



凸轮轴智能高速磨削理论 及其关键技术

邓朝晖 张晓红 刘伟 万林林 © 著



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

凸轮轴智能高速磨削理论 及其关键技术

邓朝晖 张晓红 刘 伟 万林林 著



华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书以凸轮轴智能高速磨削理论及其关键技术为主线,汇集了作者多年来从事凸轮轴智能高速磨削加工技术的最新成就和经验,在国家科技支撑计划课题(2015BAF23B01)、国家 863 计划课题(2007AA04Z143、2014AA041504)、国家自然科学基金项目(5117516、51405158)、湖南省自然科学基金重点项目(12JJ2027)、教育部博士点基金项目(20110161110032)等课题、基金项目的支持下开展研究工作并参考国内外相关文献的基础上撰写而成。本书分析了磨削加工过程建模与工艺方案优选方法、误差分析和补偿技术及磨削工艺数据库的现状及发展趋势,修正并建立了凸轮轴数控磨削加工中的部分数学模型,建立了凸轮轴智能高速磨削系统整体框架结构,进行了磨削工艺智能优选模型的建立及实验验证、磨削工艺智能推理模块建模研究、磨削误差分析与智能补偿模型的建立及实验验证,并对凸轮轴智能高速磨削系统进行了软件实现与实验验证等。

本书可作为高等院校机械工程类、近机械类各专业的本科生与研究生教学用书和参考书,也可作为从事数控磨削加工、磨削工艺智能数据库及工艺软件等领域的工程技术人员和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

凸轮轴智能高速磨削理论及其关键技术/邓朝晖等著. —武汉:华中科技大学出版社,2018.7
ISBN 978-7-5680-3978-9

I. ①凸… II. ①邓… III. ①数控机床-凸轮轴-高速磨削 IV. ①TG580.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 168657 号

凸轮轴智能高速磨削理论及其关键技术

邓朝晖 张晓红 刘 伟 万林林 著

Tulunzhou Zhineng Gaosu Moxue Lilun ji Qi Guanjian Jishu

策划编辑:汪 富

责任编辑:吴 晗

封面设计:廖亚萍

责任监印:徐 露

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:10.75

字 数:272 千字

印 次:2018 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:58.00 元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

磨削加工是机械制造业重要的加工方法。大多数情况下,作为最终加工工序的磨削加工,直接决定着工件成品的质量。当前磨削加工所面临的共同问题就是严重依赖操作人员的经验,选择磨削加工工艺方案的方式仍以传统的“试切”法和“经验”法为主,加工效率低,加工柔性差。凸轮轴作为汽车、内燃机、国防等众多行业所需的关键零部件,其加工的精度、效率直接影响着发动机及相关产品的质量、寿命和节能标准。因此,本书旨在以凸轮轴数控磨削加工为研究对象,分析磨削加工过程建模与工艺方案优选方法、误差分析和补偿技术及磨削工艺数据库的现状与发展趋势,研究和开发出包括磨削工艺智能优选模块、磨削工艺智能推理模块、磨削误差分析与智能补偿模块、磨削自动数控编程模块四大模块及磨削工艺数据库系统的凸轮轴高速智能磨削系统。所做的研究工作主要如下。

第一,修正并建立了凸轮轴数控磨削加工中的部分数学模型。分析并比较不同磨削余量、砂轮半径对 X-C 轴联动坐标数学模型所引入误差的大小,分别建立了修正后的 X-C 轴联动坐标数学模型;建立了基于最小二乘法的凸轮升程转换通用数学模型。

第二,建立了凸轮轴高速智能磨削系统整体框架结构。分析了凸轮轴高速智能磨削系统的总体要求、系统设计的总体思路;确立了系统的运行框架及主要模块,即磨削工艺智能优选模块、磨削工艺智能推理模块和磨削误差分析与智能补偿模块;对凸轮轴磨削工艺数据库系统进行了功能建模,定义了数据库系统的总体结构及各子库模型架构。

第三,磨削工艺智能优选模型的建立及实验验证。采用粗糙集(rough set, RS)实现了凸轮轴数控磨削加工中特征属性的选取,并提出了一种新的 R^5 模型;采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)实现了特征属性主客观权重的计算,通过定义组合赋权法获得了特征属性的组合权重大小;建立了三级特征权重过滤级别的分层过滤机制;定义了数值型、模糊逻辑型、无关型和枚举型等四种特征属性局部相似度的计算模型,实现了实例整体相似度的计算;采用基于模糊综合评价模型的综合评价因子实现了实例的重用;以某型凸轮轴磨削加工为例验证了磨削工艺智能优选模型的正确性。

第四,磨削工艺智能推理模型的建立及实验验证。建立了集成基于规则推理方法和遗传神经网络算法的磨削工艺智能推理模型,可组合推理/映射出完整的磨削加工工艺方案。推理策略采用正反向混合推理、置信度和活性度综合排序的方式来进行冲突消解,并以路径跟踪法实现整个推理过程的解释说明。采用均匀设计实验方法安排凸轮轴数控磨削工艺实验,获得批量的训练样本;实现了基于 RS 理论在凸轮轴数控磨削加工中金刚石滚轮修整 CBN 砂轮领

