

Control Algorithms and Their Realization in the Magnetic Levitation System

磁悬浮系统控制 算法及实现

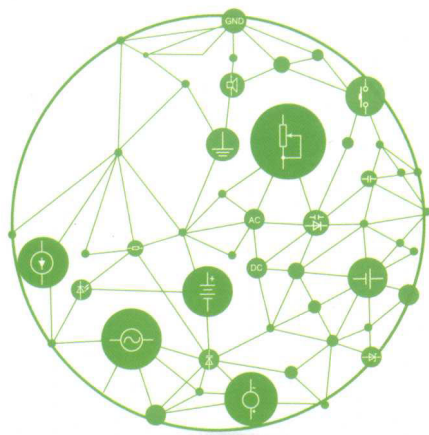
曹广忠 潘剑飞 黄苏丹 邱洪 著

Cao Guangzhong

Pan Jianfei

Huang Sudan

Qiu Hong



清华大学出版社

电子

Control Algorithms and Their Realization in the Magnetic Levitation System

磁悬浮系统控制 算法及实现

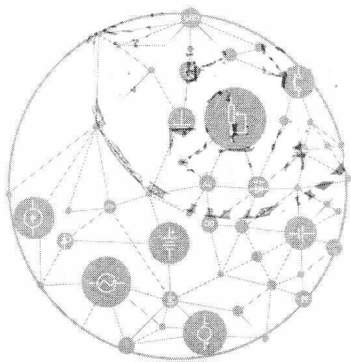
曹广忠 潘剑飞 黄苏丹 邱洪 著

Cao Guangzhong

Pan Jianfei

Huang Sudan

Qiu Hong



清华大学出版社

内 容 简 介

本书系统论述了磁悬浮系统控制算法及实现。全书主要内容涵盖了磁悬浮技术简介、磁悬浮系统设计及建模、磁悬浮系统 PID 控制、磁悬浮系统模糊控制、磁悬浮系统鲁棒控制、磁悬浮系统神经网络控制、磁悬浮系统滑模变结构控制、磁悬浮系统线性二次型最优控制、磁悬浮系统自适应控制算法、基于 dSPACE 的磁悬浮系统和基于 DSP 的磁悬浮系统。

本书针对磁悬浮系统的控制,全面研究了各种控制算法,并给出了两种常用的实现方式,具有极高的实用价值。本书适合作为控制工程、电气工程、机械工程及交通运输工程等学科领域高校师生的参考用书,尤其适合从事磁悬浮系统研究的相关科研与工程技术人员参考使用。

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

磁悬浮系统控制算法及实现/曹广忠等著.--北京:清华大学出版社,2013.4

电子信息与电气工程技术丛书

ISBN 978-7-302-30896-6

I. ①磁… II. ①曹… III. ①磁悬浮列车—控制系统 IV. ①U292.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 292362 号

责任编辑:盛东亮 李 鹏

封面设计:李召霞

责任校对:焦丽丽

责任印制:刘海龙

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 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:148mm×210mm 印 张:8 字 数:221千字

版 次:2013年4月第1版 印 次:2013年4月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:29.00元

产品编号:041256-01

序

21 世纪的今天,机械电子技术的采用业已成为高新机电产品分类的必备高技术特征,磁悬浮技术的发展与应用就是最为典型的范例之一。

和所有的机械电子产品一样,主动控制的磁悬浮系统通常由机械、信息感知及控制三大模块组成,而控制,包括硬件和软件,则是所有机械电子产品中的核心模块。

现代控制技术的发展与普及得益于以下两方面的进步:一是 Intel 公司在 20 世纪 70 年代对于微处理器的开发成功,从而为计算系统和机械系统的集成开辟了道路。正是由于计算的引入,才使得在机械电子系统内部各子系统之间、系统与外部环境之间、人机之间等各个层面的信息沟通和复杂控制有了实现的可能,也为解决普遍存在于各子系统之间的矛盾和冲突提供了新的途径。另一方面的进步是以 dSPACE 为代表的混合实时仿真系统的出现——极大地缩短了机械电子产品开发过程,同时也为现代控制技术的普及发挥了重要的作用。

本书以主动电磁型磁悬浮系统为对象,从系统设计、建模、现代控制算法到基于 dSPACE 和 DSP 的控制器的实现及实验验证,都进行了较为系统、全面的介绍,对于本科生、研究生、工程技术和科研人员来说是一本很好的参考书。

