

废旧机电产品再制造

质量控制理论与方法

姜兴宇 李丽 乔赫廷 等著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

废旧机电产品再制造 质量控制理论与方法

姜兴宇 李 丽 乔赫廷
王 蔚 张 凯 任会之 著
王 松 柳 青 金嘉琦



机械工业出版社

本书以废旧机床再制造过程为例，重点对废旧机电产品的可再制造质量评估、废旧机电产品的质量设计、废旧机电产品再制造过程质量控制方法等进行深入研究，从而形成面向废旧机电产品再制造全过程的质量控制理论与方法。这对于提高再制造产品质量、降低再制造成本、提高再制造系统稳定性及对于我国大力发展再制造工程都具有重要的实际意义。

本书共分为 6 章，主要内容包括再制造概述、废旧机电产品再制造过程质量模型、废旧零部件的可再制造质量评估与决策、基于 TRIZ 与可拓理论的再制造质量设计、基于二级实例推理的再制造工艺决策方法、废旧零部件再制造过程智能质量控制方法。

本书可供从事再制造及绿色设计、再制造工艺研究的科技人员和院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

废旧机电产品再制造质量控制理论与方法/姜兴宇等著. —北京：机械工业出版社，2018. 2

ISBN 978-7-111-59103-0

I. ①废… II. ①姜… III. ①机械工厂 - 生产管理 IV. ①TH186

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 023429 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：沈 红 责任编辑：沈 红

责任校对：郑 婕 封面设计：张 静

责任印制：常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 9.75 印张 · 191 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-59103-0

定价：89.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010 - 88361066

机 工 官 网：www. cmpbook. com

读者购书热线：010 - 68326294

机 工 官 博：weibo. com/cmp1952

010 - 88379203

金 书 网：www. golden - book. com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www. cmpedu. com

前　　言

我国作为制造大国，机电产品保有量巨大，而再制造是机电产品资源化循环利用的最佳途径之一。目前，我国的再制造产业已初具规模，但还未规范化，且没有大规模地展开，也远未达到预期的市场前景。其原因固然很多，但不可否认，再制造的生产运作具有相当难度，且再制造技术的瓶颈是主要原因；而再制造产品质量更是制约再制造企业生存发展的重要因素。再制造产品质量的控制已成为再制造企业面临的核心问题之一，直接影响产品的销售和经济效益，质量优异的再制造产品可以凭借较低的价格优势占领用户市场，实现企业的赢利，并最大化地实现资源的循环使用、回收率及环保。因此，深入研究废旧机电产品的再制造过程质量的形成规律，构建废旧机电产品的再制造过程质量模型，并在此基础上解决复杂的、高度不确定的废旧机电产品的再制造质量控制问题，已经成为我国发展再制造工程并推进其产业化发展、构建循环经济和建设节约型社会的亟待解决的问题。

而相对于传统产品制造过程的质量控制，废旧产品再制造的毛坯是废旧零部件，其原始质量和服役工况直接决定了再制造的可行性。由于废旧件的原始质量存在较大差异，服役工况也各不相同，从而使废旧件质量具有高度的不确定性，且传统的质量管理与控制方法已很难适应再制造系统过程。基于此，本书在《中国制造 2025 专项——绿色制造系统集成项目》、国家自然科学基金（No. 51305279）和辽宁省优秀人才支持计划（No. LJQ2015078）资助下，以废旧机床再制造过程为例，重点对废旧机电产品的可再制造性评估、废旧机电产品的质量设计、废旧机电产品再制造过程质量控制方法等进行了深入研究，提出了面向废旧机电产品再制造全过程的质量控制理论与方法。这对于提高再制造产品质量、降低再制造成本、提高再制造系统稳定性及对于我国大力发展再制造工程都具有重要的实际意义。

本书共分 6 章，第 1 章由姜兴宇著，第 2、第 3 章由李丽、王松、柳青著，第 4、第 5 章由乔赫廷、王松、柳青著，第 6 章由王蔚、张凯、任会之共同著，全书由姜兴宇、金嘉琦统稿。同时，宋博学、代明、胡东波等研究生在收集资料、整理书稿方面做了大量的工作。

本书在编写过程中参考和借鉴了不少国内外的相关文献，在此谨向文献作者表示深深的谢意！特别感谢沈阳精新再制造有限公司王松总经理、徐芳副总经理和柳青工程师为本书提供了大量再制造实例、工程数据和鼎力支持。同时，感谢东北

IV 废旧机电产品再制造质量控制理论与方法

大学于天彪教授对本书提出的宝贵意见和悉心指导，感谢沈阳工业大学王世杰教授、金嘉琦教授和张新敏教授对本书出版的大力支持。

由于废旧机电产品再制造过程复杂，且涉及多学科交叉与融合，本书中还有许多内容尚需深入细致的研究，加之著者水平有限，书中不妥之处，敬请读者批评指正。

著 者

目 录

前 言

第1章 再制造概述	1
1.1 再制造的概念、内涵与特征	1
1.1.1 再制造的概念	1
1.1.2 再制造的内涵与特征	1
1.2 再制造的关键技术	3
1.3 再制造的国内、外研究现状	4
1.3.1 国内、外再制造产业的现状	4
1.3.2 国内、外再制造相关研究现状	8
1.3.3 废旧机电产品的再制造质量控制方法的研究进展	10
参考文献	12
第2章 废旧机电产品再制造过程质量模型	16
2.1 废旧机电产品再制造流程	16
2.1.1 鉴定回收阶段	16
2.1.2 拆卸阶段	18
2.1.3 清洗阶段	18
2.1.4 检测评估阶段	18
2.1.5 再设计阶段	19
2.1.6 再制造阶段	19
2.1.7 再装配阶段	20
2.1.8 销售服务阶段	21
2.2 废旧机电产品再制造质量形成过程	21
2.2.1 传统质量形成过程分析	21
2.2.2 再制造质量形成过程	22
2.3 废旧机电产品再制造质量影响因素	24
2.4 再制造质量的内涵	27
2.5 废旧机电产品再制造全过程质量模型	29
参考文献	30

第3章 废旧零部件的可再制造质量评估与决策	32
3.1 废旧零部件可再制造质量问题分析	32
3.1.1 废旧零部件质量属性分析	33
3.1.2 废旧零部件再制造质量等级决策问题分析	33
3.2 废旧零部件的可再制造质量评估与决策方法	33
3.2.1 建立废旧零部件再制造质量等级综合评价物元模型	34
3.2.2 废旧零部件再制造质量等级论域划分	34
3.2.3 确定废旧零部件质量特征的权重	36
3.2.4 确定废旧零部件质量特征与再制造等级的关联函数与关联度	37
3.3 实例分析	37
3.3.1 确定废旧导轨各再制造质量等级的阈值	38
3.3.2 废旧机床导轨测量	39
3.3.3 废旧导轨的可再制造质量决策	40
参考文献	43
第4章 基于TRIZ与可拓理论的再制造质量设计	45
4.1 废旧机电产品再制造设计概述	45
4.1.1 废旧机电产品再制造设计基本流程	45
4.1.2 废旧机电产品再制造设计关键技术	47
4.2 面向用户满意度的废旧机电产品再制造设计质量参数规划	49
4.2.1 废旧机电产品再制造设计质量参数决策框架	49
4.2.2 用户需求与再制造设计质量参数关系分析	49
4.2.3 改进的再制造设计质量参数规划方程	54
4.2.4 实例分析	55
4.3 基于可拓发散树与TRIZ的废旧机电产品再制造质量设计	63
4.3.1 废旧机电产品的再制造设计冲突	63
4.3.2 设计冲突消解方法分析	66
4.3.3 基于可拓发散树与TRIZ的再制造设计冲突消解方法	72
4.3.4 实例分析	78
参考文献	84
第5章 基于二级实例推理的再制造工艺决策方法	89
5.1 废旧机电产品再制造工艺决策	89
5.1.1 再制造工艺决策的内涵	89
5.1.2 再制造工艺决策关键因素分析	90
5.2 废旧机电产品再制造工艺决策问题分析	91
5.2.1 再制造工艺决策面临的困难	91

5.2.2 再制造工艺决策亟待解决的问题	93
5.3 基于二级实例推理的再制造工艺决策方法	94
5.3.1 实例推理	94
5.3.2 基于二级实例推理的工艺决策框架	96
5.4 实例分析	99
参考文献	103
第6章 废旧零部件再制造过程智能质量控制方法	104
6.1 废旧机电产品再制造过程质量分析	104
6.1.1 再制造过程质量不确定性的原因	104
6.1.2 再制造过程质量分析	105
6.2 废旧机电产品再制造过程质量控制的关键问题	106
6.2.1 再制造过程质量控制的关键问题	106
6.2.2 再制造过程质量监控理论综述	106
6.3 基于动态、非正态的 EWMA 控制图的再制造过程质量监控模型	107
6.3.1 面向动态、多元非正态分布的再制造过程质量监控流程	107
6.3.2 与分布无关的非参多元 EWMA 控制图的构建	108
6.3.3 面向动态、多元非正态分布的再制造过程质量 EWMA 控制图的构建	110
6.3.4 实例分析	113
6.4 基于改进 PCA 的废旧机电产品再制造过程异常识别	117
6.4.1 废旧机电产品再制造过程质量异常分析	117
6.4.2 基于改进 PCA 的再制造过程质量异常识别	119
6.4.3 实例分析	124
6.5 基于粗糙集的再制造过程质量异常诊断与调整系统	126
6.5.1 再制造过程质量诊断	126
6.5.2 基于粗糙集的再制造过程质量异常诊断	129
6.5.3 基于专家系统的再制造过程质量异常调整	137
6.5.4 实例分析	140
参考文献	144

第1章 再制造概述

1.1 再制造的概念、内涵与特征

1.1.1 再制造的概念

再制造是循环经济、再利用的高级形式，是绿色制造技术研究领域的学术热点之一，受到了国内、外学术界和业界的广泛关注。国内外的一些学者对再制造做出定义，并对其内涵和特征进行了阐述。

1984年，再制造研究的先驱、美国波士顿大学制造工程学教授 Robert T. Lund 首次在世界上提出了“再制造”（Remanufacture）概念，将其定义为：“再制造是将耗损的耐用产品恢复到既能用又经济，经过拆卸分解、清洗检查、整修加工、重新装配、调整测试的全生产过程^[1]。”

Guide JR 博士的定义为：“将一个旧产品恢复到‘新’状态，使其具有和原产品一样的使用性能和寿命，这样的过程叫再制造”^[2]。

我国学术界普遍采用的定义是：“以产品全生命周期设计和管理为指导，以优质、高效、节能、节材、环保为准则，以先进技术和产业化生产为手段，来修复改造废旧产品的一系列技术措施或工程活动的总称。”

1.1.2 再制造的内涵与特征

再制造将废旧产品作为起点，其生产流程不同于传统制造，增加了废旧产品的回收、拆解、清洗、废旧零部件质量检测及寿命评估、再制造加工、再装配等工序。再制造是把没有损坏的零件继续使用，把局部损坏的零件采用先进的表面工程技术等手段进行再制造加工后继续使用，并针对不同的失效原因采用相应的措施使其寿命延长，挖掘废旧产品潜藏的价值。

再制造的出现，完善了全寿命周期的内涵，使得产品在全寿命周期的结尾，即报废阶段，不再“一扔了之”成为固体垃圾。再制造不仅可使废旧产品获得新生，还可很好地解决资本节约和环境污染问题。因此，再制造是对产品全寿命周期的延伸和拓展，赋予了废旧产品新的寿命，形成了产品的多寿命周期循环。

随着数控化、自动化、绿色化、信息化等高新技术的不断发展，以及市场竞争的不断加剧，再制造的内涵也应与时俱进，即由“与新产品一样好的再制造”（as

good as new) 逐渐上升到“区别于新产品、有竞争力的再制造”，才能更好地适应多样化、个性化的客户需求及快速多变的市场。

再制造的重要特征是：再制造产品的质量和性能不低于原型新品，成本为新品的 50%、节能 60%、节材 70%，对环境的不良影响显著降低^[3]。再制造可以实现废旧产品或零部件的循环利用，有效缓解资源短缺和废弃产品对环境的污染问题，是我国加快发展循环经济及建设节约型社会的有效途径。

再制造与传统的维修、翻新不同，在对象、技术手段、产品质量等方面具有显著区别（见表 1-1）。

表 1-1 再制造与维修、翻新的区别

项目	再制造	维修	翻新
对象	废旧产品	故障产品	废旧产品
过程	完全拆卸	故障诊断	部分拆卸
	清洗所有部件	故障部件拆卸	部分清洗
	零件分类与检测 整机再设计	故障部件修理 或更换新零件	检测
	废旧零部件再加工 或更换新零件	零件重新安装	旧件翻新处理 或更换新零件
	产品再装配		零件重新安装
特点	达到甚至超过原新品的性能	恢复到故障前状态	基本达到原机标准
	产业化、规模化	单件、小批量零件维修	小批量翻新
	执行最新技术标准	保持原有技术标准	无法达到新品标准
	整机质量担保	维修部分质量担保	

(1) 维修 对象是有故障的产品，在产品的使用阶段使其恢复良好的状况和使用功能，多以换件为主，辅以单个或小批量的零部件修复，常具有随机性、原位性和应急性。维修的设备和技术一般相对落后，而且难以形成批量生产；维修后的产品多数在质量、性能上难以达到原机新品的水平。

(2) 翻新 对象是废旧的产品，仅是经过一定程度的拆解、清洗、检测、翻新处理和再装配等过程，没有应用高新技术对废旧产品进行性能提升，因此在技术水平上和产品质量上都无法达到新品的标准。

(3) 再制造 对象是废旧的产品，经过完全拆卸、清洗、分类、检测、评估后，根据客户的需求进行再设计，将有较高剩余附加值的零部件作为再制造毛坯，利用先进的表面工程技术，经数控化、自动化等高新技术对其进行产业化的再制造，使其性能升级，达到甚至超过原新品的性能，且执行新产品的验收标准。

此外，再制造是规模化的生产模式，它有利于实现自动化和产品的在线质量监控，有利于降低成本、降低资源和能源消耗及减少环境污染，还能以最小的投入获得最大的经济效益。

1.2 再制造的关键技术

再制造技术是实现再制造产业化的重要支撑，是一个国家再制造业核心竞争力所在，因此国内外对再制造关键技术的研发高度重视。欧美国家的再制造已经形成了巨大的产业，2005年全球再制造业产值已超过1000亿美元，美国的再制造产业规模最大，已达到750亿美元，其中汽车和工程机械再制造占2/3以上，约500亿美元。

目前，欧、美、日等发达国家和地区的再制造技术已基本成熟，主要体现在两个方面：

1) 再制造设计：针对重要设计要素进行研究，如拆卸性能、零件材料种类、设计结构与紧固方式等。

2) 再制造加工：对于机械产品，主要通过换件修理法和尺寸修理法来恢复零部件的性能^[4]。

从现有的国内、外文献与专利报道来看，大多数再制造技术是在原创技术基础上结合再制造产品的特点和要求，经过改进和调整的衍生技术。兼顾各类技术的重要性和典型性，主要有11项国内、外重点研究的再制造技术，包括激光熔覆、等离子熔覆、堆焊熔覆、感应熔覆、高速电弧喷涂、等离子喷涂、火焰喷涂、纳米复合电刷镀、表面喷丸强化、超声清洗、无损检测等技术。其中，修复成形与加工技术又可分为熔覆层、涂层和镀层三大类^[5]。

面向2030年，再制造发展在技术层面将满足更高的要求，再制造技术呈现五大发展趋势：“绿色、优质、高效、智能、服务”^[6]。未来将要重点发展的再制造关键技术主要包括六个方面：再制造设计技术、再制造系统规划技术、再制造拆卸与清洗技术、再制造损伤评价与寿命评估技术、再制造成形加工技术、再制造标准体系技术等（见图1-1）。

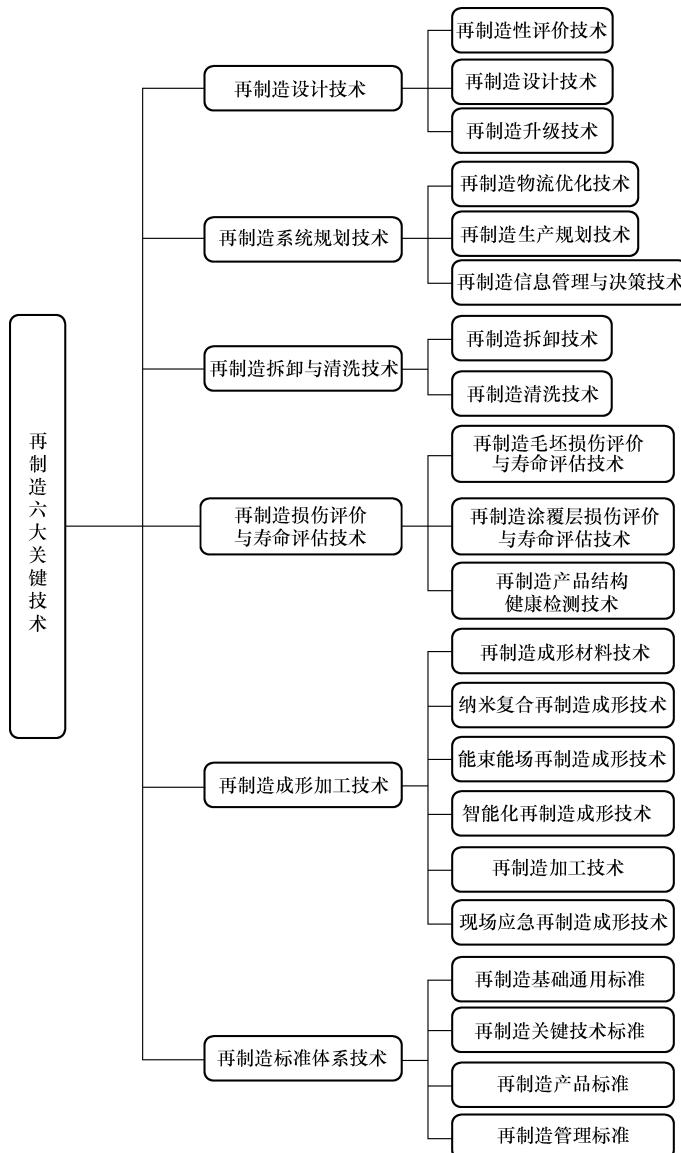


图 1-1 未来重点发展的六大关键再制造技术

1.3 再制造的国内、外研究现状

1.3.1 国内、外再制造产业的现状

1. 国外再制造产业现状

在欧美发达国家，再制造产业从 20 世纪 80 年代便已逐渐兴起，再制造产业已

具有较为完善的产业链体系，再制造产品的民众接受程度较高，因此其具有较为广阔的市场前景。此外，再制造产品的产值占比在发达国家中所占的比例同样较高，也体现出再制造对废弃资源具有较高的重用率。随着再制造研究的不断深入及其产业化的不断推进，国际上再制造的产品或零件已包括机床、医疗设备、复印机、汽车零件、计算机、办公家具、飞机、航空设备、电话设备和轮胎等。

2010年以来，美、欧、日等发达国家和地区相继制订了“再制造业化”的国家战略，不是要实现传统制造业的简单再回归，而是要进一步增强自己在传统制造业优势环节的竞争，尤其是创造出更高端的、具有更高附加值的新兴产业，抢占21世纪先进制造业的制高点，从而能够快速增强国内实体经济的实力。

(1) 美国的再制造研究 在国外再制造理论发展方面，美国走在欧美各发达国家的前列。1984年，Robert T. Lund 在世界银行的资助下完成了报告《再制造：美国的经验及对发展中国家的启示》，重点研究了绿色再制造产业的经济管理和市场导向问题，既总结了美国在绿色再制造方面的已有经验，又极大地推动了世界范围内绿色再制造产业的蓬勃发展。1996年，Robert T. Lund 主持了对美国再制造业的深入调研，发布报告《再制造业：潜在的巨人》，调查范围涉及汽车、压缩机、电器、机械制造、办公设备、轮胎、墨盒、阀门8个工业领域，建立了包含9903个再制造公司的庞大数据库。

作为全球再制造产业规模最大的美国，产业规模达1000亿美元，其中汽车和工程机械再制造占2/3以上。再制造企业有近7.5万家，从业人数约50万人。美国有300多家专业从事机床再制造的企业，对大型多功能机、齿轮加工机、金属切削机床等不同的机床产品进行了专业化的分类，都有专业公司负责再制造，并提供售后服务及质量保证。

20世纪70年代初，工程机械行业元老级企业美国卡特彼勒公司开始涉足再制造领域，迄今为止开展再制造业务40多年，并在全球已建立了17座再制造工厂，拥有了完善的全球旧件回收系统和再制造产品销售系统，产品包括发动机、变速器、驱动桥、液压零部件、电子控制单元等。每年回收处理200万个旧件，再制造回收处理8万t材料，已发展成为全球最大的再制造企业。

美军也高度重视再制造，制订了2010年国防工业制造技术框架，将武器系统的再制造列为国防重要研究领域。美军是再制造的最大受益者，既重视再制造的应用，也重视再制造相关技术的研究。其车辆和武器装备大量使用了再制造零部件，不仅节约了军费、资源和能源，而且还大大延长了武器装备的使用寿命。

(2) 日本的再制造研究 20世纪90年代，日本提出了“环境立国”口号，并逐步建立了一套有利于发展循环经济、建立循环型社会的法律体系，大力发展战略性新兴产业。日本的再制造产业主要集中于汽车再制造、电子机械再制造领域。

近年来，日本加强了对工程机械的再制造，到2008年在再制造的工程机械中，58%由日本国内用户使用，34%出口到国外，其余的8%拆解后作为配件出售。故

在生活中经常可以碰到含有再制造零件的产品，大到汽车，小到手机。日本消费者对再制造产品并不排斥，而且再制造还是环保的代称。

日本拥有占世界 1/10 的汽车，每年都有 500 万辆以上报废。日本 JRC 株式会社是日本最大的汽车零部件再制造企业，在东京和大阪地区有数家分支机构。该企业 2008 年总产值 600 多亿日元（约合人民币 45 亿元），其产品涵盖发动机、转向器、变速器、转向泵、底盘、制动器等多个类别，仅转向器、转向泵的再制造年产量就在 50 万台以上。

日本机床制造业也打破传统的维修老旧机床的观念，通过再制造实现机床现代化。主要以本地制造的机床为再制造对象，大概占所有再制造机床总数的 63%。据统计，日本从事机床再制造并具有一定规模的企业有 20 多家，如大隈工程公司、冈三机械公司、千代田工机公司、野崎工程公司、滨田工机公司和山本工程公司等。

如富士施乐公司，在日本全国建立了 50 个废弃旧复印机回收点，废旧复印机的零件循环利用率达到 50% 以上，拥有旧零部件的复印机产量达到总产量的 25%，而且通过再制造生产的复印机质量丝毫不受影响。

（3）欧洲的再制造研究 欧洲也积极推动再制造产业的发展，建立了相关的扶持法规，并制订了具体再制造行业的再制造目标。2000 年 2 月欧盟委员会规定：未来所有欧盟的汽车用户将享受免费旧车回收。从 2002 年起，废旧汽车的可再生利用率将达到 85%，到 2015 年达到 95%。欧盟还在德国建立了欧洲再制造技术中心；欧洲主要工业化国家的一些大企业都相继开展了再制造，如著名的大众、宝马、梅塞德斯汽车企业均建立了汽车拆卸试验中心。

欧洲汽车零部件再制造（APRA）协会统计显示，目前欧洲可再制造的汽车零部件包括制动器（鼓式和盘式）、空调、交流发电机、离合器、气缸盖、差速齿轮、发动机、风扇电动机、加热器鼓风机、前轴、燃油泵、喷油器、发电机、总泵、动力转向、齿轮齿条、起动机、涡轮增压器、变矩器、变速器、雨刷电动机等。

德国的汽车再制造工程产业已经达到相当高的水平，至少 90% 零部件可以得到重用或合理处理。如宝马公司已建立一套完善的回收品经营连锁店的全国性网络，并从实践中得到经验，且汽车回收工作效益很好；即用过的发动机经改造后，仅是新发动机成本的 50% ~ 80%；发动机在改造程序中，94% 被修复，5.5% 被溶化再生，只有 0.5% 被填埋处理。又如德国的大众汽车公司仅再制造原装回收发动机一项，就达 748 万台，相当于节省钢材 33.7 万 t。德国政府对机床改造及再制造非常重视，联邦政府和州政府专门拨款支持该领域的研究工作。欧洲最大的机床制造企业——德国吉特迈集团股份公司已开展机床改造服务，德国席士公司也成立了机床改造服务部。

法国的标致·雪铁龙公司联合法国废钢铁公司和维卡水泥公司，在里昂附近建

立一个汽车再生工厂；雷诺公司同法国废钢铁公司在阿蒂蒙建立了汽车报废回收中心。法国的汽车回收率，已经从前几年的 80%，提高到目前 95%。

英国在再制造产品无损检测、自适应修复和寿命评估方面开展了大量研究工作，并出版发行《Journal of Remanufacture》国际期刊。

2. 国内的再制造产业现状

随着经济快速发展、产品更新换代加快，我国废旧机电产品的数量出现爆发式增长。大量的机械装备进入报废高峰期，年报废汽车约 500 万辆；全国役龄 10 年以上的机床超过 200 万台；80% 的在役工程机械已超过质保期，30% 的盾构设备处于报废闲置状态；办公设备耗材大量更换，造成了大量的资源浪费和环境污染。经济社会发展要求再制造发挥更大作用，机械行业现状需要再制造扩大产业规模。

我国再制造产业起步较晚，经历了产业萌生、科学论证和政府推进三个阶段，目前正处于初级发展阶段。我国再制造工程实践起源于机电产品维修的产业实践探索。自 20 世纪 90 年代初开始，国内相继出现了一些企业开始探索再制造产业模式，如中国重汽集团济南复强动力有限公司、上海大众汽车有限公司的动力再制造分厂、柏科（常熟）电机有限公司、广州市花都全球自动变速箱有限公司等汽车零部件再制造企业，分别在重型卡车发动机、轿车发动机、车用电机，以及车用变速器等领域开展再制造业务探索。

再制造产业的持续稳定发展，离不开国家政策的支撑与法律法规的有效规范。我国再制造政策法规经历了一个从无到有、不断完善的过程，再制造产业的发展也逐渐走上了法制化道路。2005 年国务院颁发的《国务院关于做好建设节约型社会近期重点工作通知》和《国务院关于加快发展循环经济的若干意见》中首次提出支持废旧机电产品再制造。2008 年《中华人民共和国循环经济促进法》明确提出再制造的含义、适用范围等，由此再制造产业发展进入法制化轨道。2010 年，11 个部门联合发布《关于推进再制造产业发展的意见》，指导全国加快再制造的产业发展，并将再制造产业作为国家新的经济增长点予以培育。

国务院 2013 年发布的《循环经济发展战略及近期行动计划》提出，到 2015 年实现年再制造发动机 80 万台，变速器、起动机、发电机等 800 万件，工程机械、矿山机械、农用机械等 20 万台套，再制造产业年产值达 500 亿元左右。截至 2014 年底全国已有 77 家试点再制造企业，涉及再制造产品目录已涵盖工程机械、电动机、办公设备、石油机械、机床、矿山机械、内燃机、轨道车辆、汽车零部件等 9 大类 97 种产品。2015 年 5 月，国务院正式印发了《中国制造 2025》，这是第一次从国家战略层面描绘建设制造强国的宏伟蓝图，其中重点提出了实施包括绿色制造在内的 5 大工程。

总体来看，我国再制造产业发展速度较快，且已经成为世界的再制造中心之一。但与发达国家和地区比，我国再制造企业数量少而弱，产业规模不大，整体技术水平不高，共性和关键技术研发滞后，同时面临市场认知度不高、政策法规、逆

向物流体系不健全等一系列阻碍和挑战，再制造发展之路任重道远。

1.3.2 国内、外再制造相关研究现状

由于再制造具有广阔的市场前景，国内、外学术界和工业界在其生产运营方式、关键技术、管理模式、产业化等方面进行了大量研究。综合国内、外再制造的研究进展，再制造的研究主要集中在以下三个方面：再制造技术、再制造产业化发展与管理策略、再制造评价。

1. 再制造技术

再制造技术主要指通过研究先进的再制造技术手段及工艺、再设计方法，使再制造的产品性能得到充分的保证。

美国罗切斯特理工学院（RIT）成立了专门从事再制造工程研究的全国再制造和资源恢复中心（NC3R），其任务是为产业界提供先进的再制造技术和手段，提高再制造效率，降低再制造成本。该中心在废旧产品失效特性分析、剩余寿命评估、再制造质量检测、面向再制造的可持续性设计、逆向物流等方面展开了研究，并开发了相关的支持工具或软件^[7]。

美国田纳西大学无污染产品和技术研究中心对汽车行业的再制造技术进行了研究。通用汽车公司的土星部与田纳西大学合作，开发了一个汽车再制造软件，该软件从汽车制造到销毁，跟踪汽车所有零部件对能源和环境的影响，以指导技术人员工作和检验回收效果。

在再制造技术创新发展方面，我国以徐滨士院士为首的一批专家学者已经将热喷涂、激光表面处理、堆焊等表面工程技术用于再制造^[8-10]，并应用于汽车和机床等废旧零部件的再制造。目前，我国已形成了自主创新的、具有特色的再制造技术，即以先进的寿命评估技术、纳米表面工程和自动化表面工程技术为支撑，基于尺寸恢复及表面性能提升的“再制造成形技术”，并向自动化、智能化、复合化方向发展。但总体技术和设备配套不完善，技术发展不均衡，还不能支撑产业的发展。

另外，再设计是再制造的关键技术之一，通过应用先进的技术和设计方法，再次赋予废旧产品新的功能“适用性”、性能的恢复及提升。

在国外，Bras Bert 和 Mark W. McIntosh 对再制造设计中的产品、组织、工艺等领域的研究成果进行了综述，提出了再制造设计的热点研究领域^[11]。Hatcher 等人综述了再制造设计的研究成果，并指出再制造设计的目标是提高再制造性^[12]。Brazier 等人建立了一种基于通用设计类的任务模型来实现知识系统的再设计^[13]；D. Janz 等人提出了一种提升产品全生命周期性能和优化成本的再设计方法，该方法结合了价值分析法、质量功能部署（QFD）和生命周期成本法^[14]。

在国内，朱胜、姚巨坤对再制造设计的基础理论、内容体系及应用进行了系统研究^[15]，并对再制造升级的内涵、技术体系、实施模式、设计与评价方法等进行

了系统研究^[16]；刘志峰等人对基于拆卸的再制造设计进行了研究^[17]；刘涛、刘光复等人提出了面向主动再制造的产品可持续设计框架^[18]。

国内的其他高校也纷纷对再制造的关键技术展开研究工作。如清华大学在机电产品绿色设计技术和电子电器产品的回收处理技术方面进行了研究，并与企业进行产学研合作，成立了清华至卓绿色制造研发中心；合肥工业大学长期以来对家电产品的绿色设计及回收、拆卸、再利用技术进行了多方面的研究工作；上海交通大学与美国通用、福特汽车公司合作开展了轿车的回收、拆解等再制造研究；重庆大学在废旧机床再制造评价、再设计方法、再制造工艺决策等方面取得了较多的研究成果^[19-22]，并与重庆机床集团合作开展废旧机床的再制造产业实践；武汉科技大学针对再制造的不确定性进行评价与决策研究^[23,24]等。

2. 再制造的产业化发展与管理策略

再制造作为一个蕴藏着巨大经济价值的新兴产业，已受到国内、外广泛的重视，并纷纷对再制造产业化的经验、存在的问题、发展策略等进行了研究，如研究再制造的运营模式和管理问题，以保证再制造的实施。

在国外，Boyer 描述了一种将销售、材料、生产及财务集成到再制造“毛坯”管理的技术，并通过对产品设计和工艺过程的精心规划，使再制造可以产生最大的经济和生态效益^[25]；Uzsoy R 提出了一个由一系列模型集成的模型，用来检验不同价格的结构在再制造中长期耐久性的效果和短期管理问题^[26]；Hanson 探讨了逆向物流对再制造和可持续系统的影响，并提出了规划逆向物流的原则和方法^[27]；Murayama 和 Shu 提出了一些可靠性模型，包括材料流动仿真、生产管理和再制造^[28]。

在国内，徐滨士院士对再制造产业化的进展及管理问题进行了研究^[29,30]；江志刚、张华等人从产品多生命周期延展的技术角度，对绿色再制造管理的内涵、体系结构及实施策略进行了研究^[31]；刘飞、曹华军等人提出了机床再制造与综合提升的运作流程和技术框架，并对其产业化策略进行了研究^[32]。

另外，国内外对再制造的生产模式^[33,34]进行了探索，并对再制造的各个环节的管理^[35]展开研究，包括逆向物流管理^[36,37]、设计管理^[38]、信息管理^[39]等方面，其中逆向物流管理的研究成果较多。

3. 再制造评价

再制造评价包括对废旧产品的可再制造性进行评价，以及对再制造过程进行评价。通过建模与实验建立产品性能检测与评价系统，评估再制造产品的性能、经济性、环保性及可持续性。

Lund 通过统计不同类型再制造产品的特性，总结出产品具有再制造性的七大准则^[40]：①产品具有耐用性；②产品功能性失效；③产品零部件互换性好；④产品蕴含的剩余价值高；⑤失效产品的回收成本比它的剩余价值要低；⑥产品制造技术可行；⑦消费者接受再制造产品^[40]。Guide 将再制造废旧零部件进行分类，根

据再制造工艺过程的不同将其分成了 75 种不同类型的再制造废旧零部件，并建立了这些废旧零部件的可再制造性准则^[41]。

Bras 和 Hammond 从生态、法律和经济因素等方面考虑，提出了产品可再制造性设计准则和影响产品再制造性的关键指标^[42]；Murayama 等人在可靠性理论的基础上，定义了产品的可再制造度，并建立了基于服役时间的产品可再制造度评价模型^[43]；MI Mazhar 等人从剩余寿命的角度^[44]、M Anityasari 等人从服役时间的角度^[45]对废旧零部件的可再制造性进行评价。

刘赟、徐滨士等人从技术、经济、环境的可行性三个方面对废旧产品的再制造性进行评价^[46]；毛果平等人从经济、质量、资源和环境的可行性四个方面进行废旧零部件的可再制造性评价^[47]；刘纯以废旧机床为研究对象，建立对其进行再制造修复的评价指标体系和评价模型^[48]；曾寿金等在绿色度评价方法的基础上，从技术、经济、资源、能源、环境和服役性等方面对影响机电产品再制造度的因素进行分析，建立了机电产品再制造性评估模型^[49]；张国庆等从技术性和经济性对再制造工艺过程进行分析，计算产品的可再制造性指数，并运用到汽车发动机的再制造性评价中^[50]；杨明、陈铭基于生命周期理论的评价方法，主要从能源、原材料、环境影响三个方面对汽车发动机的再制造过程进行评价^[51]；李红霞、梁工谦运用生命周期费用理论对发动机再制造的经济性进行了分析评价^[52]；蒋小利等人建立了基于实例推理的评价模型^[53]；刘清涛等人进行了面向工艺路线的废旧零部件可再制造性评价^[54]。

1.3.3 废旧机电产品的再制造质量控制方法的研究进展

综合国内、外再制造研究现状可知，再制造的研究多集中在再制造工艺、再制造工程技术、加工设备、逆向物流等方面，而作为再制造工程的核心——再制造过程中的质量控制方面的研究却相对较少^[55-61]，这也是严重制约我国再制造发展的重要因素之一。因此，开展本课题的研究，对于我国科学发展再制造具有极其重要的理论意义。

与传统制造相比，再制造是以废旧产品为起点的，由于服役时间和工况、失效形式和失效程度、剩余寿命等的不同，使得再制造系统具有高度的不确定性。Guide 归纳了再制造系统的七项不确定性^[41]：①回收时间和质量不确定；②回收与需求平衡不确定；③回收产品的拆卸不确定；④逆向物流不确定；⑤物料匹配复杂性；⑥再制造工艺路线的随机性；⑦加工时间的多变性。

由于再制造系统具有多种不确定性，这为其运营过程中的质量管理与控制提出了巨大挑战，因此传统制造模式的质量管理与控制方法已很难适应再制造系统。再制造的对象是情况复杂的废旧产品，不同的再制造产品质量具有更大的波动性，即不同的再制造产品质量可能各不相同，同一装备在不同时期进行再制造也会使得再制造产品质量有所差异。所以，废旧产品（或零件）的质量直接影响再制造系统

的性能和其产品质量，这在客观上也要求对废旧产品（或零件）进行质量检测与控制。

瑞典的 Youngseok Kim 和 Hong - Bae Jun 提出了一种嵌入质量再制造系统建模方法，以对废旧产品（或零件）进行质量控制^[62]。但该方法受到废旧品（或零件）质量特性的限制，具有一定的局限性。目前对废旧产品（或零件）质量控制研究主要集中在外部几何形状、内部质量特性的检测及再制造性的评价，基本上实现了再制造产品质量的前期控制。但由于没有考虑环保和用户需求的因素，对实际的再制造存在一定的制约。

同时，由于再制造采用的是具有不确定性性能和质量的废旧机电产品，这使再制造过程比原产品制造过程更为复杂。而在这一过程中，再制造过程质量控制是保证再制造产品质量的核心。过程质量控制是根据再制造产品的工艺要求，研究出再制造产品的波动规律，判断造成异常波动的工艺因素，并采取各种控制措施使波动保持在技术要求的范围内，其目的是使再制造过程长期处于稳定运行状态。然而废旧品再制造性具有高度的不确定性，如再制造产品需要经过加工、改进等环节才能使用，并不能立即满足某些需要，这一系列过程需要较长的时间，即加工时间的高度不确定性。这些致使影响再制造产品质量的因素大大增多，极大地增加了工序质量控制的难度。

西北工业大学的张晶、梁工谦提出对于多工序、多指标的生产模式运用 T2 控制图的方法进行质量控制，该方法对检测数据做标准变换创造出利用休哈特控制图的条件，从而利用 T2 控制图结合相关的统计方法实现多元控制图的诊断，提高了再制造产品质量^[63]。但该方法对再制造过程质量的诊断缺乏智能性、自适应性，很难实现实时的动态过程质量控制和预测。这也源自传统的过程质量控制方法，即通过序后生产检验和质量统计报表等形式进行静态质量管理和控制^[64,65]，且没有实现实时的动态生产质量控制和质量预测，其控制效果和效益受到很大限制，从而也影响了再制造产品的最终质量。因此，如何加强过程质量控制，提高再制造的生产效率成为再制造急需解决的一大难题。

另外，在再制造产品质量管理与控制过程中，再制造产品质量评价是提高和改进再制造产品质量的重要手段。再制造产品质量的形成涉及废旧产品的回收、拆解、清洗、检测、再制造加工、组装、检验、包装直至再制造产品出厂等一系列的过程。因此，再制造产品质量评价应贯穿于产品全生命周期的整个过程，针对一定的质量目标，在相应的产品集成信息、评价技术方法及人员组织保证的支持下，就产品质量的技术性、经济性、市场性等方面所进行的系统性评价活动^[66]。

西安建筑科技大学的李菲、沈虹提出基于质量功能配置（QFD）方法将产品再制造质量特性与用户满意度相结合，构建了产品再制造质量特性评价质量屋，以此评价出相对重要的质量特性，在满足用户需求的基础上为确定再制造产品“质量突破特性”和提高再制造产品质量提供了数据参考^[67]。该方法由于在再制造环

境下, 原料返回在时间和质量上的不确定性、材料的不确定性、再制造加工路线和加工时间的不确定性、生产计划和控制的动态性, 很难解决这种动态性质量评价问题, 因此本项目通过构建基于再制造过程的动态质量评价模型, 采用动态性的评价方法来实现再制造产品质量评价, 从而实现再制造产品质量的持续改进。

参 考 文 献

- [1] Robert T. Lund. Remanufacturing: the experience of the USA and implications for the developing countries [R]. World Bank Technical Papers, 1984.
- [2] Guide Jr, V D R, Srivastava R. An evaluation of order release strategies in a remanufacturing environment [J]. Computer Operations Research, 1997, 24 (1): 37 - 47.
- [3] 徐滨士. 绿色再制造工程及其在我国的应用前景 [R]. 北京: 中国工程院咨询报告, 2000.
- [4] 徐滨士. 绿色再制造工程的进展 [J]. 中国表面工程, 2001 (2): 1 - 5.
- [5] 张伟, 吉小超, 魏敏, 等. 国内外再制造技术体系及竞争力分析 [J]. 中国表面工程, 2017, 27 (3): 1 - 9.
- [6] 中国机械工程学会再制造工程分会. 再制造技术路线图 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2016.
- [7] The National Center for Remanufacturing and Resource Recovery (NC3R) at the Rochester Institute of Technology Mission Statement [EB/OL]. 2009 - 09 - 20. <http://www.reman.rit.edu/>.
- [8] 徐滨士, 董世运, 朱胜, 等. 再制造成形技术发展及展望 [J]. 机械工程学报, 2012, 48 (15): 96 - 105.
- [9] 赵江涛, 朱胜. 再制造工程中的反求技术 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2003, 17 (1): 15 - 17.
- [10] 储洪胜, 宋士吉. 反向物流及再制造技术的研究现状和发展趋势 [J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10 (1): 10 - 14.
- [11] Bert Bras, Mark W. McIntosh. Product, process, and organizational design for remanufacture: an overview of research [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 1999 (15): 167 - 178.
- [12] Hatcher GD, Ijomah WL, Windmill JFC. Design for remanufacture: a literature review and future research needs [J]. Journal of Cleaner Production, 2011 (19): 2004 - 2014.
- [13] Frances M T Brazier, Pieter H G van Langen, Jan Treur, et al. Redesign and reuse in compositional knowledge - based systems [J]. Knowledge - Based Systems, 1996 (9): 105 - 118.
- [14] D Janz, W Sihn, H J Warnecke. Product redesign using value - oriented life cycle costing [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005, 54 (1): 9 - 12.
- [15] 朱胜, 姚巨坤. 再制造设计理论及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [16] 朱胜, 姚巨坤. 再制造升级 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [17] 刘志峰, 柯庆镝, 宋守许, 等. 基于拆卸分析的再制造设计研究 [J]. 数字制造科学, 2008, 6 (1): 39 - 56.
- [18] 刘涛, 刘光复, 宋守许, 等. 面向主动再制造的产品可持续设计框架 [J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17 (11): 2317 - 2323.

- [19] 杜彦斌. 退役机床再制造评价与再设计方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [20] 曹华军, 王本涛, 刘飞, 等. 再制造工艺过程二阶优化决策方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16 (5): 936–941.
- [21] 李聪波, 李玲玲, 曹华军, 等. 废旧零部件不确定性再制造工艺时间的模糊学习系统 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (15): 137–146.
- [22] 李成川, 李聪波, 曹华军. 基于 GERT 图的废旧零部件不确定性再制造工艺路线模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18 (2): 298–305.
- [23] 张旭刚, 张华, 江志刚. 基于剩余使用寿命评估的再制造方案决策模型及应用 [J]. 机械工程学报, 2013, 49, (7): 51–57.
- [24] 江志刚, 蒋小利, 张旭刚, 等. 基于协同效应的再制造工艺技术决策模型及应用 [J]. 机械设计与制造, 2013 (1): 58–60.
- [25] Boyer J. A proven technique for planning and executing core control in a remanufacturing industry [A]. New Orleans, VA: APICS, 1990: 666–669.
- [26] Uzoy R. Production planning for companies with product recovery and remanufacturing capability [C]//IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, New York: IEEE, 2002: 285–290.
- [27] Hanson Uwe. Reverse logistic is the key for remanufacturing and a sustainable development [C]// Electronics and the Environment, IEEE 2000, Proceedings of the 2000 IEEE international Symposium on, 2000: 338–242.
- [28] T Murayama, LH Shu. Treatment of Reliability for Reuse and Remanufacture [C]//Ecodesign: Second International Symposium on Environmental Conscious Design & Reverse Manufacturing, 2001: 287–292.
- [29] 徐滨士. 中国再制造工程及进展 [J]. 中国表面工程, 2010, 23 (2): 1–6.
- [30] 徐滨士, 史佩京, 刘渤海, 等. 再制造产业化的工程管理问题研究 [J]. 中国表面工程, 2012, 25 (6): 107–111.
- [31] 江志刚, 张华, 曹华军. 绿色再制造管理的体系结构及其实施策略 [J]. 中国机械工程, 2006, 17 (24): 2573–2576.
- [32] 刘飞, 曹华军, 杜彦斌. 机床再制造技术框架及产业化策略研究 [J]. 中国表面工程, 2006, 19 (5+): 25–28.
- [33] 鹿红娟, 郭伟, 邵宏宇. 基于博弈论的再制造生产模式的研究 [J]. 2011, 47 (20): 18–22.
- [34] 谢家平, 赵忠, 孔令丞, 等. 再制造生产计划的影响因素及其模式 [J]. 系统工程, 2007, 25 (7): 53–59.
- [35] Klausner M, Hendrickson C. Reverse logistics strategy for product take-back [J]. Interfaces, 2000, 30 (3): 156–165.
- [36] 夏绪辉, 刘飞. 逆向供应链物流的内涵及研究发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2005 (4): 103–109.
- [37] 姚巨坤, 朱胜, 崔培枝. 再制造管理—产品多生命周期管理的重要环节 [J]. 科学技术与工程, 2003 (04): 375–378.

- [38] 吴小艳. 绿色再制造设计管理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [39] 王瑜. 再制造信息管理多色集合建模研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
- [40] Robot T. Lund. The remanufacturing industry—hidden giant [M]. Boston: Boston University Press, 1996.
- [41] V Daniel R, Guide Jr. Production Planning and Control for Remanufacturing: Industry Practice and Research Needs [J]. Journal of Operations Management, 2000, 18 (4): 467 – 483.
- [42] Bras B, Hammond R. Towards design for remanufacturing metrics for assessing remanufacturability [C]//Proceedings of the 1st International Workshop on Reuse, Eindhoven, The Netherlands, 1996: 5 – 22.
- [43] Murayama T, Yamamoto S, Oba F. Mathematical model of reusability [C]//In Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Electronics and the environment, Phoenix (Arizona, USA), 2004: 183 – 188.
- [44] MI Mazhar, S Kara, H Kaebernick. Reuse potential of used parts in consumer products: assessment with weibull analysis [J]. Production Engineering and Computers, 2004, 6 (7): 113 – 118.
- [45] M Anityasari, H Kaebernick. A concept of reliability evaluation for reuse and remanufacturing [J]. International Journal of Sustainable Manufacturing, 2008, 1 (1): 3 – 17.
- [46] 刘赟, 徐滨士, 史佩京, 等. 废旧产品再制造性评估指标 [J]. 中国表面工程, 2011, 24 (5): 94 – 99.
- [47] 毛果平, 朱有为, 吴超, 等. 废旧机电产品再制造性评估模型研究 [J]. 现代制造工程, 2009 (6): 114 – 118.
- [48] 刘纯. 废旧机床再制造综合测试与评价技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [49] 曾寿金, 江吉彬, 许明三, 等. 机电产品再制造特性评价模型研究 [J]. 福建工程学院学报, 2009, 7 (3): 271 – 274.
- [50] 张国庆, 荆学东, 浦耿强, 等. 产品可再制造性评价方法与模型 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39 (9): 1431 – 1436.
- [51] 杨明, 陈铭. 再制造发动机全生命周期评估 [J]. 机械设计, 2006, 23 (3): 8 – 10.
- [52] 李红霞, 梁工谦. 再制造发动机生命周期费用分析 [J]. 现代制造工程, 2006, (11): 77 – 79.
- [53] 蒋小利, 江志刚, 张华, 等. 基于实例推理的废旧零部件可再制造性评价模型及应用 [J]. 现代制造工程, 2013 (12): 6 – 9.
- [54] 刘清涛, 蔡宗琰, 刘晓婷, 等. 面向工艺路线的废旧零部件可再制造性评价 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32 (3): 105 – 110.
- [55] 刘明周, 赵志彪, 凌先姣. 基于最短路径的复杂机械产品装配过程质量控制点公差带在线优化方法 [J]. 机械工程学报, 2012, 48 (10): 173 – 177.
- [56] M Ferguson, VDG Jr, E Koca, et al. The Value of Quality Grading in Remanufacturing [J]. Production & Operations Management, 2009, 18 (3): 300 – 314.
- [57] Meltem Denizel, Mark Ferguson, Gilvan Gil C. Multi-period Remanufacturing Planning With Uncertain Quality of Inputs [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2010, 57 (3):

394 – 404.

- [58] 姚巨坤, 杨俊娥, 朱胜. 废旧产品再制造质量控制研究 [J]. 中国表面工程, 2006, 19 (5): 115 – 117.
- [59] 李娟, 梁工谦. 再制造质量信息割裂研究 [J]. 机床与液压, 2012, 40 (3): 8 – 10.
- [60] 陈翔宇. 装备再制造质量控制及其经济评价 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [61] 孙志军. 复杂机械产品再制造过程质量管控策略研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [62] Youngseok Kim, Hong – Bae Jun, Dimitris Kiritsis, et al. A Methodology for Modeling a Quality Embedded Remanufacturing System [C]//International Federation for Information Processing, Advances in Production Management Systems, 2007 (246): 281 – 288.
- [63] 张晶, 梁工谦. 面向再制造的休哈特控制图分析 [J]. 机床与液压, 2009, 137 (16): 19 – 21.
- [64] 姜兴宇, 于天彪, 王宛山. 基于顾客满意的个性化定制质量保证体系研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14 (8): 1608 – 1615.
- [65] 姜兴宇, 王世杰, 赵凯, 等. 面向网络化制造的智能工序质量控制系统 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (4): 186 – 194.
- [66] 姜兴宇, 王贵和, 王宛山. 面向全生命周期的产品质量综合评价方法研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20 (20): 5581 – 5584.
- [67] 李菲, 沈虹. 面向再制造的产品质量特性评价方法 [J]. 现代制造工程, 2008 (11): 99 – 102.