域的规则自动挖掘。

第五,磨削误差分析与智能补偿模型的建立及实验验证。设计了一套基于 USB 总线的凸轮轮廓在位测量系统,并对该测量系统的去噪、滤波等信号处理电路进行了分析研究,同时讨论了影响测量系统可靠性和精度的多种干扰因素。最后通过与离线测量设备凸轮轮廓测量仪进行对比实验,验证了该测量系统的可靠性及精度。分析了凸轮升程与轮廓在磨削误差方面的变化趋势;建立了凸轮虚拟升程的构建模型及其最小二乘多项式拟合的光顺算法,建立了凸轮轴 X-C 轴联动磨削升程误差分析与补偿模型;利用误差补偿处理后的虚拟升程进行凸轮轴磨削加工实验,验证了模型的正确性。

第六,凸轮轴高速磨削自动数控编程技术的实现。确立及实现了凸轮轴磨削自动数控加工编程框架体系方案,提出了凸轮轴磨削自动数控加工编程技术框架,对砂轮走刀轨迹规划和自动计算进行了理论研究,提出了轨迹自动规划与计算方案,讨论了基于砂轮走刀轨迹的机床各运动轴的运动解析原理,并建立了机床运动的通用解析模型,依据该模型实现了机床运动仿真的数据驱动,最终依据运动驱动数据生成了数控加工程序。

第七,对凸轮轴高速智能磨削系统进行了软件实现与实验验证。针对磨削工艺智能优选模块、磨削工艺智能推理模块和磨削误差分析与智能补偿模块等进行了相应的程序设计和软件界面开发,以 SINUMERIK 840D 数控系统为例说明了嵌入数控系统版运行模式的实现过程,实现了各功能模块的总体集成;以某型凸轮轴磨削加工为例验证了凸轮轴高速智能磨削系统的合理性和有效性。

本书由湖南科技大学邓朝晖,湖南理工学院张晓红,湖南科技大学刘伟、万林林等著。本书的研究工作得到了国家科技支撑计划课题(2015BAF23B01)、国家 863 计划课题(2007AA04Z143、2014AA041504)、国家自然科学基金项目(5117516、51405158)、湖南省自然科学基金重点项目(12JJ2027)、教育部博士点基金项目(20110161110032)等课题、基金项目资助。特此向支持和关心本书涉及的研究工作的所有单位和个人表示衷心的感谢。感谢曹德芳博士和杨寿智博士对本书给予的贡献。

由于著者的水平和时间有限,书中难免存在疏漏和不当之处,恳切希望读者对本书中存在的不足之处给予批评指正,不胜感激。

著 者

2018 年 1 月

符号列表

a_p	砂轮设定切深
a_{eq}	当量磨削厚度
v_w	工件进给速度
v_s	砂轮线速度
r_j	凸轮基圆半径
r_g	凸轮滚子测头半径
r_s	砂轮半径
S_x	砂轮中心到凸轮中心的距离
θ	滚子挺杆中心转角
β	磨削点转角
ω_j	基圆转动角速度
h_g	滚子测头挺杆对应升程
h_j	尖顶测头挺杆对应升程
h_p	平底测头挺杆对应升程
α_g	滚子测头挺杆对应凸轮转角
α_j	尖顶测头挺杆对应凸轮转角
α_p	平底测头挺杆对应凸轮转角
r_c	升程转换测头半径
A_r	总磨削余量
A_{r1}	粗磨加工阶段磨削余量
A_{r2}	精磨加工阶段磨削余量
A_{r3}	光磨加工阶段磨削余量
$W_D(a)$	特征属性的重要度
$\text{card}(X)$	集合 X 的基
ω_{oa}	特征属性的客观权重
ω_{sa}	特征属性的主观权重
ω_a	特征属性的组合权重
a	层次分析法的加权系数
ω'_a	归一化后的权重值
Sim	特征属性的局部相似度
M	模糊逻辑型特征属性取值的最大差值
ψ	比例分配因子
r	综合评价因子
$ X $	实例前件所包含的特征个数

$ Y $	新实例前件所包含的特征个数
ϵ	实例置信度大小
m_{el}	最大升程误差实测值
m'_{el}	最大升程误差理论要求值
m_{ae}	最大相邻误差实测值
m'_{ae}	最大相邻误差理论要求值
Ra	表面粗糙度实测值
Ra'	表面粗糙度理论要求值
s_0	交叠判别参数门限值
s	均匀设计实验方法试验因素
q	均匀设计实验方法试验水平
n	隐层节点数
n_i	输入层节点数
n_o	输出层节点数
α	预测误差补偿系数

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 凸轮轴磨削加工技术概述	(4)
1.3 磨削加工过程的建模与专家系统智能建模	(6)
1.4 误差分析和补偿技术现状与发展趋势	(11)
1.5 磨削工艺数据库的现状、存在问题及发展方向	(13)
1.6 磨削数控加工编程技术现状及发展	(15)
参考文献	(16)
第 2 章 凸轮轴数控磨削加工数学模型	(18)
2.1 凸轮轴数控磨削加工的工艺特点	(18)
2.2 磨削加工时 X-C 轴联动坐标数学模型	(21)
2.3 凸轮轴恒线速度磨削加工	(30)
2.4 升程转换通用数学模型研究	(33)
参考文献	(36)
第 3 章 凸轮轴高速智能磨削系统的建立	(38)
3.1 凸轮轴高速智能磨削系统的总体要求	(38)
3.2 凸轮轴高速智能磨削系统的体系结构	(39)
3.3 凸轮轴磨削工艺数据库的建立	(44)
参考文献	(55)
第 4 章 磨削工艺智能优选模块建模研究	(57)
4.1 磨削工艺智能优选模块框架	(57)
4.2 基于 RS 理论的特征选取与权重计算	(60)
4.3 组合赋权法与分层过滤机制的建立	(63)
4.4 实例的检索、重用、修改及回收	(65)
4.5 磨削工艺智能优选模块示例运行	(71)
参考文献	(77)
第 5 章 磨削工艺智能推理模块建模研究	(79)
5.1 磨削工艺智能推理模块框架	(79)
5.2 基于规则的工艺智能推理	(80)
5.3 基于 GA-BP 算法的工艺智能推理	(86)
参考文献	(96)

