

学校代码: 10112

密 级:

太原理工大学

博士学位论文

论文题目: 滚磨光整加工数据库平台研发及工艺方案决策
方法研究

英文题目: Research and development of database platform and
process decision method of barrel finishing

作者姓名: 高 炜

学 号: 2014310001

学 科: 机械制造及其自动化

研究方向: 光整加工理论与技术

指导教师: 杨胜强 教授

合作导师: 田建艳 教授

论文提交日期: 2020 年 6 月

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已发表或撰写过的科研成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：

签字日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解太原理工大学有关保留、使用学位论文的规定：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版；允许本学位论文被查阅和借阅；学校可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于：保密 ☐ 在_____年解密后适用本授权书
不保密 ☐

论文作者签名：

导师签名：

签字日期： 年 月 日

签字日期： 年 月 日

学位论文答辩信息表

论文题目	滚磨光整加工数据库平台研发及工艺方案决策方法研究			
课题来源*	省科技厅项目、企事业单位委托项目			
论文答辩日期	2020.5.29	答辩秘书	张旭飞	
学位论文答辩委员会成员				
	姓名	职称	是否博导	工作单位
答辩委员会主席	徐格宁	教授	是	太原科技大学
答辩委员 1	李运华	教授	是	北京航空航天大学
答辩委员 2	吕 明	教授	是	太原理工大学
答辩委员 3	权 龙	教授	是	太原理工大学
答辩委员 4	廉自生	教授	是	太原理工大学

*课题来源可填：国家重点研发计划项目、国家自然科学基金项目、国家社科基金项目、教育部人文社科项目、国家其他部委项目、省科技厅项目、省教育厅项目、企事业单位委托项目、其他

摘要

滚磨光整加工技术是一种普适性很强的旨在提高零件表面质量、改善零件表面完整性的基础制造工艺技术，已在传统制造及高端装备制造领域广泛使用。国际权威专家 Cariapa 指出，机械零件中约有 50% 可以采用滚磨光整加工提高零件表面质量。**滚磨光整加工工艺系统的专业性与复杂性**，使得全产业链内企业之间存在**工艺供需信息盲区**，严重制约滚磨光整加工技术在制造领域的优势发挥。

以长期工艺研发实践积累的大量工艺实例和开放式汇集的典型实例为基础，**研发滚磨光整加工数据库平台**并探索**工艺方案决策的智能化方法**，助推有效加工信息资源的合理共享，是全产业链企业转型升级、提质增效重要而现实的课题，对进一步拓宽滚磨光整加工技术的应用有着十分重要的意义。本课题的主要研究目的：一是**研究滚磨光整加工数据库的构建模式，满足现阶段全产业链企业对滚磨光整加工要素信息直接获取的实际要求**。二是**研究工艺方案决策智能化方法及应用策略**，使不同用户可根据自身需求通过数据库获得所期望的解决方案，**包括使用的设备、磨块、磨剂及加工参数等方面的信息**。

首先，通过对滚磨光整加工流程分析，构建了**加工过程信息资源及集成模型**；数据库系统开发的建模表示方法采用集成化计算机辅助制造定义（IDEF）和统一建模语言（UML）结合的图形化描述方法；由功能模型、组织模型、信息模型、知识模型和过程模型组成数据库建模方法体系，建立了以过程模型为核心的滚磨光整加工数据库集成关系；建立了滚磨光整加工数据库的视图层、方法层和应用层三层体系结构，能实现全产业链中企业加工环境和基础结构的集成，为数据库平台构建奠定了模型和体系基础。

剖析加工实例，以加工对象和加工要求为主要特征对应加工工艺方案的思想构成案例并集成**案例库**，实现了加工实例的案例化表征；提出采用**减法聚类的模糊 C 均值聚类改进算法（S-FCM）**寻找特殊案例并加以保存，以提高其聚类质量；**将其余案例通过两两相似度对比，删除冗余案例**，从而合理有效地**优化案例库**。采用自主研发的滚磨光整加工数据库平台已有的合格案例进行了**大量的仿真研究**，结果表明，所提出的方法能合理筛选并删除案例库中的冗余案例，**除节省案例存储空间外**，使案例检索效率明显提高，可以满足对生产现场的实时调控。该方法原理简单、步骤清晰，可用于智能化滚磨光整加工工艺制订和生产过程中工艺参数后续优选的数据库平台。

为了智能化优选工艺方案,提出一种分级递进的融合决策理论。依据加工工艺数据库构建的工艺案例库,首先采用加权案例推理技术(WCBR),寻找与新问题匹配的原有案例,以便快速找到问题的解;如果没有找到匹配案例,则借助模糊专家系统(FES),充分挖掘已有案例中的知识,通过区间值模糊推理,寻找新问题的相似案例。其中,具体提出了一种变权重案例推理方法,基于层次分析法确定案例特征权重,明确了案例分级检索步骤和案例特征相似度计算办法,仿真研究了案例库中已有案例、相似案例及差异较大案例等情况,讨论了特征判断矩阵对优选结果的影响程度,仿真结果表明:采用 WCBR 可以快速、准确地找到案例库中与新问题匹配的案例。另外,针对不能检索到匹配案例的情况,提出了滚磨光整加工工艺优选的模糊专家推理模型,以滚抛磨块优选为例详细阐述了区间值模糊规则的构建,根据实际加工的成功案例确定各特征值等级范围及隶属区间,并与滚抛磨块参数建立联系,利用产生式规则表示法建立区间值模糊规则;通过层次分析法确定模糊规则中各特征属性的权重,并采用区间值模糊推理算法进行滚抛磨块参数优选推理机的设计;采用大量的测试案例进行了实验仿真,结果表明:模糊专家推理优选模型能够在案例推理的基础上提升新问题与旧案例之间的相似度,在满足加工要求的同时,能够快速、准确、合理地优选出待加工零件所需的滚磨光整加工工艺。

构建了包括物理资源层、虚拟资源层、数据管理服务层、应用接口层和用户层核心平台的滚磨光整加工数据库开发总体框架和功能结构。基于 Oracle 数据库管理系统、C#和 Python 开发语言、Microsoft Visual Studio 2017 集成开发环境和 B/S 网络结构模式,完成了数据库平台程序开发,多维度展示了平台的实用情况。从某大型航空发动机生产企业应用光整加工数据库的实际需求出发,实现了企业特殊的工序模板生成功能扩展,建立了与企业 PDM 系统的数据接口。生产应用表明,工序模板功能有助于工艺规范,整体数据库平台应用使企业专项工艺信息资源整合、积累并共享,对提质增效和信息化管理发挥了积极作用。

本文研发的滚磨光整加工数据库平台及工艺方案决策方法,可以直接应用于全产业链企业的专项工艺决策及管理升级,为滚磨光整加工行业产业持续提质增效提供了理论支撑和实践探索。也为其他制造技术乃至工业领域构建数据库平台并进行智能化应用提供了有益的参考。

关键词: 滚磨光整加工; 数据库; 案例库; 智能化; 模糊专家推理; 融合决策

ABSTRACT

Barrel finishing is a basic and universal manufacturing technology, which aims to improve the surface quality and integrity of parts. It has been widely used in traditional manufacturing and high-end equipment manufacturing. According to the statistics of international authoritative experts Cariapa, about 50% of the mechanical parts can be processed by barrel finishing to improve their surface quality. Due to the specialty and complexity of the barrel finishing process system, there is a dead zone of process supply and demand information among enterprises in the whole industrial chain, which seriously restricts the applications of the barrel finishing technology in the manufacturing field.

Based on the study of a large number of typical manufacturing cases accumulated from practical experience and public available sources, it is an important and realistic task for enterprises in the whole industrial chain to develop a database platform for barrel finishing and to explore the process decision method of database, as well as to promote the rational sharing of effective processing information resources. It is also essential for enterprises to transform, upgrade, and improve quality and efficiency. It is significant to further broaden barrel finishing technology. The main research purposes of this project are as follows. Firstly, the construction mode of the barrel finishing database is studied, which meets the practical requirements from enterprises to directly acquire basic barrel finishing processing information. Secondly, the intelligent process decision method and application strategy of database are studied so that different users can obtain the desired solution through database according to their own needs, including the information of equipment, barrel media, barrel liquid reagents and processing parameters.

First of all, the information resources for processing and the integrated model are constructed by analyzing the barrel finishing process. The development of modeling method of the database platform adopts the graphical description method, combining the integrated computer-aided manufacturing definition (IDEF) and the Unified Modeling Language (UML). The database modeling method is composed of function model, organization model, information model, knowledge model and process model. In this system, the integration relationship

of the barrel finishing database with the process model as the core is established. The three-layer architecture of the barrel finishing database is established, which is composed of visual layer, method layer and application layer. It can achieve the integration of the enterprise processing environment and infrastructure in the whole industrial chain, and lay the model and system foundation for the construction of the database platform.

This paper analyzes the processing cases, and combines the processing objects and requirements as the main characteristics to form the cases and assemble them into the case base, which achieves the case representation of the processing cases. The improved fuzzy C-means clustering algorithm (S-FCM) based on subtractive clustering is proposed to find and save the special cases, so as to improve the clustering quality. The other cases are compared by two similarity in order to delete the redundant cases so as to optimize the case base reasonably and effectively. A large number of simulation studies have been carried out by using the existing qualified cases of the self-developed barrel finishing database platform. The results show that the proposed method can reasonably screen and delete redundant cases in the case database to save the case storage space, which significantly improves the case retrieval efficiency and meets the real-time control of the production site. The principle of this method is simple and the steps are clear. It can be used as a database platform for the formulation of intelligent barrel finishing process and the rapid and accurate optimization of process parameters in the production process.

In order to optimize the process scheme intelligently, a hierarchical fusion decision theory is proposed. According to the process case base constructed by the processing technology database, first of all, the weighted case-based reasoning technology (WCBR) is used to find the original case that matches the new problem in order to quickly find the solution of the problem. If the matching case is not found, the fuzzy expert system (FES) is used to fully dig the knowledge in the existing cases, and the similar case of the new problem is found by interval value fuzzy reasoning. Among them, a case-based reasoning method with variable weight is proposed in detail. Based on the analytic hierarchy process, the case feature weight is determined, the step of case hierarchical retrieval and the calculation method of case feature similarity are defined. The existing cases, similar cases and cases with large differences in case database are simulated and

studied, and the influence of feature judgment matrix on the optimization results is discussed. The simulation results show that the matching case to the new problem can be found rapidly and accurately by using WCBR. In addition, for the cases that matching cases cannot be retrieved, a fuzzy expert reasoning model for the optimization of barrel finishing process is proposed. The optimization of barrel media is taken as an example and the construction of interval value fuzzy rules is described in detail. According to the successful cases of actual processing, the range and membership interval of each case feature value are determined, and the relationship with the parameters of barrel media is established. The production rule representation method is used. The interval value fuzzy rules are established. The weight of each characteristic attribute in the fuzzy rules is determined by the analytic hierarchy process, and the interval value fuzzy reasoning algorithm is used to design the reasoning machine for optimizing the parameters of the barrel media. A large number of test cases are used for experimental simulation, and the results show that the fuzzy expert reasoning optimization model can improve the relationship between new problems and old cases on the basis of case reasoning. At the same time, it can quickly, accurately and reasonably optimize the barrel finishing process for the parts to be processed.

The overall framework and functional structure of barrel finishing database development, including physical resource layer, virtual resource layer, data management service layer, application interface layer and user layer platform, are constructed. Based on Oracle database management system, C# and Python development language, Microsoft Visual Studio 2017 integrated development environment and B/S network structure mode, the database platform program is well developed, and the practical application of the platform is shown in multiple dimensions. Based on the practical requirements of finishing database from a large aero-engine manufacturing company, the function of generating special process template is extended, and the data interface with PDM system is established. Manufacturing application shows that the processing template can facilitate standardization of processing procedure. The application of the overall database platform promotes the integration, accumulation and communication of the special process information resources among entrepreneurs, which plays a positive role in improving quality and efficiency and information management.

The database platform and its process decision method developed in this

paper can be directly applied to the special process decision-making and management upgrading for enterprises in the whole industrial chain. They can provide theoretical support and practical exploration for the continuous improvement of quality and efficiency of the barrel finishing industry. It also provides a useful reference for other manufacturing technologies and industrial fields to build an database platform.

