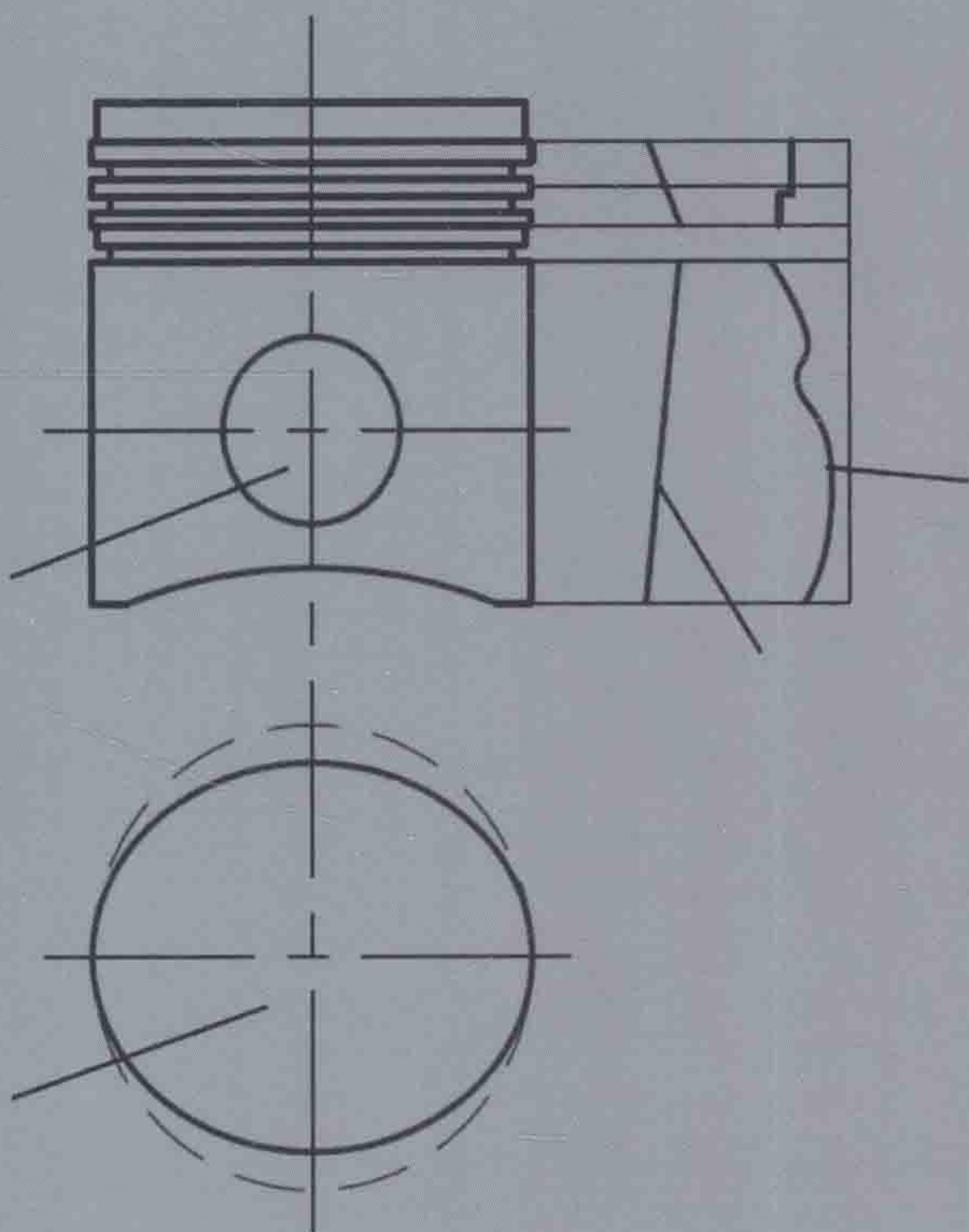


曹荣敏 郑冬 周惠兴 著

Cao Rongmin Zheng Dong Zhou Huixing

非圆切削衍生式数控系统设计及 数据驱动控制理论与方法研究

Research on Data-Driven Control Theory
Based Extracted CNC System Design for Noncircular Turning



清华大学出版社



非圆切削衍生式数控系统设计与 数据驱动控制理论与方法研究

Research on Data-Driven Control Theory
Based Extracted CNC System Design for Noncircular Turning

曹荣敏 郑冬 周惠兴 著

Cao Rongmin Zheng Dong Zhou Huixing

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

随着现代工业对非圆切削高加工精度和高加工效率的要求,获得满意跟踪性能且产生高精度的动态切削运动成为必然。衍生式数控系统设计思想是在普通数控切削系统的基础上衍生一个高速直线伺服电机单元,用于驱动刀具,并与原系统协调工作。

