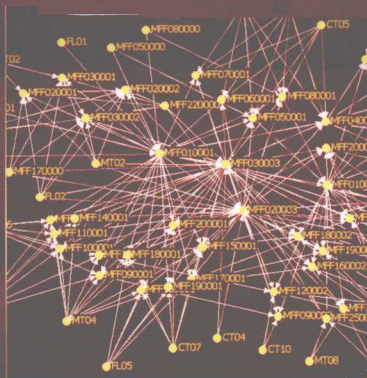


数字化加工过程 质量控制方法与技术

• 江平宇 刘道玉 等 编著 •



科学出版社
www.sciencep.com

“十一五”国家重点图书出版规划项目
21 世纪先进制造技术丛书

数字化加工过程质量控制方法与技术

江平宇 刘道玉 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以零件数字化加工过程的多源多工序质量控制问题为研究对象,重点论述了作者在理论方法与关键使能技术方面所取得的研究成果。全书共由9章组成。其中,第1章从总体上介绍了数字化加工过程质量控制问题及其内涵;第2、3章则从工序流和测量与传感网络配置的角度出发,阐述了零件加工过程建模、质量数据的采集与处理等方面的方法及关键技术细节;作为本书的重点,第4章系统介绍了基于复杂网络理论的工序误差传递建模与解算方法;第5~8章则从稳态生产控制的角度出发,介绍了面向工序的统计过程质量控制方法、控制图模式识别、基于设备的e-QC结点模型及其工件加工质量跟踪方法、工件质量的变化管理、基于统计过程控制的加工误差溯源等;第9章从加工设备的精度保障角度出发,论述了设备健康维护的方法与技术。

本书既可供从事先进制造领域内研发和工业应用的工程科技人员、高校院所的研究人员参考,也可作为相关专业本科生及研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字化加工过程质量控制方法与技术/江平宇等编著. —北京:科学出版社,2010

(“十一五”国家重点图书出版规划项目;21世纪先进制造技术丛书)

ISBN 978-7-03-028013-8

I. 数… II. ①江…②刘… III. ①数控机床-加工-质量控制

IV. ①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第114521号

责任编辑:耿建业 王向珍 / 责任校对:纪振红

责任印制:赵博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2010年6月第一次印刷 印张:18 3/4

印数:1—3 000 字数:357 000

定价:60.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪，先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点，同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展，为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术，出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合，产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战，要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展，激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升制造学科的学术水平。我们相信，有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，本丛书将为发展制造科学，推广先进制造技术，增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物，在制造业中应用范围很广，从喷漆、焊接到装配、抛光和修理，成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科，已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一，并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进

展，因此，本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后，我们衷心感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。



华中科技大学

2008年4月

前 言

数字化制造是 21 世纪提升制造业加工水平的关键核心技术,也是列入国家中长期规划中的核心内容之一。在数字化制造过程中,面向多源多工序的质量控制问题的解决对提升产品质量、扩大“中国制造”品牌的质量水平均有重要的学术意义和工程应用价值。

据此,依托国家重大基础研究“973”计划项目“数字化制造基础研究”的课题六“数字化加工多源多工序质量的综合评估与优化控制”(2005CB724106)、国家“863”计划现代集成制造技术专题项目“基于过程集成的服务型制造执行系统新方法研究”(2007AA04Z108)的研究成果,本书针对当前在多工序质量控制研究中的一些难点,遵循从实践到理论再用理论指导实践的思想,重点总结了课题组在数字化测量与传感网络的构建、误差流建模与分析方法、过程质量稳态控制、加工质量跟踪及变化管理、加工误差溯源、设备健康维护等方面的最新研究进展。

