



国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书出版规划项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书
总主编 丁汉 孙容磊

航空复杂薄壁零件 智能加工技术

张定华 罗明 吴宝海 张莹◎著



HANGKONG FUZA BAOWI LINGJIAN
ZHINENG JIAGONG JISHU



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书出版规划项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书
总主编 丁 汉 孙容磊

航空复杂薄壁零件智能加工技术

张定华 罗 明 吴莹海 张 莹 著

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书系统地总结了作者近年来在航空复杂薄壁零件智能加工技术方面的研究成果。全书共6章,第1章至第2章介绍了数控加工模型的发展历程及时变加工过程的多态演化工艺模型,阐述了智能加工技术中系统模型基础。第3章至第5章针对典型航空复杂薄壁零件的加工过程,介绍了作者提出的加工过程的监测与数据处理方法、工艺模型的学习优化方法、加工过程动态响应预测与调控方法。第6章针对薄壁零件加工的残余应力变形预测问题,介绍了作者提出的装夹感知方法。

本书内容具有先进性、新颖性,对数控加工、CAD/CAM、智能制造、航空制造工程等领域的科研和工程技术人员具有重要的参考价值,同时也适合作为高等院校相关专业的研究生教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航空复杂薄壁零件智能加工技术/张定华等著. —武汉:华中科技大学出版社,2020.7
(智能制造与机器人理论及技术研究丛书)
ISBN 978-7-5680-6203-9

I. ①航… II. ①张… III. ①航空材料-薄壁件-加工 IV. ①V25

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第124460号

航空复杂薄壁零件智能加工技术
Hangkong Fuzha Baobi Lingjian Zhineng Jiagong Jishu

张定华 罗 明 著
吴宝海 张 莹

策划编辑:俞道凯

责任编辑:程 青

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

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:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:10.75

字 数:185千字

版 次:2020年7月第1版第1次印刷

定 价:90.00元



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



总序

近年来,“智能制造+共融机器人”特别引人瞩目,呈现出“万物感知、万物互联、万物智能”的时代特征。智能制造与共融机器人产业将成为优先发展的战略性新兴产业,也是中国制造 2049 创新驱动发展的巨大引擎。值得注意的是,智能汽车与无人机、水下机器人等一起所形成的规模宏大的共融机器人产业,将是今后 30 年各国争夺的战略高地,并将对世界经济发展、社会进步、战争形态产生重大影响。与之相关的制造科学和机器人学属于综合性学科,是联系和涵盖物质科学、信息科学、生命科学的大科学。与其他工程科学、技术科学一样,它也是将认识世界和改造世界融合为一体的大科学。20 世纪中叶,*Cybernetics* 与 *Engineering Cybernetics* 等专著的发表开创了工程科学的新纪元。21 世纪以来,制造科学、机器人学和人工智能等领域异常活跃,影响深远,是“智能制造+共融机器人”原始创新的源泉。

华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准智能制造和机器人的科技前沿,组织策划了本套“智能制造与机器人理论及技术研究丛书”。丛书涉及的内容十分广泛。热烈欢迎各位专家从不同的视野、不同的角度、不同的领域著书立说。选题要点包括但不限于:智能制造的各个环节,如研究、开发、设计、加工、成形和装配等;智能制造的各个学科领域,如智能控制、智能感知、智能装备、智能系统、智能物流和智能自动化等;各类机器人,如工业机器人、服务机器人、极端机器人、海陆空机器人、仿生/类生/拟人机器人、软体机器人和微纳机器人等的发展和应用;与机器人学有关的机构学与力学、机动性与操作性、运动规划与运动控制、智能驾驶与智能网联、人机交互与人机共融等;人工智能、认知科学、大数据、云制造、物联网和互联网等。

本套丛书将成为有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,青年科学家茁壮成长的园地,科学家展示研究成果的国际舞台。华中科技大学出版社将与



施普林格(Springer)出版集团等国际学术出版机构一起,针对本套丛书进行全球联合出版发行,同时该社也与有关国际学术会议、国际学术期刊建立了密切联系,为提升本套丛书的学术水平和实用价值、扩大丛书的国际影响营造了良好的学术生态环境。