本书通过对非圆切削衍生系统数据驱动控制方法的分析、设计、仿真及实验研究,展示了基于数据驱动的多种控制方法对给定轨迹的高精度快速跟踪性能,证明数据驱动控制方法的实际应用价值,为读者提供了非圆切削数控系统的创新设计思想、设计方法和控制方法。本书主要内容包括非圆切削衍生式系统的设计及研究、刀具伺服系统的音圈直线电机的设计及控制算法的应用研究、非圆切削衍生式系统的数据驱动控制理论与方法研究、衍生式数控系统的实验研究等。

本书集理论与实际于一体,可使读者系统学习非圆切削控制系统的设计,掌握实用的控制和实现方法;可作为从事自动控制学科与机电一体化工程学科及相关学科应用研究的科研人员、从事机电综合控制系统开发的工程技术人员使用,也可作为高校相关专业的教师、研究生、高年级本科生阅读和参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

非圆切削衍生式数控系统设计及数据驱动控制理论与方法研究/曹荣敏,郑冬,周惠兴著. —北京:清华大学出版社,2017(2017.5重印)

ISBN 978-7-302-45648-3

I. ①非… II. ①曹… ②郑… ③周… III. ①数控切削—研究 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 270077 号

责任编辑:梁 颖

封面设计:常雪影

责任校对:李建庄

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:虎彩印艺股份有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:13

字 数:227 千字

版 次:2017 年 1 月第 1 版

印 次:2017 年 5 月第 2 次印刷

定 价:79.00 元

产品编号:069771-01

前言

非圆截面零件广泛应用于汽车、生物、医学、航空、航天等机械设备,随着现代工业对非圆车削的高加工精度和高加工效率的要求,获得参考轨迹的满意跟踪性能且产生高精度的动态切削运动成为必然。非圆切削车床的关键部件之一是径向进给系统,而非圆截面零件因为其独特的形状特征,给机械加工带来困难,型线越复杂,车削速度越高,对进给系统的要求就越高。高系统传动精度、高切削频率响应能力、高刚性和抗动态负载的能力是零件截面型线不失真的保障。制造业是经济结构战略性调整的推动力,是国民经济高速增长的发动机,是以信息化带动和加速工业化的主导产业。

本书采用的数据驱动控制方法是控制器设计不包含受控过程数学模型信息,仅利用受控系统的在线和离线 I/O 数据以及经过数据处理而得到的知识设计控制器,并在一定的假设下,有收敛性、稳定性保障和鲁棒性结论的控制理论与方法。数据驱动控制(Data-Driven Control)最早来源于计算机科学领域,虽然在控制领域的研究还处于萌芽阶段,但已得到国内外控制理论界的高度重视。自 2002 年美国召开题为“IMA Hot Topics Workshop: Data-driven Control and Optimization”的研讨会开始,国内也迅速开展了基于数据的控制、决策、调度与诊断的研究。2010 年 11 月,在北京召开的“基于数据的优化、控制与建模”国际学术研讨会上,柴天佑院士谈到“控制科学的研究应多注重解决实际问题,而基于数据的优化和控制正是面向实际应用提出的。中国的制造业非常发达,基于数据的优化和控制方法研究在国民经济发展中大有用武之地”。围绕北京经济、社会发展的重点科技问题,北京市科学技术委员会于 2011 年 9 月发布了“北京市‘十二五’时期科技北京发展建设规划”,规划第五部分“推进科技振兴产业工程,引领产业结构优化升级”的主题之一就是高

端装备制造产业,其中包括开展高档、专用数控装备及相关技术研发、应用及产业化。在由 139 位来自企业、研发机构、高校以及国外专家分析得出的未来 15 年先进制造领域对我国产业发展最重要的 14 类核心技术中,高档数控机床及基础制造装备关键技术被列为第一项。而该数据驱动控制技术的实现,可进一步推动北京市数控产业关键技术的自主创新和技术改造,降低高端数控机床的价格,推动控制工程学科与数字化制造学科的交叉,具有重要的理论与工程实践价值。

衍生式数控系统设计思想是在普通数控切削系统的基础上衍生一个高速直线伺服电机单元,用于驱动刀具,并与原系统协调工作。

本书主要对非圆车削数控系统的构成原理,衍生式数控系统结构的控制机理及特性进行了研究,基于数控车床系统状态机模型实现了系统的同步控制。对实时嵌入式软件的设计方法进行了研究,提出了时间触发分层有限状态机实时嵌入式软件设计模式,建立了衍生控制器软件的分层状态机模型,基于有限状态机开发了驱动程序、子功能模块和同步控制模块,完成了衍生控制器的软件开发。