全书共分 9 章。第 1 章概述了数字化加工过程质量控制问题的研究背景、研究现状与进展以及研究问题的提出等;第 2 章从多工艺路线规划和工序公差优化等角度出发,阐述了数字化加工的工序流配置问题;第 3 章从数字化加工过程多源质量数据的获取、数字化检测仪器与 RFID 系统配置等角度出发,描述了数字化测量与传感网络的构建与分析方法;第 4 章则原创性地提出了基于复杂网络理论的多工序误差传递模型的建模与解算分析方法;第 5 章从多生产模式下的工序质量控制方法、控制图模式识别、基于小波理论的工序质量控制与诊断集成方面论述了数字化加工的质量稳态控制方法;第 6 章在拓展课题组早期提出的 e-服务模型的基础上,提出了基于加工设备的 e-QC 结点模型,并据此结点互连模型实现了工件加工质量的动态跟踪;第 7 章则从变化管理的角度,讨论了工件质量在加工过程中的演变规律、相应的加工质量知识的动态管理以及加工质量预测问题;第 8 章对数字化加工过程中质量问题的误差溯源方法进行了描述,诸如利用本体论、粗糙集、支持向量机等理论等进行质量诊断与溯源;第 9 章采用 Logistic 回归、支持向量机等方法对数控设备的服役性能进行了分析和预测,提出了数字化加工的设备健康维护方法。

本书既可供从事先进制造领域内研发和工业应用的工程科技人员、高校院所的研究人员参考,也可作为相关专业本科生及研究生的教学参考书。

全书的章节规划、终稿统稿工作由江平宇教授负责完成,初稿统稿工作由刘道

玉博士负责完成。江平宇教授、刘道玉博士、付颖斌博士、曹现刚博士、赵刚博士、田颖博士、孙惠斌博士等参与了章节的编写工作。

借此机会感谢国家科技部通过“973”计划项目、“863”计划项目所给予的资金资助；感谢课题组已毕业的研究成员李智光硕士、曾志坚硕士、陈石峰硕士、陶宁硕士、周晓婧硕士、刘成硕士、郭琳硕士、孙丽梅硕士、张超锋硕士、王继努硕士等在读研期间为完成上述科研项目以及本书涉及的研究成果所作出的学术贡献。

由于编者水平有限，书中不妥之处敬请读者批评指正。

江平宇

2010年3月22日于西安交通大学

《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编:熊有伦(华中科技大学)

编 委:(按姓氏笔画排序)

丁 汉(上海交通大学/华中科技大学)

王田苗(北京航空航天大学)

王立鼎(大连理工大学)

王国彪(国家自然科学基金委员会)

王越超(中科院沈阳自动化研究所)

王 煜(香港中文大学)

冯 刚(香港城市大学)

冯培恩(浙江大学)

任露泉(吉林大学)

江平宇(西安交通大学)

刘洪海(朴茨茅斯大学)

孙立宁(哈尔滨工业大学)

宋玉泉(吉林大学)

张玉茹(北京航空航天大学)

张宪民(华南理工大学)

李泽湘(香港科技大学)

李涤尘(西安交通大学)

李涵雄(香港城市大学/中南大学)

周仲荣(西南交通大学)

查建中(北京交通大学)

柳百成(清华大学)

赵淳生(南京航空航天大学)

钟志华(湖南大学)

徐滨士(解放军装甲兵工程学院)

顾佩华(汕头大学)

黄 强(北京理工大学)

黄 真(燕山大学)

黄 田(天津大学)

管晓宏(西安交通大学)

熊蔡华(华中科技大学)

翟婉明(西南交通大学)

谭 民(中科院自动化研究所)

谭建荣(浙江大学)

雒建斌(清华大学)

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 数字化加工过程质量控制概述	1
1.1.1 数字化加工多源多工序过程质量控制的提出	1
1.1.2 数字化加工多源多工序过程质量控制的特征与内涵	2
1.2 数字化加工过程闭环质量控制	3
1.2.1 数字化加工过程的稳态生产要求	3
1.2.2 数字化加工过程质量控制的闭环流程	4
1.3 数字化加工过程质量控制稳态的实现模式	5
1.3.1 多源多工序过程质量控制体系结构	5
1.3.2 多源多工序过程质量控制实现框架与执行逻辑	7
1.4 实现多源多工序过程质量控制的关键技术	11
1.4.1 数字化加工的工序流配置技术	11
1.4.2 面向工序流的数字检测传感网络	11
1.4.3 工序流误差传递建模与关键工序结点识别技术	12
1.4.4 工序结点质量稳态控制技术	12
1.4.5 工序流质量实时跟踪技术	13
1.4.6 工序流质量变化管理技术	13
1.4.7 加工质量缺陷诊断与设备健康维护技术	13
第 2 章 数字化加工的工序流配置	14
2.1 多工艺路线规划	14
2.1.1 数字化加工的多工序流规划策略	14
2.1.2 多工艺路线规划数学模型	16
2.1.3 基于蚁群算法的多工艺路线求解	18
2.1.4 基于蚁群算法的非线性多工艺路线规划实例	21
2.2 工序公差优化分配	24
2.2.1 多工序多特征公差优化思路	24

