

柔性材料加工 智能控制理论与应用

邓耀华 刘桂雄 吴黎明 著



科学出版社

柔性材料加工智能控制 理论与应用

邓耀华 刘桂雄 吴黎明 著



科学出版社

内 容 简 介

本书围绕柔性材料加工智能控制方法与应用这一主题,介绍柔性材料加工控制智能建模、加工轨迹机器视觉提取等相关理论与方法。全书共8章,详细介绍了柔性材料加工变形影响因素提取方法、变形补偿模糊神经网络建模、加工轨迹提取方法、变形补偿嵌入式多核协同控制技术、柔性材料高速振动切割控制技术、柔性材料 R2R 加工变形力学建模与影响因素分析,以及加工智能控制理论的应用实例等内容。本书结构科学合理,内容翔实,实例与产业结合紧密。

本书可供机械工程、智能制造等方面的研究人员和工程技术人员阅读,也可作为机械、自动化、测控等专业的研究生和高年级本科生的辅导用书。

图书在版编目(CIP)数据

柔性材料加工智能控制理论与应用/邓耀华,刘桂雄,吴黎明著. —北京:科学出版社,2018. 11

ISBN 978-7-03-058584-4

I. ①柔… II. ①邓… ②刘… ③吴… III. ①柔性材料-加工-智能控制-控制系统 IV. ①TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 194471 号

责任编辑:朱英彪 赵晓廷 / 责任校对:张小霞

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年11月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年11月第一次印刷 印张:13 1/4

字数:264 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

大力发展以智能数控加工技术为核心的先进制造技术已成为世界各发达国家加速经济发展、提高综合国力和国家地位的重要途径。例如,日本于1989年倡导智能制造十年国际合作研究计划,组织大量研究机构进行智能制造技术的研究;美国国家制造科学中心(NCMS)与空军共同开展“下一代工作站/机床控制器体系结构”研究;欧洲国家开展了“自动化系统中开放式体系结构”等课题的研究。中国在20世纪80年代末也将“智能制造”列为国家科技发展规划的主要课题,科技部提出了“工业智能工程”,智能加工是该项工程中的重要内容;此后,在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》和《中国制造2025》的重点突破技术领域中指出,加大特殊和关键零部件智能加工技术的研究力度,重点解决这类零部件加工过程智能建模、精密控制与加工设备智能维护的关键问题。

柔性材料是一种常见的加工材料,在航空航天、高铁、汽车、新能源材料和纺织轻工制造等行业有着广泛的应用,但由于其刚性差、加工过程中工件容易产生较大的拉伸或挤压变形,加工件的形位误差增大,对其进行加工控制变得非常复杂,主要体现在:①加工控制的影响因素多,如工件材料变形、加工图案多样化等,变形因素相互影响,这些直接带来加工控制的不确定性;②加工控制规则复杂,当考虑的输入条件较多时,其控制规则数呈指数增长而造成“规则爆炸”问题。因此,如何对柔性工件加工变形进行建模及在线控制,是近十多年来国内外学者关注的重要问题。

本书围绕柔性材料加工变形补偿智能控制方法与应用这一主题,以柔性多层材料加载变形分析为切入点,介绍加工变形影响因素的提取;引入系统工程权重理论,介绍柔性多层材料加工变形影响因素权重评价方法,着重解决加工变形补偿,路径规划,重叠、次要影响因素约简等问题;介绍带测量反馈的、能表征加工变形影响因素与补偿量之间多输入-多输出的映射关系模型,解决加工变形补偿定量计算问题,形成完善的刀具补偿路径规划机制;设计实现加工变形补偿预测模型的嵌入式系统,开展加工实例验证、测试试验;将柔性材料加工变形影响理论方法应用于卷对卷(R2R)加工影响因素的分析,与决策控制理论方法相结合,用于柔性材料加工装备的智能维护。本书的目的在于将柔性多层材料加工变形分析推向数字化模拟仿真的深入研究阶段,同时为实现柔性多层材料一次性装夹、自动化加工与智能维护提供有效的理论和技术支撑。

本书的主要内容包括:

(1) 介绍柔性材料加工变形力学,指出影响柔性材料加工变形的因素相当复杂,必须进行加工变形决策知识提取。讨论柔性材料加工简化力学模型的有限元仿真及求解,得出柔性材料加工变形与作用力、作用点位置、柔性材料结构参数等因素之间的关系;指出作用力变化也与进给深度、进给偏角、图元类型、图元夹角、加工步长、插补方法、插补速度、加工方向角、柔性材料夹紧方式和柔性材料夹紧位置等因素相关,若将众多的加工变形影响因素作为后续预测模型的输入会形成极其复杂的系统结构,必须对柔性材料加工变形影响因素进行提取。

(2) 提出加工变形影响因素提取简权重分析方法,介绍基于粗糙集(RS)及信息熵的约简方法和基于层次分析法的加工变形影响因素提取方法。基于信息熵表示属性重要度的DDT约简算法,将互信息 $I(P;D)$ 变化程度作为条件属性对决策属性重要性的评价指标, $I(P;D)$ 变化越大则条件属性 a 对于决策属性 D 就越重要;制订变形决策表DDT属性约简算法的计算流程,实现柔性材料加工变形决策知识的提取。构建柔性材料加工变形影响因素的层次分析提取模型,由柔性材料加工变形影响因素重要度作为层次分析模型的目标层,加工属性构成准则层,各个加工变形影响因素作为指标层。以加工变形影响因素 C_m 的提取属性 P 对目标层的影响程度向量 W_P 表征每个加工变形影响因素的重要度,若 W_P 中元素的值越大,则其对应的加工变形影响因素的重要度就越大,从而具有较强的理解性、客观性、操作性。制订加工变形影响因素提取层次分析算法的计算流程,开展基于层次分析法的提取加工变形影响因素的效果试验。

(3) 提出柔性材料加工变形补偿预测自适应T-S模糊神经网络(ATS-FNN)建模方法,集中了模糊聚类、模糊神经网络建模方法的优点。该方法将自适应模糊聚类方法(AFCM)与T-S模糊神经网络(TSFNN)建模方法有效结合,具有学习能力强、逼近非线性函数映射能力好的特点,模型的前件网络引入AFCM方法完成输入空间模糊等级划分、隶属度函数提取、规则适应度计算,实现TSFNN模型前件网络结构的辨识;后件网络与标准T-S模糊神经网络模型相比增加了隐含层,进一步提高了模型的全局逼近性能。试验结果表明,ATS-FNN模型的各项指标均优于标准的T-S模糊神经网络(STS-FNN)模型。

(4) 提出一种基于机器视觉测量加工误差反馈的ATS-FNN模型,设计以双32位MicroBlaze处理器为核心、小波变换等专用IP核为辅助的柔性材料轨迹加工变形补偿硬件控制器。通过机器视觉测量加工轨迹的几何尺寸,轨迹加工偏差经PID调节后对ATS-FNN模型预补偿值进行修正,解决了柔性材料轨迹加工精度受工件厚度、进给速度、加工轨迹图案变化等影响的问题;硬件控制器中双处理器基于消息邮箱通信机制的协同工作,加快图像处理任务的速度;专用IP核以FSL总线协处理器接入MicroBlaze处理器的多核数据通信方式,较好地解决了IP核与主处

理器之间总线和内存数据传输滞后的问题。试验结果表明,带视觉测量反馈环节的引入使得加工误差即使在加工条件改变时也只会产生较小的波动;ATS-FNN 控制器采用双处理器协同工作方式,有助于加快控制器的计算速度。

(5) 将柔性材料加工变形影响理论方法应用于柔性薄膜卷对卷(R2R)加工影响因素分析,以柔性薄膜 R2R 加工为例,对 R2R 制造系统各工位关键部件进行动力学分析,分别建立放卷辊、收卷辊、驱动辊和导向辊的物理模型,对 R2R 加工过程柔性薄膜变形进行仿真,分析张力波动对变形的影响。