第2章 废旧机电产品再制造过程质量模型

机电设备经过长期运行使用，会不断磨损、老化，生产效率、安全性、可靠性不断下降，进而不能继续使用，称为机电设备的报废。过去人们只是简单地将报废的仪器设备当作废铜旧铁处理，这对于一些结构简单、功能专一的设备而言是合理的，但是随着技术发展，出现了大量组合型、智能化、综合一体的大型机电设备，其组成复杂性提高、功能加强、结构独立性增强；另外，由于机电设备的不断更新换代，大量的老旧机电设备被淘汰。这些废旧机电产品包含巨大的经济价值，即机电设备本身包含了各种零部件，报废机电设备的各种零部件有很多是可进行再制造的，创造的经济价值也非常可观。

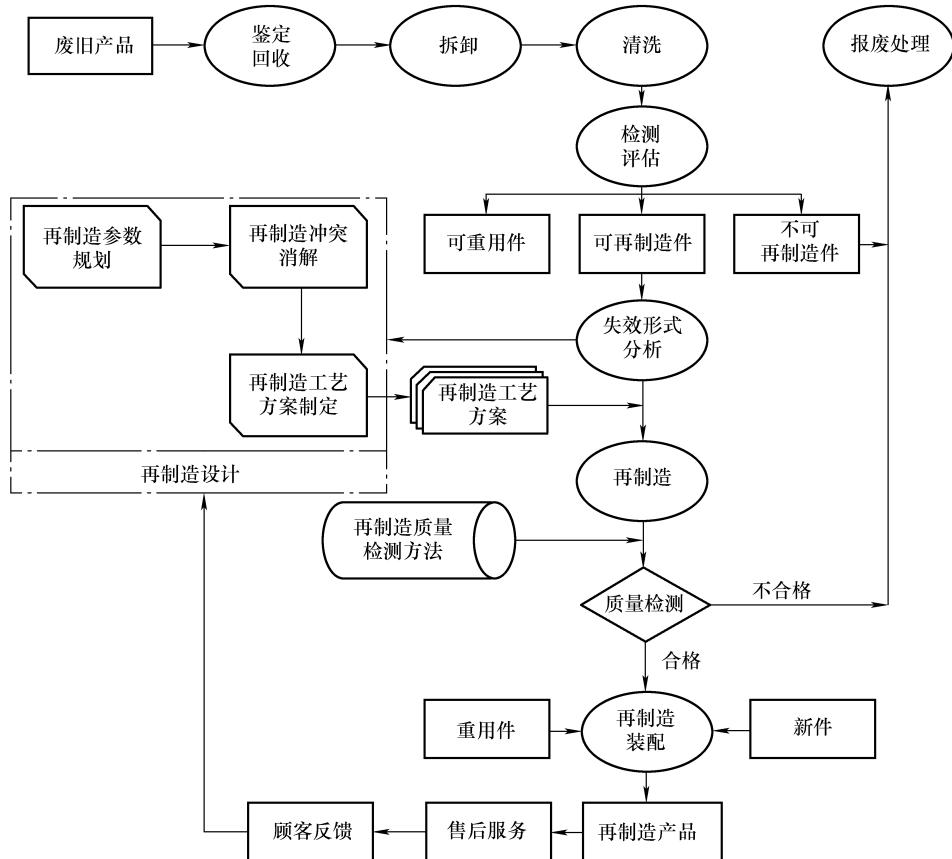
再制造产品的质量是在再制造过程中形成的，只有了解再制造产品质量形成的过程与机理，才能寻找相应的技术和手段来控制和提高再制造产品的质量，但目前关于再制造过程质量特性的形成机理还鲜有报道。因此本章深入分析废旧产品（如机床）再制造过程质量特性的形成机制，研究质量特性在再制造过程中不同阶段的质量映射、转化关系；并在此基础上，构建废旧机床的再制造过程质量模型，为后面的质量控制方法研究提供理论基础。

2.1 废旧机电产品再制造流程

再制造的毛坯件为废旧机电产品，通过先进的再制造技术恢复或提升产品的综合性能，使生命周期结束或功能失效的废旧产品重获生机。因此，废旧机电产品再制造流程与传统制造过程不同，主要分为鉴定回收、拆卸、清洗、检测评估、再设计、再制造、再装配、再销售等环节（见图 2-1）。

2.1.1 鉴定回收阶段

回收是再制造的初始环节，是通过有效的物流网络或回收渠道对报废的机电产品进行回收的活动。目前，实施报废机电产品回收制度比较好的有美国、德国、法国、日本等。美国已经能把大部分机电产品的零部件回收利用；法国政府依据环境保护和资源再生利用的理念，积极推动机电产品回收、可再生资源综合利用等政策、法规的市场化运作，并依照《个体废物处理法》有效地利用和回收了报废机电产品；日本于 2003 年 7 月通过世界上第一部关于汽车回收的法律《汽车循环利用法》，且于 2005 年 1 月 1 日起正式实施，该法律规定汽车生产厂商有义务回收报废车辆并进行再利用，汽车上几乎所有的废旧零件都可以被回收再利用。

图 2-1 废旧产品再制造流程^[6]

目前，我国废旧机电产品回收面临以下突出问题，严重制约了我国再制造产业的发展。

1) 回收法律不健全，逆向物流不完善；且大多数回收企业的规模较小，回收技术和工艺还相当落后，回收过程中产生二次污染的现象也严重。

2) 废旧机电产品回收涉及再制造商、回收商与消费者等，而各回收参与群体因从自身利益考虑，并不积极进行产品回收的合作；使得大多数再制造企业因缺少长期稳定的回收来源，存在原材料短缺问题。

3) 报废机电产品回收之后，目前能循环利用的主要还局限于废金属零部件，其他材料回收利用率并不高，如橡胶、塑料、玻璃等多作为垃圾处理，导致报废机电设备的总体利用率还较低。

根据回收主体的不同，划分为不同的回收模式，主要分为三种：再制造商回收、制造商委托零售商回收、第三方回收公司回收^[1]。目前，我国再制造产业主

要采用的是再制造企业主动回收的方式。在回收废旧机电产品之前，需要先对废旧机电产品进行鉴定，包括机械部件表面是否完好、是否存在裂痕和明显缺陷，液压、电器部分是否正常，整机能否正常运行等；进而将符合回收标准的废旧机电产品回收，然后实施再制造。

2.1.2 拆卸阶段

拆卸是去除零部件间的连接，并将零部件分离的过程。废旧产品回收后进入拆卸车间，它是再制造生产的起始阶段，为再制造生产提供所需的废旧零部件毛坯，这是非常重要的环节^[2,3]。废旧机电产品的拆卸过程要求按照装配的反向过程进行，首先将整机拆卸成部件总成，进而完全拆卸成零件，最终将零件进行检测分类^[4]。为了拆卸过程的顺利实施，需要掌握产品的技术资料、零部件结构特点、装配关系、退出方向等，如对过盈装配的部件需要大力拆卸、对热装配的零件需要加热拆卸等。对于核心部件，为防止再装配时降低加工精度，应在拆卸前对其安装位置进行标记。在拆卸过程中，不允许采用破坏性拆卸，尽量避免对零件的碰伤、拉毛甚至损坏。

2.1.3 清洗阶段

清洗是指在废旧产品拆卸后，去除零件表面油污、铁锈等所有杂质的过程。以机床为例，清洗质量是影响废旧机床再制造质量的重要因素，不良的清洗质量将会影响废旧机床零件检测质量，进而影响零件再制造质量及再制造机床质量^[4]。在废旧机床完全拆卸之后，根据零件需要采用的清洗方式及清洗溶液的不同对零件进行分类，以便于提高清洗效率。常用的清洗方式主要有加热、洗、擦、喷、刷等，废旧机床再制造行业常采用的清洗溶液包括煤油、柴油、汽油、金属清洗剂等。在清洗废旧零件过程中，要注意能源的消耗及清洗溶液对环境的污染，废旧零件在清洗之后还需要进行防锈、防腐蚀处理，避免影响废旧零件自身质量。

2.1.4 检测评估阶段

检测评估阶段是对拆卸、清洗之后的废旧零件进行质量检测和评估，是判断资源利用率、提高再制造产品质量的重要再制造流程之一^[5]。通过废旧零件检测与评估，决定废旧零件的质量属性，主要分为三个等级：可直接重用、可再制造和不可再制造件；然后据此进行分类，避免对可再制造的零件进行废弃处理，或者将不可再制造的零件进行再制造，造成资源和资金的浪费。

以机床再制造为例，检测评估主要针对废旧机械部分和电气部分进行^[7]。

机床电气部分的检测对象包括控制柜、控制面板、操控系统等。由于我国再制造机床多为服役时间长、技术落后的老旧机床，其电气部分零部件多已损坏或老化，而且按照再制造机床升级性要求，其电气部分零部件都应进行废弃处理，所以

针对电气部分零部件的评估是为了便于废旧电气部件的再处理、回收利用进行分类处理。

机械部分零部件的检测评估需要按照不同的材质、工况类型进行分类处理。对于床身、床腿等铸铁支撑部件，使用年份越长，其内部应力越小，结构更为稳定，只要没有明显裂痕或损伤都可直接重用；对于传动装置和进给装置，由于长期运转工作，大多会产生损害，需要对其进行详细检测，如废旧机床导轨需要检测其直线度、平行度、水平度及研伤和磨损程度；齿轮和轴类零件需要检测其缺陷、磨损情况并运用X射线、超声检测其内部质量是否符合要求；油箱、护板等非铸铁辅助零部件，只要不存在肉眼可见的明显缺陷，即可直接重用。

2.1.5 再设计阶段

再制造设计（简称“再设计”）是指根据再制造要求，通过运用设计方法和先进技术，对产品再制造性及再制造生产过程中的所有生产环节、技术单元和资源利用进行全面规划设计，最终形成最优化再制造方案的过程^[8]。废旧机电产品的再设计过程需要据客户对于再制造产品的性能要求、市场需求，以及废旧机电产品自身结构限制等特点进行，因此废旧机电产品的再设计过程比传统设计过程更为复杂。

再设计的目的是实现废旧机电产品再制造生命周期过程中，使再制造的各生产要素处于最优化状态，保障废旧资源的高利用率、再制造过程的高效率及再制造企业的效益。由于毛坯件（废旧零部件）的使用工况、原始质量、剩余寿命的不确定性，而且再设计过程需要综合考虑客户、市场和废旧机电产品自身结构等多方面的要求，因此再设计过程具有不确定性和多目标性等特点。

2.1.6 再制造阶段

废旧机电产品再制造是针对质量检测评估为可再修复和可再制造的零部件，运用先进的表面修复和再制造加工技术，使零部件结构尺寸、表面强度、性能要求等指标恢复或超过新零部件质量要求的生产过程，如图2-2所示。现阶段常用的表面工程技术包括激光熔覆、表面贴塑、纳米复合电刷镀、微脉冲电阻焊接技术等^[9]。

激光熔覆技术是利用高能激光束在零部件表面熔合一层甚至多层金属粉末，再进行机械加工使其恢复原尺寸要求^[10]。由于激光熔覆技术熔点温度高、冷却速度快，可以在原零部件表面形成细致、均匀、高强度的熔覆层，从而大大提升了修复零件的耐蚀性和耐磨性；并且激光熔覆过程耗能低、无污染，所以激光熔覆技术是废旧机电产品零部件在修复时最为常用的一种修复手段。

电刷镀技术是承装着镀液的镀笔（阳极）与工件（阴极）之间相互接触，使镀液中的金属离子在电场力的作用下贴覆在工件表面形成镀层，用以修复零件尺寸的一种方法^[11]。纳米复合电刷镀是一种复杂的电刷镀技术，即在镀液中加入纳米

颗粒，使其与金属离子共同吸附在零件表面，形成性能更加优异的镀层。纳米复合电刷镀技术由于其镀层耐腐蚀、耐磨损及极端工况下的优异表现，是废旧机电产品零部件在大面积表面修复中经常采用的一种修复工艺手段^[12]。

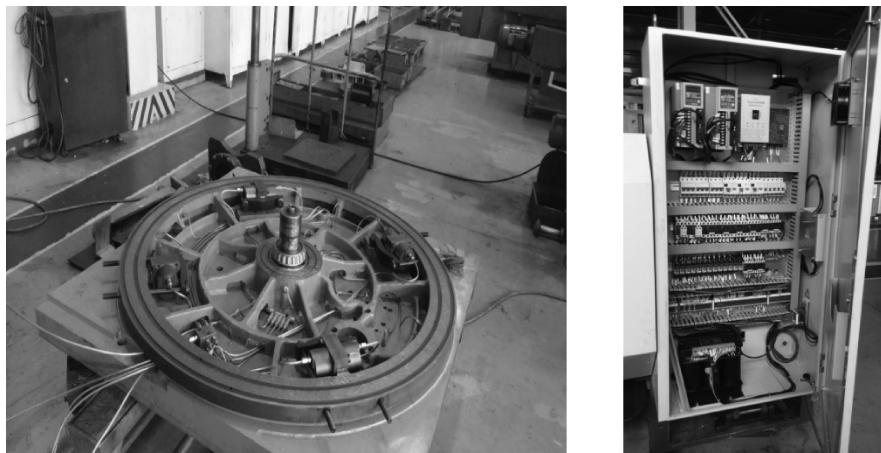


图 2-2 废旧机床零部件再制造过程

2.1.7 再装配阶段

再制造机电产品的再装配过程需要将原废旧机电产品的直接重用零部件、再制造零部件和新零部件按照装配工艺的要求进行安装，并要求装配的再制造产品达到甚至超过新产品的性能和加工精度。再装配过程具体包括涂装、部件装配、总装、检验、调试和包装等步骤，如图 2-3 所示。



图 2-3 再装配过程

以机床为例，涂装是将零部件按照客户要求、设计要求并结合人因工程学特征，将原机床零部件及增新零部件喷涂保护漆，达到防护和装饰的作用，并要求在再制造机床床身喷涂再制造标志；部件装配是将不同总成的零件组装的过程，包括

功能升级部件总成和再制造修复部件总成；总装即将各部件总成及防护零件、辅助零件等进行装配。再制造产品的总装过程需要将新零部件和再制造零部件统一进行装配，其装配过程复杂困难，需要严格按照再装配工艺及拆卸时做出的标记进行装配；检测和调试是再制造产品具有与新产品等同甚至超过新产品质量要求的有效保证；包装则是为了方便运输及保护再制造产品安全的有效途径。

2.1.8 销售服务阶段

再制造产品的销售过程包括销售和售后服务两个阶段。再制造产品与新产品相比，具有明显的价格优势，理应占据较大的市场份额。但是，目前由于国内用户对于再制造产品的认可度较低，以及同类新产品优异的性能、快速地更新换代使得再制造机电产品占有市场较为困难。因此，再制造企业需要以优良的销售及售后服务质量，获得用户对于再制造产品的认可。

再销售是实现再制造企业盈利的直接环节，在销售过程中需要使用户认可再制造产品。通过与用户的接触，及时向再制造企业反馈用户对于再制造产品的了解程度、质量要求、功能需求等信息，促进再制造企业持续提高再制造产品质量、售后服务水平。再制造产品应提供与新产品相同的售后服务、质保期限，使用户接受并倾向于购买再制造产品。在消费者未认可再制造产品前，也可以改变传统的销售模式，如引导用户按期购买再制造产品的使用权并享有相同的售后服务等，而再制造产品的所有权依旧属于再制造企业。

2.2 废旧机电产品再制造质量形成过程

在分析传统制造质量形成的基础上，结合废旧机电产品再制造全过程，详细分析再制造质量形成全过程，确定影响再制造产品质量的主要因素，以便于建立废旧机电产品可再制造质量评估体系。

2.2.1 传统质量形成过程分析

为了确定产品质量的形成过程，企业和学术界做了大量研究，其中美国质量研究学家朱兰提出的质量环最为系统、直观地描述了产品质量形成的过程，如图 2-4 所示。朱兰认为产品的形成过程主要包括市场调研、研发、设计、制定工艺、采购、生产、检测、销售等 16 个环节，产品质量形成过程是不断提高、持续完善的过程，涵盖了人、机、料、法、环、测 6 大生产要素^[13]。产品质量形成过程要求全面参与、全过程控制，需要对具有生产职能的各个环节进行组织、协调、监督，以确保产品质量的形成和提升。

传统产品质量形成的几个主要环节如下。

- 1) 市场调研：明确同类产品的市场占有率、消费者需求情况，对将要生产的

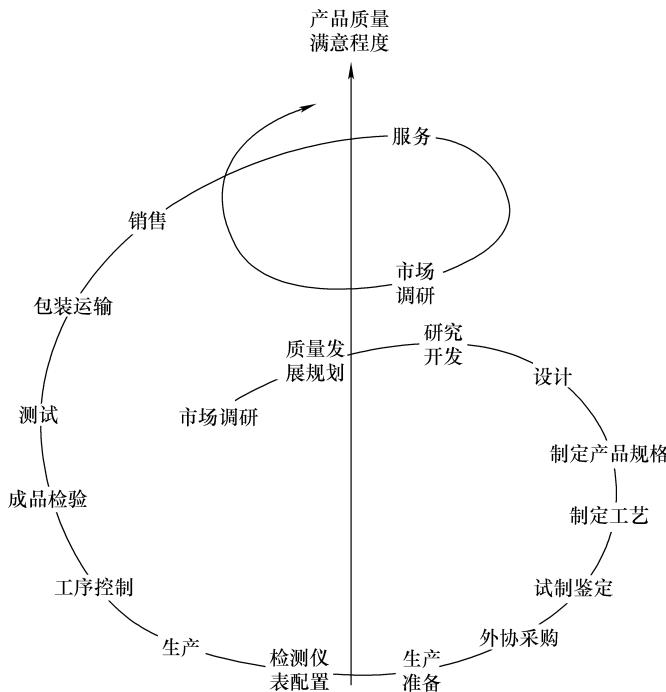


图 2-4 朱兰质量环

产品进行明确市场定位和需求预测。

- 2) 设计过程：确定产品的规格、结构、外观及与生产相关的工艺设计，是产品质量形成的最关键过程，直接影响产品的竞争力和企业效益。
- 3) 采购过程：外购件的购买环节，外购件的质量将对产品质量产生最直接的影响，是产品质量的先期影响因素。
- 4) 生产过程：通过对各生产要素进行详细规划、安排和控制，确保准时、高效地生产符合质量要求的产品。
- 5) 检测过程：确定产品出厂质量的关键环节，是检验、保证、改进产品质量的手段。
- 6) 销售阶段：产品销售和售后服务阶段，是产品使用质量、客户需求的反馈环节。

2.2.2 再制造质量形成过程

以机床为例，由于机床再制造的对象为废旧机床，其零部件的剩余寿命、整机原始质量情况和使用工况等方面的不确定性，使得废旧机床再制造过程相对于传统制造过程更为复杂。因此，再制造机床的质量形成过程分析不能按照传统质量形成过程进行。在分析废旧机床再制造流程的基础上，结合产品传统质量形成过程，确

定废旧机床再制造质量的形成过程,如图2-5所示。

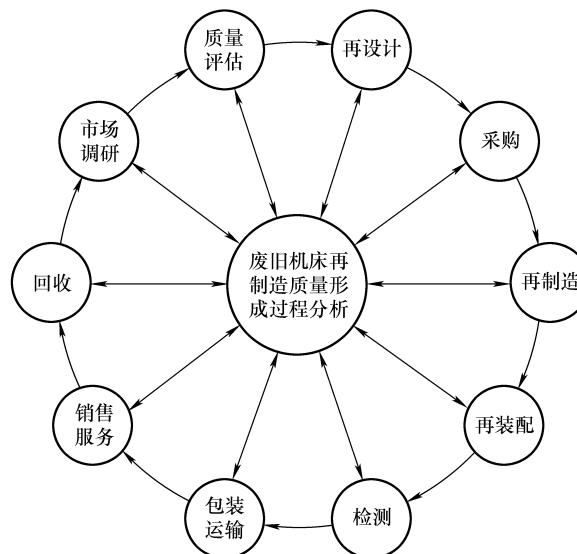


图2-5 废旧机床再制造质量形成过程^[14]

1) 回收阶段:先将废旧机床从所在地运送到再制造企业并进行鉴定,而对废旧机床质量的初步鉴定是再制造机床的首要影响因素;物流运输网络的建立、运输方式的选择直接影响再制造企业的运营效率和利益;拆卸方法选择的合理性,则直接影响废旧零件的拆卸质量和拆卸效率;清洗质量又直接影响废旧零部件尺寸检验结果的准确性,进而影响再制造零件的质量和性能。

2) 市场调研:市场调研包括分析用户对于再制造机床的性能、精度的要求,再制造机床的销售前景分析和市场定位决策研究。用户对于再制造机床的性能要求将直接决定再制造机床的后续环节进展,而机床市场的激烈竞争也使得再制造机床必须具有不低于新机床的质量要求。

3) 质量评估:这是机床再制造中最为重要的环节,对废旧机床质量的形成至关重要。质量评估阶段确定再制造机床的可再制造质量属性,可避免资源的浪费和不合格产品的产生,是确保再制造机床质量的重要环节,并为再设计阶段提供依据。

4) 再设计阶段:这是保证再制造机床质量的重要环节,包括拆卸工艺设计、再装配工艺设计、质量检测设计等,确保再制造机床在性能、可靠性、安全性、效益、环境影响等质量指标符合需求。质量检测设计是面向再制造产品复杂的生产过程,运用科学、合理的方法对质量的形成过程进行控制,确保再制造产品的质量。

5) 再制造阶段:对于拥有剩余寿命的可修复零部件采用再制造技术,恢复其尺寸、性能指标。针对不同失效模式,再制造修复方法的选择是否恰当,将直接决

定再制造零件的质量。而且，再制造设备的可靠性、操作人员的操作水平及不可控因素的干扰，也会对再制造零件质量产生影响。

6) 检测阶段：对于再制造后的零件，需运用测量工具或超声检测、射线检测等无损检测方法，检验再制造零件内部是否存在裂痕、应力集中等缺陷，确定再制造零件的质量是否合格。检测质量直接影响再制造机床的可靠性和使用寿命。

7) 再装配阶段：将重用件、再制造零部件、外购零部件组装成再制造机床。原机床零部件经过拆卸后的再次安装、再制造零部件与新零部件的结合，造成了再制造机床的装配过程复杂化。由于再制造机床使用的零部件复杂多样，造成再装配工艺设计、装配操作困难，也将影响最终的装配质量。

8) 销售服务阶段：运输过程的安全性、销售服务质量及售后服务水平是再制造机床质量的最终构成部分。销售服务质量影响再制造机床的市场占有率，售后服务与反馈信息为再制造企业明确再制造机床质量要求和改进提升机床质量提供指导。

2.3 废旧机电产品再制造质量影响因素

以机床为例，通过对废旧机床再制造流程分析，可以明确影响再制造机床质量的主要环节为：机床再制造回收、可再制造评估、再设计、再制造、再装配、再销售等6个主要阶段。据此，影响最终再制造机床质量的主要因素分为（见图2-6）：回收质量、拆卸质量、清洗质量、检测质量、可再制造质量属性评估、再制造质量、再装配质量等。

1. 回收质量

回收质量指的是废旧机电产品在回收时的质量。由于废旧机电产品的报废原因、服役工况和时间、损伤形式和损伤程度等具有不确定性，因此废旧机电产品的回收质量也具有高度的不确定性。回收分为主动回收和被动回收，目前我国的废旧机电产品再制造基本都是企业主动回收方式。再制造之前必须对废旧机电产品的回收质量进行必要的鉴定，即判定其是否有回收的价值。

2. 拆卸质量

再制造需要将废旧机电产品完全拆卸，拆卸是首要的再制造工序，它在很大程度上保证了废旧机电产品再制造资源的最大化利用。由于废旧机电产品的功能构造各有特点，整机及零部件在质量、结构、精度方面存在一定差异，因此不当的拆卸顺序、拆卸方式等都会对废旧零部件的质量造成损害，并给再装配带来困难，从而影响再制造的效率、成本和质量。目前，再制造企业的拆卸主要是借助工具和设备的人工拆解，存在效率低、成本高、废旧零部件容易出现二次损伤等问题。因此，如何获得高效率、低成本的无损拆卸方法是废旧机电产品再制造需解决的关键问题之一。

3. 清洗质量

清洗也是再制造过程中所独有的、显著区别于传统制造过程的重要工序，对保证再制造产品质量具有重要影响。它是检测表面尺寸精度、几何形状精度、表面粗糙度、表面性能、磨损腐蚀状况等指标的前提，也是废旧零部件再制造的基础。表面清洗的质量直接影响检测质量、再制造加工质量和再装配质量。清洁度不良还会影产品综合性能的下降，容易出现过度磨损、精度下降、寿命缩短等现象。

另外，清洗工序是再制造过程污染的主要来源，由于附着物的复杂程度，常常需要同时应用多种设备和多种方法，在清洗过程中可能会产生污染环境的有害物质。因此，根据废旧零部件表面附着的脏污物的类型和程度，选择科学、高效、绿色的清洗技术和设备至关重要。

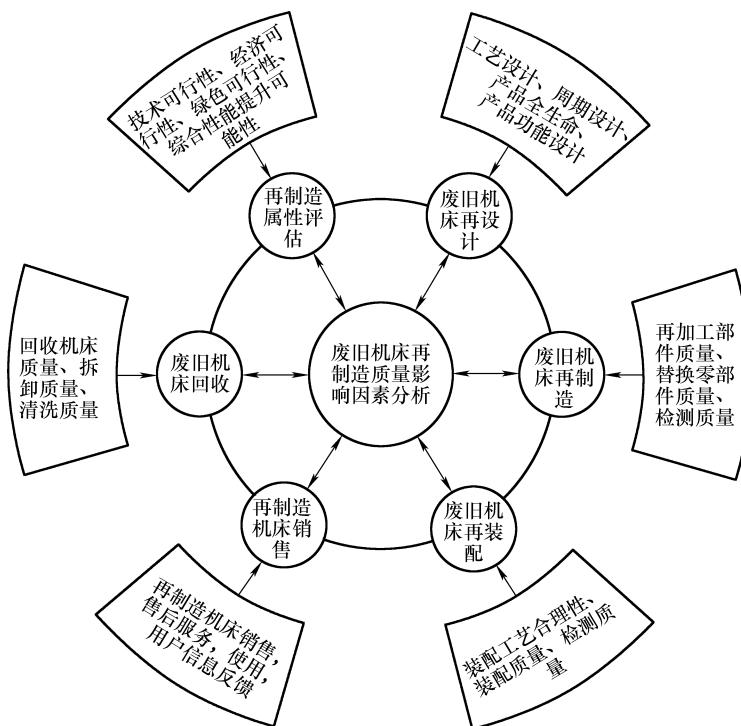


图 2-6 再制造机床质量影响因素

4. 检测质量

一是对废旧毛坯件的检测（如尺寸检测、缺陷检测）、剩余寿命评估等，严格把控“入口关”^[15]，对其检测不能造成损伤，因此现在的一个研究热点是无损检测技术；目前已有 200 多种无损检测技术，通常采用涡流检测、超声检测技术检测零件表面与内部裂纹等缺陷与损伤，采用金属磁记忆等技术检测剩余寿命等；二是对再制造涂层/零件的检测，包括涂层的厚度、缺陷、结合强度的检测，保证再制

造零部件的质量达到再制造标准；三是对再制造产品进行整机检测，严格把控“出口关”，确保整机的综合性能达到用户的要求。

5. 可再制造质量属性评估

可再制造质量属性评估是再制造过程中最重要的环节之一，包括对整机性能的评估，以及废旧零部件的评估。正确有效地评估废旧机电产品的可再制造质量属性，不仅可以评判废旧机电产品是否值得再制造和再制造的可行度，避免了资源的浪费。同时，也可为后面的废旧机电产品再设计、再制造提供必要的依据。

现阶段对于废旧机电产品的可再制造性评估的研究已经取得了一定的成果，但鲜见以质量的观点对废旧零部件进行评价。因此本书将以质量的视角，对废旧零部件的可再制造质量属性进行评价。若废旧零部件具备直接重用的价值，则将其转移至备件库，以便在进行再制造装配时使用；若该废旧零部件可再制造，则需要对其进行再制造工艺设计与工艺方案决策，即应用先进的再制造技术与工艺，恢复改善其质量；若该废旧零部件不具备再制造的价值，则将其转移至废件库，对其进行再回收循环处理。

6. 再设计质量

再制造设计是影响再制造机电产品质量的关键环节，在废旧机电产品的可再制造质量属性评估的基础上，结合客户需求进行再制造设计，实现再制造产品的综合性能升级^[16]。再设计过程一般包括三个阶段：再制造设计质量参数规划阶段、再制造设计冲突消解阶段、再制造工艺规划阶段^[7]。在再制造设计质量参数规划阶段，即根据现有的再制造机床的市场反馈，制定相应的再制造机床的整机性能参数，并基于此对废旧零部件的再制造工艺要求进行制定。而受制于原有废旧机电产品在结构、功能与材料等方面，还需对再制造设计第一阶段得到的再制造设计质量参数进行冲突消解，以保证其实现的可行性。再制造工艺的决策要依据再制造工艺要求进行，保证制定的再制造工艺能够实现所有再制造加工要求。

再制造的根本意义在于废旧资源的最大化再利用，因此废旧机电产品的再设计受到原有机电产品功能、材料、结构等的限制，与新产品设计相比，再设计的自由度受到了很大限制。而随着机电产品市场竞争日趋激烈，用户需求再制造产品成本更低而综合性能却有提升^[17]，这样在原有的材料结构限制与日益增长的用户需求之间就形成了再设计的冲突。因此，如何在废旧资源的利用、用户需求的性能之间、再制造成本与再制造利润之间进行最优的质量规划设计，解决再设计的矛盾冲突，实现废旧机电产品的综合性能提升，采用科学有效的再设计方法对再设计过程进行质量控制就尤为重要。

由于废旧零部件的失效形式、失效程度、使用寿命等的不确定性，使得废旧零部件的再制造工艺路线具有高度不确定性，再制造工艺方案的决策方法也成为再制造多种不确定性问题的一个重点研究领域。文献 [18] 阐述了 4 种典型再制造工艺路线，并建立 GERT 图形评审技术的某废旧零部件路线模型；文献 [19] 从制

造系统工程的角度建立了一种再制造工艺决策问题的框架模型，并提出了一种基于专家评判及模糊回归理论的二阶段再制造工艺过程优化决策方法；文献[20]建立了基于模糊Petri网的废旧零部件再制造工艺过程模型，并建立了一个废旧零部件不确定性再制造工艺时间的模糊学习系统，且基于废旧零部件的质量状况信息对其再制造工艺时间开展模糊学习。

7. 废旧零部件的再制造质量

废旧零部件是再制造零部件的毛坯，废旧零部件的再制造质量直接决定再制造零部件的质量。以废旧机床为例，铸造件（床身、立柱、工作台、箱体等）经过简单再加工后，可直接重用；精密关键功能件（导轨、主轴、蜗杆副等）需要采用先进的再制造技术，对其进行再制造，一般包括表面修复和机械加工两个阶段；电气系统等淘汰件和易损件则需升级换新。

再制造技术是保障再制造零部件质量的强有力支撑，是恢复或改善废旧零部件性能的关键因素。表面工程技术是我国的再制造技术特色，其功能是恢复尺寸、恢复或改善表面性能（耐磨、耐蚀、耐热、抗疲劳等）。目前我国重点研究的表面修复技术有：激光熔覆技术、电刷镀修复技术和喷涂修复技术。

8. 再装配质量

再装配是把直接重用件、再制造零部件、新件重新装配成再制造产品。作为再制造加工的最终环节，再制造装配对于提高再制造零部件利用率、保障再制造产品质量至关重要。再制造装配过程最主要的问题来源于如何保证不同种类的零部件的装配精度，不同种类的零部件具有不同类型的精度特征，有效保证再制造装配精度将对再制造产品的性能具有直接影响。再装配精度不仅影响再制造产品的工作性能，而且影响使用寿命，如机床的再装配精度将直接影响在机床上加工零件的加工精度。

张媛针对由再制造/再利用零部件尺寸超差、装配过程质量稳定性低等问题，提出一种再制造发动机装配质量控制方法，并对其关键技术进行了研究^[21]；刘明周等人在分析机械产品再制造装配过程特点的基础上，提出了面向机械产品再制造装配过程的动态工序质量控制模式^[22]。

9. 销售服务质量

用户所感受到最终质量不仅仅是再制造产品本身的质量，还包括在销售与售后过程中所提供的服务质量。再制造过程是否执行再制造过程质量控制、再制造产品是否达到再制造质量标准、是否提供安全可靠的质量担保等，这些都会影响用户感受到最终的产品质量。特别是当下国内处于对再制造认可度不高的大环境，销售与售后服务的质量更是再制造产品能否获得市场认可的重要环节。

2.4 再制造质量的内涵

Morup M 博士提出的“两类质量论”是“面向质量的设计”（DFQ）理论的基

础,他将产品质量分为两类(Q, q):外部质量 Q ,用户能感受到的质量,即最终产品所体现的质量特征;内部质量 q ,企业内部为实现 Q 而进行的一切生产经营活动的质量,即产品过程质量^[23]。本节在两类质量论的基础上,结合再制造的特点,将再制造的质量分为三类(Q_0, Q_R, q):回收质量 Q_0 、再制造产品质量 Q_R 、再制造过程质量 q 。下面分别对再制造三类质量的内涵进行定义和阐述。

1. 回收质量 Q_0

回收质量是指废旧机电产品在退役报废后,再制造商在回收时的废旧机电产品质量。与传统制造相比,再制造是以废旧机电产品的零部件为毛坯的,由于服役时间和工况、失效形式和程度、剩余寿命等的不同,使得废旧机电产品的回收质量具有高度的不确定性,由此带来再制造工艺路线与工艺时间具有高度不确定性。因回收是为了再制造,据此将回收质量定义为:“回收的废旧机电产品满足可再制造的程度”。

将回收质量分为两个层级:整机级回收质量和零部件级回收质量。整机级的回收质量又分为两个质量等级:恢复和升级,即可用“整机级可再制造质量属性”描述;由于可再制造的零部件通常为关键金属件,而电气类、易损类零件多做废弃处理,需更换新件而无须质量决策,因此将零部件级的回收质量分为三个质量等级:可重用、可再制造和可回收,即可用“零部件级可再制造质量属性”描述。

2. 再制造产品质量 Q_R

传统的产品质量是指产品的适用性,即满足用户需求的程度,可通过各个质量特性及其值来描述。这一质量内涵无法体现产品在使用期内功能的保持性,从根本和长远的观点看,功能和质量即所谓的“性能”是竞争力诸要素中最重要的,为此谢友柏院士提出了“性能驱动设计^[24]”的理念。闻邦椿院士认为产品的质量是通过全功能和全性能体现的,而产品的功能又往往从性能中体现出来,故可以将功能纳入综合性能体系之中^[25]。

据此,以提升再制造产品的竞争力为着眼点,将再制造产品质量定义为“再制造产品满足用户使用所具备的综合性能”。并以人-机-环境系统观点,将再制造产品的综合性能概括为三个方面:加工性能(机的因素)、人机友好性(人的因素)和绿色性(环境因素)。

3. 再制造过程质量 q

制造业过程质量中的“过程”不是指广义的过程,它指的是产品、零部件制造过程的基本环节,即“工序”。过程(工序)质量的高低主要反映在过程输出的合格率、废品率或返修率的高低上。我们从全生命周期的角度,将再制造过程定义为:“基于废旧产品回收质量的约束,以客户需求为输入,将其所需的质量特性转化为再制造产品质量输出的一组相互关联或相互作用的活动。”即把影响再制造产品质量的因素贯穿于再制造的全过程,再通过过程的执行与控制对过程特征参数进行检测评价,其结果合乎要求的程度就形成了再制造过程的质量水平。

充分利用废旧机电产品蕴含的附加值是再制造的根本，如果再制造产品质量能够满足用户的需求，但其废旧零部件再利用率低，则失去了再制造存在的意义和价值。因此，将再制造过程质量定义为“过程保证废旧零部件再利用及保证再制造产品质量满足用户需求的程度。”

2.5 废旧机电产品再制造全过程质量模型

我们在分析再制造流程、明确再制造质量内涵的基础上，研究质量特性在废旧机电产品再制造全过程中的传递和映射，构建了废旧机电产品再制造全过程质量模型（见图 2-7）。该模型能够反映回收质量、用户需求、再制造过程质量与再制造产品质量之间的转化映射关系，有利于以再制造全过程的视角进行质量控制，对再制造产品综合性能的提升具有重要意义^[26]。

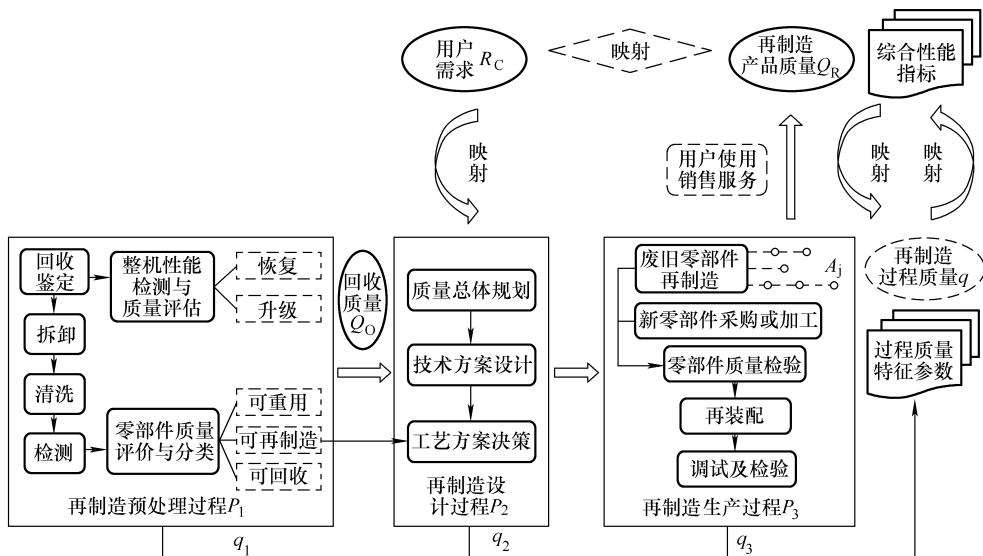


图 2-7 废旧机电产品再制造全过程质量模型^[26]

再制造是以废旧机电产品为起点的，与传统制造相比，增加了回收、拆卸、清洗、检测、再制造质量决策、废旧零部件再制造加工、再装配等工序。为了简化并优化过程的识别，该质量模型将废旧机电产品再制造的全过程分为三大子过程，即再制造预处理过程 (P_1)、再制造设计过程 (P_2) 和再制造生产过程 (P_3)。

(1) **再制造预处理过程** 包括废旧机电产品的回收鉴定、整机性能检测与质量评估（分为两个等级：恢复、升级）、拆卸、清洗、废旧零部件检测、废旧零部件质量评价与分类（分为三个等级：可重用、可再制造、可回收）。根据整机性能检测与质量评估、废旧零部件质量评价与分类对废旧机床进行综合质量评估，评定

回收质量 Q_0 。

(2) 再制造设计过程 根据回收质量 Q_0 、结合用户需求 R_C 进行再制造设计，主要包括三个阶段：质量总体规划、技术方案设计和工艺方案决策。

(3) 再制造生产过程 包括废旧零部件的再制造、新零件的采购或加工、再制造零部件质量检验、再装配、整机调试与检验。由于废旧零部件的再制造工艺路径具有不确定性，图 2-7 中 A_j 为第 j 个工序，用不同长短的不同线条反映再制造工艺路径的随机性。

在再制造实践过程中，将再制造质量目标“提升再制造机床的综合性能”分解落实到每一过程，优化的顺序，把下一工序作为上一工序的用户，并对关键的过程特征参数进行控制。对于无法满足再制造产品综合性能指标的过程，则需要进行优化甚至重组，才能保证再制造质量，更好地满足用户需求。

另外，该模型清晰识别出导致再制造产品质量不稳定的关键过程（用深色标识），包括废旧零部件质量评价与分类、再制造工艺方案决策、废旧零部件再制造加工、再装配等过程。因此，需要对这些关键过程进行重点研究及科学的质量控制，以保证最终再制造产品的质量。

参 考 文 献

- [1] 王燕玲. 废旧机电产品回收群体演化博弈研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [2] 殷炜. 不确定环境下废旧产品再制造拆卸优化研究 [D]. 南京: 东南大学, 2011.
- [3] 陈宝庆, 张国胜, 吴鸿雁, 等. 基于循环经济的废旧工程机械产品无损拆解工艺 [J]. 起重运输机械, 2013 (10): 7-10.
- [4] 王卓, 贾新锐. 基于生命周期的机床再制造过程模型探究 [J]. 科技创业家, 2012 (14): 88.
- [5] 姚巨坤, 崔培枝. 再制造清洗技术研究 [J]. 2007 (2): 180-181.
- [6] 曹华军. 废旧机床再制造关键技术及产业化应用 [J]. 中国设备工程, 2010 (11): 7-9.
- [7] 宋博学. 废旧机床再制造质量设计方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [8] 朱胜, 姚巨坤. 装备再制造设计及其内容体系 [J]. 中国表面工程, 2011 (4): 1-6.
- [9] 谭俊, 陈建敏, 刘敏, 等. 面向绿色制造与再制造的表面工程 [J]. 机械工程学报, 2011, 20: 95-103.
- [10] SONG Chuanghui, HUANG Aibing, YANG Yongqiang, et al. Design and direct manufacture of non-assembly abacus by selective laser melting [C] //International Symposium on Optoelectronic Technology and Application, 2014, 01 (1): 95-96.
- [11] Shaukatullah H Gaynes, Michael A. Comparative evaluation of various types of heat sinks for thermal enhancement of surface mount plastic package [J]. International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, 1995, 3 (18): 252-259.
- [12] LI Jianxia, GUO Bixin. Study on the brush plating technology of GH34 heat-resisting steels [J]. Advanced Materials Research, 2011 (189): 1271-1274.
- [13] 朱兰. 朱兰质量手册 [M]. 5 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2003.

- [14] 胡东波. 废旧机床可再制造质量评估与决策研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
- [15] 徐滨士, 董世运, 史佩京. 中国特色的再制造零件质量保证技术体系现状及展望 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (20): 84 – 90.
- [16] 杜彦斌. 退役机床再制造评价与再设计方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [17] 曹华军, 杜彦斌, 李智明, 等. 机床再制造与综合性能综合提升内涵及技术框架 [J]. 中国表面工程, 2010, 23 (6): 75 – 79.
- [18] 李成川, 李聪波, 曹华军. 基于 GERT 图的废旧零部件不确定性再制造工艺路线模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18 (2): 298 – 305.
- [19] 曹华军, 王本涛, 刘飞, 等. 再制造工艺过程二阶优化决策方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16 (5): 936 – 941.
- [20] 李聪波, 李玲玲, 曹华军, 等. 废旧零部件不确定性再制造工艺时间的模糊学习系统 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (15): 137 – 146.
- [21] 张媛. 再制造发动机装配质量控制方法及关键技术 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [22] 刘明周, 王强, 赵志彪, 等. 机械产品再制造装配过程动态工序质量控制系统 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20 (4): 817 – 824.
- [23] Morup M A new design for quality paradigm [J]. Journal of Engineering Design, 1992, 3 (1): 63 – 80.
- [24] 戴旭东, 谢友柏. 产品性能特征建模及以性能特征驱动的产品现代设计模式 [J]. 计算机工程与应用, 2003 (3): 43 – 46.
- [25] 闻邦椿. 产品全功能与全性能的综合设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [26] 李丽, 金嘉琦, 姜兴宇, 等. 废旧零部件可再制造质量评价与分类研究 [J]. 组合机床与自动化, 2017 (9): 45 – 49.

第3章 废旧零部件的可再制造质量评估与决策

3.1 废旧零部件可再制造质量问题分析

废旧机电产品再制造是以废旧零部件作为毛坯件，废旧零部件的原始质量是由其制造质量和服役工况共同作用的结果，其中制造质量有差异，尤其是服役工况中含有很多不可控制的随机因素，这将导致废旧件的回收质量具有高度的不确定性，并成为再制造机电产品质量不稳定的源头。废旧机电产品的原始质量直接决定了再制造的可行性和可行度，特别是对于产品附加值高的关键零部件，其原始质量决定是否可以再利用或再制造。

由于废旧零部件的损伤形式和损伤程度具有多样性，导致难以对其可再制造性进行快速有效的评价^[1]。目前我国大多数机床再制造企业在废旧机床拆解后，一般凭借有经验的操作工人对废旧零部件的可再制造性进行主观判断并分类，缺乏科学的分析方法^[2]。因此，对废旧零部件的回收质量（可再制造质量属性）进行科学评价与分类，是保证废旧产品再制造质量的首要前提。

现有国内外文献[3-9]对于废旧零件可再制造性评估与决策问题的研究主要集中在以下几个方面。

1) 根据再制造工艺与实践经验，提出废旧机电产品可再制造性评判准则与定量分析方法。

2) 主要从技术性、经济性与环境影响等方面，建立废旧机电产品的可再制造性评估体系。

3) 从废旧零部件的剩余使用寿命角度，进行可再制造性评估与可靠性分析。这些研究在汽车、机床、家电等再制造行业中均取得了重要进展。

但这些方法在实际应用中往往受到主观经验、构建繁杂的评估体系等方面的限制，同时这些方法评估的结果仅是定性的，并不能具体明确废旧零部件再制造质量等级（可再利用、可修复或可再制造）。基于此，我们从废旧零部件自身质量特性角度，结合再制造工艺，提出了一种基于可拓综合评价的废旧零部件质量决策方法，即根据废旧零部件的受损程度及其再制造工艺标准，通过关联函数与关联度确定废旧零部件的质量特征与可再制造质量等级间的映射关系，并在此基础上，建立废旧零部件再制造质量等级综合评价物元模型，以确定该废旧零部件不同再制造质量等级的关联度，进而确定废旧零部件的再制造质量等级（即可再利用、可修复、可再制造、报废）。

3.1.1 废旧零部件质量属性分析

根据废旧零部件的尺寸精度、形位精度、可修复程度等因素，将废旧零部件的再制造质量属性（等级）分为可再利用、可修复、可再制造和报废处理。

1) 可再利用：是指废旧零部件各项指标要求与新零件相同，经过清洗之后直接贮存，等待装配使用。

2) 可修复：是指废旧零部件存在少量质量缺陷或者某一检测指标不合格，这类零部件一般仅需要进行简单的再修复，其性能就可以恢复到新零部件的要求。

3) 可再制造：是指废旧零部件性能指标的某方面或某几个方面存在不足，运用再制造修复工艺对其进行再制造比生产同类新零部件具有更好的经济性，修复之后的零部件质量满足质量要求，而且可靠性和使用寿命能够达到新零部件的水平。

4) 报废处理：是指废旧零部件存在明显缺陷，性能指标达不到要求或者再制造过程耗费资源、人力超过新产品，对于这一类零部件一般进行降阶使用、原材料回收或者环保处理。

3.1.2 废旧零部件再制造质量等级决策问题分析

在进行废旧零部件再制造质量等级决策时，往往会受到废旧零部件种类不同、多质量特征等多方面因素的限制。因此，废旧零部件可再制造质量等级决策将面临如下挑战。

1) 通常废旧机电产品是由多个废旧零部件构成，因此，需要进行再制造质量等级评估的废旧零部件的种类和数量繁多，这就要求决策方法不能过于复杂、难于计算，而应具有很强的实用性和可操作性。

2) 废旧零部件的质量往往包含多个质量特征，而且这些质量特征之间又相互影响、相互矛盾。因此，需要将废旧零部件的质量特征与可再制造质量等级之间建立映射关系，才能对多质量特征的废旧零部件进行再制造质量等级决策。

3) 废旧零部件可再制造质量等级决策的实质就是确定废旧零部件可再制造质量等级，这就要求废旧零部件可再制造质量等级决策方法不仅能够定量地确定决策值，而且能够明确划分废旧零部件质量等级。

3.2 废旧零部件的可再制造质量评估与决策方法

废旧零部件在进行可再制造质量等级决策时，需要充分考虑废旧零部件的受损程度及其再制造工艺标准；同时还应避免仅局限在理论上的探讨，要具有普适性和可操作性，以及避免计算过于复杂而导致难以应用。

基于此，我们引入可拓学思想，以物元理论、可拓集合理论^[10]为基础，根据论域划分原理^[11]将废旧零部件的再制造质量等级（即可再利用、可修复、可再制

造、报废)划分为不同论域,并根据废旧零部件的受损程度及其再制造工艺标准设定每个论域的阈值;通过关联函数^[12,13]确定废旧零部件的质量特征属性与再制造质量等级间的映射关系;建立废旧零部件可再制造多质量等级综合评价物元模型,确定该废旧零部件不同再制造质量等级的关联度,其中对应质量等级关联度最大的,即为该废旧零部件所属的再制造质量等级。

因此,通过可拓理论中的论域划分原理、关联函数理论,将废旧零部件的质量特征与其可再制造质量等级能够建立映射关系,能够正确反映废旧零部件的再制造质量等级,使决策结果更切合实际。所以,运用可拓理论综合评价进行废旧零部件的再制造质量等级决策,在理论和应用上具有普适性且可操作。

3.2.1 建立废旧零部件再制造质量等级综合评价物元模型

对于某一废旧零件 A ,假设其再制造质量等级可分为 m 个质量等级,而 N_j 为所划分的第 j 个质量等级, $j=1, 2, \dots, m$ 。 C_i 为再制造质量等级 N_j 的质量特征。经典域 x_{ji} 为再制造质量等级 N_j 关于质量特征 C_1, C_2, \dots, C_n 的质量特征值区间。而节域 X_{iP} 为所有废旧零部件再制造质量等级的 C_i 取值范围,其中 P 为废旧零部件再制造质量等级的全体,即 $x_{ji} \in X_{iP}$ 。对于需要可再制造质量等级决策的废旧零部件物元为 R_0 , x_i 为该废旧零部件 A 关于质量特征 C_i 的取值,即实际测得的质量特征值。废旧零部件再制造质量等级域、节域、废旧零部件物元以式(3-1)~式(3-3)表示。

$$R = (N_j, C_i, x_{ji}) = \begin{pmatrix} N_j, & C_1, & x_{j1} \\ & C_2, & x_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n, & x_{jn} \end{pmatrix} \quad (3-1)$$

$$R_P = (A, C_i, X_{iP}) = \begin{pmatrix} A & C_1, & X_{1P} \\ & C_2, & X_{2P} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n, & X_{nP} \end{pmatrix} \quad (3-2)$$

$$R_0 = \begin{pmatrix} A & C_1, & x_1 \\ & C_2, & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n, & x_n \end{pmatrix} \quad (3-3)$$

3.2.2 废旧零部件再制造质量等级论域划分

在确定废旧零部件再制造质量等级、质量特征域实测质量特征值的关联函数

前,需要对废旧零部件再制造质量等级域进行论域划分。在进行可再制造质量等级决策时,通过判别实测的质量特征值与废旧零部件的可再制造各质量等级的符合程度来确定其质量等级。基于此,根据可拓理论中的论域^[14],将废旧零部件再制造质量等级(可再利用、可修复、可再制造、报废)划分为不同论域,并设定每个论域的阈值。

定义1:对于某一废旧零部件,设 X 为论域表示该废旧零部件所有质量特征值。

在再制造过程中,通常以新件质量为标准,能够达到新件质量的废旧零部件为可再利用的零部件;通过简单的修复可达到新件质量标准的为可修复件;经再制造后可达到新件质量标准的为可再制造件。因此,对于论域 X 中相对于新件质量的符合程度可分为标准正域与过渡正域,则对应的就是可再利用级(A)、可修复级(B)。而对于那些已超过可修复范围但在再制造工艺能力容许范围内的,则为过渡负域,即可再制造级(C)。

剩下的区域是不可再制造的,即报废级(D),如图3-1所示。图中: x_a 、 x_b 、 x_c 分别表示某一质量等级直接重用、可修复、可再制造的判断阈值, x 为某一质量特征的实际测量值。

定义2:假定废旧零部件某一质量特征的可再利用域 $A = \langle x_a, x_b \rangle$,即 $x_{ji} \in X$,可修复域 $B = \langle x_c, x_d \rangle$,可再制造域 $C = \langle x_e, x_f \rangle$,报废域 $D = \langle x_f, \infty \rangle$,则对于该质量特征值 x ,对可再利用、可修复与可再制造等级的符合程度分别记为: $\rho(x, A)$ 、 $\rho(x, B)$ 、 $\rho(x, C)$ 。这里仅列出 $\rho(x, A)$ 的计算公式, $\rho(x, B)$ 、 $\rho(x, C)$ 可依此类推。

$$\begin{aligned} \rho(x, A) &= \left| x - \frac{x_a + x_b}{2} \right| - \frac{x_b - x_a}{2} \\ &= \begin{cases} x_a - x, & x \leq (x_a + x_b)/2 \\ x - x_b, & x \geq (x_a + x_b)/2 \end{cases} \end{aligned} \quad (3-4)$$

定义3^[15] 在确定关联函数前还需要确定质量特征值 x 与两个再制造等级区间的位置关系,即位值,记为 D 。这里以可再利用、可修复等级域为例,则质量特征值 x 与可再利用、可修复等级域组成的位值 $D(x, A, B)$ 为

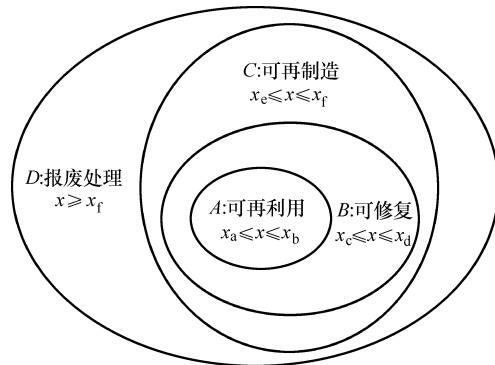


图3-1 废旧零部件的可再制造质量论域划分图

$$D(x, A, B) = \begin{cases} \rho(x, B) - \rho(x, A), & \rho(x, B) \neq \rho(x, A) \\ & \text{且 } x \notin A \\ \rho(x, B) - \rho(x, A) + x_a - x_b, & \rho(x, B) \neq \rho(x, A) \\ & \text{且 } x \in A \\ x_a - x_b, & \rho(x, B) = \rho(x, A) \end{cases} \quad (3-5)$$

则 $D(x, A, B)$ 就量化了质量特征值 x 与可再利用、可修复等级域组成的区间的位
置关系。

3.2.3 确定废旧零部件质量特征的权重

目前, 确定权重多采用层次分析或模糊综合评价法, 而这些方法的主观性较大, 与客观实际可能会有较大偏差。序关系分析法 (G_1) 能够充分体现专家的意愿, 且无须一致性检验; 对指标个数没有限制, 具有强保序性; 与常用的层次分析法 (AHP) 等方法相比, 计算量成倍减少, 更为简单直观实用^[16]。因此, 我们应用序关系分析法确定废旧零部件各质量特征的权重, 具体步骤如下。

步骤 1: 确定废旧零部件可再制造质量特征间的序关系 (重要度排序)。

对于废旧零部件可再制造质量特征, 质量特征 C_i 相对于特定要求的重要程度大于 C_j 时, 则记为 $C_i > C_j$; 同理, 当废旧零部件可再制造质量特征 C_1, C_2, \dots, C_m 相对于某特定要求按如下顺序排列:

$$C_1^* > C_2^* > \dots > C_j^* > \dots > C_m^*, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (3-6)$$

则废旧零部件可再制造质量特征按 “ $>$ ” 确定了指标间唯一的序关系 (重要度排序)。这里的 C_i^* 代表 $\{C_i\}$ 按序关系 “ $>$ ” 对指标进行排序后的第 i 个质量特征 (其中, $i = 1, 2, 3, \dots, m$)。

步骤 2: 确定相邻的质量特征间相对重要程度之比 r_k 。

假设专家对于废旧零部件可再制造质量特征 C_{k-1} 与 C_k 间的重要程度之比 w_{k-1}/w_k 的理性判断为

$$r_k = w_{k-1}/w_k, \quad k = m, m-1, \dots, 3, 2 \quad (3-7)$$

式中, r_k 取值请参考表 3-1。指标 r_k 取值也可以为 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 其数值表示的意义处于表 3-1 中相邻两数值之间。

表 3-1 r_k 赋值参考

r_k	意义
1.0	指标 C_{k-1} 与指标 C_k 同等重要
1.2	指标 C_{k-1} 比指标 C_k 稍微重要
1.4	指标 C_{k-1} 比指标 C_k 明显重要
1.6	指标 C_{k-1} 比指标 C_k 强烈重要
1.8	指标 C_{k-1} 比指标 C_k 极端重要

步骤 3：计算废旧零部件可再制造质量特征的权重系数 w_k

假设某专家给出的 r_k 的理性赋值满足关系式 (3-8)，则 w_m 为

$$w_m = \left(1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_i \right)^{-1} \quad (3-8)$$