第 6 章 磨削误差分析与智能补偿模块建模研究	(98)
6.1 磨削误差分析与智能补偿模块框架	(98)
6.2 基于 USB 总线的凸轮轮廓在位测量系统设计	(99)
6.3 凸轮轴高速数控磨削轮廓误差分析	(104)
6.4 凸轮轴高速数控磨削误差补偿	(110)
6.5 凸轮轴高速数控磨削误差补偿实验研究	(113)
参考文献	(115)
第 7 章 凸轮轴高速磨削自动数控编程技术	(117)
7.1 凸轮轴磨削智能数控加工编程技术框架	(117)
7.2 智能数控编程技术	(118)
7.3 刀具轨迹规划	(120)
7.4 砂轮进给速度优化与调节	(124)
7.5 基于砂轮走刀轨迹的机床轴运动解析	(130)
参考文献	(133)
第 8 章 凸轮轴高速智能磨削系统软件与实验验证	(135)
8.1 软件程序设计及流程	(135)
8.2 软件运行模式	(145)
8.3 软件界面	(148)
8.4 系统实验验证	(157)
参考文献	(161)

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

制造业是一个国家工业发展的基础与核心,也是一个国家工业化水平和国际竞争力的重要体现。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,将推进制造业信息化确定为先进制造领域的三大发展思路之一。

近年来,在工业领域与信息技术领域都发生了深刻的变革。在工业领域的变革主要包括智能机床、工业机器人、3D 打印等技术的出现与应用,而在信息技术领域的变革主要包括大数据、云计算、社交网络、移动互联等技术的出现与应用。这些变革带来了制造业的新一轮革命,特别是作为信息化与工业化高度融合产物的智能制造得到长足发展。无论是在微观层面,还是宏观层面,智能制造技术都能给制造企业带来切实的好处。

20 世纪 60 年代后,由于市场经济的冲击和信息革命的推动,作为世界财富主要来源的制造业经历一场重大的变革。从市场竞争来看,企业面临的是一个变化越来越快的市场和竞争越来越激烈的环境,社会对产品的需求正从大批量产品转向多品种、小批量甚至单件产品上。企业要在这样的市场环境中立于不败之地,必须对自身不断进行改造以适应变化了的市场。20 世纪 50 年代诞生的数控技术,以及随后诞生的机器人技术、柔性制造技术、计算机集成制造技术、CAD/CAPP/CAM 技术和现代生产管理技术,正是为了适应以上市场变化后的新型制造技术和新型制造系统。柔性制造和计算机集成制造开了数字化技术用于制造活动的先河,加速了制造技术与信息技术的融合,从此,信息和数据成为制造技术发展的重要驱动力之一,推动了数字制造技术的发展。20 世纪 80 年代,人工智能技术引入到制造领域,对于制造业来说无疑是一场革命性的变革,导致一种新型的制造模式——智能制造(IM)的诞生。

智能制造技术是现代制造技术、人工智能技术与计算机科学发展的必然结果,也是三者结合的产物。人工智能技术和计算机技术是推动智能制造技术形成与发展的重要因素。

近年来由发达国家倡导的面向 21 世纪的“智能制造系统”、“信息高速公路”等国际研究计划,是国际间进行高科技研究开发的重点和占领 21 世纪高科技制高点的象征。目前,世界各国竞相大力发展智能制造,其主要原因如下。

1. 实体经济的战略意义再次凸显是直接原因

2008 年国际金融危机以来,世界经济竞争格局发生了深刻变化。一方面,实体经济的战略意义再次凸显,美国、德国、日本、英国等世界主要发达国家纷纷实施以重振制造业为核心的“再工业化”战略。另一方面,发达国家以信息网络技术、数字化制造技术应用为重点,力图依靠科技创新,抢占国际产业竞争的制高点、谋求未来发展的主动权。

2. 企业提高核心竞争能力的要求是内在动力

多样化的市场需求和激烈的全球化竞争,迫切需要企业迅速、高效制造新产品、动态响应

市场需求以及实时优化供应链网络。通过信息技术与智能技术的发展从根本上改变制造企业的生产运营模式,实现从产品设计、工艺规划、加工装配、检测监测、质量保证、生产执行到销售服务、报废回收等全生命周期的高效运行,以最小的资源消耗获取最高的生产效率和最好的经济效益。

3. 新一代信息技术的高速发展是技术基础

传感技术、智能技术、机器人技术、数字制造技术的发展,特别是新一代信息和网络技术的快速发展,同时加上新能源、新材料、生物技术、现代管理技术等方面的突破,为智能制造提供了良好的技术基础和发展环境。