Key Words: Barrel Finishing; Database; Case Base; Intelligentization; Fuzzy Expert Reasoning; Fusion Decision

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 论文研究的意义和目的	1
1.2 课题背景及国内外现状	2
1.2.1 滚磨光整加工技术现状	3
1.2.2 工业数据库技术概要	13
1.2.3 数据库智能化应用原理与方法	19
1.3 课题来源及主要研究内容	23
1.3.1 课题来源	23
1.3.2 论文研究的主要内容	24
第 2 章 滚磨光整加工数据库的建模方法和体系结构	27
2.1 滚磨光整加工工艺流程分析	27
2.1.1 滚磨光整加工工艺过程信息资源	28
2.1.2 滚磨光整加工工艺过程信息集成	29
2.2 面向数据库系统开发的建模表示方法	29
2.2.1 集成化计算机辅助制造的定义方法 IDEF	29
2.2.2 统一建模语言 UML	31
2.2.3 滚磨光整加工数据库建模方法需求	32
2.3 滚磨光整加工数据库的建模方法	33
2.3.1 滚磨光整加工数据库的功能模型	34
2.3.2 滚磨光整加工数据库的组织模型	36
2.3.3 滚磨光整加工数据库的信息模型	38
2.3.4 滚磨光整加工数据库的知识模型	39
2.3.5 滚磨光整加工数据库的过程模型	40
2.4 滚磨光整加工数据库的体系结构	41
2.4.1 滚磨光整加工数据库的视图层	44
2.4.2 滚磨光整加工数据库的方法层	44

2.4.3 滚磨光整加工数据库的应用层.....	45
2.5 本章小结	47
第 3 章 基于滚磨光整加工数据库的工艺参数优选案例库构建.....	49
3.1 滚磨光整加工工艺实例的数据分析	49
3.2 基于滚磨光整加工数据库的工艺案例表征	50
3.3 基于模糊 C 均值聚类算法的工艺案例库优化	53
3.3.1 基于减法聚类的模糊 C-均值聚类算法改进.....	53
3.3.2 基于减法聚类的 FCM 的工艺案例库优化	58
3.3.3 仿真研究.....	59
3.4 本章小结	64
第 4 章 滚磨光整加工工艺参数优选融合推理模型研究.....	67
4.1 工艺优选的融合推理模型总体设计	67
4.2 加工工艺优选的加权案例推理模型研究	69
4.2.1 基于层次分析法的案例特征权重确定.....	70
4.2.2 案例的匹配.....	76
4.2.3 案例处理.....	77
4.2.4 加权案例推理的仿真研究.....	78
4.3 滚磨光整加工工艺优选的模糊专家推理模型研究	93
4.3.1 专家系统的基本组成.....	93
4.3.2 滚磨光整加工工艺优选的专家推理模型研究.....	96
4.3.3 仿真研究.....	109
4.4 本章小结	121
第 5 章 滚磨光整加工数据库的开发与应用.....	123
5.1 滚磨光整加工数据库的开发	123
5.1.1 数据库的总体框架.....	123
5.1.2 数据库的系统功能结构.....	125
5.1.3 数据库的开发环境.....	126
5.1.4 面向全产业链应用的用户权限模型设计.....	127
5.1.5 工艺优选融合推理模型的程序实现.....	128
5.2 面向全产业链应用的数据库平台界面	129
5.2.1 物料信息维护界面示例.....	129
5.2.2 工艺实例维护界面示例.....	130

5.2.2 案例智能优选界面示例	132
5.3 滚磨光整加工数据库在典型企业的定制化应用	135
5.3.1 企业定制化服务需求分析	135
5.3.2 基于定制化服务的数据库功能设计	136
5.3.3 实际生产应用	137
5.4 本章小结	140
第 6 章 结论	141
6.1 结论	141
6.2 展望	142
参考文献	145
攻读学位期间取得的科研成果	151
致谢	153

第 1 章 绪论

1.1 论文研究的意义和目的

2019 年第二届中国制造高峰论坛上,来自产学研用各界制造专家就中国制造业“大而不强”建言献策。其中中国工程院专项研究报告明确指出,关键基础零部件、关键基础材料、先进基础工艺及包括技术标准在内的相应技术支持等是制约我国制造业尤其是装备制造业由大变强的症结所在。突破瓶颈的主要途径包括智能制造和质量创新,其中质量创新的核心是质量技术创新。

工信部信软司在与工业软件产业发展有关文件中指出:工业软件是指专用于或主要用于工业领域,为提高工业企业研发、制造、生产管理水平和工业装备性能的软件。工业软件是现代产业体系之“魂”,广泛渗透和应用几乎于几乎所有工业领域核心环节。e-works 发布的“2019-2020 中国智能制造 10 大热点”指出,在细分行业和细分领域,工业企业对工业软件提出了更迫切的需求。同时,随着智能制造战略的深入,推动企业的运营管理与制造执行系统的纵向集成与贯通已成为当前企业新的应用需求和重要产业趋势,通过两者融合打通运营管理与制造执行系统间的数据链路,将二者整合在一个统一的信息平台上,从而帮助行业中各级企业提升在运营决策与制造执行等方面的综合效益^[1]。

滚磨光整加工是一种可用于精密和超精密加工的基础制造工艺,目前在装备制造业中广泛使用并强劲需求,能够有效提高零部件的表面质量,从而改善零部件的使用性能,是先进制造技术之成性制造的一个重要组成部分。滚磨光整加工可以批量加工不同大小、不同形状和不同材质的零部件;可以一次性完成零部件的几乎所有复杂的结构部位的加工;可以综合改善零件表面质量的多种指标;此外,滚磨光整加工对加工设备的制造精度要求低,相应的设备维护和滚抛介质消耗总体费用相对较低^[2,3]。

权威专家 Cariapa^[4]指出,世界范围内机加工零件中约有 50%采用不同的滚磨光整加工工艺提高零件表面质量,改善零件表面完整性。我国从上世纪 50 年代工业化初期使用振动光饰技术至今,已有多家高校、研究院所和百余家专门企业专业研发各种滚磨光整加工设备、辅料及成套工艺,并实际应用于国内外制造企业^[5]。

据不完全调研统计,目前在国内各类制造企业使用的滚磨光整加工设备类别和型号有几百种;滚磨光整加工专用的滚抛磨块的种类及型号据国内外专业生产厂家公开信息报道有近千种之多;滚磨光整加工专用的磨液的种类依照加工对象及加工目标的不同从最初的几种、几十种到现阶段的按目标专项定制。通常,滚磨光整加工工艺系统主要由相互影响、作用、制约的加工对象、加工要求、加工设备、磨块、磨液、加工参数等基本要素组成,因此,滚磨光整加工工艺系统是名副其实的复杂系统^[6,7]。

值得注意的是：

(1) 滚磨光整加工已从早期的面向中低端装备逐步升级到面向高端装备制造，如航空发动机、高端变速箱、高端液压元器件、机器人、兵器装备等^[8,9]；

(2) 高端装备制造企业应用滚磨光整加工的规模越来越大，主要体现在：设备种类多，各种不同加工方式的设备既有国外的又有国内的；加工对象越来越多，包括不同材质、不同结构、不同大小、不同成型及加工方法；同时，对零件加工既有单一指标要求又有多指标综合要求，而且对批次质量稳定性要求也高；

(3) 光整加工零件多变、加工要求多样，滚磨光整加工执行工艺制定涉及因素多，传统的依照经验进行实验摸索来制定最优工艺方案，对现场操作人员专业水平要求高，工艺规程编制费时费力，上下游企业供需衔接有效性差，不能满足快速发展的要求；

(4) 历史上形成的滚磨光整加工工艺专一性强，部分企业原有的滚磨光整加工设备因原加工零件或加工要求变化而闲置；

(5) 历史上已经形成的以传统纸质实验文件或电子文档为数据保存和利用手段的大量成功案例，不能快捷有效的在新工艺方案制定过程中发挥作用；

(6) 上游企业及研发机构有很多无序的成功案例，下游企业因缺少基础数据难以掌握工艺制订方法；

(7) 随着滚磨光整加工技术应用市场的不断扩大，滚磨光整加工产业涉及的企业专业化更强，其中包括国内外不同类型及规格的设备研制、滚抛磨块和化学剂生产、整体工艺研发机构或企业等。

基于上述认知，务实推进全产业链企业及研发机构的数字化、信息化和智能化，更好的为制造业市场提供高附加值、低成本制造服务，实现有效工艺资源的合理共享是滚磨光整加工行业的迫切需求。构建滚磨光整加工数据库平台并探索数据库的智能化应用是最现实最有效的方式之一。

目前，国内外还没有面向全产业链应用的滚磨光整加工智能数据库平台，这是机遇也是挑战。本文所构建的数据库平台既可以与国内成套工艺装备配套使用，也可以与国外引进设备配套使用；既可以在新实施的工艺系统中使用，也可以在直接用户尤其是高端装备制造企业原有成套工艺中嵌入使用。对进一步推进我国装备制造业尤其是高端装备制造业更好地使用普适性强、加工质量稳定、加工效率高、绿色环保的滚磨光整技术，进一步增强我国高端产品的国际竞争力，进一步推动行业快速发展和装备支持能力提升，有较大的技术保障和理论指导意义，必将产生一定的经济效益和社会效益。

1.2 课题背景及国内外现状

基于滚磨光整加工技术及全产业链发展现状分析，结合数据库技术和智能推理技术

的集成创新，可以实现滚磨光整加工数据库的构建和智能化应用。

1.2.1 滚磨光整加工技术现状

在机械加工中旨在提高零件表面质量（表面完整性）的各种加工方法、加工技术，称为表面光整加工技术，简称光整技术。传统意义上的去毛刺、抛光、光饰、精整等都属于光整加工。它是机械加工领域的一类基础性工艺技术，是先进制造技术的一个重要组成部分，涉及电磁学、电化学、材料学、传热学、力学、机电一体化、自动控制等多学科交叉的综合技术。光整加工技术有很多种，其中滚磨光整加工技术是普适性最好的光整加工技术之一^[3]。

滚磨光整加工技术体系主要包括：滚磨光整加工设备、固体颗粒介质（滚抛磨块）和液体介质（化学剂和基本液体）三大基本要素。其中：（1）光整加工设备是加工能量来源，是实现加工过程几何限定和运动限定的基础，其大类主要有回转式、振动式、离心式、涡流式、主轴式等；（2）固体颗粒介质，即滚抛磨块，以不同的成型方法制作的具有不同形状、不同大小和不同研磨、抛光、光饰和微量磨削功能的加工介质；（3）液体介质，即化学剂和基本液体，由不同成分制备的符合不同加工要求的化学剂及特定指标的水介质，具有清洗、抗腐蚀、防锈、软化、光亮、发泡、润滑、缓冲等促磨功能。

图 1-1 为滚磨光整加工工艺系统框架。

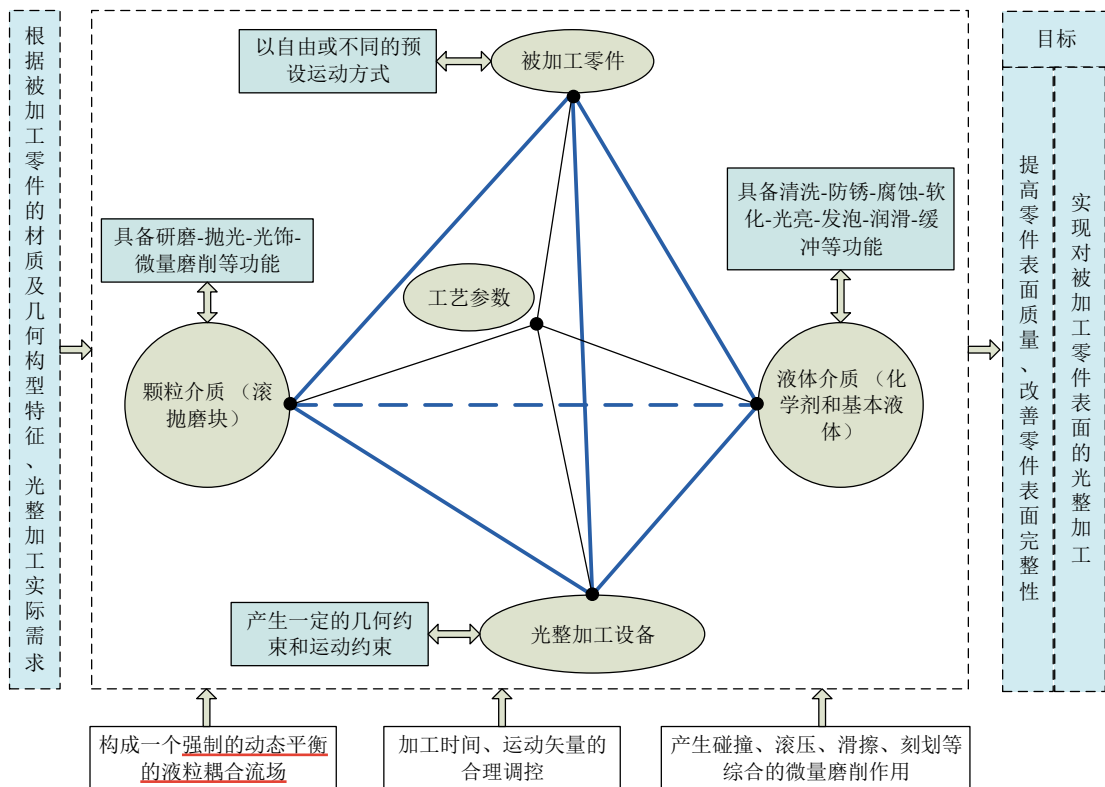


图 1-1 滚磨光整加工工艺系统框架

Figure 1-1 The framework of barrel finishing process system

加工时，三类要素根据一定的几何和运动学约束，可以建立动态平衡下的强迫液粒耦合流场。被加工的零件以自由或不同的预设运动方式，在强制的动态平衡的液粒耦合流场中保持约束，经过一定的加工时间及这个时段内合理的运动矢量调控，加工介质以不同性质、不同程度的作用对零件表面进行碰撞、滚压、滑擦、刻划等综合的微量磨削作用，从而实现对被加工零件表面的光整加工^[10]。即，改变零件表面的几何特征（降低表面粗糙度值，增加表面轮廓支承率，改变表面纹理，去除毛刺等缺陷），改善表面层的物理力学性能（提高表面显微硬度，表面形成变质层，改善表面应力状态等），提高零件的清洁度，综合改善零件的表面完整性，提高零件及产品的使用性能和寿命^[11]。表 1.1 为常见滚磨光整加工方式的特点和适用范围。

