

数据驱动运动控制系统 设计与实现

Motion Control System Design
and Implement Based on Data-Driven

■ 曹荣敏 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

数据驱动运动控制 系统设计与实现

Motion Control System Design and
Implement Based on Data - Driven

曹荣敏 著

福建师范大学
图书馆
藏书印记



T1003688

国防工业出版社

· 北京 ·

1003688

图书在版编目 (CIP) 数据

数据驱动运动控制系统设计与实现 / 曹荣敏著. —北京:
国防工业出版社, 2012. 6

ISBN 978 - 7 - 118 - 08145 - 9

I. ①数... II. ①曹... III. ①运动控制 - 系统设计
IV. ①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 127692 号



(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 6½ 字数 166 千字

2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

数据驱动控制方法是指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来设计控制器,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。

运动控制系统主要研究生产和生活中的动力传输和机器与设备的运动控制问题。目前运动控制系统已经广泛应用于机械制造、航空航天、电力、轻工、交通运输、石油化工、农业、家电等领域。

本书以永磁直线电机、三相异步电机以及直流电机为研究对象,通过数据驱动控制方案的设计,实现运动控制中位置速度的跟踪、定位等精密运动控制问题。

本书采用的数据驱动控制方法是基于运动控制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运动控制系统任何数学模型信息,所以它的评价、预报和稳定性检验方法是有发展的研究方向。以往的基于模型的控制理论和方法的评价和预报都是基于系统模型的结果,然而这些评价和预报方法在运动控制系统的实际应用中可靠性不高,因为模型本身就是不准确的,系统鲁棒性差,随动性不佳。所以构造安全的控制器对运动控制系统的实际应用至关重要。

目前,吉林大学的“基于数据的汽车动力总成控制”、华中科技大学的“基于数据的复杂工程系统故障预测与健康管埋”、大连理工大学的“基于数据的冶金能源系统实时预测与优化调度”等,均将学科的前沿研究成果应用于实际工业生产中,并取得了很好

的控制效果。

教学方面,数据驱动的控制方法研究已经在中国农业大学“永磁直线电机的倒立摆创新实验平台设计”中应用,学生可利用创新实验平台,与其他经典和现代控制理论相比较,通过观察控制效果,深刻理解控制理论的应用。

2010年11月6日,中国工程院院士柴天佑教授在“基于数据的优化、控制与建模”国际学术研讨会上讲到:“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。”本书是将数据驱动控制理论方法应用在运动控制的实际领域中,尤其是制造领域的非圆切削控制中,所以本书的出版无疑对理论联系实际,用控制理论解决实际问题具有非常重要的指导意义。

本书是在北京市自然科学基金项目(基金号:3102013)“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”、人才培养模式创新试验区项目“自动化专业应用型人才培养模式改革”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。作者特别感谢两位导师:北京交通大学的侯忠生教授和中国农业大学的周惠兴教授,没有他们的指导和帮助作者是不可能完成此书的。作者也非常感谢新加坡国立大学的许建新教授、K. K. Tan教授、清华大学的王先逵教授、空间技术研究所的倪茂林教授给予的关键性的建议。感谢安阳机床厂对研究工作给予的大力支持和合作,感谢中国农业大学的马荣华、郑东和兴连国三位博士,北京信息科技大学的苏昂和贾贺帅两位硕士的热心支持。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。

目前,数据驱动控制理论已经得到了国内外控制理论界的高

度重视,本书使读者在对数据驱动控制理论的基本方法有初步了解的基础上,学习如何设计控制器,如何进行参数的选择,如何进行实际系统的参数辨识,如何进行实际系统的调试,如何用理论去解释实际调试中的现象,从而解决实际问题。由于作者理论水平和实践经验有限,加之研究工作的局限性,书中难免有不妥之处,恳请广大读者提出宝贵意见。