由式 (3-7) 得 $w_{k-1} = r_k / w_k$, $k = m, m-1, \dots, 3, 2$ (3-9)

式中, m 表示第 k 个质量特征的权重。

3.2.4 确定废旧零部件质量特征与再制造等级的关联函数与关联度

确定关联函数时，需要区分指标值最优点是否处于标准正域中点，以及相邻区域之间是否共用相同端点情况，根据废旧零部件质量决策的数据类型，构建关联函数为

$$k(x) = \begin{cases} \frac{\rho(x, v_{ij})}{D(x, v_{ij}, V_{ip})} D(x, v_{ij}, V_{ip}) \neq 0 \\ -\rho(x, v_{ij}) - D(x, v_{ij}, V_{ip}) = 0 \end{cases} \quad (3-10)$$

在此基础上，确定废旧零部件物元关于再制造等级 j 的关联度为

$$k_j(R_0) = \sum_{i=1}^n w_i k_j(v_i) \quad (3-11)$$

式中： w_i 为第 i 个特征属性的权重； $k_j(v_i)$ 为该废旧零部件物元的第 i 个质量特征对于再制造等级 j 的关联度，则废旧零部件物元 R_0 对于 j 个评价等级的关联度最大值即为该废旧零部件的再制造等级 j_0 ，如式 (3-12) 表示，即

$$k_{j_0}(R_0) = \max_{j=1,2,\dots,m} k_j(R_0) \quad (3-12)$$

3.3 实例分析

下面以机床为例，导轨是机床的基准部件，主要作用是承载其余主要部件并作为其余部件的运动基准，保证机床主要部件运动的准确性^[16]。机床导轨大部分都是铸铁件，在机床使用过程中导轨需要面临承载力、腐蚀、氧化等多方面影响，一旦机床导轨精度发生变化，其余部件的相对位置精度将会受到影响，将直接影响被

加工件的精度。

导轨的再制造质量特征属性主要包括直线度、平行度、平面度、垂直度等^[17]。由于机床在正常运转时，导轨会受到热变性、切削腐蚀等因素影响，从而使导轨的直线度、平行度、平面度、垂直度等精度下降，进而影响加工部件的尺寸精度，因此以废旧机床的导轨为研究对象，选取直线度、平行度、平面度、垂直度作为废旧导轨的质量特征决策指标，进行废旧导轨的可再制造质量等级决策分析。

3.3.1 确定废旧导轨各再制造质量等级的阈值

当导轨再制造质量等级为可再利用时，要求其精度达到新导轨的精度要求。导轨直线度误差要求小于0.03mm，平面度误差要求小于0.02mm，平行度误差要求小于0.04mm，垂直度误差要求小于0.02mm。

废旧导轨的修复过程依旧以传统机械加工为主，修复方法主要有刮研、刨削和磨削三种。刮研是利用刮刀、基准表面、测量工具和显示剂，以手工操作的方式，边研点边测量，边刮研加工，使工件达到工艺上规定的尺寸、几何形状、表面粗糙度和密合性等要求的一项精加工工序^[18-20]。由于刮研使用的工具简单，通用性比较强，加工余量少，而达到的精度非常高，因此广泛应用于废旧机床导轨修复。对于刮研可修复的导轨，将其再制造质量等级定义为可修复类。刮研对于废旧导轨直线度要求见表3-2。

表3-2 直线度误差要求 (单位：mm)

导轨宽度	导轨长度				
	小于500	500~1000	1000~2000	2000~4000	4000~6000
小于100	0.05	0.10	0.10~0.15	0.15~0.20	0.20
100~500	0.10	0.10~0.15	0.10~0.20	0.15~0.20	0.20~0.30

根据废旧TPX6113镗床导轨的实际尺寸，可修复类废旧导轨取值区间为(0.20, 0.30)，则可修复类导轨属性判断阈值为0.30mm。

磨削是指用磨料、磨具切除工件上多余材料的加工方法。磨削加工属于精加工，其加工量少、精度高，主要工作原理是通过高速旋转的高硬度磨具去除零件表面多余的加工余量。刨削加工是用刨刀对工件做水平直线往复运动的切削加工方法，是平面加工的主要方法之一，常用牛头刨床或龙门刨床进行刨削，刨削加工通用性好，但是由于需要做往复运动、惯性大，限制加工速度及加工效率低。磨削和刨削是废旧导轨常用的机械修复方式，其修复的废旧导轨质量等级定义为可再制造类。由于磨削可再加工误差要求为(0.1mm, 1mm)，刨削可再制造的误差要求为(1mm, 1.5mm)，则可再制造类导轨属性判断阈值为1.5mm。

3.3.2 废旧机床导轨测量

通过对回收的废旧机床 TPX6113 镗床导轨的检测，现对导轨的直线度、平面度、平行度、垂直度记录如下。

1. 直线度

采用平尺拉表法对导轨的直线度进行测量，测量结果记录见表 3-3。

表 3-3 直线度测量结果记录 (单位: mm)

监测点	A	B	C	D	E	F	G	H	I
千分尺读数	0.268	0.237	0.626	0.341	0.131	0.520	0.676	0.513	0.611
监测点	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
千分尺读数	-0.089	0.535	0.734	0.253	-0.102	0.376	0.719	0.226	0.456

对表中数据进行分析得到最大值为 0.734mm，最小值为 -0.102mm，对数据进行处理得到废旧导轨的直线度为 0.836mm。

2. 平面度

导轨平面度用千分尺测量法进行检测，其测量结果记录见表 3-4。

表 3-4 平面度测量结果记录 (单位: mm)

监测点	A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃
千分尺读数	0.156	0.137	0.426	0.173	0.151	0.267	0.593	0.628	0.273
监测点	D ₁	D ₂	D ₃	E ₁	E ₂	E ₃	F ₁	F ₂	F ₃
千分尺读数	-0.102	0.622	0.428	0.179	-0.018	0.296	0.162	0.179	0.482
监测点	G ₁	G ₂	G ₃	H ₁	H ₂	H ₃	I ₁	I ₂	I ₃
千分尺读数	0.568	0.146	0.472	0.621	0.682	0.167	0.317	0.435	0.626
监测点	J ₁	J ₂	J ₃	K ₁	K ₂	K ₃	L ₁	L ₂	L ₃
千分尺读数	0.563	0.332	0.148	0.357	0.633	0.731	0.195	0.654	0.196
监测点	M ₁	M ₂	M ₃	N ₁	N ₂	N ₃	O ₁	O ₂	O ₃
千分尺读数	0.268	0.482	0.653	0.493	0.718	0.625	0.714	0.734	0.64
监测点	P ₁	P ₂	P ₃	Q ₁	Q ₂	Q ₃	R ₁	R ₂	R ₃
千分尺读数	0.683	0.673	-0.118	0.624	-0.107	0.721	0.682	0.147	0.732

对表中数据进行分析得到最大值为 0.734，最小值为 -0.118mm，对数据进行处理得到废旧导轨的平面度误差为 0.852mm。

3. 平行度

导轨平行度采用千分表拉表法进行检测，其测量结果记录见表 3-5。

表 3-5 平行度测量结果记录 (单位: mm)

监测点	A	B	C	D	E	F	G	H	I
千分尺读数	0.245	0.194	0.793	0.328	0.842	0.942	0.149	0.349	0.328
监测点	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
千分尺读数	0.932	0.144	0.236	0.234	0.168	0.246	0.693	0.354	0.279

对表中数据进行分析得到最大值为 0.942mm, 最小值为 0.144mm, 对数据进行处理得到废旧导轨的平行度误差为 0.798mm。

4. 垂直度

导轨垂直度用 90°角尺拉表法进行检测, 其测量结果记录见表 3-6。

表 3-6 垂直度测量结果记录 (单位: mm)

监测点	A	B	C	D	E	F	G	H	I
千分尺读数	0.168	0.383	0.586	0.072	0.245	0.473	0.124	0.326	0.264
监测点	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
千分尺读数	0.536	0.295	0.329	0.189	0.482	0.287	0.388	0.156	0.391

对表中数据进行分析得到最大值为 0.586mm, 最小值为 0.072mm, 对数据进行处理得到废旧导轨的垂直度误差为 0.514mm。

3.3.3 废旧导轨的可再制造质量决策

1. 确定废旧导轨再制造质量等级的域

根据物元模型, 确定废旧 TPX6113 镗床导轨的可再制造质量等级经典域物元矩阵为

$$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} \text{可直接重用, 直线度, } \langle 0, 0.03 \rangle \\ \text{平面度, } \langle 0, 0.03 \rangle \\ \text{平行度, } \langle 0, 0.04 \rangle \\ \text{垂直度, } \langle 0, 0.02 \rangle \end{array} \right\}$$

$$R_2 = \left\{ \begin{array}{l} \text{可修复, 直线度, } \langle 0.03, 0.30 \rangle \\ \text{平面度, } \langle 0.03, 0.30 \rangle \\ \text{平行度, } \langle 0.04, 0.60 \rangle \\ \text{垂直度, } \langle 0.02, 0.50 \rangle \end{array} \right\}$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{cases} \text{可再制造, 直线度, } \langle 0.30, 1.50 \rangle \\ \text{平面度, } \langle 0.30, 1.50 \rangle \\ \text{平行度, } \langle 0.60, 2.50 \rangle \\ \text{垂直度, } \langle 0.50, 2.40 \rangle \end{cases}$$

$$\mathbf{R}_P = \begin{cases} \text{废旧导轨, 直线度, } \langle 0, 1.50 \rangle \\ \text{平面度, } \langle 0, 1.50 \rangle \\ \text{平行度, } \langle 0, 2.50 \rangle \\ \text{垂直度, } \langle 0, 2.40 \rangle \end{cases}$$

2. 确定待评价物元

针对待评价废旧导轨, 用其直线度、平面度、平行度和垂直度及各属性值构造待评价物元矩阵为

$$\mathbf{R}_0 = \begin{cases} \text{废旧导轨, 直线度, } 0.836 \\ \text{平面度, } 0.852 \\ \text{平行度, } 0.798 \\ \text{垂直度, } 0.514 \end{cases}$$

3. 确定各质量特征的权重

根据 G_1 与模糊综合评价相结合法确定各评价指标权重。首先, 确定序关系: 直线度 (u_1) > 平面度 (u_2) > 垂直度 (u_4) > 平行度 (u_3); 其次, 确定相邻指标相对重要程度:

$$r_2 = \frac{u_1}{u_2} = 1.6; r_3 = \frac{u_2}{u_3} = 1.6; r_4 = \frac{u_3}{u_4} = 1.2$$

最后, 计算评价指标的权重系数为

$$w_4^* = (1 + r_2 r_3 r_4 + r_3 r_4 + r_4)^{-1} = 0.152$$

$$w_3^* = w_4^* r_4 = 0.182;$$

$$w_2^* = w_3^* r_3 = 0.255;$$

$$w_1^* = w_2^* r_2 = 0.408$$

则直线度权重 $w_1 = w_1^* = 0.408$, 平面度权重 $w_2 = w_2^* = 0.255$, 平行度权重 $w_3 =$

$w_4^* = 0.152$, 垂直度权重 $w_4 = w_3^* = 0.182$ 。

评价小组选定的 10 位专家采用相同的评价方法, 对评价指标进行重要性排序, 确定其相对重要程度和指标权重值, 并计算出最终权重值见表 3-7。

表 3-7 权重评价表

专家	序关系	r_2	r_3	r_4	w_4^*	w_3^*	w_2^*	w_1^*	w_1	w_2	w_3	w_4
P1	$u_1 > u_2 > u_4 > u_3$	1.6	1.4	1.2	0.152	0.182	0.255	0.408	0.408	0.255	0.152	0.182
P2	$u_1 > u_2 > u_3 > u_4$	1.4	1.2	1.2	0.177	0.212	0.254	0.356	0.356	0.254	0.212	0.177
P3	$u_2 > u_1 > u_3 > u_4$	1.2	1.6	1.4	0.136	0.190	0.304	0.365	0.304	0.365	0.190	0.136
P4	$u_1 > u_2 > u_3 > u_4$	1.4	1.4	1.2	0.160	0.192	0.269	0.377	0.377	0.269	0.192	0.160
P5	$u_3 > u_1 > u_2 > u_4$	1.4	1.6	1.2	0.147	0.176	0.282	0.395	0.282	0.176	0.395	0.147
P6	$u_2 > u_3 > u_1 > u_4$	1.6	1.2	1.8	0.119	0.214	0.257	0.411	0.214	0.411	0.257	0.119
P7	$u_3 > u_1 > u_2 > u_4$	1.2	1.6	1.4	0.136	0.190	0.304	0.365	0.304	0.190	0.365	0.136
P8	$u_2 > u_1 > u_3 > u_4$	1.6	1.8	1.4	0.112	0.157	0.283	0.453	0.283	0.453	0.157	0.112
P9	$u_1 > u_2 > u_3 > u_4$	1.6	1.6	1.4	0.122	0.171	0.274	0.438	0.438	0.274	0.171	0.122
P10	$u_2 > u_1 > u_4 > u_3$	1.2	1.8	1.4	0.126	0.176	0.317	0.380	0.317	0.380	0.126	0.176
算数平均值									0.328	0.303	0.222	0.147
归一化数值									0.328	0.303	0.222	0.147

4. 关联度计算

根据式 (3-10)、式 (3-11), 计算废旧导轨的质量特征 (直线度、平面度、平行度、垂直度) 与可再制造质量等级 (可重用、可修复、可再制造) 关联度, 计算结果见表 3-8。

表 3-8 关联度数值表

指标	可重用	可修复	可再制造
直线度	-0.548	-0.447	4.189
平面度	-0.559	-0.460	5.750
平行度	-0.487	-0.199	0.331
垂直度	-0.491	-0.027	0.028

则待评价导轨关于可重用、可修复、可再制造等级的综合关联度为

$$k_{\text{重用}}(R_0) = \sum_{i=1}^4 (0.328, 0.303, 0.222, 0.147) \begin{pmatrix} -0.548 \\ -0.559 \\ -0.487 \\ -0.491 \end{pmatrix} = -0.529$$

$$k_{\text{可修复}}(R_0) = \sum_{i=1}^4 (0.328, 0.303, 0.222, 0.147) \begin{pmatrix} -0.447 \\ -0.460 \\ -0.199 \\ -0.027 \end{pmatrix} = -0.334$$

$$k_{\text{可再制造}}(R_0) = \sum_{i=1}^4 (0.328, 0.303, 0.222, 0.147) \begin{pmatrix} 4.189 \\ 5.750 \\ 0.331 \\ 0.028 \end{pmatrix} = 3.194$$

5. 确定等级

待评价导轨 R_0 关于评价等级的关联度最大值为: $k_{\text{可再制造}}(R_0) = 3.194$, 表明该导轨再制造质量等级为可再制造, 该决策结果与 TPX6113 废旧镗床的导轨再制造实际情况相符 (见图 3-2、图 3-3), 验证了该决策方法是有效的、准确的。



图 3-2 再制造前的机床导轨



图 3-3 再制造后的机床导轨

参 考 文 献

- [1] 蒋小利, 江志刚, 张华, 等. 基于实例推理的废旧零部件可再制造性评价模型及应用 [J]. 现代制造工程, 2013 (12): 6-9.
- [2] 张旭刚. 废旧机床再制造性评估与再制造工艺方案决策方法研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- [3] Robert B Aronson. Remanufactured machine tools [J]. Manufacturing Engineering, 2003, 131 (6): 1-7.
- [4] Bras B, Hammond R. Towards design for remanufacturing metrics for assessing remanufacturability [C] //Proceedings of the 1st International Workshop on Reuse. Eindhoven, The Netherlands: 1996.
- [5] 许召龙. 基于绿色制造的产品可再制造性评价决策系统 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2012.
- [6] 张宗翔, 肖素梅, 石宇强, 等. 基于产品特性的可再制造性评价研究 [J]. 机械制造与自动化, 2010, 39 (1): 74-76.
- [7] 张国庆, 荆学东, 浦耿强. 产品可再制造性评价方法与模型 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39 (09): 1431-1436.
- [8] 毛果平, 朱有为, 吴超. 废旧机电产品再制造性评估模型研究 [J]. 现代制造工程, 2009

- (06): 114 - 118.
- [9] 张旭刚, 张华, 江志刚. 基于剩余使用寿命评估的再制造方案决策模型及应用 [J]. 机械工程学报, 2013 (07): 51 - 57.
- [10] 蔡国梁, 李玉秀. 可拓学与系统工程的内蕴关系探析 [J]. 天中学刊, 2003, 02: 8 - 10.
- [11] 郭振华, 郭应焕. 可拓学原理及其应用 [J]. 宝鸡文理学院学报, 2014, 02: 74 - 78.
- [12] 蔡文. 可拓论及其应用 [J]. 科学通报, 1999, 44 (7): 673 - 682.
- [13] 杨春燕, 蔡文. 可拓集中关联函数的研究进展 [J]. 广东工业大学学报, 2012, 29 (2): 7 - 13.
- [14] 杨春燕. 多评价特征基元可拓集研究 [J]. 数学的实践与认识, 2005 (09): 203 - 208.
- [15] 李桥兴, 刘思峰. 基于区间距和区间侧距的初等关联函数构造 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006 (07): 1097 - 1100.
- [16] 史家迎. 机床再制造技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [17] 陈陌, 郭亚军, 于振明. 改进型序关系法及其应用 [J]. 系统管理学报, 2011, 20 (3): 352 - 355.
- [18] 黄保勉. 机床导轨的精度检验 [J]. 装备制造技术, 2013 (11): 153 - 156.
- [19] 周景亮. 机床导轨平行度误差的精确评定 [J]. 机床与液压, 2011, 39 (4): 121 - 122, 130.
- [20] 金明辉. 探究车床导轨修复技术革新 [J]. 科技创新导报, 2014 (25): 37.

第4章 基于TRIZ与可拓理论的再制造质量设计

4.1 废旧机电产品再制造设计概述

废旧机电产品再制造设计是指根据再制造要求，通过运用设计方法和先进技术，对废旧机电产品再制造性及再制造生产过程中的所有生产环节、技术单元和资源利用进行全面规划设计，最终形成最优化再制造方案的过程^[1]。再制造设计是影响再制造产品质量的关键环节，所有的再制造过程均严格按照再制造设计方案执行。再制造设计方案主要包括再制造产品整机性能参数要求与各个废旧零部件的再制造工艺要求。在制定这些要求时，要考虑诸如用户需求等因素，因此关于再制造设计方法的研究对保障再制造产品质量、提升再制造产品市场竞争力具有重要意义。

4.1.1 废旧机电产品再制造设计基本流程

与新产品的设计流程相似，废旧机电产品再制造设计主要分为再制造设计质量参数规划阶段、再制造设计质量参数冲突消解阶段与再制造工艺决策阶段，如图4-1所示，对再制造设计各个阶段的详细阐述如下。

1. 再制造设计质量参数规划阶段

该阶段的目标为对再制造产品的整机性能参数进行规划，即再制造目标的制订。在进行再制造设计质量参数规划时，必须将用户需求与市场反馈融入该过程中。由于整机再制造参数的种类不同，在进行再制造设计质量参数规划时，可将不同种类的再制造设计质量参数进行分类，如加工性能参数、可靠性参数、绿色性参数、人机交互性参数等。每种再制造设计质量参数还包括定量再制造设计质量参数与定性再制造设计质量参数。

通过对废旧机电产品进行再制造设计质量参数规划，能够获得对再制造产品性能的总体评估，如再制造产品在加工精度方面应该达到的要求，综合废旧机电产品现状，在一定程度上能够判断其是否具备再制造的价值。

2. 再制造设计质量参数冲突消解阶段

在进行完废旧机电产品的再制造设计质量参数的规划后，再制造产品的整机性能参数便已初步确定。然而，由于再制造设计的对象为废旧机电产品，其原有结构、功能及材料等很可能对再制造设计质量参数的实现造成阻碍。如针对某废旧机电产品的再制造设计质量参数规定其在加工精度参数方面需达到某一要求，要达到这个要求则需要对其主传动系统中的关键零部件进行高精度的再制造。以机床为

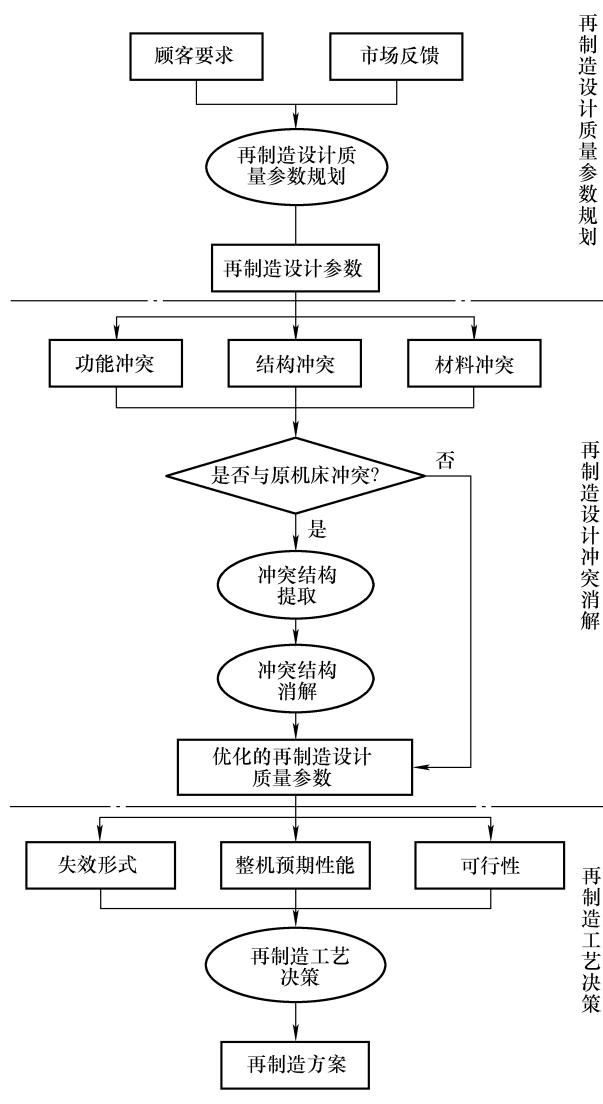


图 4-1 再制造质量设计不同阶段

例，对主传动系统的改造与原主轴箱的结构将会产生冲突，这就需要对既定的质量参数进行调整优化，以便保证再制造设计质量参数实现的可行性。

3. 再制造工艺决策阶段

在再制造质量参数设计与冲突消解阶段完成后，需要对废旧零部件进行再制造工艺决策，以保证再制造设计质量参数的实现。在进行再制造工艺决策时，应根据不同废旧零部件的损伤形式及需要达到再制造设计质量参数而至少应达到的性能要求，制定相应的再制造工艺。此外，不同的再制造工艺具有不同的工艺特征，因此实际的再制造工艺往往是不同再制造工艺的组合形式。

4.1.2 废旧机电产品再制造设计关键技术

1. 用户需求向再制造设计质量参数的转化

用户需求向再制造设计质量参数的转化是再制造设计过程中的难点之一。该过程涉及用户需求的识别提取、关键再制造设计特征的提取及转化等过程。

目前关于用户需求识别的研究主要集中于语义方面的研究,例如郭茜等^[2]提出了一种利用产品规划质量屋(House of Quality, HOQ)中的竞争性信息及卡诺模型调整顾客需求基本重要度的方法,以竞争性重要度、改进优先度与卡诺因子三者对用户需求基本重要度进行修正,获得用户需求综合重要度;白涛等^[3]提出了一种基于模糊卡诺模型的用户需求分类和重要度计算方法,通过引入重要度调整函数,使需求类别与重要度结合来实现企业以较低成本获得较高的市场竞争力;王增强等^[4]提出了基于直觉模糊数的动态分析方法,通过 IFIOWA 算子得到需求指标主观重要度的动态矢量和需求指标客观重要度的动态矢量,结合主观意见和客观市场的平衡系数得到用户需求综合动态重要度;王晓瞰等^[5]提出了一种复杂语言信息环境下质量屋中用户需求重要度的确定方法,采用非平衡语言评估标度集,结合用户需求的水平提高率、卡诺分类及产品的“卖点”等市场竞争性评估信息识别关键用户需求。

只有正确识别用户需求,才能为废旧机电产品的再制造设计提供设计方向,避免盲目的再制造设计导致过度的性能提升及过高的再制造成本,也是保证再制造机床具有充足市场竞争力的关键。

而关于设计特征的提取与转化主要以基于质量屋的工程特性重要度的确定为主,例如许多等^[6]将模糊度引入质量屋,实现了用户语义信息的度量与转换,通过模糊度质量屋的逐级分解,实现了将较为模糊的用户需求信息转化为具体的产品特征信息;李延来等^[7]提出了一种高效的工程特性重要度确定方法,将初始重要度、工程特性重要度和改进目标的重要度通过一定算法进行合成,确定工程特性最终重要度;李延来等^[8]还提出了通过粗糙集来确定用户需求,将不同用户满意度的因素进行融合,进而确定最终重要度;李延来等^[9]还针对用户需求与工程特性之间的关联关系存在不确定性的特点,通过粗糙集对用户需求与不同工程特性之间的模糊关系进行了分析。

可以看出,再制造设计特征重要度计算与用户需求密切相关,只有正确识别用户需求,才能准确提取关键再制造设计特征,从而保证再制造设计质量。然而目前仍然缺乏能够将用户需求转化为具体的再制造产品性能需求的映射方法,加之用户需求往往存在巨大的模糊性与不确定性,导致当前无法准确把握再制造产品的性能提升程度,不利于再制造产品的市场竞争力的提高。

2. 再制造设计冲突消解

再制造设计冲突消解是再制造设计过程中的难点。由于原有废旧机电产品在结

构、功能与材料等方面的固定性导致再制造设计质量参数在实现过程中存在多重不确定因素，从而阻碍再制造设计质量参数的实现。

目前，已有大量学者对设计冲突消解进行了研究，例如陈立杉等^[10]提出了基于相关度的标准满意度冲突消解策略，并通过分析协同设计中的设计权限问题，建立了相应的冲突消解方法；李祥等^[11]同样分析了协同设计中的冲突消解模型，且对模型中的各个方面进行了深入分析；王丽萍等^[12]提出了基于模糊集和多目标进化算法的冲突消解方法，并使用多目标进化算法对冲突问题的多目标模型进行求解，进而通过模糊集理论的满意度函数对解集进行满意度排序；段凯锋等^[13]构建了基于博弈论的产品设计知识重用过程冲突消解模型，对知识重用过程存在的本体冲突、条件冲突、目标冲突进行了深入分析，还引入博弈论的思想提出了三种过程冲突消解方法；王小磊等^[14]提出了基于层次知识匹配的协同产品创新设计冲突消解方法，且将禁忌搜索与生物进化中的精英重组方法相结合对不同层次的知识冲突进行求解。

综上所述，目前大部分设计冲突消解方法的主要关注点为设计流程之间的冲突，而针对设计对象本身具有的结构、功能与材料等方面产生的冲突则缺乏相关研究。有效消除再制造设计冲突是保证再制造设计质量参数实现的基础，否则将使得再制造质量参数规划失去价值。

3. 再制造工艺决策

不同于全新零部件的加工工艺决策，再制造工艺决策由于决策对象是废旧零部件，其原服役工况存在巨大的差异性，导致再制造工艺决策存在巨大的不确定性。目前，已有大量关于零部件加工工艺决策方法的研究，例如黄利江等^[15]提出了融合规则的典型工艺表示与工艺决策方法，该方法规定典型工艺都有与之密切相关的—套独立规则，规则的针对性很强，这便于实现工艺决策的自动化；陈静等^[16]构建了基于实例推理的CAPP工艺决策模型，该模型由计算机进行递进式搜索，并将零件的工艺知识进行分层处理；伍晓榕等^[17]将模糊集引入绿色公益的决策过程中，解决了专家评估中存在的巨大的不确定性，将决策试验与理论推算集成，获得绿色工艺指标的重要度；沈伟等^[18]对产品信息进行了知识建模研究，该知识模型涵盖了产品的基本特征、产品加工工艺及相关的资源知识等，并对知识进行了基于本体的建模。

综合现有工艺决策方法可知，目前尚缺乏面向废旧零部件再制造工艺的决策方法。与传统的工艺决策不同，再制造工艺决策还需考虑原废旧零部件的失效情况、加工后表面与原废旧机电产品母体的配合质量及再制造相关的工艺特征属性。由于废旧机电产品原始服役工况等一系列不确定因素，造成再制造工艺决策存在巨大的不确定性。因此，有必要针对这种不确定性，提出相应的再制造工艺决策方法，从而保证废旧零部件加工质量及最终的再制造产品质量。

4.2 面向用户满意度的废旧机电产品再制造设计质量参数规划

当前，大部分的再制造设计方法能够有效恢复甚至提高再制造机床的性能，却鲜有从用户满意度的角度研究废旧机电产品再制造设计方法。虽然现有再制造设计方法可以使再制造产品达到新产品的性能，但却忽略了用户需求偏离了用户期望，从而导致用户满意度不高，难以达到市场的预期。因此，提出面向用户满意度的再制造设计质量参数规划方法，从用户需求的角度出发，以用户需求为再制造设计导向对再制造设计质量参数进行规划，从而有效提高再制造产品的用户满意度。

4.2.1 废旧机电产品再制造设计质量参数决策框架

废旧机电产品进行再制造设计时，首先应确定再制造设计质量参数，而用户需求是有效确定再制造设计质量参数的决策依据，是实现再制造产品用户满意度最大化的关键。根据市场反馈与市场调研，用户需求主要集中在加工效率、加工精度、再制造成本及绿色性等方面。而用户对于再制造产品的需求描述，往往是模糊的、不确定的，无法直接确定相关的再制造设计质量参数，从而使再制造设计质量参数决策过程带有强烈的模糊性及主观性。基于此，提出基于模糊非线性回归和质量屋的再制造设计质量参数决策框架，如图4-2所示。

对于某一型号的废旧机电产品，首先要根据用户需求确定其再制造设计特征，并根据已有相同型号的再制造产品及其相应的用户满意度评价，由基于再制造设计质量屋的模糊回归法得到用户需求与再制造设计质量参数之间的相关关系及再制造设计质量参数特征之间的自相关关系；其次建立再制造设计规划方程，并将上述模糊关系输入到规划方程中得到使用户满意的再制造设计质量参数，再与现有的再制造设计知识库进行匹配，并最终确定再制造方案；最后，按照该方案进行再制造，并获取相应的用户满意度反馈，以及根据反馈情况对再制造过程进行修正。

4.2.2 用户需求与再制造设计质量参数关系分析

1. 模糊回归方程

自从Zadeh^[19]于1965年提出模糊数学的理论后，模糊数学在全世界范围内得到了快速发展，为处理具有不确定性的事物提供了有效的方法。随后Zadeh于1975年指出对于自然界普遍存在的模糊现象及系统，均可以用含有模糊系统参数的函数表示^[20]。日本学者Hideo在此基础上，提出在回归分析中采用模糊线性函数对模糊现象进行表示并首次系统地建立了基于对称三角模糊数的模糊线性回归数学模型，以式(4-1)表示^[21]：

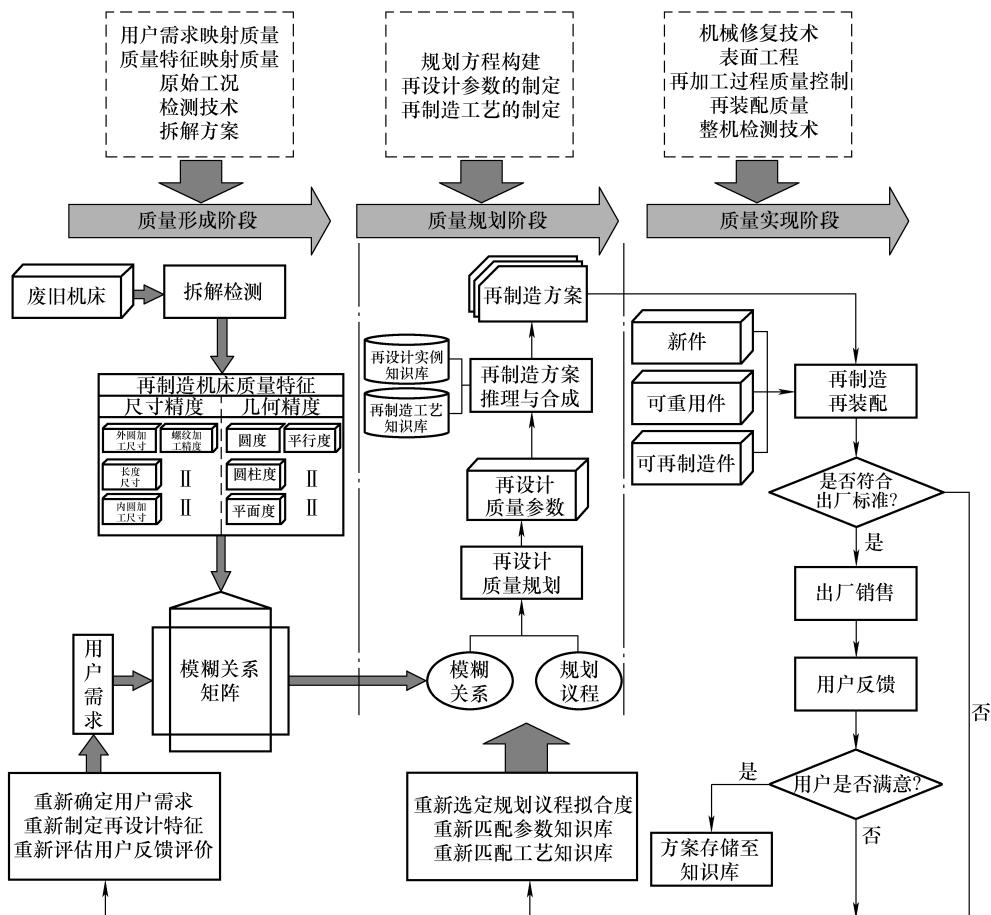


图 4-2 基于模糊非线性回归和质量屋的再制造设计质量参数决策框架

$$\begin{aligned}
 \min J &= c_1 + c_2 + \cdots + c_n \\
 a^t x_i + (1-h) \sum_j c_j |x_{ij}| &\geq y_i + (1-h)e_i \\
 -a^t x_i + (1-h) \sum_j c_j |x_{ij}| &\geq -y_i + (1-h)e_i
 \end{aligned} \tag{4-1}$$

式中： a^t 为三角模糊数的展值； e_i 为输出值 y_i 的展值； x_{ij} 为模糊特征值； h 为拟合度，在后文中将进行讨论。

目前，线性模糊回归已在多个领域得到应用，例如 Chung 等^[22]建立了基于模糊线性回归的评价基准模型；Poleshchuk 等^[23]提出了基于二型模糊集的回归模型；Al-Othman^[24]基于线性模糊回归建立了电力经济性负载模型用于电力设施的选址优化。

近年来，还有学者将模糊回归方程与质量屋相结合用于工程参数的提取与优化。质量功能展开（QFD）是一种使用户满意度最大化的产品配置方法^[25]，由日本质量专家水也滋和赤尾洋二提出后同样得到了迅速发展，并与其他多种方法进行

整合取得了更好的效果^[26]。Kwang - Jae K 等^[27]将模糊线性回归法引入 QFD 中用来确定用户需求及工程特性之间的相关关系及自相关关系；随后 Fung 等^[28]则将模型中的非对称三角模糊数拓展为非对称梯形模糊数。同年，我国学者陈以增^[29]首次提出采用模糊非线性回归法并应用到 QFD 中确定相关关系及自相关关系，以便能够更加真实地反应用户需求与工程特性之间的关系。

近年来，对模糊线性回归模型的研究主要集中于其拟合度的优化问题，如 Liu 等^[30]讨论了在基于对称三角模糊数的线性回归方程中拟合度的选取问题；Liu 等^[31]将基于对称三角模糊数的线性回归方程与拟合度的优化选取进行了整合；Chen 等^[32]将拟合度的优化问题延伸到基于非对称三角模糊数的线性回归方程。

2. 再制造设计质量参数决策

由于用户需求具有不确定性，为了保证从用户需求到再制造设计质量参数转化过程的准确性，在建立质量屋时需要将用户需求转化为决策目标，即加工效率转化为 m_1 项决策目标，加工精度转化为 m_2 项决策目标，再制造成本转化为 m_3 项决策目标，绿色性转化为 m_4 项决策目标，共有 m 项决策目标 O ，每项决策目标对应的

权重为 ω_i ，且 $\sum_{i=1}^m \omega_i = 1$ ，其发散式转化过程为

$$CR^E \rightarrow \begin{cases} O_1^E \\ O_2^E \\ \dots \\ O_{m_1}^E \end{cases}, CR^P \rightarrow \begin{cases} O_1^P \\ O_2^P \\ \dots \\ O_{m_2}^P \end{cases}, CR^C \rightarrow \begin{cases} O_1^C \\ O_2^C \\ \dots \\ O_{m_3}^C \end{cases}, CR^S \rightarrow \begin{cases} O_1^S \\ O_2^S \\ \dots \\ O_{m_4}^S \end{cases}$$

对于多目标的决策问题，用户需求的模糊性导致用户需求与再制造设计质量参数之间的相关关系及不同再制造设计质量参数之间的自相关关系存在诸多不确定性，而模糊非线性回归法是模糊关系定量化处理及分析的有效工具，能够有效解决相关关系中的不确定性带来的影响。因此，提出采用模糊非线性回归法对用户需求与再制造设计质量参数之间的相关关系及不同再制造设计质量参数之间的自相关关系进行分析。根据模糊关系方程，设用户需求与再制造设计质量参数之间的相关关系为

$$\begin{aligned} \widetilde{Y}_i &= A_{i0} + A_{i1}x_{i1} + A_{i2}x_{i2} + \dots + A_{ij}x_{ij} + \dots + A_{in}x_{in} \\ i &= 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned} \quad (4-2)$$

式中， \widetilde{Y}_i 为第 i 项决策目标的顾客满意度，共有 m 项决策目标。

设矢量 $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ 为与决策目标 \widetilde{Y}_i 相关的 n 项再制造设计质量参数矢量， $\mathbf{A} = (\widetilde{A}_{i0}, \widetilde{A}_{i1}, \dots, \widetilde{A}_{in})$ $A = (\widetilde{A}_{i0}, \widetilde{A}_{ii}, \dots, \widetilde{A}_{in})$ 为模糊关系矢量，若用对称三角模糊数 $\widetilde{A}_{ij} = (a_{ij}^c, a_{ij}^s)$ $\widetilde{A}_{ij} = (a_{ij}^c, a_{ij}^s)$ 表示模糊关系，则其隶属度由式 (4-3) 表示为

$$\mu_{\widetilde{A}_{ij}}(a_{ij}) = \begin{cases} 1 - \frac{a_{ij}^c - a_{ij}}{a_{ij}^s}, & a_{ij}^c - a_{ij}^s \leq a_{ij} \leq a_{ij}^c \\ 1 - \frac{a_{ij} - a_{ij}^c}{a_{ij}^s}, & a_{ij}^c \leq a_{ij} \leq a_{ij}^c + a_{ij}^s \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4-3)$$

式中: a_{ij}^c 为第 i 项决策目标中第 j 项再制造设计质量参数对应的模糊关系期望值, 即中值; a_{ij}^s 为波动值, 即展值。

对于 \widetilde{Y}_i , 有

$$\begin{aligned} \widetilde{Y}_i &= \sum_{j=0}^n \widetilde{A}_{ij} x_{ij} \\ &= \widetilde{A}_{i0} + \widetilde{A}_{i1} x_{i1} + \widetilde{A}_{i2} x_{i2} + \cdots + \widetilde{A}_{ij} x_{ij} + \cdots + \widetilde{A}_{in} x_{in} \\ &= (a_0^c, a_0^s) + (a_{i1}^c, a_{i1}^s) x_{i1} + \cdots + (a_{ij}^c, a_{ij}^s) x_{ij} + \cdots + (a_{in}^c, a_{in}^s) x_{in} \\ &= (a_0^c + a_{i1}^c x_{i1} + \cdots + a_{ij}^c x_{ij} + \cdots + a_{in}^c x_{in}, a_0^s + a_{i1}^s x_{i1} + \cdots + a_{ij}^s x_{ij} + \cdots + a_{in}^s x_{in}) \end{aligned}$$

设 $\mathbf{a}_i^c = (a_{i1}^c, a_{i2}^c, \dots, a_{ij}^c, \dots, a_{in}^c)^T$, $\mathbf{a}_i^s = (a_{i1}^s, a_{i2}^s, \dots, a_{ij}^s, \dots, a_{in}^s)^T$,

$\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T$,

则

$$\begin{aligned} \widetilde{Y}_i &= (\mathbf{a}_i^c \mathbf{x}_i, \mathbf{a}_i^s \mathbf{x}_i) \\ \widetilde{Y} &= \sum_{i=1}^m (\mathbf{a}_i^c \mathbf{x}_i, \mathbf{a}_i^s \mathbf{x}_i) \end{aligned} \quad (4-4)$$

则式 (4-1) 变为

$$\begin{aligned} Y &= \sum_{i=1}^m (\mathbf{a}_i^c \mathbf{x}_i, \mathbf{a}_i^s \mathbf{x}_i) \\ \mathbf{a}_i^c &= (a_{i1}^c, a_{i2}^c, \dots, a_{ij}^c, \dots, a_{in}^c)^T \\ \mathbf{a}_i^s &= (a_{i1}^s, a_{i2}^s, \dots, a_{ij}^s, \dots, a_{in}^s)^T \end{aligned} \quad (4-5)$$

其隶属度函数为

$$\mu_{\widetilde{Y}_i(y_i)} = \begin{cases} 1 - \frac{\mathbf{a}_i^c \mathbf{x}_i - y_i}{\mathbf{a}_i^s \mathbf{x}_i}, & \mathbf{a}_i^c \mathbf{x}_i - \mathbf{a}_i^s \mathbf{x}_i \leq y_i \leq \mathbf{a}_i^c \mathbf{x}_i \\ 1 - \frac{y_i - \mathbf{a}_i^c \mathbf{x}_i}{\mathbf{a}_i^s \mathbf{x}_i}, & \mathbf{a}_i^c \mathbf{x}_i \leq y_i \leq \mathbf{a}_i^c \mathbf{x}_i - \mathbf{a}_i^s \mathbf{x}_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4-6)$$

基于非线性模糊回归的用户需求与再制造设计质量参数关系分析, 得出所有模糊关系的模糊输出为最小如图 4-3 所示。

由图 4-4 可知:

$$\frac{1}{1 - \mu} = \frac{\mathbf{a}_i^s \mathbf{x}_i}{k} \quad (4-7)$$

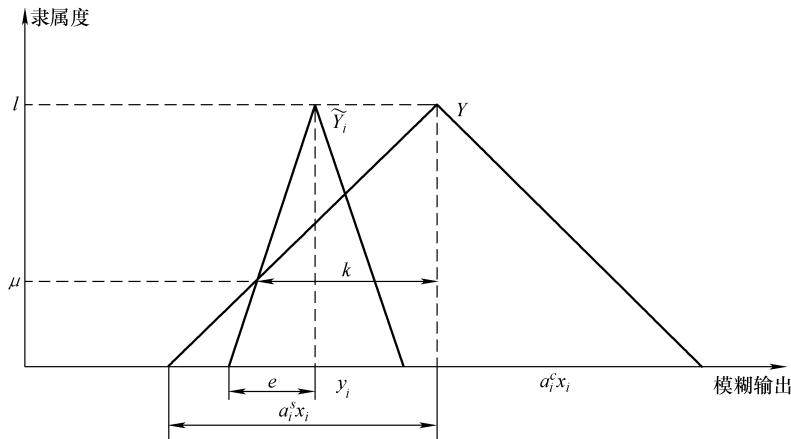


图 4-3 模糊输出

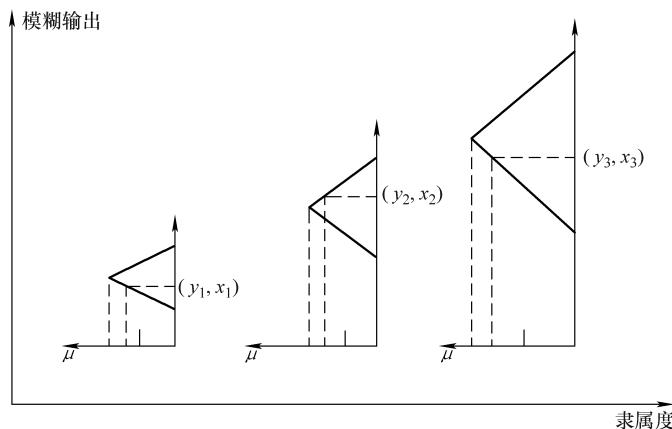


图 4-4 隶属度

其中

$$k = \left| \sum_{i=1}^m a_i^c x_i - y_i \right| + (1 - \mu) e$$

则

$$\mu = 1 - \frac{|a_i^c x_i - y_i|}{a_i^s x_i - e} \quad (4-8)$$

式中, μ 即为隶属度, 令 $\mu \geq h$, 则有

$$\begin{aligned} (1 - h) a_i^s x_i + a_i^c x_i &\geq y_i \\ (1 - h) a_i^s x_i - a_i^c x_i &\geq -y_i \end{aligned} \quad (4-9)$$

表示为式 (4-10):

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{i=1}^m a_i^s x_i \\ \mu_{\widehat{Y}_i(y_i)} & \geq h \end{aligned} \quad (4-10)$$

式中, $h \in (0, 1)$ 为拟合度, 根据实际情况由决策人员主观确定, 与样本数量相关。

将式 (4-9) 代入式 (4-10), 可得

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{j=0}^n (a_{ij}^s x_{ij})^2 + \xi (a_{ij}^c)^2 \\ \text{s. t. } & \begin{cases} (1-h)a_{ij}^s x_{ij} + a_{ij}^c x_{ij} \geq y_i \\ (1-h)a_{ij}^s x_{ij} - a_{ij}^c x_{ij} \geq -y_i \\ a_{ij}^s \geq 0, x_{ij} \geq 0 \end{cases} \\ & i = 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned} \quad (4-11)$$

式中, ξ 为一很小的正数。

通过式 (4-11), 可得第 i 项用户满意度 y_i 与再制造设计质量参数 x_{ij} 之间的模糊关系 \widehat{A}_{ij} , 同理可得不同再制造设计质量参数之间的自相关模糊关系, 由式 (4-12) 表示:

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{j=0}^n (a_{uj}^s x_{uv})^2 + \xi (a_{uj}^c)^2 \\ \text{s. t. } & \begin{cases} (1-h)a_{uj}^s x_{uv} + a_{uj}^c x_{uv} \geq x_{uw} \\ (1-h)a_{uj}^s x_{uv} - a_{uj}^c x_{uv} \geq -x_{uw} \\ a_{uj}^s \geq 0, x_{uv} \geq 0, x_{uw} \geq 0 \end{cases} \\ & u = 1, 2, 3, \dots, l \\ & v, w \in 1, 2, \dots, n \text{ 且 } v \neq w \end{aligned} \quad (4-12)$$

式中, x_{uv} 为在第 u 组自相关关系下, 与 x_{uw} 具有相关关系的再制造设计质量参数, 共有 l 组自相关关系。

4.2.3 改进的再制造设计质量参数规划方程

在得到不同再制造设计质量参数与用户需求之间的模糊关系之后, 可通过再制造产品规划方程得到不同约束条件下的再制造设计质量参数值, 由式 (4-13) 表示:

$$\begin{aligned} V = & V(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} a_{10}^{c1} + a_{11}^{c1} x_1 + \dots + a_{1n}^{c1} x_n = y_i \\ \dots \\ a_{20}^{c2} + a_{21}^{c2} x_1 + \dots + a_{v-1}^{c2} x_{v-1} + a_{v+1}^{c2} x_{v+1} + \dots + a_{2p}^{c2} x_p = x_{uw} \\ \dots \end{cases} \end{aligned} \quad (4-13)$$

式中: $a_{10}^{c1}, a_{11}^{c1}, \dots, a_{1n}^{c1}$ 为相关关系模糊度中值; $a_{20}^{c2}, a_{21}^{c2}, \dots, a_{2p}^{c2}$ 为自相关模糊关系中值; p 表示与 x_w 具有自相关关系的参数 x_v 的个数。

显然, 原始的规划方程中的约束条件均为线性关系。由线性与模糊非线性回归的结果比较可知, 模糊非线性回归方程得出的模糊关系的模糊度普遍比模糊线性回归方程得出的模糊关系高, 由线性回归模型得出的模糊关系的模糊度大部分都趋于 0, 这样的结果使模糊数的应用失去了意义, 也无法真实表达顾客需求与再制造设计质量特征之间的模糊关系。因此传统的规划方程无法充分考虑模糊关系中的模糊度带来的影响, 将模糊关系作为线性关系进行处理, 造成规划方程的灵活度降低。

为了充分考虑模糊关系中模糊度带来的影响, 将模糊度置于原有规划方程的约束中, 以式 (4-14) 表示:

$$\begin{aligned} (1-h)a_{10}^{s1} + \dots + (1-h)a_{1n}^{s1}x_n + a_{10}^{c1} + a_{11}^{c1}x_2 + \dots + a_{1n}^{c1}x_n &\geq y_i \\ (1-h)a_{10}^{s1} + \dots + (1-h)a_{1n}^{s1}x_n - a_{10}^{c1} - a_{11}^{c1}x_2 - \dots - a_{1n}^{c1}x_n &\geq -y_i \end{aligned} \quad (4-14)$$

较于式 (4-13) 而言, 约束方程 (4-14) 考虑了模糊度带来的影响, 更能够真实地描述顾客需求与再制造设计质量参数之间的关系, 因此可得改进的规划方程如式 (4-15) 表示:

$$\begin{aligned} V &= V(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ \sum_{j=1}^k (1-h)a_{ij}^{s1}x_{ij} + \sum_{j=1}^k a_{ij}^{c1}x_{ij} &\geq y_i \\ \sum_{j=1}^k (1-h)a_{ij}^{s1}x_{ij} - \sum_{j=1}^k a_{ij}^{c1}x_{ij} &\geq -y_i \\ \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq w}}^p (1-h)a_{uj}^{s2}x_{uv} + \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq w}}^p a_{uj}^{c2}x_{nv} &\geq x_{uw} \\ \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq w}}^p (1-h)a_{uj}^{s2}x_{uv} - \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq w}}^p a_{uj}^{c2}x_{nv} &\geq -x_{uw} \\ k, p &= 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (4-15)$$

式中: 前两项为再制造设计质量参数 x_{ij} 与第 i 项顾客需求满意度评价 y_i 之间的相关关系约束; k 表示与 y_i 具有相关关系的再制造设计质量参数个数; 后两项为再制造设计质量参数 x_{uv} 与 x_{uw} 之间的自相关关系约束。

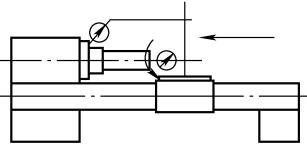
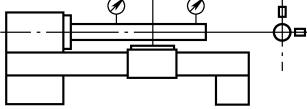
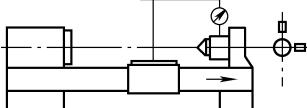
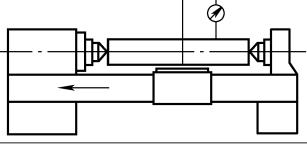
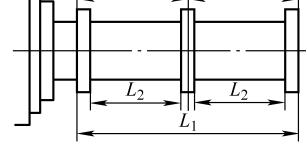
上述改进充分利用了模糊关系中的模糊度, 使再制造设计规划方程具备处理模糊关系的能力, 从而有效解决用户需求中包含的模糊关系, 并使规划出的再制造设计质量参数具备更高的实际意义。此外, 为了有效控制再制造成本, 并使得到的再制造设计质量参数值具有实际意义, 在约束关系中需要加入针对每个参数值的约束关系。

4.2.4 实例分析

以沈阳精新再制造有限公司的废旧 CAK6136 机床再制造过程为例, 对其进行

再制造设计质量参数规划。CAK6136 主要用于轴类、盘类零件的精加工与半精加工，在机械制造领域应用广泛。通过市场对当前销售的再制造 CAK6136 机床的反馈情况来看，用户不仅希望再制造机床仅达到性能的恢复，更希望达到性能的提升；然而，当前该厂的再制造机床往往无法达到期望的市场竞争力。因此需要对现有再制造方案进行改进，并结合顾客调研结果总结出顾客需求，主要为希望提高精车外圆与端面的能力及提高加工较长工件的能力。通过企业技术部门的分析及当前的再制造机床出厂标准，确定其相关的再制造设计质量参数，见表 4-1。

表 4-1 相关的再制造设计质量参数

序号	简图	检验项目	允许误差/mm
1		主轴端部的跳动 a. 主轴轴向窜动 b. 主轴轴肩支撑面跳动（包括轴向窜动）	a. 0.01 b. 0.02
2		主轴轴线对溜板移动的平行度 a. 在垂直面内 b. 在水平面内	a. 在 300 测量长度上为 0.02 b. 在 300 测量长度上为 0.015
3		尾座套筒轴线对溜板移动的平行度 a. 在垂直面内 b. 在水平面内	a. 在 100 测量长度上为 0.02 b. 在 100 测量长度上为 0.015
4		床头和床尾两顶尖的等高度	a. 0.04 且只许尾座高
5		a. 精车外圆精度 b. 圆度 c. 在纵横面内直径的一致性	a. 在 100 测量长度上为 0.02 b. 在 300 测量长度上为 0.03

