

摘要

磁浮铁路系统的商业成功运营预示着其广阔的市场前景。高速磁浮列车的超高速运行对其安全性能和运行控制系统提出了极高的要求。当高速磁浮交通系统在启动那一刻开始,就需要将车体悬浮,并在整个运行过程中依靠悬浮控制系统实现列车的稳定悬浮。而且悬浮控制系统的性能直接影响乘坐的安全性和舒适度,因此悬浮控制电磁铁的工作特性以及悬浮的控制系统是个值得仔细研究的问题。目前国内对悬浮控制系统的研究处于研究实验阶段,理论研究成果很多,该项关键技术一旦突破,将为国产磁浮列车的可靠运行提供安全保障,为列车运行提供最基础也是最重要的保障。

本文从悬浮系统的稳定、安全性能出发,首先综述了 TR08 型磁浮列车的运行控制系统,并详细介绍了悬浮控制控制系统,并对悬浮控制的原理进行了分析,在此基础上分别从用电磁场和动力学角度对悬浮控制电磁场进行了分析、简化。然后用 MATLAB 仿真分析软件建立了悬浮控制电磁铁的模型,并且用两种线性化方法对非线性模型进行了处理。

接着利用该模型对影响悬浮控制力和吸引力的各主要因素:励磁电流、悬浮气隙等进行了详细的分析,建立对象模型抽象,确定状态变量,建立状态方程。其次,在模型分析的基础上,对几种控制策略在磁悬浮模型上的应用进行了尝试,给出仿真结果。着重介绍了两种非线性控制策略,用 MATLAB 仿真实现了基于反馈线性化的滑模控制器下的悬浮控制系统。在后半部分对其他在建模过程中忽略的因素,会对悬浮控制产生的影响进行了介绍和分析。

最后一章对本文内容做了简要的总结,并提出一些本文未能讨论的关键技术及未来的研究方向。

关键词: 磁浮列车, 悬浮控制, 电磁铁, 反馈线性化, 滑模控制

Abstract

The successful operation of High-speed Maglev train indicates inevitability of universal commercial application. The super high speed of Maglev train brings heavy demands of safe assurance and reliable control system. Whenever the Maglev train starts, the levitation of the whole train is necessary and the Levitation Control System (LCS) should maintain the stability of the vertical force to assure the security of the operation. Furthermore, the quality of LCS has much to do with the security and comfortability of passengers. Thus the performance and personality of levitation electromagnet and LCS are the problems that need to be researched on. Studying on the LCS technology is on the way of theory research and experiment stage in China, and accomplishment comes out usually. Once a breakthrough appears in this key technology, it will provide safe assurance for credible operation of Maglev technology nationalization, as well as be fundamental but crucial insurance.

The thesis proceeds from a point of stability and security of LCS of TR08 Maglev train, and introduces the operational principle, especially the levitation principle, with specific analysis. On the basis of this, the thesis gives analysis and simplification of the levitation control electromagnetic field from both magnetic and kinetic angle. Then a model of single levitational electromagnet is established by MATLAB, and two methods of linearization are applied on such nonlinear model.

Secondly, by using the LCS model, the thesis gives detailed analysis on the main factors which influence the levitational vertical and attraction force. And the control plant is obtained. Then, based on the analysis of model, the thesis takes attempts of different control strategies on the Maglev model, and shows the simulation results. The fourth chapter introduces the two nonlinear control strategies, and the sliding mode controller based on the feedback linearization is realized by MATLAB simulation. The left part states and analyzes the minor factors of the levitation control, which have been ignored in the process of modeling.

The last but no the least, a conclusion is presented. The author makes a prospect of Maglev.

Keywords: Maglev train, LCS, Electromagnet, Feedback Linearization, Sliding Mode Control

第一章 绪论

§ 1.1 引言

人类社会的交通事业一直以加速度发展，在高效率的当今社会，“速度”更是人类追逐的目标。有着“零高度飞行器”美称的磁悬浮列车可以极大程度地满足人们对地面速度的需要，是铁路技术最根本的突破，它摆脱了轮轨粘着的束缚，以其速度高、乘坐舒适、选线灵活、适应性强、无污染及节能等诸多优点受到各国的广泛重视。地面有轨铁路运输交通具有运量大、能耗低、污染少、全天候、安全可靠等优点。传统的轮轨铁路系统和新兴的磁浮列车都属地面有轨铁路交通系统。两者最大的区别在于：其一，轮轨机车采用旋转电机驱动，列车牵引力收到轮轨之间黏着力的限制，磁浮列车采用线性电机驱动，牵引力不受黏着力限制，这就决定了磁浮列车可以达到很高的速度；其二，轮轨机车是通过车轮来支撑和导向的，存在机械接触，因而噪声和磨损较大，而磁浮列车是采用磁力悬挂和导向，避免了机械接触。

磁悬浮列车按照运行速度分为高速磁悬浮列车和中低速磁悬浮列车，按使用的材料可分为常导磁悬浮列车和超导磁悬浮列车。高速磁悬浮列车的研究在德国、日本等国起步较早，进展良好。美国、加拿大、法国、英国等发达国家相继开始筹划进行磁悬浮运输系统的开发，并均取得了令人瞩目的进展。中国对磁悬浮铁路技术的研究还处于初级阶段。

最新的高速磁悬浮列车以德国的 TR08 型和日本的 HSST 型为代表。HSST 型磁浮列车依靠安装于车上的直线感应电机初级与安装在轨道上的直线电机次级实现牵引，利用同一组电磁铁来实现悬浮与导向。TR08 型列车依靠安装在车上的悬浮电磁铁与铺设在线路上的长定子铁芯之间的吸引力实现悬浮，利用长定子同步直线电机定子通电产生的移动磁场吸引车载悬浮电磁铁沿线路方向运动实现牵引和悬浮，并且利用固定在车上的导向磁铁与线路侧向的导向轨之间的吸引力进行导向。本课题是针对德国 TR08 型磁浮列车的研究。

磁悬浮列车通过主动控制方式使轨道与车辆始终保持一定间隙来削减运行中轨道与车辆的摩擦阻力，从而保证其运行的快速性、舒适性和安全性。由于磁悬浮列车采用多悬浮控制技术，而多个悬浮控制器必定会导致各个控制器之间的相互耦合，影响系统悬浮稳定，故必须采取一定的措施实现悬浮控制器之间的解耦。

本文所研究的课题：高速磁浮列车悬浮系统的仿真及悬浮控制策略的研究，正是针对

高速磁浮列车在各种运行状态下的悬浮控制策略,详细分析了 TR08 磁浮列车的悬浮电磁铁系统,并据此设计了适合各种路况的高速磁浮列车悬浮控制策略。

§ 1.2 世界磁浮交通的发展现状

§ 1.2.1 日本磁浮交通

日本铁道综合技术研究所于 2002 年 2 月 2 日向媒体首次披露,于 2000 年开始研究开发耗资 1.4 亿日元的利用机车悬浮时产生的动能转化为机车驱动力的混合式(电能和转化能)电动机车研发成功。

混合式电动机车式利用机车悬浮时所产生的动能完全转换成电能储存在车内的锂离子电池内,用于机车行驶时作为能源被再次使用。该车在不使用新电能的条件下,完全依靠蓄电池内的电能就可以行驶,行驶速度最高可以达到 100km/h,依靠储存的电能可以连续行驶 60km。该车的开发目的从环保角度出发实现了无公害化可再生资源最大限度的充分利用,完全符合现代社会的环保历年。更重要的意义在于,它对大都市复杂的城区布局有着极强的适应能力,对没有架设电车电线的地段也可以畅通行驶。有利于城市建设和城市交通的有机结合。

名古屋东部丘陵线 TKL (Tobu Kyuryo Line) 是正式的磁悬浮商业化线路,是日本快速列车运输系统 HSST 规划之一。该线系结合名古屋国际博览会修建,由名古屋地铁的藤丘站至爱知环形铁路的八草站,全场 8.9km,为复线,其中 60%的坡道。计划使用中等运量的车辆,基本车型采用 HSST-100L 型车,最早计划于 2008 年完工。借助爱知世博会的机会,于 2005 年 3 月 6 日该线提前 3 年实现商业运营。

§ 1.2.1 美国 Magplane 磁浮交通方案

美国 Magplane 磁悬浮列车方案有两种,一种是速度在 500km/h 的超导方案,另一种是速度约 250km/h 的永磁方案。与其他高速磁悬浮列车相比,美国高速磁悬浮列车方案使用了永磁悬浮,使悬浮气隙达 5~15cm,这样可以大大降低轨道土建工程施工的精度要求,并且该系统使用电磁道岔,改变了多数磁悬浮列车系统使用机械道岔,占地面积大、操作不方便的缺点,从而该方案具有造价低、原理简单、悬浮间隙大、起浮速度低的优点。

Magplane 是美国麻省理工学院以 Montgomery 教授为首的一些专家提出来的, 上世纪 70 年代在美国自然科学基金支持下成功的验证了其原理的可行性, 建造了 1:25 的模型车, 100m 长的试验线, 进行了五代车数百次试验。上世纪 90 年代在美国交通部支持下, 花费约 400 万美元进行了 800km 厂线路的工程估价与设计及美国佛罗里达 Miami—Orlando—Tampa 150km 线路的工程设计, 积累了一定工程经验。

Magplane 方案包括两种类型, 其中有速度在 500km/h 左右的高速方案, 和速度大约在 250km/h 的准高速方案。高速方案为超导方案, 准高速方案为永磁方案。在准高速方案中采用较低的速度, 较小的悬浮间隙, 这种磁悬浮列车造价将更便宜, Magplane 近期的研究发展以这种永磁方案为主。

§ 1.3 中国磁浮交通的发展

中国经济快速发展的需求, 地域宽广、人口众多、石油资源匮乏和环境问题突出的实情, 长距离高速客运市场潜力极大, 决定了中国应当寻找一种适合国情和可持续发展战略的高速、节能、环保、安全的大容量高速客运交通系统。我国在本世纪计划建成总长约8000km的高速客运专线网(如图1.1), 采用高速磁浮交通是重要的发展方向。发展高速磁浮交通, 符合经济社会未来的发展方向, 有利于我国传统制造业的技术升级和结构调整, 促进新兴产业的形成。在中长距离的城市之间采用磁浮交通作为干线交通, 可以更大限度地发挥同城效用和资源互补^[6]。

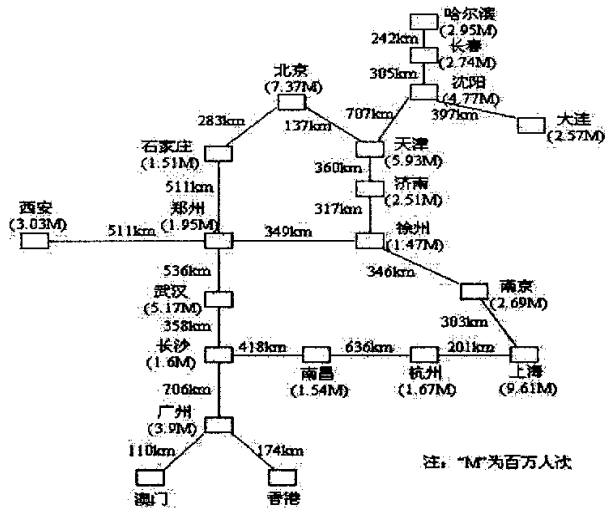


图 1.1 我国高速客运专线网示意图

中国由上世纪80年代后期开始了磁浮列车关键技术研究, 自90年代中期积极推进磁浮列车的发展, 并于本世纪初引进德国成熟的高速磁浮Transrapid系统, 同德国合作在上海浦东建设了世界上第一条商业运行的磁浮线路, 全线长30公里, 连接浦东机场与龙阳车站, 该线路运行三年多来, 其安全性和舒适性得到了时间的考验。上海示范线的成功建设说明

Transrapid是安全的，技术上是可用的，为我国高速磁浮列车技术研究和发 展提供了试验基地，有利于相关设备的改进和新型车辆的研制，也使中国社会对磁浮系统的认知程度较其他国家更高，为中国长大干线高速交通系统的决策提供了依据。当前，对于磁浮系统的进一步推广应用，必须进行系统优化与经济成本的降低。

近年来，中国自主开发研究高速磁浮列车系统也取得了较大的成就，国家也 已将磁浮交通系统纳入“十一五”国家重点研究项目。由于上海磁浮示范运营线尚不能为长大线高速交通系统提供必要的运行实验，所以提出建设约200km的沪杭磁浮实验线，该实验线正处于紧张的谈判讨论中，预计该线路的成功修建，将实现磁浮线路的80%国产化，大大地降低磁浮线路的造价，为进一步规划中的京沪高速线提供依据。

§ 1.4 问题的提出

德国 Transrapid 磁浮铁路是一个十分封闭的技术系统，它采用的各项技术都是对外保密的，我国要发展高速磁浮铁路，首先应保证磁浮列车的运行安全，避免故障发生时的人员伤亡和财产损失，所以磁浮列车的安全问题一直是磁浮列车国产化进程中首要的关注问题。其中最大的保障系统，情况下的悬浮控制系统则成为关注的焦点。目前国内在悬浮控制技术方面尚处于研究的初级阶段，尤其是 TR08 型磁浮列车的悬浮控制系统的诸多特性我们尚不清楚，从而导致对悬浮控制控制系统的设计不准确。磁浮列车悬浮控制系统研究中包括两大问题：

1. 悬浮控制电磁铁的性能研究，各影响因素对悬浮效果的影响。
2. 悬浮控制算法的选择及优化，保证在情况时的各种路况下列车能安全准确停靠。

§ 1.5 论文的主要工作

本文针对 TR08 型高速磁浮列车悬浮系统的性能以及悬浮控制策略两大问题进行了研究，并做了以下相关工作：

- 1、介绍磁浮列车运行控制系统及安全防护系统，悬浮模块装置以及控制原理；
- 2、分别应用电磁场分析方法和动力学分析方法对悬浮控制磁场进行数学解析计算；
- 3、利用仿真分析软件MATLAB建立磁浮列车悬浮装置的模型。

- 4、基于所建立的模型，分析了励磁电流、悬浮气隙对悬浮力和吸引力的影响，并分别分析了悬浮力/吸引力与各变量的数值关系。
- 5、为悬浮控制电磁铁结构设计提供优化参数，并分析了磁铁故障对悬浮效果的影响。
- 6、根据磁浮列车安全悬浮的特殊要求制定了悬浮控制策略。
- 7、考虑到磁浮列车悬浮时悬浮控制器对不同路况的适应，本文根据磁浮列车的动力学模型给出了特殊路段和情况下磁浮列车的受力分析。

