

学校编码: 10384
学 号: 200429026

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于 DSP 磁悬浮球控制系统的设计与研究

Design and Research of a Maglev Ball
Control System Based on DSP

王 义 进

指导教师姓名: 席 文 明 副教授

专 业 名 称: 测试计量技术及仪器

论文提交日期: 2 0 0 7 年 4 月

论文答辩时间: 2 0 0 7 年 6 月

学位授予日期: 2 0 0 7 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2007 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密（ ），在 年解密后适用本授权书。
2. 不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘要

磁悬浮技术是集电磁学、电子技术、控制工程、信号处理、机械学、动力学等为一体的典型机电一体化技术。当前,进行磁悬浮技术的研究,可以实现各个学科间的交叉与渗透,推动磁悬浮高新技术产品的开发与应用,因而,具有重要的理论和现实意义。

本论文所研究的磁悬浮球控制系统,是常导型磁悬浮系统的一种,也是研究其它常导型磁悬浮系统的基础。论文介绍了磁悬浮球控制系统的组成,分析了其工作原理。为了便于分析与设计,文中建立了控制系统的数学模型。一方面,从经典控制理论的角度,求出了控制系统的传递函数;另一方面,从现代控制理论的角度,建立了被控对象的状态空间表达式。根据数学模型,文中借助 MATLAB/Simulink 工具,一方面,对经典的 PID 控制及其各种改进形式进行了仿真,经过对比仿真的结果,选择积分分离 PID 控制为系统的第一种备选方案;另一方面,对状态反馈控制进行了仿真,选择状态反馈控制为系统的第二种备选方案。经过对比两种备选方案,选择状态反馈控制为系统最终的控制方案,并且用一个位于系统输出反馈通道上的 PD 控制器来实现。在此基础上,用模拟电路实现 PD 控制器,经过调整控制器参数,实现了钢球的稳定悬浮。针对模拟控制的缺点,文中采用数字控制的方法对系统进行改进,重点设计了一个基于 DSP 芯片 TMS320LF2407A 的数字 PD 控制器电路,实现了系统的稳定工作。论文的最后,对工作进行了总结与展望。

关键词: 磁悬浮; PD 控制器; DSP

ABSTRACT

Maglev technology is a typical electromechanical integration technology which sets electromagnetics, electronics, control engineering, signal processing, mechanics and dynamics of integration. At present, research of maglev technology can achieve cross-infiltration of many disciplines and promote development and application of maglev high-tech products, thus, is of great theoretical and practical significance.

Maglev ball control system which is studied in this paper belongs to the attractive levitation systems and is the foundation of researching other systems. This paper introduces the composition of maglev ball control system and analyzes its working principle. In order to facilitate the analysis and design, mathematical models of control system are established. On one hand, from classical control theory point, transfer functions of control system are solved; On the other hand, from modern control theory point, state space expression of controlled object is established. According to the mathematical models, dynamic simulations of control system are done by using MATLAB/Simulink tool. On one hand, the simulations of classical PID control and its improved forms are done, and integral separated PID control is chosen as the first alternative plan after contrasting the simulation results; On the other hand, the simulation of state feedback control is done, and it is chosen as the second alternative plan. State feedback control is chosen as the final control method after contrasting the two options, which can be achieved by using a PD controller placed on the output's feedback channel. On this basis, an analog PD controller is designed, which achieves stable suspending of the steel ball after adjusting controller's parameters. Aiming at the shortcomings of analog control, a digital PD controller based on TMS320LF2407A DSP chip is designed, which achieves stable working of the system. Summarizations and expectations of the work are introduced in the end of this paper.