2.2.2	特征成本函数构建	25
2.2.3	基于 ATC 的工序公差优化求解	27
2.3	工序流配置建模与优化	32
2.3.1	面向多工序流的零件聚类分析思路	32
2.3.2	基于加权有向图的零件工艺描述模型	33
2.3.3	基于群体智能算法的工序流优化	37
2.3.4	实例分析	41
2.4	本章小结	45
第 3 章	数字化测量与传感网络	46
3.1	数字化加工过程多源质量数据的获取方法	46
3.1.1	数字化加工过程闭环质量控制的数据需求特点	46
3.1.2	数字化检测传感网络的提出	47
3.2	数字检测仪器的配置	48
3.2.1	基于零件加工特征的检测仪器配置框架	48
3.2.2	零件加工特征网络分析	49
3.2.3	检测仪器配置空间建模	56
3.2.4	基于本体的检测仪器配置	57
3.3	工序物流信息的 RFID 读写器配置	67
3.3.1	RFID 数据采集网络设计	67
3.3.2	RFID 数据获取预处理	70
3.4	数字检测传感网络性能评价	73
3.4.1	数字检测传感网络模型	73
3.4.2	基于复杂网络理论的数字检测传感网络性能分析	76
3.5	工序尺寸数据在线测量技术	79
3.5.1	数控加工轴外径在线测量系统组成	79
3.5.2	测量系统设计与试验平台搭建	80
3.5.3	测量系统误差评定	85
3.6	叶片类复杂曲面零件的测量仪研制及其加工误差评定	90
3.6.1	基于 Keyence 激光传感器的数控测量仪	90
3.6.2	测量仪误差测定与补偿	91
3.6.3	叶片类复杂零件的测量路径规划	96
3.6.4	叶片型线数字化建模	103
3.6.5	叶片型线理论曲线与测量曲线的误差比对分析	107
3.6.6	叶片型线加工误差评估	109

3.7 本章小结	112
第4章 工序误差传递建模与解算	113
4.1 多源多工序误差传递网络基本概念	113
4.1.1 误差传递网络的提出	113
4.1.2 误差传递网络构建思想	114
4.2 误差传递网络建模	115
4.2.1 误差传递网络建模原理	115
4.2.2 误差传递网络建模步骤	117
4.2.3 误差传递网络生成	119
4.3 误差传递网络特性量测	120
4.3.1 网络基本特性定义	120
4.3.2 网络传递效应量测	121
4.4 误差传递网络实证分析	123
4.4.1 发射架箱体零件加工误差传递网络构建	123
4.4.2 小世界效应验证	124
4.4.3 网络特性分析	126
4.5 基于误差传递网络的工序流波动效应评价	131
4.5.1 工序流波动分析的基本原理	131
4.5.2 波动传递模型与波动传递网络构建	132
4.5.3 波动源评价与辨识	135
4.5.4 实例分析	136
4.6 本章小结	139
第5章 数字化加工的质量稳态控制	140
5.1 数字化加工过程质量稳态控制概述	140
5.1.1 基于(近)零缺陷的稳态生产过程	140
5.1.2 零缺陷稳态生产过程的实现方法	140
5.2 多种生产模式下的工序质量控制方法	141
5.2.1 大批量生产模式的工序质量控制图	141
5.2.2 大规模定制生产模式下的工序质量控制图	146
5.2.3 小批量生产模式下的工序质量控制图	148
5.3 基于神经网络-数值拟合的控制图模式识别	153
5.3.1 工序控制图的基本模式	153
5.3.2 控制图模式识别的神经网络-数值拟合模型	155
5.3.3 控制图模式识别过程训练与仿真	157