由表 4-1 可知，项目 1、项目 2、项目 3 及项目 5 均由两项参数组成，而项目 4 包括一项参数。通过当前的市场反馈情况来看目前出厂标准显然已不能满足用户需求。为了提高再制造机床的市场竞争力，需要制定更加严格的出厂标准，同时还需要保证再制造成本不会出现大幅提高的情况。现以变量 x_1 表示项目 1 中的 a 参数，以 x_2 表示项目 1 中的 b 参数，以此类推，至 x_9 表示项目 5 的 b 参数。从该厂已经售出的 6 台再制造机床的反馈情况可以掌握这 6 台机床的不同参数与用户满意度之间的关系。已售出的这 6 台再制造机床相应于表 4-1 的再制造设计质量参数及其相应的用户满意度，可通过质量屋的形式体现，如图 4-5 所示。

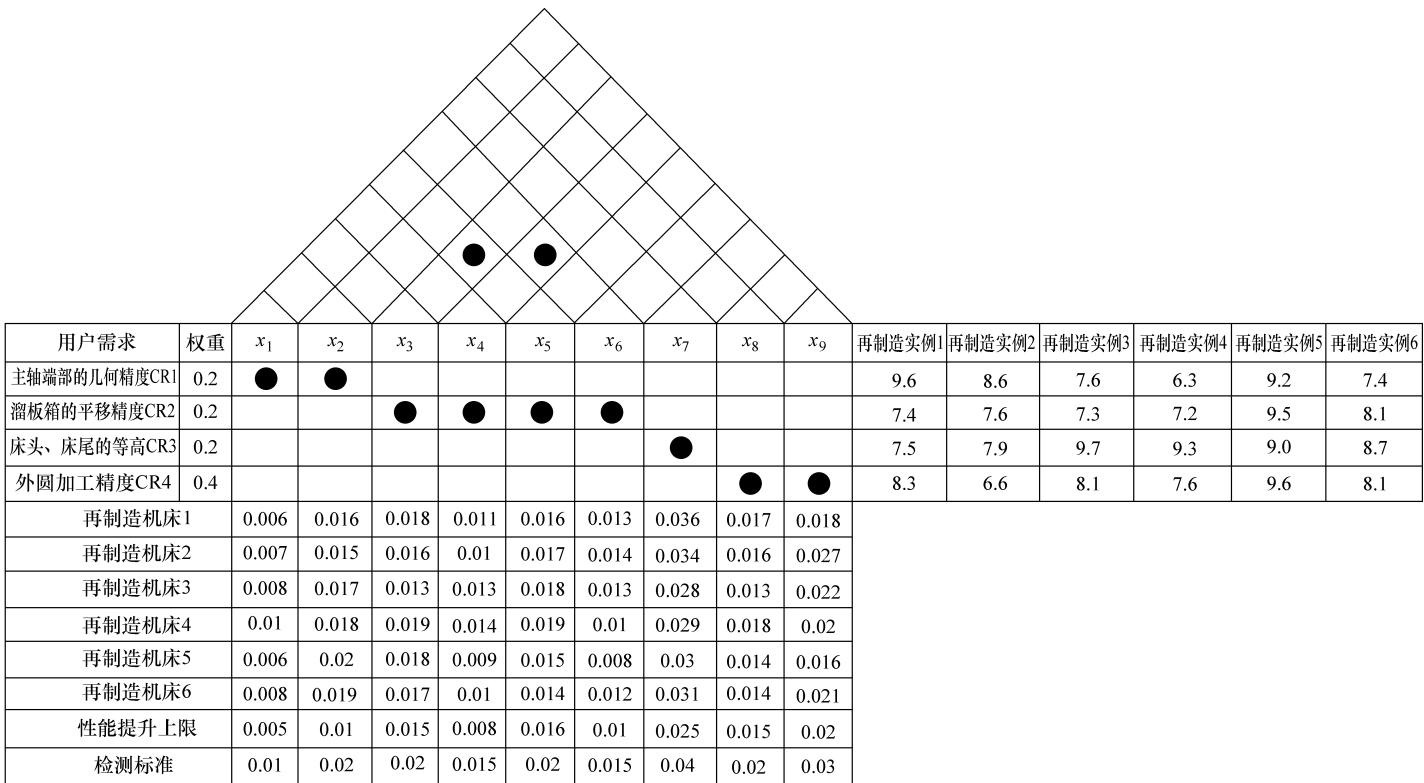


图 4-5 再制造设计质量屋

其中, 用户需求为分解的 4 条由技术语言表述的决策目标, 且每台再制造机床的再制造设计质量参数均为出厂实测值, 其对应的用户满意度评价以 1~10 为基准, 即 10 为最大化评价值。

将质量屋中的数据代入式 (4-11) 中可以得到用户需求与再制造设计质量参数之间的相关关系, 如主轴端部的几何精度与主轴轴向窜动与主轴轴肩支撑面跳动之间的模糊非线性回归方程为 ($h=0.5$)

$$\begin{aligned}
 \min Z &= 36 a_0^2 + 0.045^2 a_1^2 + 0.105^2 a_2^2 + 0.01(a_3^2 + a_4^2 + a_5^2) \\
 0.5 a_0 + 0.003 a_1 + 0.008 a_2 + c_0 + 0.006 c_1 + 0.016 c_2 &\geq 9.6 \\
 0.5 a_0 + 0.003 a_1 + 0.008 a_2 - c_0 - 0.006 c_1 - 0.016 c_2 &\geq -9.6 \\
 0.5 a_0 + 0.0035 a_1 + 0.0075 a_2 + c_0 + 0.007 c_1 + 0.015 c_2 &\geq 8.6 \\
 0.5 a_0 + 0.0035 a_1 + 0.0075 a_2 - c_0 - 0.007 c_1 - 0.015 c_2 &\geq -8.6 \\
 0.5 a_0 + 0.004 a_1 + 0.0085 a_2 + c_0 + 0.008 c_1 + 0.017 c_2 &\geq 7.6 \\
 0.5 a_0 + 0.004 a_1 + 0.0085 a_2 - c_0 - 0.008 c_1 - 0.017 c_2 &\geq -7.6 \\
 0.5 a_0 + 0.005 a_1 + 0.009 a_2 + c_0 + 0.01 c_1 + 0.018 c_2 &\geq 6.3 \\
 0.5 a_0 + 0.005 a_1 + 0.009 a_2 - c_0 - 0.01 c_1 - 0.018 c_2 &\geq -6.3 \\
 0.5 a_0 + 0.003 a_1 + 0.01 a_2 + c_0 + 0.006 c_1 + 0.02 c_2 &\geq 9.2 \\
 0.5 a_0 + 0.003 a_1 + 0.01 a_2 - c_0 - 0.006 c_1 - 0.02 c_2 &\geq -9.2 \\
 0.5 a_0 + 0.004 a_1 + 0.0095 a_2 + c_0 + 0.008 c_1 + 0.019 c_2 &\geq 7.4 \\
 0.5 a_0 + 0.004 a_1 + 0.0095 a_2 - c_0 - 0.008 c_1 - 0.019 c_2 &\geq -7.4 \\
 a_0, a_1, a_2 &\geq 0
 \end{aligned}$$

解以上方程可得: $a_0 = 1.047$, $a_1 = 148.8$, $a_2 = 58.103$, $c_0 = 8.3736$, $c_1 = -15.006$, $c_2 = -7.3944$ 。

因此, 主轴端部的几何精度与主轴轴向窜动与主轴轴肩支撑面跳动之间的模糊非线性关系表示为

$$y_1 = (8.3736, 1.047) + (-15.006, 148.8)x_1 + (-7.3944, 58.103)x_2$$

同理, 可以得到其他用户需求与不同再制造设计质量参数之间的模糊关系及 x_3 与 x_5 、 x_4 与 x_6 之间的自相关关系, 见表 4-2。

此时, 所有用户需求与不同再制造设计质量参数之间的模糊关系及不同再制造参数之间的自相关关系都已得到; 若要得到改进后的再制造设计质量参数值, 需要将上述模糊关系代入产品规划式 (4-15) 中, 在此之前, 还需对目标函数进行定义。一般来说, 产品规划方程的目标函数均为使用户满意度最大化, 因此, 可构建出再制造机床的综合满意度与面向不同用户需求的用户满意度评价之间的函数关系。

若定义当用户满意度评价值为 10 时, 综合满意度为 1; 而用户满意度评价值

为1时,综合满意度为0,则两者之间的函数关系可归纳为如下线性关系为

$$V = \frac{1}{9}y - \frac{1}{9} \quad (4-16)$$

式中: V 为综合满意度; y 为顾客满意度评价。

若存在 n 个用户需求,需要有 n 个用户满意度评价与之相对应。在本例中存在 4 个用户需求,若将这 4 个用户需求按照权重进行分配,可得

$$V = \frac{1}{45}y_1 + \frac{1}{45}y_2 + \frac{1}{45}y_3 + \frac{2}{45}y_4 - \frac{1}{9} \quad (4-17)$$

式 (4-17) 即可作为产品规划方程的目标函数,将图 4-5 中每一台再制造机床针对每一项用户需求的用户满意度评价值代入式 (4-12) 可得这 6 台再制造机床的综合满意度,见表 4-2。

而根据式 (4-15) 可得到如下约束:

$$\begin{aligned} 1.05 + 148.8\left(\frac{x_1}{2}\right) + 58.1\left(\frac{x_2}{2}\right) + 8.37 - 15x_1 - 7.39x_2 &\geq y_1 \\ 1.05 + 148.8\left(\frac{x_1}{2}\right) + 58.1\left(\frac{x_2}{2}\right) - 8.37 + 15x_1 + 7.39x_2 &\geq -y_1 \\ 0.32 + 20.5\left(\frac{x_3}{2}\right) + 29.9\left(\frac{x_4}{2}\right) + 20.3\left(\frac{x_5}{2}\right) + 23.4\left(\frac{x_6}{2}\right) + 11.54 - \\ 1.67x_3 - 5.26x_4 - 3.68x_5 - 329x_6 &\geq y_2 \\ 0.32 + 20.5\left(\frac{x_3}{2}\right) + 29.9\left(\frac{x_4}{2}\right) + 20.3\left(\frac{x_5}{2}\right) + 23.4\left(\frac{x_6}{2}\right) - 11.54 + \\ 1.67x_3 + 5.26x_4 + 3.68x_5 + 329x_6 &\geq -y_2 \\ 0.97 + 31.6\left(\frac{x_7}{2}\right) + 9.55 - 27.6x_7 &\geq y_3 \\ 0.97 + 31.6\left(\frac{x_7}{2}\right) - 9.55 + 27.6x_7 &\geq -y_3 \\ 0.86 + 54.9\left(\frac{x_8}{2}\right) + 43.3\left(\frac{x_9}{2}\right) + 9.07 - 6.06x_8 - 33.9x_9 &\geq y_4 \\ 0.86 + 54.9\left(\frac{x_8}{2}\right) + 43.3\left(\frac{x_9}{2}\right) - 9.07 + 6.06x_8 + 33.9x_9 &\geq -y_4 \\ 0.002 + 0.006\left(\frac{x_3}{2}\right) + 0.016 + 0.007x_3 &\geq x_5 \\ 0.002 + 0.006\left(\frac{x_3}{2}\right) - 0.016 - 0.007x_3 &\geq -x_5 \\ 0.003 + 0.097\left(\frac{x_4}{2}\right) + 0.011 + 0.005x_4 &\geq x_6 \end{aligned}$$

$$0.003 + 0.097\left(\frac{x_4}{2}\right) - 0.011 - 0.005 x_4 \geq -x_6$$

$$0.002 + 0.08\left(\frac{x_5}{2}\right) + 0.016 + 0.004 x_5 \geq x_3$$

$$0.002 + 0.08\left(\frac{x_5}{2}\right) - 0.016 - 0.004 x_5 \geq -x_3$$

$$0.002 + 0.072\left(\frac{x_6}{2}\right) + 0.011 + 0.008 x_6 \geq x_4$$

$$0.002 + 0.072\left(\frac{x_6}{2}\right) - 0.011 - 0.008 x_6 \geq -x_4$$

表 4-2 再制造机床综合满意度

机床序号	综合满意度 V
再制造机床 1	0.803
再制造机床 2	0.718
再制造机床 3	0.792
再制造机床 4	0.735
再制造机床 5	0.932
再制造机床 6	0.785

以上约束包括了用户需求与用户满意度评价之间的模糊关系约束，也包括了再制造设计质量参数 x_3 与 x_5 、 x_4 与 x_6 之间的自相关关系约束。此外，由于再制造综合性能提升并不意味着性能的无限提升，其中，还要考虑再制造性能提升的同时带来的再制造成本及方案可行性等因素的影响。因此，除了上述约束以外，针对每一个再制造设计质量参数还应限定一个性能提升的最大限度值，一般由企业内部根据企业实际情况，综合再制造成本进行制定，见表 4-3。

在对废旧机电产品进行再制造性能提升时，针对每一项再制造设计质量参数的性能提升都不应超过表 4-4 中的给定值，否则会使在制造成本超过所能接受的范围。因此，式 (3-17)、式 (4-15) 得到的所有约束与表 4-4 中的约束值共同组成了产品规划方程。

解此规划方程可得出所有的再制造设计质量参数值为： $x_1 = 0.01\text{mm}$ ， $x_2 = 0.02\text{mm}$ ， $x_3 = 0.019\text{mm}$ ， $x_4 = 0.014\text{mm}$ ， $x_5 = 0.019\text{mm}$ ， $x_6 = 0.01\text{mm}$ ， $x_7 = 0.04\text{mm}$ ， $x_8 = 0.02\text{mm}$ ， $x_9 = 0.02\text{mm}$ ，此时目标函数 $V = 0.98$ 。

和原再制造机床的出厂检测标准进行对比可以发现，主轴轴线对溜板移动的平行度在垂直面内的标准值由原来的 0.02mm 提升为 0.019mm ；在水平面内的标准值由原来的 0.015mm 提升为 0.014mm 。尾座套筒轴线对溜板移动的平行度在垂直面内的标准值由原来的 0.02mm 提升为 0.019mm ；在水平面内的标准值由原来的 0.015mm 提升为 0.01mm 。

表 4-3 模糊关系表

质量参数	截距	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
CR1	(8.371, 05)	(-15, 0.148.8)	(-7.39, 58.1)							
CR2			(-1.67, 20.5)	(-5.26, 29.9)	(-3.68, 20.3)	(-329, 23.4)				
CR3								(-27.6, 31.6)		
CR4									(-6.06, 54.9)	(-33.9, 43.3)
x_3					(0.007, 0.06)					
x_4						(0.005, 0.097)				
x_5				(0.004, 0.08)						
x_6					(0.008, 0.072)					

表 4-4 再制造设计质量参数限值

再制造设计质量参数	精度提升上限/mm
x_1	0.005
x_2	0.010
x_3	0.015
x_4	0.008
x_5	0.016
x_6	0.010
x_7	0.025
x_8	0.015
x_9	0.020

精车外圆时在纵横面内直径的一致性标准值由原来的 0.03mm 提升为 0.02mm。经过改进后的综合满意度为 0.98，均高于表 4-3 所示的现有的 6 台再制造机床。

此外，在建立再制造设计规划方程时，若按照传统的建立方法，即只考虑模糊关系中值的影响，根据式 (4-13) 可得如下约束为

$$\begin{aligned}
 & 8.37 - 15x_1 - 7.39x_2 \geq y_1 \\
 & 11.54 - 1.67x_3 - 5.26x_4 - 3.68x_5 - 329x_6 \geq y_2 \\
 & 9.55 - 27.6x_7 \geq y_3 \\
 & 9.07 - 6.06x_8 - 33.9x_9 \geq y_4 \\
 & 0.016 + 0.007x_3 \geq x_5
 \end{aligned}$$

同样，以式 (4-17) 为目标函数，以表 4-4 中再制造设计质量参数为提高上限，以相同的方法可得出再制造设计质量参数为： $x_1 = 0.005\text{mm}$ ， $x_2 = 0.01\text{mm}$ ， $x_3 = 0.016\text{mm}$ ， $x_4 = 0.011\text{mm}$ ， $x_5 = 0.016\text{mm}$ ， $x_6 = 0.011\text{mm}$ ， $x_7 = 0.025\text{mm}$ ， $x_8 = 0.015\text{mm}$ ， $x_9 = 0.02\text{mm}$ ， $V = 0.81$ 。将通过改进的规划方程得出的结果、通过传统规划方程得出的结果、与表 4-4 中的提升极限的差值结果对比汇总于表 4-5。

表 4-5 结果对比

再制造设计质量参数	提升上限/mm	改进规划方程/mm	传统规划方程/mm
x_1	0.0050	0.0050	0.0000
x_2	0.0100	0.0100	0.0000
x_3	0.0150	0.0040	0.0010
x_4	0.0080	0.0060	0.0030
x_5	0.0160	0.0030	0.0000
x_6	0.0100	0.0000	0.0010
x_7	0.0250	0.0015	0.0000
x_8	0.0150	0.0050	0.0000
x_9	0.0200	0.0000	0.0000

从对比结果来看, x_1 、 x_2 、 x_5 、 x_7 、 x_8 、 x_9 的值与表 4-4 中的性能提升极限值相等, 而 x_3 与 x_6 均与极限值相差很小。尽管由传统规划方程得出的再制造设计质量参数, 在性能提升方面要比由改进规划方程得出的再制造设计质量参数高, 然而其最终满意度仅为 0.81, 明显低于构建的规划方程得出的用户满意度 (0.98)。

实践表明: 我们提出的基于非线性回归的再制造设计改进质量规划方程, 不仅能够显著提高用户对再制造机床的满意度, 还能有效缓解再制造性能提升与再制造成本之间的矛盾。

4.3 基于可拓发散树与 TRIZ 的废旧机电产品再制造质量设计

废旧机电产品再制造设计冲突消解能够有效摆脱原废旧机电产品与再制造设计质量参数之间产生的设计冲突。下面以面向废旧机电产品再制造设计为目标, 引入可拓发散树与 TRIZ 来解决废旧机电产品再制造设计中遇到的设计冲突问题, 并构建再制造设计冲突消解流程框架。在此基础上, 提出了基于可拓发散树与 TRIZ 的废旧机电产品再制造设计冲突消解方法, 给出了解决再制造设计中存在的物理冲突与技术冲突的解决方案; 并通过基于 TRIZ 的创新原理对形式化的废旧机电产品结构物元进行可拓变换与发散并形成发散树。最后, 通过优度评价法对发散树中的候选物元进行优度评价, 以确定具有较高优度值的候选物元作为再制造设计参考方案。

4.3.1 废旧机电产品的再制造设计冲突

1. 设计冲突的内涵

设计是把一种计划、规划、设想通过某种形式传达出来的活动过程。人类通过劳动改造世界、创造文明、创造物质财富和精神财富, 而最基础、最主要的创造活动是造物。设计便是针对造物活动进行的预先计划, 即可以把任何造物活动的计划技术和计划过程理解为设计。然而在设计过程中, 有时为了提高设计目标的某一设计特征, 需要对整体设计结构进行调整优化; 在此过程中, 可能对另外一些设计特征的性能造成不利影响, 由此便形成了设计冲突。

关于设计冲突的解决方案多种多样。Jenab 等^[33]针对在概念设计阶段产生的设计冲突, 提出了一个多层次设计结构模型, 将多种决策准则整合到图表中, 得到冲突消解结果; Lebedieva 等^[34]研究并分析了协同设计中的冲突类型、来源及解决方法; Ostrosi 等^[35]基于模糊集理论建立了解决协作式设计和分布式设计中存在的设计冲突; Yan 等^[36]提出了公理化设计冲突表达模型, 对设计冲突中各个要素之间的关系进行了分析; Gutierrez 等^[37]提出了能够识别产品环境系统冲突的系统化算法, 弥补了传统 EBD 方法无法识别设计冲突的问题; Hisarciklilar 等^[38]提出在协同设计中采用统一的设计接口, 并构建了子系统连接表示通用接口方案进行系统的

界面表示方法；Wits 等^[39]提出为了最大程度的消解设计冲突，在产品开发过程中应选择具有模块化和整体设计特点的产品架构；Heussen 等^[40]分析了信息控制系统设计中存在的冲突，通过标准化的建模语言，构建了面向早期需求检测的控制结构模型，能够在设计初期识别潜在设计问题；Shimomura 等^[41]提出了使服务设计者能够识别当前存在的设计冲突及初期消解策略的方法，对 PSS 系统的效率具有改善作用；Troitsky^[42]讨论了在计算机辅助设计与产品开发中的设计冲突问题，并构建了能够早期预测潜在冲突风险的模型；Canbaz 等^[43]讨论了在分布式设计系统中由于设计目标和异构设计人员在设计系统交互的工作程序中的任何不一致而导致的设计冲突，并提出了基于集合的设计和约束编程技术；Meijers 等^[44]提出通过有效的变更管理、沟通管理、质量管理、风险管理流程来检测和管理并行设计过程中遇到的设计冲突。

可以看出，设计冲突的消解对设计质量具有重要影响。因此，再制造设计过程同样需要相应的设计冲突解决方案以保证再制造设计质量。

2. 再制造设计冲突的内涵

对废旧机电产品进行再制造设计，应对其原有性能参数进行分析，综合用户需求、再制造成本、再制造难易度、再制造周期、废旧零部件寿命周期等因素制定相应的再制造设计目标参数。再制造设计的关键在于其最终方案应达到期望的用户满意度，这就需要设计者根据用户需求对废旧机电产品原有性能做出提升。

然而，与设计新产品不同，由于再制造设计的面向对象为废旧机电产品，其原有结构、功能及材料等方面均以固定，为了实现再制造设计目标参数，有时要对原有结构等方面做出改变。如果为了某个再制造设计质量参数而必须要将废旧机电产品原有结构进行重新规划，而造成的其他再制造设计质量参数对应的性能下降，则将会产生再制造设计冲突。目前，已有学者对这种冲突问题进行了研究，如陈建等^[45]采用转换桥方法对油锯的绿色设计进行冲突消解；阳斌等^[46]采用公理化设计及 TRIZ 对变速箱进行再制造设计冲突消解。但却鲜有面向废旧机电产品再制造设计的冲突消解方法，这使再制造产品仍旧缺乏足够的市场竞争力。

3. 再制造设计冲突的类型

再制造设计冲突的类型主要包括结构冲突、功能冲突及材料冲突，而前两种冲突最为常见。

(1) 结构冲突 结构冲突是再制造设计冲突中最常见的冲突类型。任何对原有废旧机电产品结构进行的改变均有很大概率造成再制造设计冲突。例如在废旧机床的数控化再制造过程中，需要将原废旧机电产品的进给系统全部移除，由伺服进给电动机驱动。对于横向进给系统而言，其丝杠与原废旧机床床身的配合就会形成再制造设计冲突，因此要对原丝杠轴承孔及电动机座进行重新设计，如图 4-6 ~ 图 4-8 所示。

同理，对于横向进给系统，要充分考虑伺服电动机的机座与原废旧机床床身之间的配合冲突，根据床身特点对伺服电动机座进行重新设计，如图4-9、图4-10所示。

(2) 功能冲突 功能冲突同样在废旧机电产品的数控化再制造过程中尤为常见。以机床为例，原有废旧机电产品绝大部分功能均需手动操作，而要实现数控机床的功能，必须在原废旧机电产品的基础上增添相应的数控设备，如操作面板、编码器、无级变速电动机等控制与驱动设备，而上述设备的安装与固定往往就会和原废旧机电产品的原有功能产生冲突。

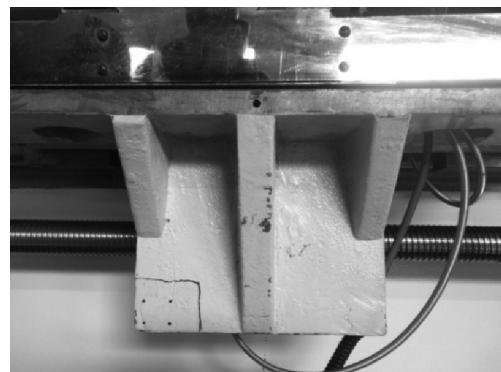


图 4-6 丝杠支撑座

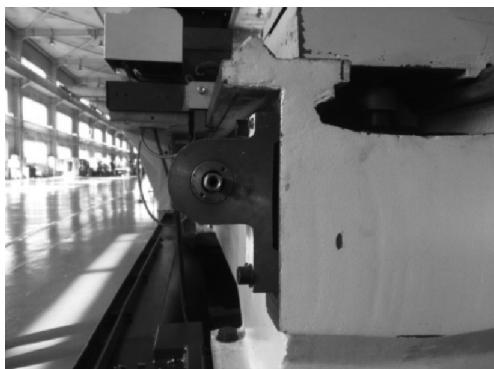


图 4-7 丝杠轴承孔



图 4-8 进给电动机座

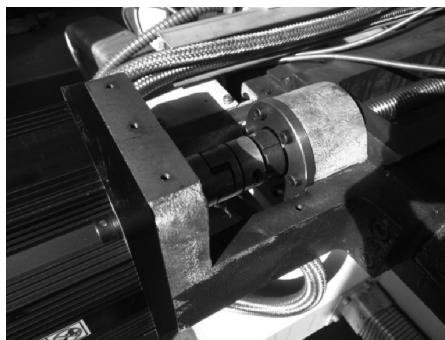


图 4-9 横向进给电动机座



图 4-10 横向进给系统

例如在安装编码器的过程中，要充分考虑原废旧机电产品与编码器之间的兼容性，编码器与原废旧机电产品主轴箱之间的固定方式等因素，如图 4-11 所示。

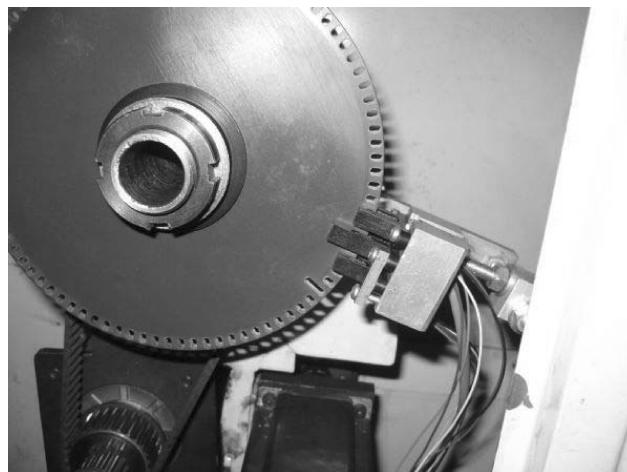


图 4-11 主轴编码器

又如在主轴箱变速功能的改造过程中，若要实现无级变速，既可以对原主传动结构进行重新规划，又可以直接通过无级变速电动机通过电主轴等先进传动系统直接控制，这就在再制造机床的功能的实现方面产生了再制造设计冲突。

4.3.2 设计冲突消解方法分析

1. TRIZ 理论

TRIZ 是基于大量发明专利研究的问题解决、分析、创新与预测工具，由苏联发明家 Altshuller 及其团队提出^[47]。TRIZ 是理解和定义具有挑战性问题的系统方法，由于困难的问题通常需要创造性的解决方案，因此 TRIZ 提供了一系列的策略和工具，以找到这些具有创新性的解决方案。早期关于 TRIZ 的大量研究表明，需要创新性解决方案的问题其主要特征在于必须克服其包含的相互矛盾的元素之间存在的制约关系。因此，基于 TRIZ 的主要目标在于系统的应用一系列策略和工具来找到适当的解决方案，以折中或权衡两个相互矛盾元素之间的制约关系。

20 世纪 70 年代初，在经过 20 多年涵盖了成千上万个专利的研究后，Altshuller 对获得创新解决方案模式的观点得到了验证，并提出了基于 40 个发明原理的创新方法。40 个发明原理几乎能够对所有专利中包含的发明方法进行解释。根据这种方法，“概念解决方案”可以通过对需要解决的矛盾进行定义来找到，并且系统地考虑对 40 个原理进行选择决策，以克服问题中“矛盾”的特定解决方案，从而得

到更接近“最终理想结果”的解决方案。

矛盾矩阵是基于40个原则的延伸而演变的工具之一，其中根据可能彼此影响的39个因素的列表将问题的矛盾元素分类。39个元素的每个配对的组合以矩阵（如静止对象的权重、移动对象的能量使用、修复的容易程度等）来表示。矩阵的列表示恶化的元素，矩阵的行表示改善的元素，以已经发现解决两个元素之间的冲突的先例作为解决方案。矩阵中的相关单元通常包含子集，并且在获得两个元素之间矛盾的创造性解决方案中，通常会应用一组或多组原则。

随着物理冲突和分离原则逐渐成为TRIZ的核心部分，40个发明原理依然是TRIZ中最常用的创新方案解决法的基础，并仍然在广泛使用。Yuri^[48]探索了TRIZ与公理化设计相结合的方法，指出TRIZ更适用于大批量生产的冲突消解，而公理化设计则应用于生产系统的组织优化；Tom等^[49]指出面向维修工程师的37个指导方针仅提供了实现目标，而没有规定实现方法，并基于此提出了三个阶段研究计划，将每个指导方针转化为TRIZ工程参数，并找出创新原理以实现目标；Dmitriy^[50]通过分析TRIZ的基础概念，指出其技术系统与现代科技之间的关联性，为TRIZ的未来发展指出了方向，以适应不断变化的科技环境；Abubakr等^[51]将TRIZ与遗传算法结合，通过计算机辅助创新软件AEGIS进行图形设计创新，从软件得到的结果可以看出，这样的方法可以得到更具备创新性的设计信息，并能有效加速图形设计过程；Stefano^[52]构建了将TRIZ与QFD相结合的相互设计准则框架，并将此框架融入Microsoft Access中，最终建立了从收集顾客需求到获得解决方案的冲突消解流程；Ahmed等^[53]提出了基于TRIZ的产品生态设计方法及其相应的定性评估矩阵，并通过大量生态设计相关专利表明该方法可以帮助设计者缩小创造思维的思考范围，从而有效提高创新针对性及设计效率；Liu等^[54]将区间灰数、QFD及TRIZ结合，提出了灰色QFD来帮助设计者识别关键质量特性，并提供潜在的创新方向。

在TRIZ的应用方面，Lorenzo等^[55]以飞船在平流层的膨胀效应为例，分别应用TRIZ与OTSM-TRIZ对飞船结构进行冲突消解，并列出了两种方法的主要区别，以及证明了OTSM-TRIZ面对复杂问题的有效性；Christian等^[56]分析了超过200多个TRIZ应用案例，总结出企业需要TRIZ的原因、TRIZ如何与其他方法结合及企业之间如何交流TRIZ的成功案例；Ivan等^[57]针对TRIZ在建筑领域鲜有应用的现象，指出了TRIZ对建筑结构、材料、生产管理及价值工程等领域的潜在应用价值，并以28个建筑工程实例说明TRIZ可以解决诸多建筑工程中遇到的难题；Victor等^[58]通过对面向对象的编程范式的深入分析，找出范式中存在的冲突，指出了TRIZ能够有效解决这些冲突，并以Simula-67等为例，建议将TRIZ融入面向

对象的编程语言；Wang 等^[59]针对锌液腐蚀测试仪中出现的严重氧化而导致产生大量锌渣，从而影响测试结果的问题，并应用 TRIZ 对现有测试仪进行结构创新以降低氧化效应，其结果表明通过结构创新使氧化效应降低了 68%；Abramov 等^[60]将 TRIZ 引入到化学工业中，通过相关数据分析以实例指出 TRIZ 可以解决化学工业中存在的冲突消解问题，并能有效提高化工产品质量；Chen, Chi - Kuang^[61]将 TRIZ 应用于服务创新，即通过创新矩阵对 ageing - in - place 服务体系进行了改进。

通过以上研究综述可以看出，目前 TRIZ 已应用于多个领域，并且在各自领域中均取得了诸多富有价值的成果。

2. 可拓理论

可拓学是由我国学者蔡文于 1983 年提出的一门原创性横断学科，其以形式化的物元模型，讨论了事物拓展的可能性及开拓创新的规律与方法，并用于解决矛盾问题，即在现有条件下无法实现既定的设计目标的问题^[62-64]。可拓学的核心是基元理论、可拓集及可拓逻辑，其理论框架如图 4-12 所示。

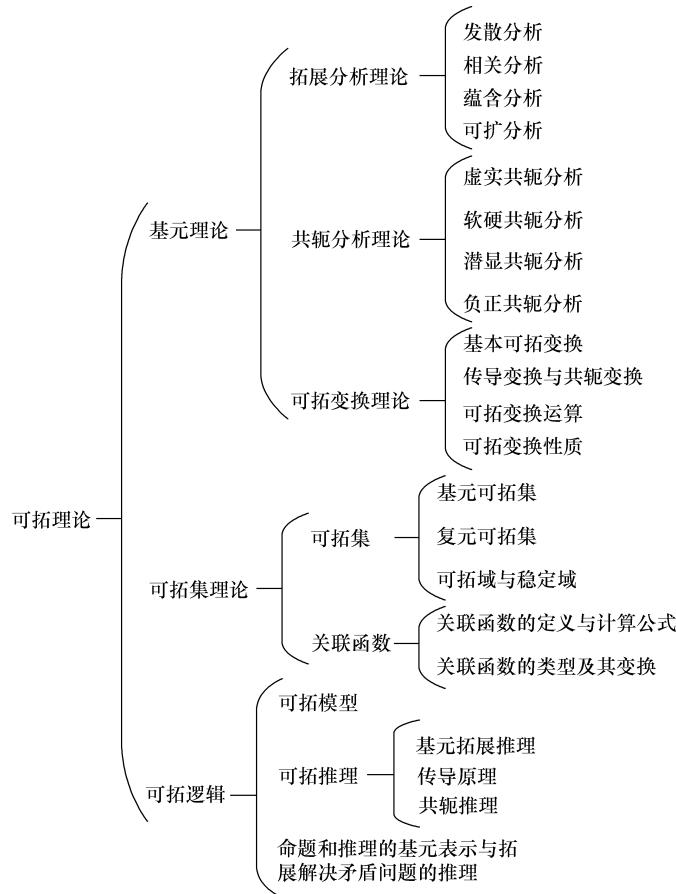


图 4-12 可拓理论框架

可拓方法是在可拓学的思想指导下产生的，主要包括拓展分析方法、共轭分析方法、可拓变换方法、可拓集方法、优度评价方法及可拓思维模式。

(1) 拓展分析方法 可拓学把矛盾处理过程中的事、物和关系看成可拓展的。解决矛盾问题就是根据事、物和关系的可拓展性，对问题的目标和条件通过某种变换以实现。为了标准化矛盾问题的解决过程，采用基元作为描述事物的工具。

(2) 共轭分析方法 事物中包括的物质性、系统性、动态性和对立性成为事物的共轭性。利用物元关系作为形式化的工具，对物的虚部与实部、软部与硬部、潜部和显部、负部和正部进行形式化分析的方法称为共轭分析方法，其立足整体论与还原论的结合，为事物的分析提供了崭新的视角。

(3) 可拓变换方法 变换可以使矛盾问题得到转化。从变换方式来讲，包括基本可拓变换方法、变换的运算方法、变换的复合方法和传导变换方法；从变换对象来讲，包括论域的变换、关联准则的变换方法及论域中元素的变换方法。

(4) 可拓集 可拓集是从动态的，转化的角度对研究对象进行分类、识别和聚类的方法。可拓集是以可拓变换函数和关联函数为基础的集合。

(5) 优度评价方法 优度评价方法是综合多种衡量标准对某一对象，方案或策略的优劣进行综合评估的方法。在优度评价过程中，不仅要考虑评价对象的多个方面，还要考虑评价对象的动态特征及其未来的可变性，并对潜在的利弊进行评估。可拓优度评价利用关联函数来计算各个衡量条件符合要求的程度，由于可拓关联函数的值可正、可负，因此可拓优度评价的结果更加符合实际。

(6) 可拓思维模式 可拓思维模式包括菱形思维模式、逆向思维模式、共轭思维模式和传导思维模式。不同的思维模式具有不同的特点，例如菱形思维模式将拓展方法与收敛方法结合，通过将模型化、定量化结合来解决矛盾问题。

目前，可拓学已被广泛应用于诸多领域的评价与决策模型中，如张晔等^[65]运用熵权可拓物元模型，定量评价2012年湖南省土地市场成熟度；杨贵军等^[66]提出了基于熵权-可拓理论的高炉软熔带位置状态两级模糊综合评判的新方法，实现了可拓评价与层次分析法的结合；王体春等^[67]提出了基于灰色系统理论和可拓理论相融合的多属性可拓灰关联决策方法，将灰色物元引入可拓学中；李泓泽等^[68]构建了改进变权物元可拓模型的电能质量综合评价模型，对电能质量等级进行评估。

根据不同种类的变换包括可拓域与稳定域。此外，可拓学还建立了距和侧距的概念用以描述不同可拓集之间的关系。

3. 公理化设计理论

公理化设计方法由Suh教授于1990年出版的《设计原理》中正式提出，其目的在于对于产品目标特征要求，设计方案能否满足所有产品功能要求、满足的程度如何及不同产品设计方案的决策等问题。公理化设计的基础是“域”，包括用户域、功能域、物理域和过程域，如图4-13所示。

(1) 用户域 用户域即用户需求，无论任何形式的设计方法都要根据用户需

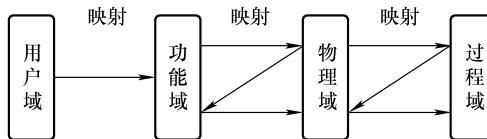


图 4-13 公理化设计域

求制订相应的设计方案,后续设计特征的选取等过程都要根据用户需求进行。

(2) 功能域 功能域为产品的目标功能,基于用户域确定。此外,功能域还包含产品设计约束,所有的功能需求都要满足设计约束。

(3) 物理域 物理域描述了产品功能域中不同功能参数的量值。物理域的确定需考虑设计约束以及设计成本等限制因素。

(4) 过程域 过程域定义了产品设计由功能域向物理域的转化过程。公理化设计的判别公理主要有独立性公理和信息化公理。

独立性公理:当产品有两个或两个以上功能需求时,设计方案必须在满足所有功能需求的同时,不影响其他的设计质量参数。这就要在设计质量参数的定义过程中,既能选择满足要求的设计质量参数,同时又能够保持功能的相互独立。对特定功能需求与其设计质量参数之间关系的分析能够确定功能要求之间是否保持独立。

信息性公理:在所有满足要求的公理化设计中,信息含有量最少的设计为最优化设计。信息性公理可以作为各种设计方案优劣的评价准则。根据公理 2 的要求,在产品的设计过程中应尽量保持产品设计信息最小化原则,以使设计过程得到简化,同时减少各个因素设计中各个因素可能的影响,最终降低产生耦合设计的可能性。

目前公理化设计的大部分应用主要是与其他设计方法相结合,例如 Liu 等^[69]将公理化设计与胡克模型结合,提出了面向用户惯性的产品设计方法; Modrak 等^[70]通过将公理化设计与熵来衡量大规模定制化生产系统的复杂度; Ashtiany 等^[71]将公理化设计与质量功能展开与健壮性设计相结合,解决了新产品设计中往往对传统特征忽略的问题; Banciu^[72]通过功能独立性准则,应用公理化设计对连接结构进行设计并对不同结构进行决策; Lee 等^[73]将公理化设计应用到逆向工程中,构建了一个全新的设计改善模型及其对应的定性评估决策; Girgenti 等^[74]构建了面向用户满意度的开发模型,通过基于公理化准则的评价,对产品是否满足用户要求进行决策; Salonitis^[75]提出了基于公理化设计的增材制造设计方法,以改善传统设计方法不能充分考虑增材制造工艺优势的问题; Borgianni 等^[76]指出公理化设计能够以最简单的方式分析问题或结构,而 TRIZ 用来解决固有的设计冲突,基于两者的相关性,提出了公理化设计与 TRIZ 相结合的设计方法。

4. 设计冲突消解方法综述

前述设计冲突消解方法中的每一种方法对解决冲突的角度均不相同。TRIZ 理论侧重于主观需求与客观实际存在一定程度的不兼容性的情况,即设计矛盾; 可拓

理论侧重于研究事物的可变换性，强调从设计对象自身出发；而公理化设计则强调为设计活动构造一个完整的实用性框架，独立公理和信息公理为设计的合理性和优劣及方案的选择提供了有效的判断标准。

同时，不同的冲突消解方法也存在一定的局限性。TRIZ的局限性主要体现在以下几个方面^[77]：

- 1) 由于TRIZ无法有效获取具体的设计目标，也就无法确定设计需求。
- 2) 目前还无法应用于概念设计阶段。
- 3) 其物质场分析模型等对复杂问题的建模能力偏弱，即难以处理过于复杂的设计冲突问题。
- 4) 由于TRIZ过于依赖经验，故缺少有效的方案评估与决策方法，造成了方案的可行性存在不确定性。
- 5) TRIZ目前还没有提出具体化的设计流程，故无法引导设计者对所有设计阶段进行有效控制。

可拓理论的局限性主要体现在以下几个方面^[78]：

- 1) 可拓学将设计冲突形式转化为物元模型，与TRIZ相比，其在解决工程实际问题的流程中存在明显差别。
- 2) 可拓学中对形式化的模型变换较为抽象，即与工程实际结合的不够紧密，故造成有时无法消解设计冲突。

公理化设计的局限性主要体现在以下几个方面：

- 1) 公理化设计追求功能需求的独立性，然而其又缺少使需求保持独立性的方法。
- 2) 如果设计系统过于复杂，某一项设计参数的调整对另一项设计参数是否具有影响，需要依赖相应的数学、物理域及化学知识；而且如果系统存在过多的设计参数时，需要通过大量的计算与评估来确定两者之间相互的影响关系，造成公理化的应用过程复杂，甚至难以实现。
- 3) 信息公理无法详细描述具体的设计需求信息。

总之，对废旧机电产品再制造设计而言，其设计冲突主要来源于原废旧机电产品与要实现的再制造设计质量参数之间。因此，这种冲突更需要追求创新性的解决方案，而TRIZ恰好能够满足对传统结构进行创新性规划的要求。然而，由于TRIZ严重依赖于设计者的思维，而且矛盾矩阵所讨论的仅仅是两个相互冲突的设计元素，还无法考虑整个系统的复杂性，这就直接造成应用TRIZ进行再制造设计时可能出现如下问题：

- 1) 当前废旧机电产品及废旧零部件的再制造设计过程缺乏系统性、规范性，致使再制造设计目标无法有效转化为TRIZ工程特征，造成了再制造设计效率低下，设计思路混乱等现象。
- 2) 由于废旧机电产品在原有结构、功能与材料等方面造成的阻碍，在一定程

度上制约了 TRIZ 创新原理的实施, 进而造成 TRIZ 创新原理向创新方案转化的过程效率低下, 甚至无法转化。

综上所述, 可拓变换通过置换、增删、扩缩、分解、复制等基本变换及积变换、与变换、或变换、逆变换等基本运算, 能将不可知问题变为可知问题。可见应用可拓学对 TRIZ 中的设计冲突问题进行拓展变换, 具有了一定的优势。而且可拓学将设计冲突形式转化为物元模型, 其仅仅针对相应的物元模型进行可拓变换, 并未增加系统的复杂性, 更不会产生不可预知的问题, 即使物元模型具有更高的适用性^[79,80]。因此, 可拓理论是对 TRIZ 很好的补充, 两者的结合充分适应了废旧机电产品再制造设计中的冲突消解。

4.3.3 基于可拓发散树与 TRIZ 的再制造设计冲突消解方法

1. 再制造设计冲突消解框架

根据上述设计冲突消解方法综述, 在充分考虑了不同方法之间的优势与局限后, 我们提出了基于可拓发散树与 TRIZ 的再制造冲突消解框架, 如图 4-14 所示。

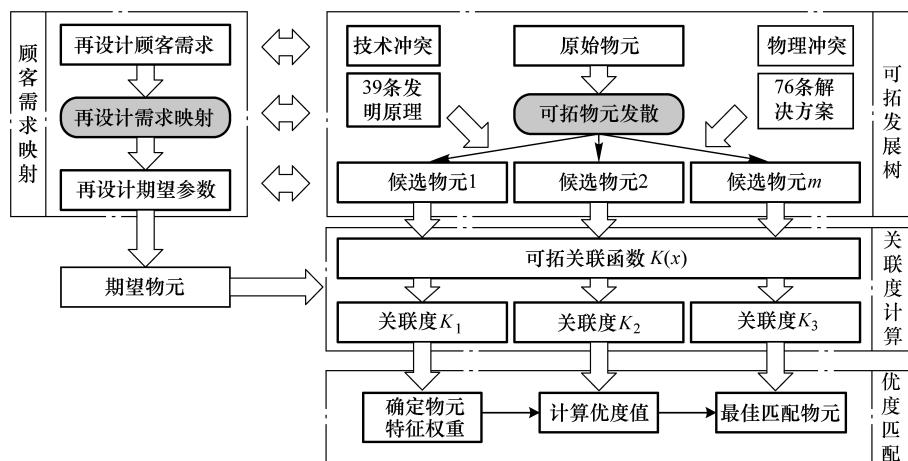


图 4-14 基于可拓发散树与 TRIZ 的再制造冲突消解框架

该框架将 TRIZ 理论与可拓理论相结合, 以 4.2.4 得到的最大化满足用户需求的再制造设计质量参数为基础, 通过对可能产生冲突的再制造设计质量参数进行分析, 并将其对应结构形式化表示为结构物元。通过分析再制造设计冲突的类型, 即若为技术冲突, 则提取产生冲突的元素, 并通过 TRIZ 矛盾矩阵得到相应的创新原理; 若为物理冲突, 则通过物质-场模型选取适当的解决方案。在此基础上, 根据得到的 TRIZ 创新原理, 对形式化的废旧机电产品结构物元进行可拓变换与物元发散, 最终得到若干候选物元。通过可拓关联函数, 分别计算各个候选物元与期望物元之间的关联度, 并通过可拓优度评价决策出最佳匹配物元作为再制造设计方案的参考。

2. 废旧机电产品结构物元的构建与变换

为了达到综合性能提升与充足的市场竞争力,需要对废旧机电产品的特定结构进行重新规划。为了降低原废旧机电产品结构、功能及材料等方面对再制造设计带来的限制,宜采用一种标准化集成的方法。可拓学通过形式化的模型分析事物拓展的可能性及创新性规律,有益于创新性设计方法的规范化与流程化。形式化的废旧机电产品结构物元可表示为

$$M = \begin{bmatrix} O & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ \cdots & \cdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix}$$

其中, O 为需要进行创新性设计的废旧机电产品结构, 特征矢量 $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ 为结构 O 对应的相关特征; 特征值矢量 $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 为每个特征对应的定量值或定性值。

在对废旧机电产品特定结构进行形式化过程中, 需要选取其与特定结构相关的特征。根据废旧机电产品再制造实践, 通常需要对废旧机电产品(如机床)的主传动系统、进给系统等进行改进, 其典型再制造冲突特征见表 4-6。

表 4-6 典型再制造冲突特征

废旧机电产品 (如机床) 结构	再制造设计特征	说明
主传动系统	主电动机型号	
	主轴箱变速级数	
	主轴最高转速	
	传动比	
	工作噪声	应对再制造主轴箱在装配后单独进行测试, 包括工作噪声测定, 以保证绿色性要求
	主轴径向跳动	整机装配后通过试加工轴类零件的方式对加工精度进行测定
	主轴轴向跳动	
	外圆加工误差	
进给传动系统	进给传动电动机型号	
	丝杆类型	再制造机床通常需要更换新的丝杆以保证进给传动精度
	轴承型号	轴承为易磨损件, 进行再制造时需要更换
	进给传动误差	整机装配后通过试加工轴类零件的方式对进给传动精度进行测定
其他	防护类型	再制造机床通常需要加装防护以提高安全性
	切削液后处理	为保证绿色化要求需要对废旧机电产品进行改造以降低切削液污染
	总体工作噪声	

一个物元可以通过可拓变换得到出多个非空物元集合, 即

$$M = (O, C, V) \dashv \{(O, C_1, V_1), (O, C_2, V_2), \dots, (O, C_m, V_m)\}$$

则废旧机电产品结构物元可拓展出 m 个物元，这些拓展出的物元与原物元具有相同的物元特征及不同的特征量值。此外，还可以拓展出具有相同特征量值的物元集合，即

$$M = (O, C, V) \dashv \{(O, C_1, V), (O, C_2, V), \dots, (O, C_m, V)\}$$

或者相同特征的物元，即

$$M = (O, C, V) \dashv \{(O_1, C, V_1), (O_2, C, V_2), \dots, (O_m, C, V_m)\}$$

或者在不同参数下同一对象关于同一特征具有多个取值的物元^[80]：

$$\begin{aligned} M(t) = (O(t), C, V(t)) \dashv & \{(O(t_1), C, V_1(t_1)), (O(t_2), C, V_2(t_2)), \\ & \dots, (O(t_m), C, V_m(t_m))\} \end{aligned}$$

在实际解决问题的过程中，往往需要多种拓展方式相结合，这便形成可拓发散树。通过可拓发散树可以找出废旧机电产品特定结构的若干拓展方式，为创新性设计提供解决思路。然而，可拓发散树只能提供物元拓展的方向，且更注重于方法的推演，与工程实际结合的并不紧密^[81]。因此，我们将 TRIZ 与可拓学相结合，通过 TRIZ 中的创新原理作为可拓发散的发散方向。基于 TRIZ 的可拓发散方法流程如图 4-15 所示。

对再制造设计期望物元特征值而言，每一个特征的最优点可能是该域的中值，也可能不是中值，例如对于精度特征来说其期望值往往越小越好。因此，定义期望物元域左侧距为

$$\rho_l(v, v_0, V_0) = \begin{cases} a - v, v \leq a \\ \frac{b - v_0}{a - v_0}(v - a), v \notin (a, v_0) \\ v - b, v \geq v_0 \end{cases} \quad (4-18)$$

式中， V_0 为期望特征值域， $V_0 \in [a, b]$ ， $v_0 \in (a, \frac{a+b}{2})$ ，为 V_0 的左侧最优值。当 $v_0 = a$ 时，式 (4-18) 变为

$$\rho_l(v, a, V_0) = \begin{cases} a - v, v < a \\ a_z, v = a \\ v - b, v > a \end{cases} \quad (4-19)$$

其中，

$$a_z = \begin{cases} 0, a \notin V_0 \\ a - b, a \in V_0 \\ 0 \otimes (a - b), a \notin V_0 \text{ 且 } a \in V_0 \end{cases}$$

3. 基于物元模型的关联函数

当通过基于可拓发散树与 TRIZ 的创新方法对废旧机电产品结构物元进行发散后会得到若干候选物元，为了识别出与期望物元最为接近的候选物元，要对候选物

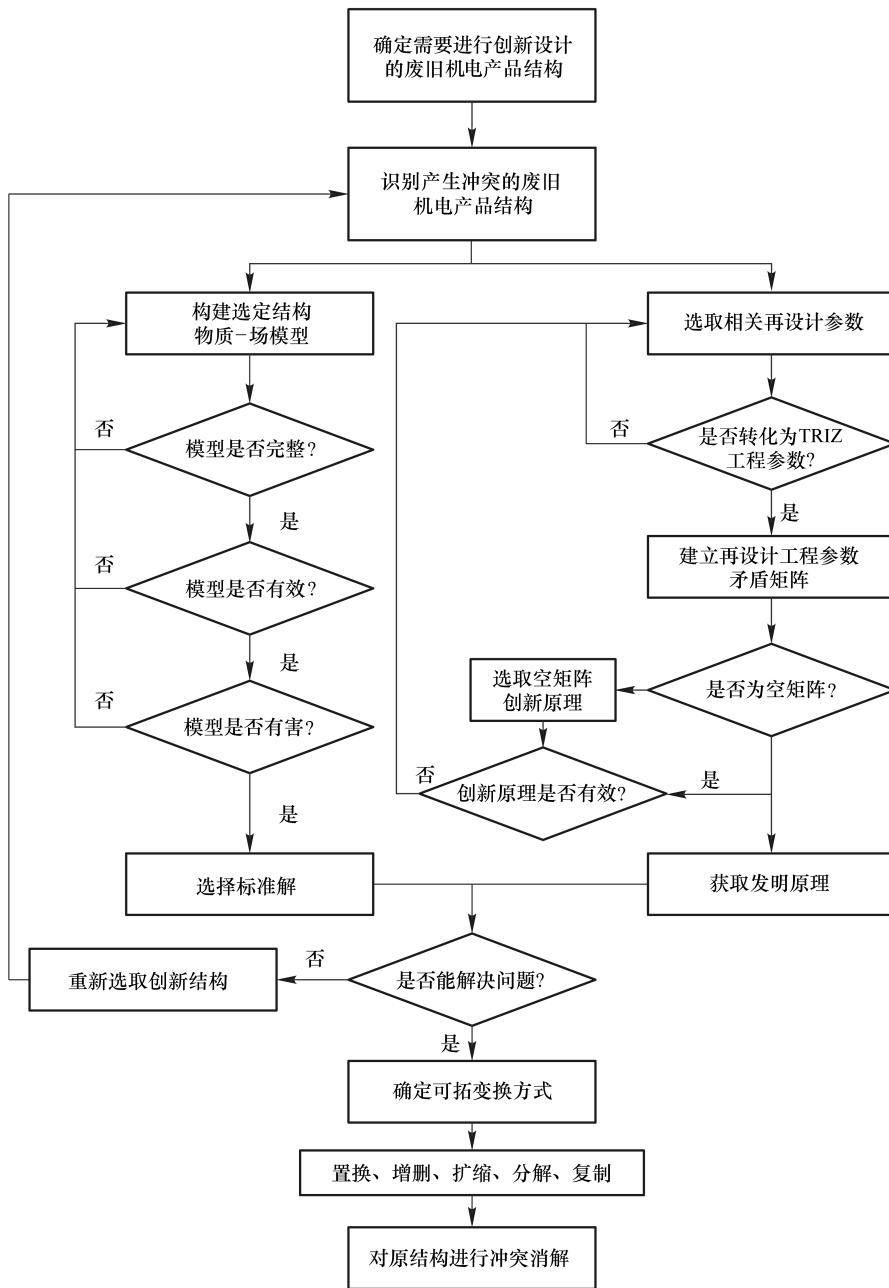


图 4-15 基于 TRIZ 的可拓发散方法流程

元与期望物元之间的相似关系进行分析。对于期望物元，其特征值 V 通常为区间值（域），而可拓关联函数是研究点与域相关关系的有效工具，为此定义如下概念。

(1) 侧距 同理可定义期望物元域右侧距为

$$\rho_l(v, v_0, V_0) = \begin{cases} a - v, v \leq v_0 \\ \frac{a - v_0}{b - v_0}(b - v), v \in (v_0, b) \\ v - b, v \geq b \end{cases} \quad (4-20)$$