Keywords: Maglev; PD controller; Digital Signal Processor

目 录	
第 1 章 绪 论	1
1.1 磁悬浮技术的发展与应用	1
1.1.1 磁悬浮列车.....	1
1.1.2 磁悬浮轴承.....	4
1.1.3 其他方面的应用.....	4
1.2 磁悬浮技术研究的意义	5
1.3 磁悬浮技术的分类与选题依据	5
1.4 论文研究的主要内容	6
第 2 章 磁悬浮球控制系统的组成及工作原理	7
2.1 引言	7
2.2 磁悬浮球控制系统的组成	7
2.3 磁悬浮球控制系统的工作原理	7
2.4 磁悬浮球控制系统的详细介绍	9
2.4.1 电磁铁.....	9
2.4.2 光源.....	9
2.4.3 光电传感器.....	10
2.4.4 电流驱动电路.....	13
2.4.5 控制器.....	15
2.5 小结	15
第 3 章 磁悬浮球控制系统的建模	16
3.1 引言	16
3.2 磁悬浮球控制系统各组成的数学模型	16
3.2.1 磁悬浮被控对象的数学模型.....	16
3.2.2 光电传感器的数学模型.....	20
3.2.3 电流驱动电路的数学模型.....	21
3.3 磁悬浮被控对象的状态空间表达式	22
3.4 磁悬浮被控对象的能控性和能观性	23

3.5 小结.....	26
第 4 章 磁悬浮球控制系统的仿真.....	27
4.1 引言.....	27
4.2 磁悬浮球控制系统的 PID 控制.....	27
4.2.1 PID 控制介绍.....	27
4.2.2 各种 PID 控制的仿真.....	30
4.3 磁悬浮球控制系统的状态反馈控制.....	36
4.3.1 闭环极点的配置.....	37
4.3.2 反馈矩阵的确定.....	37
4.3.3 输入放大倍数的确定.....	39
4.3.4 极点配置后系统的阶跃响应.....	40
4.3.5 状态反馈控制的 Simulink 仿真.....	41
4.4 小结.....	43
第 5 章 磁悬浮球控制系统的设计与调试.....	44
5.1 引言.....	44
5.2 模拟 PD 控制器.....	44
5.3 数字 PD 控制器.....	47
5.3.1 数字 PD 控制器介绍.....	48
5.3.2 采样周期的选择.....	50
5.3.3 硬件电路的设计.....	50
5.3.4 控制软件的设计.....	56
5.4 小结.....	63
总结与展望.....	64
参考文献.....	66
硕士期间发表的论文.....	69
附 录.....	70
致 谢.....	73

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Development and application of maglev technology	1
1.1.1 Maglev train.....	1
1.1.2 Maglev bearing.....	4
1.1.3 Other applications.....	4
1.2 Significance of maglev technology research	5
1.3 Classification of maglev technology and basis of selected topic	5
1.4 Contents of this paper	6
Chapter 2 Composition and principle of maglev ball control system ..	7
2.1 Foreword	7
2.2 Composition of maglev ball control system	7
2.3 Principle of maglev ball control system	7
2.4 Detailed introduction of maglev ball control system	9
2.4.1 Electromagnet.....	9
2.4.2 Photosource.....	9
2.4.3 Photoelectric sensor.....	10
2.4.4 Current drive circuit.....	13
2.4.5 Controller.....	15
2.5 Summary	15
Chapter 3 Modeling of maglev ball control system	16
3.1 Foreword	16
3.2 Mathematical model of maglev ball control system	16
3.2.1 Mathematical model of maglev object.....	16
3.2.2 Mathematical model of photoelectric sensor.....	20
3.2.3 Mathematical model of current drive circuit.....	21
3.3 State space expression of maglev object	22
3.4 Controllability and observability of maglev object	23