4. 制造智能化是历史发展的必然趋势

工业发达国家已走过了机械化、电气化、数字化三个发展历史阶段,具备了向智能制造阶段转型的条件。未来的制造系统必然是以高度的集成化和智能化为特征的智能化制造系统,并以部分取代制造中人的脑力劳动为目标,即在整个制造过程中通过计算机将人的智能活动与智能机器有机融合,以便有效地推广专家的经验知识,从而实现制造过程的最优化、自动化、智能化。发展智能制造不仅是为了提高产品质量和生产效率及降低成本,而且也是为了提高快速响应市场变化的能力,以期在未来国际竞争中求得生存和发展。

改革开放 30 多年来,中国制造业取得了伟大的历史性成就,走出了一条中国特色工业化发展道路,已经具备了建设制造强国的基础和条件:①我国制造业拥有巨大市场,需求是最强大的发展动力;②我国制造业有着世界上最为门类齐全、独立完整的体系,具备强大的产业基础;③我国一直坚持信息化与工业化融合发展,在制造业数字化、网络化、智能化方面掌握了核心技术,具有强大的技术基础;④我国在制造业人才队伍建设方面已经形成了独特的人力资源优势;⑤我国制造业在自主创新方面成就辉煌,上天、入地、下海、高铁、输电、发电、国防装备等都显示出我国制造业巨大的创新力量。

但是,我国制造业大而不强,存在着突出的问题和巨大的困难:①自主创新能力不强,核心技术受制于人,关键技术对外依存度高;②产品质量问题突出;③资源利用效率低;④产业结构调整刻不容缓,战略性新兴产业弱,传统产业亟待升级换代,服务型制造业刚刚起步,产业集聚和集群发展水平低,总体处于世界制造产业链的中低端。

国际金融危机爆发后,世界制造业分工格局面临新的调整,我国制造业面临重大挑战,且挑战越来越严峻。从内部因素看,我国经济发展已由较长时期的高速增长进入中高速增长阶段,前一时期非常成功的经济发展方式已不可持续,转变经济发展方式已刻不容缓,对制造业创新驱动、转型升级提出了紧迫的要求。从外部因素看,一方面,欧美发达国家推行“再工业化”战略,谋求在技术、产业方面继续领先优势,抢占制造业高端,进一步拉大与我国的距离。另一方面,印度、越南等发展中国家则以更低的劳动力成本承接劳动密集型产业的转移,抢占制造业的中低端。我国制造业正面临来自西方发达国家和发展中国家“前后夹击”的双重挑战。

与此同时,我国制造业面临世界范围内新一轮工业革命的历史性机遇。紧紧抓住新一轮科技革命和产业变革与我国加快转变经济发展方式历史性交汇的重大机遇,将大大加快我国工业化和建设制造强国的进程。

在此背景下,2015 年国务院印发《中国制造 2025》,部署全面推进实施制造强国战略,根据规划,通过“三步走”实现制造强国的战略目标,其中第一步,即到 2025 年迈入制造强国行列。我国从制造大国迈向制造强国过程中,制造业面临 5 个转变:产品从跟踪向自主创新转变;从

传统模式向数字化、网络化、智能化的转变;从粗放型向质量效益型转变;从高污染、高能耗向绿色制造转变;从生产型向“生产+服务”型转变。在这些转变过程中,智能制造是重要手段。“中国制造 2025”要以创新驱动发展为主要动力,以信息化与工业化深度融合为主线,以推进智能制造为主攻方向。智能制造——制造业数字化、网络化、智能化是新一轮工业革命的核心技术,应该作为“中国制造 2025”的制高点、突破口和主攻方向。

而磨削加工是机械制造业重要的加工方法,大多数情况下,作为最终加工工序的磨削加工,直接决定着工件成品的质量。随着现代制造技术的不断发展,磨削加工的应用范围日益扩大,对磨削加工的精度要求也越来越高。当前磨削加工所面临的共同问题就是严重依赖操作人员的经验,选择磨削加工工艺方案的方式仍以传统的“试切”法和“经验”法为主,加工效率低,加工柔性差。磨削加工的成形机理复杂、影响加工的因素众多和加工参数在线检测困难,这些特点使得磨削加工过程的工艺方案优选、加工误差消减等问题成为制造企业的难题。目前磨削加工成本在工业化国家加工操作总支出的比重已经提高到 20%~30%。

如何实现磨削加工质量的整体提升,实现磨削加工经济效益的最大化及磨床加工能力的最大利用,即在保证最佳工件质量的前提下实现磨削加工效率的最大化、磨削加工成本的最小化是亟待解决的问题。

凸轮轴作为汽车、内燃机、国防等众多行业所需的关键零部件,其加工的精度、效率直接影响着发动机及相关产品的质量、寿命和节能标准。基于凸轮轴具有形状复杂、刚度较低、加工要求高等特点,磨削加工已成为凸轮轮廓形成的主要加工方法。凸轮的表面为非圆表面,传统加工方法是采用靠模仿形加工方法。靠模仿形加工凸轮轴过程简单,易于控制,但加工精度受制于靠模精度。靠模磨损后,该加工方法就无法满足凸轮轴加工要求。特别是,在凸轮轴轮廓形状发生改变时,须根据凸轮轮廓数据制作新的靠模。全新靠模的制作、安装及调试进一步降低了加工效率。