(6) 结合柔性材料加工变形补偿技术的应用,分别介绍带反馈 ATS-FNN 控制器的绗缝加工系统、基于开环 ATS-FNN 控制器的电脑弯刀机加工系统,以及柔性皮革材料振动切割装备的设计与应用。根据实际绗缝加工提取加工变形影响因素,基于 ATS-FNN 控制器设计了绗缝加工系统的硬件结构,开发了花模打版、控制软件。应用结果表明,基于 ATS-FNN 控制器的绗缝加工系统的加工轨迹夹角误差 f_a 、直线度误差 f_l 分别比基于 PC+NC 控制器的绗缝加工系统减少 32.9%、36.1%,较好地解决了绗缝轨迹加工误差随着柔性材料厚度增加而增大的问题;基于开环 ATS-FNN 控制器的电脑弯刀机加工系统的技术参数已经达到送料精度 $-0.015 \sim 0.015\text{mm}$ 、最大折弯角度 130° 、最大弯曲半径 200mm 。设计用于柔性材料高速切割的高速振动切割模组,切割柔性材料厚度范围为 $0.5 \sim 6.0\text{mm}$,切割加工的角度误差为 $-1.5^\circ \sim 1.5^\circ$,当振动频率切割为 16000 次/min 时,切割速度可达到 120cm/s ,这表明加工变形控制基础理论在柔性材料加工系统的应用已取得较好的应用效果。

本书涉及的主要内容是在国家自然科学基金项目(51675109, 51205069)、广东省自然科学基金项目(2017A030313308, S2013010013288)、广东省佛山市科技创新专项项目(2015IT100102)及广东省科技计划项目(2016B010124002)等资助下完成的。

本书能够顺利完成,要感谢与我一起开展国家自然科学基金项目、广东省自然科学基金项目研究的合作伙伴;此外,卢绮雯参与了本书第 3 章、第 5 章部分内容的撰写和数据整理工作,刘夏丽参与了第 4 章、第 6 章部分内容的撰写和全书文稿整理工作,周娜、金拓和陈嘉源参与了第 2 章、第 7 章部分内容的撰写和实验数据的整理工作,在此表示感谢;感谢美国密歇根大学倪军教授的支持和鼓励;感谢广东瑞洲科技有限公司郭华忠高级工程师的帮助;感谢我的家人对我工作的默默支持;最后对所引用文献的作者表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,请各位读者批评指正。

邓耀华

2018 年 5 月于广州

主要符号表

a	柔性件长度
b	柔性件宽度
c	模糊划分类别数
t	柔性件厚度
n	主轴转速
$p(x_p, y_p)$	柔性件加工集中的受力作用点
v	插补速度
u_{iq}	G_i 的类别中心
w_{jk}^r	第 r 个子网络第 j 层与 k 连接权值
w_{ij}^r	第 r 个子网络第 i 层与 j 连接权值
z_i	决策表第 i 个对象
A_{px}	x 轴定位精度
A_{py}	y 轴定位精度
A_{pz}	z 轴定位精度
A, P	条件属性集
$AS(a, P; D)$	属性重要度
$\tilde{A}, \tilde{B}$	条件属性 A 、决策属性 D 在论域上的划分
$\tilde{A}_k, \tilde{B}_l$	$\tilde{A}, \tilde{B}$ 的条件概率
C_I	信息熵约简算法终止阈值
C_m	柔性件装夹方式
C_p	柔性件装夹位置
D	决策属性集
D_{type}	图元类型
$D_{ikM_i}^2$	平方内积范数
E	弹性模量
E_σ	模糊划分质量指标参数

F_z	z 方向作用力
F_i	协方差
G_i	第 i 个模糊划分类别
$\text{Gu}_{ji}(x_{kj})$	x_k 对 G_i 的隶属度函数
Ga_i	第 i 条模糊规则适应度
$\overline{\text{Ga}}_i$	归一化模糊规则适应度
I_m	插补方法
$I(A;D)$	条件属性 A 与决策属性 D 的互信息
$\text{Ind}(A), \text{Ind}(D)$	条件属性 A 、决策属性 D 的不可分辨关系
$\bar{J}$	模糊聚类目标函数
L_{deep}	进给深度
L_{step}	加工步长
$\text{Red}_D(A)$	变形决策知识精简集
S	加工补偿输出量集合
X	加工变形影响量集合
β	模糊加权幂指数
$\epsilon > 0$	聚类算法终止允许误差
γ	隶属度降低速度系数
μ	泊松比
θ_{angle}	进给偏角
θ_D	图元夹角
θ_P	加工方向角
σ_{iq}^2	G_i 的类别对应方差