3.5 Summary	26
Chapter 4 Simulation of maglev ball control system	27
4.1 Foreword	27
4.2 PID control of maglev ball control system	27
4.2.1 Introduction of PID control.....	27
4.2.2 Simulation of various PID control	30
4.3 State feedback control of maglev ball control system	36
4.3.1 Disposition of closed loop poles.....	37
4.3.2 Determination of feedback matrix.....	37
4.3.3 Determination of input gain.....	39
4.3.4 Step response of system after pole disposition.....	40
4.3.5 Simulation of state feedback control.....	41
4.4 Summary	43
Chapter 5 Design and debugging of maglev ball control system	44
5.1 Foreword	44
5.2 Analog PD Controller	44
5.3 Digital PD Controller	47
5.3.1 Introduction of digital PD controller.....	48
5.3.2 Determination of sampling period.....	50
5.3.3 Design of hardware circuit.....	50
5.3.4 Design of control software.....	56
5.4 Summary	63
Summarizations and expectations	64
References	66
Publications	69
Appendix	70
Thanks	73

第1章 绪论

1.1 磁悬浮技术的发展与现状

利用磁力使物体处于无接触悬浮状态的设想是人类一个古老的梦^[1]，但实现起来并不容易。因为磁悬浮技术是集电磁学、电子技术、控制工程、信号处理、机械学、动力学等为一体的典型机电一体化技术。随着电子技术、控制工程、信号处理元器件、电磁理论及新型电磁材料的发展和转子动力学的进展，磁悬浮技术得到了长足的发展。

下面介绍一下磁悬浮技术的几种主要应用及其发展现状。

1.1.1 磁悬浮列车

磁悬浮列车是磁悬浮技术的一个重要应用，也是目前国内外磁悬浮技术研究的重点。磁悬浮列车与当今的高速列车相比较，具有许多不可比拟的优点：由于磁悬浮列车是在轨道的上方行驶，导轨与机车之间不存在任何实际的接触，成为“无轮”的状态，故其几乎没有轮、轨之间的摩擦，时速高达几百公里；磁悬浮列车可靠性大、维修简便、成本低，其能源消耗仅是汽车的一半、飞机的四分之一；噪音小，当磁悬浮列车时速达 300 公里以上时，噪声只有 65 分贝，仅相当于一个人大声地说话，比汽车驶过的声音还小；由于它以电为动力，在轨道沿线不会排放废气，无污染，是一种名副其实的绿色交通工具。

因此，磁悬浮列车是当今世界各国科学研究的一个重点领域。

德国自 70 年代开始发展磁浮的 Transrapid 计划^[2]，旨在发展高速磁浮交通，但是因为 Kross-Maiffe 与 MBB 提出的短定子异步牵引的磁悬浮方案都只能适合于低速运行，所以德国转向长定子同步电机牵引的技术，直至形成目前上海运行的高速磁浮系统，原来适合于低速运行的技术专利，被日本利用而发展成为 HSST 低速磁浮系列。

日本于 1962 年开始磁悬浮铁路的研究，研制出了超导高速磁悬浮列车（即 EDS—electrodynamic suspension 型）和常导中低速磁悬浮列车系统（即 EMS—

electromagnetic suspension 型)。1990 年在名古屋附近的大江建设了 1.5 km 长的试验线，并于 1991 年 5 月开始试运行。经过两年的实验，专家学者组成的可行性研究委员会对试验结果进行了最后论证，认为：作为城市交通系统，HSST 已达到实用水平，并具有商业应用的可能性。现在，日本已经建设开通了一条 8.9 km 长的中低速磁浮铁路商业运行线，连接名古屋一个地铁车站和市郊的一个现代化居住区，目前运行良好，起到了城市磁浮的示范作用，有力的证实了城市磁浮的优势。