5.4 基于小波理论的工序质量监控与诊断集成	160
5.4.1 工序质量监控与诊断集成框架	160
5.4.2 基于小波多尺度理论的工序质量监控	161
5.4.3 基于信号融合的工序质量诊断	164
5.5 工序流过程能力评价	166
5.5.1 工序流波动轨迹图	166
5.5.2 基于合格率的多工序能力指数模型	169
5.5.3 实例分析	172
5.6 本章小结	175
第6章 基于设备 e-QC 模型的工件加工质量跟踪	177
6.1 基于设备 e-QC 模型的工件加工质量跟踪概述	177
6.1.1 加工过程质量信息的实时性需求分析	177
6.1.2 基于设备 e-QC 模型的加工过程质量信息跟踪逻辑实现架构	177
6.2 面向加工设备的 e-QC 结点模型	178
6.2.1 e-QC 结点模型的图式概念描述	178
6.2.2 e-QC 结点模型的组成要素界定	180
6.2.3 e-QC 结点的参考实现框架	180
6.2.4 实例分析	183
6.3 工件质量信息共享控制方法	185
6.3.1 质量信息共享基本概念	185
6.3.2 质量信息共享控制数学描述	187
6.3.3 质量信息共享控制实现算法	188
6.4 基于 TIT 网络的工件质量信息跟踪的实现	189
6.4.1 模板及模板结构树	189
6.4.2 模板实例的动态更新	190
6.4.3 基于 TIT 网络的工序质量信息跟踪实现算法	194
6.4.4 实例分析	196
6.5 本章小结	199
第7章 数字化加工的工件质量变化管理	200
7.1 工件质量变化管理理念及其实现框架	200
7.1.1 工件质量变化管理相关概念	200
7.1.2 工件质量变化管理体系结构	201
7.2 基于 Blog 平台的工件质量控制知识管理	202
7.2.1 基于 Blog 平台的工件质量控制知识管理系统架构	202

7.2.2 基于情境的质量控制知识模型	204
7.2.3 基于情境的质量控制知识本体建模	208
7.2.4 基于情境的质量知识检索与推送	211
7.3 工件加工误差的可视化评估与综合分析	216
7.3.1 基于质量控制工具集成的工件加工误差可视化评估	216
7.3.2 工件关联工序质量特性变化的回归分析	218
7.4 基于加权误差传递网络的工件质量变化预测	224
7.4.1 加权误差传递网络建模原理	224
7.4.2 加权误差传递网络的形成	224
7.4.3 工件质量变化预测	225
7.5 本章小结	228
第8章 数字化加工的误差溯源	229
8.1 数字化机械加工误差溯源概述	229
8.1.1 数字化机械加工误差及其误差源分类	229
8.1.2 数字化机械加工误差溯源基本原理	233
8.2 数字化机械加工过程质量智能诊断领域本体建模	233
8.2.1 数字化机械加工过程智能诊断模型	233
8.2.2 数字化机械加工过程质量诊断领域本体的层次结构	235
8.2.3 领域本体建立与层次结构实现	238
8.3 基于粗糙集的质量诊断知识库建立	241
8.3.1 诊断知识的分类与获取	241
8.3.2 基于粗糙集的控制图异常诊断规则提取	242
8.3.3 诊断规则知识的形成	245
8.4 数字化机械加工过程质量异常智能诊断决策	246
8.4.1 质量异常诊断决策原理	246
8.4.2 质量异常诊断决策实现	247
8.4.3 实例分析	248
8.5 基于支持向量机的工序质量异常诊断	250
8.5.1 数字化切削加工过程的监控状态量	250
8.5.2 数字化切削加工过程状态信号特征提取	250
8.5.3 支持向量机的异常状态编码与诊断过程实现	252
8.6 本章小结	255
第9章 数字化加工的设备健康维护	257
9.1 基于 Logistic 回归的设备综合故障概率指标	257

9.1.1 设备服役性能分析与维护原理	257
9.1.2 Logistic 回归模型	258
9.1.3 设备综合故障概率指标定义及计算	259
9.2 数控设备服役性能分析与预测	260
9.2.1 基于 SVR 的设备服役寿命预测	260
9.2.2 基于蒙特卡罗仿真试验与结果分析	261
9.3 设备群性能退化与维护建模	265
9.3.1 设备退化模型的建立	265
9.3.2 基于视情维护的多装备联合决策模型	267
9.4 基于蒙特卡罗仿真的维护决策过程求解	270
9.4.1 设备退化与维护过程模拟	271
9.4.2 设备状态检查过程	271
9.4.3 备件库存量模型	272
9.4.4 期望费用的计算	272
9.4.5 实例分析	273
9.5 本章小结	275
参考文献	277