近年来,高校师生、各领域专家和科技工作者等各界人士对智能制造和机器人的热情与日俱增。这套丛书将成为有关领域专家学者、高校师生与工程技术人员之间的纽带,增强作者与读者之间的联系,加快发现知识、传授知识、增长知识和更新知识的进程,为经济建设、社会进步、科技发展做出贡献。

最后,衷心感谢为本套丛书做出贡献的作者和读者,感谢他们为创新驱动发展增添正能量、聚集正能量、发挥正能量。感谢华中科技大学出版社相关人员在组织、策划过程中的辛勤劳动。

华中科技大学出版社

华中科技大学教授
中国科学院院士

2017年9月



前言

理论上,数控加工中只要使用零件模型编程,生成“正确”的程序,就能加工出合格的零件。然而,在实际的生产实践中,尤其是航空复杂薄壁零件的加工中,数控加工过程并非一直处于理想状态,材料去除会导致出现多种复杂的物理现象,如加工几何误差、热变形、弹性变形以及系统振动等。这些问题的存在,使得根据理论模型生成的“正确”程序,并不一定能够加工出合格、优质的零件,同时设备加工能力得不到充分发挥,机床组件及刀具的使用寿命也会受到影响。产生上述问题的原因在于,传统加工过程经常只考虑了数控机床或者加工过程本身,缺乏对机床与加工过程交互作用机理的综合理解,难以实现事先对加工工艺系统进行准确建模。而这种交互作用又经常产生难以预知的效果,大大增加了加工过程控制的难度,使对加工过程的精确控制难以实现。航空发动机等复杂装备上的整体叶盘、整体机匣等零件的结构越来越复杂,其极端恶劣的服役环境对加工过程与加工品质的要求也越来越高。作者在 30 余年航空复杂薄壁零件研制工程实践经验与研究的基础上,近 8 年来对加工工艺的智能化技术进行了系统性研究,提出了智能加工技术的基本框架及实施途径,取得的主要研究成果包括:

(1)提出了“无试切”侦测加工方法,通过主动激励与在线监测相结合,将试切融入零件加工过程,保证试切和实际加工过程中工件材料、结构、工艺和过程四个因素完全相同,解决现有工艺模型由于建模条件与加工过程不同而导致的模型不精确问题。

(2)提出了基于侦测加工的自主学习与模型进化方法。利用在线侦测获取



实时工况和系统响应信息,通过建立联想记忆知识模板表征工况、界面耦合行为和工件品质之间的映射关系,实现工艺知识的积累与模型的进化;针对加工过程中工件状态、刀具磨损的强时变特性,通过时空细分多态演化建模方法实现工件、刀具状态在工步内的动态建模;利用工步间的数据存储模板,基于在位测量和离线检测实现综合加工误差补偿模型的迭代学习与进化,解决了现有工艺模型和建模方法难以实现动态建模、自主学习与自适应进化的问题。

(3)建立了残余应力变形感知预测的数学模型,基于超静定理论提出了基于装夹力监测的残余应力变形感知预测模型的求解方法,为航空复杂薄壁零件加工变形的在位预测提供了新的思路。

相关的一系列模型和方法应用于航空发动机大型风扇叶片、整体叶盘、整体机匣和飞机结构件等零件的研制中,取得了良好的应用效果。

本书内容具有先进性、新颖性,对数控加工、CAD/CAM、智能制造、航空制造工程等领域的科研和工程技术人员具有重要的参考价值,同时也适合作为高等院校相关专业的研究生教材或参考书。

在本书完成之际,作者衷心感谢各位学术前辈、师长和同事们的支持与帮助。本书是在作者所指导博士研究生的研究成果的基础上综合而来的,包括周续、韩飞燕、刘一龙、侯永锋、侯尧华、韩策、梅嘉炜、马俊金、王骏腾、刘冬生、姚琦等,在此也向他们表示谢意!