第二章 磁浮列车运行控制系统及速度监控

§ 2.1 磁浮列车运行控制系统分析

§ 2.1.1 磁浮列车运行控制系统

磁浮列车的运动控制系统是整个磁浮交通系统正常运转的根本保障，处于安全防护的核心地位。它包括所有用于安全保护、控制、执行和计划的设备，还包括用于设备间通讯的设备，通过计算机控制、计算机网络、通信及信息处理等先进技术与磁浮交通系统的车辆、牵引、线路及道岔等设备或系统相连，完成对列车的运行控制、安全防护、自动运行及调度管理等任务。运行控制系统与列车其他子系统之间的相互关系如图 2.1 所示。

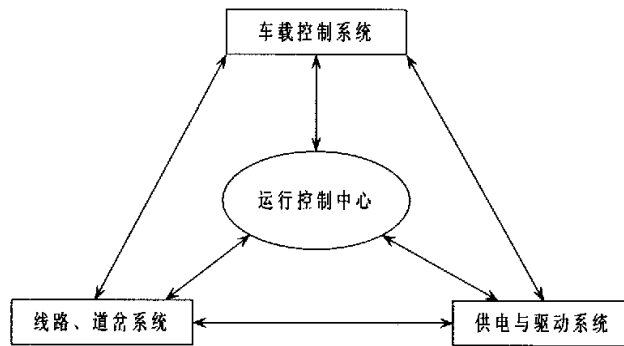


图 2-1 运行控制系统与其他子系统间关系

运行控制系统具有很高的自动控制和防护特性，能根据运行中车辆、线路的状况随时调整运行计划，迅速处理运行中的各种突发事件，只有在需要清除故障时才需要运行控制人员按操作顺序进行人工干预。运行控制系统由三层结构组成：

- 1) 位于控制中心的中央控制系统：主要包括列车自动运行系统(ATO)、操作员终端系统(OTS)、诊断终端系统(DTS)和中央无线电系统等子系统；
- 2) 位于牵引变电站或道岔房的，与牵引区段对应的分区控制系统：主要包括分区控制计算机(DCC)、分区安全计算机(DSC)、分区牵引切断计算机(DPS)、分区道岔模块(DSM)、分区传输计算机(DTC)和分区无线电系统等子系统；
- 3) 位于列车上的车载运行控制系统：主要包括车载安全计算机(VSC1/VSC2)、车载传输计算机(VTC)和车载无线电等子系统^[8]。

整个运行控制系统共同完成全面复杂的功能，系统主要工作数据流程如图 2.2 所示。

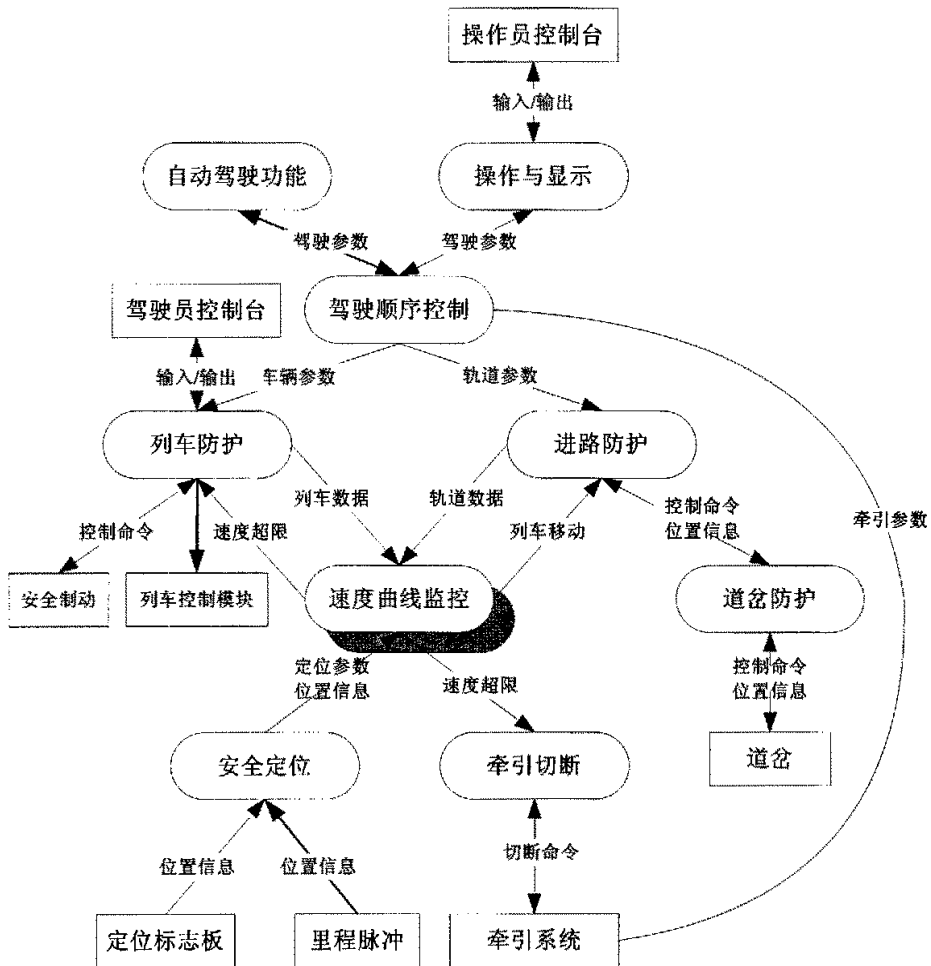


图 2-2 磁浮运行控制系统数据流程

椭圆形框内为自动控制系统(OCS)，矩形框内为外部组件。OCS 功能之间的线条表示需要传送的信息，是下级功能正常工作的一些前提条件。在控制员控制台上，显示该 OCS 管辖内所有列车和轨道的当前状态。基于状态显示和运行需要，操作员执行相应的指令以实现列车的手动驾驶。操作与显示功能负责接收操作员的输入指令，并作为驾驶参数向下传送。驾驶顺序功能对驾驶参数进行处理，将车辆参数和轨道参数分别传递给列车防护功能模块和进路防护模块。轨道参数主要由对进路设置和进路解锁的请求等指令组成，车辆参数包括人工悬浮的请求等。此外，它还以驾驶图形式计算出牵引参数发送给牵引模块。进路防护根据轨道参数设置并监视进路，为此，进路防护从道岔防护中读取道岔的当前位置和状态，并根据需要向道岔防护发送移动命令。列车移动信息用于轨道占用追踪和进路

解锁、列车防护监视并控制所有列车的状态，并通过列车控制模块管理列车的悬浮和着地等。

运行控制系统还是一种兼有安全防护功能的控制系统，在设计、制造、使用和维护过程中均须遵循最基本的安全性原则：“故障—安全”原则。它要求系统在正常运行寿命内，在正常的运行操作规范和维护规范的指导下避免由于系统故障而引起列车运行的灾难性后果。“故障—安全”原则主要体现在如下几个方面：

1) 系统硬件 运行控制系统中所有与安全有关的计算机均采用故障安全计算机系统，该系统具有高度的可靠性、安全性和冗余特性。与安全无关的计算机采用双机热备的冗余方式。

2) 系统软件 软件的设计遵循工业安全防护系统的标准。

3) 数据传输 运行控制系统中所有的数据传输网络，均采用双通道冗余方式。联锁总线具有“故障—安全”特性，一旦数据传输发生通信中断，运行控制系统将采取导向安全措施。

运动控制系统与安全相关的功能主要通过分区控制系统和车载运行控制系统来实现，其中与悬浮控制控制系统息息相关的是车载运行控制系统。

§ 2.1.2 车载运行控制诊断系统

悬浮控制装置位于磁浮列车上，由车载控制系统负责控制与诊断，情况下由车载控制系统完成安全悬浮。车载运行控制系统与其他控制部件一起协同工作，保证了列车的安全操作。

车载控制系统主要包括车载控制单元（BST）、车载电网控制、悬浮/导向/悬浮控制、火警、乘客信息、车门控制等，主要完成与车辆安全有关的车载部件的控制与监测。

每节车辆有两个车载控制单元，主要功能有两个：一、将车载运行控制系统发出的与安全相关的控制信号经一定的处理后分配到相应车辆部件；二、把由车辆部件产生的与安全相关的监测信号送回车载运行控制系统。

为了保证控制与监测信号的可靠传输，各种控制信号与监测信号的传递都是以两倍冗余的方式实现。所有的控制信号由车载运行控制系统 1(BLF1)与车载运行控制系统 2(BLF2)以两倍冗余的方式发出，在车载控制中经过“或”逻辑运算后以两倍冗余的方式传到车辆的各底层部件。这样保证了当一路控制信号出现故障时该控制信号仍然能够执行。所有反

馈回来的监测信号也是以两倍冗余的方式传输到车载控制单元，在车载控制单元中经过逻辑运算后传输到车载运行控制系统 BLF1。每一节中间车的车载控制单元一方面监控本节车各种与安全相关的部件，同时接受与传递来自于相邻车辆车载控制单元的监控信号。所有这些监测与控制信号都是通过点到点的单线连接实现信号的传送，而且这些信号都采用了较高的电压或电流，充分保证了信号传输的可靠性。车载控制单元的控制与监测信号通过车载控制分配器（VTBST）进行分配。每节车辆的两个车载控制单元共用一个车载控制分配器。

每节车辆有一个车辆诊断计算机（SDR），SDR 与所在车辆内的各部件通过 CAN 总线连接从而形成一个诊断子系统。各车辆的功能部件通过部件内的信号采集装置采集部件中的控制信号和状态信号。采集到的状态信号在车辆诊断计算机通过与设定值的比较来判断车辆部件是否出现故障。

分别位于端车 1 与端车 2 的两个列车诊断计算机（FDR）和两个列车操作计算机（FPR）之间通过工业以太网相互连接。每个列车诊断计算机与列车操作计算机都带有一个显示模块和一个键盘，通过 RS232 串行总线与相应的计算机连接实现人一机接口，进行各种信息的显示与操作。其中列车诊断计算机用于显示与存储各节车辆的诊断数据，列车操作计算机可以存储各节车辆间传输的操作数据。列车诊断计算机与列车操作计算机通过以太网与车载无线电设备连接；通过 TTY 串行接口与车载安全计算机（FSI）相连。整个车载诊断系统的列车诊断/操作计算机及其显示器与键盘都具有冗余。两个端车的列车驾驶台的操作和显示功能完全相同，其中一个驾驶台的部件发生故障不会影响另一驾驶台的功能。整个车载诊断系统还具有自我监测功能。

§ 2.2 磁浮列车悬浮控制系统简介

悬浮系统主要由悬浮电磁铁、悬浮间隙测量单元、悬浮电磁铁控制单元组成。悬浮电磁铁同时也是牵引直线电机的励磁磁极。每节中车有 14 个整段悬浮电磁铁和 4 个跨接相邻车辆的部分悬浮电磁铁，每节端车有 14 个整段悬浮电磁铁和 2 个部分悬浮电磁铁。一个标准的整段悬浮电磁铁由两个部分悬浮电磁铁组成。在端车头部两侧的两个悬浮电磁铁被分为三个部分。每个部分悬浮电磁铁对应一对悬浮间隙测量单元和一套悬浮电磁铁控制单元。悬浮电磁铁磁极中还嵌有直线发电机线圈。悬浮电磁铁同时具备悬浮励磁、牵引直线电机励磁和发电三种功能。

3.1.1 部件结构

1) 悬浮电磁铁

悬浮电磁铁除产生悬浮力和牵引电机励磁磁场外,还通过直线发电机为车辆提供电能。悬浮电磁铁结构如图 3-3。

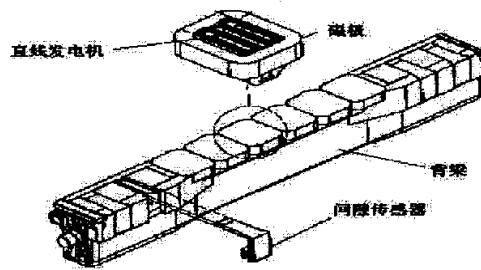


图 3-3 悬浮电磁铁

每个悬浮电磁铁长约 3 米,悬浮电磁铁上的各个零部件通过悬浮电磁铁的背梁连接起来构成一个整体。在背梁上面布置着悬浮电磁铁的以下部件:

- 悬浮电磁铁磁极: 列车有两种不同磁极数量的电磁铁。端车头部的两个悬浮电磁铁各有 14 个磁极,其中两个端部磁极、6 个高铁芯磁极和 6 个主磁极;其余悬浮电磁铁各有 12 个磁极、分别为 2 个端部磁极、4 个高铁芯磁极与 6 个主磁极。高铁芯磁极功能上与主磁极相同,只是铁芯较高,留出了一定的空间用于安装悬浮间隙测量单元;
- 悬浮间隙测量单元: 悬浮间隙测量单元安装在悬浮电磁铁两端高铁芯磁极的铁芯之间,用来测量气隙、垂向加速度和列车运行速度;
- 直线发电机: 悬浮电磁铁的部分磁极上装有直线发电机,每一个悬浮磁铁上有 10 个直线发电机。一个直线发电机有两个串联的线圈,这两个直线发电机线圈安装在悬浮电磁铁的同一个磁极上。端车头部悬浮电磁铁靠车头方向的两个高铁芯磁极以及两个端部磁极上没有直线发电机,剩下的 10 个磁极上装有直线发电机线圈;其余的悬浮电磁铁在每个悬浮电磁铁的高铁芯磁极与主磁极上装有 10 个直线发电机线圈,端部磁极上没有安装直线发电机线圈;
- 磁铁背梁上留有受流器的安装位置以及与两个悬浮架托臂相连接的磁铁铰接机构的固定铰接点;
- 端车头部的悬浮电磁铁每个增加了两个高铁芯磁极。出于冗余度方面的原因,在四