在本书出版之际,写了以上的话,是为序。

虞 烈

2013 年 3 月于西安

支承技术是所有工业装备的基础技术,作为一种先进支承技术的磁悬浮技术,有着其他支承技术所无法比拟的优点:首先,磁悬浮支承为非接触式,无机械接触从而减小了摩擦损耗,延长装备的使用寿命;其次,不需任何润滑手段即可实现无摩擦的运动,从而使高速运动或是高精度定位成为可能;再次,其无污染特性特别适合于太空、真空与超洁净领域。因此,磁悬浮技术具有极为广泛的应用前景。

磁悬浮系统由机械、电气硬件以及软件三大部分组成,是典型的机电一体化系统。磁悬浮系统的研究涉及控制理论、电磁理论、计算机技术、电子技术、机械设计以及动力学等多个学科领域。我国控制科学与工程、机械工程、电气工程以及交通运输工程等学科都有研究人员对磁悬浮技术进行研究,而磁悬浮技术的核心问题是控制问题。

本书首次详细地公开了作者自主设计的磁悬浮控制系统平台,并系统总结了作者研究的多种磁悬浮控制算法及其实现。期望能为工程界研发人员提供翔实的磁悬浮技术理论、设计和实现的系统方案及参考;能为普通高校的相关研究人员及研究生提供系统的参考,推动磁悬浮技术的研究与应用。

本书共 11 章。以一维磁悬浮系统为研究对象,首先给出典型的磁悬浮系统设计方案及其数学建模;接下来依次讨论 PID (Proportional Integral Differential) 控制、模糊控制、鲁棒控制、神经网络控制、滑模变结构控制、二次型最优控制、自适应控制原理及其在磁悬浮系统中的实现;最后,依次介绍基于 dSPACE (Digital Signal Processing and Control Engineering) 的磁悬浮系

统和基于 DSP(Digital Signal Processor)的磁悬浮系统。

本书在撰写过程中,参阅了国内外的大量相关著作和文献,并引用了他们的部分成果和论述,在此向本书所引文献的作者们表示衷心的感谢。

本书是在总结作者近些年的教学和研究成果的基础上,特别是在国家自然科学基金(51275312、60204013)和广东省自然科学基金(000845、5010497)等资助下所获得的研究成果以及对国内外最新成果总结的基础上,为进一步系统化、实用化而撰写成的。在此,作者特别感谢西安交通大学谢友柏院士、虞烈教授、袁崇军教授,西南交通大学钱清泉院士以及韩国科学技术院 Chongwon Lee 院士给予的指导和支持,感谢在学习和工作的不同阶段中给予帮助和支持的深圳清华大学研究院刘岩教授、中南大学段吉安教授、西安交通大学张小栋教授和梁得亮教授;感谢深圳大学自动化研究所的郭小勤副教授、杨蓉副教授的支持,感谢林旅明、李寒逸、方继林、万国军、杨冲冲等研究生的工作。还要感谢为使本书质量得到充分保证而做了大量细致工作的盛东亮和李鹏编辑。感谢深圳大学学术出版基金的资助!

目前,国内外有关磁悬浮控制领域的图书文献相对匮乏,希望本书从磁悬浮控制的基本原理到多种算法的实现、从开发方法到基于 dSPACE 控制平台和基于 DSP 控制器的实现等实践中可以给大家一定的帮助,但是由于作者水平和能力有限,不足及错误之处在所难免,欢迎各位同行专家、学者及广大读者批评指正并提出宝贵意见。

作者 2013 年 3 月

于深圳大学-美国德州仪器高级嵌入式控制联合实验室、
深圳大学自动化研究所

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 磁悬浮技术概述	1
1.2 磁悬浮系统控制算法	4
1.3 数字控制系统	6
1.3.1 数字控制系统的组成	6
1.3.2 数字控制系统的采样周期	8
1.3.3 数字控制系统的类型	9
1.4 MATLAB 平台	13
1.4.1 MATLAB 简介	13
1.4.2 MATLAB 运行方式	17
1.5 dSPACE 平台	19
1.5.1 dSPACE 体系结构	19
1.5.2 dSPACE 硬件系统	20
1.5.3 dSPACE 软件系统	21
1.5.4 dSPACE 的集成开发环境	22
第 2 章 磁悬浮系统设计及建模	24
2.1 磁悬浮系统的工作原理	24
2.2 磁悬浮系统的总体设计方案	25
2.3 磁悬浮系统的机械设计	26
2.4 磁悬浮系统的电路设计	28
2.4.1 电流驱动器电路	28
2.4.2 电流检测电路	30
2.4.3 位置检测电路	31
2.4.4 DSP 控制器	33
2.4.5 系统电源模块	33