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 柔性材料加工控制基本过程	1
1.2 柔性材料加工过程控制评价指标	3
1.3 柔性材料加工变形补偿控制研究进展	5
1.3.1 柔性材料加工过程 MIMO 建模方法	5
1.3.2 柔性材料加工轨迹视觉测量方法	14
1.3.3 智能控制系统软硬件协同设计与硬件加速方法	15
参考文献	17
第 2 章 柔性材料加工变形影响因素提取方法	25
2.1 柔性材料加工变形力学建模与变形影响因素分析	25
2.2 基于粗糙集及信息熵约简的柔性材料加工变形决策知识提取	36
2.2.1 柔性材料加工变形决策表的粗糙集表示	37
2.2.2 变形影响因素属性重要度的信息熵计算方法	39
2.2.3 基于信息熵的柔性材料加工变形决策表 DDT 的约简	41
2.3 信息熵约简方法与 Pawlak 约简方法等的比较	42
2.4 基于粗糙集的柔性材料加工变形决策知识提取实例	43
2.5 基于层次分析法的柔性材料加工变形影响因素提取	54
2.5.1 加工变形影响因素提取的层次分析法思路	54
2.5.2 加工变形影响因素提取的层次模型设计	55
2.5.3 层次单排序和层次总排序权变量计算推导	56
2.5.4 基于层次分析法的加工变形影响因素提取试验	58
2.6 本章小结	71
参考文献	72
第 3 章 柔性材料加工变形补偿模糊神经网络建模	73
3.1 柔性材料加工变形补偿预测建模原理	73
3.1.1 自适应模糊聚类方法数学基础	73
3.1.2 T-S 模糊神经网络数学基础	74

3.1.3 柔性材料加工变形补偿模糊预测模型	75
3.2 基于 AFCM 与 TSFNN 的柔性材料加工变形补偿预测建模实现 ...	77
3.2.1 柔性材料加工变形补偿预测输入数据的 AFCM 划分	77
3.2.2 柔性材料加工变形补偿预测的 TSFNN 构建	79
3.3 柔性材料加工变形补偿预测模型性能分析	83
3.3.1 加工变形补偿预测模型构建	84
3.3.2 预测模型的性能分析	92
3.4 加工试验	95
3.5 本章小结	99
参考文献	100
第 4 章 基于机器视觉的柔性材料加工轨迹提取方法	101
4.1 柔性材料加工轨迹测量指标与轨迹图像提取方法概述	101
4.2 基于主动轮廓模型的柔性材料加工轨迹提取方法	102
4.2.1 柔性材料加工轨迹主动轮廓 R-S 提取的数学模型	102
4.2.2 基于有限差分法的柔性材料加工轨迹轮廓曲线提取	105
4.3 试验测试	111
4.4 本章小结	118
参考文献	119
第 5 章 柔性材料加工变形补偿嵌入式多核协同控制技术	120
5.1 带反馈的柔性件加工变形补偿闭环控制方法	120
5.1.1 基于视觉测量反馈的柔性材料加工变形补偿控制系统框架	120
5.1.2 柔性材料加工变形补偿 ATS-FNN 控制器的硬件实现原理	121
5.2 柔性材料加工变形补偿嵌入式多核控制器关键技术	125
5.2.1 ATS-FNN 控制器的加工轨迹夹角测量技术	126
5.2.2 ATS-FNN 控制器的 TSFNN 计算 IP 核设计	139
5.3 加工变形补偿多核控制器测试	146
5.4 本章小结	152
参考文献	153
第 6 章 柔性材料高速振动切割加工控制方法与应用	154
6.1 柔性材料高速振动切割原理	154
6.2 柔性材料高速振动切割模组机构设计方法	156
6.2.1 刀头部分机构设计	156
6.2.2 机头部分机构设计	158
6.3 性能测试与应用实例	159