当 $x_0 = b$ 时,

$$\rho_l(v, b, V_0) = \begin{cases} a - v, v < b \\ b_z, v = b \\ v - b, v > b \end{cases} \quad (4-21)$$

其中,

$$b_z = \begin{cases} 0, b \notin V_0 \\ a - b, b \in V_0 \\ 0 \otimes (a - b), b \notin V_0 \text{ 且 } b \in V_0 \end{cases}$$

(2) 位值 在废旧机电产品冲突消解中, 还需考虑候选物元特征值与期望特征值域之间的关系, 因此, 定义位值为

$$D(v, V_0, V) = \begin{cases} \rho(v, V) - \rho(v, V_0), \rho(v, V) \neq \rho(v, V_0) \text{ 且 } v \notin V_0 \\ \rho(v, V) - \rho(v, V_0) + a - b, \rho(v, V) \neq \rho(v, V_0) \text{ 且 } v \in V_0 \\ a - b, \rho(v, V) = \rho(v, V_0) \end{cases} \quad (4-22)$$

式中, $\rho(v, V)$ 为候选物元特征值 v 与可行特征值域 V 的侧距, $V \in (c, d)$ 且 $V_0 \in V$ 。

$$\rho(v, V) = \left| v - \frac{c+d}{2} \right| - \frac{d-c}{2} \quad (4-23)$$

(3) 关联函数 在得到物元特征值与期望特征值域的位值及侧距后, 由可拓关联函数表征两者之间的关联度为

$$K(v) = \frac{\rho(v, v_0, V_0)}{D(v, V_0, V)} \quad (4-24)$$

4. 基于可拓优度评价的再制造冲突消解决策

通过可拓优度法可对某个废旧机电产品结构物元的优劣进行定量分析, 具体步骤如下。

(1) 选取衡量指标 在对某一物元进行评价时, 首先要从待评价物元确定评价特征, 即衡量指标。例如对于期望物元 M_e , 其存在 n 个物元特征, 可从中选取 s 个衡量指标, 且 $s \leq n$, 则衡量指标集为

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_s)$$

衡量指标的选取应保证所选取的指标具备目标相关性、全面性、可行性与稳定性, 以保证评价结果之有效性。

(2) 确定衡量指标权重 衡量指标以权重表征其重要程度。为了降低人为主观评价对决策结果的影响, 可采用层次分析等方法确定指标权重, 从而确定衡量指标权重集为

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s), \sum_{k=1}^s \alpha_k = 1$$

(3) 计算规范关联度 在计算候选物元特征与期望物元特征之间的关联度时, 若对应的衡量指标为定性指标或离散指标, 则其关联度为

$$K(v) = \begin{cases} a \\ b \\ c \\ \dots \end{cases}$$

即对期望物元的衡量指标 s_k 对应的期望指标值 V_0 进行分级, 每级评分可由专家通过资料进行评定。

若为连续的定量指标, 则关联度计算方法由 4.3.3 确定。若第 k 个衡量指标与第 i 个候选物元对应特征值的关联度为 $K_k(v)_i$, 则每个候选物元对应第 k 个衡量指标的关联度向量为

$$\begin{aligned} K_k &= [K_k(v)_1, K_k(v)_2, \dots, K_k(v)_m] \\ k &\in [1, s] \end{aligned}$$

由式(4-25)对关联度进行规范化:

$$\begin{aligned} K_{kj} &= \frac{K_k(v)_i}{\max_{i \in [1, m]} |K_k(v)_i|} \\ k &\in [1, s], i \in [1, m] \end{aligned} \quad (4-25)$$

即可得规范化关联度矢量为

$$K_k^* = [K_{k1}, K_{k2}, \dots, K_{km}], K \in [1, s]$$

(4) 计算优度值 由向量 K_k 可知, 对于第 i 个候选物元, 其每一特征关于衡量指标 s 的规范关联度向量为

$$\begin{aligned} K_G &= [K_{1i}, K_{2i}, \dots, K_{si}]^T \\ i &\in [1, m] \end{aligned}$$

则第 i 个候选物元的优度值为

$$\begin{aligned} p_i &= \alpha K_G = \sum_{k=1}^s \alpha_k K_{ki} \\ i &\in [1, m] \end{aligned} \quad (4-26)$$

通过优度评价, 可选择优度最大的候选物元作为与期望物元最佳匹配的物元, 并以此作为再制造设计方案的参考依据。

4.3.4 实例分析

以沈阳精新再制造有限公司的废旧 CA6140 的主轴箱为例，应用再制造冲突消解方法对其进行冲突消解改进。主轴箱主传动结构对机床加工精度具有决定性影响，因此在对废旧主轴箱进行再制造设计时，对主轴箱进行再制造冲突消解使其达到性能提升具有一定的实践意义。该厂目前收回回来的废旧 CA6140 的主轴箱主轴最高转速为 1400r/min，最低转速为 11r/min，24 级分级变速，主传动电动机型号为 Y132M-4，如图 4-16 所示。



图 4-16 废旧主轴箱

根据用户需求与再制造设计质量参数规划，可得废旧主轴箱主要技术参数为主轴最高转速、工作噪声、主轴轴向跳动、主轴径向跳动及主轴顶尖跳动。通过对废旧主轴箱进行技术测定，得到其技术参数及其规划值，见表 4-7。

表 4-7 废旧主轴箱技术参数及其规划值

再制造设计质量参数	实测值	规划值
主轴最高转速	1400r/min	2600r/min
工作噪声	83dB	73dB
主轴轴向跳动	0.008mm	0.007mm
主轴径向跳动	0.005mm	0.0035mm
主轴顶尖跳动	0.01mm	0.007mm

由表 4-7 可知，相较于原始主轴箱，用户希望再制造主轴箱具备更高的主轴转速及加工精度。此外，还应降低其工作噪声及具有更高的稳定性。然而，通过对当前废旧主轴箱的性能参数与规划值进行分析，可以看出，由于原废旧主轴箱本身的工艺限制，一旦主轴转速过高将导致主轴在高速状态下发生振动，从而降低了其工作稳定性，且导致加工精度难以保证；还可能影响主轴箱内部零部件的工作寿命。

此外,过高的主轴转速还将导致运行噪声的提高,不利于废旧主轴箱的绿色化改造。因此,用户期望的更高的主轴转速与加工稳定性,与噪声之间形成了再制造设计冲突,需要对其进行具有针对性的冲突消解,如图4-17所示。

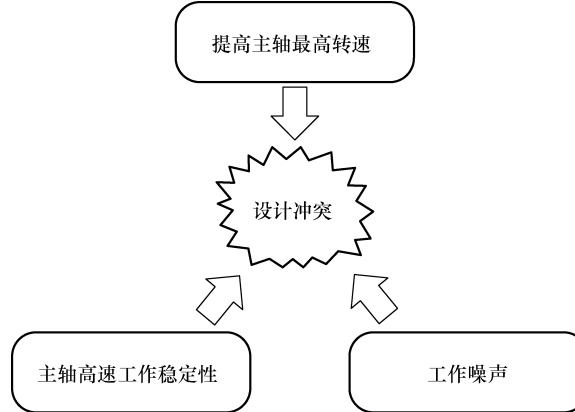


图4-17 再制造设计冲突

根据对废旧主轴箱的测试结果,建立原废旧主轴箱物元模型 M_0 如下:

主轴箱 O_n 主轴最高转速 1400r/min
工作噪声 83dB
主轴轴向跳动 0.008mm
主轴径向跳动 0.005mm
主轴顶尖跳动 0.01mm

根据对废旧主轴箱的再制造设计质量参数规划阶段得到的规划值,建立相应的再制造主轴箱期望物元 M_e 如下:

主轴箱 O_n 主轴最高转速 (1400) 1450 ~ 3000 (3000) r/min, opt (2600)
工作噪声 (73) 73 ~ 78 (83) dB, opt (73)
主轴轴向跳动 (0.005) 0.006 ~ 0.008 (0.010) mm, opt (0.007)
主轴径向跳动 (0.002) 0.003 ~ 0.004 (0.005) mm, opt (0.0035)
主轴顶尖跳动 (0.006) 0.007 ~ 0.009 (0.01) mm, opt (0.007)

其中,在物元的特征值列中,特征值域为期望特征值域 V_0 ,而括弧中的数值为特征值可行域 V 。对再制造设计,其期望特征值域为再制造主轴箱对应特征需要达到的标准值,而可行域是指无法达到期望特征值域时需要满足的区间,因在此区间往往会造成一定程度的性能不足或使再制造成本提高,因此超出可行域的再制造特征值是不允许的。opt表示该特征的最优值。

对废旧主轴箱内部结构的改动属于技术创新,需应用TRIZ矛盾矩阵对其进行创新性设计,并形成可拓发散树。根据期望物元需求,为了获得更高的主轴最大转速,可通过变更齿轮传动比实现。与此同时,更高的转速会降低加工稳定性,因此两者形成了技术矛盾。通过技术矛盾特征向TRIZ矛盾矩阵的工程特征进行映射,

确定需要改善的工程特征为“3 – 运动物体的尺寸”“5 – 运动物体的面积”及“7 – 运动物体的体积”，而防止恶化的特征为“29 – 制造精度”。则矛盾矩阵见表 4-8。

表 4-8 再制造设计矛盾矩阵

工程特征	29 – 制造精度
3 – 运动物体的尺寸	10, 1, 35, 17
5 – 运动物体的面积	02, 32
7 – 运动物体的体积	25, 28, 02, 16

从矛盾矩阵可以得到若干个创新原理，对每一个创新原理进行可行性分析，确定“02 – 拆出原则”与“28 – 机械替换原则”为可用原则。其中，拆出原则指从物体中拆出干扰部分（干扰特性）或者相反，分出唯一需要的部分或需要的特性；机械替换原则指利用非机械装置（如声、光、电等）或非机械作用（如电场、磁场）代替机械装置或机械作用。根据 TRIZ 创新原理对废旧主轴箱进行可拓变换，变换过程如下：

$$M_0^T = T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ M_0$$

其中， T_1 、 T_2 、 T_3 及 T_4 均为可拓变换； M_0^T 为经过 4 次可拓变换后的主轴箱物元。可拓变换具体变换内容为

$$T_1 = \begin{bmatrix} \text{主轴箱} & \text{支配对象} & \text{主轴箱 } M_0 \\ & \text{接受对象} & \text{床头摩擦片 } L_1 \\ & \text{变换结果} & M_0 \ominus L_1 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \text{主轴箱} & \text{支配对象} & \text{主轴箱 } M_0 \\ & \text{接受对象} & \text{制动轮 } L_2 \\ & \text{变换结果} & M_0 \ominus L_2 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} \text{主轴箱} & \text{支配对象} & \text{主轴箱 } M_0 \\ & \text{接受对象} & \text{螺距手柄和齿轮 } L_3 \\ & \text{变换结果} & M_0 \ominus L_3 \end{bmatrix}$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} \text{主轴箱} & \text{支配对象} & \text{主轴箱 } M_0 \\ & \text{接受对象} & \text{电磁离合器 } L_4 \\ & \text{变换结果} & M_0 \oplus L_4 \end{bmatrix}$$

其中， \oplus 表示增加变换； \ominus 表示删除变换。

根据可拓变换结果对废旧主轴箱传动结构进行调整，如图 4-18 所示。

根据菱形发散思维，为了得到不同转速，需变换齿轮传动比。从企业实际需求出发，确定将 I 轴与 II 轴之间的第一变速组进行传动比变换，由主轴箱传动系统图（见图 4-19）得到两种方案。

方案 1：将主轴箱第一变速组进行微调，两个变速组分别由原来的 56:38 变为

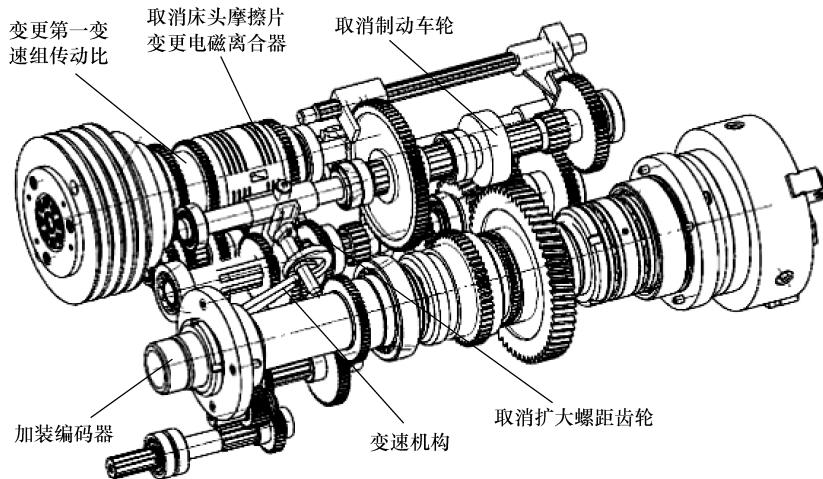


图 4-18 对废旧主轴箱的调整方案

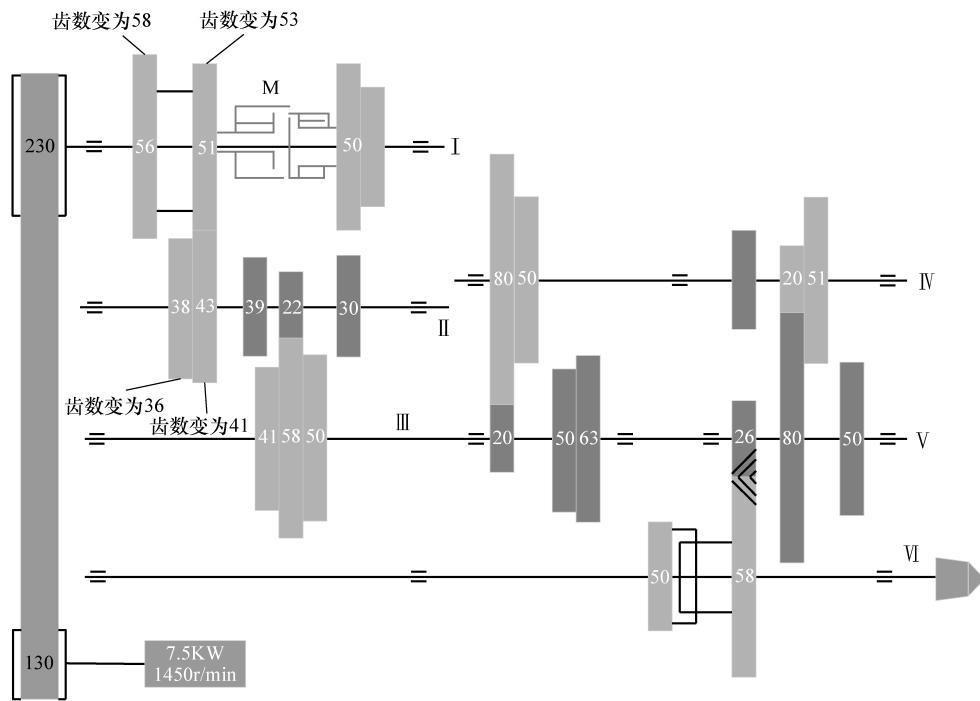


图 4-19 主轴箱传动系统图

58:36、51:48 变为 53:41。这样变换不仅使原主轴最高转速提高了 200r/min，且因主轴箱的变换范围小，故成本低、易改造。

方案 2：为了有效提高主轴最高转速，将第一变速组进行改进，分别由原来的

56:38 变为 63:31 及 51:43 变为 53:41。此变换可将主轴最高转速提高至 2000r/min, 但变速级数由原来的 24 级降至 14 级; 且由转速图分析可知, 轴Ⅱ与轴Ⅲ的 30:50 变速组可取消, 从而在一定程度上简化了主轴箱结构。

此外, 为了获得更高的转速, 还可将原主传动电动机替换, 即将主电动机型号由原来的 Y132M-4 变为 Y132S2-2。此变换考虑了原电动机座结构, 使机座中心高度不变, 但由原来的中机座改为短机座, 使新电动机座设计更为方便。主电动机最高转速变为 2900r/min, 主轴最高转速变为 2900r/min; 需注意的是过高的主轴转速将产生噪声、振动及严重发热, 且加工稳定性变差。

最后, 将可拓变换后的废旧主轴箱物元 M_0^T 发散为每个方案对应的候选物元, 如图 4-20 所示。

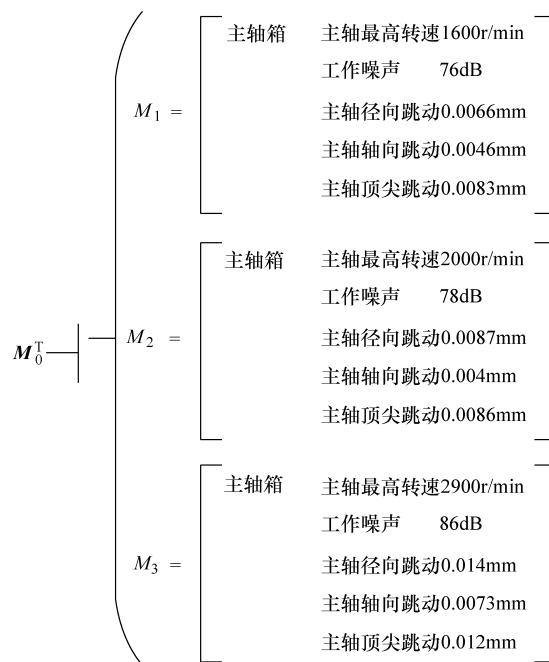


图 4-20 候选物元发散树

根据式 (4-18) ~ 式(4-22) 可得到每一个候选物元 (M_1 , M_2 , M_3) 中的每一个物元特征相对于期望物元 M_e 的侧距及位值。例如以主轴顶尖跳动为例, 可知其期望特征值域 $V_0 = [0.007, 0.008]$, 而可行域 $V = [0.006, 0.011]$ 。因此, M_1 的主轴顶尖跳动值与 M_e 的位值 D_{15} 为

$$D_{15} = (0.0083, V_0, V) = \rho(0.0083, V) - \rho(0.0083, V_0) + a - b$$

即

$$D_{15} = \left| 0.0083 - \frac{0.006 + 0.011}{2} \right| - \frac{1}{2}(0.011 - 0.006) - \left| 0.0083 - \frac{0.007 + 0.008}{2} \right| + \frac{1}{2}(0.009 - 0.007) + 0.007 - 0.009 = -0.0036$$

由于主轴顶尖跳动期望值的最优值处于期望值域的左半域，则由式（4-1）可得其左侧距 ρ_{15} 为

$$\rho_{15} = 0.0083 - 0.009 = -0.0007$$

同理，可得每一个候选物元中各个特征的位值与侧距。位值矩阵为

$$D = \begin{bmatrix} -1600 & -6 & -0.003 & -0.001 & -0.0036 \\ -1600 & -10 & -0.002 & -0.002 & -0.004 \\ -1600 & -5 & -0.002 & -0.001 & -0.002 \end{bmatrix}$$

侧距矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} -150 & -2 & -0.006 & 0.006 & -0.0007 \\ -550 & 0 & -0.0007 & 0 & -0.0004 \\ -287.5 & 8 & 0.006 & 0.0033 & -0.0003 \end{bmatrix}$$

其中，位值矩阵与侧距矩阵的列表示评价指标，行表示候选物元。

进而由式（4-24）可得每一个候选物元中各个特征的关联度，并由式（4-25）可得规范关联度。则每个物元的规范关联度矢量为

$$K_{G1} = (0.273, 0.208, 0.067, -0.182, 0.129)^T$$

$$K_{G2} = (1, 0, -0.117, 0, 0.067)^T$$

$$K_{G3} = (0.538, -1, -1, -1, -1)^T$$

若通过层次分析等方法得到的评价指标权重矢量为

$$\alpha = (0.14, 0.15, 0.41, 0.08, 0.22)$$

则可得每个候选物元的优度值为

$$P_1 = \alpha K_{G1} = 0.1107$$

$$P_2 = \alpha K_{G2} = 0.1067$$

$$P_3 = \alpha K_{G3} = -0.7847$$

因此可知，候选物元一 (M_1) 为最佳匹配物元。根据物元一的要求可知，再制造主轴箱的主轴转速应至少达到 1600r/min；同时保证主轴径向跳动、轴向跳动及顶尖跳动分别达到 0.0066mm、0.0046mm 及 0.0083mm。物元一成为最佳匹配物元说明了该废旧主轴箱的主轴最高转速不应过高，否则将使得主轴在高速状态下难以保持稳定。最后，应根据物元一对主轴箱的各项性能参数的要求，对废旧主轴箱包含的各个废旧零部件制定相应的工艺路线。

物元二 (M_2) 虽然不是最佳匹配物元，但其优度值与物元一的优度值十分接近。通过物元二对主轴的性能要求可知，物元二的再制造冲突消解方案可以使主轴箱的主轴转速达到 2000r/min，然而其主轴稳定性不如物元一的要求。因此，如果

在可行的条件下,适当牺牲一部分加工精度要求,也可考虑以物元二作为再制造设计方案的参考。

物元三(M_3)的优度值为负值,说明其与期望物元呈负相关关系。通过对其分析可以看出,虽然其主轴最高转速达到了2900r/min,但是其主轴跳动精度远低于用户期望,说明只通过变更驱动电动机是无法满足用户需求的。

参 考 文 献

- [1] 姚巨坤,朱胜,时小军,等.再制造设计的创新理论与方法[J].中国表面工程,2014,27(2):1-5.
- [2] 郭茜,李延来,蒲云,等.基于群体语义信息的顾客需求重要度确定方法[J].计算机集成制造系统,2012,18(04):840-848.
- [3] 白涛,李中凯.基于模糊Kano模型的顾客需求重要度计算方法[J].中国机械工程,2012,8(23):975-980.
- [4] 王增强,李延来,蒲云.产品规划中基于直觉模糊数的顾客需求动态分析[J].计算机集成制造系统,2013,19(11):2726-2735.
- [5] 王晓瞰,熊伟.复杂语言信息环境中顾客需求重要度的确定方法[J].计算机集成制造系统,2010,16(07):1472-1479.
- [6] 许多,严洪森.基于模糊度量质量屋的产品特征映射及分析[J].计算机集成制造系统,2004,10(6):693-698.
- [7] 李延来,姚建明,焦明海.基于BSC的质量屋中工程特性最终重要度确定方法[J].机械工程学报,2010(4):177-185.
- [8] 李延来,唐加福,姚建明,等.质量屋中顾客需求改进重要度的确定方法[J].机械工程学报,2007,43(11):110-118.
- [9] 李延来,唐加福,姚建明,等.基于粗糙集理论的质量屋中工程特性确定方法[J].计算机集成制造系统,2008,14(02):386-392.
- [10] 陈立杉,段莉莉.基于相关度的同步协同设计冲突消解策略[J].武汉大学学报:工学版,2012,45(2):268-272.
- [11] 李祥,袁国华.基于集成的协同设计冲突消解系统研究[J].计算机集成制造系统,2000,6(4):61-64.
- [12] 王丽萍,江波,邱飞岳.基于多目标进化算法的协同设计冲突消解方法[J].计算机集成制造系统,2010,16(09):1836-1843.
- [13] 段凯锋,杨元钊.产品设计知识重用过程冲突消解研究[J].机械,2013,40(6):43-48.
- [14] 王小磊,杨育,杨洁,等.协同产品创新设计中基于层次知识匹配的冲突消解研究[J].中国机械工程,2010(20):2488-2495.
- [15] 黄利江,田锡天,贾晓亮,等.融合规则的典型工艺表示与工艺决策方法研究[J].西北工业大学学报,2009,27(5):8-14.
- [16] 陈静,杨桂华,刘辉.基于实例推理CAPP的工艺决策模型研究[J].机床与液压,2010,38(7):109-112.

- [17] 伍晓榕, 张树有, 裴乐森, 等. 面向绿色制造的加工工艺参数决策方法及应用 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (7): 91–100.
- [18] 沈伟, 乔立红. 基于知识工程的工艺决策方法研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011 (5): 108–112.
- [19] Zadeh L A. Fuzzy Sets [J]. Information Control. 1965 (8): 338–353.
- [20] Zadeh L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning [J]. Information Sciences, 1975, 8 (3): 199–249.
- [21] Hideo T. Linear regression analysis with fuzzy model [J]. Transactions On Systems, 1982, 12 (6): 903–907.
- [22] Chung W. Construction of benchmarking models using fuzzy linear regression techniques [C] // Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2012 9th International Conference on. IEEE, 2012: 555–559.
- [23] Poleshchuk O, Komarov E. A fuzzy linear regression model for interval type-2 fuzzy sets [C] // Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS), 2012 Annual Meeting of the North American. IEEE, 2012: 1–5.
- [24] Al-Othman A K. Economic Dispatch Fuzzy Linear Regression and Optimization [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011 (5): 76–79.
- [25] Prasad B. Review of QFD and related deployment techniques [J]. Journal of manufacturing Systems, 1998, 17 (3): 221.
- [26] Yoji A. Quality Function Deployment: Integrating customer requirements into product design [M]. Cambridge, MA, Productivity Press, 1990.
- [27] Kim K J, Moskowitz H, Dhingra A, et al. Fuzzy multicriteria models for quality function deployment [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 121 (3): 504–518.
- [28] Fung R Y K, Chen Y, Tang J. Estimating the functional relationships for quality function deployment under uncertainties [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2006, 157 (1): 98–120.
- [29] Chen Y, Chen L. A non-linear possibilistic regression approach to model functional relationships in product planning [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28 (11–12): 1175–1181.
- [30] Liu X, Chen Y. A Systematic Approach to Optimizing Value for Fuzzy Linear Regression with Symmetric Triangular Fuzzy Numbers [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013 (6): 1–9.
- [31] Liu Y, Chen Y, Zhou J, et al. Fuzzy linear regression models for QFD using optimized h values [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2015 (39): 45–54.
- [32] Chen F, Chen Y, Zhou J, et al. Optimizing h value for fuzzy linear regression with asymmetric triangular fuzzy coefficients [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2016 (47): 16–24.
- [33] Jenab K, Sarfaraz A, Ameli M T. A conceptual design selection model considering conflict resolution [J]. Journal of Engineering Design, 2013, 24 (4): 293–304.
- [34] Lebedieva O, Matvijkiv O, Lobur M. Conflict classification in distributed collaborative design environments [C] //Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), 2011

- Proceedings of VIIth International Conference on. IEEE, 2011: 160 – 161.
- [35] Ostrosi E, Haxhiaj L, Fukuda S. Fuzzy modelling of consensus during design conflict resolution [J]. Research in Engineering Design, 2012, 23 (1): 53 – 70.
- [36] Yan B, Zeng Y. Design Conflict: Conceptual Structure and Mathematical Representation [J]. Journal of Integrated Design and Process Science, 2011, 15 (1): 75 – 89.
- [37] Gutierrez R, Zeng Y, Sun X, et al. Conflict identification in conceptual design: Algorithm and case study [C] //Innovative Design and Manufacturing (ICIDM) , Proceedings of the 2014 International Conference on. IEEE, 2014: 205 – 210.
- [38] Hisarciklilar O, Rahmani K, Thomson V. A conflict detection approach for collaborative management of product interfaces [C] //ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2010: 555 – 563.
- [39] Wits W W, Vaneker T H J. TRIZ based interface conflict resolving strategies for modular product architectures [J]. Procedia Engineering, 2011 (9): 30 – 39.
- [40] Heussen K, Gehrke O, Niemann H. On early conflict identification by requirements modeling of energy system control structures [C] //Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA) , 2015 IEEE 20th Conference on. IEEE, 2015: 1 – 8.
- [41] Shimomura Y, Hara T. Method for supporting conflict resolution for efficient PSS development [J]. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2010, 59 (1): 191 – 194.
- [42] Troitsky D I. Conflicts in Product Development and Machining Time Estimation at Early Design Stages [M] Advances in Mechanical Engineering. Springer International Publishing, 2015: 103 – 116.
- [43] Canbaz B, Yannou B, Yvars P A. Preventing design conflicts in distributed design systems composed of heterogeneous agents [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014 (28): 142 – 154.
- [44] Meijers S J, Hartmann T, Dewulf G. Conflict Management in Concurrent Engineering: A Case Study [C] //Construction Research Congress 2010: Innovation for Reshaping Construction Practice. 2010: 737 – 746.
- [45] 陈建, 赵燕伟, 李方义, 等. 基于转换桥方法的产品绿色设计冲突消解 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (9): 132 – 142.
- [46] 阳斌. 变速箱再制造设计冲突解决方法研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [47] Hua Z, Yang J, Coulibaly S, et al. Integration TRIZ with problem – solving tools: a literature review from 1995 to 2006 [J]. International journal of business innovation and research, 2006, 1 (1/2): 111 – 128.
- [48] Borgianni Y, Matt D T. Applications of TRIZ and axiomatic design: a comparison to deduce best practices in industry [J]. Procedia CIRP, 2016 (39): 91 – 96.
- [49] Vaneker T, van Diepen T. Design Support for Maintenance Tasks using TRIZ [J]. Procedia CIRP, 2016 (39): 67 – 72.
- [50] Bakhturin D, Feygenson N. Technical Platform & Basic Design: Challenge of New Engineering

- Phenomena (Towards Review of Ontological Basis of Classical TRIZ) [J]. Procedia Engineering, 2015 (131): 682–688.
- [51] Shahdad M A, Filmore P. Applying TRIZ to Graphic Design using Genetic Algorithms [J]. Procedia Engineering, 2015 (131): 881–891.
- [52] Filippi S, Barattin D. IDGL, an interaction design framework based on systematic innovation and quality function deployment [J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 2016, 10 (2): 119–137.
- [53] Cherifi A, Dubois M, Gardoni M, et al. Methodology for innovative eco – design based on TRIZ [J]. International Journal on Interactive Design & Manufacturing, 2015, 9 (3): 167–175.
- [54] Liu H T, Cheng H S. An improved grey quality function deployment approach using the grey TRIZ technique [J]. Computers & Industrial Engineering, 2016 (92): 57–71.
- [55] Fiorineschi L, Frillici F S, Rissone P. A comparison of Classical TRIZ and OTSM – TRIZ in dealing with complex problems [J]. Procedia Engineering, 2015 (131): 86–94.
- [56] Spreafico C, Russo D. TRIZ Industrial Case Studies: A Critical Survey [J]. Procedia CIRP, 2016 (39): 51–56.
- [57] Renez I A, Chechurin L S. Application of TRIZ in Building Industry: Study of Current Situation [C] // Procedia CIRP, 2016 (39): 209–215.
- [58] Berdonosov V, Zhivotova A, Sycheva T. TRIZ evolution of the object – oriented programming languages [C] // Procedia Engineering, 2015 (131): 333–342.
- [59] Wang C N, Lin W C, Huang T S, et al. Apply TRIZ to Improve the Molten Zinc Corrosion Tester in Steel Manufacturing [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2014, 43 (6): 1413–1423.
- [60] Abramov O, Kogan S, Mitnik – Gankin L, et al. TRIZ – based approach for accelerating innovation in chemical engineering [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2015, 103: 25–31.
- [61] Chen C K, Shie A J, Wang K M, et al. An Ageing – in – Place Service Innovation Model by Using TRIZ Methodology [J]. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 2015, 25 (2): 166–182.
- [62] 蔡文. 可拓集合和不相容问题 [J]. 科学探索学报, 1983, 1 (1): 25–29.
- [63] 蔡文. 物元模型及其应用 [M]. 北京, 科学技术文献出版社, 1994.
- [64] 蔡文. 可拓论及其应用 [J]. 科学通报, 1999, 44 (7): 673–682.
- [65] 张晔, 邓楚雄, 谢炳庚, 等. 基于熵权可拓物元模型的湖南省土地市场成熟度评价 [J]. 资源科学, 2015 (1): 45–51.
- [66] 杨贵军, 蒋朝辉, 桂卫华, 等. 基于熵权 – 可拓理论的高炉软熔带位置状态模糊综合评判方法 [J]. 自动化学报, 2015, 41 (1): 75–83.
- [67] 王体春, 杨爱军, 卜良峰. 基于多属性可拓灰关联决策模型的产品方案设计 [J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33 (9): 2321–2329.
- [68] 李泓泽, 郭森, 唐辉, 等. 基于改进变权物元可拓模型的电能质量综合评价 [J]. 电网技术, 2013, 37 (3): 653–659.
- [69] Liu A, Li T M. Develop Habit – forming Products Based on the Axiomatic Design Theory [J]. Procedia CIRP, 2016 (53): 119–124.

- [70] Modrak V, Bednar S. Using axiomatic design and entropy to measure complexity in mass customization [J]. Procedia CIRP, 2015 (34): 87 – 92.
- [71] Ashtiani M S, Alipour A. Integration Axiomatic Design with Quality Function Deployment and Sustainable Design for the Satisfaction of an Airplane Tail Stakeholders [J]. Procedia CIRP, 2016 (53): 142 – 150.
- [72] Banciu F V. Axiomatic Design Functional Independence Concept Applied In Concept Solution Selection [J]. Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2015, 13 (2).
- [73] Lee S J, Park G J. A novel method of reverse engineering using axiomatic design [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28 (2): 595 – 604.
- [74] Grgic A, Pacifici B, Ciappi A, et al. An Axiomatic Design Approach for Customer Satisfaction through a Lean Start – up Framework [J]. Procedia CIRP, 2016 (53): 151 – 157.
- [75] Salonitis K. Design for additive manufacturing based on the axiomatic design method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87 (1 ~4): 989 – 996.
- [76] Borgianni Y, Matt D T. Axiomatic design and TRIZ: deficiencies of their integrated use and future opportunities [J]. Procedia CIRP, 2015 (34): 1 – 6.
- [77] 贺晓明. 基于 AD 与 TRIZ 组合的产品创新设计体系 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [78] 赵燕伟, 何路, 洪欢欢, 等. 面向 TRIZ – 可拓学集成的创新方法研究 [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2015, 32 (2).
- [79] 赵燕伟, 何路, 洪欢欢, 等. 面向 TRIZ – 可拓学集成的创新方法研究 [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2015, 32 (2).
- [80] 杨春燕, 蔡文. 可拓工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [81] 张祥唐, 陈家豪. 可拓方法与 TRIZ 方法在产品创新上的应用 [J]. 工业工程, 2004, 7 (2): 33 – 37.

第5章 基于二级实例推理的再制造工艺决策方法

当废旧机电产品的再制造设计质量参数规划完成后，对其进行再制造设计冲突消解，最终得到最优化的再制造设计参数。其后应根据再制造设计参数中的要求，对废旧机电产品的各个系统进行分析，对其关键废旧零部件进行失效模式分析，判断其是否具备达到再制造设计参数的要求。因此，本章构建了基于二级实例推理的再制造工艺决策框架，通过规范化的废旧零部件知识表达，再与再制造工艺数据库中的再制造工艺知识进行相似度匹配，从而获得可行的再制造工艺方案。

5.1 废旧机电产品再制造工艺决策

5.1.1 再制造工艺决策的内涵

在废旧机电产品再设计过程中，对再制造设计参数的制定能够使再制造产品的性能参数最大化满足顾客需求；对目标结构进行再制造设计冲突消解能够使再制造产品摆脱原有结构、功能与材料带来的限制。为了实现上述设计目标，还需对废旧机电产品的再制造工艺进行制定与决策。

一般而言，传统的工艺规划方法如图 5-1 所示。

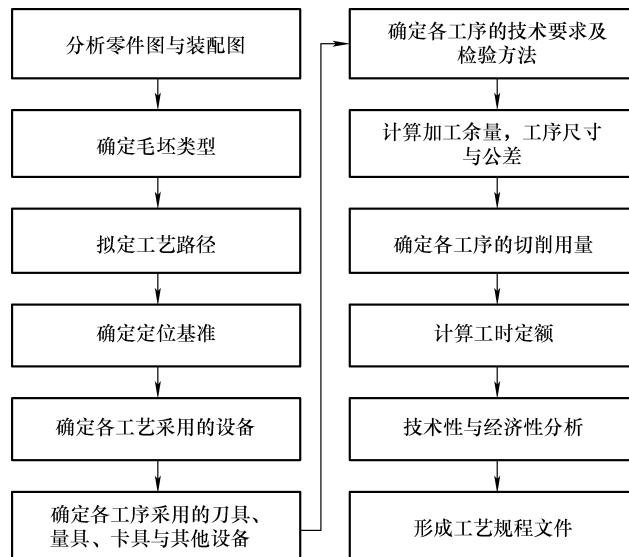


图 5-1 传统的工艺规划方法

以机床为例,一台机床的各个零部件由毛坯加工至成品,当其中的某些零部件寿命接近其生命周期末期时,其性能将显著衰退直至该零部件失效,从而造成该机床无法达到正常的工作状态,此时该机床将由新机床代替。对于该机床中包含的废旧零部件,若通过某些机械加工或表面工程等先进技术对其进行失效部位的修复,则能够使废旧零部件的性能恢复甚至超过其原有性能。因此,确定合适的再制造修复工艺及正确选取工艺参数,将对最终的再制造机床质量产生重要影响,如图 5-2 所示。

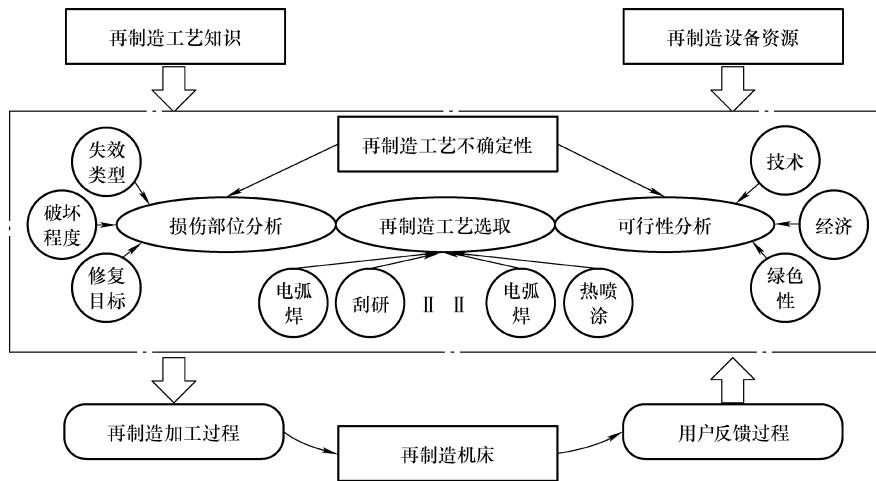


图 5-2 再制造修复工艺对再制造机床质量的影响

5.1.2 再制造工艺决策关键因素分析

由图 5-2 可知,在废旧机电产品(如机床)再制造工艺决策过程中,损伤部位分析、再制造工艺的选取与可行性分析这三个过程对最终再制造机床质量具有重要影响。

1. 损伤部位分析

损伤部位分析过程的主要目标是确定废旧零部件的失效形式及该失效形式对废旧零部件造成的损伤程度。不同种类的废旧零部件失效形式多种多样,例如废旧机床主轴可能的失效形式包括表面磨损、腐蚀、疲劳裂纹与主轴弯曲等。每一种失效形式造成的损伤程度也不尽相同,如不同的裂纹深度与裂纹类型,表面磨损造成的擦伤或划伤等。在进行再制造工艺决策前,应对废旧零部件进行准确无损检测。

目前,对废旧零部件无损检测主要有 X 射线检测、超声检测、磁粉检测、涡流检测、 γ 射线检测、渗透检测(荧光检测、着色检测)等。其中,短波长的 X 射线与超声波具有良好的穿透能力,而磁粉检测则根据工件磁化后产生的磁场性质确定损伤程度。为了保证废旧零部件的可再制造性,无损检测过程应尽量保证不对废旧零部件进行二次破坏,因此应更多地采用无损检测技术。只有对废旧零部件损伤部位进行准确测定,才能决策出适合再制造的修复工艺,从而保证再制造机床的

质量。

2. 再制造工艺选取

再制造工艺的选取对再制造机床质量同样具有重要影响。合理的再制造工艺不仅能够最大限度地保证再制造机床质量，还能有效降低再制造成本。随着再制造表面工程的不断发展，除了传统的机械加工修复方式外，还发展了诸多基于表面工程的修复技术，如锡铋合金焊接技术、逆变脉冲电刷镀技术、热喷涂技术以及激光熔覆技术等。不同的再制造工艺具有各自的应用领域，而作用于相同应用领域的不同再制造工艺具有不同的修复效果，如修复表面与母体的结合强度与表面硬度等。

此外，即使同一种再制造工艺往往也包含不同类型，如热喷涂技术包括火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂、爆炸喷涂与超频喷涂。其中等离子喷涂与爆炸喷涂成本高，且设备复杂；而火焰喷涂与电弧喷涂成本低，可现场施工，还具备更大的涂层厚度。

因此，在再制造工艺决策过程中，需要根据实际的损伤类型选定合理的再制造修复工艺，才能够对损伤部位实现有效修复，从而保证再制造质量。

3. 可行性分析

再制造工艺的可行性分析主要包括技术可行性分析、成本可行性分析及绿色性分析。对技术可行性而言，其目标为选定的再制造工艺是否能够满足废旧零部件的修复要求。如果选定的再制造工艺无法满足修复要求，将造成废旧零部件修复效果不佳，如内部或仍存在裂纹等损伤，若不能及时发现会成为潜在的危险。此外，不恰当的再制造工艺还会对废旧零部件造成永久的损伤，使其彻底报废，失去了可再制造性，从而造成包括人力与物力的资源浪费。

成本可行性分析的主要目标是核算相应的再制造工艺带来的再制造成本是否符合再制造要求。一般来说，再制造工艺成本与其实施的复杂性直接相关，因此对于废旧零部件存在的不同程度的损伤，需根据再制造要求与损伤类型等选定具有经济性的再制造工艺方案。例如对于废旧机床导轨，若其损伤形式为轻微的表面摩擦损伤，则完全可通过传统的机械加工工艺进行修复，而不需要实施成本更高的基于表面工程的再制造表面修复工艺。

绿色性分析主要评估再制造工艺的实施过程对环境的影响。例如传统的机械加工修复工艺需要大量的切削液，而喷焊等工艺会造成大量的碳排放等。再制造机床强调可持续发展，因此在进行再制造工艺决策时，不应忽视不同再制造工艺潜在的环境污染等因素。

5.2 废旧机电产品再制造工艺决策问题分析

5.2.1 再制造工艺决策面临的困难

再制造工艺决策的对象是废旧机电产品零部件，由于其在服役期间的工况条件

不尽相同，造成废旧零部件的损伤形式也多样化，因此针对不同废旧机电产品的再制造工艺路线均不同，如图 5-3 所示。

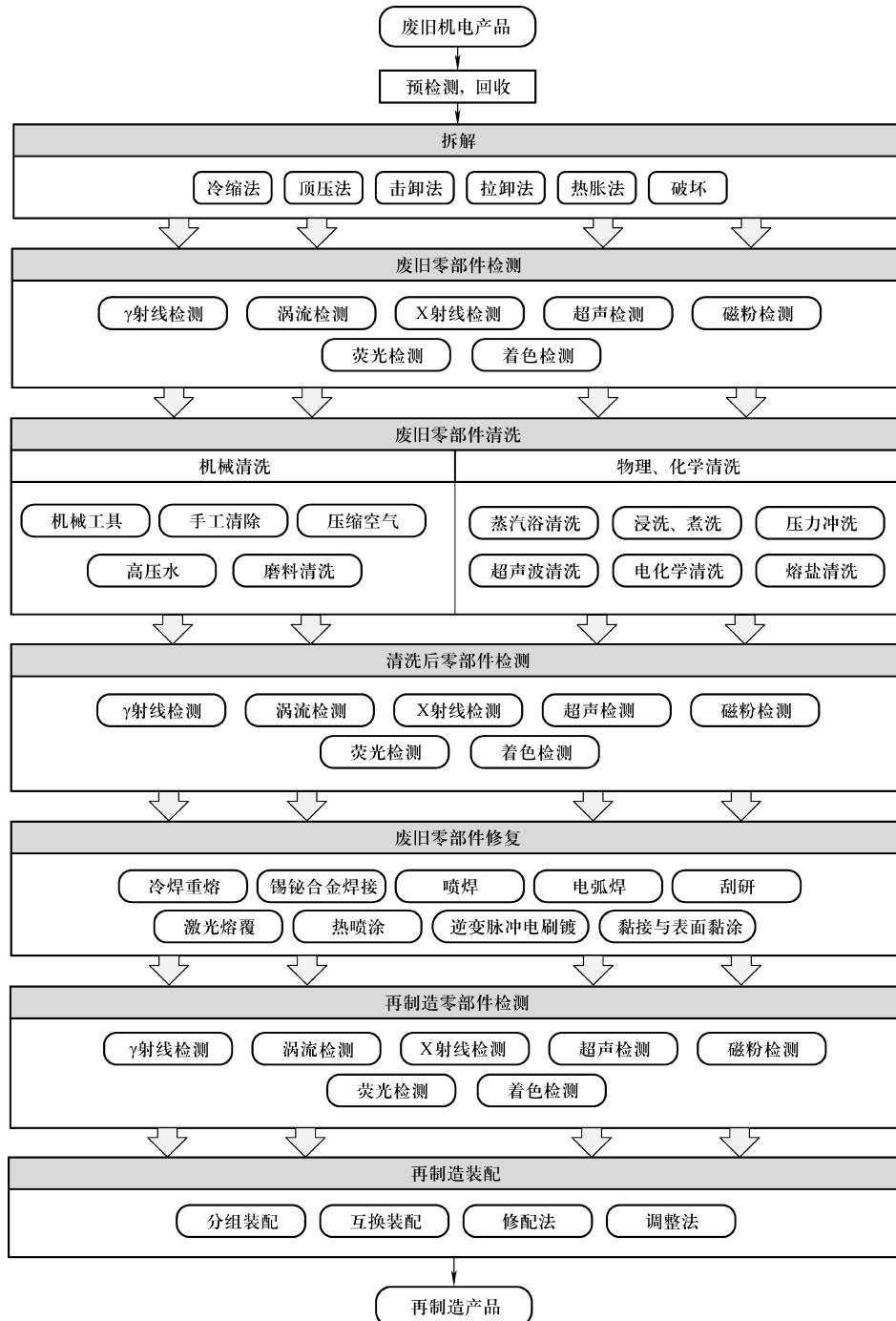


图 5-3 再制造工艺不确定性

由图5-3可知,废旧机床再制造工艺决策的难点主要在于其不确定性。由于不同废旧零部件的失效形式不同,相应的再制造修复工艺也不尽相同。而不同的再制造修复工艺虽然可能适用于相同的废旧零部件的失效形式,但其同样存在再制造工艺实施的复杂性与实施成本等不同因素。对废旧机床导轨的再制造工艺决策见表5-1。

表5-1 废旧机床导轨的再制造工艺决策

失效形式	具体失效情况	再制造工艺路径
磨料磨损	凿削式磨料磨损(沟槽深)	黏接-逆变脉冲电刷镀
	碾碎式磨料磨损(应力大)	更换
	擦伤式磨料磨损(应力低)	冷焊重熔-电刷镀
黏着磨损	轻微磨损(表面材料转移少,结合面剪切破坏)	刮研
	涂抹磨损(黏着结合强度小,软金属浅层破坏)	磨削-激光脉冲电刷镀
	擦伤磨损(软金属亚表层剪切,硬金属表面划伤)	冷焊重熔-电刷镀
	撕脱磨损(摩擦副金属较深处剪切破坏)	锡铋合金焊接-激光熔覆
	咬死型磨损(黏着点焊合,不能相对运动)	更换
腐蚀磨损	轻微腐蚀(0~0.1mm)	磨削-热喷涂
	中度腐蚀(0.1~0.2mm)	磨削-激光熔覆
	重度腐蚀(0.2mm~)	更换
表面疲劳磨损	一般疲劳裂纹(0~0.1mm)	冷焊重熔
	重度疲劳裂纹(0.1mm~)	更换

总之,不合理的再制造工艺决策将使具备可再制造性的废旧零部件变为报废件,将造成严重的资源浪费,使再制造失去了意义。而合理的再制造工艺决策不仅能够完美修复废旧零部件,还能在满足顾客满意度的前提下保持具有竞争力的再制造成本优势。

5.2.2 再制造工艺决策亟待解决的问题

在再制造产业相对发达的欧美国家拥有高度完善的再制造工艺流程,从废旧机电产品的预检测、拆解、清洗等到最后的再制造装配过程,均有工艺规程文件作为其支撑,其批量化的再制造生产方式同样使再制造产品的质量得到了充分保障。而我国再制造产业起步较晚,目前还不具备规模化的生产方式。由于目前我国的废旧

机电产品回收物流系统尚不发达，绝大部分废旧机电产品无法实现大范围流通；通常只能由所在企业进行再制造修复，这导致我国废旧机电产品再制造方式以单件小批量生产为主。因此，对废旧机电产品存在的缺陷问题往往无法进行有效归纳与总结。

同时，由于缺乏相关再制造工艺标准，制约了再制造概念的广泛传播，造成用户与市场对再制造产品缺乏足够的可信度，即担心再制造产品质量是否符合需求，是否具有良好的可靠性等。因此，再制造工艺决策是保证再制造产品质量的关键环节。目前，废旧机电产品再制造工艺决策过程存在如下问题。

- 1) 人工决策为主，过于依赖经验，再制造修复效率低。
- 2) 再制造修复工艺过于繁杂，修复质量波动过大。
- 3) 再制造修复工艺选择不恰当，造成资源浪费。
- 4) 缺乏检测过程，对废旧零部件及再制造零部件的质量检测不完善。

因此，有必要提出一种再制造工艺决策方法，从而降低人工决策带来的工艺不合理性及减小再制造过程的质量波动等。

在对沈阳精新再制造有限公司的废旧机电产品再制造工艺决策环节进行分析后发现，实现再制造工艺决策，要从如下方面入手。

1) 建立再制造工艺数据库，将所有成功的再制造案例通过规范化的形式存储至数据库中，在进行工艺决策时，以数据库中的工艺实例作为参考，从而避免了基于经验的传统再制造工艺决策带来的工艺不合理性。

2) 将再制造工艺制成相应的工艺规程文件，在进行废旧零部件再制造时，应严格按照工艺规程文件的规定执行，从而最大程度降低再制造质量波动。

3) 制定的再制造工艺检测流程。对于不同种类的废旧零部件，制定与其相对应的再制造修复工艺参数，并确定与之对应的检测方式与检测设备，从而避免再制造零部件检测过程中存在的检测漏洞，并降低潜在的失效风险。

综上所述，如果在废旧零部件的工艺决策环节存在诸多问题，将导致废旧零部件再制造成本升高，且产生的加工废弃件较多，严重影响了再制造加工效率，以及制约再制造产品的市场前景。因此，为了提高再制造产品的综合性能，同时降低再制造成本，再制造工艺决策环节亟待改善。针对上述问题，提出了基于二级实例推理的再制造工艺决策方法。

5.3 基于二级实例推理的再制造工艺决策方法

5.3.1 实例推理

实例推理是一种基于已存在的相似案例而通过对其进行直接重用或修改重用来解决现存一系列问题的推理技术。实例推理技术可追溯至 20 世纪 80 年代早期

Schank 及他的学生研究成果中。Schank 的动态记忆模型是早期实例推理系统的基础，包括 Kolodner 的 CYRUS 模型^[1]与 Lebowitz 的 IPP 模型^[2]。与实例推理相似的技术，如法律推理、记忆基础推理（基于大规模并行机器的推理）及与基于案例（CBR）相结合的推理技术也在同期出现。20世纪90年代，CBR 技术在国际上广泛传播与发展。CBR 技术也催生了一系列优秀的推理系统，如早期 Lockheed 的 CLAVIER 系统。此外，CBR 还广泛应用于商业领域和医疗领域。

实例推理模型主要包括：检索（Retrieve）、重用（Reuse）、修正（Revise）和保存，如图 5-4 所示。

1. 实例检索

实例检索指针对特定问题，从案例知识库中寻找与之相关的成功案例来解决该问题。一个完整的案例包括问题分析、解决方案及该解决方案的推理机制。实例检索的效率决定了整个实例推理系统的运行效率，而影响实例检索效率的因素主要包括知识的规范化表达方式及实例检索算法等。