目录

2.5	磁悬浮系统的电磁铁设计	35
2.6	磁悬浮系统的线性化数学模型	39
2.7	磁悬浮系统的非线性数学模型	48
第3章	磁悬浮系统PID控制	52
3.1	磁悬浮系统控制规律的选择	52
3.2	磁悬浮系统PD控制器参数的选择	55
3.2.1	磁悬浮系统的PD控制仿真	55
3.2.2	磁悬浮系统的实时PD控制	59
3.3	基于PID控制的磁悬浮系统	62
	附录	67
第4章	磁悬浮系统模糊控制	70
4.1	模糊控制基本原理	70
4.1.1	常规模糊控制	71
4.1.2	模糊PID控制	73
4.2	基于常规模糊控制的磁悬浮系统	76
4.2.1	磁悬浮系统的模糊控制器设计	76
4.2.2	磁悬浮系统的模糊控制仿真	78
4.2.3	磁悬浮系统的实时模糊控制	84
4.3	基于模糊PID控制的磁悬浮系统	86
4.3.1	磁悬浮系统的模糊PID控制器设计	86
4.3.2	磁悬浮系统的模糊PID控制仿真	89
4.3.3	磁悬浮系统的实时模糊PID控制	94
	附录1	96
	附录2	101
第5章	磁悬浮系统鲁棒控制	110
5.1	鲁棒控制基本原理	110

目录

5.1.1	H_{∞} 标准控制	110
5.1.2	混合灵敏度 H_{∞} 控制	112
5.2	基于鲁棒 H_{∞} 控制的磁悬浮系统	114
5.2.1	磁悬浮系统的鲁棒 H_{∞} 控制器设计	114
5.2.2	磁悬浮系统的鲁棒 H_{∞} 控制仿真	118
5.2.3	磁悬浮系统的实时鲁棒 H_{∞} 控制	122
	附录	123
第 6 章	磁悬浮系统神经网络控制	126
6.1	神经网络控制基本原理	126
6.1.1	人工神经元模型	127
6.1.2	BP 神经网络	128
6.1.3	BP 神经网络 PID 控制	131
6.2	基于 BP 神经网络 PID 控制的磁悬浮系统	132
6.2.1	磁悬浮系统的 BP 神经网络 PID 控制器设计	132
6.2.2	磁悬浮系统的 BP 神经网络 PID 控制仿真	136
6.2.3	磁悬浮系统的实时 BP 神经网络 PID 控制	138
	附录	141
第 7 章	磁悬浮系统滑模变结构控制	150
7.1	滑模变结构控制基本原理	150
7.1.1	滑模变结构控制方法	151
7.1.2	滑模变结构控制器设计的基本方法	152
7.2	基于滑模变结构控制的磁悬浮系统	154
7.2.1	磁悬浮系统的滑模变结构控制器设计	155

目录

7.2.2	磁悬浮系统的滑模变结构控制仿真	156
7.2.3	磁悬浮系统的实时滑模变结构控制	159
附录		161
第8章	磁悬浮系统线性二次型最优控制	164
8.1	线性二次型最优控制基本原理	164
8.2	基于线性二次型最优控制的磁悬浮系统	166
8.2.1	磁悬浮系统的线性二次型最优 控制器设计	166
8.2.2	磁悬浮系统的线性二次型最优 控制仿真	169
8.2.3	磁悬浮系统的实时线性二次型 最优控制	173
附录		174
第9章	磁悬浮系统自适应控制	178
9.1	自适应控制基本原理	178
9.1.1	利用输入输出的模型参考自适应控制 系统(被控对象相对阶为1)	179
9.1.2	利用输入输出的模型参考自适应控制 系统(被控对象相对阶为2)	182
9.2	基于模型参考自适应控制的磁悬浮系统	185
9.2.1	磁悬浮系统利用输入输出的模型参考 自适应控制器设计	185
9.2.2	磁悬浮系统利用输入输出的模型参考 自适应控制仿真	187
9.2.3	磁悬浮系统实时利用输入输出的模型 参考自适应控制	192