个高铁芯磁极区安装有四个悬浮间隙测量单元。在每个端车头部悬浮电磁铁靠车头方向的磁铁背梁上还安装有两个齿槽计数器，用于列车的相对定位测量；

- 每一辆端车头部的两个悬浮电磁铁中，各安装一个用于绝对定位测量的绝对定位编码器（INKREFA）；
- 在端部悬浮电磁铁上装有防撞装置。

悬浮间隙测量单元

悬浮间隙测量单元用于测量列车的悬浮间隙、列车速度和列车加速度。每个悬浮间隙测量单元主要由一个线圈卡 TSS、一个插接卡 SET 和一个铝制的外壳组成。线圈卡上布置有用于测量悬浮间隙与列车速度的测量线圈；插接卡用于对测量信号进行预处理，向测量传感器提供电源，以及对测量单元的故障进行诊断；外壳则是用于容纳、封装所有的测量器件。悬浮间隙测量单元线圈探头如图 3-4 所示。

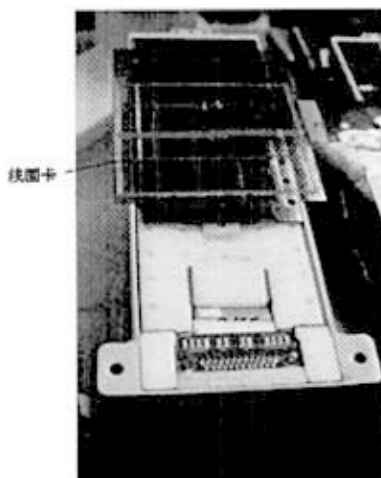


图 3-4 悬浮间隙测量单元（环氧树脂浇铸前）

在每个线圈卡 TSS 上集成有 3 个相互独立的测量线圈：

- A 通道间隙测量线圈
- B 通道间隙测量线圈
- 列车速度测量线圈

A、B 两个通道的间隙测量线圈上各有一个 PT1000 温度传感器用来测量线圈的温度。电磁铁垂向加速度通过间隙测量单元中的加速度传感器测量。

线圈卡 TSS 安装在悬浮间隙传感器外壳的传感器槽中。线圈卡 TSS、填充体与外壳之间通过一个机械连接件相连接，并用环氧树脂浇铸，保证了与环境的隔离。线圈卡通过 25 针 D 型插头和插接卡 SET 相连。悬浮间隙测量线圈卡如图 3-5。

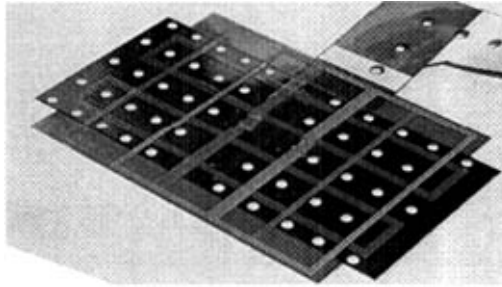


图 3-5 悬浮电磁铁线圈卡

悬浮间隙测量插接卡安装在悬浮间隙测量传感器外壳一个单独箱体中。它有五个功能模块：

- 通道 A 的间隙测量和开关电源 D；
- 通道 B 的间隙测量和开关电源 D；
- 加速度测量；
- 速度测量；
- 诊断。

3) 悬浮电磁铁控制单元 (MRET)

悬浮电磁铁控制单元通过获取来自于悬浮间隙测量单元的信号与相邻悬浮电磁铁控制单元的信号，并在悬浮控制器中经过软件进行一定的运算后最终通过对悬浮电磁铁励磁电流的控制控制悬浮力和气隙。其内部结构按功能大体可分为悬浮斩波器，数字控制部分和信号调理部分。悬浮电磁铁控制单元对悬浮电磁铁的控制如图 3-6 所示。

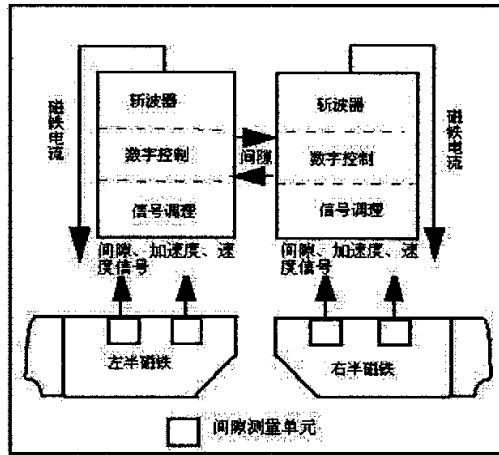


图 3-6 悬浮电磁铁控制图

悬浮电磁铁控制单元的斩波器部分主要通过控制斩波器内开关管的通断来完成对悬浮电磁铁电流的调整，数字控制部分是整个悬浮控制器的核心，它主要是通过对传感器采集到的速度、间隙、加速度等信号进行分析运算，得到斩波器的电压给定值。信号调理部分则是对传感器采集的信号进行一些预处理（如滤波）。

悬浮控制器主要由以下几部分组成：

- 开关电源 SNT-A
- 磁铁电流调节器主电路（斩波器主电路及中间电路）
- 悬浮控制总线卡
- 间隙处理卡
- 悬浮接口卡
- 悬浮力限制卡
- 悬浮控制器卡
- 磁铁电流调节器模拟卡
- 磁铁电流调节器数字卡
- 悬浮电磁铁控制单元机箱

§ 2.3 小节

本章首先讨论了磁浮运行控制系统的组成结构及其中各个组成功能子模块的功能及实

现方法，着重讨论了与悬浮控制紧密相关的车载悬浮控制系统。悬浮控制系统功能的组成结构及其列车安全速度曲线的计算涉及到磁浮列车动力学模型、车载悬浮系统数学模型以及线路和列车数据的有效获取等多方面数据，它是整个列车安全运行有效防护的核心。下一章我们将深入讨论磁浮列车悬浮系统仿真建模及分析过程，并对悬浮电磁场进行详细的数学分析。

第三章 磁浮列车悬浮系统仿真建模

§ 3.1 磁浮列车悬浮系统

§ 3.1.1 悬浮系统分块功能介绍

磁浮列车的悬浮系统使车辆可以在运行线路上实现无接触的悬浮。悬浮系统提供支承车辆浮起的垂向力。通过调节悬浮电磁铁励磁线圈的电流来控制悬浮力的大小，使悬浮电磁铁功能面与轨道相应功能面保持一定的间隙。悬浮电磁铁安装在列车悬浮架的相邻两个托臂上。安装在相同的两个托臂上的一个悬浮电磁铁与一个导向电磁铁构成一个基本的电磁铁模块单元，如图 3-1 所示。



图 3-1 电磁铁模块单元

悬浮电磁铁沿着整列车长度方向布置，每一节车有四个悬浮架，每个悬浮架有四个悬浮框。一节车的两侧各有八个悬浮框。悬浮电磁铁布置在相邻两个悬浮框之间（图 3-2）。

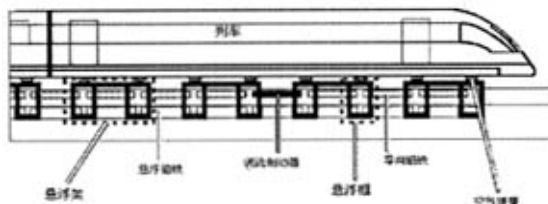


图 3-2 端车上的悬浮/导向电磁铁布置图

1) 悬浮电磁铁

车辆的荷载通过相应的机械铰接机构传递到各个悬浮托臂中的两个相邻的部分悬浮电磁铁上，由悬浮电磁铁来承担车辆的重量。正常情况下由各个电磁铁分担车辆重量。当一个悬浮控制电路发生故障时，其控制的部分悬浮电磁铁不能产生悬浮力，这部分悬浮电磁铁所承担的荷载由相邻的悬浮电磁铁承担，这时失效的部分悬浮电磁铁所在位置的空气弹簧要排气。当对应的空气弹簧部分排气或完全排气后，相应荷载可以几乎均匀地分配到剩余的悬浮电磁铁上。

悬浮电磁铁电流平均值由静态荷载和当时的悬浮电磁铁间隙计算得出。由于悬浮电磁铁的跟随特性造成了悬浮间隙的动态变化，为了保证在电磁铁悬浮间隙动态变化的情况下悬浮力大小的稳定并与承受荷载平衡，悬浮电磁铁的励磁电流必须跟随悬浮间隙的变化，所以要在悬浮电流平均值上附加有一个交变电流分量。悬浮电磁铁跟随特性引起的最大间隙动态偏差在列车荷载情况 A 时为 4.5mm，荷载情况 B 和 C 时为 5.5mm（各种荷载定义见本章 3.3）。另外悬浮间隙的动态变化特性还会造成相对于最大静态荷载 10%的动荷载。

悬浮电磁铁线圈中通入电流后会引引起电磁铁励磁线圈温度的升高，由于线圈温度过高后会对线圈的功能造成损伤，所以必须有较好的措施来防止悬浮电磁铁线圈温度过高。悬浮电磁铁最高温度出现在位于磁极之间缝隙区域的最外层磁极线圈上。上海项目相对于 TR07 为减小电磁铁线圈温升采取了如下一些措施：

- 通过把线圈绕组高度从 71mm 增加到 83mm，扩大了磁极散热表面的面积；
- 通过把线圈绝缘厚度从 2.3mm 减少到 1.2mm，改善了线圈/铁芯间的传热性能；
- 电磁铁背梁的紧固件在电磁铁磁极和背梁之间有更好的传热性能；
- 更长的磁铁背梁，从 2923mm 增加到 3045.5mm。

悬浮电磁铁具有如下功能：

- 产生悬浮力

通过悬浮力把整个车辆荷载（作用在托臂上的荷载）传递到轨道上；

通过悬浮电磁铁铰接机构的弹性元件实现对动态电磁悬浮力的解耦。

- 为直线同步电动机产生励磁磁场

通过定子中的移动磁场和悬浮电磁铁交替变化的磁场相互作用产生牵引力；

通过悬浮电磁铁极距（266.5mm）和直线同步电动机定子极距（258mm）的差异来减少定子电流谐波。

- 产生车载电能

利用牵引直线电机定子齿槽间气隙磁场的不同，列车运行时在直线发电机的线圈中产生磁通量的变化，从而在线圈中感应出交流电。

磁极上相邻两个直线发电机线圈之间电流相位相差约 36° （相当于一个齿槽周期 86mm），使每个电磁铁上的 10 个主磁极上的直线发电机发出的交流电产生相位差，并在两个升压斩波器中分别进行处理。

悬浮电磁铁的零部件及其功能：

- 端部防撞斜面：用于当出现局部冰层或有异物时防止车辆其它功能部件与冰层或异物的碰撞；
- 磁极：包括主磁极、高铁芯磁极和端部磁极，用于产生磁场。为了安装悬浮间隙测量单元，高铁芯磁极的励磁线圈上平面低于磁极铁芯上表面，从而留出了一个用于安装悬浮间隙测量单元的安装位置，在装上悬浮间隙测量单元后整个悬浮电磁铁表面保持平整；
- 磁极磁轭：用于导磁；
- 磁铁背梁：固定磁极/磁极磁轭；用于安装悬浮间隙测量单元，具有安装托臂的开口和用于固定磁铁铰接的结构；可以布置电缆和安装受流器；
- 悬浮间隙测量单元：采用了可靠且抗振的夹紧装置和螺栓连接来固定悬浮间隙测量单元，便于快速拆换；
- 电力电缆：包括悬浮电磁铁磁极线圈间串联电缆以及磁极到插座连接电缆、磁铁电缆通道中的插座与磁铁控制单元接口的连接电缆；
- 安装位置：安装位置的布置及连接方式使测量单元可快速更换，从而具有良好的可维护性。每节车有 4 个电磁铁上有受流器安装位置，分别带有引线和连接箱。端车头部两个悬浮电磁铁有相对定位测量单元（齿槽计数器）的四个安装位置。端车头部左右各两个电磁铁上还分别有一个绝对定位读码器安装位置，可安装总共四个绝对定位读码器；
- 表面构造：通过刚性磁铁背梁和相应的磁极和传感器装配形成平整的磁极表面。还通过一些填盖措施，使磁铁外表面的各端面都较光滑平整，以减轻高速时的空气湍流，降低噪声；
- 抗雷击：通过对空气间隙区域内的所有元件进行绝缘，防止雷击损坏。

2) 悬浮间隙测量单元

在悬浮间隙测量单元中产生两路相互独立的间隙信号（通道 A 与通道 B，两者在结构上完全相同。）、一路加速度信号、一路速度信号以及一路诊断信号。这 5 路信号通过一个串行口传输给磁铁控制单元中的间隙处理卡。间隙测量单元的结构见图 3-8。

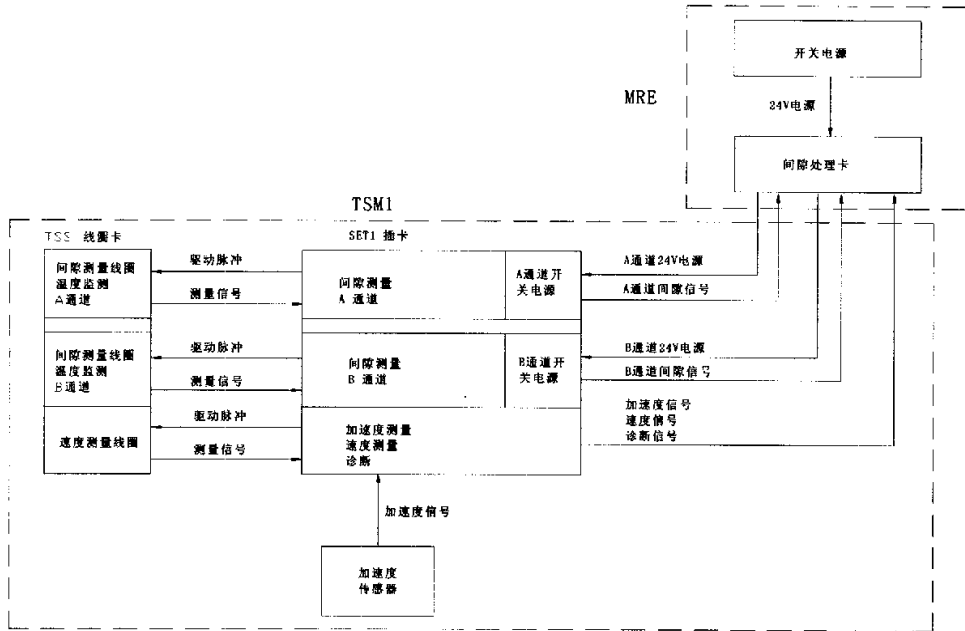


图 3-3 悬浮间隙测量单元结构方框图

每节端车有 68 个悬浮间隙测量单元，其中端车头部的两个悬浮电磁铁上有 6 个悬浮间隙测量单元，其余的每个悬浮电磁铁上有 4 个悬浮间隙测量单元。每节中间车有 64 个悬浮间隙测量单元，每个悬浮电磁铁上有 4 个悬浮间隙测量单元。一个悬浮电磁铁控制单元对应两个悬浮间隙测量单元。由于在车辆上安装位置的不同共使用了 4 种不同的间隙测量单元 TSM1、TSM2、TSM3 和 TSM4。这 4 种不同的间隙测量单元的区别在于测量线圈的激励频率有所不同。