美国针对其交通运输以汽车、航空为主而导致的环境、能源问题，于 1998 年签署了相关法令，将美国要发展的地面高速交通运输方式锁定为常导高速磁浮交通技术，并考虑引进德国技术。但不久，美国政府宣布支持城市磁浮技术的研究与开发。美国支持的城市磁浮研究的计划有：①通用原子能公司（GA）城市磁浮列车，利用永久磁铁实现 EDS 悬浮。②Magplane 是另一种采用永久磁铁实现 EDS 悬浮的磁浮列车，但目前仍处于概念研究阶段。③MagneMotion 公司的 M3 磁浮列车，采用永磁电磁混合 EMS 悬浮以减小悬浮功耗，悬浮气隙增大到 20mm，同时，M3 采用小型化车辆和轻型轨道。④AMT 公司的磁浮列车，采用电磁 EMS 悬浮和直线感应电机 LIM 推进，类似于 HSST，在老多米尼大学校园内修建 1.3 公里磁浮示范线，是美国目前规模最大的磁悬浮项目；AMT 的 EMS 型磁浮列车进行了很多革新。⑤Maglev2000 磁浮列车，采用四极超导磁铁，还提出了电磁道岔的概念。

韩国为解决大城市交通问题，很早就开始发展磁浮列车。1989 年至 1993 年，韩国机械材料协会（KIMM）、现代（Hyundai）、大宇（Daewoo）分别开始进行不同形式的磁悬浮技术研究开发。1994 年至 1998 年，KIMM 和 Hyundai 合作，目标是在 1998 年制造出两节编组的商业化城市磁浮车辆原型，在 2000 年实现商业化服务。1994 年 Hyundai 联合 KIMM 开始政府资助的低速磁悬浮列车项目。合作的商业化原型车 UTM-01 于 1997 年 11 月完成，最大设计速度 110km/h。随后在 KIMM 1.1 千米测试轨道上进行全面测试，最大速度 65km/h 或 70km/h。1999 年至今开始对磁悬浮技术进行商业化尝试，是对 UTM-01 进行改进和开发 UTM-02。由于名古屋和中国高速线的商业化，韩国政府开始对磁浮表现出很高的兴趣。韩国人口密集，大城市交通拥挤。由于地铁系统代价昂贵，政府已经宣布不再建设地铁，而改为建设轻轨和磁悬浮铁路。

我国从八十年代后期,就开始了高速轮轨铁路基础技术研究工作^[3],安排了一批科研攻关项目。最近我国自行研制的准高速机车、车辆,成功地在北京环行试验线上进行了最高速度 183 公里 / 时的综合试验,实现了我国铁路技术发展史上新的突破。在“八五”攻关项目中开展了“磁悬浮列车关键技术研究”,进行 14 吨常导低速磁浮样车研制及相应的试验线的建设,在低速磁悬浮列车技术的研究方面取得了可喜进展。国防科技大学自八十年代开展磁浮列车悬浮牵引控制技术的研究,先后研制了小型磁浮原理模型、小型磁浮实验样车等。1992 年 5 月,国家科委把“磁浮列车关键技术研究”正式列入国家科委“八五”重点科技攻关计划,1995 年 5 月研制成功我国第一台全尺寸单转向架磁浮列车系统。

1999 年北京控股磁悬浮技术发展有限公司和国防科技大学合作,共同组织、联合国内铁路、航空、汽车等行业最具技术优势的单位,进行中低速磁悬浮列车技术产业化研究,2001 年 4 月建设了中国第一条磁悬浮列车 204 米长沙试验线。2001 年 7 月完成了中国第一辆全尺寸磁悬浮列车的生产制造。

在试验车充分试验验证的基础上,从 2003 年开始,北京控股磁悬浮技术发展有限公司和国防科技大学又按照实用型标准,研制了一辆磁浮列车工程化样车,并于 2005 年 7 月底在唐山机车车辆厂下线,2005 年 12 月正式在长沙试验线运行,2006 年 2 月成功实现双车编组,连挂运行试验。试验车至今已经成功安全试验运行 9000 余公里。2006 年 7 月 1 日,北京控股磁悬浮技术发展有限公司在唐山机车车辆厂内开工建设一条长约 2km 的试验示范线系统。