表 1.1 常见滚磨光整加工方式的特点和适用范围
Tab. 1.1 Characteristics and application scope of barrel finishing

滚磨光整加工方式	金属去除能力	加工效率	表面光亮度	提高零件表面粗糙度等级	改善表面物理力学性能	零件表面相互磕碰程度	实现自动化	适用范围
回转式	很弱	低	较差	约 0.5 级	较差	大	一般	小型异形件
振动式	较弱	一般	较好	1 级左右	较差	小	易	中、小型异形件
离心式	强	高	较好	1-2 级	较好	中	较难	中、小型异形件
涡流式	较强	高	较好	1-2 级	较好	中	易	中、小型异形件（薄片件除外）
立式主轴式	强	高	好	1-2 级	较好	无	较易	中、小型件、轴类件及异形件
交叉主轴式	强	高	好	1-2 级	较好	无	较易	中、小型件、盘类件及异形件
卧式主轴式	强	高	好	1-2 级	较好	无	易	曲轴类零件

（1）滚磨光整加工设备

滚磨光整加工设备类型不断发展变化，没有一个绝对分类方案，但分类逻辑应该按加工对象及加工要求的限定为基本出发点。按加工时零件约束状态可分为自由式和非自由式；按加工时使用介质的形态不同可以分为湿式滚磨和干式滚磨；按加工时主运动激励方式可分为回转式、振动式、离心式、涡流式、往复式和主轴式等；按加工时工件与滚筒的相对联接关系可以分为器壁式滚磨和非器壁式滚磨。这些分类既相互独立、也可有机组合复合、更有进一步延伸细分。

截至目前，国内外均没有关于滚磨光整加工设备的行业及以上级别的标准，完全是非标化设计、生产状态。不同的企业根据自身对市场的判断开发有不同的设备类型、规格等，在滚磨光整加工技术数字化、信息化和智能化过程中，有关设备的信息描述必须适应这种现状。

图 1-2 为滚磨光整加工设备信息描述组成。

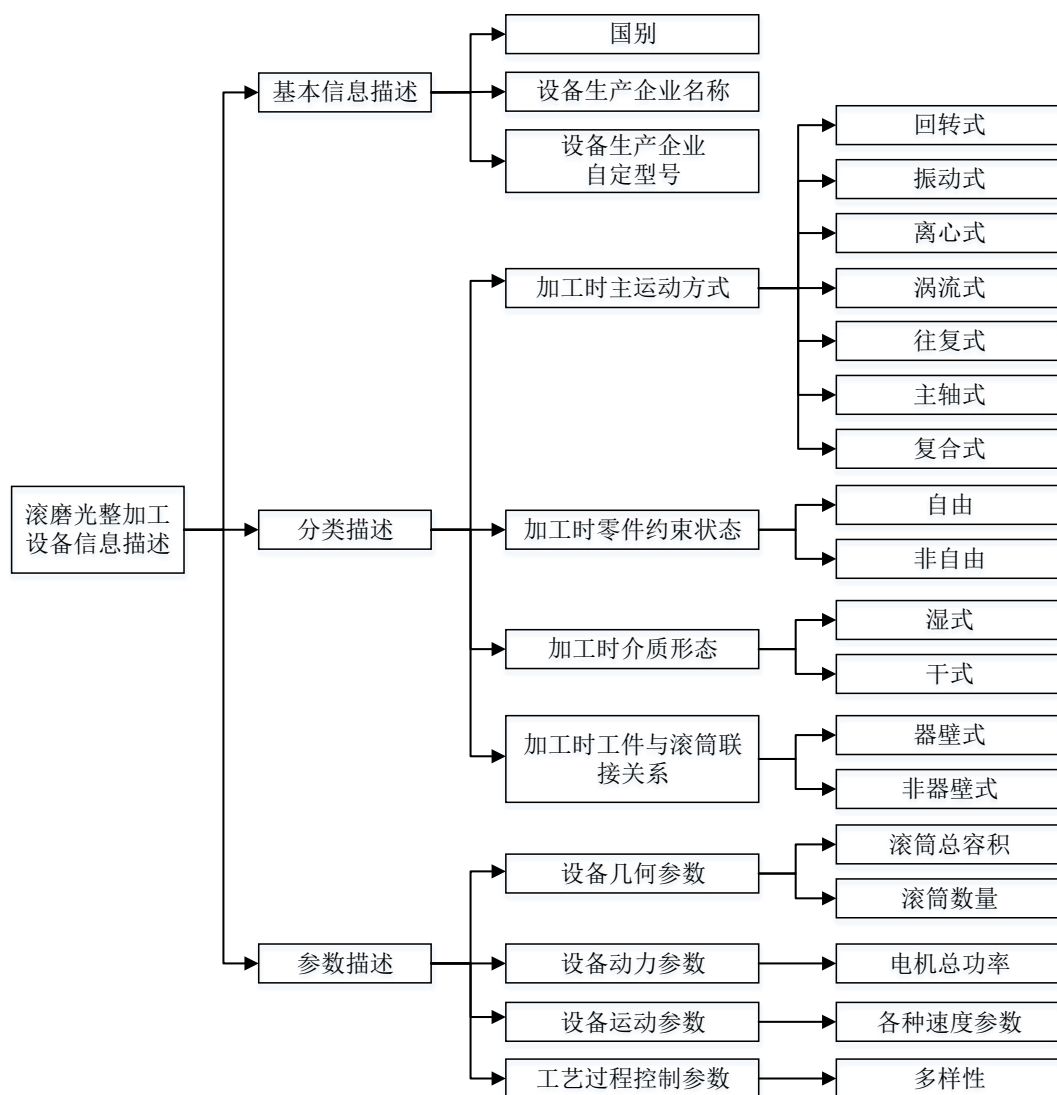


图 1-2 滚磨光整加工设备信息描述组成

Figure 1-2 Information description and composition of barrel finishing equipment

(2) 滚抛磨块

滚抛磨块是滚磨光整加工生产过程中所必须用的磨具，一般是用磨料与结合剂以不同方法制成各种形状的块状，由于其形状多为规则的三棱柱、圆柱、圆锥、圆球等块状，故称其为滚抛磨块，国外也叫研磨石(grinding/polishing stone)、磨丽石(abrasive media)或抛丽石(barrel media)。作为工艺过程中必要的加工介质，是实现滚磨光整加工效果的重要因素。

依据滚磨光整加工实际工况需求，滚抛磨块必须组织致密、硬度高、韧性好、吸水率低、耐水、耐油、耐酸碱。同时滚抛磨块对工件表面应具有一定的磨削能力并且耐磨损。表 1.2 列出专门制作的滚抛磨块的种类、特点及适用性。

表 1.2 滚抛磨块的种类、特点及适用性

Tab. 1.2 Types, characteristics and applicability of barrel media

种类	特点	适用性
高温烧结型陶瓷滚抛磨块	组织致密、粒度细、质地坚硬（约 7 度）、磨耗小，耐水、油、酸碱	主要用于各种金属零件去小毛刺，表面粗糙度有要求的零件 的抛光
高温烧结型熔凝（结晶）氧化铝滚抛磨块（纯黏土高温氧化铝结晶聚合）	切削能力很强、硬度很高（约 9.3 度）	多用于黑色金属工件去毛刺、倒圆锐边，去氧化皮等
高温烧结型氧化铝滚抛磨块（陶土和金刚砂混合烧结）	切削能力较强、硬度较高、韧性好	常用于黑色金属工件去除小毛刺及抛光
高温烧结型各种刚玉滚抛磨块（白刚玉、棕刚玉等）	切削能力强	用于各种金属件去毛刺、抛光
高温烧结型碳化硅滚抛磨块（陶土和碳化硅粉混合烧结）	硬度高且质脆、磨耗大	用于有色金属件去毛刺和抛光
高温烧结型高硬度磨料系滚抛磨块（人造金刚石、立方氮化硼等）	切削能力强、使用寿命长	因价格昂贵，应用较少
树脂滚抛磨块（树脂结合剂与各种磨料低温混合成型）	密度小，弹性好、缓冲作用强	主用在振动滚磨机对精加工件进行抛光及光亮加工
金属滚抛磨块（不同形状的不锈钢滚抛磨块）	密度大，表面好	多用于有色金属件表面光整加工的最终工序

根据滚抛磨块行业标准“中华人民共和国机械行业标准 JB/T 10153”，图 1-3 为滚抛磨块产品的信息描述示例，其中磨料的种类、代号及其粒度符合 GB/T 2476、GB/T 2481 的规定，结合剂的种类及代号符合 GB/T 2484 的规定。

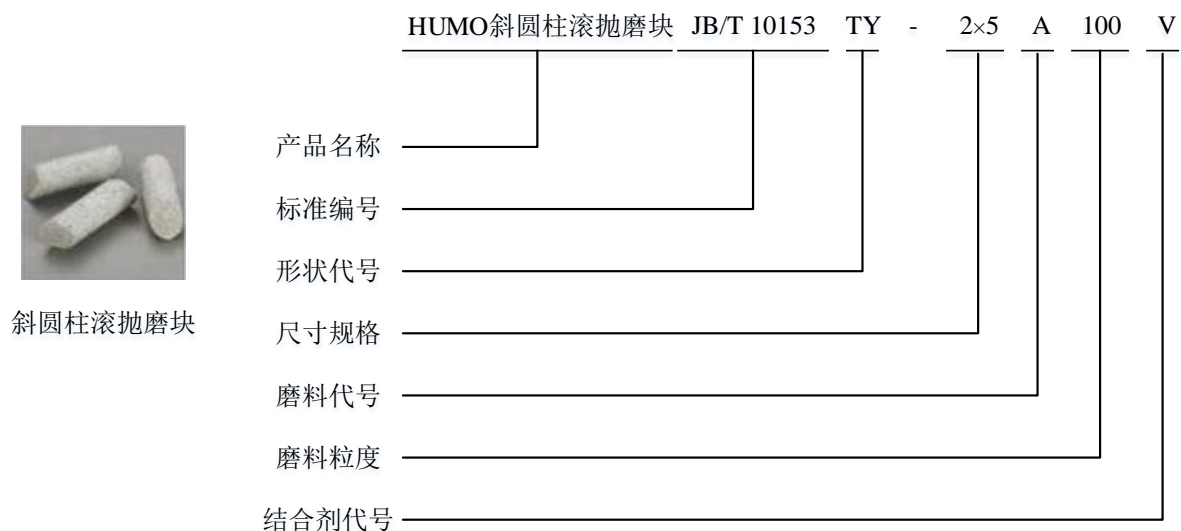


图 1-3 滚抛磨块产品信息描述示例

Figure 1-3 Example of information description of barrel media products

国内外专门针对滚抛磨块的研究性文章较少，随着行业快速发展，越来越多的研究人员开始关注这一领域。Domblesky J 等^[12]研究了**振动光整加工中滚抛磨块的材料去除率**，并建立了一个基于滚筒加速度、工件质量、材料特性等工艺参数描述质量去除率的模型。Vijayaraghavan V 等^[13]对**滚抛磨块的材料去除情况和资源消耗进行了持续研究**，提出这**两种特征参数在加工过程中起到了重要作用**。Chiancola 等^[14]研究了滚磨光整加工工艺参数选择中**滚抛磨块**的优选方式，强调了**磨块形状、结构及磨料选择的重要性**。Kittredge J B^[15]针对实际生产应用讨论了**滚抛磨块的损耗和生产效益问题**。各个研发机构和科研人员对滚抛磨块的研究逐步从实验室研发发展到产业应用探讨。

随着世界工业的不断发展，零件对表面光整加工的需求将随着工业发展要求的提升而不断加大，滚抛磨块生产行业迎来了高速发展阶段^[16]。国内外滚磨光整加工技术应用市场的扩大，滚抛磨块的用量、新型滚抛磨块的研发需求也迅速增长，市场对滚抛磨块加工性能的稳定性提出了越来越高的要求，国内滚抛磨块研发与生产企业的数量也同步增多^[17-19]。