6.4 本章小结	162
参考文献	163
第7章 柔性材料 R2R 加工变形力学建模与影响因素分析	164
7.1 柔性材料 R2R 加工力学建模与张力影响因素分析	164
7.1.1 柔性材料 R2R 制造系统结构模型	164
7.1.2 柔性材料 R2R 制造系统卷辊张力表达方程	166
7.2 柔性材料 R2R 加工张力波动仿真与分析	170
7.3 本章小结	173
参考文献	173
第8章 柔性材料加工智能控制应用实例	175
8.1 带反馈 ATS-FNN 控制器在绗缝加工系统中的应用实例	175
8.1.1 基于 ATS-FNN 控制器的绗缝加工系统	176
8.1.2 基于 ATS-FNN 控制器的绗缝加工系统应用效果	180
8.2 开环 ATS-FNN 控制器在电脑弯刀机加工系统中的应用	185
8.2.1 基于开环 ATS-FNN 控制器的弯刀机加工系统设计	186
8.2.2 项目完成情况	187
8.3 柔性材料加工智能控制技术在皮革切割装备的应用	191
8.4 本章小结	197
参考文献	198

第 1 章 绪 论

1.1 柔性材料加工控制基本过程

柔性材料是一种常见的加工材料,在航空航天、高铁、汽车、新能源材料和纺织轻工制造等行业有着广泛的应用。柔性件加工是在单层或者由多层柔软物组合成的工件上进行各种复杂图形的加工,在表面上浮现出凹凸不平的立体图案或者组合成一种新材料的过程。柔性加工工件具有柔软性,当受到外力时,极易发生变形。工件材料的特性决定其难以用材料力学方法进行变形分析,变形不确定性明显,而工件厚度的不均匀也使得工件受力发生变形的情况复杂化^[1]。柔性材料加工过程控制就是解决以上复杂问题的重要步骤。

因此,柔性材料加工过程控制一般指在充分考虑工件材料变形、加工形状、工艺及加工伺服系统性能等的基础上,获得加工过程控制规则,并确定控制推理机制,采用机器视觉测量等辅助手段,实现复杂的加工过程轨迹变形补偿控制^[2,3]。根据流程先后,柔性材料加工控制过程可分为控制规则获取、控制推理、测量反馈和控制参数在线调整等环节。

1. 控制规则获取环节

控制规则获取环节主要将与加工控制过程有关的各种控制信息归一化处理并输入到模型中进行训练得到加工控制规则。控制信息主要来于专家知识或在线观测数据。从专家知识库中获得的控制规则,可在未知环境下仿效专家智能实现控制,但难以随加工环境变化对控制规则做出快速调整;通过观测数据的训练得到的当前加工控制规则,其模型参数可适应加工状态变化。在这个环节中,规则属性约简非常必要,去掉冗余和冲突规则,可降低决策推理的复杂性。

2. 控制推理环节

控制推理环节是在控制规则获取基础上,通过似然推理获得控制模型输入输出之间的映射关系矩阵,由集合计算求得系统输出控制向量,再经反变换将控制向量转换成加工伺服系统可以执行的精确量。在这个过程中,集合计算通常由专用高性能片上系统(system on chip, SoC)来完成。推理方法既要求能确保有效信息的完整性,又不消耗过多时间,这是保证控制系统准确性和快速性的基础。

3. 测量反馈环节

测量反馈环节的目的在于通过测量被控量的实际信息,作为消除被控量与输入量之间的偏差以及调整控制规则的依据。加工轨迹实时测量是反馈控制环节的难点。

4. 控制参数在线调整环节

控制参数在线调整环节主要是为了适应加工过程状态的变化并解决控制指标偏离问题,对测量反馈环节获得的数据进行在线学习训练,根据实际输出误差实时地调整控制器参数,优化系统的控制性能。

图 1-1 为柔性材料加工过程控制流程图。系统状态初始化正常后,执行机构先进入待机状态,接着进入加工图形选择、控制规则获取、控制推理、确定控制、测量反馈和在线调整的交替循环过程。