著者

2012年6月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 数据驱动控制方法研究背景	1
1.2 数据驱动控制研究意义	2
1.3 直线电机在制造业中的研究及应用现状	6
第2章 数据驱动控制理论及控制方法	10
2.1 常用的数据驱动控制方法	11
2.1.1 基于在线数据的无模型自适应控制方法	11
2.1.2 基于离线数据的PID控制方法	11
2.1.3 基于在线和离线数据结合的迭代学习控制方法	12
2.2 无模型自适应控制	12
2.2.1 无模型自适应控制的发展历史与背景	12
2.2.2 基于紧格式线性化的无模型自适应控制的设计	15
2.2.3 基于偏格式线性化的无模型自适应控制的设计	18
2.2.4 基于全格式线性化的无模型自适应控制的设计	21
2.3 迭代学习控制	31
2.3.1 迭代学习控制系统概述	31
2.3.2 迭代学习控制研究现状及应用	33
2.3.3 迭代学习控制过程的表述	34
2.3.4 迭代学习控制的学习律	37
2.4 本章小结	40

第3章 直线电机的无模型自适应控制仿真	42
3.1 永磁直线电机的模型	42
3.2 紧格式线性化的无模型自适应控制在直线电机系统中的仿真研究	43
3.3 偏格式线性化的无模型自适应控制在直线电机系统中的仿真研究	47
3.3.1 投影算法	48
3.3.2 带有时变遗忘因子的最小二乘估计算法	49
3.3.3 经典PID的控制算法	49
3.4 全格式线性化的无模型自适应控制在直线电机系统中的仿真研究	53
3.4.1 情形A:电机空载,无外部扰动和噪声时的投影算法仿真	54
3.4.2 情形B:电机负载,无外部扰动和噪声的投影算法仿真	55
3.4.3 情形C:在情形B基础上,调节参数到最佳的投影算法仿真	56
3.4.4 情形D:电机负载且有白噪声干扰的投影算法仿真	56
3.4.5 情形E:在情形D基础上调节参数到最佳的投影算法仿真	58
3.4.6 情形F:PID控制算法在电机加载和加入白噪声时的仿真	58
3.5 无模型直接自适应广义预测控制及其在直线电机系统中的仿真研究	61
3.5.1 单入单出非线性系统的输出预测方程	62
3.5.2 无模型直接自适应预测控制律算法	64
3.5.3 伪偏导数的估计算法	64
3.5.4 伪偏导数的预测算法	65
3.5.5 无模型直接自适应广义预测控制初值选取及	

参数设定	67
3.5.6 仿真研究	68
3.6 本章小结及展望	74
3.6.1 本章小结	74
3.6.2 展望	75
第4章 数据驱动的直线电机伺服系统设计	76
4.1 直线电机的结构及基本工作原理	76
4.2 永磁同步直线电机伺服系统实验平台	77
4.2.1 直线电机伺服系统工作原理	77
4.2.2 直线电机特性分析	80
4.3 直线电机伺服系统无模型自适应控制 方案设计	81
4.3.1 直线电机伺服驱动器特性测试及分析	84
4.3.2 直线伺服系统无模型自适应控制实现	84
4.4 直线伺服系统复合迭代学习控制方案设计	93
4.4.1 复合迭代学习控制问题阐述	94
4.4.2 复合迭代学习控制鲁棒收敛性分析	99
4.4.3 直线伺服系统复合迭代学习控制器设计	101
4.4.4 直线伺服系统复合迭代学习控制的实现	103
4.5 本章小结及展望	106
4.5.1 本章小结	106
4.5.2 展望	107
第5章 数据驱动的直流电机控制系统设计	108
5.1 数据驱动的直流电机控制系统仿真研究	108
5.1.1 直流电机的无模型自适应控制仿真	108
5.1.2 直流电机的复合迭代学习控制仿真	110
5.2 直流电机无模型自适应控制设计与实现	115
5.2.1 直流电机控制系统硬件设计	115
5.2.2 直流电机的无模型自适应控制实验	118
5.3 本章小结	122