本书通过对非圆切削衍生系统数据驱动控制方法的分析、设计、仿真及实验研究,展示了基于数据驱动的多种控制方法对给定轨迹的高精度快速跟踪性能,证明数据驱动控制方法的实际应用价值,为读者提供了非圆切削数控系统的创新设计思想、设计方法和控制方法。

本书主要内容包括非圆切削衍生式系统的设计及研究、刀具伺服系统的音圈直线电机的设计及控制算法的应用研究、非圆切削衍生式系统的数据驱动控制理论与方法研究、衍生式数控系统的实验研究等。目前,关于非圆切削系统的设计及控制方法方面的较高水平的学术论文均有发表(例如清华大学王先逵、吴丹团队),数据驱动控制方法理论研究及应用的论文及专著也有出版(例如侯忠生,金尚泰,科学出版社,2013;曹荣敏,国防工业出版社,2012),但就非圆切削衍生系统设计与数据驱动控制方法研究的专著目前尚未见,通过该专著的出版将数据驱动控制方法在非圆切削方面的应用进行系统的讲解,以供该领域研究的学者系统学习和应用。

本书是在北京市自然科学基金项目(编号:4142017)“数据驱动控制方法及其在直线电机精密运动控制中的应用”和国家重大科技专项(项目号:2011ZX04002-132)“CK9555 大功率船用柴油机活塞加工用变椭圆车床”的支持下完成的,是基于上述项目研究的成果;根据北京信息科技大学曹荣敏教授、南阳理工学院机械与汽车工程学院郑冬博士及中国农业

大学周惠兴教授 3 位作者及其合作团队多年来在非圆切削和数据驱动方面的研究内容以及这些领域的最新发展趋势进行选题。值得特别提出的是,在项目研究期间本书作者之一郑冬博士在安阳机床厂设备现场调试过程中付出了艰辛的劳动。特别感谢北京交通大学侯忠生教授和金尚泰副教授,没有他们在理论方面的热心指导和帮助,作者是不可能完成此书的;非常感谢新加坡国立大学 K. K. Tan 教授和清华大学王先逵教授给予的关键性建议;感谢安阳机床厂对研究工作和现场调试工作给予的大力支持和合作,感谢北京信息科技大学 4 位硕士研究生赵云杰、代军委、齐京升和高彬彬同学在本书科研工作、整理和录入等方面付出的辛勤劳动,感谢中国农业大学刘天宇博士和王磊硕士对本书的支持和贡献。另外,还要感谢中国农业大学精密工程研究中心研究团队的全体合作者们给予作者各方面的大力协助;同时感谢清华大学出版社对本书出版给予的大力支持。

由于作者理论水平和实践经验有限,书中难免有不妥和不完善之处,恳请广大读者提出宝贵意见。

著 者

2016 年 9 月

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	数据驱动衍生式非圆切削数控系统研究背景及意义	1
1.1.1	研究意义	1
1.1.2	国内外研究现状及背景	2
1.1.3	应用方向及应用前景	4
1.2	非圆活塞数控车床的研究现状	4
1.2.1	国内研究现状	4
1.2.2	国外研究现状	5
1.3	非圆活塞车床控制系统概述	6
1.3.1	非圆活塞切削原理	6
1.3.2	非圆活塞车床控制系统性能指标确定	12
1.4	本章小结	17
第 2 章	衍生式数控系统设计及控制器开发	19
2.1	衍生式数控系统结构及同步控制	19
2.1.1	衍生式数控系统结构	19
2.1.2	衍生式数控系统的子系统	26
2.1.3	衍生式数控系统的同步控制	34
2.2	衍生控制器硬件设计	39
2.2.1	编码器接口电路	39
2.2.2	D/A 输出电路	40
2.2.3	RS-232 接口电路	43
2.2.4	A/D 转换电路	43