两轴联动的数控磨削加工凸轮轮廓依靠砂轮架移动(X轴)和头架主轴转动(C轴)耦合运动而成,能显著提高凸轮轴的加工效率和加工精度。基于数控磨削的优点及相关行业对凸轮轴精度、效率和加工柔性更高的要求,X-C轴耦合联动加工取代靠模仿形加工是必然的趋势。但采用数控技术进行凸轮轴磨削存在较多的技术难题,其中尤为重要的是如何实现合理成熟的凸轮轴磨削工艺方案选择优化、凸轮轴加工误差的消减、加工精度和加工效率的进一步提高等问题。截至目前,凸轮轴数控磨削技术人员和操作人员尚无可靠的凸轮轴数控磨削数据以供查询,仅依赖不断试加工积累的经验很难保证凸轮轴的加工精度。而另一方面,凸轮轴磨削制造企业在实际生产中结合砂轮、工件、机床与企业自身的实际加工特性,积累了一定的凸轮轴磨削加工实例和知识。但缺乏基于信息化的共享软件平台,使得这些存于部分操作人员头脑中的知识和经验无法充分利用、扩展,甚至由于丰富经验人员的流失而对企业的生产、加工及创新造成较大的影响。如何把工程技术人员的丰富经验及专业知识进行归纳总结并形成规范,实现“知识的重用和自动增长”,是企业迫切需要解决的问题。

建立一个针对凸轮轴数控磨削整体加工过程及企业具体情况的平台,可实现凸轮轴数控磨削工艺方案的智能优选、智能推理及误差智能消减,系统性的专家系统平台的建立和应用可使磨削技术人员在较短的时间内获得较佳的凸轮轴磨削工艺方案,为凸轮轴磨削加工技术的合理应用起到正确的指导作用,避免凸轮轴加工过程中磨削烧伤等现象的发生,满足各凸

轮轴加工单位的需要。

1.2 凸轮轴磨削加工技术概述

传统的凸轮轴磨削加工是采用普通砂轮在靠模仿形磨床上完成的。而靠模具有制造精度难以保证、容易磨损、柔性差等特点,同时普通砂轮耐用度和使用寿命低,需要频繁更换和修整,加工辅助时间和劳动强度大幅增加,影响生产效率。不同砂轮之间的质量波动也对凸轮轴磨削加工工艺系统的稳定性产生影响。国内外基于数控技术和磨削加工技术的最新成果,对凸轮轴磨削加工的新工艺、新方法和新设备均进行了大量的研究。其中需要特别提及的是将数控技术和 CBN 或金刚石磨料结合起来,形成全新的高速/超高速、高效凸轮轴数控磨削加工方法。

超高速凸轮轴磨削是在超高速外圆磨削的基础上扩展应用而来的,砂轮线速度达到 150 m/s,采用金刚石或 CBN 砂轮借助高性能的 CNC 系统和高精度微进给机构。日本丰田工机株式会社已将其成功用于汽车发动机凸轮轴产品的加工中。研发的 GCH63B 型 CNC 超高速磨床磨削加工余量达 5 mm 的球磨铸铁凸轮轴时,金属磨除率能达到 $174 \text{ mm}^3/\text{s}$,磨削比为 33 500。砂轮一次修整可连续加工 60 个工件,可从毛坯直接磨为成品,实现了以磨代车。德国 Guhring Automation 公司研发的 RB625 超高速磨床,配备有 CBN 砂轮,每分钟磨除的金属可达 2 kg。德国 JUNKER 公司在 1999 年中国数控机床展览会(CCMT1999)中展示了多种凸轮轴磨床,该凸轮轴磨床配备外圆直径为 400~500 mm 的 CBN 砂轮,磨削线速度已可达 140 m/s。在 2000 年中国数控机床展览会(CCMT2000)上,湖大海捷工程技术研究有限公司展出了最高线速度达 120 m/s 的数控凸轮轴磨床。

考虑到传统磨削方式砂轮与工件为线接触,工件冷却效果不佳,德国 Junker 公司开发出快速点磨削方法。快速点磨削方法与超硬磨料、超高速磨削加工方法结合后,已迅速应用于凸轮轴磨削加工领域。砂轮线速可达 160 m/s,砂轮寿命可长达一年,单次修整后可加工 2000 个零件。同时由于加工过程中砂轮与工件接触状态为点接触,磨削力小,冷却效果佳,避免了磨削烧伤的产生。一汽大众汽车有限公司采用金属结合剂 CBN 超薄砂轮快速点磨削技术加工发动机凸轮轴,砂轮转速为 4300 r/min,砂轮修整一次可磨削 3000 件。实现了以磨代车,一次装夹可磨削凸轮型面、主轴轴颈、两端轴颈、止推轴颈侧肩面和凸轮调整座面外径,尺寸精度达到 IT6, $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$,周期时间 150 s。

传统的凸轮轴磨削加工,工件以恒角速度转动,砂轮架耦合跟随进行磨削。而恒角速度磨削由于凸轮轮廓每单位角度对应的表面弧长不同,在磨削深度相同的情况下,金属去除率不同,特别是在升程段与降程段均存在一“敏感点”,敏感点附近由于金属去除率发生较大改变而导致磨削力发生急剧的变化。而工件恒线速度磨削,需要在升程段每个磨削点处都改变速度,容易导致各个联动轴的加速度过大,如果机械系统和伺服系统的响应不能达到要求,反而会使工件的加工精度下降,导致实现真正意义上的恒线速在现阶段来看是很困难的。

众多学者在凸轮轴磨削加工恒线速度或恒磨除率方面进行了深入的研究,建立了较为完整的数学模型。韩秋实等研究了恒磨除率控制条件下凸轮轮廓磨削加工的工件转动规律,并以 PC 为控制装置开发了基于数控凸轮轴磨床的数控系统和软件。Chen G 等建立了基于切