知识的规范化表达指将已得到的案例相关参数通过规范化的表达语言呈现至推理机中。对于废旧机电产品再制造而言，其指将待修复的废旧零部件的基本信息转化为推理机能够识别的语言，以便实施实例检索与匹配。近年来，基于本体的知识建模技术广泛发展，构造本体被看作是改进知识工程过程、增强知识共享和重用，以及促进异构系统间互操作的重要手段。本体在机械产品智能设计领域中的应用主要表现在产品设计知识的表示、检索、重用及本体集成等方面。

常见的本体表达语言主要包括 XML、OWL、RDF、CYCL 等。其中，OWL 在已有标准的基础上添加了大量的基于描述逻辑的语义原语，因此其具备更加高效的知识推理机制，并能够清楚地表达不同领域知识之间的关联性。

高效的检索算法能够有效降低检索时间，从而提高检索效率。目前基本的检索算法主要包括顺序搜索、二分搜索、差值搜索、斐波那契搜索、数表搜索、分块搜索及哈希搜索等。

2. 实例重用

实例重用指在进行实例检索的结果中，选取与待解决问题最为相似的实例作为该问题的参考解决方案。实例检索的结果往往不会局限于某一个相似实例，而是能

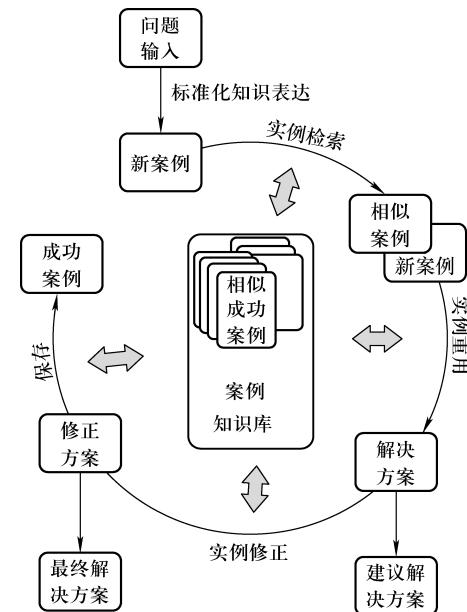


图 5-4 实例推理模型

够检索出与待解决问题相似的若干实例。

3. 实例修正

实例修正指对于检索出的相似实例而言，其解决方案可能与待解决问题存在矛盾冲突，因此往往不能直接将检索出的相似实例所用的解决方案直接套用在待解决的问题中。这就需要对相似实例的解决方案根据待解决问题的实际情况而进行相应修正。对废旧机电产品再制造工艺决策而言，其检索出的工艺实例与当前废旧零部件的工况或修复目标存在冲突性。例如检索出的相似实例所采用的再制造修复工艺可能存在环境浪费或成本过高等情况，这就需要决策者根据实际情况，在保证其制造目标实现的前提下，采用具备绿色性或低成本的再制造修复手段。然而，对相似实例的修复是具有限制性的，范围过大的相似实例修正往往降低实例推理系统的执行效率，此时应关注实例检索过程中存在的问题，并加以改善。

4. 保存

保存指如果最终修正的解决方案能够有效解决当前存在的问题，则说明该方案是一个成功的方案，进而需要将该方案进行规范化知识建模并存储至案例知识库中，以便为今后存在的相似问题的解决方案提供参考。

5.3.2 基于二级实例推理的工艺决策框架

由于规范化的再制造工艺决策能够保证再制造产品质量，且实例推理技术能够显著提高再制造工艺决策过程的效率。因此，提出了基于二级实例推理的工艺决策过程框架，如图 5-5 所示。

由图 5-5 可知，所提出的再制造工艺决策框架主要包括特征参数规范化阶段、指定相似度与实例推理阶段、实例修正与再制造阶段与制定工艺规程阶段。各个阶段具体内容如下。

1. 特征参数规范化阶段

首先，分析待修复的废旧零部件，并根据其再制造要求提取相关的特征参数，如磨损面积、裂纹深度等。其次，将提取出的废旧零部件特征参数通过相应的手段将其转化为规范化语言，如基于本体的 XML 或 OWL 语言等，以便输入推理机进行实例推理。规范化的废旧零部件特征参数主要包括失效形式知识表达及具体失效情况知识表达两部分。前者对废旧零部件的失效类型进行定义；后者对关于其失效类型的相关参数进行定义。在对废旧零部件的失效特征进行定义后，进入一级实例推理阶段。

2. 指定相似度与实例推理阶段

一级实例推理根据废旧零部件的失效类型，对废旧零部件再制造工艺类型进行推理计算。在推理计算过程中，推理机将输入的废旧机电产品失效特征与数据库中存在的相关再制造工艺进行匹配运算。根据事先定义的关联度函数，最终得到两者之间的关联度值。关联度值的运算除了考虑输入特征与匹配特征外，还需要将再制

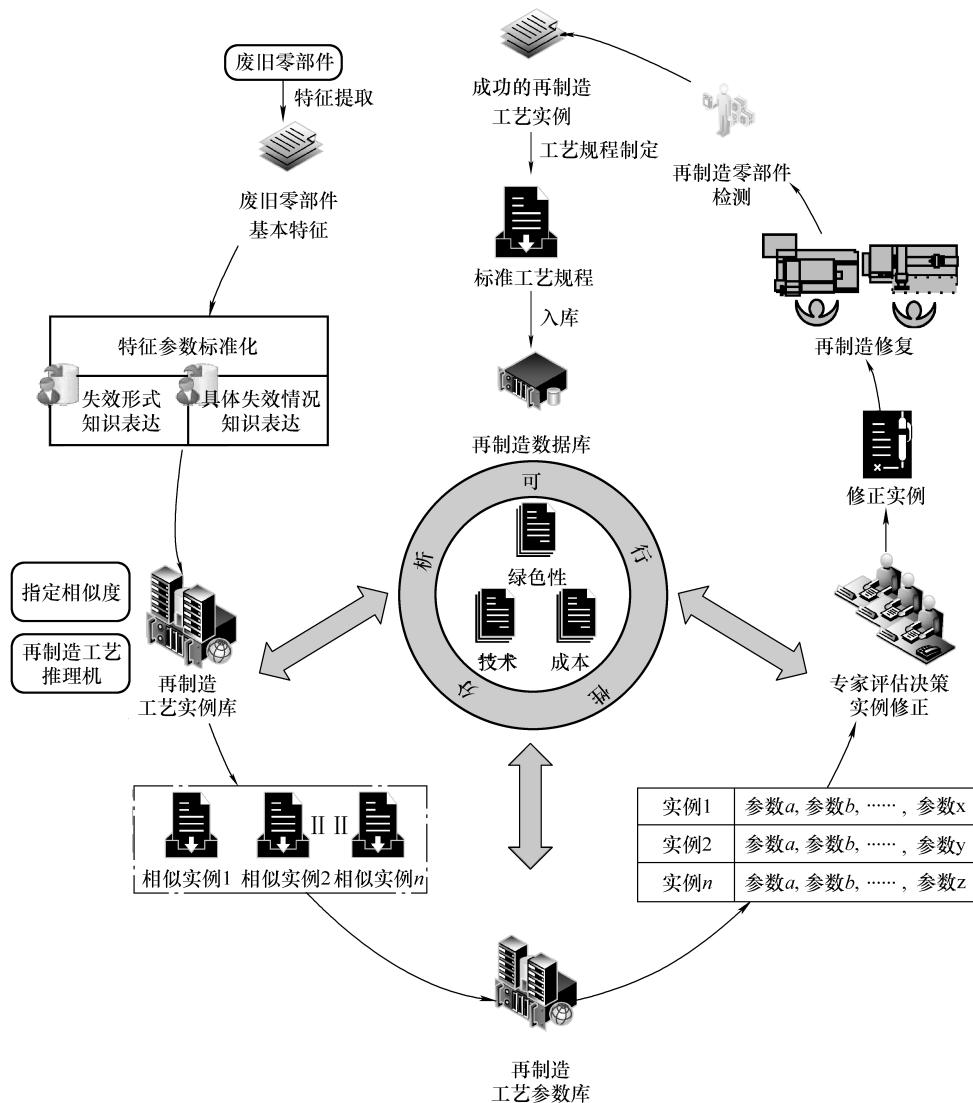


图 5-5 基于二级实例推理的工艺决策过程框架

造成本、再制造技术可行性及再制造工艺绿色性等因素考虑在内；最终通过加权算法，得到最终的相似度值。

目前有关相似度的度量主要有向量空间余弦相似度、皮尔森相关系数、Jaccard 相似系数与调整余弦相似度等方法。以下引入基于皮尔森系数的相似度计算方法来计算目标实例与候选实例之间的相似度。

实例间的匹配是基于其实例特征的匹配，因此在匹配过程之前应从中选取对匹配结果影响较大的实例特征。例如对于废旧机电产品（如导轨）的实例特征主要

有材料类型、失效类型、失效程度、导轨平面度、导轨平行度、大山导轨直线度等。

对于定量表示的实例特征，若其定量特征值为 x ，与之对应的期望实例特征值为 y ，则基于皮尔森系数的相似度可由式 (5-1) 表示：

$$r_i(X, Y) = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \quad (5-1)$$

式中： x_i 为第 i 项候选实例特征值； y_i 为对应的第 i 项期望实例特征值； $r_i(X, Y)$ 分别为对 X 和 Y 基于自身总体规范化后计算空间向量的余弦夹角，而 X 和 Y 则分别表示包含 x_i 和 y_i 的实例特征值向量。

而对于每一项定性表示的实例特征局部相似度，则由式 (5-2) 表示：

$$s = \begin{cases} 1 & p_l = q_l \\ 0 & p_l \neq q_l \end{cases} \quad (5-2)$$

式中： p_l 表示实例特征 X 包含的第 1 项定性特征的语义值； q_l 表示期望特征 Y 包含的第 1 项定性特征的语义值。

若两者语义值吻合，则相似度取 1，否则取 0。定性特征相似度由式 (5-3) 表示：

$$s_l(X, Y) = \sum_{l=1}^m s_l w_l \quad (5-3)$$

式中： s_l 为第 1 项定性特征局部相似度； w_l 为其对应的权重值。

因此候选实例与期望实例之间的相似度值由式 5-4 表示：

$$sim(X, Y) = r(X, Y)k + s(X, Y) \quad (5-4)$$

式中： k 为定量特征权重系数； $s(X, Y)$ 为定性特征相似度。

经过一级实例推理后，根据事先定义的最低相似度，可从再制造工艺数据库提取出若干个满足再制造要求的相似再制造工艺实例。基于这些实例进入二级实例推理过程。二级实例推理的主要目标为根据输入的再制造实例，同样以第一级实例推理相似度为推理基准，通过推理机得到满足再制造要求的再制造工艺参数，例如加工余量、切削速度、镀层厚度等。这些再制造工艺参数将为后续的再制造工艺决策过程提供有效参考。

3. 实例修正与再制造

在二级实例推理结束后将得到若干个再制造工艺及其对应的工艺参数。然而受限于再制造成本、再制造工艺技术难度与工艺绿色性等因素的制约，还需对这些再制造工艺进行评估。通过相关领域专家的鉴定，同时采用科学有效的决策方法，最终从候选再制造工艺中选择最为合适的再制造工艺作为最终再制造工艺的参考，并对决策出的再制造工艺进行工艺参数修正，以适应当前的废旧零部件再制造修复。

过程。

4. 制定工艺规程

以修正后的再制造工艺路线对废旧零部件实施再制造修复，并采取相应的方法对再制造零部件进行质量检测。如果检测结果符合预期，则表明本次实例推理过程是有效可行的。因此，将本次的再制造工艺制作成再制造工艺规程文件，并通过相应手段存储到再制造实例库中，以便日后的再制造工艺实例推理问题的求解。

5.4 实例分析

以沈阳精新再制造有限公司的废旧机床导轨再制造修复工艺的决策过程为例，应用基于二级实例推理的废旧机床再制造工艺决策方法对其再制造修复工艺进行决策。在废旧机床回收拆解前，要对其进行性能评估，即预检测。例如通过对该废旧机床尾座套筒轴线对溜板箱移动的平行度进行检测（见图 5-6），以便对该废旧机床的导轨状态进行评估。

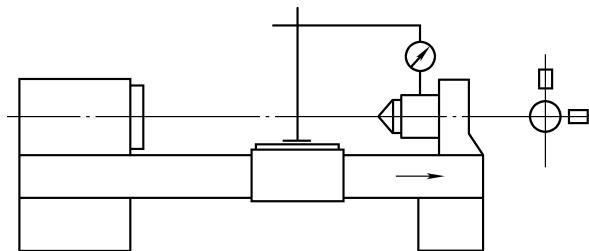


图 5-6 平行度检测

通过对该废旧机床进行检测，确认该导轨主要存在的失效形式为黏着磨损。此外，通过对磨损区域的分析与观察可知，导轨面的剪切破坏多发生在黏着面不远的软金属层内，即软金属层之间的相互摩擦与磨损，由此可知该磨损为涂抹磨损，如图 5-7 所示。导轨总体损伤面积大概为 200mm^2 。此外，导轨面还存在少量腐蚀与疲劳损伤。

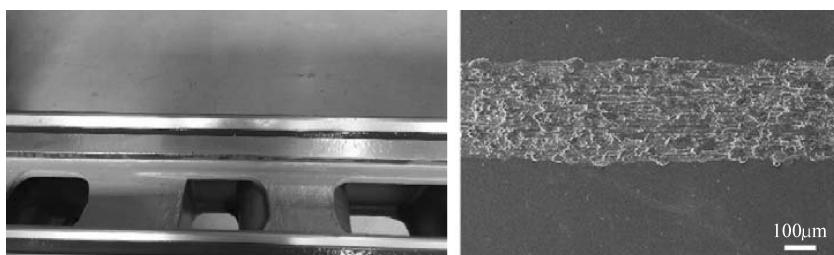


图 5-7 废旧机床导轨损伤检测

针对黏着磨损提取相应的失效工艺特征，即失效类型、失效程度，以及磨损面

积、疲劳裂纹深度等。

将导轨的失效特征参数以形式化的语言进行表达，以便使计算机能够识别。形式化语言形式多样，本例以基于本体的 OWL 语言为例，部分废旧导轨的失效特征表达如下：

```

<owl: class>
<owl: oneof rdf: parseType = " failure" >
<owl: Thing rdf: ID = " Friction" />
.....
<owl: Thing rdf: ID = " Corrosion" />

```

其中，以 class 定义一种类别，具体类型由 parseType 定义为 failure，即失效类别，而失效类别总体包括了磨损（Friction）与腐蚀（Corrosion）等类型。同理，部分黏着磨损特征参数的表达如下：

```

<owl: Thing rdf: ID = " Wear" />
<owl: ObjectProperty rdf: ID = " AdhesiveWear" />
<rdfs: range rdf: resource = "#Detection" />
.....
<owl: Class rdf: ID = " CrackDepth" />
<owl: DatatypeProperty rdf: ID = " DepthValue" />
<rdfs: domain rdf: resource = "#CrackDepth" />
<rdfs: range rdf: resource = " &xsd; positiveInteger" />
</owl: DatatypeProperty>

```

其中，通过 Thing 定义事物类型为 Wear，即磨损，而磨损属性通过 ObjectProperty 定义为 AdhesiveWear，即黏着磨损，其来源为实测数据（Detection）。同理，对失效类型类中的 CrackDepth，即裂纹深度进行定义，以 DepthValue 表示深度值；数据类型为 positiveInteger，即正整数，单位为 μm 。将形式化的基于本体 OWL 语言的废旧机床导轨失效特征知识本体输入到再制造工艺实例库中进行实例推理，在实例推理过程中，还将受到技术、成本、绿色性等因素的限制，如对电刷镀的再制造成本限制为：

```

<owl: Class rdf: ID = " BrushPlating" />
<rdfs: subClassOf rdf: resource = " &CrackRestore" />
.....
<rdfs: subClassOf>
<owl: Restriction>
<owl: onProperty rdf: resource = "#hasLimit" />
<owl: allValuesFrom rdf: resource = "#LimitValue" />
</owl: Restriction>

```

```
</rdfs: subClassOf >
```

```
.....
```

```
</owl: Class >
```

其中，在电刷镀修复类型中，通过 subClassOf 定义其子类别裂纹修复（Crack-Restore），以 onProperty 定义其特征限制，而限制值由 LimitValue 定义，LimitValue 由制造企业根据再制造工艺难度、成本等因素制定。

将废旧机床导轨本体知识和再制造工艺要求输入到推理机中，同时提取机床导轨实例特征。再制造工艺知识库中已有的候选工艺实例与根据再制造工艺要求规定的期望工艺实例见表 5-2。

表 5-2 知识库中的候选工艺实例与期望工艺实例

工艺实例特征	当前	工艺实例 1	工艺实例 2	工艺实例 3	工艺实例 4	预期目标
材料类型	铸铁	铸铁	铸铁	铸铁	铸铁	铸铁
失效类型	黏着磨损	黏着磨损	黏着磨损	疲劳磨损	腐蚀磨损	黏着磨损
失效程度	涂抹磨损	涂抹磨损	涂抹磨损	轻微磨损	轻微腐蚀	涂抹磨损
导轨平面度	0.024	0.016	0.014	0.018	0.016	0.017
检测平行度 H	0.022	0.018	0.016	0.019	0.021	0.016
检测平行度 V	0.018	0.012	0.013	0.011	0.009	0.012
大山导轨直线度	0.016	0.008	0.01	0.008	0.009	0.008

则根据式（5-1），所有候选工艺实例的皮尔森相关系数算子见表 5-3、表 5-4 及表 5-5。

表 5-3 皮尔森相关系数算子（I）

再制造工艺实例 1			再制造工艺实例 2		
xy	x^2	y^2	xy	x^2	y^2
2.72×10^{-4}	2.56×10^{-4}	2.89×10^{-4}	2.38×10^{-4}	1.96×10^{-4}	2.89×10^{-4}
288×10^{-4}	3.24×10^{-4}	2.56×10^{-4}	2.56×10^{-4}	2.56×10^{-4}	2.56×10^{-4}
1.44×10^{-4}	1.44×10^{-4}	1.44×10^{-4}	1.56×10^{-4}	1.69×10^{-4}	1.44×10^{-4}
6.4×10^{-5}	6.4×10^{-5}	6.4×10^{-5}	8×10^{-5}	10×10^{-5}	6.4×10^{-5}
7.68×10^{-4}	7.88×10^{-4}	7.53×10^{-4}	7.3×10^{-4}	7.21×10^{-4}	7.53×10^{-4}

表 5-4 皮尔森相关系数算子（II）

再制造工艺实例 3			再制造工艺实例 4		
xy	x^2	y^2	xy	x^2	y^2
3.06×10^{-4}	3.24×10^{-4}	2.89×10^{-4}	2.72×10^{-4}	2.56×10^{-4}	2.89×10^{-4}
3.04×10^{-4}	3.61×10^{-4}	2.56×10^{-4}	3.36×10^{-4}	4.41×10^{-4}	2.56×10^{-4}
1.32×10^{-4}	1.21×10^{-4}	1.44×10^{-4}	1.08×10^{-4}	8.1×10^{-5}	1.44×10^{-4}
6.4×10^{-5}	6.4×10^{-5}	6.4×10^{-5}	7.2×10^{-5}	8.1×10^{-5}	6.4×10^{-5}
8.06×10^{-4}	8.70×10^{-4}	7.53×10^{-4}	7.88×10^{-4}	8.59×10^{-4}	753×10^{-4}

表 5-5 皮尔森相关系数算子 (III)

相关系数算子	Σ_{xy}	Σ_x	Σ_y	Σx^2	Σy^2
工艺实例 1	7.68×10^{-4}	5.4×10^{-2}	5.3×10^{-2}	7.88×10^{-4}	7.53×10^{-4}
工艺实例 2	7.30×10^{-4}	5.3×10^{-2}	5.3×10^{-2}	7.21×10^{-4}	7.53×10^{-4}
工艺实例 3	8.06×10^{-4}	5.6×10^{-2}	5.3×10^{-2}	8.70×10^{-4}	7.53×10^{-4}
工艺实例 4	7.88×10^{-4}	5.5×10^{-2}	5.3×10^{-2}	8.59×10^{-4}	7.53×10^{-4}

由式 (5-2) 可得候选再制造工艺实例包含的定性特征相似度, 见表 5-6。

表 5-6 候选定性特征相似度

候选定性特征	材料	失效类型	失效程度
工艺实例 1	1	1	1
工艺实例 2	1	1	1
工艺实例 3	1	0	0
工艺实例 4	1	0	0

若再制造工艺特征权重向量 V 为

$$V = (k, vl) = (0.5, 0.2, 0.16, 0.14)$$

则最终各项候选再制造工艺实例相似度见表 5-7。

表 5-7 候选工艺实例相似度

相似度	$r_i(X, Y)$	K 加权值	$sim(X, Y)$
工艺实例 1	0.9594344	0.4797172	0.979717187
工艺实例 2	0.8995894	0.4497947	0.949794699
工艺实例 3	0.9687523	0.4843761	0.684376126
工艺实例 4	0.8205016	0.4102508	0.610250785

根据设定最低相似度为 0.9 的标准, 再制造工艺实例 1 与再制造工艺实例 2 符合再制造要求, 通过推理机得到的两条符合要求的再制造工艺路线如下。

- 1) 相似工艺实例 1: 磨削 - 激光脉冲电刷镀 - 锡铋合金焊接。
- 2) 相似工艺实例 2: 磨削 - 激光熔覆 - 表面处理。

同理, 接下来将这两个相似工艺实例输入到二级推理机, 即再制造工艺参数库中, 并得到对应工艺实例的工艺参数。根据推理结果, 制定相应的再制造工艺流程如下。

- 1) 工艺流程 1: 废旧导轨表面预处理—磨削去毛刺—除油除灰—电净处理 (电压 10V, 阴阳极相对移动速度 1.5m/s) —刷镍底层 (0.01mm) —刷碱铜—水洗酸洗—焊锡铋合金层 (0.01mm) —打磨抛光—检测。
- 2) 工艺流程 2: 废旧导轨表面预处理—磨削去毛刺—除油除灰—选定激光熔

覆设备—设定激光熔覆参数（激光功率 1600W，扫描速度 8mm/s，预置层厚度 0.4mm，离焦量 40mm）—进行激光熔覆—打磨抛光—检测。

由此可知，通过上述两种再制造工艺实例，均可达到该废旧导轨的再制造工艺要求。该再制造企业召集相关专家对这两例再制造工艺流程进行了评估。考虑到该再制造企业目前拥有的专用电刷镀电源的电压调节范围及电压变化幅度等技术指标无法满足工艺要求，且再制造工艺流程 1 相对工艺步骤较多，加工复杂程度高，因此最终选定了再制造工艺流程 2 作为废旧导轨的修复工艺方案，进而对其实施激光熔覆，如图 5-8 所示。

经检验，经过激光熔覆的再制造工艺修复后的机床导轨的直线度、平行度及表面粗糙度等精度指标均符合预期要求。此外，在该机床进行再制造装配过程后，检测其尾座套筒轴线相对于溜板移动的平行度，在垂直平面内由原来的 0.026mm/100mm 降低为 0.018mm/100mm；在水平面内由原来的 0.018mm/100mm 降低至 0.012mm/100mm，表明该工艺流程在保证技术、成本及绿色性的可行性条件约束下，能够达到再制造要求，体现了该工艺流程的可行性与有效性。

综上所述，该工艺流程转化为形式化的语言表达后，并输入到再制造工艺实例数据库中，形成了规范的再制造工艺流程，对日后的相似的再制造工艺决策问题的求解提供了参考依据。



图 5-8 废旧机床导轨激光熔覆过程

参 考 文 献

- [1] Kolodner J L. Reconstructive Memory: A Computer Model [J]. Cognitive Science, 1983, 7 (4): 281 – 328.
- [2] Lebowitz M. Memory – based parsing [J]. Artificial Intelligence, 1983, 21 (4): 363 – 404.

第6章 废旧零部件再制造过程智能质量控制方法

6.1 废旧机电产品再制造过程质量分析

6.1.1 再制造过程质量不确定性的原因

再制造产品的原材料为再制造零件、重用件或新件，很明显三者的质量状况不一。另外，重用件由于其服役年限及自身质量状况不定，使得其自身质量难以确定。又由于所使用的废旧毛坯质量不确定，使得以废旧毛坯为原材料的再制造过程与传统的制造过程相比变得更为复杂多变。所以，充分地了解再制造过程的这些不确定性，有利于再制造过程质量控制的有效实施。

引发再制造过程质量不确定性的原因有以下几个方面：

1) 再制造生产的原材料：再制造作为绿色生产，其原料主要来源于回收的废旧毛坯，由于废旧毛坯的服役情况及失效形式的不确定，毛坯的质量也不确定，所以毛坯的这种差异性使得再制造最终的产品质量存在着差异。再制造毛坯质量的差异是再制造过程的质量出现波动的根本原因，因此，在再制造过程质量控制中，着重考虑此重要因素的影响，对于保证再制造过程质量控制的准确性显得尤为重要。

2) 再制造过程的生产设备：在实际再制造过程中所使用的设备及回收零件进行再制造所使用的设备，对最终再制造零件的质量会产生很大影响，因此，优良的设备对再制造产品的质量是一大保证。

3) 再制造过程的生产技术：回收的废旧件，其中一些零件需要进行再制造，要使再制造零件的质量达到或者超过新品，对再制造的生产技术提出了较高的要求。目前常用的生产技术主要有激光熔覆、纳米电刷镀、表面贴塑、微脉冲电阻焊接技术等。这些生产技术可使再制造零件的质量与新品质量相差无几，有些甚至还高于新品的质量。

4) 再制造过程的生产环境：再制造过程的生产环境要比传统制造环境严格一些，再制造环境主要包括生产地点、时间、温度、湿度等。为了保证再制造过程最终产品的质量，要对再制造的环境进行严格的控制。

5) 再制造操作人员：操作者对再制造过程中质量的影响很大，所以对这一部分要多加重视。由于操作者技术水平的不同，操作者的熟练程度、工作态度、身体条件及心理素质等不同，使得再制造最终产品的质量情况也随之波动。

6) 再制造的生产目的：基于不同再制造目的所制造的产品质量也存在质量差

距,如再制造生产、再制造升级、再制造恢复等。不同目的的再制造,其产品恢复的等级也不一样,对应的产品的质量就存在着一定的差距。

6.1.2 再制造过程质量分析

通过从不同角度分析再制造质量的不确定性原因,能更有针对性地对再制造过程质量实施有效地控制。通过上述几点可引起再制造过程质量不确定性原因,对再制造过程的质量进行分析。

传统的产品制造过程大多数都是单生命周期降价单环服役周期,即“原料→成品→废旧失效产品→报废”的断裂模式。而再制造过程是一种绿色循环系统,能实现自身物质、能量及性能的循环,即形成了“原料→成品→再制造→成品”闭环多寿命周期的循环。

废旧机电产品再制造过程的质量管理贯穿于再制造的全过程,因此,对再制造过程质量分析同样需要贯穿于再制造的全过程。废旧毛坯的质量由于其使用的材料组织、自身几何尺寸、实际的服役性能、服役寿命等方面的不同,在前期评价过程中要考虑不同的因素,即再制造废旧零部件质量情况、本身性能的要求、对其剩余寿命要求等能否满足使用要求。就再制造产品而言,首先,其是以回收的废旧产品作为生产原材料的,回收的废旧毛坯服役状况、服役时间又是各不相同的,在使用过程中的失效形式同样存在各种类型,导致回收的废旧产品的剩余寿命、质量状况等波动很大,具有很大的不确定性。其次,针对废旧毛坯本身由于服役工况与服役时间不同导致其失效形式、质量状况的不确定,因此需要根据废旧产品的自身失效形式与存在的质量问题,选择合适的再制造修复技术并确定其加工工艺。另外,对于不同的废旧产品,其再制造过程需要的生产设备和采用的工艺处理手段也不一样,相比新产品的制造过程,再制造过程更复杂,也更具有波动性,因此在废旧机电产品再制造过程需要严格控制废旧毛坯的加工参数、加工质量、加工设备的情况等,以确保最终再制造产品的质量性能达到要求。最后,需要对加工完成的最终的再制造产品进行严格的检查,以确保配送到用户的再制造产品的质量和性能是合格的,是满足要求的。综合再制造过程的质量控制的不确定问题与再制造过程质量的分析,在再制造过程质量控制过程中,重点应考虑以下几个方面。

- 1) 由于再制造毛坯为回收的废旧零件,其服役状况、服役时间、组织机构的不同,造成毛坯的损伤和缺陷各不相同,致使各个毛坯的质量各不相同。
- 2) 再制造产业作为新兴产业,属于定制产品类型,因此能收集到的质量样本较少,如何在小样本条件下识别质量故障类型,是再制造过程的一个重点问题。
- 3) 再制造过程复杂多变,各种不确定性质量因素随机发生,使得再制造各质量控制点呈现出高度不确定性、动态性和时变性,致使再制造过程质量异常与引发因素之间同样存在不确定性。

6.2 废旧机电产品再制造过程质量控制的关键问题

6.2.1 再制造过程质量控制的关键问题

根据前期对再制造过程质量分析结果得出,再制造过程的质量控制的关键是如何解决这几个质量控制难点,这也是再制造过程质量控制的关键问题之所在。

1) 针对再制造过程出现的各种不确定因素,如何在众多质量控制方法之中选择一种适合于再制造过程质量监控的方法,是实现再制造过程质量有效控制的关键。通过分析传统控制方法的使用条件、假设条件及再制造过程质量数据分布不确定问题,选择不需要对参数进行任何假设的非参数控制图的方法。如何将非参数控制图方法应用到再制造控制中去,也是实现再制造过程质量控制的关键。

2) 在监控到再制造过程质量异常的基础上,如何实现在小样本条件下再制造过程质量异常识别,是再制造过程质量控制的又一关键问题。传统的异常识别方法都是以大样本为基础实现的,所以选择一种合适的方法解决再制造过程质量异常识别,并快速实现异常的识别及定位出异常的位置,对于后期的快速寻找异常的原因同样是特别重要的。

3) 当识别出再制造过程异常的类型时,下一步的工作就是加速发现导致再制造过程质量异常的可能因素,并进行快速、准确的过程调整。在得知可能导致质量异常原因的基础上,要实现快速、准确地实现再制造过程调整,需要确定导致过程异常的各种因素对于该种质量异常的重要度。如何确定在再制造过程质量因素不确定、不明确的条件下各种因素之间的重要度,是实现再制造过程质量诊断与调整的关键。

6.2.2 再制造过程质量监控理论综述

目前,针对废旧产品再制造过程的质量控制问题,国内、外学者及专家从不同角度开展了广泛的研究。再制造过程的主要问题集中在不确定性之上,所以主要研究内容也基本是再制造前期及其不确定的方向上。

在国外,Mark Ferguson 等^[1]针对回收的废旧毛坯件质量的不确定性,考虑到毛坯质量分级对再制造装配过程的重要性,提出了一种简单的贪婪启发式算法来计算最优解确定毛坯质量等级;Barquet 等^[2]针对缺少再制造知识及其知识系统可视化难度问题,提出了一种可视化的再制造模型以确保再制造产品的质量;Shen W 等^[3]针对影响再制造装配的主要因素提出了测量其不确定性测量的方法,并通过实例的方式验证该方法的可行性。

在国内,姚巨坤教授^[4]针对影响再制造过程质量的因素,对废旧产品再制造过程的质量控制问题进行了研究,并提出相应的控制方法;钟诚等^[5]以再制造全

过程出发研究再制造产品质量问题，从阐述加工阶段使用的技术方法出发剖析了再制造加工过程的质量控制内容，并分析了统计过程控制在加工阶段质量管理控制的应用；邵将等^[6,7]针对曲轴再制造加工过程特点和质量控制难题，构建了再制造曲轴加工过程质量控制的体系架构，并结合实际加工过程验证体系的可行性；孙志军等^[8,9]针对再制造毛坯种类数目众多质量不一的问题，根据完工工件存在着不同程度的差异，建立了产品再制造质量误差耦合模型监控再制造过程质量；刘明周等^[10]针对再制造装配的不确定性问题，提出了动态工序质量控制系统的结构模型对再装配过程进行控制；李成川等^[11]针对再制造系统工艺路线不确定性问题，建立了一种基于图形评审技术的再制造工艺路线模型，并详细阐述了该模型建立的过程，且以具体的实例验证了该模型的可行性；张宇等^[12]综合统计公差国家标准与给定置信水平两个因素，设计了一种用于质量目标的计量型常规控制图；梁工谦等^[13]针对休哈特控制图在再制造应用中出现的各种不适应性，提出了对于多工序、多指标的生产模式运用控制图的方法。

综上所述，关于再制造质量控制方面的研究主要还是集中在将传统常用的质量控制与检测技术应用于再制造的加工过程，且多从定性描述或评价的角度，偏重于从再制造成品质量分析的研究；并没有考虑再制造毛坯质量差异和样本质量分布不确定这些问题。同时，传统的控制图在再制造应用中，出现了许多不适应情况。

因此，我们针对再制造废旧毛坯质量的不确定性问题，提出了一种面向动态、非多元正态分布的再制造过程质量 EWMA (Exponentially Weighted Moving – Average) 控制图，利用非参数方法中的 Wilcoxon 秩和检验的理论知识得到与样本数据无关的秩和统计量，真正达到与分布无关；同时，结合指数加权移动平均控制图 (EWMA) 的设计原理，以及通过不断更新的观测点和变化的光滑参数来确定动态控制限，从而实现再制造过程质量的自适应监控。

6.3 基于动态、非正态的 EWMA 控制图的再制造过程质量监控模型

6.3.1 面向动态、多元非正态分布的再制造过程质量监控流程

由于废旧机电产品再制造毛坯质量不确定问题，使过程质量监控相对于传统过程监控更为复杂。受数据自相关性及偏正态性的影响的传统控制图方法，已不再适用于再制造过程质量监控。如何在众多的方法中选择一种适合再制造的方法对于再制造的质量监控特别重要。

针对再制造过程毛坯质量的不确定性问题，提出的基于非参数的理论方法，无须对总体分布做任何假设，完全可以从实际样本数据中获得信息，从而消除传统参数方法的模型假设条件所带来的偏差。因此，非参数控制方法能够适应过程不确定

的实际工业生产中，特别是再制造行业。同样，在其他有关不确定性探索领域中，焦点也集中在非参数控制图上。利用基于非参数的理论知识实现再制造过程质量的自适应监控，而采用的面向动态、非多元正态分布的再制造过程质量 EWMA 控制图的详细监控流程图，如图 6-1 所示。

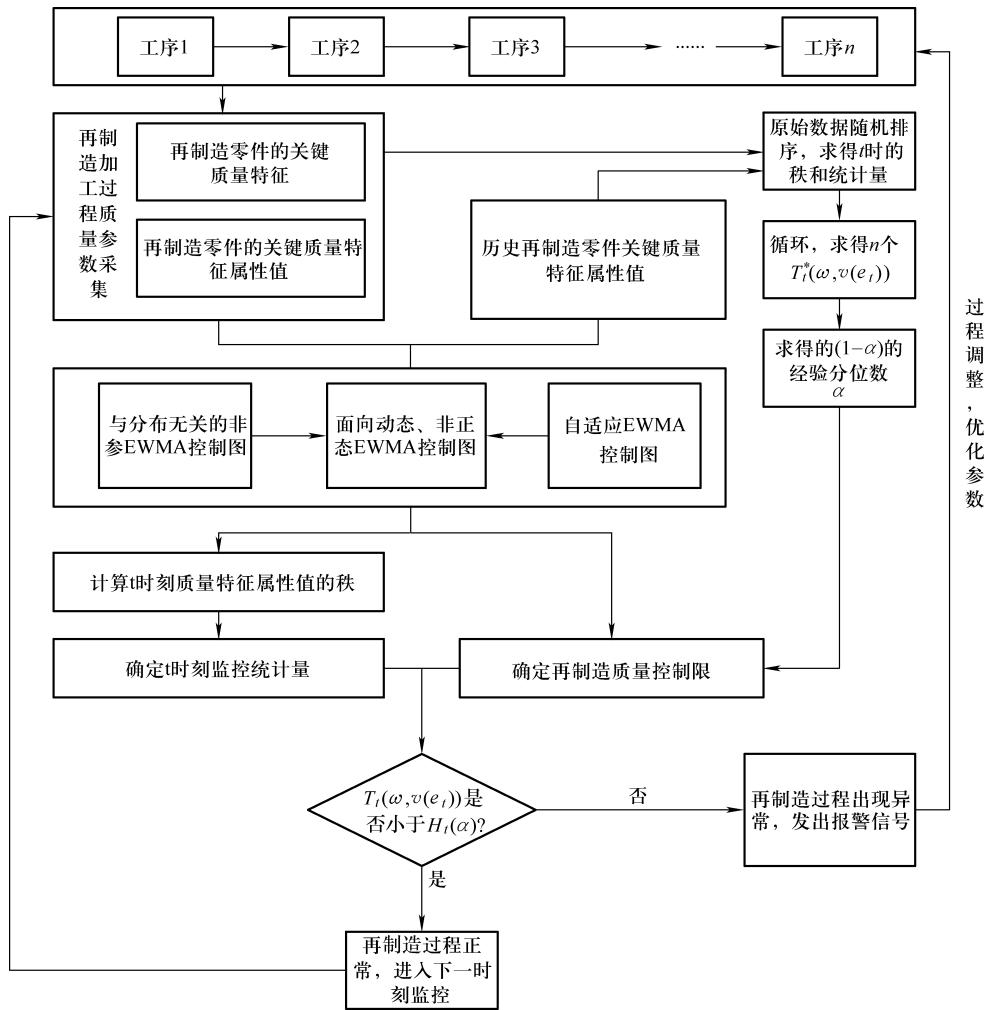


图 6-1 再制造过程质量监控流程

6.3.2 与分布无关的非参多元 EWMA 控制图的构建

目前，废旧产品再制造系统存在许多不确定性，导致废旧毛坯的质量分布不确定，而有关不确定问题的研究大多集中在非参方法上。秩和检验作为非参方法的一种，不需要提前对样本做任何假设，即可应用于总体分布形式未知或分布类型不明数据的方法中，使得基于秩和检验所构建的非参多元 EWMA 控制图（Distribution -

Free Exponentially Weighted Moving – Average, DFEWMA) 具有能够很好地适应再制造过程系统不确定性的特点。而 DFEWMA 控制图的特点就在于其控制限是随时间变化的，并通过不断更新观测值进行实时改变，它不是在监控前预设的，而此控制图动态控制限的使用恰好符合再制造过程质量分布不确定的特点。由于消除过程数据维度及数据分布两者的限制，在不同情况下该控制图依然能获得特定可控平均运行链长。通过构造一系列非参数的再制造质量监控秩和检验统计量，保证了控制图是与数据分布无关的，这也是此控制图的核心思想。在统计量构造过程中，重点是如何使用条件概率，即控制图在当前时刻的统计量超过控制限，而在此之前，再制造过程并未出现过程异状，由此保证了控制图能够取得特定错误报警率。接下来，针对再制造过程质量分布不确定性特点及条件概率的使用，具体阐述了 DFEWMA 控制图统计量的构建过程，进而说明再制造过程质量具体的监控过程。

1. 再制造过程质量监控统计量的构建

假设两个独立再制造样本 $\{X_1, X_2, \dots, X_\tau\}$ 与 $\{X_\tau, X_{\tau+1}, \dots, X_t\}$ ，并且它们分别服从分布 $f(x; \mu_0)$ 和 $f(x; \mu_1)$ 。原假设为 $H_0: \mu_0 = \mu_1$ ，备择假设 $H_1: \mu_0 \neq \mu_1$ 。

原假设 $H_0: \mu_0 = \mu_1$ ，等价于当 $j = 1, 2, \dots, p$ 时，它们的每一个成分 $\mu_{j0} \neq \mu_{j1}$ ，因此，对于观测的再制造样本的每一个成分，利用 Wilcoxon 秩和检验^[14,15]，如式 (6-1) 表示：

$$T_{jt} = \frac{\sum_{i=\tau+1}^t R_{ji} - \frac{\tau(t+1)}{2}}{\sqrt{\frac{\tau(t+1)(t-\tau)}{12}}} \quad (6-1)$$

式中， R_{ji} 表示 X_{ji} 在再制造混合质量样本中的秩。

当 $\mu_{j0} \neq \mu_{j1}$ ， $|T_{jt}|$ 的值就会变大。随后合并再制造质量观测值的每一个成分 T_{ji} ， $j = 1, 2, \dots, p$ ，此过程采用“max”或“ Σ ”。采用 $T_t = \max T_{ji}^2$ ，当 T_t 值变大，超出设定界限时，拒绝 H_0 。在再制造过程中，虽然无法获得原始分布，但由于它依赖于变量与变量间的相关性，其条件与分布无关，所以当给定再制造质量数据样本时，能求得阈值。

假设 m_0 个独立同分布 (iid) 的再制造过程历史观测值， $X_{-m_0+1}, \dots, X_0 \in R^p, p \geq 1$ ，第 i 个质量观测值是 $X_i = (X_{1i}, \dots, X_{pi})$ ，多元位置变点模型以式 (6-2) 表示：

$$X_i \sim \begin{cases} f_0(x; \mu_0) & \text{for } i = m_0 + 1, \dots, 0, 1, \dots, \tau \\ f_1(x; \mu_1) & \text{for } i = \tau, \dots \end{cases} \quad (6-2)$$

式中： τ 为某一再制造质量异常变点； f_0 表示再制造过程在控的分布函数； f_1 表示失控时的分布函数，假设两函数都是连续的。

在实际再制造过程中， f_0 和 f_1 是否相同不确定，假设再制造过程位置参数 μ_0

$= (\mu_{10}, \mu_{20}, \dots, \mu_{p0})^T$ 和 $\mu_1 = (\mu_{11}, \mu_{21}, \dots, \mu_{p1})^T$ 是不同的。

定义再制造质量监控点为 $x_{k,j}^t = -(x_{jk}, \dots, x_{jt})^T$ 和 $x_k^t = (x_{k,1}^t, \dots, x_{k,p}^t)^T$ ，此外选择一个窗宽 ω 和一个光滑参数 λ 。在每一个质量监控时间点，假设为 t 时刻，构造一个再制造质量监控点的统计量如式 (6-3) 表示：

$$T_{jt}(\omega, \lambda) = \sum_{i=t-\omega+1}^t (1-\lambda)^{t-i} \cdot \frac{\left[R_{jti} - \frac{m_0 + t + 1}{2} \right]}{\sqrt{\omega(t+m_0-\omega)(t+m_0+1)}} \quad (6-3)$$

式中： R_{jti} 表示再制造监控点 X_{ji} 在样本 $x_{-m_0+1,j}^t$ 中的秩； ω 表示窗宽； λ 表示光滑参数； m_0 表示历史观测点数量； j 表示再制造质量观测点的第 j 维参数。

$T_{jt}(\omega, \lambda)$ 用来检验两个再制造质量监控样本点 $x_{-m_0+1,j}^t$ 和 $x_{t-\omega+1,j}^t$ 中观测值的位置参数是否相等。观测点离得越近，权重越大；反之，权重越小，且权重符合指数分布，并以此函数形式衰减。当变点 τ 的第 j 个监控成分中某一个位置参数变动，当 $t > \tau$ 时，质量监控最终值 $|T_{jt}|$ 变大，若超出特定值，引发报警。

2. 再制造过程质量监控控制限的确定

利用与分布无关的控制图实现再制造加工过程的质量监控，关键在于再制造质量监控的控制限的确定，使得条件概率为一特定的常数，且此之前过程并没有出现异常，发出报警。通过式 (6-5) 确定监控点的控制限：

$$\Pr(T_1(\omega, \lambda) > H_1(\alpha) | \hat{F}_1) = \alpha \quad (6-4)$$

$$\Pr(T_t(\omega, \lambda) > H_t(\alpha) | T_i(\omega, \lambda) < H_i(\alpha), 1 \leq i \leq t, \hat{F}_t) = \alpha, t > 1 \quad (6-5)$$

式中， α 表示错误报警概率。

6.3.3 面向动态、多元非正态分布的再制造过程质量 EWMA 控制图的构建

在实际的再制造过程中很难准确了解漂移的大小，直接人为设定光滑参数会带来较大的误差，降低监控的准确性。为了减少这类人为误差，同时加大监控过程漂移的范围^[16]，Capizzi 和 Massarotto^[17] 在前人的基础上，提出了变化光滑参数的 (Adaptive) 自适应 EWMA 控制图 (AEWMA)，此控制图对过程发生的不同大小漂移都有效。

AEWMA 控制图的再制造过程质量统计量定义以式 (6-6) 表示：

$$x_t = x_{t-1} + \varphi(e_t) \quad (6-6)$$

式中， $e_t = y_t - x_{t-1}$ ， $\varphi(e_t)$ 表示“得分函数”。

若 $|x_t - \eta_0| > H$ ，系统发出报警信号，式中 η_0 为再制造过程目标均值， H 为相对应的阈值。当 $y_t \neq x_{t-1}$ 时，式 (6-6) 可变形为式 (6-7)：

$$x_t = (1 - \omega(e_t)) x_{t-1} + \omega(e_t) y_t \quad (6-7)$$

式中， $\omega(e) = \frac{\varphi(e)}{e}$ ，这说明，再制造过程中权重是实时变化的。

在选取式(6-6)与式(6-7)中得分函数时, 鉴于传统控制图及移动加权平均控制图各自的特点与优势, 需考虑如下因素:

因素1: $\varphi(e)$ 是e的非降函数。

因素2: $\varphi(e) = -\varphi(-e)$, 即 $\varphi(e)$ 是奇函数。

因素3: 当 $|e|$ 较小时, $\varphi(e) \approx \lambda e$ $0 \leq \lambda \leq 1$ 。

因素4: 当 $|e|$ 较大时, $\varphi(e) \approx e$ 。

综合上述四点因素考虑, 给出以下三种得分函数:

$$\varphi(e) = \begin{cases} e + (1 - \lambda)k & e < -k \\ \lambda e & |e| \leq k \\ e + (1 - \lambda)k & e > k \end{cases} \quad (6-8)$$

$$\varphi(e) = \begin{cases} e \left(1 - (1 - \lambda) \left(1 - \left(\frac{e}{k} \right)^2 \right)^2 \right) & |e| \leq k \\ e & e < -k \text{ 或 } e > k \end{cases} \quad (6-9)$$

$$\varphi(e) = \begin{cases} -e & e < -p_1 \\ -\tilde{\varphi}_{cb}(e) & -p_1 < e < -p_0 \\ \lambda e & |e| \leq p_0 \\ \tilde{\phi}_{cb}(e) & p_1 < e < p_0 \\ e & e > p_1 \end{cases} \quad (6-10)$$

式中, $0 \leq \lambda \leq 1$, $k \geq 0$, $0 \leq p_0 \leq p_1$, 且 p_0 、 p_1 都为常数, 并满足: $\tilde{\varphi}_{cb}(e) = \lambda e + (1 - \lambda) \left(\frac{e - p_0}{p_1 - p_0} \right)^2 * \left(2p_1 + p_0 - (p_1 + p_0) \left(\frac{e - p_0}{p_1 - p_0} \right) \right)$ 。

此控制图的参数包括光滑参数 λ 和控制限 H 。对于式(6-8)及式(6-9)中的得分函数, 未知参数为三维矢量, 设 $\beta = (\lambda, H, k)$, 采用下述方法求解:

步骤1: 确定要检测的漂移区间 (μ_1, μ_2) 及在控平均运行链长 ARL , 设为 b 。

步骤2: 假定参数 β^* , 使漂移为 μ_2 时, 达到最小的 ARL , 即求解式(6-11):

$$\begin{cases} \min_{\beta} ARL(\mu_2, \beta^*) \\ st ARL(0, \beta^*) = b \end{cases} \quad (6-11)$$

式中, $ARL(\mu, \beta)$ 表示当漂移是 μ , 平均运行链长是 ARL 时, 得到参数 β 。

步骤3: 对于假定的 α , 设 $\alpha = 0.05$, 此控制图的最优参数 β , 即求解式(6-12):

$$\begin{cases} \min_{\beta} ARL(\mu_1, \alpha) \\ st ARL(0, \beta^*) = b \\ ARL(\mu_2, \alpha) \leq (1 + \alpha) ARL(\mu_2, \beta^*) \end{cases} \quad (6-12)$$

经计算得到参数 β , 满足当条件为漂移是 μ_1 时, 取得最优的 ARL ; 同时在漂移为 μ_2 的条件下, 几乎取得最优的 ARL 。

为了使再制造加工过程质量监控更加精确, 减少人为设定参数带来的误差, 针对再制造过程发生的漂移大小不同的情况, 利用实时变化的光滑参数实现再制造过程在线监控。鉴于式 (6-8) 函数的有效性及简便性, 利用式 (6-8) 展开所提出的自适应方法。

1. 改进的再制造过程质量监控统计量

引入自适应的概念, 将式 (6-7)、式 (6-8) 带入式 (6-3), 得到新的再制造质量监控点的统计量如式 (6-13) 表示:

$$T_{jt}(\omega, v(e_i)) = \sum_{i=t-\omega+1}^t (1 - v(e_i))^{t-i} \cdot \frac{\left[R_{jti} - \omega \cdot \frac{m_0 + t + 1}{2} \right]}{\sqrt{\frac{\omega(t + m_0 - \omega)(t + m_0 + 1)}{12}}} \quad (6-13)$$

其中, $e_i = |Y_i - X_{i-1}| = \sqrt{(Y_{i,1} - X_{i-1,1})^2 + (Y_{i,2} - X_{i-1,2})^2 + \cdots + (Y_{i,p} - X_{i-1,p})^2}$

$$\varphi(e) = \begin{cases} e + (1 - \lambda)k & e < -k \\ \lambda e & |e| \leq k \\ e + (1 - \lambda)k & e > k \end{cases}$$

其中, $v(e_i) = \varphi(e_i)/e_i, 1 \leq i \leq t$ 。选择 $0 \leq \lambda \leq 1, k = 3\sigma$ 。

再制造监控统计量最终值 $T_t(\omega, v(e_t)) = \max T_{jt}^2$ 。

2. 改进后的再制造过程质量监控控制限的确定

引入自适应的概念后, 最终再制造质量控制动态控制限由式 (6-5) 变为式 (6-14):

$$\Pr(T_t(\omega, v(e_t)) > H_t(\alpha) | T_i(\omega, v(e_t)) < H_i(\alpha), \max(1, t - \omega + 1), \hat{F}_t) = \alpha \quad (6-14)$$

使用的动态控制限需要特别强调, 动态控制限是在线确定的, 而不是在监控前确定的。即这些控制限与原始数据相关的, 并没有做任何假设, 这是构造与分布无关控制图的关键。

定理: 在可控情况下, 对于任何连续的 F_0 , 当 $t \geq 1$ 时, $\Pr(ARL = t) = \alpha(1 + \alpha)^{t-1}$

虽然 $T_t(\omega, v(e_t))$ 是条件与数据分布无关的, 但要通过求解再制造加工质量统计量所有值, 进而求得 $H_t(\alpha)$ 是很难实现的。此外, 鉴于再制造控制限统计量公式本身及求解的复杂性, 同样无法通过分析方法来解决 $H_t(\alpha)$ 的求解问题。因此, 提出了一种算法近似 $H_t(\alpha)$ 。

推理: 对于每一个 j , $T_{jt}(\omega, \lambda)$ 与 $T_{jk}(\omega, v(e_t))$ 无关, $k \leq t - \omega$ 。

依据此理论, 将上述求解再制造过程控制限统计量公式 (6-14) 简化为

$$\Pr(T_t(\omega, v(e_t)) > H_t(\alpha) | T_i(\omega, v(e_t)) < H_i(\alpha), \max(1, t - \omega + 1), \hat{F}_t) = \alpha \quad (6-15)$$

当 t 较大时, 式 (6-15) 有助于求得 $H_t(\alpha)$, 因为概率只与窗宽 ω 内的 T_i 有关, 而不是与再制造所有参数的 T_i 有关, 因此, 采用如下算法。

1) 当 $t = 1$ 时, $\{-m_0 + 1, \dots, 1\}$ 随机进行排序, 假设某一排序为 $\{i_1, \dots, i_{-m_0 + 1}\}$, 设 $x_{-m_0 + 1}^1 = \{X_{i_1}, \dots, X_{-m_0 + 1}\}$, 求得相应的 $T_1^*(\omega, v(e_t))$ 。循环该排序过程 b 次, 最后通过求解 $T_1^*(\omega, v(e_t))$ 所有值的 $(1 - \alpha)$ 经验分位数, 得到相应的条件阈值 $H_1(\alpha)$ 。

2) 当 $t > 1$ 时, 假设初始值 $i = 0$ 。按照上述随机排序方法, 计算求得再制造统计量 $T_k^*(\omega, v(e_t)) \max(1, t - \omega + 1) \leq k < t$ 。若 $T_k^*(\omega, v(e_t)) < H_k(\alpha)$, 求得一个 $T_t^*(\omega, v(e_t))$, 进入下一次排序, 且 $i = i + 1$; 反之, 舍弃该排序。循环该过程, 当 $i = b$ 时停止。随后通过求解 $T_t^*(\omega, v(e_t))$ 的 $(1 - \alpha)$ 经验分位数, 获得条件阈值 $H_t(\alpha)$ 。

3. 再制造过程质量监控相关参数的选择

(1) m_0 的选择 ADFEWMA 是一种自启动控制图, 从再制造开始阶段就利用动态控制限检测过程异常。因此, 若 m_0 太小, 不利于再制造过程质量的异常检测。因为控制图需通过获取适量多的观测值满足第一阶段的学习, 用以保证再制造过程初始阶段的稳定性。通过实践证明, 要保证控制图有稳健良好的表现, 在再制造过程质量出现异常前, 需要 20~100 个再制造历史观测数据 (越多越好)。