2.2.5	数字 I/O 电路	44
2.3	衍生控制器软件设计	46
2.3.1	时间触发模式	46
2.3.2	分层有限状态机	49
2.3.3	时间触发的分层有限状态机	53
2.3.4	衍生控制器软件总体设计	54
2.4	本章小结	59
第 3 章 伺服系统直线音圈电机的设计及试验研究		61
3.1	非圆切削刀具进给伺服系统概述	62
3.2	直线音圈电机运行原理	64
3.2.1	电磁原理	65
3.2.2	电压平衡方程	66
3.2.3	动力学原理	66
3.3	直线音圈电机优化计算及机械设计	67
3.3.1	优化方法概述	68
3.3.2	电机优化计算	70
3.3.3	电机机械设计说明	75
3.4	非圆切削刀具进给伺服直线音圈电机试验研究	79
3.4.1	电机漏磁及静态力测试	79
3.4.2	电机驱动器调试试验	84
3.4.3	电机运动控制试验	92
3.5	本章小结	100
第 4 章 非圆切削刀具进给伺服系统设计与建模		101
4.1	非圆切削直线电机伺服驱动与控制关键技术	101
4.1.1	伺服驱动回路硬件配置	102
4.1.2	驱动方式选择	102
4.1.3	直线伺服进给系统模型分析与建立	102
4.1.4	数据驱动控制算法的实现	102
4.1.5	接口与定义问题	103
4.2	刀具进给直线伺服控制系统实验平台	103
4.2.1	音圈直线电机	104
4.2.2	数字伺服驱动器	105

4.2.3	DSP 控制器	106
4.2.4	位置检测部件	106
4.3	刀具进给直线伺服控制系统模型辨识	107
4.3.1	系统数学模型的推导	107
4.3.2	系统模型参数辨识	109
4.4	本章小结	117
第 5 章	数据驱动非圆切削刀具进给伺服系统控制方法研究	118
5.1	无模型自适应预测控制研究	118
5.1.1	概述	118
5.1.2	基于紧格式动态线性化的无模型自适应预测控制 方法	119
5.1.3	基于偏格式动态线性化的无模型自适应预测 控制	127
5.1.4	基于全格式动态线性化的无模型自适应预测 控制	133
5.2	无模型迭代学习控制方法研究	139
5.2.1	无模型迭代学习研究进展	139
5.2.2	基于紧格式动态线性化的无模型自适应迭代学习 控制算法	140
5.2.3	基于偏格式动态线性化的无模型自适应迭代学习 控制算法	145
5.2.4	基于全格式动态线性化的无模型自适应迭代学习 控制算法	151
5.3	迭代学习与无模型预测组合控制研究	155
5.3.1	基于紧格式线性化的无模型预测控制算法 研究	155
5.3.2	基于紧格式线性化的迭代学习与无模型预测控制 组合算法研究	158
5.4	迭代学习与 PID 复合控制方法研究	160
5.5	数据驱动非圆切削刀具进给系统控制方法应用研究	167
5.5.1	无模型自适应控制方法应用研究	167
5.5.2	PID 控制方法应用研究	171
5.5.3	无模型自适应预测控制应用研究	173

5.5.4	改进重复控制与 PI 复合控制方法应用研究	175
5.6	本章小结	181
第 6 章	衍生式数控系统的实验研究	182
6.1	衍生式数控系统调试实验	182
6.2	机床样机调试实验	185
6.3	本章小结	187
参考文献		188

第1章

绪 论

1.1 数据驱动衍生式非圆切削数控系统研究背景及意义

1.1.1 研究意义

非圆截面零件广泛应用于汽车、生物、医学、航空、航天等机械设备中,随着现代工业对非圆切削的高加工精度和高加工效率的要求,获得参考轨迹的满意跟踪性能且产生高精度的动态切削运动成为必然。非圆切削车床的关键部件之一是径向进给系统^[1],而非圆截面零件因为其独特的形状特征,给机械加工带来困难,型线越复杂,切削速度越高,对该进给系统的要求就越高。高系统传动精度、高切削频率响应能力、高刚性和抗动态负载的能力是零件截面型线不失真的保障^[2,3]。

直线电机及其伺服驱动控制技术在径向进给系统的广泛应用,使机床的传动结构出现了重大变化^[4-6]。然而在切削过程中,系统承受非线性切削力,刀具振动及其他干扰对系统产生的影响,参数的变化及导轨摩擦力的产生、内部存在的齿槽效应和端部效应等都给直线伺服进给机构的控制带来困难^[7-10],要克服以上问题,除研究和采用高性能的硬件外^[4-6],寻找更优化的控制算法并对其实施有效控制,一直是重要的具有挑战性的研究课题^[11-22]。传统 PID(proportional-integral-differential,比例积分微分)加前馈的控制算法由于缺乏快速抑制扰动的能力已经不能满足越来越高的性能指标要求^[11,12],神经网络控制因仅用受控系统 I/O 数据来设计控制器而得到广泛应用,但需要进行离线与在线系统辨识,计算量