图 1-4 所示为国外某典型企业滚抛磨块样板，图 1-5 所示为国内某典型企业滚抛磨块样板。

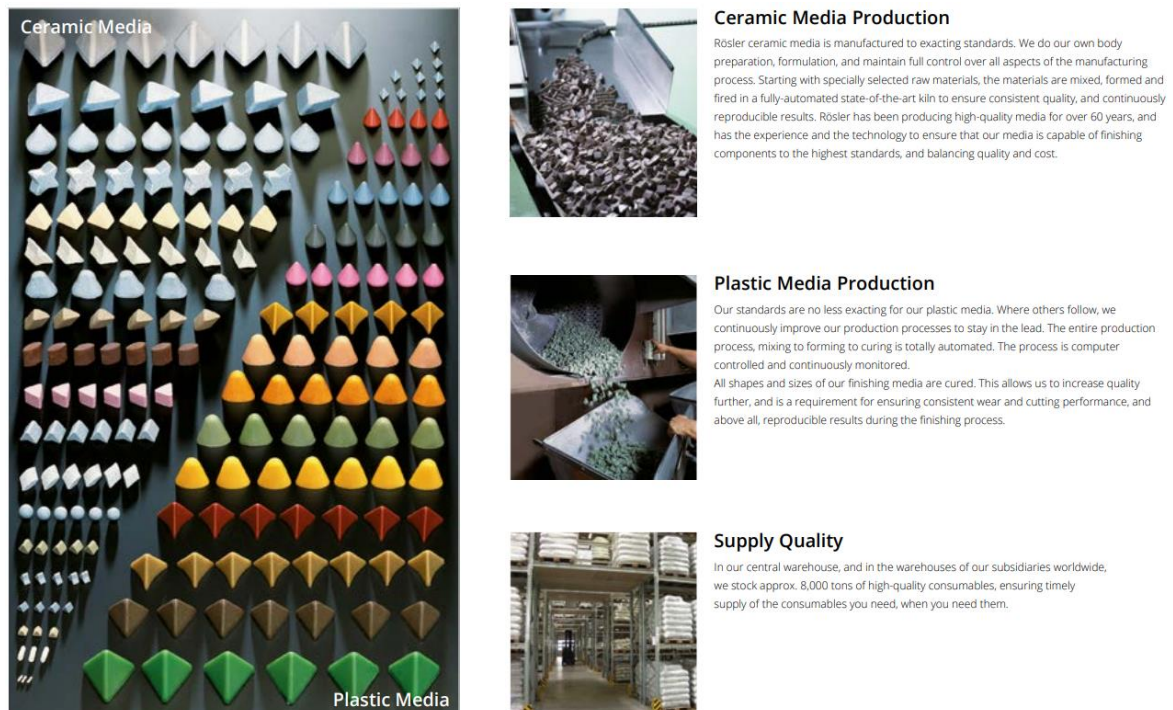


图 1-4 国外某典型企业滚抛磨块样板^[20]

Figure 1-4 Barrel media sample of a typical foreign enterprise^[20]

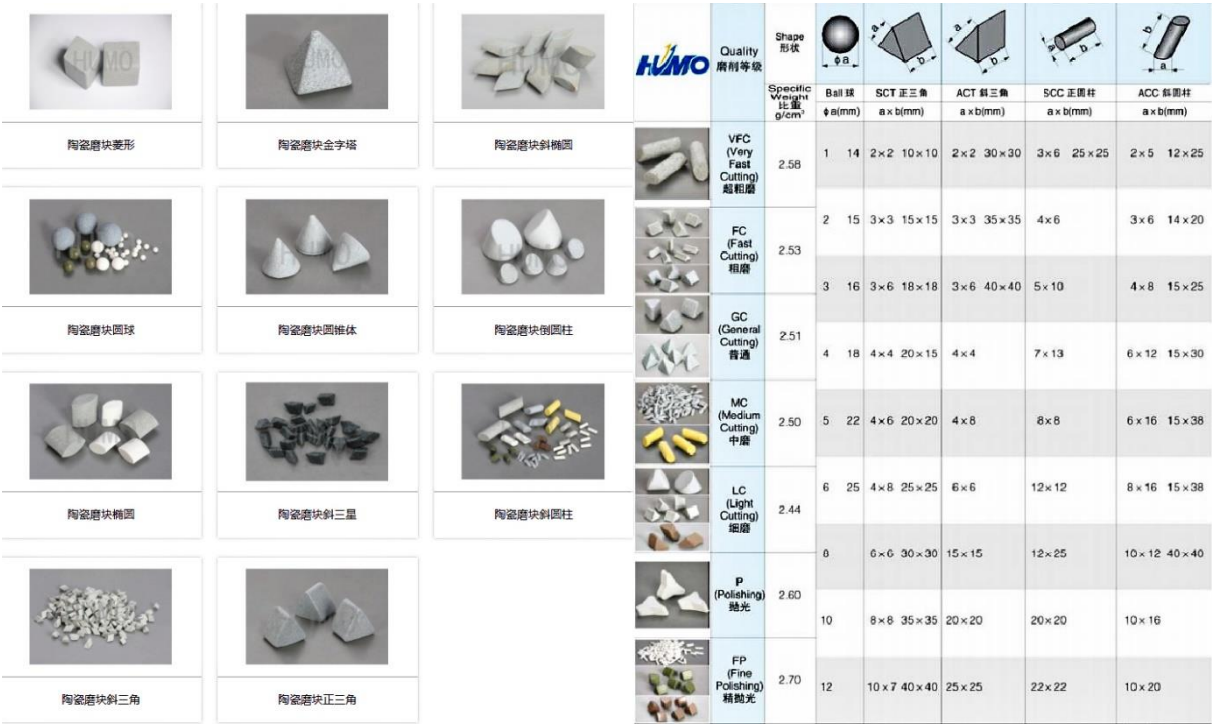


图 1-5 国内某典型企业滚抛磨块样板^[21]

Figure 1-5 Barrel media sample of a typical domestic enterprise^[21]

(3) 化学剂和基本液体

化学剂是一种或多种化学物质与水配制而成的溶剂，依据加工对象和加工要求，合理选定具有软化、防锈、清洗、光亮、润滑或发泡等相关的试剂。合理的选用化学剂，不仅对加工效果有显著影响也会影响加工效率。基本液体是根据零件加工要求的不同，选择的具有特定 pH 值的自然水。

化学剂和基本液体的有效选择，对光整加工效果起到了重要的作用，在大部分的加工方式中对加工结果、生产效率都起到了明显的促进作用。

在实际的生产过程中，滚抛磨块之间、滚抛磨块与工件之间的作用力会导致滚抛磨块与工件上脱落粉末状颗粒，随着加工时间逐步增长，会对对加工产生一定的影响。因此，化学剂和基本液体的更换频次也非常重要，及时的更换能起到冲刷滚抛磨块和工件表面、减少颗粒物影响化学剂辅助加工效应。当前，很多新型的滚磨设备都设计加装了液体介质的循环装置，通过控制化学剂的加入量和基本液体流量实现持续稳定的加工辅助作用。

目前，滚磨光整加工行业中使用的化学剂还没有相关的行业标准，具体使用只能是依据不同生产企业自定的参考标准。表 1.3 为国外某典型企业滚磨用化学剂样板，其型号主要按加工的粗精程度来区分。表 1.4 为国内某典型企业滚磨用化学剂样板，其型号主要按加工对象的材质及功能需求来区分。

表 1.3 国外某典型企业化学剂样板^[22]Tab. 1.3 chemical sample of a typical foreign enterprise^[22]

品名	用途	包装	備考
DP-11	粗研磨用	20kg 缶	ベルト#400 除去等
DP-22	粗研磨用	20kg 缶	ベルト#600 除去等
DP-33	粗、中研磨用	20kg 缶	ベルト#800 除去等
AM-25 (水溶性)	中～細研磨用	23kg 缶	メガネフレーム中研磨用等
AM-28 (水溶性)	中～細研磨用	23kg 缶	メガネフレーム中研磨用等
AM-50	光沢用	18kg 缶	全金属光沢～鏡面仕上用等
AM-52	光沢用	18kg 缶	メガネフレーム光沢用等
AM-55	光沢用	18kg 缶	全金属光沢～鏡面仕上用等
AM-72	光沢～鏡面用	18kg 缶	メガネフレーム鏡面用
AM-1000R	光沢用	20kg 缶	樹脂光沢仕上用

表 1.4 国内某典型企业化学剂样板^[23]Tab. 1.4 chemical sample of a typical domestic enterprise^[23]

型号	HA-PF	HA-IS	HA-SS	HA-TA	HA-FC	HA-RC	HA-PC
功能及用途	有色金属抛光增亮	褐色金属抛光	黑色金属、不锈钢类抛光	水质偏硬地区抛光	有色金属光整，防止油泥	黑色金属防锈、光整	黑色金属光整，防止油泥产生、分散功能佳
PH 值	8.4±0.2	8.6±0.2	8.8±0.2	8.3±0.2	8.2±0.2	8.3±0.2	8.3±0.2
钢/铁	+	++	+	+	+	++	++
不锈钢	o	o	++	o	o	+	+
铝	++	+	+	+	++	o	o
锌	++	+	+	+	++	o	o
镁	+	+	o	+	+	o	o
铜	+	+	o	+	+	o	o
防蚀保护	o	o	+	o	o	++	++
清洁	o	o	+	+	+	+	++
脱脂	o	o	o	o	+	+	++
增亮	++	+	+	+	+	o	o
泡沫	++	+	+	+	+	+	+
助磨	++	+	+	+	o	+	+

(4) 滚磨光整加工工艺实例的形成

通常，光整加工企业从与客户接洽开始到给客户提交结果形成工艺实例，主要经过需求输入、方案制定及准备、方案实施和效果评估等四个业务流程。

图 1-6 为滚磨光整加工工艺实例的形成流程。其中最重要的是必须准确了解加工对象及加工要求。

图 1-7 为滚磨光整加工的加工对象信息组成，图 1-8 为滚磨光整加工的加工要求信息组成。

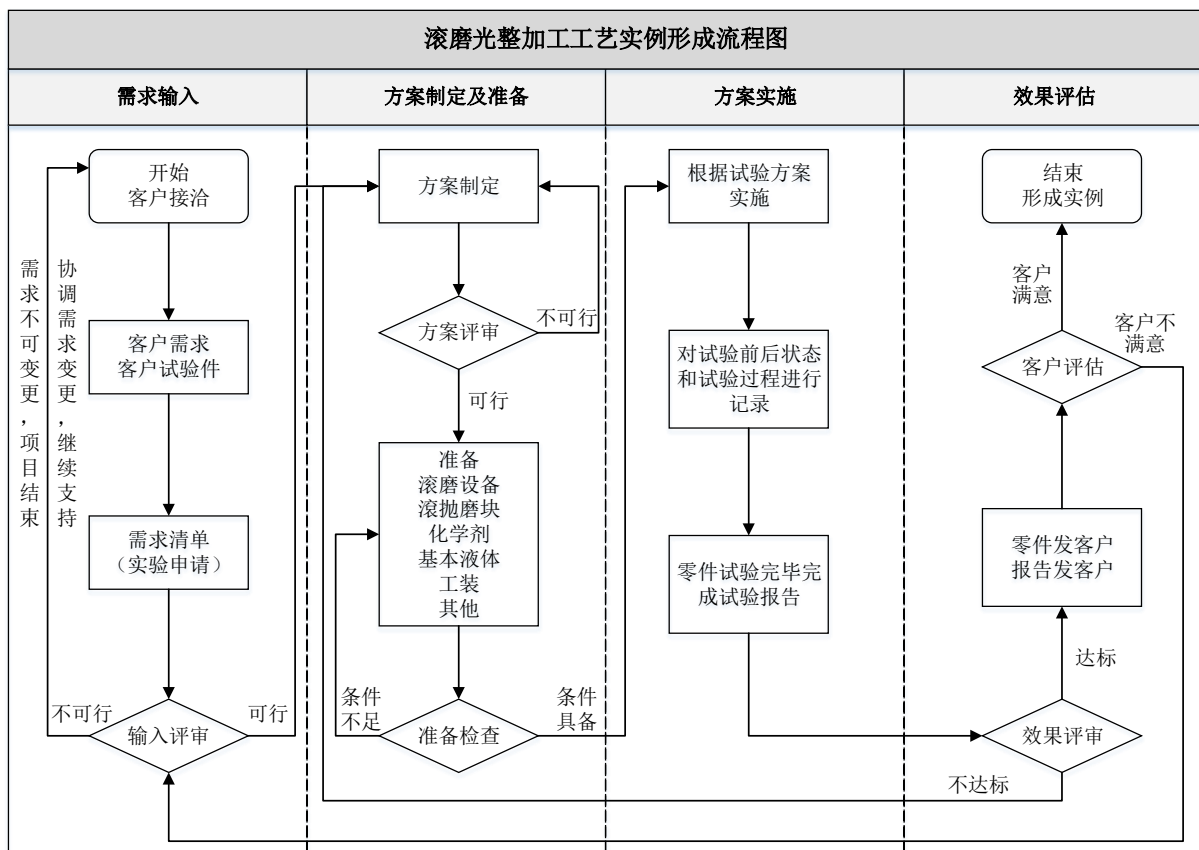


图 1-6 滚磨光整加工工艺实例形成流程图

Figure 1-6 Forming flow chart of barrel finishing process example

实际加工过程中，每一个最终形成的工艺实例都是经过工艺技术人员根据个人经验反复试验、并通过多道工序得到的结果，耗费了大量的精力和时间，导致加工企业对用户的需求响应效率低下。同时，因部分用户的零件生产成本低，用户不可能提供大量的零件给加工企业进行频繁的工艺试验，因此整个行业迫切需要进行滚磨光整加工数据库平台的研究和建立，以实现滚磨光整加工工艺方案的智能选择，解决传统加工模式中过分依赖工艺人员经验导致加工效率低下的难题。