国内从事中低速磁浮列车技术研究的还有西南交通大学、铁道部科学研究院、中国科学院电工所等。西南交通大学已在成都青城山动工修建一条实验线,线路 412 米长、轨距 1.7 米,车体长 11 米、宽 2.6 米,自重 16 吨,载重 2 吨。2006 年 4 月 30 日车辆上线调试运行成功。

铁道部科学研究院在“八五”科技攻关中,也研制成功单转向架磁浮系统。

国内还有一些单位在研究永磁型磁悬浮技术,例如大连磁谷公司、上海师范大学、西南交大的高温超导—永磁磁浮技术等等。目前,这些技术尚在概念研究阶段,距离实际进入交通系统的目标尚有相当的距离。

1.1.2 磁悬浮轴承

磁悬浮轴承是一种新型的高性能轴承，它是磁悬浮技术的另一个重要应用。与传统的滚珠轴承、滑动轴承以及油膜轴承相比较，磁悬浮轴承具有无法比拟的优越性^[4]：不存在机械接触，转子可以达到很高的运转速度；摩擦功耗少，转子只有磁带及涡流引起的功耗，耗能少；维护成本低，寿命长，不存在摩擦和接触疲劳产生的寿命问题；无需润滑，可省去泵、管道、过滤器和密封元件等，也不存在润滑剂对环境的污染问题，适合在真空、辐射和禁止润滑剂污染的场所应用。磁悬浮轴承可广泛用于机械加工、涡轮机械、航空航天、真空技术、转子动力学特性辨识与测试等领域，被公认为极有前途的新型轴承。

因此，磁悬浮轴承也引起了世界各国科学界的特别关注，国内外众多学者和企业界人士都对其倾注了极大的兴趣和研究热情。

国外由于在这方面的研究起步较早，并且投入了大量的人力、物力和财力，已有不少成熟的产品问世，并渐渐投入使用。而我国在这方面的研究起步较晚，1980年清华大学才开始定性研究。1986年哈尔滨工业大学开始研制五维主动式磁力轴承，并获得国家自然科学基金赞助，1990年成功地实现了静态和动态稳定悬浮。目前，国内磁悬浮轴承的研究大多处于实验室阶段，仍然有许多理论和技术上的问题需要解决。

1.1.3 其它方面的应用

在磁悬浮技术的其它应用方面，日本东芝公司开发出可用于半导体无尘生产车间的零功率磁悬浮运输器，德国的一所工业大学推出了用于激光电视的多功能高速光束扫描器。此外，磁悬浮技术的应用和研究领域还包括：磁悬浮天平、磁悬浮平台、磁悬浮隔振器、磁悬浮冶炼、磁悬浮测量仪器、磁悬浮高速电机、磁悬浮传送系统等。

1.2 磁悬浮技术研究的意义

磁悬浮由于其无接触的特点，避免了物体之间的摩擦和磨损，能延长设备的使用寿命，改善设备的运行条件，因而在交通、冶金、机械、电器、材料等各个方面有着广阔的应用前景。

磁悬浮列车是一项高科技集成的技术，它的发展不仅是一项技术、一个行业自身的成熟壮大，更将带动我国变频、电子设备制造及对外技术合作等一大批相关产业的发展，其应用前景是广阔的。

磁悬浮轴承属机电一体化产品，是控制理论、电子电力、电磁学、转子动力学及计算机科学等学科交叉的结晶，进行这项研究，有很强的学科意义。同时，磁悬浮轴承具有的高速、高精度、长寿命等突出优点，将逐渐带领机电行业走向一个没有摩擦、小损耗、超高速的崭新境界。