悬浮间隙测量单元的电源由悬浮电磁铁控制单元中的 24V 开关电源提供。该 24V 电源在 A、B 间隙测量通道中的 A、B 通道开关电源被转换为 5V 与 12V 两种电压。A 通道开关电源为 A 通道间隙测量线圈供电，B 通道开关电源一方面为 B 通道间隙测量线圈供电，另一方面还为速度测量、加速度测量与诊断供电。

TTS 线圈卡上的线圈由振幅为 12V 的脉冲波激振。TTS 线圈卡有一个特性随线圈与定子的距离变化的并联振荡回路，悬浮间隙测量装置提供高频激励信号并且对 TSS 的输出信号进行解调。解调是由对信号振幅和相位信息进行分析的同步解调器完成的。通过 10 位分辨率的模/数转换器对解调产生的低频原始信号进行数字化处理。得到的 10 位数据，存储到容量为 512K 的 PROM 中。监测间隙测量线圈温度的温度传感器测得的线圈温度数据也被传送到 PROM。对间隙信号进行线性化处理和温度补偿等预处理后，再通过 RS485 总线送到悬浮电磁铁控制单元。

列车的速度测量与间隙测量原理相似。与间隙测量线圈不同，为了提高速度测量线圈的灵敏度，TSS 线圈卡上的速度测量线圈经过专门的设计，使其对定子齿槽具有尽可能大的灵敏度。具体设计采用了两个宽度接近一个定子齿宽的测量线圈，并使两个测量线圈的间距为齿槽中心线间距（43mm），这样可以使两个线圈在同一时刻感应的电流幅值相差最大。处理电路对两个线圈产生的差分信号进行处理。速度测量信号被解调后的波形反映了线圈相对齿槽的位置。由于采集的测量信号是差分信号，所以无需进行温漂补偿。

加速度信号从集成在悬浮间隙传感器机箱中的一个加速度传感器测得。它的输出信号被 SET 插接卡放大，并经 12 位模/数转换器转换为数字信号，然后经 RS485 串口传送给悬浮电磁铁控制单元。

3) 悬浮电磁铁控制单元

悬浮电磁铁控制单元用来调节悬浮电磁铁励磁线圈的电流。每一个悬浮电磁铁的两个（或三个）部分悬浮电磁铁分别由一个悬浮电磁铁控制单元控制。例外情况是端车头部左右两侧第一个悬浮电磁铁分为三段，每一段由一个悬浮电磁铁控制单元控制。每个悬浮电磁铁上的悬浮电磁铁控制单元在结构上完全相同，控制功能相互独立。一个悬浮框上相邻两个悬浮电磁铁控制回路的电流应该相等，因此每一个悬浮电磁铁控制单元都为其相邻的悬浮电磁铁控制单元提供自身的电流信息。不同悬浮框上的控制回路不存在相互耦合的关系。车辆的悬浮命令由地面控制中心通过 38G 无线天线传输到车辆运行控制系统（BLF1），再由车辆运行控制系统以两倍冗余的控制信号（由 BLF1 和 BLF2 发出），经车载控制单元传送到悬浮电磁铁控制单元。在悬浮控制单元中通过一定的信号处理和算法后控制悬浮电磁铁电流。控制信号传递原理图如图 3-4。

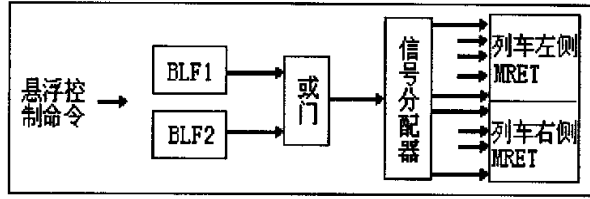


图 3-4 列车悬浮控制信号传递图

悬浮控制单元接受来自于间隙测量单元的两路速度信号、两路加速度信号与四路悬浮间隙信号，所有这些信号首先送到悬浮控制单元的间隙处理卡上。由间隙处理卡处理后向控制器卡提供一个双通道冗余的加速度信号和一个速度信号。间隙处理卡同时根据得到的四路间隙信号产生两路相互独立的间隙信号，这两路悬浮间隙信号一方面被送到力限制卡的间隙处理单元，用于对悬浮力的计算，另一方面一路送到悬浮控制器卡中用于控制，另一路送到诊断控制器中用于监测。

● 悬浮力限制卡

悬浮力限制卡主要用于对电磁铁悬浮力进行计算，并对悬浮力是否超出最大值进行监控，同时还具有空气弹簧排气控制功能。悬浮力限制卡对电磁铁悬浮力的计算是在力限制控制器中进行，并根据获得的下列信号进行计算：悬浮间隙、悬浮电磁铁实际电流、悬浮电磁铁所在的安装位置、相邻磁铁控制回路的状态信号。所有的这些信号都是双通道冗余的。悬浮力限制卡对空气弹簧排气的控制则按以下方式进行：由悬浮力限制卡中的间隙分配处理部分对收到的两路间隙信号的可靠性进行比较，并将比较结果发送到接口卡中的空气弹簧控制器中以指示悬浮架是否可靠的悬浮；悬浮力限制卡中的排气控制部分接收两路冗余的悬浮电磁铁实际电流大小监测信号，并判断电磁铁电流是否过大，如果电磁铁电流过大，排气控制部分会根据这两路电流信号产生两路用于控制空气弹簧冗余排气的控制信号到空气弹簧控制器中。

● 悬浮电磁铁电流调节器

悬浮电磁铁电流调节器用于对悬浮电磁铁的电流大小进行控制。悬浮电磁铁电流调节器的主电路电源由 440V 电网提供。其电路结构如图 3-10。

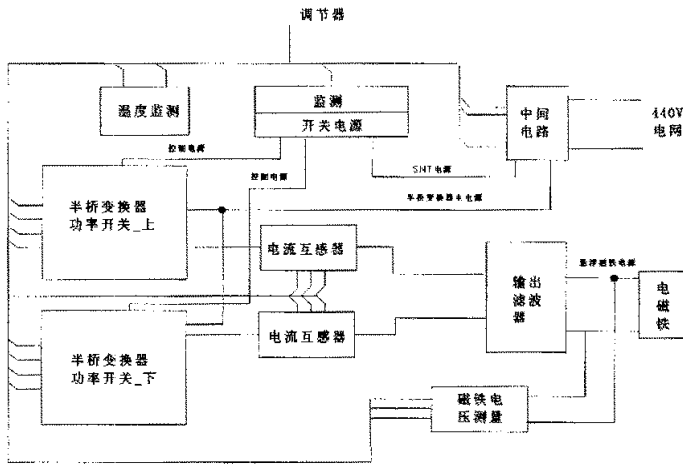


图 3-5 悬浮电磁铁电流调节器电路图

悬浮电磁铁电流调节器主要包括供电器和不对称半桥变换器(斩波器)。其中供电器包括中间电路、悬浮电磁铁电流互感器与悬浮电磁铁电压检测器、温度传感器等。不对称半桥变换器包括上部达林顿开关控制电路及电路板、下部达林顿开关控制电路及电路板。440V 电网的电源分别通过中间电路(用于稳压和隔离)送到半桥变换器的上部与下部两部分以及开关电源。开关电源将 440V 电源变换为 24V、15V、5V 三种等级的电压，为整个电流调节器提供各种等级的控制电压。440V 电源经过半桥变换器变换后送到输出滤波器中进行平波处理，然后输入悬浮电磁铁线圈进行励磁。电磁铁的电流由两个电流互感器进行检测，电压由一个电压互感器进行检测，并将检测得到的电压、电流信号送到悬浮电磁铁控制器中。温度传感器则用于监测电流调节器散热器的温度。

● 悬浮电磁铁控制器

悬浮电磁铁控制器用于对悬浮电磁铁的给定电压值进行控制。它主要由调节控制器与诊断控制器组成。调节控制器有数字输入与模拟输入两个输入端口。模拟输入端口接收的模拟信号包括悬浮电磁铁的实际电流、悬浮电磁铁的实际电压、悬浮间隙、加速度信号等；数字输入端口接收的数字信号有列车运行速度信号、间隙测量单元的状态信号、起浮信号等。调节控制器对相关的输入信号进行一定的算法处理后得到悬浮电磁铁的模拟电压给定值，并将这个模拟电压给定值发送到悬浮电磁铁电流调节器中。同时调节控制器通过一个

先入先出的 RAM(FIFO)将控制的诊断数据传输到诊断控制器中。调节控制器可以通过自身的复位端口进行复位。

诊断控制器只用于监测并诊断悬浮电磁铁控制回路和空气弹簧的状态，自身不会对悬浮电磁铁的控制回路与空气弹簧控制产生影响。其产生的诊断结果通过 CAN 总线传输到列车诊断系统。诊断控制器共有 5 个接口接收诊断数据，这 5 个接口分别为：8 位诊断总线接口、模拟接口、数字接口、异步接口、与 FIFO 的接口。具体每个接口接收的诊断信号如下：

- A) 8 位诊断总线：插卡的诊断数据；
- B) 模拟接口：悬浮电磁铁实际电流、悬浮间隙信号、加速度信号、来自于力限制卡的悬浮电磁铁实际力信号；
- C) 数字接口：速度信号；
- D) 异步接口：异步接口状态测试信号；
- E) 与 FIFO 的接口：调节控制器的诊断数据。

悬浮控制器的结构图如图 3-6。

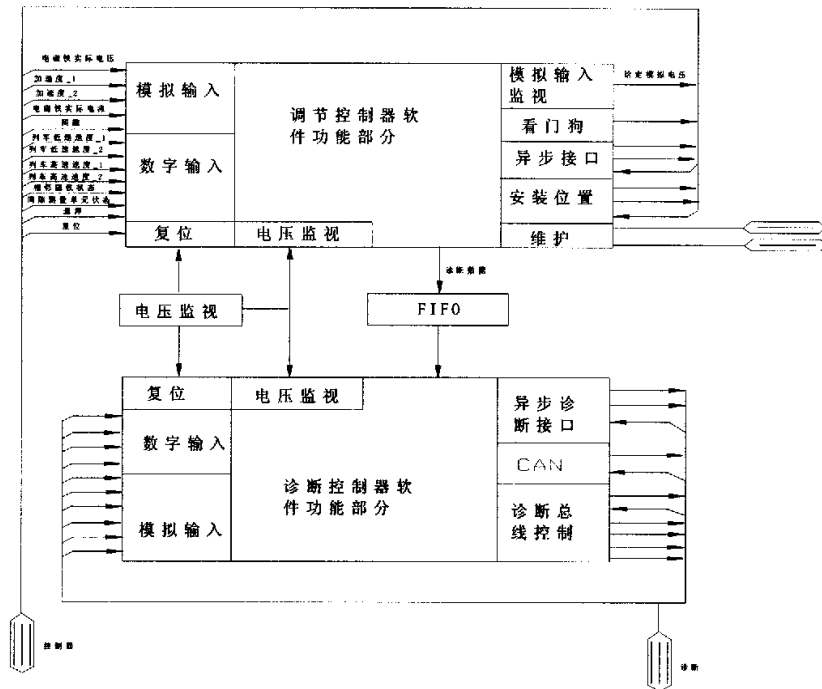


图 3-6 悬浮控制器结构

- 对应同一悬浮框的两个悬浮电磁铁控制单元间的信号传递

每个悬浮电磁铁控制单元都会与同一悬浮框相邻悬浮电磁铁控制单元交换信号，两个悬浮电磁铁控制单元间交换的信号如下：

- a、悬浮电磁铁的实际电流值；
- b、列车速度；
- c、悬浮间隙；
- d、间隙测量单元的状态信号。

当两个相邻悬浮电磁铁间的信号传递发生错误时，就判定相邻的部分悬浮电磁铁失效。

§ 3.1.2 安全和冗余设计

1) 悬浮电磁铁

一个悬浮框中的两个相邻的部分悬浮电磁铁承受着磁铁铰接机构传递过来的荷载。当其中一个部分悬浮电磁铁发生故障时，可以由相邻的部分悬浮电磁铁承受悬浮框的荷载。为了对悬浮电磁铁的荷载和电流进行平均分配，通过对空气弹簧的排气来调节悬浮框荷载。端车头部第一个悬浮电磁铁被分成了三个部分电磁铁，并增加了两个间隙测量单元和一套悬浮电磁铁控制单元来保证相应的冗余度。其余的悬浮电磁铁每个都由两个控制器进行控制，这样当一个控制器失效时不至于影响整个悬浮电磁铁的功能。

为尽量减小由于电网出现故障对悬浮电磁铁悬浮功能的影响，悬浮电磁铁磁极的供电采用如下几种方式：列车同一侧左右相邻的电磁铁由不同的电网供电；列车左右两侧相对电磁铁也采用不同电网供电；端车头部左右两侧的第一个电磁铁都分为三段，分别由三个电网供电，并且这两个电磁铁相对应的磁极也是由不同的电网供电。这样就保证了当一个电网故障导致其相应电磁铁失效时，该电磁铁所承担的荷载可以较为均匀的由相邻和相对的电磁铁承担。

2) 悬浮间隙测量单元

与安全性相关的间隙信号在两个相互独立通道中产生，即在间隙测量 A 通道与 B 通道中。每个模块都拥有各自的 A 通道 D 型开关电源或 B 通道 D 型开关电源。这样每个测量通道都独立地由所属开关电源供电。这两个开关电源分别通过相互隔离的线路由各自的一

个 24 伏电源（来自于悬浮电磁铁控制单元）进行供电：

- A 通道： P24_1_A_S, GND24_1_A_S;
- B 通道： P24_1_B_S, GND24_1_B_S。

这些线路间具有 2 千伏的绝缘强度。线圈卡 TSS 采用了多层板结构，基板与外层薄膜的材料都是聚酰亚胺。多层板的每一层的尺寸要保证在所有工作条件下所有单个线路之间以及在单个线路与周围金属外壳之间的绝缘强度大于 2kV。