第 6 章 数据驱动的异步电机控制系统设计	123
6.1 控制系统硬件设计实现	124
6.1.1 变频器的选用和连接	125
6.1.2 旋转编码器的选用和连接	126
6.1.3 磁粉制动器的选用及功能	126
6.2 控制系统软件功能设计	127
6.2.1 转速检测	127
6.2.2 PID 控制方法实现	129
6.2.3 无模型自适应控制算法实现	132
6.2.4 定位控制	135
6.2.5 反转时的转速测定	136
6.4 实验结果	137
6.5 本章小结	139
第 7 章 非圆车削系统的控制方法研究	140
7.1 非圆车削刀具进给系统概述	140
7.2 非圆车削直线电机伺服驱动与控制	
关键技术	144
7.2.1 伺服驱动回路硬件配置	144
7.2.2 驱动方式选择	145
7.2.3 直线伺服进给系统模型分析与建立	145
7.2.4 数据驱动控制算法的实现	145
7.2.5 接口与定义问题	145
7.3 非圆车削直线电机伺服系统组成	146
7.3.1 音圈直线电机	147
7.3.2 DSP 控制器	148
7.3.3 数字伺服驱动器	148
7.3.4 位置检测	149
7.4 非圆车削直线伺服系统建模	150
7.4.1 机理模型推导	151
7.4.2 模型参数的辨识	152

7.5 非圆车削刀具进给系统的前馈补偿	
复合控制	157
7.5.1 前馈补偿复合控制方法仿真研究	157
7.5.2 刀具进给系统的 PID 控制实现	162
7.5.3 刀具进给系统的前馈补偿复合控制实现	163
7.6 非圆车削刀具进给系统的自抗扰控制	163
7.6.1 自抗扰控制概述	163
7.6.2 非圆车削刀具进给系统的自抗扰控制实现	167
7.7 非圆车削刀具进给系统的无模型自适应控制	168
7.7.1 非圆车削刀具进给系统的无模型自适应控制 仿真研究	168
7.7.2 非圆车削刀具进给系统的无模型自适应控制 实现	170
7.8 非圆车削刀具进给系统的迭代学习控制	171
7.9 非圆车削刀具进给系统的 BP 神经网络整定 PID 参数的控制	178
7.9.1 BP 神经网络整定 PID 参数的控制算法描述	178
7.9.2 基于前馈补偿的 BP 神经网络整定 PID 参数 控制算法描述	181
7.9.3 仿真研究	181
7.10 本章小结及展望	184
7.10.1 本章小结	184
7.10.2 展望	185
参考文献	186

第 1 章 绪 论

随着经济和科学技术的飞速发展,控制理论及其应用的范围不断深化与扩大,由实际工程需要而产生的新问题、新思想、新方法发展迅速,各学科领域相互渗透融合的趋势进一步加强,理论研究结果的应用也显著地加快。

1.1 数据驱动控制方法研究背景

近 20 多年来,随着科学技术、特别是信息科学技术的快速发展,化工、冶金、机械、电子、电力、交通运输和物流等行业发生了重大变化。企业的规模越来越大,生产工艺、生产设备和生产过程越来越复杂。传统方法,即依据物理化学机理建立精确数学模型,并对生产过程和设备进行控制、预报和评价已变得越来越困难。相当数量的企业每天都在产生并存储着大量的生产、设备和过程数据,这些数据隐含着工艺变动和设备运行等信息。如何有效利用大量的离在线数据和知识,在难于建立受控系统机理模型的前提下,实现对生产过程和设备的优化控制、预报和评价,已成为控制理论界迫切需要解决的问题。因此,发展数据驱动控制理论与方法是新时期控制理论发展与重大应用的必然要求,具有重要的理论与现实意义。

数据驱动控制(Data - Driven Control)最早来源于计算机科学领域,控制领域对数据驱动控制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。美国明尼苏达大学的数学及其应用研究所(IMA)在 2002 年专门召开了一个为期 3 天的学术研