附录.....	193
第 10 章 基于 dSPACE 的磁悬浮系统	199
10.1 dSPACE 简介	199
10.1.1 dSPACE 体系结构	199
10.1.2 基于 dSPACE 的控制系统开发方法 ...	203
10.2 基于 dSPACE 的磁悬浮系统实时控制	204
10.2.1 磁悬浮系统的控制器设计	204
10.2.2 磁悬浮系统的离线仿真	205
10.2.3 磁悬浮系统的实时控制	207
附录	216
第 11 章 基于 DSP 的磁悬浮系统	222
11.1 DSP 简介	222
11.1.1 TMS320F280x DSP 平台介绍	222
11.1.2 CCS 环境介绍	225
11.2 基于 DSP 的磁悬浮系统结构	227
11.2.1 基于 DSP 的磁悬浮系统硬件	227
11.2.2 基于 DSP 的磁悬浮系统软件	229
参考文献.....	238

第1章

绪论

本章主要介绍磁悬浮技术的发展和磁悬浮控制的基本概念。首先介绍磁悬浮技术的背景和控制算法分类,然后简介磁悬浮控制与计算机控制的相关知识,最后介绍在控制领域的分析、设计与仿真研究中最具影响和最为有效的程序设计语言 MATLAB 和仿真平台 dSPACE。

1.1 磁悬浮技术概述

很早以前,人类就从自然界的电闪雷鸣和天然磁石上注意到了电磁现象。我国春秋末年《管子》中最早出现了关于磁石的记载,其后战国末年的《吕氏春秋》中又有了“慈招铁,或引之也”的磁吸铁之说,公元1世纪王充的《论衡》中最早把静电现象和静磁现象相并列,记载了“顿牟缀芥,磁石引针”、“司南之杓投之于地其柢指南”。1086年,北宋科学家沈括的《梦溪笔谈》中最早记述了指南针的制法和用法,这是人类最早利用磁现象的产物。国外,1820年丹麦物理学家奥斯特发现电流的磁感应现象,法国的毕奥和萨伐尔提出了直流电流元的磁力定律。1842年,英国剑桥大学的恩休首先提出了磁悬浮的概念,并证明了铁磁体不可能仅由另一个

永久磁铁支承而在六个自由度上都保持自由、稳定的悬浮,必须至少有一个自由度被机械或其他方式所约束,且必须根据物体的悬浮状态不断地调节磁场力的大小才能实现物体的稳定悬浮,因此电磁铁的出现才使得磁悬浮成为可能。1822年,法国物理学家阿拉戈和吕萨克发现了通电的铜螺线管能像磁铁一样吸引铁屑,这实际上就是电磁铁原理的最初发现。1823年斯特金制作了一块其吸力为其自重20倍的电磁铁。1831年美国的电学家亨利对斯特金电磁铁装置进行了革新,以绝缘导线代替了裸铜导线,制造出了一块能吸起1t重铁块的电磁铁。1938年,德国的工程师肯佩尔利用一块可控电磁铁使一个重量为210kg物体的稳定悬浮,这是人类有史以来第一次真正实现磁悬浮。自此,拉开了人类对磁悬浮技术进行研究探索的序幕。

作为支承技术的一种,磁悬浮技术由于不存在直接的机械接触,与其他技术相比具有无摩擦、无需润滑、功耗低、清洁无污染等优点。经过几十年的发展,磁悬浮技术作为一种高新技术日趋成熟,其在交通、工业和航天等领域有着广泛的应用前景。目前,磁悬浮技术研究的热点是磁悬浮列车和磁悬浮轴承。

1. 磁悬浮列车

磁悬浮列车以其速度快、爬坡能力强、转弯半径小及其在经济、环保等方面的优势被认为是21世纪交通工具的发展方向。1935年,有“磁浮之父”之称的德国工程师Hermann Kemper首次运用实验模型验证了磁悬浮。自20世纪60年代起,德国和日本先后开始对磁悬浮技术进行深入研究,1969年第一代磁悬浮试验车模型(TR-01)在德国问世。1984年德国埃姆斯兰磁悬浮列车试验场建成使用,运行其上的第6代试验车已经达到时速302公里的时速。1988年慕尼黑国际交通展上,第7代试验车的亮相标志着高速磁浮技术趋于成熟。