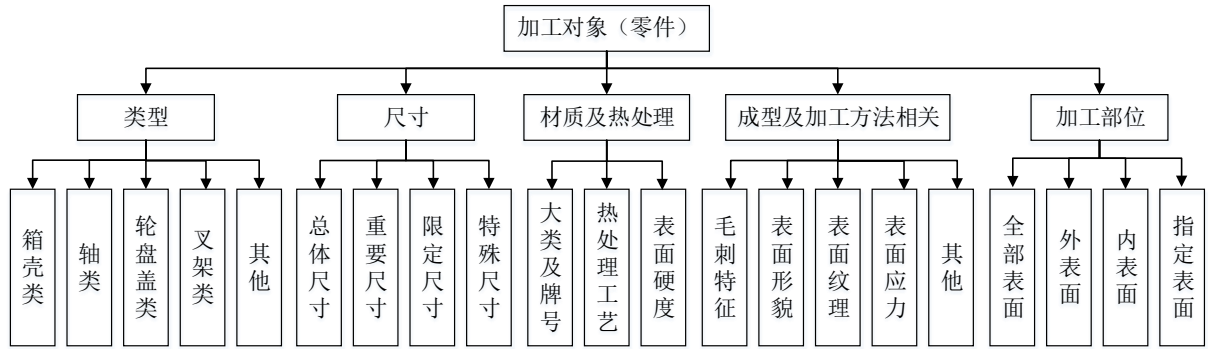


图 1-7 滚磨光整加工的加工对象信息组成

Figure 1-7 Information composition of processing object for barrel finishing

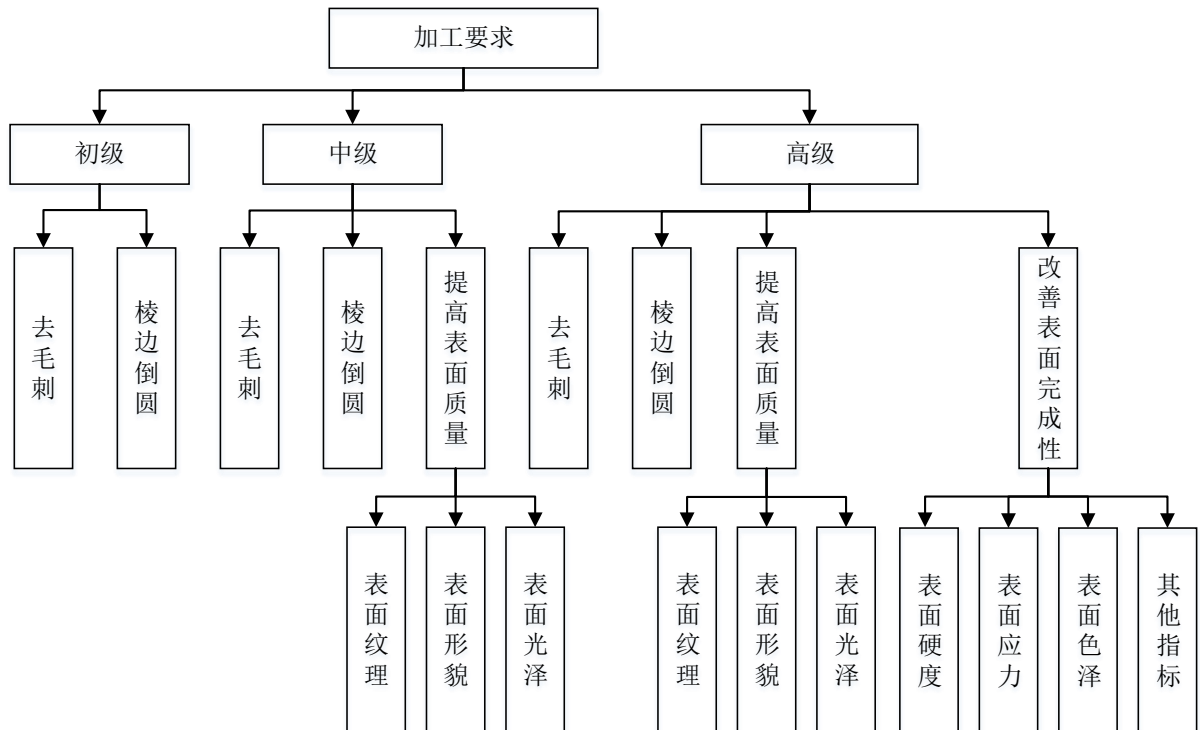


图 1-8 滚磨光整加工的加工要求信息组成

Figure 1-8 Information composition of processing requirements for barrel finishing

（5）滚磨光整加工技术全产业链

随着滚磨光整加工技术的不断发展及广泛应用，其产业链日趋成熟并不断壮大。图 1-9 为滚磨光整加工技术产业链总体框架。

其中：上游包括成百上千的滚磨光整加工核心要素（设备、介质、工艺）生产、制备和提供成套技术的研发企业，下游包括成千上万的直接或间接使用滚磨光整加工成套技术提高自身零部件产品质量的应用企业，中游是一些依据滚磨光整加工技术自身及应

用特点应运而生一类专门从事滚磨光整代加工企业。三类企业之间相互关联、相互促进。

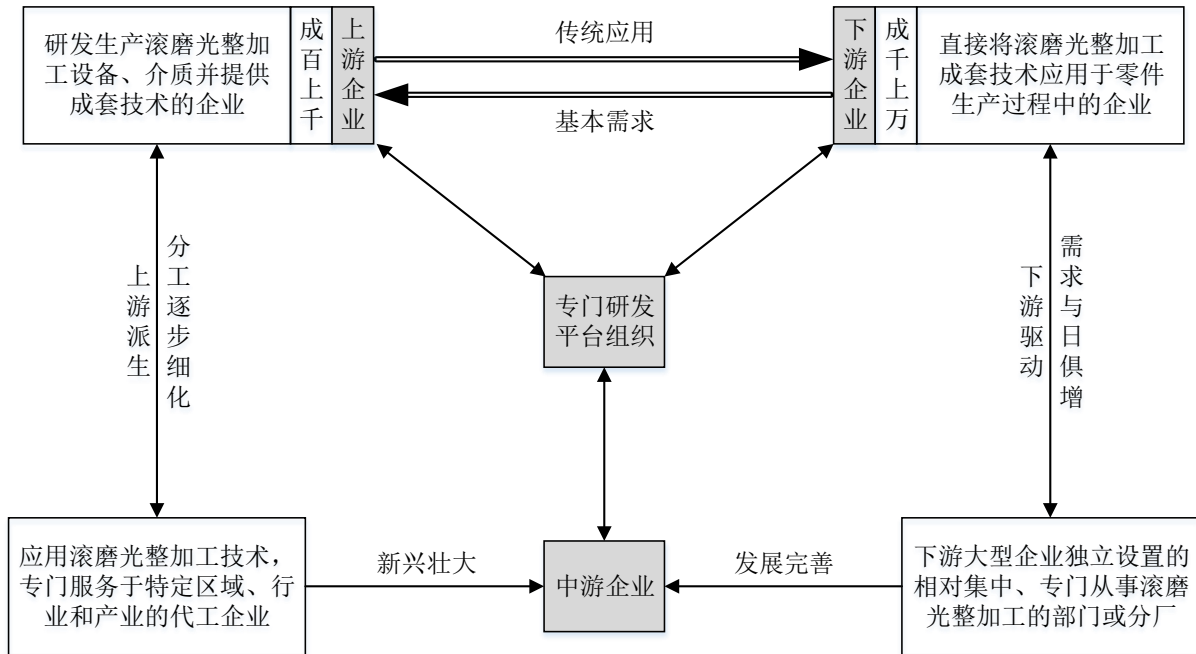


图 1-9 滚磨光整加工技术产业链总体框架

Figure 1-9 Overall framework of barrel finishing technology industrial chain

制约全产业链良性互动稳健发展的关键问题是数据共享不足、信息交流不畅。如果专门研发一个能把上游产品、中游工艺及下游需求有机的组织成包含数据及信息的共建共享平台，将对产业发展起到积极的促进作用。

目前，处于产业链上游的滚磨光整设备研发和生产企业，尤其需要了解下游制造企业的加工对象和加工要求。而往往针对一种零件需求进行庞大的试验以确定设备的选型或研发，而研发设备又依赖滚抛磨块与化学剂的匹配选择。首先，所有的工艺试验几乎都依赖于企业内部所拥有的滚抛磨块及化学剂，没有任何一家企业可以配齐市场上的各类滚抛磨块和化学剂。其次，大量的工艺试验依赖于技术人员的经验，耗费大量的工艺试验时间从而导致延误市场时机。

滚抛磨块生产企业作为滚磨光整加工全产业链中的一个重要组成部分，所起作用无法替换。近年来国内滚抛磨块制造企业成绩斐然，但从整体上来看我国滚抛磨块制造企业在生产优质产品方面与国外水平相比，还有不小差距。首先，市场信息获取不足导致存在产能过剩问题；其次，企业信息化程度过低，导致企业出产的滚抛磨块质量不稳定；最后，总体水平与国外同类型企业比有较大差距，新品研发能力薄弱。一直以来，整个磨料磨具高端产品性能与国外比差距大，且只能满足汽车、航天航空、机床、轴承、机车车辆船舶几大支柱工业需求 30%；尽管出口量很大，但却主要靠传统低档产品支撑，

出口均价仅为进口产品均价的 $1/10$ ^[24]。特别高端滚抛磨块，与国外相比更是少有企业能够出产，这样就导致不能良性发展。另外，一些滚抛磨块制造企业严重缺乏市场反馈信息，导致生产配方多年不变，缺少技术改进，有产量无效益。

化学剂生产企业在国内发展比较落后，与国外同类型企业相比差距很大。国内目前专业进行化学剂生产的企业较少，其在整个工艺系统中起到作用的程度相对较低。在整个工艺系统中起到的作用不足 20%，而国外同行业如日本已将化学剂在滚磨光整加工工艺中的作用提到了 60% 左右。产业需求信息的匮乏以及工艺选择与应用效率的低下使得化学剂生产企业专业化有减退趋势。

产业链下游的各类装备制造和零件制造企业在对零件加工提出新的需求时，只能依靠将零件提供给不同的光整设备研发与加工企业，采取撒网打鱼的方式为企业零件加工需求寻找工艺方案，往往周期很长从而导致响应市场不及时。此类型企业更需要一个信息发布与获取的平台以加快企业生产快速响应的市场需求。

针对如上问题，究其原因，首先是市场信息不匹配导致，大部分上游企业被动的依靠中下游企业订单获取市场信息进行生产，无法根据市场改变企业的生产量与生产方向。其次，中下游企业对上游企业的产品反馈信息不及时且信息量过少，无法对出产的滚抛磨块、化学剂和设备进行使用跟踪与分析。最后，各级企业内部生产信息化程度过低，生产工艺信息不一致导致生产的多批次产品质量不稳定。

基于此，滚磨光整加工产业链中各级企业迫切需要建立数据库平台，实现以滚磨光整加工工艺应用为衔接点，对上游滚抛磨块、化学剂和滚磨设备生产企业进行信息反馈，为下游滚磨光整加工技术应用企业提供成熟工艺方案，将整个产业链的信息串联起来，可以提升产业链各级企业产品竞争力。这正是滚磨光整加工数据库研发的价值所在。

1.2.2 工业数据库技术概要

数据库是“按照数据结构来组织、存储和管理数据的仓库”，是长期存储在计算机内的、有组织的、可共享的、统一管理的大量数据的集合。数据库技术的研究和开发源自上世纪 60 年代，发展以数据建模和数据库管理系统（Database Management System, DBMS）核心技术为主，内容丰富的一门学科，其数据模型主要有层次模型，网状模型和关系模型 3 种^[25]。1970 年，IBM 研究员埃德加·弗兰克·科德（Edgar Frank Codd 或 E. F. Codd）博士提出了数据库的关系模型的概念，奠定了关系模型的理论基础。经过近半个世纪的发展完善，基于关系模型的数据库已经成为世界上最流行的数据库系统，是大部分数据库商业化的标准模式^[26]。

近年来数字化、智能化制造概念的兴起，使得数据库技术在机械制造行业的应用得到很大的发展。国内外已经建设了成百上千不同类型的制造数据库，有效管理和利用了各类制造信息资源进行科学研究与决策管理，成为制造业不可或缺的基础技术设施^[27,28]。