第 1 章 绪 论

1.1 数字化加工过程质量控制概述

1.1.1 数字化加工多源多工序过程质量控制的提出

复杂的产品一般由多个零部件组成,而每个零件又由多道工序加工完成,为了保证产品的最终加工质量,需要对每个零件的加工质量进行控制,而零件的加工质量又取决于其加工工序序列(又称为工序流)的稳定性,如图 1-1 所示。从加工质量控制的角度来看,零件加工工序流通常具有以下特征:

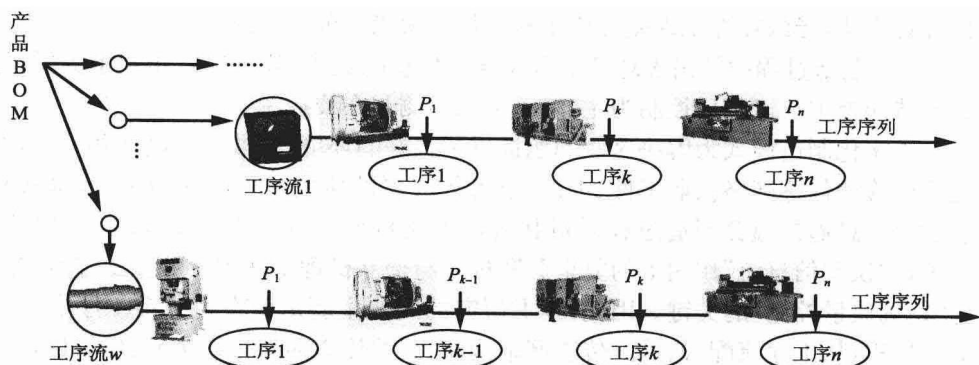


图 1-1 产品加工工序流

(1) 误差源繁多,且彼此相互耦合。加工误差源可能来自设备(机床种类选择、静态精度、服役性能导致的动态精度等)、工艺(切削参数选择、刀量夹具选择、加工方法选择等)、工件(工件待加工特征、加工精度要求等),误差类型的体现形式包括设备服役性能误差、刀具-工件系统产生的动态误差、夹具误差、测量误差等,最终体现为工件误差。

(2) 工序间存在交互效应。工序流形态依赖于制造工艺能力、待加工零件的批次、零件特征要求等,具体表现为零件随加工工序的进行,加工精度得到不断提高,由此使得前、后工序间可能存在误差传递现象。

因此,零件加工工序流实现稳态生产过程通常依赖以下两个方面:

(1) 制造工艺本身的成熟性。制造工艺的优劣直接决定了零件加工质量水平

的高低,随着加工过程的进行,零件的制造工艺也会不断趋向成熟,快速获得成熟的制造工艺是企业赢得竞争的关键。

(2) 加工过程的数字化质量控制理论与方法及其与加工设备服役性能评价的融合。提高对制造过程中工件质量相关的各类数据、信息(来自设备、工艺、工件等)的获取和处理能力,是提高对零件加工质量的控制能力和实现稳态生产过程的关键。

当前,与国外制造企业相比,我国的复杂精密零件的制造工艺水平和相应的质量控制能力亟待提高^[1]。造成这种现象的直接原因之一是我国对这些重要基础件的制造工艺信息流的演变规律和过程质量控制的核心知识仍有待进一步掌握,同样的设备、生产线下,生产出的产品质量差异巨大,主要表现在以下几个方面:

(1) 对生产过程的多源和多工序误差产生与演化的机理认知不清,在误差溯源与补偿方面缺少理论与技术依据,导致同等装备条件下加工精度控制能力差,无法有效实现加工过程的多工序误差控制。