对间隙测量信号进行温度补偿时，需要通过 TSS 线圈卡上的 Pt1000 电阻器进行温度测量。因此每个间隙测量通道都有一个单独的 Pt1000 热电阻，这些热电阻之间同样具有安全隔离。

3) 悬浮电磁铁控制单元

每一个电磁铁控制单元都对应两个冗余的间隙测量单元，当有一个间隙测量单元失效时，该悬浮控制单元会获取相邻的悬浮控制单元中测得的间隙信号，经一定的参数调整后对间隙信号进行比较来获取正确的间隙信息；同时把剩下的一个悬浮测量单元测得的间隙信息传给相邻的电磁铁控制单元。如果一个悬浮电磁铁控制单元中的两个悬浮间隙测量单元都失效，则该悬浮电磁铁控制单元关闭。

悬浮电磁铁控制单元间的信号传递如图 3-7。

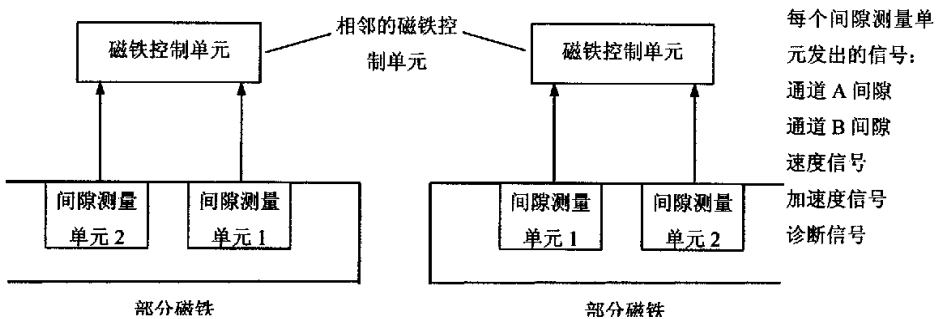


图 3-7 悬浮控制单元信号传递

通过调节器插接卡 (DR) 对两个间隙测量单元发出的两个加速度信号和两个速度信号的有效性进行监测。当一个加速度信号失效或者受到的干扰太大时，就使用另外一个加速度信号。如果两个加速度信号都失效，则使该悬浮电磁铁控制单元关断。每个悬浮电磁铁控制单元将自己的两个速度信号与从相邻悬浮电磁铁控制单元传来的一个速度信号进行 3

选 2 比较后从中选出两个信号，进而得出正确的速度信息。如果这 3 个信号比较后得不到正确的速度信号，就会采用一组适合所有速度的参数进行控制。

如果与相邻的悬浮电磁铁控制单元的数据传输发生中断，就会假设该悬浮电磁铁控制单元已失效，此时也就不再进行电流平衡，并将这种状态通知相邻悬浮电磁铁控制单元。如果悬浮电磁铁控制单元实际并没有发生失效却被识别为失效，不会影响控制回路的稳定性。

总的说来，一个部分悬浮电磁铁悬浮功能的失效由以下情况决定：一个悬浮电磁铁控制单元故障，或两个间隙测量单元故障，或部分悬浮电磁铁本身故障。而一个间隙测量单元的故障不会使相应悬浮控制电路失效。

§ 3.1.3 基本参数

1) 尺寸参数

1、系统尺寸			
定子极距	τ_p [mm]	258	
定子宽度	b_s [mm]	180	
磁铁间距	τ_M [mm]	3096	
磁铁极距 τ_{MP}	主磁极间距	τ_{MP1} [mm]	266.5
	端磁极间距	τ_{MP2} [mm]	222.7
磁铁长度	L_w [mm]	3045.5	
平均推力角	$\cos \alpha$	0.97	
2、磁路			
宽度(y-坐标)	[mm]		
磁铁背梁	b_R	170	
主磁极	b_w	170	
端磁极极靴	b_E	206	
叠片铁芯宽度	b_{EB}	176	
长度(x-坐标)	[mm]		
主磁极	l_M	166.5	

端磁极	l_E	79
直线发电机齿槽	l_L	4×11
高度(z-坐标)		
主磁极	h_H	90
高铁芯磁极	h_{HH}	118
端磁极	h_E	118
叠片铁芯极靴	h_{EB}	23
磁极靠背	h_R	56
直线发电机齿槽	h_L	15
磁极表面涂层厚度	[mm]	2.0/-0.2

2) 直线发电机线圈

数据导线		
线圈槽口面积	$A_{FL}[\text{mm}^2]$	$11 \times 15 = 165$
含绝缘层的导线	$W \times d \times h(\text{mm}^2)$	$28 \times 3.15 \times 1.25$
铜导线截面积 (不含绝缘)	$Q[\text{mm}^2]$	$\times. \times \times$
槽满率	k_{FL}	0.63
线圈平均每匝长度	$l_{LM}[\text{m}]$	$\times. \times \times \times$
线圈总长($l_{LM} \times w$)	$L_L[\text{m}]$	2×12.8
绝缘		
绝缘漆厚度	[mm]	$\times. \times \times \pm 0.04$

3) 悬浮电磁铁重量

TMA (标准磁铁): 603 kg;

TMB (车头磁铁): 653 kg;

TMC (带受流器的标准磁铁): 633 kg;

TMD (带绝对定位读码器的标准磁铁): 615 kg;

平均到一个电磁铁必须承受的重量: 750kg。

§ 3.2 磁悬浮系统数学分析

§ 3.2.1 悬浮控制基本原理

由电磁理论知，通直流电的线圈绕组会产生方向恒定、磁通大小随电流变化而变化的磁场，产生垂直方向的磁场。EMS电磁型悬浮列车依靠电磁吸力以给定气隙悬浮于轨道之上，并以无接触的线性电机作为驱动。一节车厢有四个悬浮控制器，独立控制各个电磁铁单元的励磁电流，达到控制悬浮气隙高度的目的。

§ 3.2.2 悬浮磁场的电磁场分析

悬浮系统装置的设计与计算问题属于变边界的三维非线性涡流场问题。气隙中的磁场是由励磁电磁铁产生的磁感应强度的强制分量，以及磁极移动时磁极前端和磁极后端出现电磁场过渡过程产生的暂态分量叠加而成，其数学模型为非线性微分方程。磁悬浮系统的基本结构简化图如下图所示：

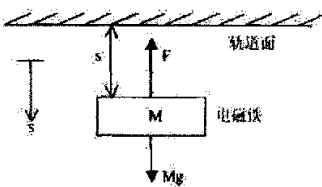


图 3-8 悬浮结构简化图

其中 s 表示电磁铁和轨道面的间隙，也就是前述公式中的 δ ，向下为正； M 表示悬浮电磁铁的质量； F 表示悬浮力， Mg 表示电磁铁的重量。由此可以得出电磁铁的动力学方程：

$$M\ddot{\delta} = Mg - F \quad \text{其中悬浮力可以由下式得到:}$$

$$\text{悬浮力: } F = \frac{\mu_0 N^2 A I^2}{4\delta^2} \quad (3-1)$$

其中 N 为线圈匝数， A 为电磁线圈的有效极面积， I 为电磁线圈中流过的电流， μ_0 为真空磁导率。为了便于表达，令： $k = \frac{\mu_0 N^2 A}{4}$ ，则：

$$\text{电磁铁的动力学方程可以写成: } M\ddot{\delta} = Mg - k \frac{I^2}{\delta^2} \quad (3-2)$$

$$\text{电磁线圈的电压平衡方程: } u = RI + \frac{d(L \cdot I)}{dt} \quad (3-3)$$

上式中： R 为线圈的等效电阻， L 为线圈的等效电感。电感的等效表达式： $L = \frac{2k}{\delta}$ ，

将此式带入表达式(2)可以得到:

$$u = RI + \frac{2k}{\delta} \dot{j} - \frac{2kI}{\delta^2} \dot{\delta} \quad (3-4)$$

方程(3-2)和(3-4)即为单铁磁悬浮系统的基本模型。

§ 3.3 悬浮电磁场模型线性化的两种方法

线性化的控制方法主要有两个大类:直接反馈线性化方法和基于平衡点展开的线性化方法,在实际应用时,多数控制系统采用的基于平衡点展开的线性化方法。磁悬浮系统是一类典型的非线性系统,在控制系统的设计过程中也遇到了这样的问题:采用平衡点展开的线性化方法设计系统,由于控制参数都是基于某一平衡点求得的,是一种局部线性化的方法,因而不能保证控制系统在大范围内稳定,但是磁悬浮系统又要求电磁铁在一个比较大运动范围内稳定。

直接反馈线性化方法是一种全局线性化的方法,它是利用代数的方法将一个非线性系统的动态特性变化为一个线性系统的动态特性,这种方法不但简化了控制器的设计,而且可以保证控制器的全局稳定。

§ 3.3.1 直接反馈线性化

令 $x_1 = \delta$, $x_2 = \frac{dx_1}{dt}$, $x_3 = I$, 从而可以得到系统的状态空间方程为:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = g - \frac{kx_3^2}{Mx_1^2} \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{x_2 x_3}{x_1} - \frac{Rx_1 x_3}{2k} + \frac{x_1}{2k} u \end{cases} \quad (3-5)$$

设 $z_1 = x_1$, $z_2 = x_2$, $z_3 = g - \frac{kx_3^2}{Mx_1^2}$, 其中严格要求 $x_1 > 0$, $x_3 > 0$ 从而保证变换过程可逆。

新的状态变量是悬浮电磁铁的悬浮间隙,速度,加速度。在新的坐标系下,可以得到系统的状态方程:

$$\begin{cases} \frac{dz_1}{dt} = z_2 \\ \frac{dz_2}{dt} = z_3 \\ \frac{dz_3}{dt} = \alpha(x) + \beta(x)u \end{cases} \quad (3-6) \quad \text{其中:} \quad \begin{cases} \alpha(x) = \frac{Rx_2^2}{Mx_1} \\ \beta(x) = -\frac{x_3}{Mx_1} \end{cases}$$

应用状态反馈： $u = (-\alpha(x) + w) / \beta(x)$ 可以得出线性化以后的系统状态空间描述：

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w \quad (3-7)$$

考虑到实际的悬浮情况，假设系统最终的平衡点为： $(z_{10}, 0, 0)$ ，可以用下面的线性反

馈控制规律： $w = K_1(z_1 - z_{10}) + K_2z_2 + K_3z_3 + w_0$ ，其中： w_0 由系统的平衡状态计算得出。

由于反馈线性化以后的系统矩阵为：

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

很容易看出这个系统是一个可控系统。所以适当选择系数 K_1 ,

K_2 , K_3 就可以保证线性系统的极点位于复平面的左半平面，从而保证了系统的稳定。

§ 3.3.2 基于平衡点展开线性化

对于传统的 PID 控制，控制规律可以表示为： $u = k_p(\delta - \delta_0) - k_I I + k_D y$ ，将这个控制规律带入表达式 (4) 可以得到：

$$\begin{cases} \dot{\delta} = y \\ \dot{y} = g - \frac{kI^2}{M\delta^2} \\ \dot{I} = -\left(\frac{\delta}{2k}R - \frac{y}{\delta}\right)I + \frac{\delta}{2k}[u + k_p(\delta - \delta_0) - k_I I + k_D y] \end{cases} \quad (3-8)$$

令 $\dot{\delta} = 0, \dot{y} = 0, \dot{I} = 0$ ，可以求出系统的两个奇点：

$$\delta_1 = \frac{u - k_p \delta_0}{R_i \sqrt{\frac{Mg}{k}} - k_p}, \quad y_1 = 0, \quad I_1 = \frac{u - k_p \delta_0}{R_i - k_p \sqrt{\frac{k}{Mg}}};$$

$$\delta_2 = \frac{u - k_p \delta_0}{R_i \sqrt{\frac{Mg}{k}} + k_p}, \quad y_2 = 0, \quad I_2 = \frac{u - k_p \delta_0}{R_i + k_p \sqrt{\frac{k}{Mg}}}, \quad u < 0。其中, R_i = R + k_f。$$

在这两个奇点附近系统具有相同的工作性质, 所以只在第一个奇点附近对系统进行分析。这里取 $\delta_0 = \delta_1$ 。

磁悬浮系统在该奇点处所对应的线性系统为:
$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

磁悬浮系统在该奇点处对应系统矩阵分别为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2g}{\delta_0} & 0 & -\frac{2}{\delta_0} \sqrt{\frac{kg}{M}} \\ \frac{k_p \delta_0}{2k} & \frac{\delta_0 k_0}{2k} + \sqrt{\frac{Mg}{k}} & -\frac{R_i \delta_0}{2k} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\delta_0}{2k} \end{bmatrix}^T, \quad C = [1 \ 0 \ 0],$$

将上述三式带入能控性矩阵: $S_c = [B \ AB \ A^2B]$, 和能观性矩阵: $S_o = [C^T \ A^T C^T \ (A^T)^2 C^T]$, 容易看出, 系统为能控能观系统。

§ 3.3.3 两种线性化方法的仿真性能比较

为了比较两种控制方法的性能, 下面给出基于这两种方法的 PID 控制器仿真结果。在仿真时, 采用磁悬浮系统的实际参数, 当用直接反馈线性化控制方法是, 可以得到位置响应曲线如下:

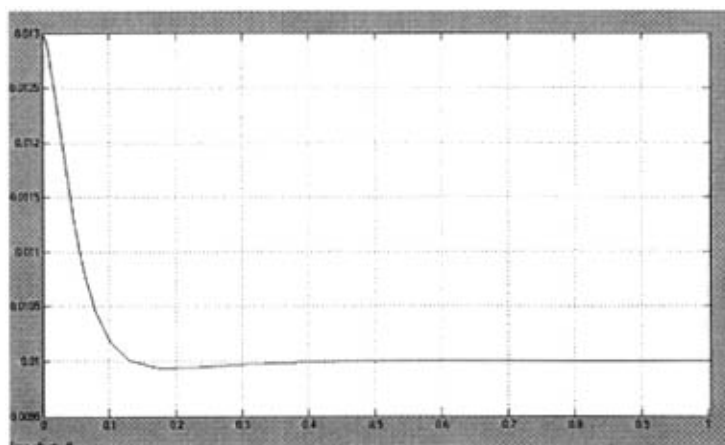


图 3-9 基于直接反馈线性化的 PID 控制系统输出曲线

从上面的曲线可以看出，由直接反馈线性化方法得到的控制参数运用到原非线性系统后，系统的响应时间较少，超调也比较小。

采用基于平衡点展开设计 PID 控制器的方法，把控制器运用到线性化后的系统，可以得到下面的仿真结果：

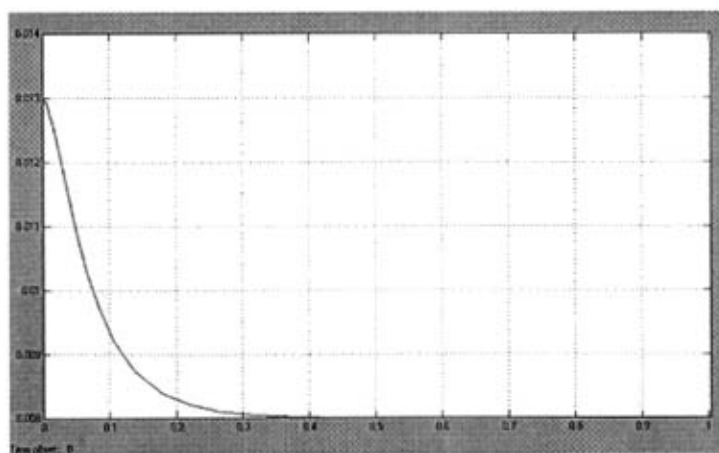


图 3-10 基于平衡点展开的 PID 控制系统输出

从上面的曲线可以看出，由基于平衡点展开的线性化方法得到的控制参数运用到线性化系统后，系统的响应时间较小，没有超调。如果控制对象完全按照我们设计的参数运行，平衡点展开线性化无疑是理想的方法。然而实际控制对象是一个强非线性不稳定系统，系统参数实时在变，因此平衡点展开法就有很大的局限性，为了说明该问题，我们可以采用原来的非线性系统作为控制对象，比较得到的结果。

采用基于平衡点展开设计 PID 控制器的方法，把控制器运用到原来的非线性系统，可以得到下面的仿真结果：

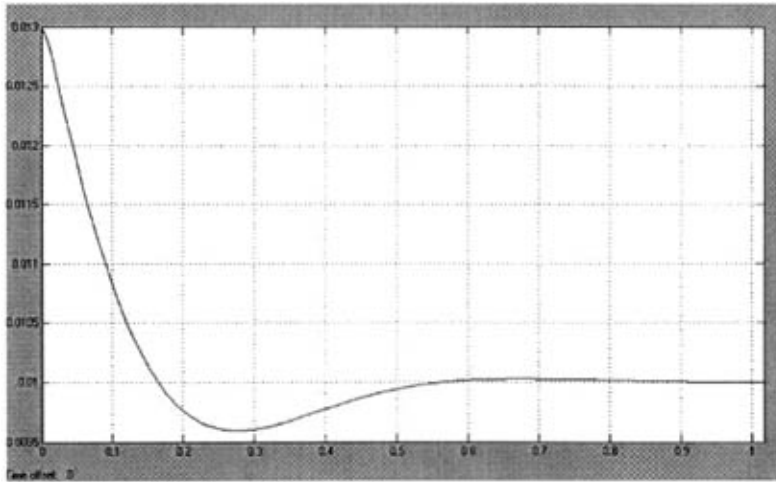


图 3-11 采用实际非线性系统对象后的平衡点展开设计 PID 控制器结果曲线

从上面的曲线可以看出，由基于平衡点展开的线性化方法得到的控制参数运用到原来的非线性系统以后，系统的调节时间明显变长，超调量增大。

比较结论：

从仿真的结果可以看出，直接反馈线性化方法可以达到较好的控制效果，而基于平衡点展开的控制方法在设计上只能保证线性化系统的性能最优，但是当运用的实际的非线性系统时，控制系统的性能会明显的变差。同时实验表明，如果对于系统的结果参数不变的系统，两种控制方法都可以实现稳定的悬浮，但是基于平衡点展开的方法实际控制参数与设计的参数相差比较大，而直接反馈线性化的实际控制参数与设计的参数比较接近。同时从设计的过程可以看出，如果系统参数变化时，直接反馈线性化的新控制参数比较容易求出。而平衡点展开法在系统参数变化的情况下，要求得一组新的控制参数就比直接反馈线性化复杂的多。从而可以看出，直接反馈线性化相对于平衡点展开更具有简便性和实用性。因此以下章节的分析和计算，所应用的对系统模型的线性化，都是直接反馈线性化。

§ 3.4 小节

本章详细介绍了 TR08 型磁浮列车的悬浮装置、对该控制装置的控制方式，安全冗余控制方式，以及悬浮气隙信号采集和分析的工作过程。然后简单分析了悬浮控制的原理，从基本的单磁铁电磁场方程入手对悬浮电磁场进行了动力学分析。并且针对悬浮系统为不稳定的非线性系统的特点，运用直接反馈线性化和平衡点展开线性化方法对原模型进行了线性化处理，并进行了比较，为进一步的工作打下了良好的基础。

第四章 悬浮控制的控制策略研究

利用电磁相吸原理的悬浮控制系统的核心技术是单电磁铁的悬浮控制问题，该控制系统是强非线性不稳定的，传统控制方法对其实现控制最重要的就是进行线性化处理，最常见的两种方法已经在上一章中有所介绍。本章将对于已经线性化了的模型进行各种控制方法的尝试、分析，给出仿真结果。在本章后半部分，还对非线性模型尝试了基于反馈线性化的滑模控制，为本文的创新点，并对各种控制方法的优缺点、可行性进行了全面分析，给出了参考意见。

§ 4.1 传统控制方法

磁悬浮系统的线性化模型是能控和能观的，所以可以使用极点配置和状态观测器（或状态滤波器）的方法对系统进行设计；针对线性化的单电磁铁的悬浮模型也可以采用经典PID控制方法设计控制器。无论采用哪种控制方法，单磁铁控制器本质上是一个状态反馈控制器。再设计单磁铁控制器时涉及到利用气隙和加速度来估计阻尼信号的问题。

§ 4.1.1 PI 状态反馈控制

§ 4.1.1.1 控制对象模型处理

模型仍然采用以上提到的模型，为了论述方便，这里简单罗列几个重要的物理量之间的关系： $M \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} = Mg - F(i, t) + F_d(t)$ (4-7)

$$F(I, \delta) = \frac{\mu_0 AN^2}{4} \left(\frac{I}{\delta} \right)^2 = k \left(\frac{I}{\delta} \right)^2 \quad (4-8)$$

$$u(t) = Ri(t) + \frac{d\psi(i, x)}{dt} = Ri(t) + \frac{d}{dt} [L(i, x)i(t)] \quad (4-9)$$

其中 F 表示电磁吸力， A 表示磁极面积， N 表示电磁铁线圈匝数， i 表示励磁电流， s 表示电磁铁与导轨之间的间隙， μ_0 为空气磁导率 ($4\pi \times 10^{-7} H/m$)。

输入电压（控制信号） $u(t)$: $u(t) = Ri(t) + \frac{d\psi(i, x)}{dt} = Ri(t) + \frac{d}{dt}[L(i, \delta)i(t)]$;

瞬时电感 $L(i, s)$: $L(i, s) = \frac{N\Phi_\tau}{i(t)} = \frac{\mu_0 N^2 A}{\delta(t)}$ (4-10);

由上两式可得: $u(t) = Ri(t) + \frac{\mu_0 AN^2}{\delta(t)} i(t) - \frac{\mu_0 AN^2 i(t)}{\delta^2(t)} \dot{\delta}(t)$ (4-11)。

应用上一章提到的在平衡点 (i_0, δ_0) 处泰勒展开的办法，忽略高阶影响，可以得到

$$F(i, \delta) = F(i_0, \delta_0) + k_{i0}(i - i_0) + k_{\delta 0}(\delta - \delta_0) \quad (4-12),$$

式中 $F(i_0, \delta_0)$ 式当浮体与磁极气隙

为 δ_0 ，平衡电流为 i_0 时电磁铁对浮体电磁力，它与浮体所受的重力平衡，即 $F(i_0, \delta_0) = Mg$ ；

$$k_{i0}, k_{\delta 0} \text{ 分别为: } k_{i0} = F_i(i_0, \delta_0) = \frac{\mu_0 AN^2}{2\delta_0^2} i_0, k_{\delta 0} = F_s(i_0, \delta_0) = -\frac{\mu_0 AN^2}{2\delta_0^3} i_0^2 \quad (4-13),$$

将 (4-12)、(4-13) 代入 (4-7) 得:

$$\begin{aligned} M\ddot{s} &= Mg - F(i_0, s_0) - k_{i0}(i - i_0) - k_{\delta 0}(\delta - \delta_0) + F_d(t) \\ &= -k_{i0}(i - i_0) - k_{\delta 0}(\delta - \delta_0) + F_d(t) \end{aligned} \quad (4-14),$$

由 (4-11) 可得:

$$u(t) - u(t_0) = \Delta u(t) = R\Delta i + L_0\Delta \dot{i} - L_s\Delta \dot{\delta}, L_0 = \frac{\mu_0 AN^2}{2\delta_0}, L_s = \frac{\mu_0 AN^2}{2\delta_0^2} i_0 \quad (4-15),$$

由式 (4-14)、(4-15) 可以画出磁悬浮装置得开环系统结构图如下所示:

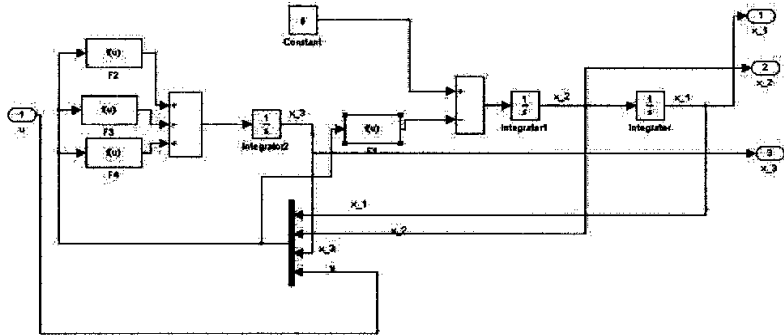


图 4-3 系统开环模型

磁悬浮控制得性能指标应包含悬浮位置 s 和浮体的运动的加速度 \ddot{s} ，同时也把浮体运动速度 $\dot{\delta}$ 作为关注的一个状态，于是可以选取状态变量：

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [\Delta\delta \quad \Delta\dot{\delta} \quad \Delta\ddot{\delta}]^T, \text{ 其中 } \Delta\delta = \delta - \delta_0, \Delta\dot{\delta} = \dot{\delta}, \Delta\ddot{\delta} = \ddot{\delta}. \text{ 输出量是 } \Delta\delta,$$

即 $y = x_1$ 。

建立状态方程：
$$\begin{cases} \dot{x} = A_0x + B_1w + B_0u \\ y = Cx \end{cases} \quad (4-16) \quad \text{其中:}$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_{s0}R}{ML_0} & 0 & -\frac{R}{L_0} \end{bmatrix}, B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{k_{r0}}{ML_0} \end{bmatrix}, u = \Delta u(t)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{R}{ML_0} & \frac{1}{M} & 0 \end{bmatrix}, w = \begin{bmatrix} \Delta F_d(t) \\ \Delta \dot{F}_d(t) \\ 0 \end{bmatrix}, y = \Delta x, C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

如不考虑外界扰动情况下，系统状态方程可以简化为 $\begin{cases} \dot{x} = A_0x + B_0u \\ y = Cx \end{cases}$ 。代入磁浮列车的

参数 $M = 750\text{kg}, s_0 = 10\text{mm}$ ，可以得到系统能控性矩阵 $M = [B \quad AB \quad A^2B]$ 和系统能观性矩阵 N 均为满秩矩阵，系统完全能控能观。

为了消除稳态误差，并且为了可在参考输入端直接给定输出，在系统中增加一个偏差积分

环节，因此必须将系统增广为四阶。因为 $\text{rank} \begin{bmatrix} A_{3 \times 3} & B_{3 \times 1} \\ C_{1 \times 3} & 0 \end{bmatrix} = 3 + 1 = 4$ 满秩，所以增广系统

可控。对于高速磁悬浮系统，要求低频刚度大，能够高精度地跟随输入变化，保证悬浮位置地准确，同时，系统的频带不能过宽，以免在收到外界高频干扰或扰动的时候不致引起剧烈振动。这些性能指标可能通过闭环系统地极点配置来实现，取增广系统地期望极点为：

$$s = -15, -11 \pm j110, -200。$$

§ 4.1.1.2 PI 状态反馈控制器设计

定义偏差向量 $e = y - y_r$ ，偏差向量的积分记为 $z(t)$ ，有 $z = \int_0^t e(\tau) d\tau$ ，而

$\dot{z}(t) = e(t) = Cx(t) - y_r$ (4-17)。增广系统的开环方程变为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -y_r \end{bmatrix}, y = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

反馈规则 $u = [K \quad K_e] \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}$, 其中 $K = [k_0 \quad k_1 \quad k_2]$, $K_e = [k_3]$, 得到闭环系统状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A+BK & BK_e \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -y_r \end{bmatrix}, y = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

代入平衡点信息 ($x_0 = 10\text{mm}$), 闭环特征多项式 $f(\lambda)$ 为: $f(\lambda) = \det[\lambda I - (A+BK)]$, 期望特征多项式为 $f'(\lambda) = (\lambda+15)(\lambda+110+j110)(\lambda+110-j110)(\lambda+200)$, 令 $f(\lambda)$ 与 $f'(\lambda)$ 的对应项相等, 应用 MATLAB 解方程得 $k_0 = 13267.5, k_1 = 158.2, k_2 = 0.6703, k_3 = 1.542 \times 10^5$ 。

因此反馈矩阵系数 $K = [13267.5 \quad 158.2 \quad 0.6703]$, $K_e = [1.542 \times 10^5]$ 。

用 Simulink 对系统进行仿真, 得到仿真曲线如图所示:

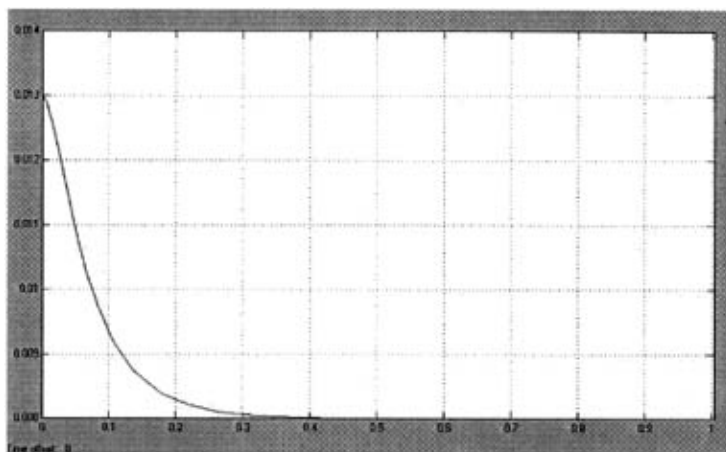


图 4-4 悬浮气隙在 1s 内的变化曲线

磁悬浮系统有良好得暂态性能调节时间约为 0.35s, 没有超调, 稳态误差为 0。与线性增益状态反馈控制器相比, 由于误差积分器的引入, 输出能准确地跟随给定值, 能够保证磁悬浮系统稳定、准确控制的要求。

但是这种单磁铁的状态反馈法, 也存在着不可解决的缺陷: 电流作为状态变量之一引入系统, 和悬浮间隙以及电磁铁的加速度信号等一起作用, 因此, 电流信号和其他信号之间会产生耦合, 对电流的控制也不够灵活。

§ 4.1.2 反馈线性化极点配置方法

§ 4.1.2.1 磁悬浮模型反馈线性化处理

磁悬浮系统可以描述为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \gamma(x) \\ \alpha(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \beta(x) \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

其中: $\alpha(x) = \frac{x_2 x_3}{x_1} - \frac{R x_1 x_3}{2k}$, $\beta(x) = \frac{x_1}{2k}$, $\gamma(x) = -\frac{k x_3^2}{M x_1^2}$.