（1）机械工程领域数据库的研究与应用现状

随着数据库技术不断完善与在各个行业的成熟应用,机械制造业各类工业数据库的建设也得到迅猛的发展。工业数据库提高了生产、研发效率,带来了巨大经济效益,又进一步促进各个制造强国开发了各种类型与用途的工业数据库系统。表 1.5 为当前制造业比较典型的焊接工业数据库的国内外研发现状^[29-32],表 1.6 为典型的切削工业数据库的国内外研发现状^[33-38]。

日本焊接数据库委员会 1986 年开始进行焊接数据库建设规划,之后英国焊接研究所(TWI)、德国焊接协会和美国焊接研究所分别开发了针对焊接工艺及评定管理、焊接文献与记录、焊接工艺参数的数据库,提供数据的管理与查询。21 世纪初,美国国家标准技术研究所基于互联网将焊接图片、焊接数据等提供异地工程检索,开启了数据库网络服务的先河,2003 年保加利亚鲁塞大学建立了包含常用钢材的焊接数据库,用户选择需要的钢材和焊接方法,匹配适用的焊条,初步进行了数据库智能化应用的探索。近年来,国外焊接数据库基本就是在这些数据库基础上不断完善数据量和数据库功能。

表 1.5 外焊接数据库国内外研发现状

Tab. 1.5 Research and development status of welding database at home and abroad			
国家及部门	内容	功能特点	起始年代
日本焊接数据库委员会	建设规划	焊接数据库建设理念明确提出	1986 年
英国 TWI	WELDSPEC	焊接工艺及评定管理	1986 年
德国焊接协会	焊接文献数据库及焊接记录数据库.	焊接文献与焊接记录数据的检索	1987 年
美国巴地蒙雨电器公司	焊工技能评定数据库	焊工基本信息、考试信息、技能信息和焊接参数的管理	1989 年
美国焊接研究所	CORRAL D1.1 WPS/POR	对焊接工艺和焊接材料参数的查询	1990 年
美国国家标准技术研究所	焊接网络数据库系统	焊接数据的网络化查询	21 世纪初
保加利亚鲁塞大学	焊条智能选择系统	包含常用钢材的数据库,用户选择需要使用的钢材和焊接方法,匹配出适用的焊条	2003 年
哈尔滨工业大学,哈尔滨锅炉厂	锅炉压力容器焊接数据库	焊接参数检索	1986 年
甘肃工业大学,哈尔滨焊接研究所	焊接工艺数据库	结合已有的工艺实验数据和经验,选择焊接工艺参数。	1986 年
太原重型机械学院,太重集团	钢制压力容器焊接工艺评定专家系统	根据工艺评定参数对数据库进行精确和模糊检索。	1999 年
中国电子科技集团,南京航空航天大学	焊接数据库	通过互联网实现铝合金焊材信息维护和查询	2008 年
南京航空航天大学	成分性能、牌号对照和材料分类数据库	钢材、铝合金、钛合金等母材及焊材的网络查询检索	2014 年
西南交通大学	高速列车生产数据库	高速列车生产过程相关的焊材及工艺参数的数字化、网络化管理与维护	2016 年

我国焊接数据库的研究始于 1986 年, 哈尔滨工业大学与哈尔滨锅炉厂合作研发锅炉压力容器焊接数据库, 同一时期, 甘肃工业大学和哈尔滨焊接研究所结合已有的工艺实验数据和经验, 建立数据库提供焊接工艺参数的查询。太原重型机械学院和太重集团基于企业的实际应用于 1999 年开发了钢制压力容器焊接工艺评定专家系统。近十多年, 中国电子科技集团和南京航空航天大学建立的焊接数据库提供了各类焊材的网络化管理与查询服务。2016 年西南交通大学建立的高速列车生产数据库提供列车生产过程中各类焊材基础信息、工艺参数信息及焊接设备的物理力学性能信息的网络化管理, 企业应用效果良好。

如上所述, 目前国外焊接领域的数据库多集中于焊接材料和工艺方面, 国内焊材数据库随着中国制造业的发展而快速壮大, 尤其是依托网络技术、数据库技术的发展, 在航空制造、高铁生产方面的应用已经相当广泛, 对焊接产业的快速发展起到了数字引领作用。

表 1.6 切削数据库国内外研发现状

Tab. 1.6 Research and development status of cutting database at home and abroad

国家及部门	内容	功能特点	起始年代
美国金属切削联合研究公司, 美国空军加工性数据中心 (AFMDC)	CUTDATA	维护了大量的切削试验数据, 提供工件材料、加工方式和刀具切削参数的查询。	1964 年
德国的阿亨工业大学	INFOS	存储材料可加工性方面的信息总量已达二百万个单元数据	1971 年
瑞典 SANDVIK 公司	SANDVIK COROCUT	提供车削、钻削、铣削刀具查询与切削参数检索	20 世纪 90 年代
德国 Walter 公司	TDMeasy	提供企业产各类刀具的切削参数	1993 年
德国 CIM 公司	CIM-SOURCE	提供 16 家世界著名刀具厂商的标准化图形、优化控制刀具信息, 精确、即时地将刀具信息提供给用户检索	20 世纪 90 年代
成都工具研究所	TRN10	工件、刀具、及切削用量数据的查询	1987 年
南京航空航天大学	KBMDBS	优化速度快能满足自动化系统优化切削数据的要求。	1991 年
山东大学	高速切削数据库	高速切削数据及加工工艺参数的查询。	2003 年
北京理工大学	难加工材料切削数据库	针对兵器工业企业需求提供难加工材料切削数据检索	2006 年
北京航空制造工程研究所	切削参数数据库	切削参数的优化和评估数据查询	2015 年
南京理工大学, 中航工业洪都集团	切削参数库系统	切削过程工艺数据管理, 参数优化和典型零件实例数据维护	2016 年

1964 年, 美国金属切削联合研究公司和美国空军材料实验所联合开发 CUTDATA 切

削数据库以来,国外切削数据库的建设迅猛发展。德国的阿亨工业大学 1971 年建立了切削数据情报中心(INFOS),二百多万个单数据存储量成为世界上数据量最多的切削数据库之一。20 世纪 90 年代开始,商业应用逐渐广泛,瑞典 SANDVIK 公司、德国 Walter 公司和 CIM 公司均向用户提供各类刀具的标准化图形、参数信息等数据的查询。

如上所述,世界各工业发达国家大都开发了金属切削数据库并提供各种形式的信息服务,且商业应用已经比较广泛,数据来源分布于科研实验室、生产车间及各类标准文献。国内切削数据库的研究始于成都工具研究所在 1987 年建成的我国第一个试验性车削数据库 TRN10,1988 年,南京航空航天大学开发了专用切削数据库软件系统 NAIMDS,后来又逐步完成开发了 KBMDBS 切削数据库系统。山东大学建立了实例和规则结合的混合推理智能高速切削数据库系统。21 世纪初以来,依托国内机械制造业的规模扩展,数据库的研究也发展迅猛,并开始了其智能化应用的研究,北京理工大学建立了刀具磨损和刀具寿命等试验曲线的存储,进一步发展了切削数据库的应用范围。山东理工大学开发的高速切削数据库引入了混合推理方法。北京航空制造工程研究所研发的切削数据库提供对切削参数的优化或评估。南京理工大学和中航工业洪都集团开发的切削参数数据库能够对切削结果进行预测,并在实际进行了应用。切削产业链数字化、智能化应用的发展走到了机械制造领域的前端,带动了整个产业链的良性发展。

(2) 有关滚磨光整加工数据库的基本探索

尽管装备制造业工业数据库的开发已经是目前国际装备与产品信息化研发的重要发展方向,机械工程领域如焊接数据库与切削数据库的发展也相当迅猛。但国内外滚磨光整加工数据库的建设尚处于起步阶段,与同类型制造行业的数据库建设相比,行业数据库建设滞后。

基于制造业全面振兴的需求,越来越多的机械制造领域不单单在发展制造技术,更多的实现了与数据库技术、网络技术等的结合,从而逐步完善机械制造技术在生产中的不足。滚磨光整加工技术应用范围越来越来大、实际生产需求越来越急,传统的工艺制订方式已经难以适应制造业发展提出的新要求。

目前国外的研究更多是简单的体现在商业应用上,如德国的罗斯勒集团、OTEC 公司、日本宇治电化学工业株式会社等。

图 1-10 为德国罗斯勒集团某种设备在其中文官方网站发布的产品介绍页面,针对本企业生产销售的滚磨光整加工设备,按加工类型分类列出各种加工设备,同时在每种设备下列出本产品可加工的零件类型范围供用户参考,仅仅是模糊参考的概念。

图 1-11 为日本宇治电化学工业株式会社日文官方网站提供的简单加工方案检索页面。用户在其官网页面中输入工件材质、加工目的、上一道工序、尺寸、形状、需加工数量、预处理方式、表面粗糙度等简单信息,页面根据用户输入的信息可列出有可能满足加工需求的设备,滚抛磨块及化学剂信息,其中应包括一定的数据积累与应用策略。



图 1-10 罗斯勒某种设备在其官网发布的产品介绍页面

Figure 1-10 Product introduction page of Rosler's equipment published on its official website



图 1-11 宇治电化学工业株式会社官网的加工方案检索页面

Figure 1-11 Search page of processing scheme on the official website of Yuzhi electrochemical industry Co., Ltd

上述企业的简单数据库构建主要针对自身产品实现产品信息的信息化管理，对外提供查询功能，而针对核心的滚磨光整加工工艺内容并没有过多涉及。尽管国内滚磨光整加工产业链中各级企业的数量持续增长，应用不断扩大，但受限于大部分企业规模小、信息化程度低，以至于国内滚磨光整加工行业企业级数据库还是空白，针对整个产业链的数据库建设更是要从零开始。

在国内各大期刊数据库平台上，基于滚磨光整加工技术数据库的文献极少，仅有太原理工大学进行过研究。中国机械工程学会生产工程分会 2001 年“面向 21 世纪的生产工程”学术会议上，太原理工大学杨世春教授首次提出：针对各类零件及不同的加工要求，分类构建工艺参数之间合理的数学模型，整体建立技术、工艺、设备及辅料选定的专家系统。之后，依托长期坚持对滚磨光整加工技术及成套工艺的研究，太原理工大学针对滚磨光整加工数据库的建立进行了探索性研究。首先，对滚磨光整加工产业链上下游企业进行有针对性的进行产业调研，力图能针对性的构建数据库平台，期间也设计了一些简单的工艺数据库，2009 年应用 ACCESS 数据库初步提出构建滚磨光整加工数据库。但受限于资源积累不够、网络技术及数据库技术应用不足，一直未能真正实现。经过多年的产学研用合作积累和沉淀，已收集了较丰富的覆盖滚磨光整加工全产业链的大量工艺实例数据资源和产业需求。在分析和参考制造业各类数据库的基础上，从 2014 年开始有针对性的开展了实际生产数据的分析与整理，对适用于滚磨光整加工工艺的智能推理方法进行了分析与总结，逐步开始进行数据库的建设。

（3）构建滚磨光整加工数据库的设想

目前，滚磨光整加工全产业链面临的问题较多，构建数据库面对的技术难点还不少。首先，针对市场上不同零件复杂多样的加工要求，滚磨光整加工执行工艺制定涉及因素多，长期以来以经验加试验的办法来确定工艺方案对现场操作人员专业水平要求高，工艺规程编制费时费力；而各类型企业长久以来积累的加工实例没有得到有效的管理和规范，未能生成有序的工艺数据，无法直接应用于新的加工需求。随着市场对滚磨光整加工技术的应用需求不断扩大，对技术研发机构与技术应用企业也提出了更高的要求。然而面对零件类型日益多样复杂、加工要求不断提高、定制需求逐步增多的生产现状，加工经验+试验摸索的工艺选择方式依然是各级企业工艺技术人员惯用的工作模式。同时，各个企业多年积累的工艺手册、加工实例的纸质或电子文档内容纷繁复杂，数据格式杂乱不一，不能快捷有效的在新工艺方案制定过程中发挥作用。其次，滚磨光整加工行业全产业链的布局因信息共享与互通不足导致了严重的不平衡，上下游各级企业没有市场规模，没有有效的提升盈利和抗风险能力，导致整个产业链无法达成战略协同效应与成本规模效益，从而形成产业优势。最后，建成的数据库平台如何能够发挥其数据库关键技术作用，为用户提供个性定制化的数据服务，从而使得产业链上下游各个企业在全市场的竞争中发挥滚磨光整加工全产业链的优势，是国内开展滚磨光整加工数据库构建

必须思考的问题。

本文所要构建的**滚磨光整加工数据库平台**是基于**滚磨光整加工技术与数据库技术相结合的产物**，从理论上能够有效地解决**滚磨加工工艺**制订的成本和效率问题，存储并管理大量数据，并根据不同数据的特点建立与之相应的知识库及数据库。**用户所需的加工工艺参数可以根据不同的加工需求和查询条件被迅速检索以指导生产决策**，采取不同类型的工序模板和各类报表的形式进行输出。同时，各类新的设备、滚抛磨块、化学剂和基本液体等加工数据能即时更新进入数据库，以实现给企业降低加工成本，提升经济效益的目的。然而，要实现滚磨光整加工数据库的构建并在实际生产应用中发挥作用，依然存在一些**亟待解决的科学问题和技术问题**：