(2) 初始阶段 当 t 较小时, 例如 $t < \omega$, 再制造质量统计量里面包括历史观测值的排序。另外由于过程漂移通常是在过程正常运行一段时间后发生, 所以此时 t 对再制造过程不会产生影响。若在较早的情况下, 即 t 较小时, 过程发生漂移, 则需满足 $\omega = \max\{5, \min\{\omega_1, t\}\}$, 式中 ω_1 表示满足 $(1 - \lambda)^{\omega_1} \approx 0$ 的窗宽。因此, 求得 $\omega = 5$ 。

(3) 光滑参数 λ 的选择 对于最终控制图中光滑参数 λ 的确定, 不仅要考虑其对于非正态分布的稳健性, 同时还要考虑其在再制造过程中, 对于不同漂移的监控的可靠性。在再制造过程正常运行情况下, 无论权重如何选取, 都是与过程数据分布无关的。因此, λ 的选取方法与传统控制图参数 λ 的取值方法类似。针对不同的漂移, 选择合适的 λ 值。所以, 根据偏移量和再制造毛坯质量不定情况, 选择 $\lambda \in [0.025, 0.2]$ 。

6.3.4 实例分析

以废旧 TPX6113 镗床的横向导轨再制造过程为例。导轨是机床的基准部件, 主要作用是承载其余主要部件并作为其余部件的运动基准, 保证机床主要部件运动的准确性^[18]。机床导轨大部分都是铸铁件, 在机床使用过程导轨需要面临承载

力、腐蚀、氧化等多方面影响，容易出现氧化、拉伤、碰伤、磨损、腐蚀等。废旧导轨的修复过程依旧以传统机械加工为主，修复方法包括刮研、刨削和磨削三种。刮研是以基准表面为标准，使用刮刀、测量工具及显示剂等工具，手工操作为辅助的方式，通过边研点、边测量、边刮研加工的方式，使最终工件达到工艺上规定的尺寸、几何形状、表面粗糙度和密合性等要求的一项精加工工序。磨削是指通过利用磨料、磨具等工具将工件上多余材料切除或者磨去的机械方法。磨削加工属于精加工，其加工量少、精度高，主要工作原理是通过高速旋转的高硬度磨具去除零件表面多余的加工余量。刨削加工是用刨刀对工件做水平相对直线往复运动的切削加工方法，是平面加工的主要方法之一。

由于回收的废旧导轨存在极大的不确定性，导致导轨再制造方法不确定，从而使其再制造过程存在极大的不确定性。主要体现在如下几个方面：

- 1) 由于废旧导轨回收数目、回收时间的不确定，导致再制造导轨的数量和时间不确定，其数据分布已不再符合正态分布。
- 2) 由于其服役工况、本身质量的不确定性，使得再制造加工余量不确定。
- 3) 由于加工余量的不确定性，使得过程使用的加工设备不确定，导致再制造加工工艺不确定。因此，导轨回收数量与时间的波动、本身质量的波动及加工余量与加工方法的波动导致其再制造加工过程存在极大的波动性。

所以，针对废旧机床导轨再制造过程中的不确定性与波动性极大的问题，需对导轨的再制造过程质量特征属性进行严格的质量监控，从而有效保证再制造导轨的质量。导轨的质量特征属性主要包括表面粗糙度、直线度、平行度、平面度、垂直度等。

1) 确定机床导轨的质量监控点。TPX6113 镗床再制造车间需要对一批镗床导轨进行再制造。当废旧导轨为再制造时，要求其精度达到新导轨的精度要求，导轨的表面粗糙度要求小于 Ra 为 $0.8 \mu\text{m}$ ，直线度要求小于 0.015mm ，平行度要求小于 0.02mm ，垂直度要求小于 0.02mm ，平面度要求小于 0.02mm 。其中，垂直度是指加工导轨相对于装夹平面的垂直度。从再制造车间采集导轨再制造过程的在控质量特征属性值数据，例如利用研点法、垫塞法、平尺拉表法求得导轨的直线度。由于控制图第一阶段需要一定量的数据保证其过程的稳定性，故采集废旧导轨的历史加工数据，再制造导轨质量特征属性值的历史数据具体见表 6-1。

表 6-1 再制造导轨质量特征属性值样本数据 (单位：mm)

序号	表面粗糙度/ μm ($Ra0.8$)	直线度 (0.015)	平行度 (0.02)	垂直度 (0.02)	平面度 (0.02/1000)
1	0.72	0.014	0.020	0.016	0.020
2	0.63	0.015	0.015	0.020	0.020
3	0.68	0.013	0.016	0.017	0.015
4	0.73	0.014	0.017	0.015	0.014

(续)

序号	表面粗糙度/ μm ($Ra0.8$)	直线度 (0.015)	平行度 (0.02)	垂直度 (0.02)	平面度 (0.02/1000)
5	0.67	0.012	0.013	0.018	0.018
6	0.80	0.014	0.014	0.015	0.012
7	0.61	0.011	0.013	0.014	0.013
8	0.72	0.013	0.018	0.016	0.015
9	0.69	0.012	0.013	0.012	0.017
10	0.79	0.010	0.010	0.011	0.012
11	0.65	0.013	0.019	0.018	0.015
12	0.76	0.014	0.013	0.020	0.019
13	0.78	0.012	0.016	0.016	0.017
14	0.68	0.014	0.017	0.015	0.014
15	0.75	0.013	0.018	0.018	0.019
16	0.69	0.015	0.016	0.017	0.014
17	0.71	0.013	0.014	0.016	0.016
18	0.80	0.015	0.018	0.017	0.016
19	0.66	0.010	0.016	0.013	0.018
20	0.78	0.014	0.019	0.017	0.015

注: () 数值参照值。

2) 根据受控的数据对控制图进行参数估计, 以保证控制图第一阶段的稳定性。接下来监控导轨再制造过程实时质量情况, 由于再制造机床是根据用户需求或工厂自身需求定制的, 所以回收的废旧机床的数目是不确定的。而过程所需的导轨数目有限, 使其再制造过程的加工时段可能是不连续的。取两时段 T_1 、 T_2 的加工过程为例, 注意两个时段间隔时间不宜过长, 具体数据见表 6-2。

首先, 采用面向动态、非多元正态分布的再制造过程质量 EWMA 控制图的方法, 利用式 (6-13) 计算得到每个观测数据的相关的统计量; 其次, 依据动态控制限的求解式 (6-18) 及提出的其相关的计算方法求出该质量观测数据相对应的控制限。确定求解控制图统计量和控制限中各个参数值: $m_0 = 20$, $w = 5$, $\lambda = 0.025$ 。利用 MATLAB 软件按照图 6-1 具体流程编程, 实现再制造过程质量监控统计量及相应控制限有关的计算, 并绘制出相应的控制图, 如图 6-2 所示。图 6-2 中, t 表示再制造导轨实时监控时间点; $H(t)$ 表示控制图的控制限。导轨再制造过程的每个质量监控点的控制限实时变化的, 当质量监控点的质量数据超出了控制限, 即说明再制造加工过程处于失控状态, 过程出现了异常。由图 6-2 可以得出, 对于不同时段的数据, 当再制造导轨过程出现异常时, 该控制图能够灵敏地检测出再制造过程质量异常, 并发出异常信号。

表 6-2 再制造导轨质量特征属性值实时数据 (单位: mm)

时间	序号	表面粗糙度/ μm ($Ra0.8$)	直线度 (0.015)	平行度 (0.02)	垂直度 (0.02)	平面度 (0.02/1000)
T_1	1	0.70	0.013	0.019	0.019	0.017
	2	0.77	0.014	0.015	0.020	0.019
	3	0.78	0.012	0.016	0.016	0.017
	4	0.58	0.014	0.017	0.015	0.014
	5	0.75	0.013	0.018	0.018	0.019
T_2	6	0.69	0.015	0.016	0.017	0.014
	7	0.70	0.013	0.014	0.015	0.016
	8	0.91	0.016	0.019	0.017	0.016
	9	0.66	0.017	0.016	0.013	0.018

为了进一步说明此控制图良好的表现, 通过 MATLAB 模拟求得上述两种控制图的平均运行链长 (Average Run Length, ARL) 来比较控制图表现的优劣。在进行控制图的性能比较时, 通常是在 ARL_0 (将从监测开始到发出误警报所抽取的平均样本组数称为可控的 ARL) 取定值 (通常选择 $ARL_0 = 200$ 、370、500, 本例以 $ARL_0 = 370$ 为标准进行讨论) 的情况下, 比较其 ARL_1 (从监控开始到发出异常警报所取的平均样本数量称失控 ARL) 的大小, ARL_1 越小说明该控制图在生产过程出现异常时能越早报警, 表示其监测性能越强。

从表 6-3 中可以看出, 无论 p 和 λ 如何取值, ADFEWMA 控制图的表现都很稳定。无论是可控平均运行链长 (ARL_0), 还是运行链长的方差 ($SDRL$) 都非常接近于标准值 370。说明 ADFEWMA 的控制图的表现优于 DFEWMA 控制图, 有改进效果。

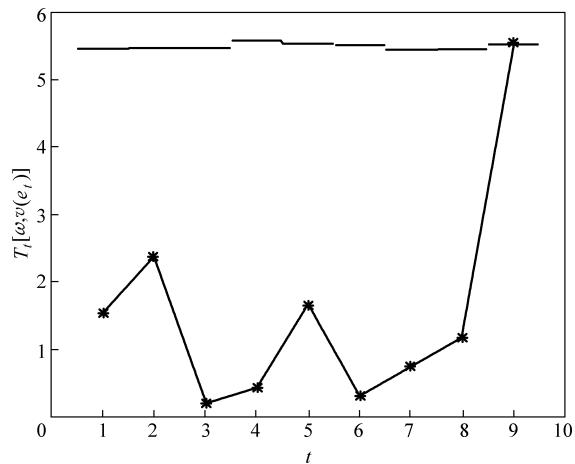


图 6-2 再制造导轨质量监控控制

表 6-3 $m_0 = 20$ 时, 不同 p 、 λ 下得到控制图 ADFEWMA、DFEWMA 的 ARL0

p		$\lambda = 0.1$			$\lambda = 0.05$		
		ARL0	SDRL	FAR	ARL0	SDRL	FAR
5	ADFEWMA	370	370	0.10	370	370	0.10
	DFEWMA	369.51	310.32	0.093	369.78	323.69	0.091
4	ADFEWMA	360.64	305.83	0.098	362.82	306.54	0.096
	DFEWMA	369.62	312.72	0.092	369.80	323.44	0.090

6.4 基于改进 PCA 的废旧机电产品再制造过程异常识别

再制造作为新兴产业, 产品质量是其发展的根本, 再制造系统相比于传统的制造系统更为复杂, 一旦系统发生故障将会给再制造企业的发展和财产带来极大的危害, 因此提高废旧机电产品再制造系统的安全性和可靠性至关重要^[19]。而保证再制造系统的安全运行, 就离不开再制造过程异常源识别问题。而再制造过程由于其毛坯种类多样、损伤程度不同, 使得再制造过程质量控制点呈现出不确定性、动态性及非线性等特点。再制造产品大多数是根据用户的要求进行定制的产品, 故再制造质量数据样本较少。因此, 如何在小样本条件下实现复杂再制造过程质量异常识别, 是有效控制再制造过程稳定性的一个重要方法, 也是再制造企业亟待解决的重要难点问题之一。

6.4.1 废旧机电产品再制造过程质量异常分析

废旧机电产品再制造过程中复杂性与不确定性对再制造最终产品的质量产生很大的影响, 再制造过程的质量控制的目的是为了保证最终再制造产品的质量, 但并不是所有的再制造产品都能制造合格, 以及达到出厂要求。废旧毛坯再制造过程中需要控制的质量参数有很多, 而影响这些参数的质量因素相对来说就更多, 例如加工温度、人员操作不当、刀具出现磨损问题、夹具误差、加工热变形等。为了更好地对再制造过程质量异常进行识别, 需要对再制造异常进行分析, 以对再制造过程中可能出现的异常有更深层次的了解。

废旧机电产品零部件是通过传统的机械加工技术、表面技术、激光熔敷、修复与热处理等工艺, 对其进行再制造加工, 从而使零部件的尺寸及质量达到出厂要求。废旧零部件应经过检测与评价, 而需要再制造加工的废旧机电产品零部件主要为主轴、导轨、孔、床身及箱体等。

随着工业的发展, 制造环境越来越复杂, 定制产品等多种新型企业的出现推动质量控制理论的发展。传统的多变量控制图 MEWMA、MCUSUM 等虽然能够有效

地监控过程出现的质量异常，但不可避免都存在着各自的缺点与不足。传统控制图的应用条件固定，而且只能在监控出质量异常，却不能提供出异常的具体位置。为了适应新的制造环境，克服传统方法的不足，针对制造不同的环境及特定的问题，许多质量异常的识别的方法被提出。在制造过程质量异常识别研究过程中，神经网络由于其快速识别、计算快速、效率高等优点，从而受到大家的重视。Krauss C 等^[20]通过分析深层神经网络、梯度提升树以及随机森林的方法，提出一种新的简单等权三种理论的方法，并以实例的方式验证了该方法的可行性；石书彪等^[21]针对训练数据与被测数据质量的问题，提出基于小波去噪与神经网络相结合的方法，实现质量异常的识别效率，并以实例验证方法的识别效率，结果表明可行；余忠华等^[22]将模糊化技术引入多 ANN 神经网络模型中，得到一种新的控制图异常模式识别方法；Ashraf 等^[23]提出基于方法论的网络还原方法实现电力系统稳定的监控，并通过实例方式实现这一过程；Alexander P 等^[24]通过制造过程的模糊关系，分析其过程异常因果，依据分析的结果求解找出引发过程质量异常原因。

目前，制造环境越来越复杂，专家研究的方法也越来越集中于智能学习器（如 ANN），即通过智能识别器快速监控制造过程中的异常，并进行质量异常识别。如 Chen 和 Wang^[25]提出了基于 χ^2 控制图与 BPN 理论的模型，并通过该模型识别出哪组质量数据引发质量异常的；Guh^[26]提出了一种集在线监控、异常识别及异常参数量化于一体的智能质量控制模型，这属于一种两层的智能混合学习模型，且通过第一层监控过程质量异常，再经过第二层实现质量异常识别；Niaki 和 Davoodi^[27]提出了一种基于 BPN 的模型，即通过实例的方式识别多阶段制造过程的多变量的质量异常。基于主元分析的方法同样应用在多变量过程的质量异常识别。如许凡、方彦军等^[28]针对过程中特征向量维数高的问题，提出了基于总体平均经验模态分解、模糊熵及 PCA 相结合的故障诊断方法，并以滚动轴承的质量异常为实例验证该方法的可行性；侯彦东、闫治宇等^[29]针对小样本问题，提出了基于特征子空间估计的质量异常识别方法，并通过实例模拟对比其他方法，得出该方法在小样本条件下的优势。基于主元分析法的在多元变量的质量异常识别的应用比较多，但是该理论在易用性和使用条件上同样存在一些难点，还需要后期进一步研究。

如何快速准确识别再制造过程质量异常，并通过异常识别方法及时发现质量异常原因，提出解决方案，使再制造过程恢复正常，这是企业目前需要解决的难点问题之一。因为保证废旧产品的质量不仅可以提高再制造过程的稳定性及减少成本，还可以提高再制造产品质量，从而提高再制造企业的效益。

综上所述，废旧机电产品零部件在再制造过程中，不同的废旧毛坯零件可能出现的质量问题各不相同，如何在监控出再制造过程质量出现异常时，快速准确地识别出质量异常，对于再制造过程的质量控制特别重要。对再制造过程质量异常的分析，为下一步再制造过程质量异常识别选择合适的方法做好准备。

6.4.2 基于改进 PCA 的再制造过程质量异常识别

再制造过程不同于传统的制造过程，其过程更加复杂多变，过程中各种不确定性因素会随机发生，对再制造过程的产品质量产生很大的影响。所以，在再制造过程中如何快速识别、如何在小样本条件下，实现再制造过程的质量异常识别，对再制造过程非常重要。

传统的质量异常识别方法已经很难再适用于此复杂的环境，其研究的焦点也越来越多地集中在智能识别器上。如何在众多的智能识别方法中选择一种合适的方法对再制造过程质量控制显得特别重要。而主元分析法作为智能识别的一种典型代表，且在制造过程质量异常识别中得到了广泛的应用。主元分析法是以系统变量的样本序列所构成的系统数据矩阵为基础，通过建立少数的综合变量，实现了高维复杂数据的降维。该方法既可以做到保留原始变量中的重要信息，又能有效地实现系统中重要信息和噪声的分离。基于此，针对再制造小样本的问题与主元分析法自身需要大样本的限制，提出了基于改进 PCA 的方法，通过将求解协方差的方法转换成求解特征子空间矩阵来消除小样本的限制。基于改进 PCA 的废旧产品再制造过程质量异常识别方法的具体识别流程如图 6-3 所示。

1. 传统的 PCA 理论

对于多变量的系统，用 n 维数据描述如式 (6-16) 表示：

$$\mathbf{X} = [x(1), x(2), \dots, x(m)] \quad (6-16)$$

式中： $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ ($t = 1, 2, \dots, m$) 表示 x 的第 t 次采样值； n 表示再制造系统变量个数； m 表示质量样本个数。

随机矩阵 $\mathbf{X} \in R^{n \times m}$ 的协方差矩阵 \sum_X 如式 (6-17) 表示：

$$\sum_X = E \left[\sum_{i=1}^n (x_i - E[x_i]) (x_i - E[x_i])^T \right] \quad (6-17)$$

通过求解下式

$$(\lambda_i - \sum_X) \mathbf{B}_i = \mathbf{0}, i = 1, 2, \dots, n \quad (6-18)$$

求得矩阵 \sum_X 的特征值 λ_i 和特征矩阵 $\mathbf{B}_i = [\mathbf{B}_{i1}, \mathbf{B}_{i2}, \dots, \mathbf{B}_{in}]$ ，且有

$$\mathbf{B}_i^T \mathbf{B}_j = \begin{cases} \mathbf{1} & i=j \\ \mathbf{0} & i \neq j \end{cases}, j = 1, 2, \dots, n \quad (6-19)$$

为了便于描述再制造过程质量数据，假定 n 个特征值满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ ，同时可得随机矩阵 $\mathbf{M} = \mathbf{B}^T \mathbf{X}$ 。此外，由于矩阵 \mathbf{B} 是正交矩阵，所以求解 \mathbf{X} 的统计特征就可以转化成求解 \mathbf{M} 的统计特征。

为了求得随机矩阵的最优变化量，与此同时弱化噪声对 PCA 的影响，选取前 s 个主元来代表数据中的主要变化，分解后以式 (6-20) 表示：

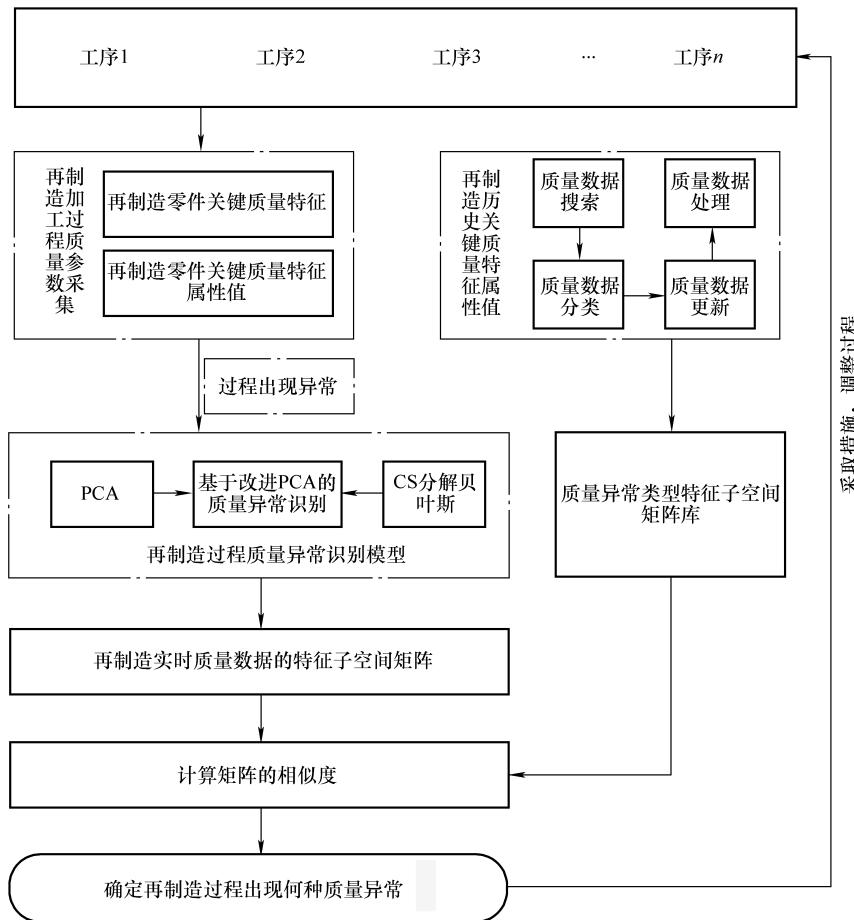


图 6-3 再制造过程质量异常识别流程图

$$X = \sum_{i=1}^s B_i M_i + \sum_{i=s+1}^n B_i M_i = \hat{X} + E \quad (6-20)$$

式中: \hat{X} 表示主元模型; E 表示建模误差, 一般为系统噪声。

从式 (6-20) 可以看出, 只有提供稳健的协方差矩阵时, 才能求得矩阵 X 的特征值与特征矢量。但是当数据样本较少时, 是无法获得稳健的协方差矩阵的, 继而会影响再制造系统过程质量异常识别。

从主元分析法的几何意义可以看出, 该方法的实质就是将原坐标进行平移或者旋转, 使更新得到的坐标原点与原数据样本群重心重合。设随机矩阵的分布 $N(E(X), \sum_X)$, 在以 $E(X)$ 为中心的超椭球上, X 的密度是常数, 以式 (6-21) 表示:

$$(X - E(X)) \sum_X^{-1} (X - E(X))^T = C^2 \quad (6-21)$$

此时超椭球的各轴分别为

$$\pm C \sqrt{\lambda_i} \mathbf{B}_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$$

由式 (6-22)

$$\sum_{\mathbf{X}}^{-1} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \mathbf{B}_i \mathbf{B}_i^T \quad (6-22)$$

求得式 (6-23) :

$$C^2 = \frac{1}{\lambda_1} \mathbf{M}_1^T \mathbf{M}_1 + \frac{1}{\lambda_2} \mathbf{M}_2^T \mathbf{M}_2 + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \mathbf{M}_n^T \mathbf{M}_n \quad (6-23)$$

假设 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 从大到小排列, 那么超椭球上主轴沿着 B_1 的方向, 即为 PA1 的方向, 其余为次要因素, 依次为 B_2, B_3, \dots, B_n 。主元分析法的几何意义可以用图 6-4 表示。

从图 6-4 中可以看出, 不同数据的坐标系的空间分布是不同的, 其旋转角度也是不相同的, 这就说明不同的质量异常类型的数据空间分布及旋转的角度都是不同的, 其对应的特征子空间也是不相同的, 所以可以通过不同的特征子空间来区别不同的质量异常类型, 进而对异常类别进行识别。

假设再制造系统单独变量出现异常, 共有 p 种异常类型, 第 j 种异常模式记为 $f_j (j = 1, 2, \dots, p)$, 每种异常模式对应的特征子空间矩阵为 \mathbf{B}_{f_j} 。

2. 基于改进 PCA 的再制造过程质量异常识别

从主元分析法中式 (6-20) 中的由系统噪声引起的建模误差 E 满足高斯分布, 因此可以得到在条件 B 和 M 下 X 的概率密度函数以式 (6-24) 表示:

$$p(X | \mathbf{B}, \mathbf{M}) \propto \text{etr} \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} (X - \mathbf{B}\mathbf{M})^T (X - \mathbf{B}\mathbf{M}) \right\} \quad (6-24)$$

因为随机矩阵 \mathbf{M} 满足统一的先验分布, 即 $\pi(\mathbf{M}) \propto 1$, 所以由式 (6-24) 得到式 (6-25), 即得到在条件 \mathbf{B} 下 X 的概率密度函数:

$$p(X | \mathbf{B}) = \int p(X | \mathbf{B}, \mathbf{M}) \pi(\mathbf{M}) d\mathbf{M} = \text{etr} \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} X^T X + \frac{1}{2\sigma^2} X^T \mathbf{B} \mathbf{B}^T X \right\} \quad (6-25)$$

由式 (6-25) 得出, X 的概率密度此时主要受映射矩阵 $\mathbf{W} = \mathbf{B} \mathbf{B}^T$ 的影响, 假设该矩阵 \mathbf{W} 满足冯·米塞斯-费舍尔分布^[30]。

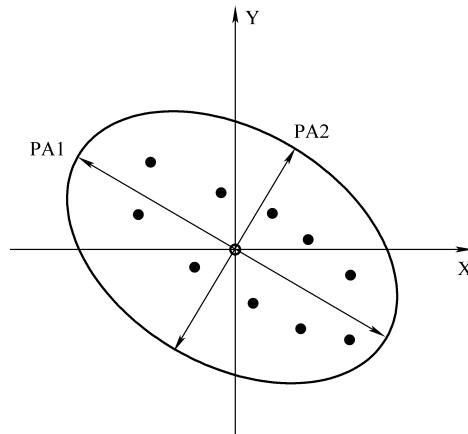


图 6-4 PCA 的几何意义

由于矩阵 \mathbf{B} 是正交矩阵, 可以对其进行 CS 分解贝叶斯, 具体模型^[31]以式 (6-26) 表示:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \mathbf{C} \\ \mathbf{V}_2 \mathbf{S} \end{bmatrix} \mathbf{Z}^T \quad (6-26)$$

式中: \mathbf{V}_1 和 \mathbf{Z} 为 $s \times s$ 正交矩阵, \mathbf{V}_2 为 $(n-s) \times s$ 半正交矩阵 ($\mathbf{V}_2^T \mathbf{V}_2 = \mathbf{I}_s$)

$$\mathbf{C} = \text{diag}\{\cos\theta_1, \cos\theta_2, \dots, \cos\theta_s\} \quad (6-27)$$

$$\mathbf{S} = \text{diag}\{\sin\theta_1, \sin\theta_2, \dots, \sin\theta_s\} \quad (6-28)$$

式中, θ_i 为主元坐标与空间基坐标之间主元的角度。空间基坐标为 $\bar{\mathbf{B}} = [\mathbf{I}_s, 0]^T$ 。由式 (6-26) ~ 式 (6-28) 可以看出, 各主元与基坐标之间的角度决定特征子空间矩阵 \mathbf{B} 所在的空间位置, 这点恰恰符合主元分析法的几何意义。

将 CS 分解贝叶斯空间思想概念引入主元分析法中, 将式 (6-26) 代入式 (6-25) 得到式 (6-29):

$$\mathbf{W} = \mathbf{B} \mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \mathbf{C}^2 \mathbf{V}_1^T & \mathbf{V}_1 \mathbf{C} \mathbf{S} \mathbf{V}_2^T \\ \mathbf{V}_2 \mathbf{S} \mathbf{C} \mathbf{V}_1^T & \mathbf{V}_2 \mathbf{S}^2 \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix} \quad (6-29)$$

矩阵 \mathbf{X} 可以分解成 $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1^T \mathbf{X}_2^T]^T$, 由式 (6-25) 可以得到式 (6-30):

$$\begin{aligned} \text{Tr}\{\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X}\} &= \text{Tr}\left\{\left[\mathbf{X}_1^T \mathbf{X}_1^T\right] \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \mathbf{C}^2 \mathbf{V}_1^T & \mathbf{V}_1 \mathbf{C} \mathbf{S} \mathbf{V}_2^T \\ \mathbf{V}_2 \mathbf{S} \mathbf{C} \mathbf{V}_1^T & \mathbf{V}_2 \mathbf{S}^2 \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1^T \\ \mathbf{X}_2^T \end{bmatrix}\right\} \\ &= \text{Tr}\{\mathbf{C}^2 \mathbf{V}_1^T \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_1^T \mathbf{V}_1 + 2\mathbf{X}_2^T \mathbf{V}_2 \mathbf{S} \mathbf{C} \mathbf{V}_1^T \mathbf{X}_1 + \mathbf{S}^2 \mathbf{V}_2^T \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_2^T \mathbf{V}_2\} \end{aligned} \quad (6-30)$$

由式 (6-24) ~ 式 (6-30) 可以求得 \mathbf{V}_1 、 \mathbf{V}_2 和 $\boldsymbol{\theta}$ 的后验概率分布函数以式 (6-31) 表示:

$$\begin{aligned} p(\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \boldsymbol{\theta} | \mathbf{X}) &\propto p(\mathbf{X} | \mathbf{B}) \pi(\mathbf{V}_1) \pi(\mathbf{V}_2) \pi(\boldsymbol{\theta}) \\ &\propto \text{etr}\left\{\frac{1}{2\sigma^2} [\mathbf{C}^2 \mathbf{V}_1^T \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_1^T \mathbf{V}_1 + \mathbf{S}^2 \mathbf{V}_2^T \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_2^T \mathbf{V}_2]\right\} \\ &\quad \times \text{etr}\left\{\frac{1}{\sigma^2} \mathbf{X}_2^T \mathbf{V}_2 \mathbf{S} \mathbf{C} \mathbf{V}_1^T \mathbf{X}_1\right\} \pi(\mathbf{V}_1) \pi(\mathbf{V}_2) \pi(\boldsymbol{\theta}) \end{aligned} \quad (6-31)$$

式中, $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s]$; σ 可由信噪比求得, 即 $SNR = 10 \lg \left(\frac{m}{p\sigma^2} \right)$ 。

此外, \mathbf{V}_1 、 \mathbf{V}_2 和 $\boldsymbol{\theta}$ 的边缘概率分布可以由式 (6-31) 求得, 分别以式 (6-32) ~ 式 (6-34) 表示:

$$p(\mathbf{V}_1 | \mathbf{V}_2, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{X}) \propto \text{etr}\left\{\frac{1}{2\sigma^2} \mathbf{C}^2 \mathbf{V}_1^T \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_1^T \mathbf{V}_1\right\} \times \text{etr}\left\{\frac{1}{\sigma^2} \mathbf{V}_1^T \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_2^T \mathbf{V}_2 \mathbf{S} \mathbf{C}\right\} \quad (6-32)$$

$$p(\mathbf{V}_2 | \mathbf{V}_1, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{X}) \propto \text{etr}\left\{\frac{1}{2\sigma^2} \mathbf{C}^2 \mathbf{V}_2^T \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_2^T \mathbf{V}_2\right\} \times \text{etr}\left\{\frac{1}{\sigma^2} \mathbf{V}_2^T \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_1^T \mathbf{V}_1 \mathbf{S} \mathbf{C}\right\} \quad (6-33)$$

$$\begin{aligned}
p(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{X}) &\propto \text{etr} \left\{ \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{X}_2^T \mathbf{V}_2 \mathbf{S} \mathbf{C} \mathbf{V}_1 \mathbf{X}_1^T \right\} \\
&\times \text{etr} \left\{ \frac{1}{2\sigma^2} [\mathbf{C}^2 \mathbf{V}_1^T \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_1^T \mathbf{V}_1 + \mathbf{S}^2 \mathbf{V}_2^T \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_2^T \mathbf{V}_2] \right\} \pi(\boldsymbol{\theta}) \quad (6-34) \\
&\propto \sum_{i=1}^s e^{\alpha_i \cos^2 \theta_i + 2\beta_i \cos \theta_i \sin \theta_i + \gamma_i \sin^2 \theta_i} [0, \theta_{\max}] \boldsymbol{\theta}_i
\end{aligned}$$

式(6-32)、式(6-33)满足冯·米塞斯-费舍尔分布^[30]。式(6-34)中: θ_{\max} 表示主元与基坐标的所有夹角的最大值; α_i 表示 $\frac{1}{2\sigma^2} \mathbf{V}_1^T \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_1^T \mathbf{V}_1$; β_i 表示 $\frac{1}{2\sigma^2} \mathbf{V}_2^T \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_2^T \mathbf{V}_2$; γ_i 表示 $\frac{1}{2\sigma^2} \mathbf{V}_2^T \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_2^T \mathbf{V}_2$ 。式(6-34)不属于目前已知的任何分布, 很难求得, 所以, 需要将其转化为已知的分布, 设 $\chi_i = \sin^2 \theta_i$, $\boldsymbol{\chi} = [\chi_i]$, 将式(6-34)转化为式(6-35):

$$p(\chi_i | \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{X}) \propto e^{-(\alpha_i - \gamma_i)\chi_i + 2\beta_i \chi_i^{\frac{1}{2}} (1 - \chi_i)^{\frac{1}{2}} \times \chi_i^{\frac{1}{2}} (1 - \chi_i)^{\frac{1}{2}} [0, \chi_{\max}] \chi_i} \quad (6-35)$$

其中, $\chi_{\max} = \sin^2 \theta_{\max}$ 。此时的式(6-35)类似于贝塔分布:

$$B(\chi_i) \propto \left(\frac{\chi_i}{\chi_{\max}} \right)^{c_i-1} \left(1 - \frac{\chi_i}{\chi_{\max}} \right)^{d_i-1}$$

此时, c_i 和 d_i 分别取^[32]

$$\begin{aligned}
c_i &= 0.5 + 0.25 \max \{0, \beta_i\} - 0.25 \min \{0, \alpha_i - \gamma_i\} \\
d_i &= 0.5 + 0.25 \max \{0, \beta_i\} + 0.25 \min \{0, \alpha_i - \gamma_i\}
\end{aligned}$$

式(6-35)能很好地取得近似值。

基于上述的算法与推理过程, 通过下述方法实现随机抽样所得的特征子空间矩阵 $\mathbf{B}(n)$ 的计算。

输入: 任意初始变量 $\mathbf{V}_1^{(0)}$ 、 $\mathbf{V}_2^{(0)}$ 、 $\boldsymbol{\theta}^{(0)}$

- 1) for $n = 1, 2, \dots, N_b + N_i$ 。
- 2) 根据式(6-32), 通过吉布斯采样获得 $\mathbf{V}_1^{(n)}$ 。
- 3) 根据式(6-33), 通过吉布斯采样获得 $\mathbf{V}_2^{(n)}$ 。
- 4) 通过吉布斯采样获得角度 $\boldsymbol{\theta}^{(n)}$ 。
- 5) for $i = 1, 2, \dots, s$ 。
- 6) 在 $X_{\max} \mathbf{Bata}(c_i, d_i)$ 中的值, 令 $X_i^{r(0)}$ 为初始值, 设 $X_i^{r(n)} = X_i^{r(0)}$ 。
- 7) for $u = 1, 2, \dots, q$ 。
- 8) 从 $\chi_{\max} \mathbf{Bata}(c_i, d_i)$ 中获得 $\chi_i^{r(u)}$ 。
- 9) 当 $\frac{p(\chi_i^{r(u)} | \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{X})}{p(\chi_i^{r(u-1)} | \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{X})} \frac{q(\chi_i^{r(u-1)})}{q(\chi_i^{r(u)})} < 1$ 时, $\chi_i^{r(n)} = \chi_i^{r(u)}$, 其概率分布以式(6-35)表示。

10) end for。

11) $\theta_i^{(n)} = \arcsin \sqrt{\chi_i^{(n)}}$ 。

12) end for。

13) end for。

输出: 计算得出一组随机矩阵 $\mathbf{B}^{(n)} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^{(n)} & \mathbf{C}^{(n)} \\ \mathbf{V}_2^{(n)} & \mathbf{S}^{(n)} \end{bmatrix}$ 。

由上述的矩阵 $\mathbf{B}^{(n)}$ 可以估计出特征子空间矩阵以式 (6-36) 表示:

$$\mathbf{B}^* = p_s \left\{ \frac{1}{N^i} \sum_{n=N_b+1}^{N_b+N_i} \mathbf{B}^{(n)} (\mathbf{B}^{(n)})^T \right\} \quad (6-36)$$

式中, p_s 表示 s 个主元向量。

为了实现再制造过程质量异常的识别, 采用特征子空间矩阵的相似性对异常类型进行识别, 矩阵相似度函数以式 (6-37) 表示:

$$d_j = \sum_{u=1}^s \zeta_u \frac{|\mathbf{B}_{f_j}^T \mathbf{B}^*|}{\|\mathbf{B}_{f_j}^T\| \|\mathbf{B}^*\|} \quad (6-37)$$

其中, ζ_u 表示加权系数, 代表不同方向主元的重要性, 且 $\sum_{u=1}^s \zeta_u = 1$, $1 > \zeta_1 > \zeta_2 > \dots > \zeta_u$, 相似度函数表示两个矩阵在 s 个投影方向夹角余弦值的加权和。因为 $\zeta_u < 1$, 所以 $0 < d_j \leq 1$ 。所得值越接近 1, 说明两个矩阵相似度越好。

根据再制造过程先验概率信息, 以及上述的计算步骤, 在再制造小样本条件下, 运用 CS 分解贝叶斯方法估计其特征子空间矩阵。考虑不同类型数据对应不同的特征子空间矩阵, 所以再制造过程中不同的质量异常数据分别对应不同的特征子空间矩阵。因此, 可以通过比较数据与已知质量异常类型的特征子空间矩阵的相似度函数来确定质量异常类型, 进而实现异常源识别。

6.4.3 实例分析

以废旧 TPX6113 镗床的横向导轨再制造过程为例。导轨是机床的基准部件, 主要作用是承载其余主要部件并作为其余部件的运动基准, 保证机床主要部件运动的准确性。机床导轨大部分都是灰铸铁 HT200—400, 易于铸造、加工及减摩。在机床使用过程中, 导轨需要面临多方面影响, 如承载力、腐蚀、氧化等, 容易出现氧化、拉伤、碰伤、磨损、腐蚀等各种不同类型的损伤, 这些损伤情况的产生是由于导轨自身材质差、摩擦面配合不良、润滑状况不佳、防护装置不密封和维护保养不善等多种因素所致。当机床导轨磨损后, 影响机床运动之间的互相位置关系, 进而会严重影响机床的生产加工, 其加工精度就不能得到保证。

由于废旧导轨毛坯损伤类型、损伤程度不同以及服役年限不定, 所以采用的再制造手段同样各不相同, 因此不同的导轨对应的加工工艺是不同的。因此, 为了保

证再制造导轨的质量，提高再制造系统的稳定性，在检测再制造过程出现异常的基础上，快速识别再制造异常模型显得尤为重要。

首先，收集不同质量异常类型的少量再制造质量数据，并进行建模，求得各自的特征子空间矩阵；其次，采集废旧导轨再制造过程实时的质量数据；最后，检测到再制造过程质量异常时，提取质量异常数据，通过实时的再制造过程质量异常数据与不同异常类型的特征子空间矩阵进行比较，与哪种异常数据相似最高，说明为哪一种质量异常类型。导轨再制造过程中主要有四类质量异常类型，分别为起泡（定义为质量异常类型1）、镀层部分剥离（定义为质量异常类型2）、拱曲形状或凹状（定义为质量异常类型3）及砂眼（定义为质量异常类型4）^[33]。

鉴于计算的复杂性，以 MATLAB 软件实现再制造过程异常源识别的计算过程。计算前，取 $p = 15$, $m = 5$, $k = 1000$, $N_b = 20$, $N_i = 1000$, $SNR = 5$, $\theta_{\max} = 55^\circ$ 。再制造导轨不同的质量异常类型赋予不同的夹角角度，通过式（6-26）计算出再制造过程中不同质量异常类型的特征子空间。

以实时导轨再制造过程质量数据为例，见表 6-2。同时为了进一步说明该方法的有效性与优越性，与传统的 PCA 以及小样本协方差估计的方法^[34]进行对比分析。小样本协方差估计方法的具体计算过程参考文献 [34]。应用 MATLAB 软件进行编程计算，得出结果见表 6-4。

表 6-4 三种方法求得的异常相似度值

异常编号	CS 分解	PCA	小样本估计
1	0.1212	0.2312	0.2025
2	0.0304	0.1245	0.1019
3	0.8092	0.5104	0.6302
4	0.1723	0.2034	0.1805

根据结果生成再制造过程异常源识别图（见图 6-5），为 CS 分解贝叶斯方法与其他两种方法所求得的特征子空间矩阵与质量异常库中四种不同异常类型的特征子空间矩阵的相似度。从图 6-5可以看出，三种方法求得的特征子空间矩阵的相似度，CS 分解贝叶斯方法求特征子空间矩阵与异常类型 3 的特征子空间矩阵的相似度最高，达到 0.8092，识别出再制造导轨的异常类型，为异常类型 3。对比其他两种方法，此种方法有更高的正确识别率。从而可以看出基于 CS 分解贝叶斯的 PCA 质量异常识别的可行性。

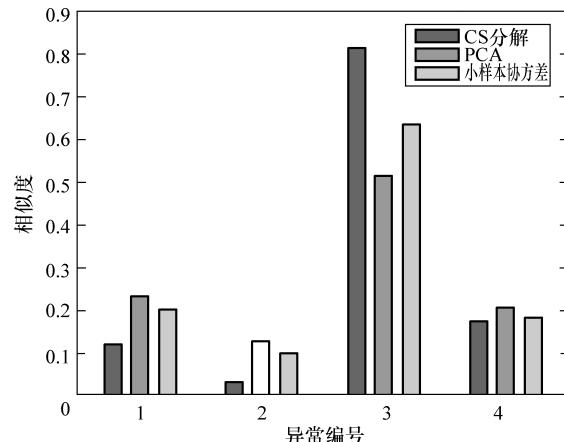


图 6-5 再制造过程质量异常识别图

为了进一步说明该方法在小样本条件下的优势及可行性,以同一质量异常类型,不同的质量样本数,对比三种方法所求的质量数据的特征子空间矩阵与特定质量异常的特征子空间矩阵的相似度。利用 MATLAB 实现计算过程,计算结果见表 6-5,将计算结果绘制成图,如图 6-6 所示。

表 6-5 不同样本数目条件下三种方法求得的异常相似度值

样本数目	CS 分解	PCA	小样本估计
10	0.5316	0.3509	0.4187
15	0.5845	0.3712	0.4562
20	0.7804	0.4063	0.5089
25	0.7945	0.4123	0.5132
30	0.8055	0.4166	0.5198

从图 6-6 可以看出,小样本条件下,对比传统 PCA 方法与小样本协方差估计的方法,基于 CS 分解贝叶斯方法所求得的特征子空间矩阵与特定质量异常的特征子空间矩阵的相似度明显高出不少,由此可以看出,CS 分解贝叶斯方法在小样本条件下求解特征子空间矩阵的优越性,即说明基于改进 PCA 的方法在再制造过程质量异常识别上具有的优越性与可行性。

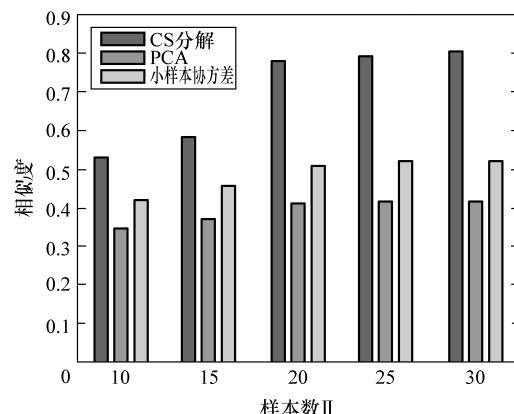


图 6-6 不同样本下再制造过程异常识别图

6.5 基于粗糙集的再制造过程质量异常诊断与调整系统

废旧机电产品再制造过程复杂多变,各种不确定性质量因素随机发生,针对再制造过程质量异常与引发因素之间的不确定性,采用基于粗糙集理论的再制造过程质量异常诊断与调节系统对再制造过程的异常进行诊断,找出引发异常的原因并进行调节。粗糙集是针对不确定、不完善、不完整的数据中发现知识,描述了知识表达中不同属性的重要度,简化了空间知识的表达,而且不需要任何先验知识,而这点恰恰符合再制造过程的特点。

6.5.1 再制造过程质量诊断

质量诊断涉及的内容较多,以本研究为例,是指废旧机电产品再制造过程的质量诊断。通常,质量诊断是通过一定的管理学相关的技术与手段或者依据特定的作业标准,考察、衡量并判断企业的所生产的产品、生产过程或质量管理工作,以确定生产出的产品和提供的服务的质量是否满足预期的要求或者客户满意,或与该产品在生产过程中所采用的质量管理活动是否适合、得当、有效,并进一步识别和查

找引发质量异常的原因，提出质量改进的方向，并提出调整质量异常的方法使过程恢复正常全部活动。

质量诊断^[35]的内容主要包括产品质量诊断、过程质量诊断和质量管理诊断。产品质量诊断是指即不定期地对产品进行抽样检查，从而确定产品目前的质量情况能否满足用户的需求，以及随时掌握目前市场需要的产品质量数据和信息，以便随时采取相应的措施对制造的产品质量加以改进。过程质量诊断就是对产品的制造过程的质量进行实时或者定期的检查，以监控制造过程产品的质量是否稳定统一及制造过程有无异常干扰因素存在。若制造过程出现质量异常，则迅速查找导致异常的因素及异常发生的位置和异常程度。过程质量诊断也被称为工序质量诊断。质量管理诊断是对生产过程所使用的质量管理方法的诊断。再制造过程质量诊断主要是指过程质量诊断，需要对已监控出质量异常的再制造过程质量进行诊断，找出异常原因并进行过程的调整。

1. 质量诊断技术的发展

质量诊断技术是应用于过程出现质量异常，查找质量异常原因并提出改进措施的技术手段。质量诊断技术是不同企业保证其生产过程产品质量的一条重要管理技术。质量诊断作为质量管理的一部分，其发展与质量管理的发展是密切相关的。质量诊断技术主要包括三个发展阶段^[36]。

(1) 原始的质量诊断 主要从19世纪末到20世纪中期。这个阶段诊断技术刚刚发展，技术手段相对较为简单，过程诊断主要通过对产品的全检或者抽检，当检测到过程质量异常时，所采取的措施依赖于专家经验，根据专家的经验对质量异常问题进行诊断与改进。

(2) 全面统计过程控制阶段 主要是从20世纪40年代到80年代。这一时期，国外率先将SPC技术应用到工业生产质量诊断中去，极大地提高了过程的质量管理水平。随着SPC的推广，SPC的技术也得到了发展，并由单变量SPC技术发展到多变量SPC技术、统计过程诊断(Statistical Process Diagnosis, SPD)和统计过程调整(Statistical Process Adjustment, SPA)。使得制造过程质量诊断的方法得到进一步的发展与丰富，使得工业生产质量管理水平进一步提高。

(3) 智能质量诊断阶段 主要是从20世纪80年代至今。随着工业的迅速发展，全面质量管理得到各行各业的普遍认可，并在工业中推广应用。随着生产过程所涉及的质量特征属性值越来越多，而且各种变量之间存在着复杂的相关性、不确定性、模糊性等特征，使得单纯统计过程方法已经无法单独应用到过程质量诊断中去。随着科学技术的进一步发展，新兴起的智能技术为质量诊断提供一条新的思路。智能化质量诊断技术虽然发展已有30年，但是实践表明，智能诊断技术也有形成系统完整的体系。在实践应用过程中，智能技术也存在一些问题，未能全面满足制造过程中的质量诊断的要求。目前需要根据实际的生产情况，选择合适的智能诊断手段对过程进行质量控制，才能对实际的现场情况取得良好的效果。

2. 质量诊断技术的研究综述

过程质量诊断中所使用的方法是各不相同的，涉及许多领域的知识与理论。自休哈特提出控制图之后，通过简单的控制图对过程进行诊断并依据专家的知识进行简单的调节。张公绪^[37]在1982年首次提出两阶段质量诊断理论，为统计质量控制与诊断（Statistical Process Control and Diagnosis, SPCD）指出新的方法；提出的多元逐步诊断理论与方法解决了传统统计诊断理论第一类错误概率大的问题，随后针对工程出现的多工序、多指标的问题，两种质量多元诊断理论相继被提出，以解决其过程的质量控制与诊断问题。

随着经济的发展和新的制造环境下，用户的需求越来越多样化，小批量生产成为重要的生产模式，而传统的大批量定制的生产模式已经不再适用于市场的要求。休哈特控制图建立在传统统计学、正态分布的基础上，只适用于大批量生产过程的使用，对于小批量生产过程并不适用。在新的先进复杂的制造环境下，满足多品种、小批量的要求，在有限的观测数据下，实现过程有效的监控与诊断，是质量诊断需要研究的重要问题。

张志雷^[38]通过改进 EWMA 方法解决自相关性过程质量诊断问题；Perry 和 Guh^[39]提出基于 BP 神经网络的控制图模型识别方法，并以西方电气公司定义的六类典型控制图模式为例来验证该模型的识别能力，结果表明该方法能够识别出异常模型，但其模式识别率有待提高；Cheng 等^[40]提出基于 SVM 的多元过程方差异常的诊断方法，实现了制造过程散度异常的诊断和异常变量定位功能。

胡涛^[41]等针对不确定性知识表达的问题，将 RS 理论应用到电力变压器和发电机组生产中去，并对其出现的质量故障进行诊断；束洪春、孙向飞等^[42]针对不完备的知识库导致系统混乱问题，提出了基于 RS 方法建立的变压器质量故障诊断的专家知识库；俞晓东等^[43]集合 RS 理论与模糊神经网络两种理论的优点，组成一种对变压器质量异常诊断的方法；冯志鹏、杜金莲等^[44]针对制造过程非线性问题，提出了基于 SOM 网络 - 粗糙集 - BP 网络集成进行故障诊断方法，并以 4135 柴油机质量诊断实例验证了该方法的可行性；黄文涛、赵学增等^[45]针对在故障诊断信息不一致的情况下提取简单有效的诊断规则，提出了一种基于粗糙集理论的决策规则提取方法，并以实例的方式验证该方法的可行性；赵方方^[46]针对定制产品质量影响因素关系复杂、波动溯源难度高等问题，提出了基于粗糙集的质量诊断方法，并以扣式电池自动封口机的实例验证诊断方法的可行性。

综上所述，制造过程质量异常的诊断过程中使用的不同方法，都有各自的适用条件。而其中基于粗糙集的质量诊断方法，是处理信息不精确、不完整、不一致问题的一种有效手段，而废旧机电产品再制造过程的不明确信息刚好能够被粗糙集的知识解决。废旧机电产品再制造过程复杂多变，各类不确定性质量因素随机发生，针对再制造过程质量异常与引发因素之间的不确定性与传统质量诊断方法的应用条件，我们采用了基于粗糙集理论的再制造过程质量异常诊断与调节系统对再制造过

程的异常进行诊断，并通过粗糙集的知识理论处理再制造过程质量信息不明确的问题，从而实现过程质量诊断。

6.5.2 基于粗糙集的再制造过程质量异常诊断

1. 粗糙集理论

1982年，波兰科学家Z. Pawlak^[47]提出粗糙集（Rough Sets, RS）。粗糙集理论有着强大的数据处理功能，对各类不完备信息，如不精确（imprecise）、不一致（inconsistent）、不完整（incomplete）问题依然非常有效的工具。该理论一经提出就受到各界专家学者的普遍重视，此理论之所以能够处理不完备信息得益于使用者成熟的数学基础、不需要先验知识；另一方面在于该理论的易用性。粗糙集理论处理数据信息的原理比较直观，就是直接对数据信息样本进行分析和推理，从中发现数据中潜在的有用信息，找出数据中隐藏的规律，其属于数据挖掘或知识发现方法中的一类，与其他数据挖掘技术与方法，如基于概率论方法、模糊理论方法及证据理论等处理同类型不确定性问题相比，其只需提供待处理的不明确信息的知识，而且不需要其他额外的先验条件，以及与其他相关处理类似问题的理论存在互补性，这即为该理论的优势所在。再制造过程质量控制存在的不确定性问题，即再制造质量异常与引发因素之间的不确定性，刚好能被粗糙集的理论知识完美解决。同时，为了更好地处理再制造过程的质量数据，前期需要对再制造过程进行知识的公式化表达。知识表达系统的基是由再制造过程质量数据的集合为基础构成的，关于再制造过程的知识是依据再制造过程质量的基本特征（属性）和其特征值（属性值）来表达的。因此，某一数据表可以用公式表达为知识系统DT，具体以式（6-38）表示：

$$DT = \langle U, C \cup D, V, f \rangle \quad (6-38)$$

式中：DT表示一个决策表； $U: U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示再制造过程质量的非空有限集合，称之为论域； $C \cup D: C = \{\beta | \beta \in C\}$ 称为条件属性值，每个 $\beta_i \in C, 1 \leq i \leq m$ 称为C的一个质量属性， $D = \{d | d \in D\}$ 称为决策属性集， $C \cap D = \emptyset, C \neq \emptyset, D \neq \emptyset$ ； $V: V = \cup V_\beta (\beta \in C \cup D)$ 是信息函数f的值域； $f: f = \{f_\beta | f_\beta: U \rightarrow V_\beta, \forall \beta \in C \cup D\}$ 表示决策表的信息函数， f_β 表示再制造质量属性 β 的信息函数。

若 $ind(C) \subseteq ind(D)$ ，称为决策表是相容的，即说明两者是一致或者协调的，式中 $ind(C)$ 表示条件等价类， $ind(D)$ 表示决策等价类。

(1) 知识、范畴和近似空间 假设A和B是两个集合， $a \in A, b \in B$ ，则 (a, b) 称为一个序偶。序偶中的两个元素a、b的位置是一定的，交换位置就变成另外一个序偶。当A和B属于同一集合时，直接从该集合中选取两子集构成序偶。