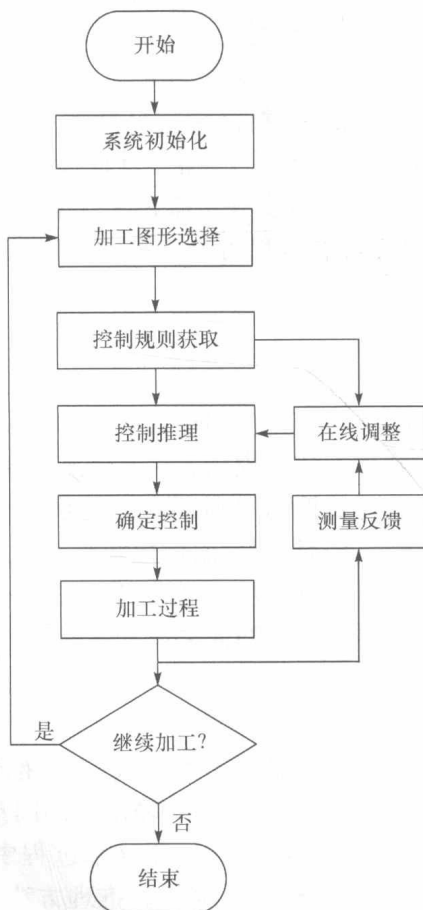


图 1-1 柔性材料加工过程控制流程

1.2 柔性材料加工过程控制评价指标

柔性材料加工性能的评价,应该包括能反映加工轨迹形状的准确性、加工控制的快速性等方面的内容,同时考虑到柔性材料加工由许多直线加工、圆形加工单元组成,还应包括加工轨迹直线度、加工轨迹圆度、加工轨迹夹角误差和图元最小加工时间^[4,5]等主要指标。

1. 加工轨迹直线度 f_l

f_l 为衡量柔性材料加工中实际加工直线偏离理想直线程度的评价指标,反映一个平面内的直线形状偏差、空间直线在某一方向上的形状偏差和空间直线在任一方向上的形状偏差。图 1-2 给出了 f_l 的最小二乘法 (least square method, LSM) 评定方法, L_{LS} 是通过 LSM 将被测要素上各点进行拟合得到的评定基线。在给定平面内, f_l 为平行于 L_{LS} 、包容实际被测要素且距离为最小的两直线之间的距离,如图 1-2(a) 所示;而在任意方向上, f_l 为与轴线平行、包容实际被测要素且直径为最小的圆柱面的直径,如图 1-2(b) 所示。

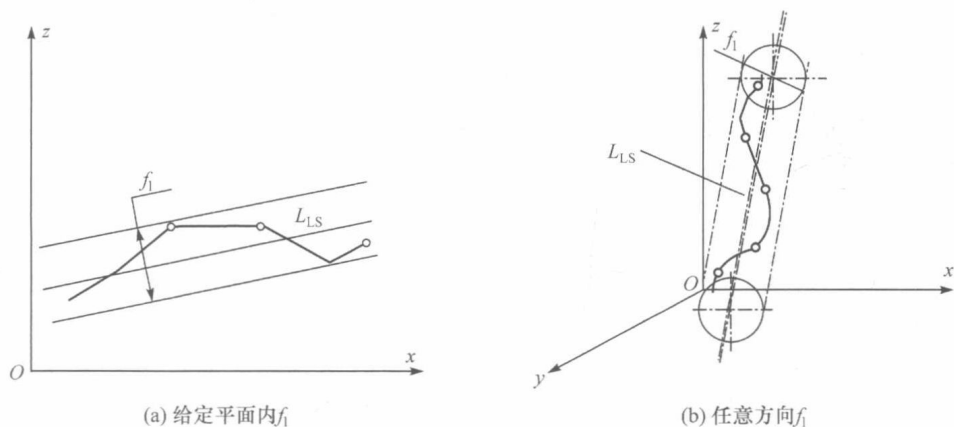
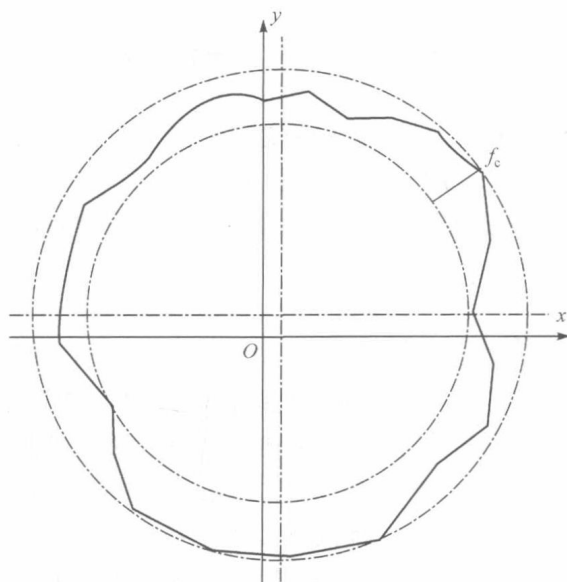