感谢国家重点基础研究发展计划课题(2013CB035802)、国家自然科学基金项目(51305354、51475382、51575453、51675438、91860000)、西北工业大学中央高校基本科研业务费项目(3102017gx06008、3102018jcc004、31020190505002)和西北工业大学“双一流”研究生核心课程建设项目的支持!

由于作者水平有限,书中难免会有纰漏和疏忽,敬请读者批评指正。

特别声明:本书没有统一的符号表,各章的符号定义自成体系。

作 者

2019年8月



目录

第 1 章 绪论 /1

1.1 数控加工技术 /1

1.1.1 数控技术发展历程 /1

1.1.2 数控加工模型的发展阶段 /3

1.2 智能加工技术 /5

1.2.1 智能加工技术的内涵 /5

1.2.2 智能加工的实现途径 /5

1.2.3 智能加工技术涉及的基础知识 /6

1.3 本书的内容编排 /8

本章参考文献 /8

第 2 章 时变加工过程的多态演化工艺模型 /10

2.1 加工工艺系统的描述 /10

2.1.1 刀具-主轴子系统动力学模型 /11

2.1.2 工件-夹具子系统动力学模型 /12

2.2 加工过程的多态演化模型 /13

2.2.1 加工过程的定义 /13

2.2.2 加工过程的时域离散 /13

2.2.3 多态模型的演化 /15

2.3 工件几何演化模型 /17

2.3.1 变形映射方法 /17

2.3.2 复杂加工特征的变形映射建模方法 /23



- 2.4 工件动力学演化模型 /29
 - 2.4.1 基于结构动力修改技术的工件动力学演化分析 /29
 - 2.4.2 基于薄壳模型的工件动力学演化分析 /30
- 2.5 刀具磨损演化模型 /36
 - 2.5.1 加工中的刀具磨损 /36
 - 2.5.2 刀具磨损的演化建模 /37

本章参考文献 /39

第3章 切削加工过程监测与数据处理方法 /41

- 3.1 切削加工过程中的监测方法 /41
- 3.2 侦测加工方法 /43
 - 3.2.1 侦测加工的概念 /43
 - 3.2.2 侦测加工的实现方法 /44
- 3.3 基于铣削力的切深切宽侦测方法 /47
 - 3.3.1 平均铣削力 /47
 - 3.3.2 加工过程中的侦与测 /47
 - 3.3.3 侦测响应方程 /48
 - 3.3.4 切深切宽的侦测识别 /48
- 3.4 铣刀磨损状态的侦测识别方法 /51
 - 3.4.1 刀具磨损的检测方法 /51
 - 3.4.2 磨损刀具的铣削力模型 /51
 - 3.4.3 识别过程分析 /55
 - 3.4.4 磨损量计算识别 /56
- 3.5 基于现场监测数据的切削力系数辨识 /57
 - 3.5.1 考虑振动条件的切削力预测模型 /58
 - 3.5.2 考虑振动条件的切削力系数辨识模型 /65

本章参考文献 /68

第4章 工艺模型的学习优化 /70

- 4.1 加工工艺模型的学习优化方法 /70
- 4.2 加工过程数据的时空映射 /71
- 4.3 加工误差补偿迭代学习方法 /76
 - 4.3.1 工件几何信息的在位检测方法 /76

4.3.2	薄壁零件加工误差补偿建模	/78
4.3.3	薄壁零件误差补偿模型求解	/79
4.3.4	误差补偿系数学习控制方法	/83
4.3.5	误差迭代补偿方法在薄壁叶片加工中的应用	/86
4.4	深孔钻削深度迭代学习优化方法	/87
4.4.1	单步钻削排屑力模型	/88
4.4.2	深孔啄式钻削排屑过程	/90
4.4.3	钻削深度的迭代学习与优化方法	/93
4.5	工艺参数循环迭代优化方法	/95
4.5.1	进给速度优化数学模型	/97
4.5.2	进给速度优化问题的在线求解	/101
4.5.3	工艺参数的离线学习与迭代优化	/106