日本主要针对超导磁悬浮排斥型方向进行磁悬浮技术的研究,1972年世界上第一列超导磁悬浮模型车ML100在日本向公众展示,1977年宫崎磁悬浮试验线建成,1996年山梨试验线第一

段线路完工,1999年在山梨试验线上 MLX01 型载人磁浮列车时速高达 552km/h,2003 年山梨实验线上创下载人磁悬浮列车时速 581km 的世界最高纪录。

我国磁悬浮列车的研制始于 20 世纪 70 年代,以中低速型的磁悬浮技术为主要研究对象,国防科技大学、西南交通大学、铁道科学研究所和大连磁谷科技等多家科研单位都参与研发。国防科大 CMS 系列的磁浮车、西南交大 CFC 系列的磁浮车以及大连磁谷的中华号永磁磁浮车相继问世,并建成了长沙、唐山、青城山以及大连等多条试验线。

世界上正式投入运营的磁悬浮线路有三条,即英国伯明翰线、日本东部丘陵线和上海磁悬浮示范线,其中伯明翰线和丘陵线为中低速磁悬浮线,上海磁悬浮示范线是第一条高速磁悬浮线。

2. 磁悬浮轴承

磁悬浮轴承也称电磁轴承或磁轴承,是利用可控电磁力作用将转子或轴稳定悬浮于空间的一种新型高性能轴承,广泛的应用于机械工业领域,如各类机床、涡轮分子泵、高速离心机、涡轮发电机以及液氮泵等各种高速旋转机械。

1950 年美国弗吉尼亚大学 J. W. Beams 最早研制成功用于离心机的混合电磁轴承。1977 年法国 S2M 公司开发了世界上第一台用于高速机床的磁悬浮主轴。2002 年德国 Darmsdat 工业大学机电研究所成功研制出了主动磁轴承(AMB)电主轴。在航空航天领域,美国、法国以及日本先后成功地将磁悬浮轴承应用在空间制导和惯性轮以及发动机等核心构件上。

我国对磁悬浮支承技术的研究开始于 20 世纪 50 年代末,目前还处于实验及工业试验运行阶段,还未有成功批量应用于实际机组上的报道。目前,清华大学、西安交通大学、上海大学、武汉理工大学、南京航空航天大学以及北京航空航天大学等多所院校都在致力于磁悬浮轴承的研究工作。

在磁悬浮系统的研究中,单自由度磁悬浮系统为典型的磁

悬浮系统,其结构简单、易于实现。因此对单自由度磁悬浮系统的研究是研究磁悬浮技术的一种简单而有效的方法,是进行多自由度磁悬浮控制系统技术研究的基础,对非接触式位置传感、悬浮磁场分析以及磁悬浮先进控制算法等方面的研究有着重要的意义。

1.2 磁悬浮系统控制算法

图 1-1 为典型的闭环反馈控制系统,一个闭环反馈控制系统一般由被控对象、控制器和检测装置等环节组成,控制器根据设定值与检测装置所检测的实际输出值之差按照某种算法或规律运算,运算所得的结果作为控制量作用于被控对象,从而控制被控对象的输出。根据控制器不同的控制规律,控制器算法可分为经典控制算法、现代控制算法与智能控制算法,相应的控制算法分类如图 1-2 所示。由于控制算法种类较多,本书不可能对每一种控制