讨会,会议的名称为“热门主题研讨会:数据驱动控制及优化”。2008年11月,国家自然科学基金委员会于北京专门召开了“基于数据的控制、决策、调度与诊断”学术研讨会^[1]。《自动化学报》在2009年第6期也出版了专刊,中国工程院院士柴天佑教授在专刊序中写道:“本专刊的目的是希望引起控制界对基于数据的控制、决策、调度与故障诊断的研究兴趣与重视,特别是希望中国从事控制科学与工程的研究人员结合中国制造业信息化工程的实践,开展基于数据的控制、决策、调度与故障诊断的研究。”2010年11月6日,国家自然科学基金委在北京交通大学召开了“基于数据的优化、控制与建模”国际学术研讨会。孙家广院士阐述了国民经济发展对数据驱动技术的重大需求。柴天佑院士再次谈到:“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27日至29日在北京举行的中国自动化大会将“基于数据的建模控制及优化”列为专题。2012年由中国自动化学会控制理论专业委员会主办,中国科技大学承办的中国控制会议也将“数据驱动建模与控制”单列为一个专题,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。

1.2 数据驱动控制研究意义

数据驱动控制方法是指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来设计控制器,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。

数据驱动典型的控制方法包括 PID 控制、迭代学习控制(Iterative Learning Control, ILC)和无模型自适应控制(Model-Free Adaptive Control, MFAC)。

PID 控制和基于 PID 的控制方法已经在实际中得到了最广泛

的应用。工业过程控制中 95% 以上的控制都是 PID 控制,但 PID 对于具有强非线性、时变、耦合及结构和参数不确定性的复杂系统控制效果不佳,然而 PID 在电机控制的参数整定方法和技术也处于不断发展中,许多重要的国内外杂志不断发表新的研究成果^[2-4]。

无模型自适应控制^[5-7]的基本思想是利用一个新引入的伪梯度向量的概念,用一系列的动态线性时变模型(有紧格式、偏格式、全格式线性化模型)来替代一般非线性系统,并仅用受控系统的 I/O 数据来在线估计系统的伪梯度向量,从而实现非线性系统的无模型学习自适应控制。目前已成功应用于炼油、化工、电力、轻工、交通、化工铸模等领域^[8],在直流电机和化工铸模中的应用也已成功报道^[9,10]。

迭代学习控制理论自 1984 年提出,现已经形成系统的理论体系^[11],并且在很多领域中得到了成功应用^[12-14]。迭代学习控制在设计时不需要事先已知受控系统的数学模型。但系统在收敛性分析时,对控制器增益的选取则需要知道受控系统的关于控制变量的偏导数的上下界,所得的结论只是关于迭代轴的收敛性。迭代学习控制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。在交流电机启动过程和直流电机的速度控制中的应用也已报道^[15-20]。

直流电机作为执行元件目前被广泛应用于高精度直流伺服系统和直流调速系统中,而且一直在调速领域占居主导地位。异步电机的定子绕组接交流电网,转子绕组不需与其他电源连接。因此,它具有结构简单,制造、使用和维护方便,运行可靠以及质量较小,成本较低等优点。异步电机有较高的运行效率和较好的工作特性,从空载到满载范围内接近恒速运行,能满足大多数工农业生产机械的传动要求。异步电机还便于派生成各种防护形式,以适应不同环境条件的需要。由于异步电机的转速与其旋转磁场转速有一定的转差关系,其调速性能较差(交流换向器电动机除外)。对要求较宽广和平滑调速范围的交通运输机械、轧机、大型机床、

印染及造纸机械等,采用直流电机较经济方便。但随着大功率电子器件及交流调速系统的发展,目前适用于宽调速的异步电机的调速性能及经济性已可与直流电机的相媲美。但同时异步电动机是一个多变量(多输入,多输出系统)、强耦合(电压、电流、频率、磁通、转速之间都互相影响)的非线性系统,这对其控制系统的设计带来了很大的不便。从现阶段来看,设计异步电机控制系统时最常见的算法是PID控制算法,其原理简单易懂,使用中不需精确的系统模型等先决条件,因而成为应用最为广泛的控制算法。它由于用途广泛、使用灵活,已有系列化产品,使用中只需设定三个参数(K_p , K_i 和 K_d)。但是,PID对于具有强耦合、非线性、时变和参数不确定的系统控制效果不佳。因此,需要有更优秀的控制算法来解决PID算法的缺陷。