本章参考文献 /108

第5章 加工过程的动态响应预测与调控 /109

5.1	加工过程动态响应的控制方法	/109
5.2	铣削过程中的交变激振力	/110
5.2.1	交变激振力的产生原因	/110
5.2.2	交变激振力表征与分解	/111
5.3	铣削加工动态响应预测	/112
5.3.1	铣削加工中的强迫振动	/112
5.3.2	铣削加工颤振稳定性预测	/115
5.4	基于切削参数优选的铣削动态响应控制	/121
5.5	基于刀具非均匀齿间角优化设计的响应控制方法	/125
5.5.1	变齿间角铣刀的颤振稳定性预测方法	/125
5.5.2	相邻齿间角间的几何关系	/126
5.5.3	铣刀非均匀齿间角设计	/127
5.6	工件-夹具子系统动力学特性调控方法	/128
5.6.1	基于附加辅助支撑的调控方法	/129
5.6.2	基于附加质量块的调控方法	/131
5.6.3	基于磁流变阻尼器支撑的调控方法	/133

本章参考文献 /137



第 6 章 薄壁零件加工残余应力变形的装夹感知	/138
6.1 切削加工中的残余应力	/138
6.2 残余应力变形	/140
6.3 残余应力变形感知预测原理	/142
6.4 残余应力变形感知预测模型	/144
6.5 典型装夹形式残余应力变形势能感知	/145
6.5.1 多余约束中存在面约束	/146
6.5.2 多余约束为点约束	/147
6.6 残余应力变形感知预测模型求解	/148
6.7 薄壁零件加工残余应力变形感知应用案例	/152
6.7.1 感知位置的确定	/152
6.7.2 感知夹具的设计	/153
6.7.3 加工感知实验	/154
6.7.4 变形的求解	/154
本章参考文献	/155

华中科技大学出版社



第 1 章

绪论

1.1 数控加工技术

1.1.1 数控技术发展历程

数控技术,简称数控(numerical control),是采用数字控制的方法对某一工作过程实现自动控制的技术。1948年,美国空军提出研制直升机螺旋桨叶片轮廓检验用样板的加工设备,由于样板形状复杂,精度要求高,提出了采用数字脉冲控制机床的想法。1952年,美国麻省理工学院与帕森斯公司合作研发的采用电子管元件的第一台三坐标数控铣床试制成功。1959年,采用晶体管元件和印刷电路板的数控装置出现,同时出现了自动换刀装置,加工中心(machining center)由此出现。20世纪60年代末至70年代中,采用小型计算机控制的计算机数控(computerized numerical control, CNC)系统以及使用微处理器和半导体存储器的微型计算机数控系统相继出现。从20世纪80年代开始,人机对话式自动编程技术和PC+CNC系统相继出现,极大促进了数控加工技术的发展与应用。现在,数控技术也叫计算机数控技术,它是采用计算机实现数字程序控制的技术,可以通过计算机软件方便地实现数据的存储、处理、运算、逻辑判断等各种复杂功能^[1, 2]。

一般情况下,当根据零件的理论模型编制完数控加工程序后,数控机床会按照规划的加工轨迹运动,理想情况下可以得到合格的加工零件。然而,加工过程中经常出现一些产品质量不合格的问题,例如:采用同样的数控加工程序和装备但得到了不同的加工质量或产品质量不稳定,几何上检测合格的零件并不能达到服役性能的要求。实际上,数控加工过程并非一直处于理想状态,伴随着材料去除会出现多种复杂的物理现象,如机床运动误差、热变形、弹性变形以及系统振动等。这些现象的存在导致实际的加工过程与零件的理想加工状



态存在差异并影响了最终加工质量。在以往的研究与实际生产中,通常只注重数控机床或者加工过程本身,缺乏对机床与加工过程交互作用机理的综合理解。而这种交互作用又经常产生难以预知的效果,大大增加了加工过程控制的难度^[3]。实际生产中,对于结构较为简单、精度要求不高且壁厚较大的零件,上述影响并不明显。对于结构复杂且壁厚较小的零件,目前主要还是通过一线有经验的工人进行加工过程及产品质量的控制。