图 1-2 f_l 的 LSM 评定

2. 加工轨迹圆度 f_c

f_c 指同一正截面上实际加工轮廓对其理想圆的变动量,反映了加工轨迹不圆整的程度。用两个理想的同心圆包容实际轮廓圆,实现最小区域的两个同心圆半径之差即 f_c (图 1-3)。

图 1-3 f_c 的评定

3. 加工轨迹夹角误差 f_a

f_a 是柔性材料加工中图元连接处夹角准确度的评价指标,指实际加工夹角与期望角度之间的误差值。图 1-4 列出三种不同图元连接方式(直线-直线式、直线-圆弧式、圆弧-圆弧式)的夹角。

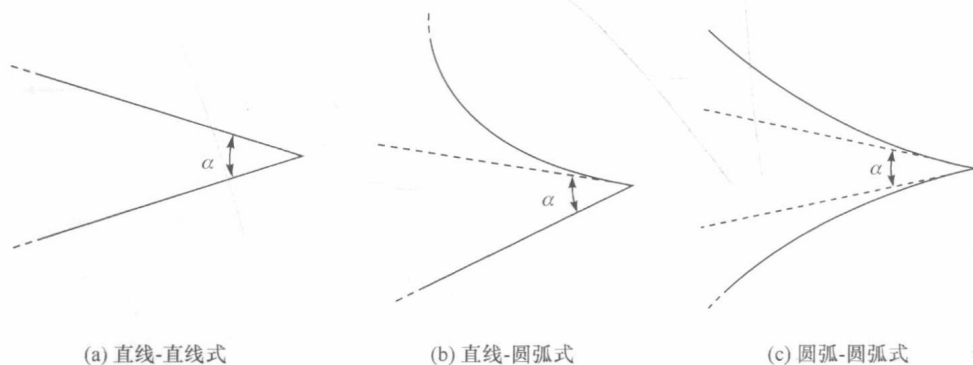


图 1-4 图元夹角类型

在实际加工中, f_a 可用来衡量直角或尖角的加工效果, f_a 越小说明夹角加工水平越接近理想效果, f_a 越大则说明夹角加工处出现圆角或钝角的情况。 f_a 定义为

$$f_a = \hat{\alpha} - \alpha \quad (1-1)$$

式中, $\hat{\alpha}$ 是夹角期望加工值; α 是实际夹角的大小。

4. 图元最小加工时间 t_p

t_p 是系统加工快速性的衡量指标, 指加工系统完成一个最小单位的图元轨迹所用的时间, 包括控制器的响应时间 t_1 、加工进料时间 t_f 以及完成一次加工循环的时间 t_m 。

除上述主要指标外, 能加工工件厚度以及多次跨步加工能力也是考虑的指标。在柔性材料加工中, 工件越厚则受力变形越严重, 加工轨迹的变形补偿则越难控制; 多次跨步加工能力反映了系统能加工图形的多样性, 如独立加工图形、内嵌加工图形(独立图形内部包含子图形)等。柔性材料加工过程的工件变形不确定性和加工图形多样性等特点决定了其控制过程必须具备较好的自适应性、智能性, 可通过自动调整或重构等手段来适应工况、减少各种因素的影响, 通过在线自学习优化控制策略保证控制系统的准确度。

从上述内容可以看出, 柔性材料加工变形由多个因素造成, 在加工过程中可通过调节多个相关变量来减少加工误差。因此, 柔性材料加工变形补偿控制实质上是一个多输入-多输出(multiple input multiple output, MIMO)过程^[6], 而建立变形影响因素与补偿输出量之间的耦合关系是进行补偿控制的关键之一。