对于集合A和B，其所有序偶 (a, b) 构成的集合称之为A和B的笛卡儿乘积，记作 $A \times B$ ，以式（6-39）表示：

$$A \times B = \{(a, b) | a \in A, b \in B\} \quad (6-39)$$

对于笛卡儿乘积 $A \times B$ 中任意一个子集称为 A 到 B 的一个关系, 记为 R 。

论域 U 中任意一子集 $X \subseteq U$ 称为 U 的一个概念或者范畴。

对于给定的一个非空集合 U 定义为论域, R 是 U 的等价关系, 则二元组合 $L = (U, R)$ 称为一个近似空间 (approximation space), L 称为 U 的一个知识基 (knowledge base)。

(2) 等价与不可分辨的关系 根据属性集意义的描述, 具有等价关系的聚类称之为等价类。

为了方便再制造过程的数学推导, 一般使用等价关系来表述分类, 且两个概念可以互相代替。所以在实际再制造过程中, 不是针对某一个具体过程而是论域 U 中的分类。论域 U 中的分类族构成了 U 上的知识库, 其中某一特定的知识是论域上的一个分类。

定义: 对于随机选取的子集 $X, Y \subseteq U$, 若根据等价关系 R , X 和 Y 在论域 U 上是不可分辨时, 记为 $ind(R)$, 其中子集 X 和 Y 属于等价关系 R 上的一个范畴, 具体表示以式 (6-40) 表示:

$$[X]_R = U | R = U | ind(R) \quad (6-40)$$

式中, $[X]_R$ 表示等价关系中的一种等价类。

当某一不可分辨关系是由属性集 P 表达时, 属性集 $P \subseteq R$, 且 $P \neq \emptyset$, 则 $\cap P$ (P 中全部等价关系的交集) 也是一种等价关系, 称为 P 上的不可分辨关系, 记为 $ind(P)$, 因此, 等价关系中一个不可分辨等价类以式 (6-41) 表示:

$$X_{ind(P)} = \cap [X]_R, P \subseteq R \quad (6-41)$$

当不可分辨关系由属性集 P 表达时, 属性集 $P \subseteq R$, 对象 $X, Y \subseteq U$, 当且仅当 $f(X, a) = f(Y, a)$ 时, $a \in X, Y, P$ 是不可分辨的, 以式 (6-42) 表示:

$$ind(P) = \{ (X, Y) \subseteq U : \text{所有的 } a \in P, f(X, a) = f(Y, a) \} \quad (6-42)$$

不可分辨关系具有以下几点性质:

自反性: $(x_i, x_j) \in R (1 \leq n \leq i)$ 。

对称性: $(x_i, x_j) \in R \Rightarrow (x_j, x_i) \in R (\forall i, j \leq n)$ 。

传递性: $(x_i, x_j) \in R, (x_j, x_k) \in R \Rightarrow (x_i, x_k) \in R (\forall i, j, k \leq n)$ 。

不可分辨关系 $ind(P)$ 可表达为 $U | ind(P)$ 或者 $U | P$ 。如果 R 中任意基本集合都是互不可变, 以对象 $c_1, c_1 \in U$ 为例, 若两者都属于相同的基本集合 X_j , 即 $c_1, c_1 \in X_j$, 则两对象具有相同的描述:

$$Des(c_1) = Des(c_2) = Des(X_j)$$

(3) 集合近似与粗集的概念 粗糙集理论的相关基础概念包括分类和范畴, 范畴的概念是指论域中的特征子集对对象的描述, 其是指在知识库中获得的知识。此外, 某一范畴在一个知识库中是可定义的, 但在另外一个知识库中有可能就是不可定义。在讨论的论域 U 中, 存在子集 $X \subseteq U$, 定义 R 为一等价系。当某一子集 X 能用 R 属性集准确描述时, 能通过 R 上一些基本集合的并来表达, 称 X 是在 R 上

是可定义的；反之，为不可定义的。 R 上的可定义集称之为 R 的精确集，而 R 的不可定义集称之为 R 非精确集，即为 R 粗集。

假设给定的知识库 $l = (\mathbf{U}, \mathbf{R})$ ，对于每一个子集 $X \in \mathbf{U}$ ，等价关系 $\mathbf{R} \subset \text{ind}(l)$ ，集合 X 的划分可以通过等价关系 R 的基本集合的描述进行。对于每一个 $X \in \mathbf{U}$ 的集合，为了衡量根据集合 $Y_i \subset \mathbf{U} | \text{ind}(\mathbf{R})$ 来描述集合 X 的情况，因此，对于粗集的近似地定义，使用两个精确集，即粗集的上近似集 $R^+(X)$ 和粗集的下近似集 $R^-(X)$ 进行描述。粗糙集的概念具体描述如图 6-7 所示。

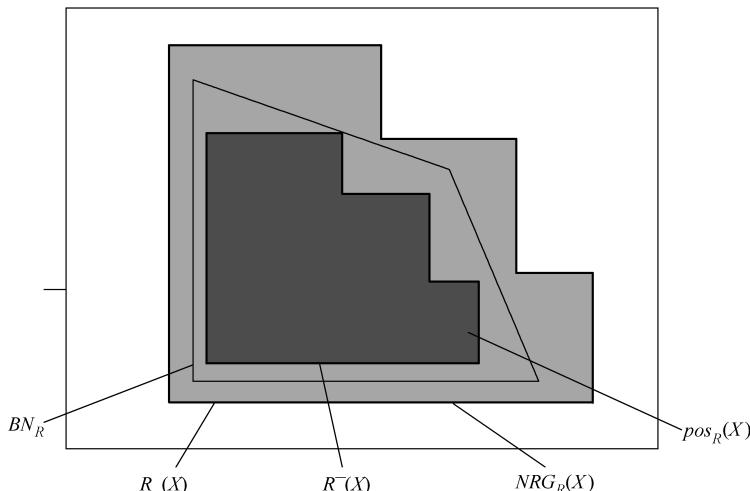


图 6-7 粗糙集概念示意图

$$R^+(X) = \bigcup \{Y_i \subset \mathbf{U} | \text{ind}(\mathbf{R}) : Y_i \subset X\}$$

$$R^-(X) = \bigcup \{Y_i \subset \mathbf{U} | \text{ind}(\mathbf{R}) : Y_i \cap X = \emptyset\}$$

式 (6-43) 称为 X 的 R 正域：

$$pos_{\mathbf{R}}\{X\} = R^-(X) \quad (6-43)$$

式 (6-44) 称为 X 的 R 负域：

$$NRG_{\mathbf{R}}(X) = \mathbf{U} - R^+(X) \quad (6-44)$$

式 (6-45) 称为 X 的 R 边界：

$$BN_{\mathbf{R}}\{X\} = R^+(X) - R^-(X) \quad (6-45)$$

下近似集 $R^-(X)$ 或正域是由依据知识等价关系 R ，判断 X 中属于论域 U 中元素的集合组成；同样，上近似集 $R^+(X)$ 是由依据知识等价关系 R ，判断 X 中属于或者可能属于论域 U 中元素的集合组成；边界域 $BN_{\mathbf{R}}\{X\}$ 是依据知识等价关系 R ，即不能判断肯定属于 X ，又不能肯定不属于 X 的论域 U 中的元素集合构成；负域 $NRG_{\mathbf{R}}(X)$ 是由肯定不属于 X 的论域中 U 的元素集合组成。

(4) 知识的约简 对于给定的一个知识库 $l = (\mathbf{U}, \mathbf{R})$ ，以及知识库中的一个

等价关系族 $\mathbf{P} \subseteq \mathbf{S}$, $\forall \mathbf{R} \in \mathbf{P}$, 如果 $ind(\mathbf{P}) = ind(\mathbf{P} - \{\mathbf{R}\})$ 成立, 则称知识 \mathbf{R} 为 \mathbf{P} 中不必要的, 反之, 这说明 \mathbf{R} 为 \mathbf{P} 中必要的。

对于每一个 $\mathbf{R} \in \mathbf{P}$, 如果 \mathbf{R} 都为 \mathbf{P} 中必要的, 则称 \mathbf{P} 为独立的, 否则称 \mathbf{P} 是依赖的或者不独立的。对于任意 $\mathbf{R} \in \mathbf{P}$, 若 \mathbf{R} 满足 $ind(\mathbf{P} - \{\mathbf{R}\}) \neq ind(\mathbf{P})$, 则称 \mathbf{R} 为 \mathbf{P} 中不必要的, \mathbf{P} 中所有必要的知识组成的集合称为 \mathbf{P} 的核, 记为 $CORE(\mathbf{P})$ 。核实具有唯一性的特征的。

假设 $\mathbf{Q} \in \mathbf{P}$, 如果 \mathbf{Q} 是独立的, 且 $ind(\mathbf{Q}) \neq ind(\mathbf{P})$, 则称 \mathbf{Q} 为 \mathbf{P} 的一个约简。显然, \mathbf{P} 有多个约简。

核与约简的关系以式 (6-46) 表示:

$$CORE(\mathbf{P}) = \cap RED(\mathbf{P}) \quad (6-46)$$

从式 (6-46) 可以看出, 知识的核等于知识所有约简的交集, 这说明知识的核包含在知识的每一个约简之中, 属于约简中的一个基础部分。核作为知识特征中最重要的一部分, 在知识约简过程中是绝对不能被删除的, 否则将会削弱知识的分类能力。

为了更好地表达集合之间的近似程度, 引入近似度的概念。定义等价关系 R 关系描述近似程度以式 (6-47) 表示:

$$d_R(X) = \frac{card(R_-(X))}{card(R^-(X))} \quad (6-47)$$

式中, $card(R_-(X))$, $card(R^-(X))$ 分别表示 $R_-(X)$, $R^-(X)$ 的势, 即 $R_-(X)$ 和 $R^-(X)$ 集合中元素的个数。

2. 基于粗糙集的再制造过程质量异常诊断

再制造产品的质量主要受再制造过程中各种关键过程参数的影响。再制造过程参数在实际加工过程中的任何异常变动, 都会出现各种各样有质量缺陷的产品。再制造过程的复杂性与其存在的各种不确定性对再制造过程的产品质量产生较大的影响, 所以如何实现再制造过程质量异常诊断并提出调整方案使得再制造过程恢复正常是一个重要难题。

再制造过程的质量主要以工序的形式传递, 影响再制造过程质量的因素主要有以下几个方面^[48]。

- 1) 人员因素: 是指参与制造过程的操作工、质检员、配料员等工作人员的业务水平、受教育程度、身体条件等各方面的因素。
- 2) 设备因素: 是指再制造过程使用的机床、检测设备的精度、安全性及可靠性, 刀具的材质与精度, 夹具的精度与磨损, 以及生产过程中的辅助设备的精度及磨损等因素。
- 3) 材料因素: 是指再制造过程使用的废旧毛坯、原材料、辅助材料的力学性能与精度, 如尺寸要求、硬度、表面粗糙度等因素。
- 4) 方法因素: 是指再制造过程采用的加工工艺、修复方法、检测方法等的准

确性与可靠性。

5) 环境因素: 是指再制造过程中有关的环境因素, 如温度、噪声、湿度等微气候因素。影响再制造产品质量的因素有很多, 将一些次要的、偶然因素忽略, 主要从 5M1E 五个方面入手考虑。在此仅罗列出比较常见的几种原因, 如图 6-8 所示。

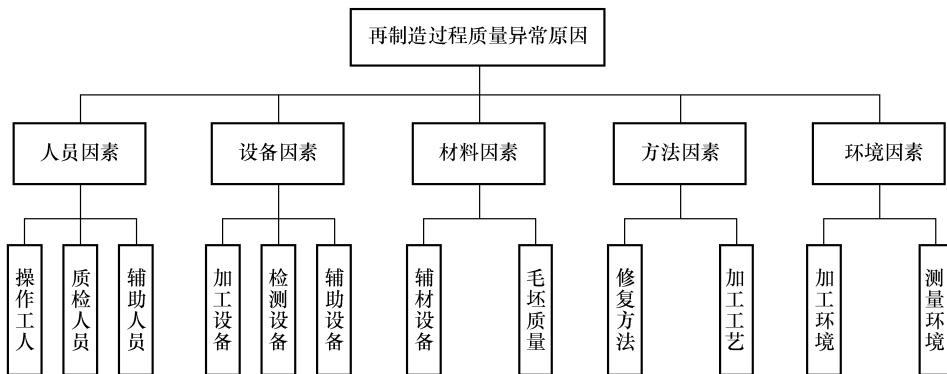


图 6-8 再制造过程质量异常原因

当检测出再制造过程出现异常, 但对于何种原因引发的这次质量异常, 还需要进一步溯源。这种溯源的过程就称为再制造过程的质量异常诊断。基于粗糙集的再制造过程质量异常诊断是利用粗糙集理论计算条件属性 (质量影响因素) 相对于决策属性 (质量特征) 的重要度。诊断过程的核心思路是指当再制造过程出现质量异常时, 根据影响因素的重要度的大小, 从大到小依次考虑, 对异常原因进行溯源。具体的过程如图 6-9 所示。

根据两种质量概念^[49]可知, 依据再制造过程分析, 总质量是在上一道工序加工完成后的半成品 (它的特征值反映了上道工序的影响水平) 的基础上。经本工序的再一次加工后综合而成的产品质量。分质量只是总质量的一部分。分质量与上道工序没有关系的, 要想将上下工序之间的这种联系切断, 要从再制造过程的分质量入手, 进而实现其质量控制, 达到简化分析的目的。因此, 通过利用两种质量的知识理论分析问题时, 关键所在是对其分质量进行分析。

以再制造过程某一特定生产为例, 过程的每一道工序都有自己的分质量, 将每道工序的加工质量与前期的工序质量叠加在一起, 构成了总质量, 因此, 各道工序都存在两种质量。当在技术方面与上道工序无关的工序, 或者在无须考虑原材料输入影响的第一道工序的情况下, 两种质量是相等的 (但这不是说两种质量不存在)。

某一具体再制造过程有 n 道工序, 定义 X_0 为原始材料的质量属性值, $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, 为影响再制造过程工序 i 的生产质量的因素集,

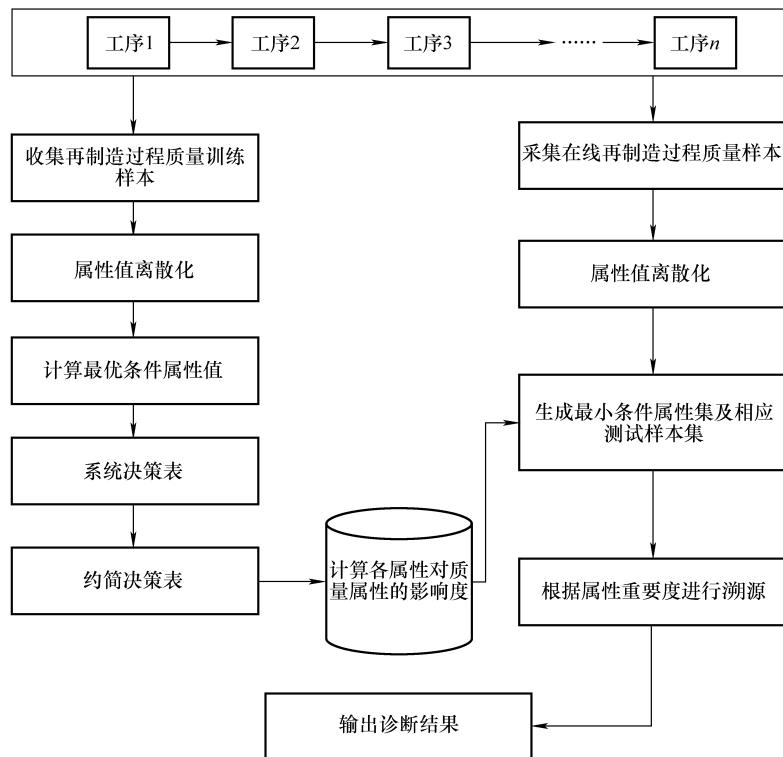


图 6-9 再制造过程质量异常诊断流程

即为前文所叙述的 5M1E。工序 i 的质量特征用 Y_i ，这里 Y_i 既表示工序 i 的质量特征的输出值，又表示工序 $(i+1)$ 的输入值。定义 Y_n 为再制造产品最终的质量特征值。

对于整个再制造过程， $X_i = \{X_0, X_1, \dots, X_n\}$ 为影响最终再制造产品质量特征 Y_n 的因素集^[50]，如式 (6-48) 表示：

$$Y_n = f(X) = f(X_0, X_1, \dots, X_n) \quad (6-48)$$

根据上述两质量的概念，再制造工序 i 的质量由上一道工序对本道工序的影响 Y_{i-1} 和本道工序时产品本身的质量的 X_i 决定，如式 (6-49) 表示：

$$Y_i = f_i(Y_{i-1}, X_i) \quad (6-49)$$

而在实际再制造过程中，并不需要为每一道工序都设立相关的质量监控点，只需要将对再制造过程质量产生重要影响的重点工序作为质量控制点。设再制造有 m 个工序质量控制点，其对应的再制造质量特性分别为 $Y_1^*, Y_2^*, \dots, Y_k^*, \dots, Y_m^*$ ，若质量监控点 $k-1$ 和监控点 k 间的生产子系统 k 有 $X_l^*, X_{l+1}^*, \dots, X_{l+s}^*$ 个工序，令 $Y_{(k)}^* = \{X_l, X_{l+1}, \dots, X_{l+s}\}$ ，则生产子系统过程 k 有 $Y_{(k)}^* = f_k^*$

$(Y_{(k-1)}^*, X_k^*)$ 。

根据两质量的知识理论,再依据用户和实际再制造过程生产的质量分析需求,可针对不同过程(整个再制造过程、单个工序或若干个工序组成的生产子系统)建立相对应的质量影响方程。

为了更好地处理再制造质量数据,需要对再制造过程质量诊断系统进行描述,即为知识的表达。知识的表达系统基本成分是研究对象,即再制造过程质量数据的集合,关于这些再制造过程的知识是通过再制造过程的基本特征(属性)和它们的特征值(属性值)来表达的。

基于粗糙集的理论知识,实际再制造过程中影响再制造过程质量的因素作为决策系统的条件属性,再制造质量的特征作为决策属性,即条件属性集由表征原材料(或再制造上道工序分质量)和影响再制造过程每道工序质量的5M1E数据(即 X)组成,决策属性是指再制造过程总质量特征的数据。

综上所述,再制造过程质量诊断系统可分为三个子系统,即再制造产品质量诊断决策系统、工序质量诊断决策系统、再制造子系统质量诊断决策系统。

1) 再制造产品质量诊断决策系统以式(6-50)表示:

$$P = (\mathbf{U}, \{X_0, X_1, \dots, X_n\} \cup \mathbf{Y}_n, V, f) \quad (6-50)$$

式中: \mathbf{U} 表示再制造系统的集合; $\{X_0, X_1, \dots, X_n\} \cup \mathbf{Y}_n = \mathbf{R}$ 表示属性集合; $\{X_0, X_1, \dots, X_n\}$ 表示条件属性集; \mathbf{Y}_n 表示决策属性集; V 表示属性值的集合,通常为连续性,需进行转化,变成离散型; f 表示一信息函数,即 $f: \mathbf{U} \times \mathbf{R} \rightarrow V$ 表示为指定 \mathbf{U} 中的一个对象 x 的属性值。以上述 $\mathbf{Y}_n = f(\mathbf{X}) = f(X_0, X_1, \dots, X_n)$ 为例。

以决策表来表达此决策系统,具体见表6-6。

表 6-6 再制造产品质量诊断系统决策表

U	X_0	X_1	...	X_n	Y_n
x_1	x_{10}	x_{11}	...	x_{1n}	Y_1
x_2	x_{20}	x_{21}	...	x_{2n}	Y_2
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots
x_j	x_{j0}	x_{j1}	...	x_{jn}	Y_j

2) 工序质量诊断决策系统以式(6-51)表示:

$$P_j = (\mathbf{U}, \{Y_{j-1}, X_j\} \cup \mathbf{Y}_j, V, f) \quad (6-51)$$

式中: \mathbf{U} 表示研究对象的集合; $\{Y_{j-1}, X_j\} \cup \mathbf{Y}_j$ 表示属性集合; $\{Y_{j-1}, X_j\}$ 表示条件属性集; \mathbf{Y}_j 表示决策属性集。

同样,此决策系统依旧用决策表来表达,具体见表6-7。

表 6-7 再制造过程工序质量诊断子系统决策表

U	X_0	...	X_n	Y_{j-1}	Y_i
x_1	x_{10}	...	x_{1n}	$Y_{(j-1)1}$	Y_1
x_2	x_{20}	...	x_{2n}	$Y_{(j-1)2}$	Y_2
\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots	\vdots
x_j	x_{j0}	...	x_{jn}	$Y_{(j-1)n}$	Y_j

3) 再制造子系统 t 质量诊断决策系统以式 (6-52) 表示:

$$P_t^* = (\mathbf{U}, \{\mathbf{Y}_{(t-1)}^*, \mathbf{X}_t^*\} \cup \mathbf{Y}_t^*, V, f) \quad (6-52)$$

式中, U 表示研究对象, 即再制造子系统的集合, $\{\mathbf{Y}_{(t-1)}^*, \mathbf{X}_t^*\} \cup \mathbf{Y}_t^*$ 表示属性集合, $\{\mathbf{Y}_{(t-1)}^*, \mathbf{X}_t^*\}$ 为条件属性集, \mathbf{Y}_t^* 为决策属性集合。 $\mathbf{X}_t^* = (X_l, X_{l+1}, \dots, X_{l+s})$ 。同样, 用决策表来表述该决策。具体见表 6-8。

表 6-8 再制造子系统 t 质量诊断子系统决策表

U	X_l	$X_{(l+1)}$	...	$X_{(l+s)}$	$Y_{(t-1)}^*$	Y_t^*
x_1	x_{1l}	$x_{1(l+1)}$	...	$x_{1(l+s)}$	$Y_{(t-1)1}^*$	Y_1^*
x_2	x_{2l}	$x_{2(l+1)}$	...	$x_{2(l+s)}$	$Y_{(t-1)2}^*$	Y_2^*
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots	\vdots
x_j	x_{jl}	$x_{j(l+1)}$	...	$x_{j(l+s)}$	$Y_{(t-1)j}^*$	Y_j^*

根据粗糙集的理论知识可得, 给定一个决策表 $DT = \langle \mathbf{U}, \mathbf{C} \cup \mathbf{D}, V, f \rangle$, 对于 $\forall \mathbf{B} \subseteq \mathbf{C}$, $\forall \beta \in \mathbf{C}$ 及 $\forall \alpha \in \mathbf{C} - \mathbf{B}$, 定义以式 (6-53) ~ 式 (6-55) 表示

$$sig(\alpha, \mathbf{B}; \mathbf{C}) = \gamma_{ind(\mathbf{B} \cup \{\alpha\})}(\mathbf{D}) - \gamma_{ind(\mathbf{B})}(\mathbf{D}) = \frac{|pos_{\mathbf{B} \cup \{\alpha\}}(\mathbf{D})| - |pos_{\mathbf{B}}(\mathbf{D})|}{|\mathbf{U}|} \quad (6-53)$$

式中, $sig(\alpha, \mathbf{B}; \mathbf{C})$ 为条件属性 α 对条件属性集 B 相对于决策属性 D 的重要性。

$$sig(\beta, \mathbf{C}; \mathbf{D}) = \gamma_{\mathbf{C}}(\mathbf{D}) - \gamma_{\mathbf{C} - \{\beta\}}(\mathbf{D}) = \frac{|pos_{\mathbf{C}}(\mathbf{D})| - |pos_{\mathbf{C} - \{\beta\}}(\mathbf{D})|}{|\mathbf{U}|} \quad (6-54)$$

式中, $sig(\beta, \mathbf{C}; \mathbf{D})$ 为条件属性 β 对条件属性集 C 相对于决策属性 D 的重要性。

$$sig(\mathbf{B}, \mathbf{C}; \mathbf{D}) = \gamma_{\mathbf{C}}(\mathbf{D}) - \gamma_{\mathbf{C} - \mathbf{B}}(\mathbf{D}) = \frac{|pos_{\mathbf{C}}(\mathbf{D})| - |pos_{\mathbf{C} - \mathbf{B}}(\mathbf{D})|}{|\mathbf{U}|} \quad (6-55)$$

式中, $sig(\mathbf{B}, \mathbf{C}; \mathbf{D})$ 为条件属性 B 对条件属性全集 C 相对于决策属性 D 的重要性。

再制造过程质量诊断实质过程为计算条件属性 (再制造过程质量影响因素) 相对于决策属性 (再制造过程质量特征) 的重要性, 当再制造过程产品出现异常时, 首先从重要性大的影响因素入手进行溯源。

3. 再制造过程质量异常诊断的具体过程

再制造过程质量异常诊断的具体计算过程如下：

1) 输入：决策表 $DT = \langle U, C \cup D, V, f \rangle$

步骤1：计算 C 相对于 D 的核 $CORE_D(C)$ ；

步骤2：令 $B = CORE_D(C)$ ，如果 $CORE_D(C)$ ，转到步骤5；

步骤3：对于 $\forall c_i \in C \setminus B$ ，计算属性重要度 $sig(c_i, B) = |pos_{B \cup \{c_i\}}(D)| - |pos_B(D)|$ ，求得 $c_m = \arg \max_{c_i \in C \setminus B} sig(c_i, B)$ ，如果存在多个属性满足最大值，从中选取一个与 B 属性值组合数最少的属性为 c_m 。令 $B = B \cup \{c_m\}$ ；

步骤4：当 $|pos_{B \cup \{c_i\}}(D)| = |pos_B(D)|$ ，回到步骤3，否则转到步骤5；

步骤5：输出 $B \in RED_C(D)$ ，本次计算结束。

2) 输出：条件属性 C 相对于决策属性 D 的一个约简 $B \in RED_C(D)$ 。

再制造过程质量具体的诊断算法步骤如下：

1) 收集原始再制造质量数据，从中选取训练样本集，建立初始的决策表；

2) 对数据中连续属性进行离散化处理并消除冗余样本，获得离散的信息表；

3) 约简再制造过程的条件属性；

4) 计算不同的条件属性对决策属性的重要度；

5) 当再制造过程出现质量缺陷时，按照上述计算的重要度，从高到低，对条件属性（质量影响因素）进行分析，得出诊断的结果。

6.5.3 基于专家系统的再制造过程质量异常调整

再制造过程质量异常调整主要应用质量调整专家系统，根据历史经验和收集到的再制造过程质量控制信息和过程质量异常诊断结果找出影响再制造过程质量的因素，通过质量调整专家系统设计再制造过程质量改进方案，对再制造过程质量进行调整。专家系统是一种基于智能知识的计算机程序系统，其内部含有大量的某个领域专家水平的知识和经验，其应用人工智能技术依据专家提供的专业知识及过程的推理能力，通过模拟专家思维对过程异常做出决策的过程，来解决原来只能专家才能解决的复杂问题。

1. 再制造过程质量调整专家系统

建立再制造过程质量调整专家知识库与调整机构，系统采用生产式结构，具体如图6-10所示，主要包括以下内容。

1) 质量知识库，包括废旧机电产品再制造过程质量控制、质量异常的解决方法的相关知识。

2) 质量数据库，描述再制造过程质量控制的符号、概念的集合，包括质量异常的初始数据、过程数据、异常的类型、测试设备的测试数据及最终结果的信息，该信息处于实时变动的状态。

3) 推理引擎，根据再制造过程的质量异常类型，通过质量知识库的知识，按

照特定的推理过程和搜索方式进行推理得到再制造过程质量异常的解决方法。

4) 知识获取系统, 将再制造过程质量异常的事实及专家的知识转换成计算机语言, 输入到知识系统。

5) 解释机制, 答复用户提出再制造过程质量异常的问题, 并解释具体的推理过程。

6) 人机接口与数据接口, 通过实时知识的更新及专家知识输入再制造质量知识, 更新和完善知识库, 其他模块向系统输入问题或将再制造过程质量控制信息从工序质量数据接口输入, 知识系统将依据输入数据进行推理, 并得出结果。

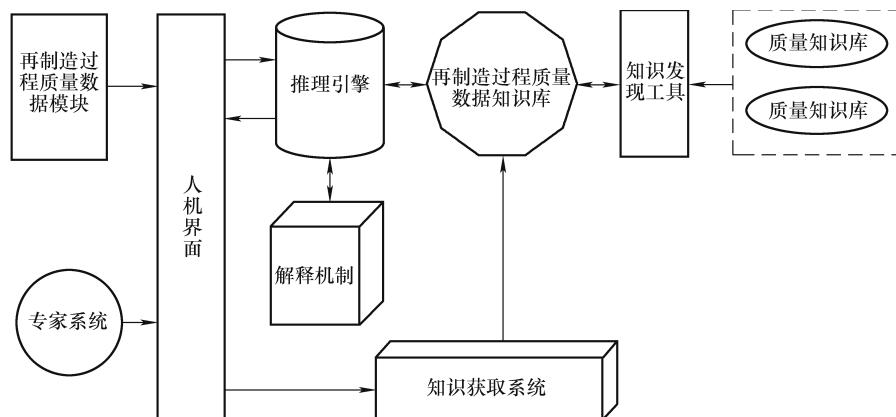


图 6-10 再制造过程质量调整专家知识调节系统体系结构

2. 知识的获取

通常专家知识系统知识获取方法主要有两种: 一种是自动获取; 另一种为人工获取。

1) 自动获取, 是指计算机可以像人类一样智能学习, 自动对系统进行分析, 发现系统中出现的新问题, 并对该问题自动分析、归档, 将其作为一个新的知识存入知识库的过程。

2) 人工获取, 是指通过查阅废旧机电产品再制造过程相关的文献资料或与再制造领域专家进行交流, 获取专家对再制造系统的经验知识, 并将这些知识以计算机语言的方式存入质量异常知识库中的过程。

主要通过这两种方式实现再制造过程质量异常专家调整系统的知识获取, 实现系统的实时知识更新。

3. 知识的表达

知识的表达是指将获取来的再制造质量知识转换为计算机语言形式的过程。目前比较常用的知识表达方法主要包括神经网络表示法、状态空间法、语意网络法、产生式知识表示法、问题归约法、框架式知识表示法及谓词逻辑法等。不同的表达

方法具有不同的优缺点，因此选择合适的知识表达方法有助于提高系统的诊断效率，而系统知识的特点通常是选取知识表达方法的主要依据。再制造过程质量异常调整专家系统中质量知识库主要包括三个部分：规则、事实、元知识。规则是专家系统的核心所在，也是再制造过程异常调整的规律所在；采用生产式规则表述，以及布尔运算的符号表达规则。事实是指再制造过程出现的质量异常类型、需要的调整措施及质量影响因素的质量知识。元知识是指质量控制规则应用、比较、行动的实时性知识，即是规则执行的规则。再制造过程质量异常主要从人、机、料、法、环、测六方面入手检测，在构造专家知识系统时同样以该六个方面建立规律。再制造过程质量异常专家系统常常用于因果性较强的系统知识的表示，其基本形式可表示为

IF a THEN b

式中： a 表示前提，即再制造过程的条件； b 表示结果，即再制造过程质量异常的诊断结果。

具体规则表达如下：

规则 1： IF 起泡。

THEN 更换刀具（概率）OR 人员问题（概率）。

规则 2： IF 拱曲形状（概率）OR 凹状（概率）。

THEN 磨削速度（概率）OR 人员问题（概率）。

4. 专家系统的推理机制

推理机制作为专家系统的核心，对系统有着举足轻重的作用。其决定着知识结构的表达方式，推理主要是对知识库的搜索，通过符号的模式匹配实现的。目前，主要有三种常用的推理方式：正向推理（数据驱动）、反向推理（目标驱动）和混合推动（混合驱动）。

正向推理是指是从再制造现有的质量数据信息出发，使用正向使用规则（让规则的前提与数据库匹配），求解待解的问题，又称自下而上控制、数据驱动控制、模式制导推理、前向链（Forward Chaining）控制。该推理过程是将当前的再制造过程信息输入到系统中去，并得出结果。其推理过程比较简单，也符合大家平时的思维方式且根据最终的结果采取了调整措施；缺点是没有明确的推理目标，推理效率较低。

反向推理属于目标驱动，是指从系统目标集中依据问题选择特定的目标，并在知识库中寻找出关于目标所有的规则集。如果某些规则与实际的问题相匹配，说明该规则符合目标集要求，且推理出问题的预采用措施。该推理过程又被称目标驱动控制、自上而下控制等。

混合推动是将正向推理与反向推理相结合，通过正向推理将客户提供的事实转化为规则，当遇到某些结论时，启动反向推理，根据已知的再制造问题对假设的方案进行选择，再根据假设方案反向检测出相应的规则。该推理过程可以集合正向推理与反向推理的优点，同时也避免了两种推理方法的不足。

6.5.4 实例分析

以废旧 TPX6113 镗床的横向导轨再制造过程为例。导轨作为机床的核心部件，起支承和传导作用，应该满足导向精度、刚度、耐磨性、低速平稳性、结构工艺性等基本要求，其误差不可忽视。机床导轨的滑动面在使用中经常会出现拉丝、划痕、研损、甚至咬合等损伤^[33]。废旧导轨再制造过程是以导轨的实际质量情况，如不同的损伤类型、不同的服役年限，来确定不同的修复方法，为了保证再制造导轨的质量，需要对再制造过程的质量进行控制。

1. 问题描述

废旧导轨再制造过程是应用现在先进的技术，比如激光熔敷、热喷涂技术等，依照不同的工艺手段对废旧导轨进行再制造，使其尺寸达到出厂要求。由于其再制造过程中不确定性扰动因素会随机发生，导致再制造过程质量异常时，其引发异常的质量原因与异常类型之间的关系不确定，致使再制造过程出现异常时，无法及时准确地确定引发异常的原因。机床导轨的质量特征属性主要包括表面粗糙度、直线度、平行度、平面度、垂直度等。几个关键过程参数影响再制造产品的质量属性输出，这些过程参数主要包括磨削速度、进给量及磨头倾斜度。

由 6.4.3 的实例得知，废旧导轨再制造出现的质量异常类型为质量异常 3，即为导轨表面出现凹状。

2. 再制造导轨质量异常诊断过程

在废旧导轨再制造过程中，影响再制造导轨表面质量的工序包括磨削速度、进给量以及磨头倾斜度。在再制造过程中，导轨的磨削主要有两种类型：一种为砂轮端面磨削；另一种为砂轮周边磨削。鉴于端面磨削的磨头机构简单性、万能型以及周边磨削磨头机构复杂性、对车床要求高的特点，使得端面磨削在机床上应用的更为广泛。在废旧机床导轨再制造过程中，使用单柱落地式导轨磨床 M50100 进行导轨磨削。建立再制造过程质量决策表，具体见表 6-9 所示。

表 6-9 再制造导轨质量诊断系统决策表

编号	磨削速度 v_c /(r/min)	进给量 f /(mm/min)	磨头倾斜度 θ /(°)	表面粗糙度 Ra /μm	平行度 p /mm
1	1820	2	3.0	0.67	0.015
2	1820	1.3	3.0	0.62	0.014
3	1450	1.6	1.9	0.71	0.010
4	1450	1.3	2.1	0.65	0.012
5	980	0.5	2.6	0.67	0.013
6	980	0.9	3.0	0.70	0.014
7	1820	1.1	1.5	0.59	0.011
8	980	0.7	1.8	0.60	0.010

再制造条件属性 $C = \{v_c, f, \theta\}$ ，用以表征影响再制造导轨质量的因素集，决策属性 $D = \{R, p\}$ 。所有的再制造数据都要经过离散化处理才能进行决策，所以，对再制造属性集进行离散化处理，得到表 6-10。

表 6-10 再制造导轨质量诊断系统决策表（离散化后）

编号	磨削速度 $v_c / (\text{r}/\text{min})$	进给量 $f / (\text{mm}/\text{min})$	磨头倾斜度 $\theta / (\text{°})$	表面粗糙度 $Ra / \mu\text{m}$	平行度 p / mm
1	1	1	1	4	6
2	1	2	1	2	5
3	2	2	3	6	1
4	2	2	2	3	3
5	3	4	2	5	4
6	3	3	1	6	5
7	1	3	3	1	2
8	3	4	1	1	1

决策表的计算：

$$U|(v_c, f, \theta) = \{\{1\}, \{2\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}\}$$

$$U|(Ra) = \{\{1, 5\}, \{2\}, \{3, 6\}, \{4\}, \{7, 8\}\}$$

$$U|(p) = \{\{1, 8\}, \{2, 6\}, \{3\}, \{4\}, \{7\}, \{5\}\}$$

C 的 Ra 正域 $\text{pos}_C(Ra)$ 为：

$$\text{pos}_C(Ra) = \{\{2\}, \{4\}, \{3\}, \{1\}, \{6\}, \{5\}, \{7\}, \{8\}\}$$

C 的 p 正域 $\text{pos}_C(p)$ 为：

$$\text{pos}_C(p) = \{\{2\}, \{4\}, \{3\}, \{1\}, \{6\}, \{5\}, \{7\}, \{8\}\}$$

计算再制造导轨质量决策表中分类结果对识别特征值的依赖性 γ ，可以求得粗糙集对三种识别特征值的依赖性为

$$\gamma_c(Ra) = \frac{\text{card}(\text{pos}_C(Ra))}{\text{card}(U)} = \frac{8}{8} = 1$$

平行度对三种识别质量特征值的依赖性为

$$\gamma_c(p) = \frac{\text{card}(\text{pos}_C(p))}{\text{card}(U)} = \frac{8}{8} = 1$$

从计算的结果可以看出，再制造知识系统是协调的，这是进行属性约简的前提条件。

接下来，需要通过粗集对再制造过程决策表达系统的属性进行约简。通过去除再制造过程的某一质量属性值，即去除决策表中的某一列的值，根据剩余列的属性值的情况，将属性值相同的归为一类。

(1) 去除磨削速度 v_c 时 去除 v_c 后，决策表由表 6-10 转变为表 6-11。

表 6-11 去除 v_c 再制造导轨质量诊断决策表

编号	进给量 $f/(\text{mm/min})$	磨头倾斜度 $\theta/(\text{°})$	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	平行度 p/mm
1	1	1	4	6
2	2	1	2	5
3	2	3	6	1
4	2	2	3	3
5	4	2	5	4
6	3	1	6	5
7	3	3	1	2
8	4	1	1	1

经计算求得

$$U|(f, \theta) = \{\{1\}, \{2\}, \{7\}, \{3\}, \{4\}, \{8\}, \{5\}, \{6\}\}$$

$$pos_{C-v_c}(Ra) = \{\{5\}, \{3\}, \{2\}, \{4\}, \{1\}, \{7\}, \{6\}, \{8\}\}$$

$$pos_{C-v_c}(p) = \{\{2\}, \{3\}, \{5\}, \{4\}, \{1\}, \{7\}, \{8\}, \{6\}\}$$

$$\gamma_c(Ra) = \frac{card(pos_{C-v_c}(Ra))}{card(U)} = \frac{8}{8} = 1$$

$$\gamma_c(p) = \frac{card(pos_{C-v_c}(p))}{card(U)} = \frac{8}{8} = 1$$

由计算结果得到, 去除磨削速度 v_c 时, 新的系统是协调的。所以, v_c 无论对于表面粗糙度 Ra 还是平行度 p 都是可以约简的。

(2) 去除进给量 f 时 忽略 f 时, 决策表由表 6-10 转变为表 6-12。

经计算求得

$$U|(v_c, \theta) = \{\{1, 2\}, \{3\}, \{4\}, \{8\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}\}$$

$$pos_{C-f}(Ra) = \{\{3\}, \{4\}, \{8\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}\}$$

$$pos_{C-f}(p) = \{\{3\}, \{4\}, \{8\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}\}$$

$$\gamma_c(Ra) = \frac{card(pos_{C-f}(Ra))}{card(U)} = \frac{6}{8} = \frac{3}{4}$$

$$\gamma_c(p) = \frac{card(pos_{C-f}(p))}{card(U)} = \frac{6}{8} = \frac{3}{4}$$

从计算结果可以看出, 新的系统是不协调的, f 相对于表面粗糙度 Ra 的重要度为 $3/4$, f 相对于平行度 p 的重要度为 $3/4$ 。

表 6-12 去除 f 的再制造导轨质量诊断决策表

编号	磨削速度 v_c /(r/min)	磨头倾斜度 θ /(°)	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	平行度 p/mm
1	1	1	4	6
2	1	1	2	5
3	2	3	6	1
4	2	2	3	3
5	3	2	5	4
6	3	1	6	5
7	1	3	1	2
8	3	1	1	1

(3) 除去磨头倾斜度 θ 时 忽略 θ 时, 决策表由表 6-10 转变为表 6-13。

表 6-13 去除 θ 的再制造导轨质量诊断决策表

编号	磨削速度 v_c /(r/min)	进给量 f /(mm/min)	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	平行度 p/mm
1	1	1	4	6
2	1	2	2	5
3	2	2	6	1
4	2	2	3	3
5	3	4	5	4
6	3	3	6	5
7	1	3	1	2
8	3	4	1	1

经计算求得

$$U(v_c, f) = \{\{1\}, \{2\}, \{3, 4\}, \{5, 8\}, \{7\}, \{6\}\}$$

$$pos_{C-\theta}(Ra) = \{\{2\}, \{1\}, \{7\}, \{6\}\}$$

$$pos_{C-\theta}(p) = \{\{2\}, \{1\}, \{7\}, \{6\}\}$$

$$\gamma_c(Ra) = \frac{card(pos_{C-\theta}(Ra))}{card(U)} = \frac{4}{8} = \frac{1}{2}$$

$$\gamma_c(p) = \frac{card(pos_{C-\theta}(p))}{card(U)} = \frac{4}{8} = \frac{1}{2}$$

从计算结果可以看出, 新的系统是不协调的, θ 相对于表面粗糙度 Ra 的重要度为 $1/2$, θ 相对于 p 的重要度为 $1/2$ 。

通过上述约简计算可以得出, 再制造质量决策系统因素 v_c 是可以忽略的, 而且简化后再制造系统是协调的。再制造条件属性 θ 和 f 对表面粗糙度和平行度都是有影响的, 影响度不一样, 分别为 $3/4$ 和 $1/2$ 。

通过基于改进 PCA 再制造过质量异常识别方法对再制造过程的识别结果可知，导轨再制造过程中出现的质量缺陷为凹陷问题，并通过基于粗糙集的质量诊断可知，从 θ 和 f 两种因素入手查找原因。根据两者重要的度的不同，首先，要从进给量 f 入手；其次，再从磨头倾斜度 θ 。

根据以上计算与分析得知，再制造过程出现质量异常的诊断结果，输入到再制造过程专家系统中。根据以往再制造过程的质量问题、不同的质量异常，进行推理提出相应的质量影响因素，并从人、机、料、法、环、测等方面入手对再制造过程出现的异常进行诊断，得出本次质量异常的诊断结果。得出的结论与需要采取的调整措施见表 6-14。

表 6-14 再制造过程质量异常诊断结果与调整措施

再制造质量因素	诊断结果	预采取的措施
进给量 f 原因引发	机器进给系统故障	检修机械
	人员操作不当	检查工人状态
	磨头出现故障	更换磨头
磨头倾斜度 θ 原因引发	磨头松动	紧固磨头
	人员操作不当	检查工人状态
	磨头磨钝	及时更换
	清扫工作台不够及时	及时清理

参 考 文 献

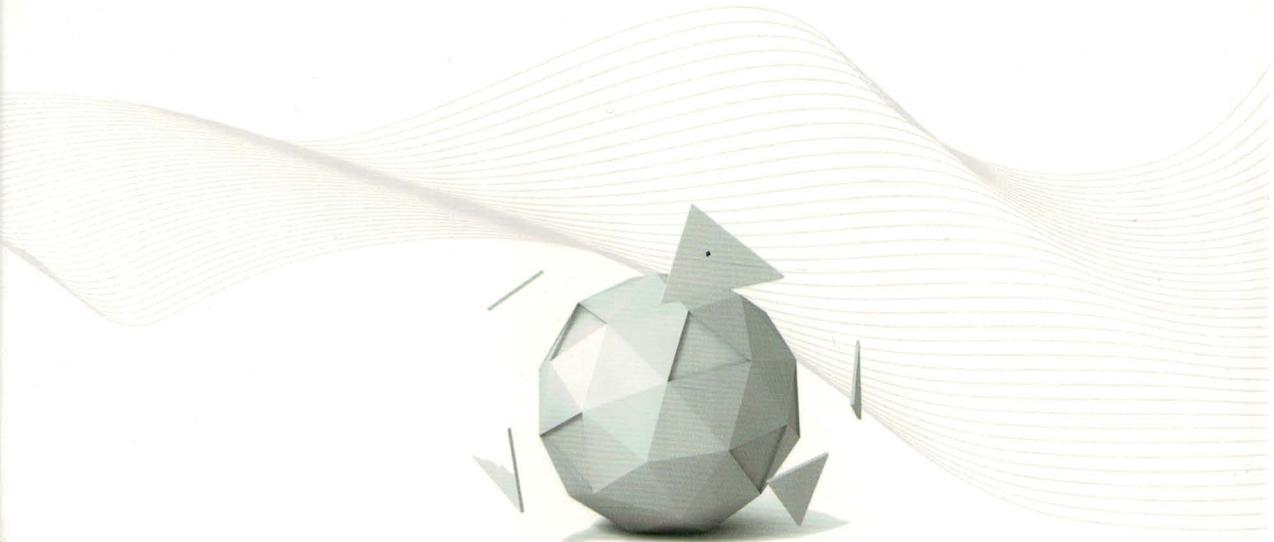
- [1] Ferguson M, Guide V D, Koca E, et al. The Value of Quality Grading in Remanufacturing [J]. Production & Operations Management, 2009, 18 (3): 300 – 314.
- [2] Barquet A P, Rozenfeld H, Forcellini F A. An integrated approach to remanufacturing: model of a remanufacturing system [J] Journal of Remanufacturing, 2013, 3 (1): 1 – 11.
- [3] Shen W, Pang K, Liu C, et al. The quality control method for remanufacturing assembly based on the Jacobian – torsor model [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81 (1): 253 – 261.
- [4] 姚巨坤, 杨俊娥. 废旧产品再制造质量控制研究 [J]. 中国表面工程, 2006, 19 (5): 115 – 117.
- [5] 钟诚. 再制造产品质量问题研究 [D]. 西安: 西安工程大学, 2015.
- [6] 邵将. 发动机曲轴再制造加工过程质量控制方法及关键技术研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [7] 刘明周, 邵将. 基于不确定测度的再制造曲轴径向跳动多元非线性映射模型 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (17): 106-113.
- [8] 孙志军. 复杂机械产品再制造过程质量管控策略研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [9] 孙志军, 刘明周. 基于装配偏差度的复杂机械产品再制造质量优化方法 [J]. 中国机械工程, 2014, 25 (11): 1473 – 1477, 1497.

- [10] 刘明周, 王强, 赵志彪, 等. 机械产品再制造装配过程动态工序质量控制系统 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20 (4): 817–824.
- [11] 李成川, 李聪波, 曹华军, 等. 基于 GERT 图的废旧零部件不确定性再制造工艺路线模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18 (2): 298–305.
- [12] 张宇. 用于质量目标的统计公差在计量型常规控制图中的应用 [J]. 机械工业标准化与质量, 2012 (12): 13–18.
- [13] 张晶, 梁工谦. 面向再制造的休哈特控制图分析 [J]. 机床与液压, 2009, 37 (6): 19–21.
- [14] Breitung J. Rank Tests for Nonlinear Cointegration [J]. Journal of Business & Economic Statistics, 2001, 19 (3): 331–340.
- [15] 孙国强, 冯长焕. 关于秩和检验的一点讨论 [J]. 太原师范学院学报 (自然科学版), 2013 (2): 9–12.
- [16] WANG, K. and TSUNG, F. An Adaptive Chart for Monitoring Dynamic Systems [J]. Journal of Quality Technology, 2008, 40 (1): 109–123.
- [17] Capizzi, G. and Massarotto, G. An Adaptive Exponentially Weighted Moving Average Control Chart [J]. Technometrics, 2003, 45 (3): 199–207.
- [18] 黄保勉. 机床导轨的精度检验 [J]. 装备制造技术, 2013 (11): 153–156.
- [19] 徐滨士, 朱胜, 史佩京. 绿色再制造技术的创新发展 [J]. 焊接技术, 2016 (5): 11–14.
- [20] Krauss C, Xuan A D, Huck N. Deep neural networks, gradient – boosted trees, random forests: Statistical arbitrage on the S&P 500 [J]. European Journal of Operational Research, 2016 (2): 689–702.
- [21] 石书彪, 陈焕新, 李冠男, 等. 基于小波去噪和神经网络的冷水机组故障诊断 [J]. 制冷学报, 2016 (01): 12–17.
- [22] 余忠华, 吴昭同. 控制图模式及其智能识别方法 [J]. 浙江大学学报, 2001, 35 (5): 521–525.
- [23] Ashraf S M, Gupta A, Choudhary D K, et al. Voltage stability monitoring of power systems using reduced network and artificial neural network [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017 (87): 43–51.
- [24] Rotshtein A P, Posner M, Rakytynska H B. Cause and effect analysis by fuzzy relational equations and a genetic algorithm [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91 (9): 1095–1101.
- [25] Chen L H, Wang T Y. Artificial neural networks to classify mean shifts from multivariate χ^2 chart signals [J]. Computers & Industrial Engineering, 2004, 47 (2): 195–205.
- [26] Guh R S. On - line Identification and Quantification of Mean Shifts in Bivariate Processes using a Neural Network - based Approach [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2007, 23 (3): 367–385.
- [27] Niaki S T A, Davoodi M. Designing a multivariate – multistage quality control system using artificial neural networks [J]. International Journal of Production Research, 2009, 47 (1):

251 – 271.

- [28] 许凡, 方彦军, 张荣. 基于 EEMD 模糊熵的 PCA – GG 滚动轴承聚类故障诊断 [J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22 (11): 2631 – 2642.
- [29] 侯彦东, 闫治宇, 金勇. 小样本下基于特征子空间估计的故障诊断算法 [J]. 上海交通大学学报, 2015, 49 (6): 825 – 829.
- [30] Besson O, Dobigeon N, Tourneret J Y. Minimum mean square distance estimation of a subspace [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59 (12): 5709 – 5720.
- [31] Golub G H, Van Loan C F. Matrix computations [M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2012.
- [32] Besson O, Dobigeon N, Tourneret J Y. CS Decomposition Based Bayesian Subspace Estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60 (8): 4210 – 4218.
- [33] 董信昌. 基于再制造的机床导轨复合修复技术研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2015.
- [34] Tadjudin S, Landgrebe D A. Covariance estimation with limited training samples [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37 (4): 2113 – 2118.
- [35] 卓德保, 徐济超. 质量诊断技术及其应用综述 [J]. 系统工程学报, 2008, 23 (3): 338 – 346.
- [36] 李金艳, 余忠华, 徐宣国. 信息不完备情况下多因素工序质量诊断方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48 (7): 88 – 93.
- [37] 张公绪. 百年质量管理历程与当前的质量管理形势 [J]. 质量与可靠性, 2004 (3): 17 – 20.
- [38] 张志雷. 自相关过程的改进型 EWMA 控制图 [J]. 数理统计与管理, 2008, 27 (3): 466 – 472.
- [39] Marcus B. Perry, Julie K. Spoerre, T Velasco. Control chart pattern recognition using back propagation artificial neural networks [J]. International Journal of Production Research, 2001, 39 (15): 3399 – 3418.
- [40] Cheng C S, Cheng H P. Identifying the source of variance shifts in the multivariate process using neural networks and support vector machines [J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35 (1 – 2): 198 – 206.
- [41] 胡涛. 粗糙集理论在不确定性知识表达及故障诊断中的应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2001.
- [42] 束洪春, 孙向飞, 司大军. 电力变压器故障诊断专家系统知识库建立和维护的粗糙集方法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (2): 31 – 35.
- [43] 俞晓冬, 孙莹, 减宏志. 基于粗糙集与模糊神经网络的变压器故障诊断方法 [J]. 电力自动化设备, 2003, 27 (2): 15 – 17.
- [44] 冯志鹏, 杜金莲, 宋希庚, 等. 粗糙集与神经网络集成在故障诊断中应用研究 [J]. 大连理工大学学报, 2003, 43 (1): 70 – 76.
- [45] 黄文涛, 赵学增, 王伟杰, 等. 基于粗糙集理论的故障诊断决策规则提取方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (11): 150 – 154.
- [46] 赵方方. 定制产品制造过程质量控制与诊断方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.

- [47] Pawlak Z. Rough sets: Theoretical aspects of reasoning about data [M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [48] 赵蕾. 机械制造企业过程质量分析与控制的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [49] 张公绪. 两种质量诊断理论及其拓展 [J]. 中国质量, 2001 (12): 25 - 33.
- [50] Wakaki T, Itakura H, Tamura M. Rough Set - Aided Feature Selection for Automatic Web - Page Classification [C] //Web Intelligence, 2004. WI 2004. Proceedings. IEEE/WIC/ACM International Conference on. IEEE Xplore, 2004: 70 - 76.



地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037

电话服务

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版



机械工业出版社微信公众号

ISBN 978-7-111-59103-0

策划编辑◎沈红 / 封面设计◎张静

上架指导 工业技术 / 再制造 / 质量管理

ISBN 978-7-111-59103-0



9 787111 591030 >

定价：89.00元