1) 滚磨光整加工物料数据的提供方式：企业提供的各类物料的加工特征参数，如滚抛磨块本身的特征参数和被加工零件的需求特征参数独立且**信息不全**，没有与整个加工工艺系统相结合，在实际加工中**需对滚抛磨块的特征参数进行再判断**，并进行试验测试以形成工艺方案，**不利于自动化高效加工的顺利进行**，需要**系统能够充分考虑各类物料的特征参数集合的完善性**，制定规范的工艺数据标准。

2) 滚磨光整加工工艺数据的采集和更新：目前，实验室试验数据依旧是加工工艺数据的主要来源，尽管此类型数据格式规范、信息齐全，但却需要大量的人力成本和经济成本投入。**每天在产业链各级企业生产现场产生的海量加工工艺实例，更应该是数据的有效来源**。但是由于这些数据类型往往不一致且存在一定的信息缺失，规范数据格式的工作很重要。另外，**数据的更新大都是依赖严重时间滞后的人工整理实现**，迫切需要制定**即时入库的标准规范**。

3) 与企业现有 **ERP 和 PDM** 等管理及工艺系统的集成：传统的采用人工交互的模式会产生大量的工作量，**数据库要和各个系统能够实现接口模式**，即程序级的数据交互，这就要求**数据库构建时充分考虑企业模型的通用性**。

4) 数据库的**智能化应用**：传统的数字化模式已经无法适应当代滚磨光整加工设备、滚抛磨块、化学剂和基本液体与被加工零件形成的工艺体系的快速发展，无法适应多变的零件加工需求，必须构造能够**自动更新案例与知识库的自学习模式数据库**。

1.2.3 数据库智能化应用原理与方法

制造行业常用的智能化方法包括：**人工神经网络，遗传算法，模糊逻辑，案例推理和专家系统**等。

人工神经网络（Artificial Neural Network, ANN），通过模仿生物神经网络的结构和功能，由输入层、隐藏层和输出层构成，在工业分类问题中应用效果良好。多层的神经网络可以模拟数据之间的真实关系，具有强大的预测能力且准确性较高，但神经网络的开发较长、训练费时，且相比较其它的算法需要更多的数据样本^[39,40]。而滚磨光整加工过程中零件复杂多变、加工要求多样化，特征信息完全一致的有效样本数量较难满足神

神经网络训练量的要求，而较少的样本训练又无法得到可靠的结果，因此神经网络强大的预测能力在滚磨光整加工工艺选择过程中无法得到有效的发挥。

遗传算法 (Genetic Algorithm) 是解决搜索问题的一种通用算法，对于各种通用问题都可以使用，全局搜索能力强，并行性强、计算时间少、过程简单、扩展性好且算法结合性较好^[41]。但遗传算法的程序实现不易，对网络反馈信息的要求高，算法实现中很多参数依然依赖于执行者的经验，而滚磨光整加工数据库的目的就是为了摆脱过度依赖加工经验的束缚，快速得到精确的解，因此采用遗传算法并不完全适合当前滚磨光整加工工艺选择。

模糊逻辑 (Fuzzy Logic) 善于以拟人为核心的思维方式表达界限不清晰的具有模糊概念的问题，基于隶属度的概念，通过模糊集合、模糊规则和模糊推理、去模糊化的过程，实现决策^[42,43]。但获得模糊规则及隶属函数即系统的设计办法目前还主要依赖于经验，在原始生产实例的特征分析并实现案例表征过程中可以有效的借鉴应用，但在滚磨光整加工工艺方案的优选过程依然无法摆脱依赖经验的问题。

案例推理 (Case-based Reasoning, CBR) 通过重用或修改以前解决相似问题的方案来实现解决问题，善于获取知识、积累知识和提高求解效率，不同于传统的解决问题的系统，案例推理基于特征的匹配思想适用范围广，对求解复杂问题有很大的优势^[44,45]。而滚磨光整加工工艺选择是典型的复杂问题，同时有着大量的生产实例积累，其自我学习和自我更新的能力适合当前滚磨光整加工工艺优选的现实需求。

专家系统 (Expert system, ES) 基于知识获取、存储、机器学习及更新完善的优势，可为输入的新的加工问题提供已有知识和既定策略，从而获得问题的解^[46]。在当前滚磨光整加工工艺选择方式仍然依赖大量试验、企业一线技术人员经验依旧处于主要地位的情况下，是很适合于滚磨光整加工数据库的推理方法之一，能够通过长期的积累获取到足够系统自身学习的专家经验，形成有效的知识库。

基于滚磨光整加工工艺选择应用，上述智能推理方法比较表 1.7 所示。

表 1.7 智能推理方法比较

Tab. 1.7 Comparison of intelligent reasoning methods

方法	人工神经网络	遗传算法	模糊逻辑	案例推理	专家系统
知识获取	难	难	易	易	较难
学习能力	强	差	差	强	强
开发时间	长	长	短	短	较长
维护成本	低	低	低	低	较高
知识解释	没有	没有	一般	一般	很好
数据来源	数据库	数据库	数据库	数据库	专家

综合以上推理方法各自的优缺点,结合滚磨光整加工技术的实际应用需求,案例推理比较适应于数据库加工的工艺的智能优选要求。但面对实际生产中日益多样化复杂化的零件特征及加工要求,面对新研发出来的滚磨设备、滚抛磨块、化学剂的种类千变万化,整个工艺流程中各个工艺特征参数的选择范围不断拓宽、相互间制约与影响关系更加错综复杂,单一的案例推理技术的应用也无法保证能优选到最佳的工艺参数。因此,引入其他推理技术与案例推理技术结合,通过一定的集成方式,弥补案例推理技术的不足,成为滚磨光整加工数据库智能化应用研究的一个关键切入点。

本文提出的融合递进推理智能化技术集成模式,是将不同的推理方式进行分级递进结合,主要有模糊逻辑与案例推理的结合,案例推理和专家系统的结合。面对滚磨光整加工工艺系统的复杂性与特殊性,尽管专家系统获取知识的方式需要时间和经验的积累,且在学习能力和维护成本上都对应用环境有一定的要求,但滚磨光整加工产业链目前正处于技术应用不断拓展、工艺人员大量增长的初始积累期,反而能为专家系统的知识获取提供大量的数据来源,解决了其最根本的难点。因此本文在模糊逻辑优化案例库的基础上提出案例推理和专家系统的融合递进推理模型,充分利用大量的成功实例数据和领域知识进行工艺优选,减少无谓的试验时间,提高过程效率。

(1) 案例推理

基于 CBR 知识获取容易、学习能力强、开发时间短、维护成本低且易于知识解释的诸多优点,本文提出优先采用案例推理技术进行滚磨光整加工工艺参数的优选。当前,国内外学者对案例推理技术的关注热度持续攀升,且在各个领域的有效应用为滚磨光整加工数据库的智能化应用提供了大量可借鉴的思路。

Brown D 等^[47]运用案例推理技术建立了胰岛素推量计算模型,通过引入时态序列和动态特征加权,增强了检索步骤,在模拟血糖控制方面表现出了显著的改善,并突出了 CBR 的应用潜力。Jiang Z 等^[48]提出针对再制造产品的工艺规划模型,采用粗糙集方法对案例特征进行降维,确定案例特征的权重,案例推理技术的应用在获得了明显的质量提升效果。DAN W 等^[49]利用模糊案例推理技术构建风格知识和特征库,用模糊最近邻算法来定义案例推理的相似性度量方法。实验结果表明,该方法对提取产品风格是可行和有效的。Khosravani M R^[50]针对注塑产品智能故障问题,提出了一种基于案例推理的检测模型,通过案例匹配和相似度确定。基于曾经发生过的类似故障,设置不同的特征权重,解决新的特殊问题。实验结果表明该系统的应用能够减少系统机器停机时间,加快运行速度。为更快速准确地进行手机故障诊断与分析, Mohammed M A 等^[51]遗传算法与案例推理技术相结合,利用现有故障诊断案例的经验和知识为新案例提供解决方案,测试结果表明,该方法能较好地检测多个移动电话故障,平均准确率可达 98.7%。Rintala L 等^[52]建立了冶金工艺流程图的优选模型,为后续的工艺设计提供了基于案例推理的有用信息和指导。Ahn J 等^[53]提出了基于案例推理的建筑成本估算模型,采用加权马氏距

离进行案例相似性度量,估算准确率得到了提升。王浩玮等^[54]针对旧工业区再生利用方案制定时,资料数据冗杂,分析困难的问题,提出了一种基于案例推理的旧工业区再生利用方案优选模型。通过实例分析,验证了优选模型的可行性及有效性。但对于部分特征属性缺失的案例,如何进行案例检索仍需深入探索。Sande-Meijide M^[55]运用案例推理技术建立了自动检测医疗相关感染的决策系统,用不同的机器学习技术从不同类型的数据中自动提取证据,并运用在西班牙国家卫生系统公立医院的病例中,证实其有效性。刘丕亮等^[56]采用案例推理技术,针对带式焙烧机球团质量无法实时在线监测控制的问题,提出了焙烧性能与球团质量间的指标关系,建立了预测模型。与多元回归分析结果对比,基于案例推理模型的球团质量预测结果具有更高的精度。徐照等^[57]建立了基于分组式损伤案例库的损伤案例推理流程,验证了针对案例信息的分组预处理后进行不同损伤案例相似度计算的方法,建筑物损伤多属性信息的分类问题得到有效解决。以上不同应用领域的案例推理方法的研究,为滚磨光整加工工艺优选过程的规则获取和模型构建提供了思路。

(2) 专家系统

专家系统被成功地应用于工业、农业、商业、医学等众多领域。Ricardo Carreño 等^[58]采用创新的神经网络作为推理模块,研究了物联网安装布局设计的专家系统,具有良好的应用价值。Hossain M S 等^[59]研究了用于急性冠状动脉综合征预测的置信专家系统,使用置信规则库和证据推理,获取不确定性知识并完成不确定性下的推理,取得了可靠的结果,并在决策制定中发挥重要的作用。Soltani A 等^[60]研究了一种用于青光眼早期诊断的新型青光眼模糊专家系统,通过图像技术进行数据采集与处理,在此基础上并采用模糊逻辑算法确定患者病情。实验结果表明,与其他现有系统相比,该系统具有良好的优越性。Irfan M 等^[61]研究了基于贝叶斯分类器的摩托车优选专家系统,该模型可以根据客户标准推荐合适的摩托车类型,为实际应用提供了指导。Chen X S 等^[62]针对球磨机磨削回路控制,研发了基于规则推理的智能专家系统来识别当前的矿石硬度,仿真结果和工业应用证明了该方法的有效性和实用性。Delgoshaei P 等^[63]基于规则推理建立专家系统模型,用于加热、通风和空调系统中故障检测和诊断的仿真与控制,具有良好的应用效果。Avdeenko T V 等^[64]从案例库存储的案例中提取知识,并用产生式规则的表示法表示,然后存储在规则库中,研究从知识的隐式表示转换为显示表示的问题,为专家系统的知识获取提供了条件。Zhang D 等^[65]采用模糊规则库技术和证据推理算法的新方法用于内陆水路运输系统的导航风险评估专家系统。通过应用模糊规则库技术将定量标准转换为定性标准,这使得证据推理能够从层次结构的底部到顶部合成风险评估。杨善林等^[66]基于案例和规则建立领域专家系统的知识库,使用框架和一阶概率逻辑表示贝叶斯网,应用于患病诊断模型,能够直接复用历史模型,从而提高建模的效率。Yang Y^[67]等将因子分析纳入规则推理,并开发了一个信念规则推理专家系统,用于预测消费者对

新产品的偏好。结果表明,信念规则推理专家系统原型具有较强的训练数据拟合能力和较高的测试数据预测精度,在新产品开发中具有很大的应用于消费者偏好预测的潜力。裴大茗等^[68]设计和开发了船体焊接工艺设计专家系统,将传统的船体焊接工艺知识归纳整理形成专家经验存储到知识库中,进而基于模糊逻辑建立焊接工艺规划流程,最终匹配专家经验获取相关的焊接工艺参数,验证了基于模糊规则推理的有效性和合理性。周鹏飞等^[69]通过智能化的专家系统来实现共享汽车的均衡调度,预测模型对车辆调度时间、地点进行预测,对降低企业运营成本和提高企业运营效率提供了帮助。于俊夫等^[70]针对遥感无人机故障的复杂度高、表现类型多等特点,提出基于BP神经网络的知识学习研究,构建有效的遥感无人机故障诊断专家系统知识库,为实际应用提供了基础。李先送等^[71]利用专家系统决策来控制选煤厂煤泥水处理过程中絮凝剂与凝聚剂的添加量,通过测定溢流浊度并对浊度进行灰色预测,经模糊控制器来反馈调节药剂添加量,具有良好的经济效益。陈智鹏^[72]提出一种基于遗传K均值聚类的机械加工故障趋势预测的专家系统模型,并对其应用性能进行了测试,能有效的进行故障数据处理。谢静等^[73]以闪速炼铜工艺为对象,开发了砷污染源动态解析专家系统,实现了砷污染源的动态诊断、流向预测与可视化,为铜等有色金属冶炼过程中产生的砷污染防治与管理提供了技术支撑。