1.3 柔性材料加工变形补偿控制研究进展

通过分析柔性材料加工控制过程及加工评价指标可知, 要提高柔性材料的加工精度及系统性能, 加工过程变形补偿控制、加工轨迹在线测量反馈以及加工控制模型的自适应性和智能化是研究的关键。本节将从柔性材料加工过程 MIMO 建模方法、柔性材料加工轨迹视觉测量方法和智能控制系统软硬件协同设计与硬件加速方法三方面讨论与柔性材料加工变形补偿控制技术相关的国内外研究情况。

1.3.1 柔性材料加工过程 MIMO 建模方法

根据加工控制过程性质的不同以及建模对样本数量要求的差异, 下面从回归分析 MIMO 建模、时间序列 MIMO 建模和基于人工智能方法的 MIMO 建模等方面阐述柔性材料加工过程建模方法的研究情况。

1. 回归分析 MIMO 建模

回归分析法是建立在数理统计原理基础上, 从试验观测数据出发, 来确定自变

量与因变量之间函数关系的方法^[7]。回归分析 MIMO 建模就是要建立多个自变量与多个因变量之间的定量函数关系。

典型的回归分析 MIMO 模型的数学定义为 $Y = X \times \beta + \varepsilon$, 即

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1m} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \cdots & \beta_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \beta_{n1} & \beta_{n2} & \cdots & \beta_{nm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \cdots & \varepsilon_{1n} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \cdots & \varepsilon_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_{n1} & \varepsilon_{n2} & \cdots & \varepsilon_{nn} \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

式中, 因变量 Y 是自变量 X 和误差项 ε 的线性函数; β 为 $n \times m$ 阶回归系数矩阵。

建立回归模型需要确定回归系数矩阵 β 、回归模型显著性检验、拟合性校验等环节, 其中 β 参数估计是关键步骤, 且多基于最小二乘法原理。下面讨论比较有代表性的偏最小二乘回归 (partial least squares regression, PLSR)、最小二乘支持向量回归 (least squares support vector regression, LS-SVR) 两种回归分析 MIMO 建模方法。

1) 偏最小二乘回归建模方法

PLSR 是由瑞典学者 Wold 等最先提出的适合于各自变量集合内部存在较高相关性的 MIMO 回归建模方法, 该方法通过对系统数据进行有效的分解、筛选, 提取对因变量解释性最强的综合变量用于模型的建立^[8]。针对基本 PLSR 方法存在的非线性处理能力不足、计算速度慢、稳健性不高等问题, 许多学者结合不同要求对 PLSR 方法进行完善及提高, 如文献[9]提出了用于非线性建模的神经网络-偏最小二乘回归 (neural network PLSR, NNPLSR) 方法; 文献[10]和文献[11]提出了适用于实时过程建模的核函数-偏最小二乘回归 (kernel PLSR, KPLSR) 方法; 文献[12]和文献[13]介绍了具有较强跟踪能力的滑动窗口递归-偏最小二乘回归 (recursive PLSR, RPLSR) 方法; 文献[14]介绍了具有较高算法稳健性的遗传-偏最小二乘回归 (genetic algorithm PLSR, GAPLSR) 方法。

KPLSR 方法以运算速度快且不影响估计精度等特点, 在实时性要求较高的 MIMO 建模中受到越来越多的重视。KPLSR 方法由瑞典于默奥大学 Lindgren 等于 1996 年首次提出, 1997 年加拿大麦克马斯特大学 Dayal 等证明在进行 Kernel 递推运算时只需更新其中一个自变量或因变量矩阵, 这使新 KPLSR 算法的运算速度大大提高^[15,16]; 瑞典阿斯利康研究中心的 Abrahamsson 等研究样本数量巨大且变量数目较多情况下, 既能快速处理样本分类又可保证辨识算法实现的 KPLSR 新方法^[17]; 文献[18]提出一种新的 KPLSR 方法, 该方法不进行迭代计算而是直接抽取主元, 并根据统计学习理论采用实际风险的性能指标, 既有助于核函