然而,航空发动机等复杂装备上零组件的结构越来越复杂,这类产品的加工质量对其服役性能的影响也十分显著。例如,航空发动机压气机叶片的加工精度对其气动性能有直接影响,工件表面的应力状态与表面微结构对其疲劳寿命有决定性作用。这对复杂零部件加工过程品质稳定性及加工质量一致性提出了更高的要求。因此,传统的只针对加工结果进行检测、评估和只考虑几何加工精度的质量保障方法并不能满足新一代高端装备对加工品质的要求^[4]。

加工过程中,刀具切削材料产生力、热等加工负载^[5],加工装备在负载的作用下产生振动、变形等响应,这些响应反过来又影响加工过程与表面质量,从而形成了复杂的加工工艺系统。这一工艺系统结构高度复杂,且是非线性的,难以准确建模^[6]。同时,加工过程中存在大量非确定性、随机性因素,导致对加工过程的响应与加工品质的预测更加困难^[7]。例如,在航空发动机高温合金等难加工材料切削过程中,在剧烈的力热耦合作用下,刀具快速磨损^[8],一把刀具加工几十分钟就可能需要更换^[9],如图 1.1 所示。然而,由于刀具磨损本身存在随机性,无法实现准确的刀具磨损值预测,只能根据经验值提前换刀。这种方法造成的后果是,刀具得不到有效利用而造成刀具成本过高,以及材料的非均匀性和性能波动造成刀具提前损坏并破坏加工表面。

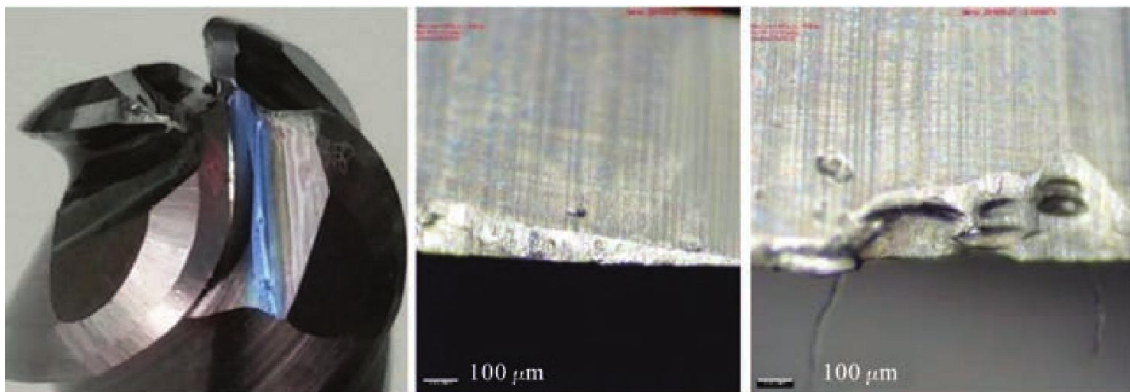


图 1.1 航空镍基高温合金铣削中的刀具磨损^[9]

综上所述,传统的加工技术状态已与高端装备零部件的制造品质要求不相适应,而加工工艺系统的复杂性又与这类产品加工过程的高一致性和高品质要求相互矛盾。要解决上述问题,必须变革传统的理念,将机床与加工过程一起考虑,对其交互作用进行建模与仿真,进而优化加工过程,改进加工系统设计,减少加工过程中的缺陷^[4]。同时,借助先进的传感器技术和其他相关技术装备数控机床,对加工过程中的工况进行及时感知和预测,对加工过程中的参数与加工状态进行评估和调整,达到经济、有效提升形状精度与表面质量的目的^[10]。因此,急需突破现有加工技术的瓶颈,发展新一代的加工技术,满足重大装备发展的需要。

近年来,随着传感与监测技术、计算技术、数据处理及人工智能技术的发展,采用新的技术解决复杂工艺系统准确建模、加工过程系统响应准确预测与控制等问题成为可能。这些新兴技术与加工过程的结合也促进了智能加工这一新一代加工技术的发展。