求系统平衡点:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 = 0 \\ \frac{dx_2}{dt} = g - \frac{k x_3^2}{M x_1^2} = 0 \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{x_2 x_3}{x_1} - \frac{R x_1 x_3}{2k} + \frac{x_1}{2k} u = 0 \end{cases} \quad (4-21), \text{可以得到系统的平衡点为: } \begin{cases} x_{10} = \frac{u_0}{R} \sqrt{\frac{k}{Mg}} \\ x_{20} = 0 \\ x_{30} = \frac{u_0}{R} \end{cases}$$

其中 $x = [x_1; x_2; x_3]^T = [\delta; \dot{\delta}; i]^T$ 为状态变量, x 是磁浮列车的悬浮气隙 (垂直位置), i 是励磁线圈电流, g 是重力加速度, M 是车厢的总质量平均到一个电磁铁模块需要承担的重量, R 是线圈电阻, u 是控制电压, 还有 L, k , 均为由线圈自身特性决定的参数, y_r 是参考值。

为了将原始的非线性模型简化, 我们引入了上一章分析说明过的直接反馈线性化处理, 如下:

$$\xi = [\xi_1; \xi_2; \xi_3]^T = [x_1; x_2; \dot{x}_2]^T.$$

在变换过程中要求 $x_1 > 0, x_3 > 0$, 从而保证变换过程的可逆。其中 ξ_3 是由电磁产生的气隙变化的加速度。令 $\omega = \frac{d\xi_3}{dt}$, 则 u 可以表示为: $u = (-\alpha(x) + \omega) / \beta(x)$ 。线性化以后的系统状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \\ \dot{\xi}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \quad (4-22), \text{一个结构非常简单的能控能观系统, 且从以}$$

上分析可以得到, 线性化后的系统的平衡点应该是 $\xi_{10} = x_{10}, \xi_{20} = \xi_{30} = 0$ 。因为系统能控, 所以可以采用状态反馈的方法使系统稳定, 状态反馈控制规律可以写成如下形式:

$$\omega = k_1(x_1 - x_{10}) + k_2x_2 + k_3x_3 \quad (4-23)$$

适当选择系数 k_1, k_2, k_3 ，就可以保证该线性系统的极点位于复平面的左半平面，从而保证了系统的稳定。系统模型及线性化以后的模型如下：

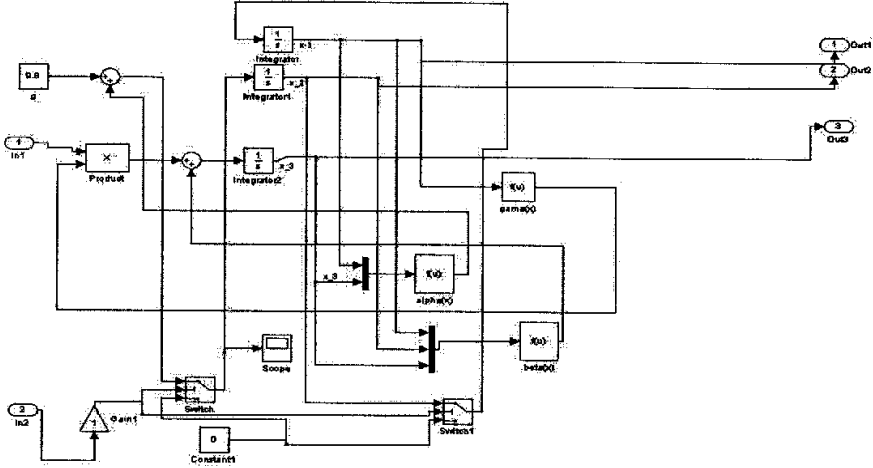


图 4-5 控制对象模型

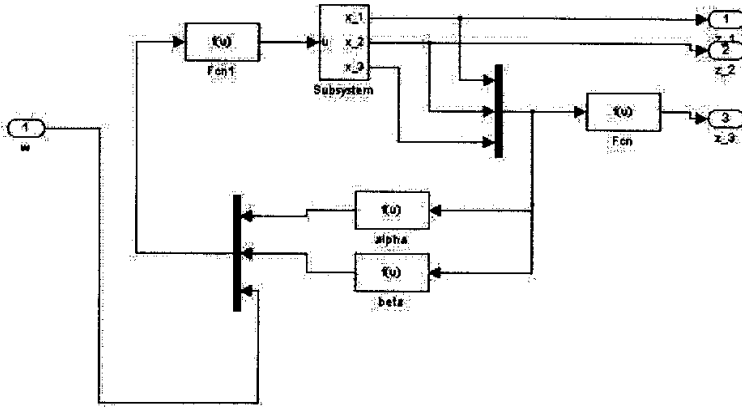


图 4-6 线性化后的模型

§ 4.1.2.2 极点配置

因为此线性化系统为三阶系统，因此传统控制方法计算过于复杂，即使得到比较好的控制性能，也不够实用。这里采用两个主导极点加一个离主导极点较远处的极点的配置方法，对系统的极点进行配置，计算简单，也能得到很好的控制效果。这样可以将一个三阶

的系统简化为先设计一个二阶系统。

首先设计一个极点已知的二阶系统，系统的标准传递函数为： $G_0(s) = \frac{240}{s^2 + 20s + 200}$ 。

其中设计系统的主导极点是： $s_1 = -10 + 10j$ ， $s_2 = -10 - 10j$ 。

然后设计一个远离主导极点的第三个极点： $s_3 = -100$ 。

这样，就可以求出设计所需要的三阶系统的特征式：

$$(s - s_1)(s - s_2)(s - s_3) = s^3 + 220s^2 + 2200s + 20000 \quad (4-25)$$

§ 4.1.2.3 控制器设计

由前述可以得到经过校正后的系统矩阵为： $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ K_1 & K_2 & K_3 \end{bmatrix}$ ，而经过反馈控制后的

闭环系统的特征方程为： $s^3 - K_3s^2 - K_2s - K_1 = 0$ 。

为了使系统达到设计的性能，反馈系数为 K_1, K_2, K_3 ，由极点配置可知：

$$K_1 = -20000, \quad K_2 = -2200, \quad K_3 = -220。$$

由线性化时提到的 $u = (-\alpha(x) + \omega) / \beta(x)$ ，可以得到：

$$u = \frac{Mx_1}{x_3} \left[-K_1(x_1 - x_{10}) - K_2x_2 - K_3 \left(g - \frac{kx_3^2}{Mx_1^2} \right) \right] + Rx_3 \quad (4-26)。$$

构建系统模型如下：

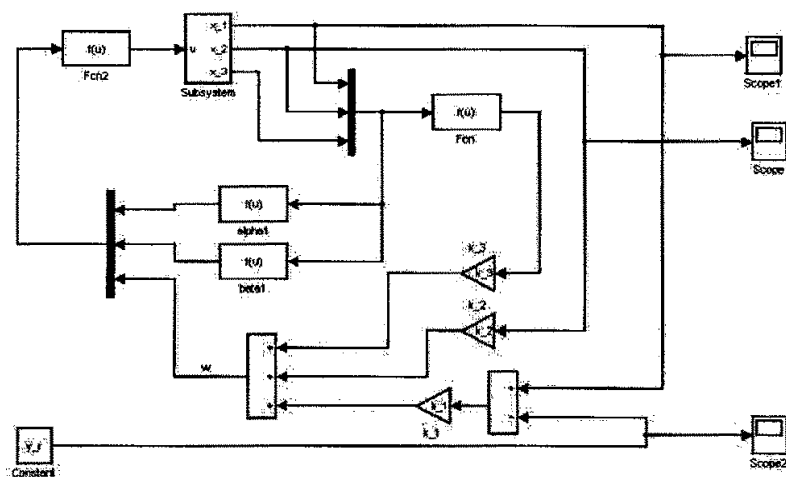


图 4-7 极点配置系统模型

§ 4.1.2.4 仿真、结果分析

带入悬浮系统的相关参数： $k=0.000756$, $M=750\text{kg}$, $R=1\Omega$, $g=9.8\text{N/kg}$ ，可以得到系统控制信号的表达式：

$$u = \frac{750x_1}{x_3} \left[-20000(x_1 - x_{10}) - 2200x_2 - 220 \left(9.8 - \frac{0.000756x_3^2}{750x_1^2} \right) \right] + x_3 \quad (4-27)$$

可以得到如下的悬浮气隙的变化曲线：

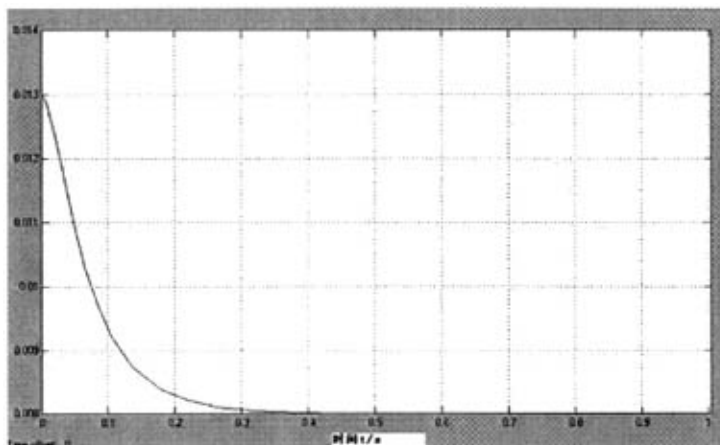


图 4-8 悬浮气隙在 1s 内的变化曲线

可以看到系统以很快的速度（0.3s）逼近期望的输出值 0.01m，没有超调，满足系统

设计的要求。达到参考值后输出非常平稳，几乎没有振荡。

悬浮气隙的速率变化曲线如下：

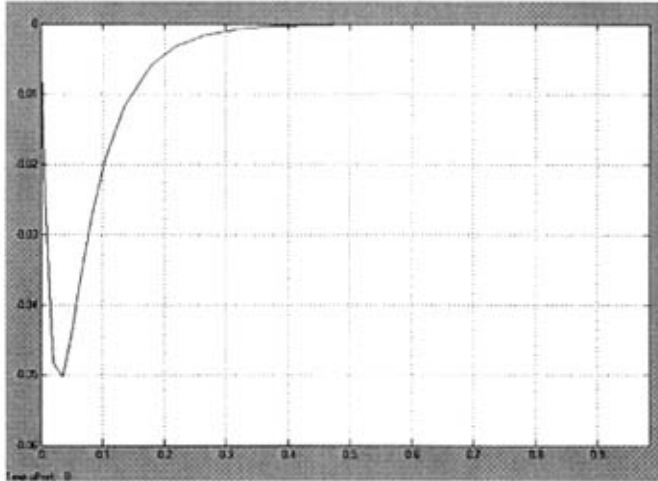


图 4-9 悬浮气隙变化速率 x_2 的变化曲线

可以看到速率变化非常迅速，很快从调整状态恢复到零值，没有出现速率为负的禁止现象。可以说分步的极点配置方法基本满足设计要求。

但是该方法也有自身的不可弥补的缺憾：

①完全依赖线性系统参数不变的假设，然而在实际悬浮系统中系统参数是时变的，比如电感、电阻等等，这对于该控制器设计中所要求的条件差距很大，如果其中的参数有所改变，直接影响控制结果，甚至导致发散。

②鲁棒性能差，在系统在无干扰情况下气隙控制之后，笔者曾经尝试在气隙信号处加一个小振幅正弦信号的扰动，结果直接导致系统发散，因此该方法仅具有理论研究价值，而与实际应用的要求相去甚远。

§ 4.2 非线性控制方法

EMS 型磁悬浮列车悬浮系统是一个典型的非线性系统。传统的悬浮控制器的设计大都是利用平衡点附近局部线性化的模型，因此控制器设计与平衡点的选取有关。当扰动过大而引起系统偏离平衡点过大时，由于系统中存在的非线性得不到合适的补偿，可能导致控制策略的失效，影响系统的稳定。解决这一问题的方法是采用非线性的控制方法，比如反馈线性化的控制方法。但此方法的建模没有考虑系统的不确定因素。实际上，悬浮系统在运行

中要受到或弱或强的外界干扰的影响；另一方面，所建模型的不确定性，控制对象参数选择的误差以及测量误差等也都将对系统形成广义的干扰。

§ 4.2.1 基于反馈线性化的滑模控制

§ 4.2.1.1 磁悬浮模型反馈线性化处理

磁悬浮系统可以描述为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \gamma(x) \\ \alpha(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \beta(x) \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-28)$$

$$\alpha(x) = \frac{x_2 x_3}{x_1} - \frac{R x_1 x_3}{2k} \quad (4-29)$$

$$\beta(x) = \frac{x_1}{2k} \quad (4-30)$$

$$\gamma(x) = -\frac{kx_3^2}{Mx_1^2} \quad (4-31)$$

其中 $x = [x_1; x_2; x_3]^T = [\delta; \dot{\delta}; i]^T$ 为状态变量， x 是磁浮列车的悬浮气隙（垂直位置）， i 是励磁线圈电流， g 是重力加速度， M 是车厢的总质量平均到一个电磁铁模块需要承担的重量， R 是线圈电阻， u 是控制电压，还有 L, k 均为由线圈自身特性决定的参数， X_0 是参考值。