大,且须掌握受控系统的阶数、模型等先验知识^[13-15]。线性二次型最优控制^[16]、 H_∞ 控制^[17]、扰动观测与前馈补偿控制技术^[18]、滑模变结构控制^[19]以及自适应鲁棒控制技术^[20-22]在机床的直接驱动系统设计中得到了普遍重视。采用扰动观测器的方法可以补偿一定带宽内的扰动,但这需要确定系统准确的数学模型。应用自适应鲁棒控制、扰动与模型不确定性观测及其前馈补偿技术、滑模变结构控制技术,虽然使系统对外部扰动和参数摄动不敏感,能够提高电机动态刚度抑制扰动影响,但很难实现对直线伺服系统非线性的完全补偿。而 H_∞ 控制性能取决于加权函数的设计,是基于对象的线性假设,将非线性因素看作系统不确定性进行处理的,同时由于算法的复杂性、控制参数收敛慢,限制了其在实时性要求很高的直线伺服进给系统中的应用。综合以上控制技术各自优势,开展混合型控制方法的研究是目前电机直接驱动关键技术主要的发展趋势^[1]。

本项目采用的数据驱动控制方法是基于闭环系统实测数据而得到的系统运行控制效果,控制器的设计不包含系统任何数学模型信息,仅利用受控系统的在线和离线 I/O 数据以及经过数据处理而得到的知识来设计控制器。在非圆切削中,控制器的设计要达到稳态跟踪精度高、动态响应快、抗干扰能力强、鲁棒性好等要求,上述的基于模型的控制方法受到了挑战,它们不适合处理具有较强未建模动态的非圆切削高精度直线伺服进给系统的控制问题。所以构造高速精密直线伺服进给系统中安全的不依赖于系统模型的控制器对实际应用的成功至关重要^[23]。

鉴于目前技术先进国家虽推出了各种高效能非圆切削数控加工系统,但价格昂贵,本项目将采用衍生式数控技术(extracted CNC (Computer Numerical Control) system, ECNC)^[24-26],衍生式数控系统设计思想为在普通数控切削系统的基础上衍生一个高速直线伺服电机单元,用于驱动刀具,并与原系统协调工作。专用数控系统作为一个独立的部件被应用,其结构和功能不变,而系统的网络和其他扩充功能则由衍生的功能部件承担,衍生的功能部件可相对独立运行。通过自主创新,降低精密数控产品的成本。

1.1.2 国内外研究现状及背景

20 世纪 90 年代以来,欧、美、日各国竞相开发和应用新一代活塞加工车床,加快了活塞车床高速发展的步伐。国内情况是,近年来我国虽然通过产学研、合资合作、引进技术等渠道,使国产数控机床有了明显的进步,却大而不强,且国内受高精度主轴、高频响大推力直线电机等先进功

能部件的性能制约,在速度和精度等两项指标上与国外差距较大,且核心技术仍然掌握在发达国家手中,尤其是在高速度、高精度技术方面差距更大,已影响到国家行业安全。

数据驱动控制(Data-Driven Control)最早来源于计算机科学领域,虽然在控制领域的研究还处于萌芽阶段,但已得到了国内外控制理论界的高度重视^[23]。自2002年美国召开题为“IMA Hot Topics Workshop: Data-driven Control and Optimization”的研讨会开始,国内也迅速开展了“基于数据的控制、决策、调度与诊断”的研究:2010年11月,在北京召开的“基于数据的优化、控制与建模”国际学术研讨会上,柴天佑院士谈到“控制科学的研究应多注重解决实际问题,而基于数据的优化和控制正是面向实际应用而提出的。中国的制造业非常发达,基于数据的优化和控制方法研究在国民经济发展中大有用武之地”;2011年11月在北京举行的控制界最权威的会议“中国自动化大会”和2012年7月在合肥召开的“中国控制会议”已经将“基于数据的建模控制及优化”列为专题;于2013年7月在西安举办的“2013中国控制会议”依然设立了该专题邀请组。这足以说明国内控制界对数据驱动控制理论及应用的重视。

数据驱动典型的控制方法包括PID控制、无模型自适应控制(MFAC, Model-Free Adaptive Control)^[27,28]和迭代学习控制(Iterative Learning Control, ILC)^[29,30]。这3种控制方法已经在很多领域得到了成功的应用和发展^[11,12,31-34],本书将以数据驱动的控制方法为基础展开研究。

由于数据驱动的无模型自适应预测控制中可调参数的选取比数据驱动的无模型自适应控制中的可调参数的选取更具有不敏感性,而可调参数选取可以改变闭环系统的动态性能,因此无模型自适应预测控制(MFAPC)相比于无模型自适应控制(MFAC)具有更加平稳的过渡过程,能够更好地实现快变工业过程的控制。鉴于此,本书将数据驱动的无模型自适应预测控制及其复合控制方法应用在非圆切削系统的控制中,实现高速度高精度控制,无论是在理论上还是在实际应用中都将具有重大的意义。