直线电机与旋转电机相比,不需要把旋转运动变成直线运动的附加装置,因而使得系统结构简化,重量和体积下降;在需要直线运动的地方,直线电机可以实现直接传动,因而可以消除中间环节所带来的各种定位误差,定位精度高;直线电机容易做到其动子用磁悬浮支撑,因而使得动子和定子之间始终保持一定的空气隙而不接触,消除了定子、动子间的接触摩擦阻力,大大提高了系统的灵敏度、快速性和随动性;直线电机可以实现无接触传递力,机械摩擦损耗几乎为零,所以故障少,工作安全可靠、寿命长^[21]。

鉴于直线电机的特点,近年来受到广泛的关注。在国外,直线电机驱动技术已进入工业化阶段,开始广泛应用于工业领域,例如各种半导体加工制作和同步检测过程、光刻技术、晶片的切割、扫描探测显微术等。磁悬浮列车是直线电机实际应用的最典型的例子,目前,美、英、日、法、德、加拿大等国都在研制直线悬浮列车,其中日本进展最快。直线电机驱动超高层电梯也将是一个必然的发展方向。制造业中融机、电、控制、信息、材料、网络通信等为一体的数控机床正在向精密、高速、复合、智能、环保的方向发展,更高的动态特性和控制精度,更快的进给速度和加速度,更低的振动噪声和更小的磨损对系统的传动及其控制部分提出了更高的要求。

直线电机及其伺服驱动控制技术在机床进给上的广泛应用,使机床的传动结构出现了重大变化^[22-25]。然而直线电机运行时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^[26-29],要克服以上问题,除研究和采用高性能的硬件外^[22-25],寻找更优化的控制算法并对其进行有效控制,一直是重要的具有挑战性的研究课题^[29-59]。传统 PID 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愈来愈高的性能指标要求^[30-33],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,且需要受控系统的阶数、模型等先验知识^[34-38]。线性二次型最优控制^[39]、 H_∞ 控制^[40,41]、扰动观测与前馈补偿控制技术^[42,43]、滑模变结构控制^[44-49]以及自适应鲁棒控制技术^[50-59]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,获得动态性能好、鲁棒性强的控制器设计,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,同时 H_∞ 控制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,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。为此,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、鲁棒性好等性能,以往需要已知受控系统阶数、模型等先验知识的基于模型的控制方法受到了挑战^[60-89],它们不适合处理结构时变、参数时变、阶数时变的具有较强未建模动态的直线伺服系统的控制问题。所以构造精密直线伺服系统中安全的不依赖于系统模型的控制器对实际中的成功应用至关重要。

基于数据驱动的无模型自适应控制理论研究及其在运动运动控制系统中的应用研究是本书的主要研究内容。鉴于目前将迭代

学习控制(ILC)与其他控制方法相结合成为对不确定性系统研究的热点^[13,90-92],将迭代学习控制(ILC)与无模型自适应控制(MFAC)进行组合模块化设计并应用在运动控制系统中,使前馈和反馈优势互补,反馈控制器用来稳定系统,学习控制算法用来实现给定轨迹的高精度跟踪任务。

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^[93]。围绕我国经济、社会发展的重点科技问题,2006年,国务院相继发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》^[94]和《国务院关于加快振兴装备制造业的若干意见》中确定的16个重大专项,都将“大型、精密、高速数控装备和数控系统及功能部件”列为重点支持的发展领域。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^[95]。2009年6月,国家自然科学基金委机械学科十二五规划研讨会在中南大学召开^[96],10位国内机械领域专家学者围绕“超精密、数字化设计与制造”这一主题进行了专题发言,其中“超高精度高性能平面、曲面制造”为主要专题之一。而本书控制技术的实现可进一步推动我国数控产业的自主创新;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。

1.3 直线电机在制造业中的研究及应用现状

直线电机是本书重点研究对象。近年来,随着工业加工质量和运动定位精度等要求的提高,直线电机受到了广泛的关注。直线电机伺服系统作为一个新型的控制系统在数控机床上也得到了越来越广泛的应用。近年来,日本三菱、东芝、日立、三井精机公司,德国西门子公司、Ex-Cell-O公司,美国的Kollmorgen公司都开发了相关的产品。Ingersoll铣床公司生产的用于高速精密机