点跟踪磨削法的凸轮轴磨削数学模型,为了解决伺服控制系统的跟踪滞后特别是在砂轮架进给速度突变情况下的不利影响,对部分工艺参数进行了优化,实验结果表明,优化工艺参数后凸轮的最大升程误差从 0.035 mm 降为 0.015 mm。贾振元等以凸轮矢角为参变量,推导出了在凸轮轮廓型线上任意磨削点对应的角速度,并依次建立了基圆、顶圆、切线、过渡圆部分的分段型线极坐标方程。除此以外,王淑君、杨占玺、李勇及钟建琳等均对恒磨除率凸轮轴磨削加工方法进行了数学模型分析。王淑君、钟建琳等建立了基于磨削加工弧长变化的恒磨除率凸轮轴变速规律;杨占玺则对该变速规律在基于 PMAC 的数控凸轮轴磨床实验装置上予以了验证;李勇优化了凸轮轴数控磨床伺服系统的输入曲线,降低了磨削点的线速度波动。张迎春等针对摇架式凸轮磨床在磨削凸轮时存在颤振问题,提出了以瞬时磨削力基本恒定为依据,建立了凸轮变速转动的规律。湖南大学章振华等提出了当量磨削厚度误差补偿技术,确保凸轮轴磨削加工过程中任意时刻的当量磨削厚度相等,从而实现恒金属磨除率磨削。上述研究成果以磨除率恒定、线速度恒定、磨削力恒定等推导的数学模型,在实际加工中直接使用是很难实现的,甚至会出现严重烧伤的情况。

凸轮轴磨削加工过程中目前广泛应用的方法为近似恒线速磨削加工方法。即在恒线速(或恒磨除率)磨削加工数学模型基础上,对工件的变速转动规律予以适当修正,保证磨削加工过程中磨削力变动尽可能小,砂轮架伺服轴的加速度尽可能平稳。国内众多凸轮轴磨削加工企业,工件变速转动表一般均采用手动经验试凑的方法。然而在保证基圆转速满足的前提下,该方法很难避免砂轮架加速度突变点的出现。国家高效磨削工程技术研究中心在分析凸轮轴磨削加工工艺特点的基础上,提出了“四点恒线速”工件变速转动技术,即保证凸轮机圆、顶圆和两侧敏感点共四处的速度接近于恒线速磨削时加工速度,各点之间转速实现较为均匀的过渡变化。孙志勇等提出的在凸轮轮廓上选取的 8 个角点处改变速度来实现恒线速与“四点恒线速”法相类似。相比而言,国外凸轮轴数控磨床已配备了相应的软件平台,能够自动根据凸轮升程表数据、基圆转速获得兼顾加工效率和加工精度的工件变速旋转曲线,并同步显示凸轮不同轮廓点处砂轮架、头架的速度、加速度和加速度变化率的曲线。但国外软件平台的价格非常昂贵,动辄数十万欧元,导致国内凸轮轴磨削加工企业无力承受。即使耗费巨资引进高精度凸轮轴数控磨床,也长期处于低效率加工状态,无法真正发挥其优势。因此,如何实现凸轮轴磨削加工过程中工件变速转动曲线的自动优化与应用具有非常重要的现实意义。

此外,部分学者针对凸轮轴磨削加工机理及加工现象进行了广泛研究。华中科技大学针对凸轮轴同时进行横磨和纵磨往复运动时凸轮轮廓表面留下往复振荡的痕迹及出现磨削力波动较大等现象也进行了分析与仿真,并找到了消除这种现象的途径和方法;黄文生等采用直线光栅测量仪对靠模凸轮轮廓进行测量,测量数据的误差可精确到 $1\text{ }\mu\text{m}$,每 0.075° 对应一组升程数据。采用三次样条算法对升程的离散数据进行拟合与插值,避免了因升程变化剧烈导致磨削加工时产生接刀痕的现象。同时对测量数据进行二维模拟显示,并生成相应的加工程序。

针对凸轮磨削加工过程中存在的发热量大、工件热变形大、工件表面容易发生磨削烧伤等问题,陈荣莲等以船用柴油机重型凸轮为例,建立了凸轮磨削的热传导数学模型。利用 ANSYS 软件对凸轮磨削加工的温度分布进行了仿真,并同红外热像仪在线拍摄的温度场予以对比。但由于研究过程中假定材料属性与温度变化无关、不考虑磨削过程中材料相变的影响,导致仿真结果与实验加工结果存在较大误差。谢卫其等分析了凸轮磨削中磨削液和空气换热所

带走热量占总磨削热量的比重大小,得出磨削液和空气换热所占比重仅为 15.35% 和 1.7324%。基于此,提出了采用低温气动喷雾射流冲击冷却技术及增强空气对流换热效果等措施,避免凸轮磨削加工中磨削烧伤。

总的来讲,我国部分汽车制造企业目前已经引进了高速凸轮轴数控磨削装备用于汽车发动机凸轮轴、曲轴类零件的加工,取得了较为显著的经济效益。但由于仅针对单一特定零件进行应用,设备和工艺均由国外生产企业垄断,实际加工中操作人员完全依照设定好的操作工序和工艺方案进行,其余加工操作均由 CNC 控制自动完成,甚至砂轮修整也依赖于程序中设定的修整参数进行,无法同凸轮轴毛坯件的实际特性、砂轮特性进行正确匹配。由于没有掌握凸轮轴磨削加工的核心技术,也无法进行工艺方案的优化与加工精度的提升,制约了企业生产效率和加工精度的提升。