迭代学习控制(ILC)在设计控制器时不需要事先已知受控系统的数学模型,可以实现对严格重复运作的系统在有限区间上的完全跟踪。本书将迭代学习控制(ILC)与无模型自适应预测控制(MFAPC)进行组合设计并应用到非圆切削刀具伺服控制中,使前馈和反馈优势互补,提高学习收敛的速度和系统跟踪的性能。此控制方案的收敛性分析采用在纵向

学习控制收敛品质(周期运行的收敛速度的定量指标)中引入横向收敛品质(控制策略的跟踪误差以连续的采样点为基准的有限步收敛的定量指标)的概念,以对非周期性扰动的收敛速度进行衡量。

在高精度直线伺服进给系统中,摩擦力(包括静摩擦力、库仑摩擦力、黏滞摩擦力和一些其他效应)会极大地降低传动系统的性能,而摩擦力又无法通过数学方法给出精确的描述,所以摩擦补偿就成为一种常见的控制策略,即引入一个对消项,以消除摩擦力。因为神经网络具有万能逼近特性,所以适合对摩擦这种复杂非线性的不确定现象加以补偿。本书将设计前馈控制、无模型自适应预测反馈控制和非线性神经网络补偿器构成的复合控制器并应用到衍生的非圆切削刀具进给直线伺服系统的控制中,用于补偿非线性摩擦力,提高加工精度。

1.1.3 应用方向及应用前景

制造业是经济结构战略性调整的推动力,是国民经济高速增长的发动机,是以信息化带动和加速工业化的主导产业^[35]。围绕北京经济、社会发展的重点科技问题,北京市科学技术委员会于2011年9月发布了“北京市‘十二五’时期科技北京发展建设规划”^[36],规划第五部分“推进科技振兴产业工程,引领产业结构优化升级”主题之一就是“高端装备制造产业”,其中包括“开展高档、专用数控装备及相关技术研发、应用及产业化”。在由139位来自企业、研发机构、高校以及国外专家分析得出的未来15年先进制造领域对我国产业发展最重要的14类核心技术中,高档数控机床及基础制造装备关键技术被列为第一项^[37]。而本书控制技术的实现可进一步推动北京市数控产业关键技术的自主创新和技术改造,降低高端数控机床的价格,推动控制工程学科与数字化制造学科的交叉,具有重要的理论与工程实践价值。

1.2 非圆活塞数控车床的研究现状

1.2.1 国内研究现状

为了提高中凸变活塞的加工精度及加工效率,国内多所大学及科研院所很早就开始了非圆活塞专用数控车床的研制。其中进行最早的是清华大学王先逵教授的研发团队,早在1988年就研制出了中凸变活塞CNC车床,该车床最先采用数控加工方式进行活塞型线的拟合加工^[38,39]。1993年又研制出TH-1高频响大行程微进给机构,以此机构为

基础,配上普通车床 CA6140,研制出了经济型的非圆截面数控切削系统,该系统可以在主轴转速为 1000r/min 下稳定切削活塞,活塞型线精度为 0.012mm^[40]。1995 年,清华大学分别与广州机床厂、安阳机床厂联合研发了活塞数控车床^[41]。该车床采用清华大学自主研制的 TH-610P 活塞专用数控系统,以普通车床 CA6140 为车床床身,数控系统的主机是工控机 486。1996 年,清华大学与广州机床厂又合作生产了全功能型的数控活塞车床,数控系统采用清华大学自主研制的 TP-952P 系统,该系统除了具有专用的中凸变活塞加工和立体靠模加工功能外,还具有通用的 CNC 功能,在一次装夹中即可完成活塞头部和裙部的加工,有效地减少了因装夹误差而引起的加工误差。

1990 年,长沙国防科技大学研制了由 TP801 单板机控制的样机^[42],在此基础上又推出了 PTC 系列,该系统采用 486 作为主机,活塞的型线数据的输入和修改可以直接在计算机中进行操作。径向进给系统选用直线电机,可加工的最大椭圆度为 1.3mm,Z 轴选用普通伺服电机,将德州机床厂生产的 CKD6150 车床改造成为专用的活塞数控车床,工件的型线轮廓误差为 0.01mm。湖南长沙一派数控设备有限公司,多年一直致力于活塞专用数控车床的研制,截至目前已研制出一系列具有国际先进水平的活塞环、活塞数控加工关键设备和专用设备,为我国的内燃机行业做出了巨大贡献。该公司研制的 ECK2320 数控活塞异形外圆车床,采用运动控制卡控制 Z 轴、X 轴、主轴的运动,X 轴可实现直线插补,X 轴、Z 轴可联动,配置自主研发的直线伺服控制板,采用“一派活塞数控加工控制软件”控制加工。整个机床由工控机控制,Z 轴、X 轴由运动控制卡控制,直线伺服单元由直线伺服控制,输入输出信号由运动控制卡与数字输入卡控制。