专家系统在珩磨工艺、研磨工艺等光整加工领域中已经得到了广泛的应用。牛俊凯^[74]通过分析珩磨工艺参数之间的相互关系及其对加工效果的影响,建立了数控珩磨工艺专家系统,为工艺参数的合理选择提供了理论依据。董迎红等^[75]最低表面粗糙度要求,开发了研磨工艺专家系统,实现工艺参数选择,提高了加工精度,能满足生产过程中的表面质量要求。

以上学者基于专家系统较好地解决了各领域的需求问题,可以在实现滚磨光整加工工艺参数的优选的过程中借鉴。尽管关于专家推理过程与方法的研究仍然是专家系统研究的难点,但其依然是最适合当前滚磨光整加工工艺优选智能化、提高加工效率的推理方法之一。

1.3 课题来源及主要研究内容

1.3.1 课题来源

(1) 企业委托

1) 中国兵器工业廊坊市北方天宇机电技术有限公司(太原理工大学光整技术中试基地)。

2) 光整加工数据库平台搭建及工序模板设计研究,2016年,中国航发XX航空发动机有限责任公司。

（2）纵向项目

1）面向全产业链应用的滚磨光整加工工艺智能数据库平台关键技术研究，2019 年，山西省重点研发计划项目（No. 201903D121057）。

2）基于模糊聚类与案例推理的滚抛磨块性能评价及反馈制备策略研究，2017 年，山西省回国留学人员科研资助项目（No. 2017-032）。

3）基于粒/群聚类参数集的滚抛磨块评价模型构建及反馈制备策略研究，2018 年，山西省自然科学基金重点项目（No. 201801D111002）。

1.3.2 论文研究的主要内容

本文立足于推动滚磨光整加工行业**全产业链企业从生产型向服务型转型升级**，研发面向全产业链应用的滚磨光整加工数据库平台，并研究智能推理方法实现数据库的智能化应用。**将历史积累的工艺数据、成功案例采集到滚磨光整加工数据库**，并实现滚磨光整加工过程中加工参数数据长期、精确、便捷、及时、完备的采集；对工艺数据进行建模和分析，从大量数据信息中挖掘出光整加工过程中各相关参数间的关系，将实时数据与历史数据相结合，应用智能推理技术分析得到最优案例并提供给新的加工需求，作为确定加工方案的重要参考，建立有效的数据库模型，实现大规模、复杂光整加工参数查询的快速、准确响应。数据库平台的研究及其智能化应用研究，对专门研发机构，既可以宏观了解产业发展状况，更重要的是可以更好的聚焦研发突破点；设备生产企业、介质生产供应企业，既可以获知原产品优化要求，更重要的是可以进一步开发新产品；实际应用滚磨光整加工工艺的制造企业，既可以最大限度的使用优化工艺，更重要的是可以在原成套工艺基础上拓展出不同加工对象或不同加工要求的新工艺。从而实现全产业链相关企业“优质、高效、低耗”的共同目标。并通过数据库平台整合产业链资源，迅速响应用户个性化需求，从而完成大规模定制。协同开创全产业链的精益生产新模式。为此，论文研究的主要内容包括：

（1）滚磨光整加工数据库平台系统模型构建：根据当前数据库技术和智能推理技术的发展，结合滚磨光整加工技术的特点，进行工艺流程分析，构建数据库平台的信息资源集成模型；在此基础上分析成熟的图形化描述方法上，构建数据库建模方法体系。（第 2 章）

（2）滚磨光整加工数据库体系结构设计：根据滚磨光整加工数据库平台系统模型，确定以过程模型为核心的系统模型集成关系，基于滚磨光整加工全产业链信息和知识共建共享需求，建立数据库平台的体系结构。（第 2 章）

（3）工艺实例的案例化表征及案例库优化方法研究：以数据库为基础，对海量的实例数据进行剖析，提取加工工艺方案的有效特征信息，形成规范的工艺案例库；同时研究案例库的优化方法，提高案例检索的效率和准确性。（第 3 章）

(4) 分级递进的融合决策理论研究：研究基于智能化工艺方案优选的加权案例推理和模糊专家推理模型，实现两者结合的融合递进决策智能工艺优选模式。为新的零件加工要求优选包括设备、磨块、磨剂及加工参数等信息在内的加工工艺方案，并通过大量的测试案例仿真，实现滚磨光整加工工艺的快速、准确、合理决策。（第4章）

(5) 滚磨光整加工数据库的系统总体设计开发和工程应用：构建滚磨光整加工数据库的开发总体框架和功能结构，确定开发环境，完成系统程序开发与部署应用。针对产业链中滚抛磨块生产企业、化学剂生产企业、设备生产企业和应用企业的生产需求不尽相同，各个企业的生产环境与自动化程度不一的现实需求，进行典型企业的定制化需求开发与工程应用验证。（第5章）

图 1-12 为论文的主要研究内容框架。基于研究内容框架，图 1-13 为拟定并执行的研究技术路线。

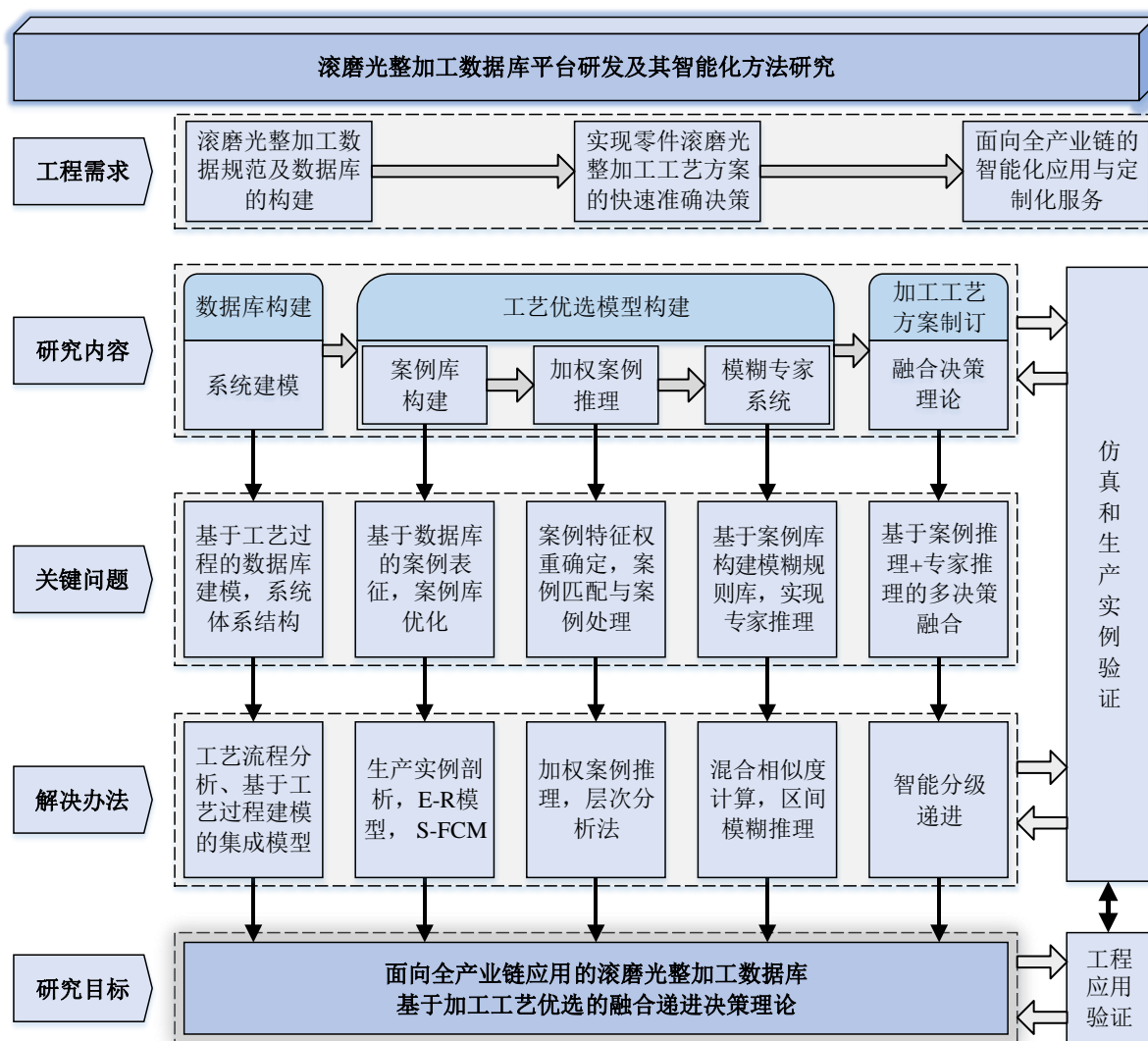


图 1-12 论文的主要研究内容框架

Figure 1-12 The main content framework of the paper

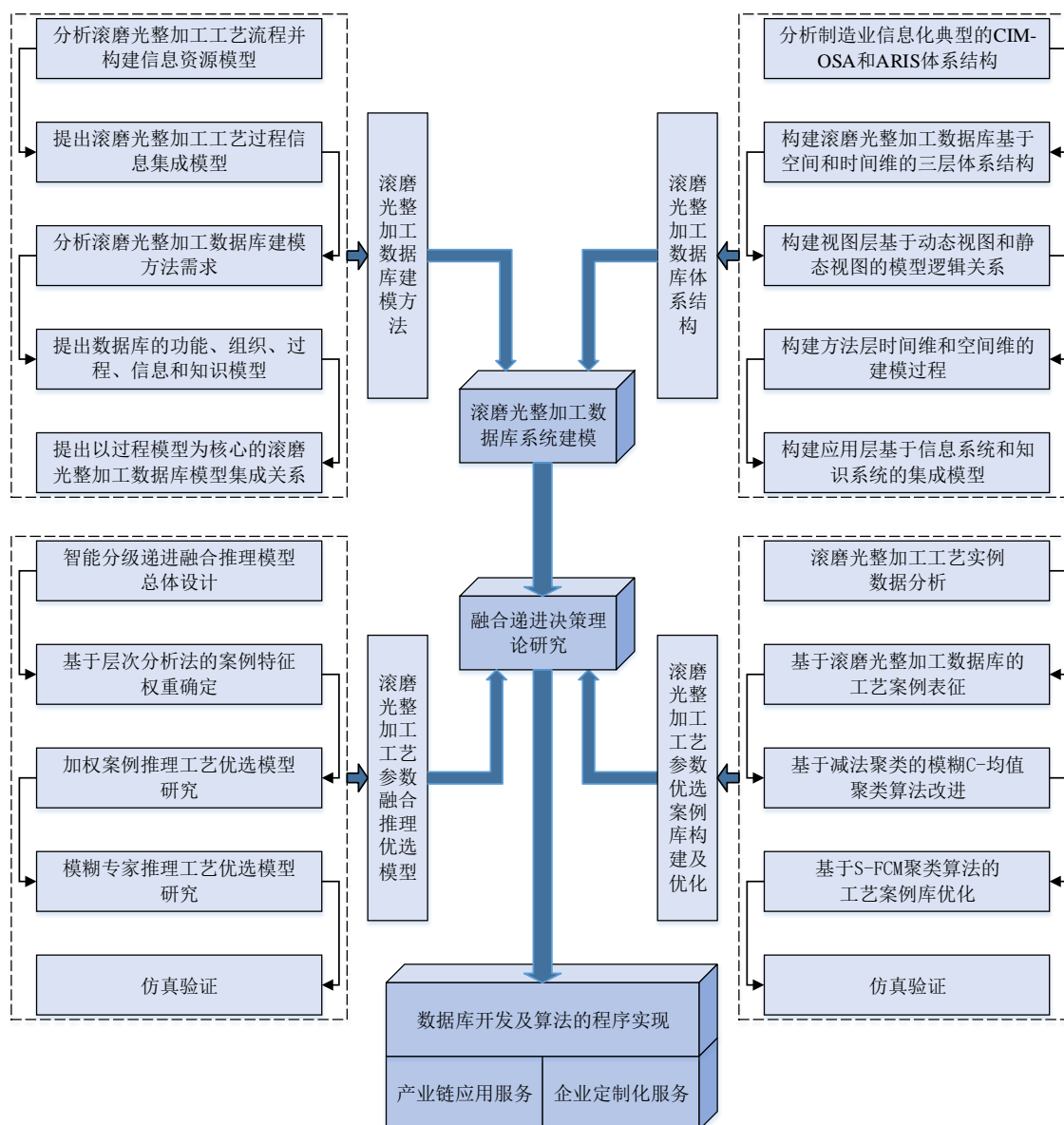


图 1-13 论文的研究技术路线

Figure 1-13 The main technical route of the paper