1.1.2 数控加工模型的发展阶段

随着数控技术的发展,数控加工模型也在不断发展,经历了从最初的只处理二维图形到同时考虑几何与物理约束,以及现在的智能加工阶段,如图 1.2 所示。每个阶段的基本特点如下。

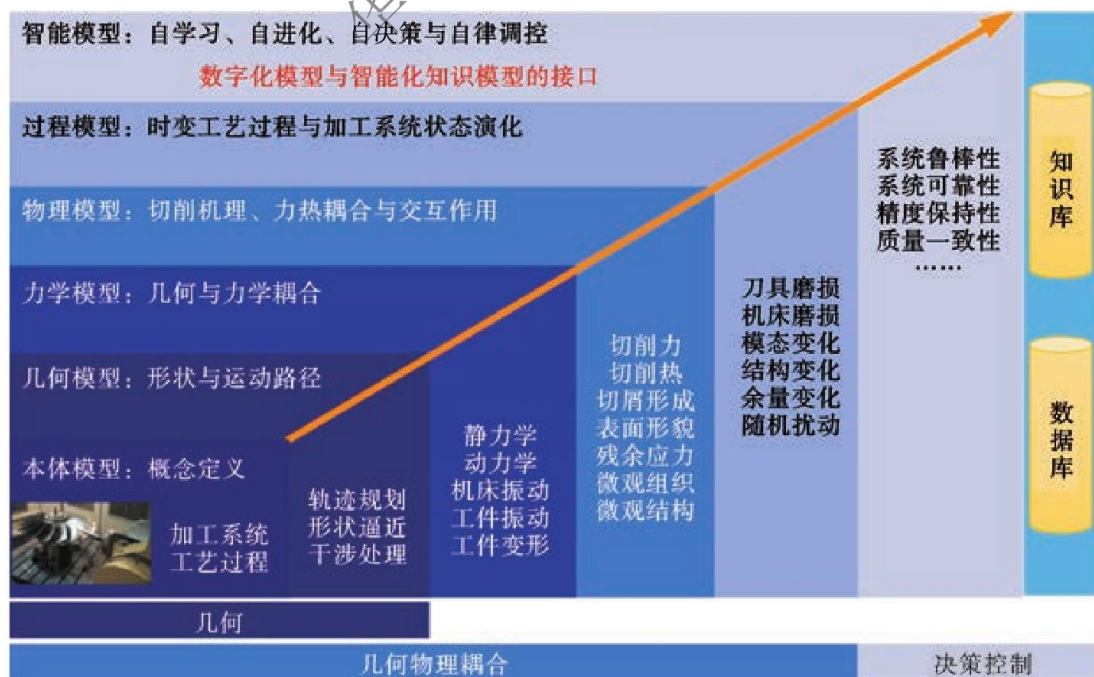


图 1.2 数控加工模型的几个发展阶段



(1) 几何模型阶段:这一阶段主要是根据零件的几何特征,解决加工过程中的几何与路径控制问题,生成产品的数控加工轨迹,实现自动化高精度加工。这一阶段研究的主要内容包括加工轨迹的规划、加工轨迹与工件几何形状的准确逼近、刀具与工件干涉的处理等。这一阶段在数控加工模型的发展中占据了较长的时间,伴随着第三次工业革命带来的变革,解决了复杂零部件自动化制造与大批量生产的基本问题。

(2) 力学模型阶段:这一阶段主要是解决加工较复杂零件过程中出现的静力学与动力学等问题,主要研究让刀变形控制、加工中机床与工件的振动抑制等问题,进一步提高工件的加工精度与效率。这一发展阶段大概从20世纪80年代初开始并一直延续到现在,是薄壁零件加工中的一个重要研究方向。这一阶段的发展使得人们认识到了数控加工中只考虑纯几何问题的局限性,并发展了相关的控制方法,对提高加工效率与精度起到了巨大的促进作用。