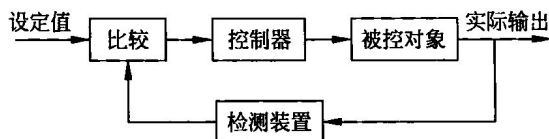


图 1-1 闭环反馈控制系统

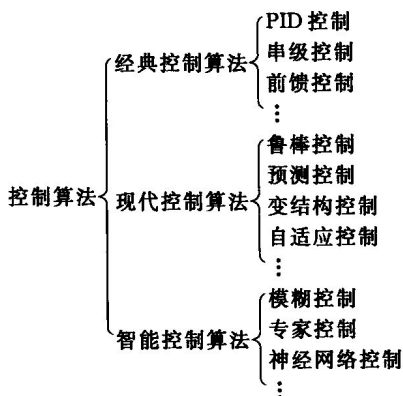


图 1-2 控制算法分类

算法都作详细的阐述,后续章节将结合磁悬浮系统控制的特点,分别介绍具有代表性和应用性的控制算法及其在磁悬浮系统中的应用。

磁悬浮系统是一个典型的本质非线性和开环不稳定系统,对磁悬浮系统实施有效的控制是磁悬浮技术应用需要解决的关键问题,因此研究磁悬浮系统的控制算法具有重要的意义。传统的控制算法设计将系统的非线性模型在其平衡点处进行泰勒展开以实现系统模型的线性化处理,基于此线性化后的模型进行控制算法设计,如传统的 PID 控制算法设计。由于传统的控制算法设计是基于平衡点的系统线性化模型对系统进行控制器设计,因此所设计的控制器只能在系统平衡点附近的小范围内产生控制效果,一旦磁悬浮系统受到较大的外部干扰,将导致被悬浮对象较大的偏离平衡点,系统的非线性特性将导致系统失稳从而使被悬浮对象悬浮失败。因此,传统的线性控制理论难以很好地解决磁悬浮系统鲁棒性差的问题,磁悬浮系统需要能对复杂非线性系统进行有效控制的控制算法。

本书将探讨 PID 控制算法、模糊控制算法、鲁棒控制算法、神经网络控制算法、滑模变结构控制算法、线性二次型最优控制算法与自适应控制算法及其在磁悬浮系统中的实现。

PID 控制算法以其结构简单、物理意义明确、容易实现以及在一定条件下能起到很好的控制效果而首先被人们普遍运用于磁悬浮系统。PID 控制算法可使系统的控制效果达到一定的精度,但系统的鲁棒性较差,容易因外界干扰而失稳。随着控制理论不断发展,许多先进的控制算法都开始运用到磁悬浮系统中。智能控制算法是指基于在线学习和辨识的控制算法,模糊控制算法与神经网络控制算法是智能控制算法中的经典算法,这两种控制算法由于其自身的特点比较适合应用在诸如磁悬浮系统这类难以得到精确数学模型的被控对象中。鲁棒控制算法是为了解决在系统存在模型不确定性或外界干扰时如何设计控制器使系统保持预期的性能要求而存在的一种现代控制算法,此控制算法在磁悬浮系统存在不确定性因素的影响下仍可使系统保持稳定并使系统具有

一定的鲁棒性。滑模变结构控制算法根据系统当前的状态有目的地不断变化,迫使系统按照预定的滑动模态状态轨迹运动,其对不确定因素具有良好的鲁棒性,具有滑模变结构控制器的磁悬浮系统结构简单、易于实现,但滑模变结构算法的不连续开关特性将会引起系统的抖振,且抖振必定存在,只能在一定程度上削弱它。线性二次型最优控制算法通常采用被控对象的输出与输入的加权二次型作为性能指标以控制系统的动态响应,从而使系统的某些性能在一定条件下表现出最优,磁悬浮线性二次型最优控制系统的二次型性能指标易于分析、处理和计算,通过线性二次型最优控制算法可使磁悬浮系统具有较好的鲁棒性和动态特性。自适应控制算法在系统的外界环境发生较大变化或系统产生不确定性的情况下,能自行调整控制器的结构、参数或控制律,保证系统的控制性能达到最优或次最优,其被控对象主要是那些存在不确定性的系统,磁悬浮自适应控制系统可适应系统内部参数变化和環境变化,可使系统具有较强的鲁棒性并满足系统的性能指标要求。

1.3 数字控制系统

数字控制系统通常以计算机作为数字控制器,实现对连续对象或过程的闭环控制,也称为计算机控制系统。

1.3.1 数字控制系统的组成

数字控制系统由硬件和软件两大部分组成。以单输入单输出的单位负反馈系统为例,此数字控制系统框图如图 1-3 所示,数字控制系统的硬件包括五个部分:

(1) 连续被控对象或过程:工作于连续状态,输入输出是连续量。

(2) 数字控制器:工作于离散状态,输入输出是数字量,由计算机实现。