1.3 磨削加工过程的建模与专家系统智能建模

1.3.1 磨削加工过程的建模

磨削加工过程的复杂性主要表现为:①磨削加工过程中参与材料去除的磨粒数量众多,几何形状不规则,于砂轮表面呈随机分布状态。②极高的磨削加工速度及磨削区温度对工件材料的特性产生很大的影响,且各个因素之间具有复杂的非线性耦合关系。特别是磨削液的注入,类似于对工件进行淬火热处理,将磨削加工过程中各种物理、力学现象的产生机理进一步复杂化。一直以来众多学者通过理论分析、磨削实验、模拟与仿真等方法致力于磨削加工过程的模型建立,借此或揭示磨削过程各种现象的本质,或获取合理的磨削用量,实现对磨削加工技术的准确应用。

采用分析方法建立数学模型来分析磨削加工过程,国内外学者已取得了不少研究成果。主要集中于砂轮表面形貌数学模型、磨削力数学模型、磨削温度数学模型和表面质量数学模型的建立。R. L. Hecker 等将磨粒简化为一个理想的圆锥,并推导了相应的表面粗糙度数学模型。G. Warnecke 等将磨粒视为一个多面体,对砂轮和工件的宏观和微观几何模型加以合成。王秋燕等建立磨粒相对工件的空间螺旋线切削运动模型,进而给出超声振动螺旋磨削加工表面生成模型,模拟出普通磨削和超声振动磨削的三维表面微观形貌。W. L. Cooper 等采用平顶圆锥形对磨粒几何形状加以表征。Y. D. Gong 等将磨粒形状简化为球体。较普遍的是将磨粒简化为尖端圆球底部圆锥的形式。从磨粒的切削刃角度考虑,多面体、尖端圆球底部圆锥形切削刃多,锋利性较好,而平顶圆锥形更接近于磨粒尖端磨平后的状态。D. A. Doman 等概述了砂轮地貌模型从一维到三维的发展过程,并在此基础上提出了考虑修整过程的砂轮地貌模型。但目前已有的几何模型均无法完整逼真地反映砂轮磨粒的实际几何形状。这也决定了假定磨粒在砂轮上呈随机分布状态而建立的砂轮几何形貌模型与实际形貌有较大差距。

由于评判磨削加工过程的重要指标主要为磨削力和磨削温度,国内外学者对磨削力和磨削温度采用分析方法进行了大量的研究工作。Werner 等在研究磨粒几何分布、磨削过程运动学的基础上建立了基于磨削区单位接触弧长的磨削力数学模型。Malkin 等建立了切削力和摩擦力两部分构成的磨削力数学模型。湖南大学李力钧等也对 Werner 建立的磨削力数学模

型进行了重新建构。但磨削加工过程应变率比切削过程的应变率高一个数量级以上,呈现出尺寸效应,动态力学性能极为复杂。J. Tang 等在考虑了磨削工艺参数对加工工件动态磨除性能的影响和砂轮与工件之间摩擦因数的基础上,推导了一种新的平面磨削磨削力模型。王颖淑等依据解析原理建立了外圆纵向磨削磨削力模型。已有的磨削力模型是通过定义摩擦系数来计算磨削力的大小,但实际加工过程中摩擦因数由于材料特性、工艺参数的改变而变动。以上所述的磨削力数学模型均是在简化条件的前提下推导而来的,使其无法准确应用于实际加工生产中。

W. B. Rowe 将磨削热四种传热方式加以结合,建立了基于磨粒离散接触的磨削热计算模型。C. Guo 等将磨粒、砂轮、工件、冷却液之间的相互关系及影响予以综合考虑,建立了热量分配模型。赵恒华等在对比直线倾斜平面模型基础上提出了一种圆弧热源高效深磨磨削热模型。D. Anderson 等模拟验证了干磨削状态下的浅磨削热模型和深磨削热模型的可靠性。

除此以外,诸多学者对磨削加工中的比磨削能、表面粗糙度及表面残余应力等均采用分析方法建立了相应的数学模型。如 S. Ghosh 等通过分析磨削过程中功率的主要组成,构建了单层金刚石砂轮高效深磨磨削轴承钢时的比磨削能模型;S. Agarwal 等建立了精度较高的陶瓷磨削表面粗糙度数学模型;东北大学修世超等在考虑了磨削加工表面塑性隆起对轮廓最大谷底高度影响的基础上,提出了修正后的磨削表面粗糙度数学模型。

尽管能够采用已经得到的分析数学模型计算出某个特定磨削环境下的磨削力、比磨削能、磨削表面粗糙度、磨削区最大温度等具体数值,但是由于数学模型的建立一般都对磨削过程进行了假设和简化,而实际加工过程中磨削加工参数之间相互影响且磨削加工过程中磨粒的形状、大小和实际参与磨削的磨粒数都是时时变动的,导致磨削力、比磨削能、表面粗糙度、磨削区最大温度等实际测量数值与计算数值存在较大的误差。由此推演得到的磨削加工用量很难使得磨削加工过程实现优化。