虽然国内针对中凸变活塞数控车床进行了大量研究,但由于其推力过小,执行机构还普遍存在着线性和动态特性差、受突加负载的影响较大、机床主轴转速过低等问题,不能很好地保证加工精度,与国外同行业的机床还有较大差距。

1.2.2 国外研究现状

20 世纪 80 年代以后,国外便开始非圆截面数控加工专用车床的研制^[43]。1987 年,美国 CROSS. CO 公司研制出了一套独特的应用于活塞加工的硬件系统和软件系统,也就是软靠模加工系统,此项创新开创了活塞加工的新工艺,标志着活塞加工新时代的到来。此后,CROSS. CO 公

司又推出 PTM-2000T 和 PTM-3000 专用活塞数控车床^[44]。紧接着日本、德国、美国等也相继开展了活塞数控加设备的研发。其中,日本株式会社大隈铁工所研制的 BL9-CAM,主轴转速最高可达 3000r/min,加工精度为 0.005mm。日本龙泽铁工所研制的椭圆形零件数控车床,可加工椭圆度为 25mm 的椭圆形零件,采用了电磁驱动伺服机构作为径向高频响装置来进行椭圆截面的加工进给^[45]。

国外专用活塞数控车床与国内的同类机床相比,其加工精度要高很多,精度一般优于 $10\mu\text{m}$ 甚至 $5\mu\text{m}$,转速一般高于 1500r/min,但价格普遍昂贵,一般在 150~200 万元之间,而且有些国家对此类机床的出口对我国进行严格的限制,以求达到技术垄断。

1.3 非圆活塞车床控制系统概述

研究活塞车床数控系统时必须以项目的技术指标要求为依据和最终实现目标,本章基于北京市自然科学基金项目“数据驱动的衍生式非圆切削数控系统控制理论与方法研究”(项目编号:4142017)和“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项:CK9555 大功率船用柴油机活塞加工用非圆车床(课题编号:2011ZX04002-132)。首先对非圆活塞的切削原理进行分析,根据项目的技术指标要求进行分析计算,最后得到活塞车床数控系统的主要技术指标,作为后续章节的研究依据。

1.3.1 非圆活塞切削原理

1. 非圆活塞的形状

活塞是内燃机的核心部件,它处在高温高压的恶劣工作环境中。由于受到机械压力和高热作用,活塞会产生严重的变形,同时这个变形又是不均匀的。活塞变形后,其裙部与气缸的接触面减小,同时活塞与内燃机气缸之间的间隙也会变得不均匀,如果间隙过大,就会发生敲缸,从而产生较大的噪声和振动。随着内燃机的速度和工作负荷不断提高,近年来活塞的裙部已经很少采用正圆柱、正圆锥等外形,而是普遍设计成异形截面形状。这样活塞在工作环境下就可变形为近似圆形,使活塞和气缸能够保持较大、较均匀的接触面,形成润滑油膜,从而减小活塞工作时磨损、振动和噪声,提高活塞的使用寿命^[46-54]。