磁悬浮技术不仅在电气等工业领域得到了广泛应用，而且在生命科学领域也开始得到应用，充分显示了磁悬浮技术在国民经济发展和人们生活质量提高方面的广阔发展前景。

当前，进行磁悬浮技术的研究，可以实现各个学科间的交叉与渗透，并推动磁悬浮高新技术产品的开发与应用，因此，具有十分重要的理论和现实意义。

1.3 磁悬浮技术的分类与选题依据

按悬浮的方式不同^[5]，磁悬浮技术可分为：常导型（EMS）、超导型（EDS）和永磁型（PMS）。永磁型是利用永磁铁来承担大部分的重力负载，而以可控的电磁铁进行悬浮控制，因而具有极佳的节能效果，特别适用于卫星、空间站等有能量限制的场合，还适用于超静、超净的环境。超导型是利用磁场对超导磁体的排斥现象来实现稳定悬浮的，控制方案比较简单，悬浮系统的可靠性高，适用于高速的磁悬浮列车等。而常导型主要是依靠可控直流电磁铁与导磁材料（如铁轨）间的吸力来实现悬浮的，由于吸力是非线性的，因此需要精确的闭环控制。

可以看出, 几种类型的磁悬浮系统研究重点不同。超导型主要侧重于超导技术的研究, 永磁型主要有永磁材料与控制技术方面的研究, 常导型则更多涉及到控制理论应用方面的研究。

磁悬浮球控制系统^[6-16]属于常导型磁悬浮系统, 也是研究其它各种常导型系统的基础。因此, 本论文选它作为重点研究的对象。

1.4 论文研究的主要内容

本论文在分析了磁悬浮球控制系统的组成及控制规律后, 设计出一套实际的磁悬浮球控制系统, 并且实现了系统的稳定工作。论文的主要内容包括:

第 1 章 介绍了磁悬浮技术的发展现状, 并阐明了磁悬浮技术的研究意义, 最后介绍了磁悬浮技术的分类和选题依据。

第 2 章 介绍了磁悬浮球控制系统的组成, 并分析了控制系统的工作原理, 最后详细介绍了系统各个组成部分的具体设计。

第 3 章 建立了磁悬浮球控制系统各组成部分的数学模型, 并且对磁悬浮球被控对象建立了状态空间表达式, 最后分析了控制系统的能控性和能观性。

第 4 章 借助 MATLAB/Simulink 动态仿真工具, 对磁悬浮球控制系统进行仿真, 确定了系统的控制方案。

第 5 章 设计出具体的控制器电路, 包括模拟 PD 控制器和数字 PD 控制器, 对磁悬浮球系统进行控制, 实现了钢球的稳定悬浮。

最后对论文的工作进行了总结, 并且展望了将来的研究方向。

第 2 章 磁悬浮球控制系统的组成及工作原理

2.1 引言

本章首先简要介绍了一种磁悬浮球控制系统的大致组成，再详细分析了控制系统的工作原理，最后对整个系统的各个构成部分进行了详细介绍。

2.2 磁悬浮球控制系统的组成

磁悬浮球控制系统是由电磁铁、光源、光电传感器、钢球、控制电路和电流驱动电路等部分组成的，整个控制系统如图 2.1 所示。

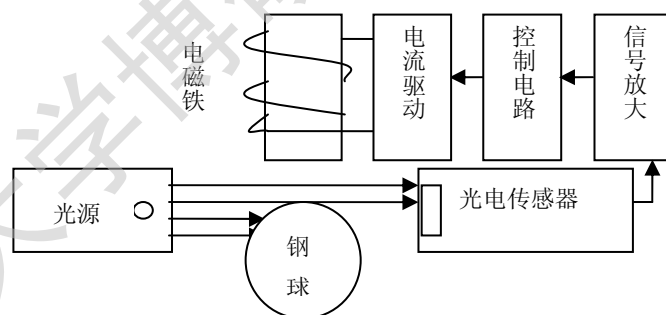


图 2.1 磁悬浮球控制系统的示意图

2.3 磁悬浮球控制系统的工作原理

磁悬浮球控制系统的工作原理是：电磁铁线圈通上电流会在周围产生磁场，位于磁场中的钢球会受到电磁力的吸引作用，只要这个电磁力与钢球自身的重力相等，钢球就可以悬浮在空中，而处于平衡状态。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库