(3) 物理模型阶段:这是加工技术研究中持续时间较长的一个阶段,这个阶段的研究旨在从切削机理出发并将研究成果融合到零件的加工过程中。从20世纪初开始即有针对金属材料切削机理的大量研究,在数控技术快速发展的阶段,这些基础理论在工程中的应用促进了工件加工品质的进一步提升。目前,这一阶段还在不断发展,并重点聚焦加工过程中工件表面微观组织、残余应力等的形成机理及力热耦合作用对表面完整性和零部件服役性能的影响。

(4) 过程模型阶段:在研究加工过程中某一固定时刻单点问题的基础上,加工过程中系统状态的变化及其对加工品质的影响是近二十年来复杂构件加工中的研究焦点之一。研究的内容主要包括:薄壁零件材料切除对动态特性的影响、大型数控机床不同位姿对加工过程的影响、机床长期使用过程中性能变化对加工品质的影响、刀具磨损等时变因素的影响等。这一阶段将加工过程看成复杂的动态过程,在满足高端装备复杂构件高品质制造要求方面起到了重要作用。

(5) 智能模型阶段:随着高端装备零部件结构复杂性的提高与对制造品质的更高要求,实现加工过程的准确控制、加工表面品质的准确保障,以及实现每件产品的正确加工,成为目前加工技术发展的重要前沿。智能模型阶段旨在通过相关技术的应用,实现加工过程的自学习、自进化、自决策,从而提高加工工艺系统的鲁棒性、可靠性,全面提升产品加工品质的一致性。

当前,在全球科技竞争日趋加剧、科技壁垒重新显现的背景下,加快制造领域技术发展转型升级、掌控高附加值产品制造核心技术、发展数据驱动的智能加工技术,已成为世界各国在制造领域科技竞争中抢占制高点的突破口,也是

我国实现弯道超车,成为科技强国的关键之一。

1.2 智能加工技术

1.2.1 智能加工技术的内涵

智能加工技术属制造过程智能化范畴,以实现数控加工过程智能化为目标,包括数控加工工艺系统和工艺过程的建模仿真、优化控制和智能加工系统集成等关键技术,以及智能加工机床与智能工装、智能网络通信等相关技术^[3]。

如图 1.3 所示,智能加工系统由工艺模型信息系统、智能加工控制系统、加工知识库与设备等组成,是智能制造系统从车间到底层设备纵向集成的“中间层”,是智能制造系统的底层工艺信息模型和物理加工设备融合的系统。通过现代传感、网络通信等相关技术,该系统可实现智能加工控制系统与智能加工设备的动态集成(加工系统、过程和装备的动态监测与控制),以及基于工艺模型信息系统的知识集成(数据存储、处理和知识挖掘、集成、管理)。