目前公认最好的活塞型面是非圆型面^[46,49,53],其形状如图 1.1 所示。

从图 1.1 中可以看到,非圆活塞的横截面是一个椭圆或类椭圆,这个

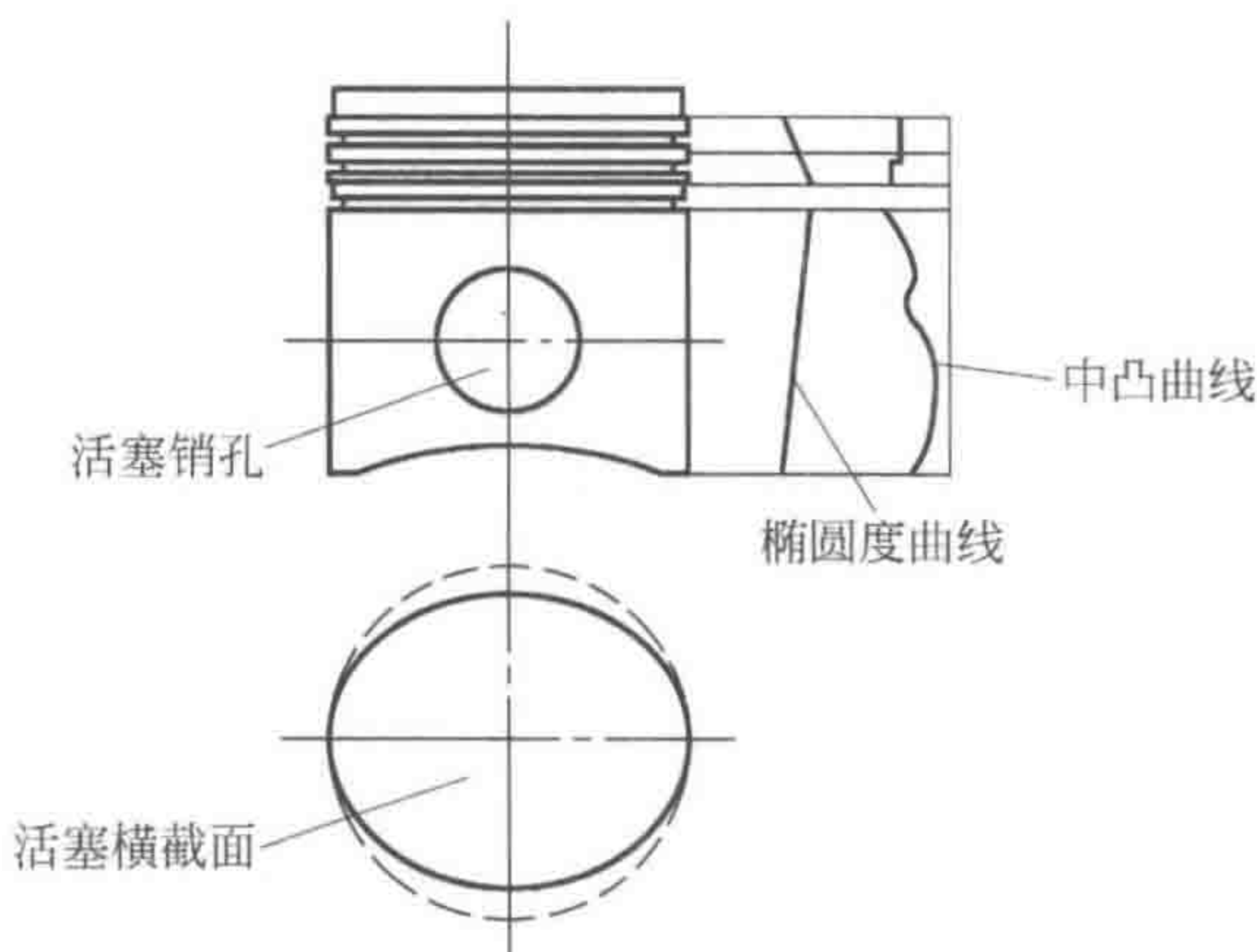


图 1.1 非圆活塞的形状

椭圆的长轴方向与活塞销孔的轴线垂直。横截面椭圆的椭圆度并不是一个固定值,图中的椭圆度曲线表示了横截面椭圆度沿着活塞的轴线方向变化的情况。同时椭圆的长轴也像图中中凸曲线表示的那样沿着活塞的轴向变化,使活塞的纵截面型线成为一条中部外凸的曲线。

非圆活塞的截面形状可以表示为

$$\rho = \frac{D_z}{2} - \frac{G_z}{4}[(1 - \cos 2\theta) + C(1 - \cos 4\theta)] \quad (1-1)$$

式中, ρ 为截面半径; θ 为此半径对应的转角; D_z 为截面长轴的长度; G_z 为截面的椭圆度,即椭圆长轴和短轴的差值;下标 Z 表示长轴长度和椭圆度是沿着活塞的轴向变化的; C 为二次椭圆系数,当 $C=0$ 时,活塞横截面为单椭圆轮廓,当 $C \neq 0$ 时,则为二次椭圆轮廓。

非圆活塞的椭圆度曲线一般为直线,在活塞图纸中一般以端点坐标的形式给出。而中凸曲线一般为不规则曲线,在图纸中通常首先规定一个活塞基准直径 D ,然后以离散点的形式给出若干个高度上截面长轴与基准直径的差值 ΔD_z ,于是 $D_z = D - \Delta D_z$,式(1-1)又可以表示为

$$\rho = \frac{D - \Delta D_z}{2} - \frac{G_z}{4}[(1 - \cos 2\theta) + C(1 - \cos 4\theta)] \quad (1-2)$$

2. 非圆活塞加工的实时性分析

由上述分析可知,在非圆活塞的加工过程中,车刀的运动为高频往复振动,且车刀任意时刻的位移由车床主轴的转角决定。因此,选择合适的执行器驱动刀具实现这个往复振动,并且通过对执行器的精确控制实现它的运动与机床主轴旋转的同步是非圆活塞车床控制系统的设计中的关