采用分析方法建立的数学模型精度不高,所以,采用经验方法建立数学模型,即建立经验公式的方法也是磨削领域一直关注的方法。建立经验公式的方法主要是采用试验设计方法获得大量实验数据,根据回归分析法或灰色预测法等数学方法归纳获得数学模型。目前在磨削加工实际生产中,仍旧以建立经验公式法为主。Marlason、Norton 等公司基于批量的磨削力实验,建立了磨削条件的幂指数函数形式的经验公式;E. C. Johnson 等采用回归分析建立了基于端面磨削铸铁和铝合金 319 的磨削力经验模型,并对应每种材料推导了三个方向的磨削力分力模型;M. Vashista 等将回归分析引入到普通氧化铝砂轮磨削加工 AISI 1060 结构钢时表面完整性的分析中,建立了加工过程中巴克豪森效应噪声参数与表面残余应力之间的经验数学模型;郭黎滨等构建了水下金刚石绳锯柔性、断续磨削过程中工艺参数与磨削力的多元线性回归方程。由于经验数学模型的建立需要大量的实验数据,实验设计方法(DOE)如因子设计和 Taguchi 实验设计方法得到了较广泛的应用,N. Alagumurthi 等分别采用上述两种试验方法优化磨削工艺参数,并对各个试验方案根据对应的磨削加工结果和磨削加工时间加以对比。

经验数学模型在其参数变化范围内计算精度较高,但其应用范围小,当磨削环境发生较大变化时,计算误差增大。由于能获得高表面质量的先进磨削工艺的种类越来越多,同时工程中也需要根据工件表面质量要求合理选择砂轮特性及磨削工艺参数,以保证磨削质量和经济性,因此单独的经验数学模型方法不完全适应磨削加工技术的发展。同时仅研究磨削力、磨削温

度等单个物理量对磨削加工结果的影响误差较大。计算机数值仿真技术由于具有再现磨削加工过程,不受实验环境限制等特点,而成为磨削加工过程机理研究的一种重要手段。计算机数值仿真技术主要包括分子动力学仿真和有限元仿真等方法。

R. Rentsch 等对磨削过程进行了分子动力学仿真,结果表明磨削过程磨屑的堆积现象十分明显。林滨和赵恒华等进行了纳米磨削过程中加工表面形成与材料去除机理的分子动力学仿真;郭晓光等建立了单晶硅超精密磨削过程的三维分子动力学仿真模型。分子动力学的研究对象多为无缺陷理想单晶材料的微观尺度下表面材料去除仿真。然而材料的实际去除主要在介观尺度下进行。对材料去除过程的分子动力学仿真越精确,建模过程工作量则越大,相应仿真效率也越低。

有限元仿真方法应用于磨削加工领域,主要集中于磨削温度场等方面的模拟。湖南大学毛聪采用抛物线热源模型对一些典型磨削加工过程进行了三维有限元仿真。吕长飞等对残余应力产生原因进行分析,并基于建立的磨削温度三维分析模型和有限元分析,实现残余应力分布的建模和预测,通过干磨和湿磨实验进行了验证。王霖、葛培琪等运用有限元法建立了湿式磨削温度场的数学模型,得出了湿式磨削温度场的等温图。邓朝晖等建立了金刚石砂轮精密平面磨削纳米结构 WC/12Co 涂层的磨削表面残余应力的有限元模拟模型。然而,磨削过程是由大量磨粒共同作用于工件表面所完成的滑擦、耕犁和切削现象的总和,采用有限元方法仿真磨削加工过程中磨削热的传导时,并未表达出磨削过程中材料所具有的流动特性。

虽然通过分析数学、经验方法、分子动力学仿真、有限元仿真等方法建立的模型在磨削加工过程中已有应用先例,但所建立的模型或基于众多前提假设,或局限于单个物理量的建模。而模型建立的最终目标是为了更好地了解磨削加工过程所隐含的机理,实现对磨削加工过程更优的控制,获取更佳的加工质量。所有以上所述,均归于磨削加工工艺方案的优化选择。只有通过最优的磨削工艺方案来控制磨削加工过程,才能够获取高的磨削加工精度和加工效率。

1.3.2 专家系统智能建模

磨削加工过程各个参数之间存在严重的非线性关系。以人工神经网络技术(artificial neural network, ANN)、遗传算法(genetic algorithm, GA)、模糊逻辑(fuzzy logic, FL)、专家系统(expert system, ES)为代表的人工智能技术在解决高度非线性领域问题时具有其独有的优势。基于此,众多学者将各种人工智能技术综合后引入到磨削加工过程的建模中来,以期实现对磨削加工过程的优化。Z. H. Deng 等采用均匀设计原理安排实验方案,在 CNC8312A 数控高速凸轮轴磨床上进行实验加工,建立了基于凸轮轴磨削过程中工件加工质量与工艺参数的遗传神经网络模型;J. Z. Wang 等将遗传算法与模糊神经网络予以综合,借助遗传算法实现规则库的自动设计及不同规则权重的自动设定,用于外圆纵向磨削过程功率预测;B. Bałasz 等利用一个二维弹性神经网络来预报磨粒几何尺寸,包括磨粒顶点数目、倾角及顶点半径;M. Tie 等基于球磨机磨削加工过程建立了混合智能模型;采用模糊神经网络选择磨削运转状态,采用规则推理实现工艺参数的调整,通过径向基神经网络实现微粒尺寸的误差补偿。

I. Gallego 分别以加工时间最短和砂轮磨损最小为目标对无心磨削加工进行了优化;C. W. Lee 等基于氧化铝砂轮平面磨削加工热处理后的 4140 合金钢过程,建立了磨削力、能耗、表面粗糙度及残余应力的数学模型,并根据砂轮磨损的时序特征来优化砂轮的修整间隔,并分