(2) 缺乏可利用的工件、工艺、设备等底层的数字化制造质量信息及相关的增值计算方法,导致在加工误差分析中缺乏用于决策的前提信息。

(3) 制造过程中的诸多环节上有关误差信息的提取、分析等工作互不关联,导致制造误差主要以事后控制为主,缺乏主动预测与在线控制。

数字化制造模式为解决这些问题提供了很好的环境,在数字化制造环境下,通过构建检测传感网络获取工件、工艺、设备等底层的质量数据已成为可能,这些底层数据信息通常蕴含制造过程质量状态的变化特征,掌握“工件-设备群-工序流”系统在“误差信息流”作用下的复杂关联规律与交互机理是实现多源多工序制造过程“精确质量控制”的关键。因此,本书研究的问题主要定位在多源多工序数字化加工过程,从工序流配置、检测传感网络构建、误差传递网络拓扑构型、质量信息增值处理与稳态控制、工件加工质量变化管理及加工误差溯源,以及加工设备维护决策等层面出发,研究面向加工工序流的数字化质量控制理论与方法,以实现零件数字化加工过程的(近)零缺陷稳态生产。

1.1.2 数字化加工多源多工序过程质量控制的特征与内涵

e-质量控制是一种数字化的闭环质量控制模式,它通过质量数据的自动实时采集、分析与反馈控制,以及对工序流质量信息资源(工件、工艺、设备等底层的数字化制造质量数据信息)的共享和质量控制的协同,揭示工序间误差信息的流动和演变规律,建立一种以数字化、集成化、网络化和协同化为特征,预警和报警相结合的工序质量控制新方法,使得多工序加工过程保持真正意义上的稳态。因此,e-质量控制系统具有以下特点:

(1) 数据采集网络化。加工过程中影响零件加工质量的误差源因素众多,有

来自加工设备的、制造工艺的以及工件本身的,通常,可以把需要获取的质量信息分为两类,即工件几何量和加工工况物理量。在多工序加工过程中,为获取这些数据信息,需要布置多个检测点,并在各检测点配置相应的检测仪器,各检测点的检测仪器进一步形成工序流的检测网络。

(2) 质量信息的共享性。在多工序加工过程中,首先,各级质量人员需要对加工过程质量状态进行实时了解和分析,这就要求质量信息具有共享性;其次,具有关联关系的上、下道工序间质量信息互用,对改进零件加工质量也是至关重要的^[2]。

(3) 质量控制的协同性。多源多工序环境决定了在进行工序质量改进时,不能仅仅关注某一工序质量问题的解决,还要从工序流层面整体实现对零件加工质量的改进,这需要各级质量人员就加工过程中的质量问题进行协同^[3]。

依据 e-质量控制系统的上述特点,本书将 e-质量控制系统的内涵归结为以下 3 个方面:

(1) 工序结点数字化是 e-质量控制模式系统的实现基础。通过构建检测传感网络获取源自工件、设备、工艺等底层的数据信息,并在此基础上实现质量信息的互操作是进行“精确质量控制”的基础,而这些数据信息的获取依赖于数字化的测量手段和方法,为此,本书将从质量信息服务的角度研究这一问题。

(2) 工序关联特性分析是 e-质量控制系统的实现核心。在多工序加工过程中,由于工序间存在传递累积效应,定量化分析这一效应是实现全局质量控制的关键,本书将从误差传递数学建模和误差传递网络复杂性分析两个层面讨论这一问题。

(3) 保持工序流稳态是 e-质量控制系统的实现目标。保持工序流的稳态是加工过程追求的目标,进行工序流协调控制是实现这一目标的关键,本书将从工序驱动的零件加工质量优化决策角度出发,建立工序流的协调优化控制模型。

1.2 数字化加工过程闭环质量控制

1.2.1 数字化加工过程的稳态生产要求

在零件加工过程中,多种因素共同作用于加工工序,从而使得零件加工质量不可能完全一致,如图 1-2 所示。在各加工工序中,人(man)、机(machine)、料(material)、法(method)、环(environment)、测(measure)等使得各工序质量特性产生一定程度的波动,为了控制各工序质量波动水平,就需要对加工过程影响质量波动的主要因素进行识别和控制,从而使得加工过程处于生产稳态。为此,需要解决以下几个方面的问题:

(1) 关键工序质量特性及其误差源的识别。确定加工过程中决定零件最终质