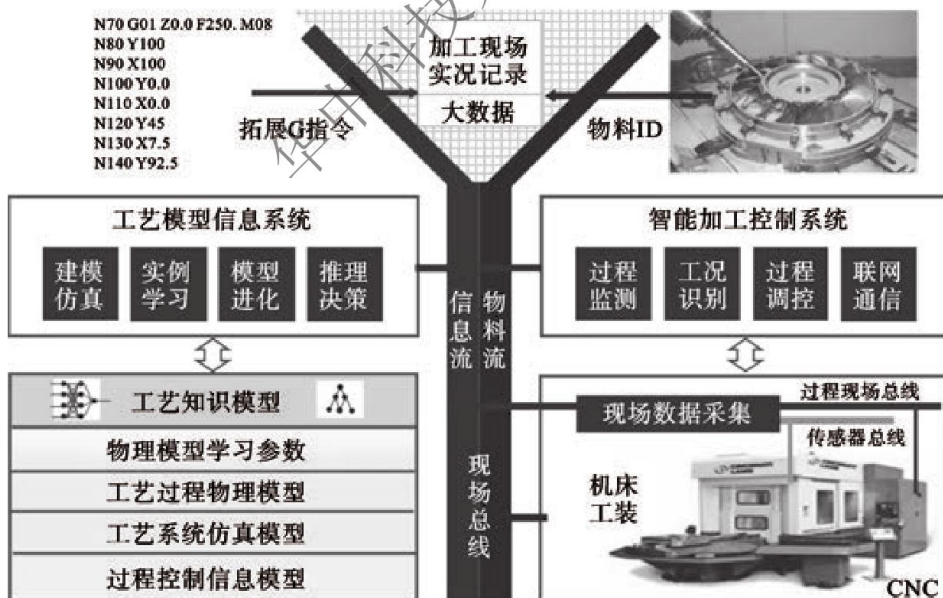


图 1.3 智能加工系统的总体架构

1.2.2 智能加工的实现途径

在智能加工系统中,一般借助先进的数字化检测与加工设备及虚拟仿真手



段,实现对加工过程的建模、仿真、预测、优化,以及对真实加工过程的在线监测与控制,即实现动态集成。此外,集成现有工艺知识和推理决策机制,使加工系统能够根据实时工况自动优选加工参数,调整自身状态,获得最优加工性能与质效,即实现知识集成。

典型的智能加工技术路线如图 1.4 所示,针对不同零件的加工工艺规划、切削参数、进给速度等加工过程中影响零件质量和加工效率的各种参数,通过基于加工过程模型的仿真,进行参数的预测和优化选取,并生成优化的加工过程控制指令。加工过程中,利用各种传感器、远程监控与故障诊断技术,对加工过程中的振动、切削温度、刀具磨损、加工变形以及设备的运行状态与健康状况进行监测。在此基础上,根据预先建立的系统控制模型,实时调整加工参数,并对加工过程中产生的误差进行实时补偿。

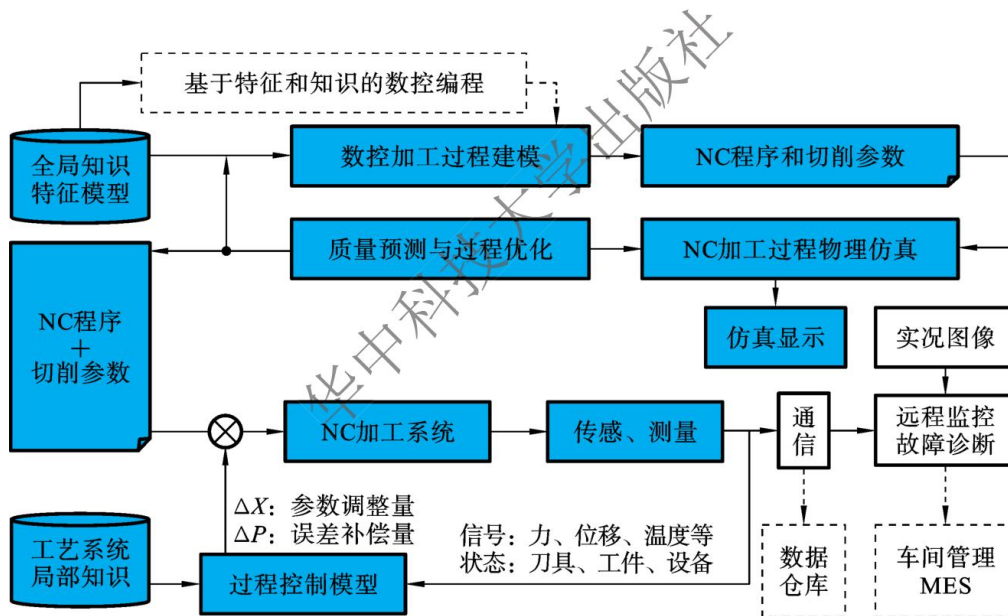


图 1.4 智能加工的总体技术路线

从上述智能加工技术的内涵及实施途径可以看出,智能加工技术是涉及数控加工、切削、传感、控制等多个领域的一个交叉技术。

1.2.3 智能加工技术涉及的基础知识

1. 数控加工技术

数控加工技术主要涉及根据零件的结构特点及工艺要求,采用编程软件自动生成数控加工轨迹,以及控制数控机床,使之按照规划的路径运动。其