为了将原始的非线性模型简化，我们引入了线性化处理，设 $\xi_1 = x_1$ ， $\xi_2 = x_2$ ，

$\xi_3 = g - \frac{kx_3^2}{Mx_1^2}$ ，其中严格要求 $x_1 > 0$ ， $x_3 > 0$ 从而保证变换过程可逆。新的状态变量是悬浮

电磁铁的悬浮间隙，速度，加速度。在新的坐标系下，可以得到系统的状态方程如下：

$$\xi = [\xi_1; \xi_2; \xi_3]^T = [x_1; x_2; \dot{x}_2]^T$$

其中 ξ_3 是由电磁产生的气隙变化的加速度。令 $\omega = \frac{d\xi_3}{dt}$ ，则 u 可以表示为：

$$u = (-\alpha(x) + \omega) / \beta(x) \quad (4-32)$$

线性化以后的系统状态方程如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \\ \dot{\xi}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \quad (4-33), \text{ 一个结构非常简单的能控能观系统。}$$

受控对象模块及其线性化后的 MATLAB 建模如下：

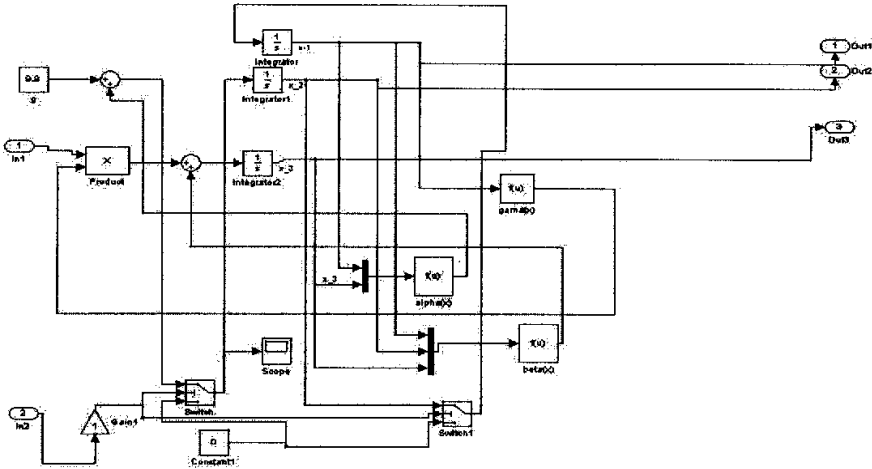


图 4-10 悬浮系统控制对象建模

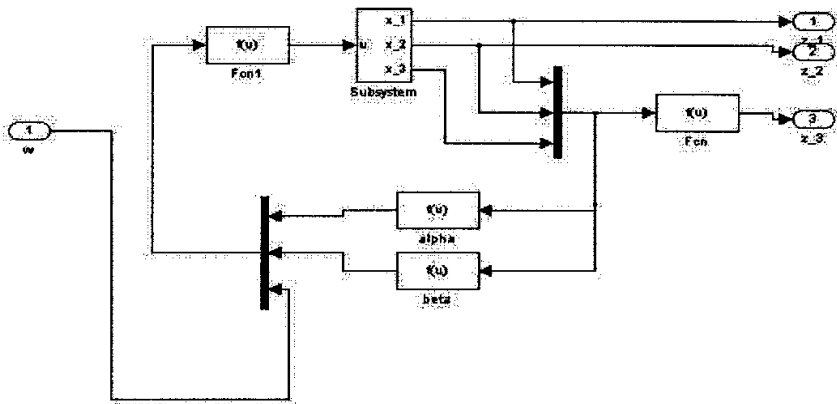


图 4-11 线性化后的悬浮对象模型

§ 4.2.1.2 滑模控制器设计

由于参数的不确定性，模型误差往往排除精确的非线性象限的信号采集，反馈线性化控制器的鲁棒性就显得非常重要。本文的工作就是设计滑模控制器抵消模型误差。

滑模控制器是一种变结构控制器（VSC）。简单地说，一个变结构控制器包含几个连续函数来对受控对象进行控制，使其滑动到滑模面上。在几个连续函数之间切换的开关函数，

由受控系统的状态决定。现在考虑对如下的磁悬浮系统进行滑模控制器设计：

假设参考磁浮列车悬浮气隙输出值 y_r 以及它的一阶、二阶、三阶导数 \dot{y}_r , \ddot{y}_r , and \dddot{y}_r 是连续的, 统一边界并且是可以求得的。误差设置：

$$e_1 = y_r - x_1, \quad e_2 = \dot{y}_r - x_2, \quad e_3 = \ddot{y}_r - x_3 \quad (4-34)。$$

设置切换函数： $s = c_1 e_1 + c_2 e_2 + c_3 e_3$ (4-35)；其中 c_1, c_2, c_3 为三个正常数，映射三个误差在滑模控制器中的权重。

趋近律选择带饱和函数的指数趋近律： $\dot{s} = -a \cdot \text{sgn}(s) - b \cdot s$ (4-36)。其中 $\text{sgn}(s)$ 是

一个符号函数，定义如下： $\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & \text{if } s < 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ 1 & \text{if } s > 0 \end{cases}$ (4-37)。显然 $s \cdot \dot{s} < 0$ ，满足滑模条件。

其中 a 和 b 是两个正常数， b 保证系统在距离滑模面 s 较远距离时能够有较大的趋近速率， a 则让系统在离滑模面距离较近时仍然保持一定的趋近速率，这两个常数是系统的可调参数，可以根据设计的需要进行调节。控制器设计如下所示：

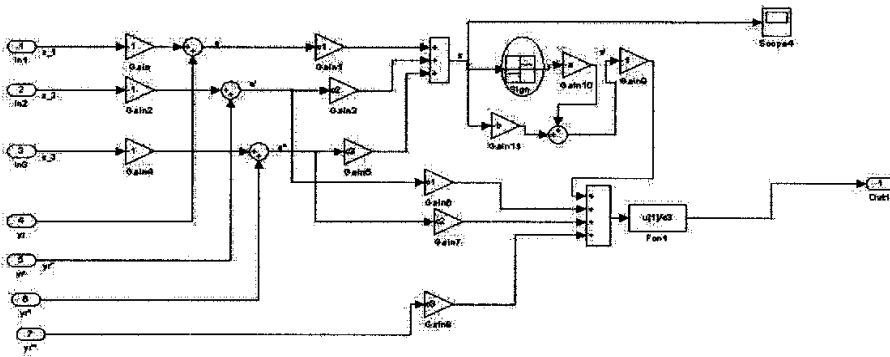


图 4-12 滑模控制器设计

悬浮控制系统的全图如下：

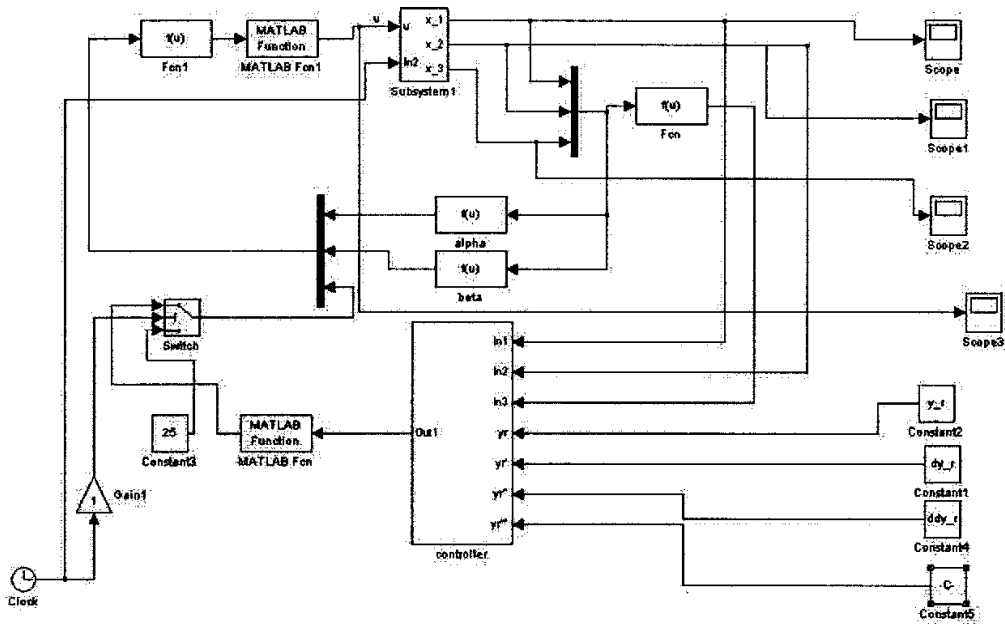


图 4-13 系统模型全图

§ 4.2.1.3 滑模控制器参数确定

系统常数取值与前述的各种方法相同，对于各个参数取值如下：

$c_1 = 40, c_2 = 200, c_3 = 10$ ，取值理由：根据经验先取定 c_1 ， c_1 不宜过大，保证一定控制初速度的同时，应避免产生大的静态误差； c_2 取值应适当放大数量级，减小静态误差；因为是三阶系统，因此 c_3 的取值应相对小，否则将会引起超调，这在悬浮控制器设计当中是绝对不允许出现的。

对于趋近律的选择，选用符号函数 $\text{sgn}(s)$ ，确实能够保证在系统在 s 很小的情况下仍然有一定的速度趋近滑模面，但是这也造成系统在穿过滑模面之后仍然有很大的速度，造成控制的不稳定性，也就是通常所说的“抖振”。具体情况可以参见下图：

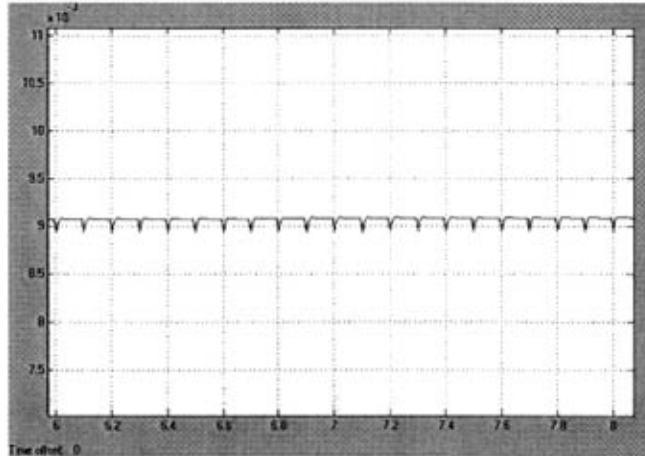


图 4-14 切换函数 S 在使用符号函数控制时稳态抖振

这个问题的症结所在，就是 s 在非常趋近于零的情况下的取值问题，理想的滑动模式是不存在的，现实中的滑模控制均伴随有抖振，抖振问题是影响滑动模式控制广泛应用的主要障碍，这里需要引入准滑动模式的概念。所谓准滑动模式，是指系统的运动轨迹被限制在理想滑动模式的某一特定的邻域内的模式。从相轨迹方面来说，具有理想滑动模式的控制是使一定范围内的状态点均被吸引至切换面。这一邻域就称为滑动模式切换面的边界层。

在边界层内，准滑动模式不要求满足滑动模式的存在条件，因此准滑动模式不要求在切换面上进行控制结构的切换。它可以是在边界层上进行结构变换的控制系统，也可以是完全不进行结构变换的连续状态反馈控制系统。准滑动模式控制在实际上的这种差别，使它从根本上避免或者削弱了抖振，从而在实际中得到广泛应用。

在本文的连续系统中，常用的准滑动模式控制有以下两种方法：

- (1) 用饱和函数 $\text{sat}(s)$ 代替理想滑模控制中的符号函数，这种方法在下文中会提到；
- (2) 将继电器特性连续化，用连续函数 $\theta(s) = \frac{s}{|s| + \varepsilon}$ 代替符号函数，其中 ε 是一个很

小的正常数。

为了解决这个问题，本文分别尝试了两种准滑模控制，结果发现采用饱和函数取代符号函数，响应速度更快，消抖效果明显，这里略去比较过程。改良趋近律后，滑模趋近律如下：

$$\dot{s} = -a \cdot \text{sat}(s) - b \cdot s, \text{ 其中 } \text{sat}(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } s > 0.01 \\ 100s & \text{if } -0.01 \leq s \leq 0.01 \\ -1 & \text{if } s < -0.01 \end{cases} \quad (4-38)。$$

这样既能够使 s 在较大时能够以很大的速率向滑模面趋近，又能够在 s 相对较小的时候保持一定的速度，并且避免了在趋近律中使用符号函数 $\text{sgn}(s)$ 而有可能在穿越滑模面时的剧烈抖振，影响系统的动态性能。使用饱和函数后，动态性能得到明显改善，具体参见下图：

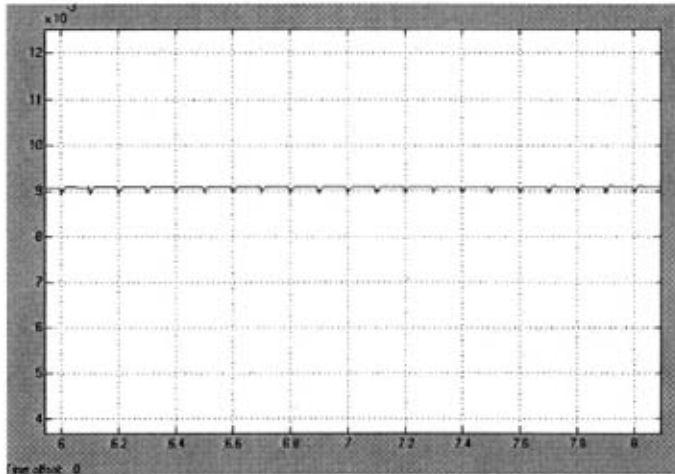


图 4-15 切换函数 S 在使用饱和函数控制时的抖振

可以明显看到，系统误差的抖振有了明显减小，动态性能得到明显改善。

在模拟仿真过程中，有一个与实际情况有很大出入的问题险些被遗漏。我们所研究和建模的电磁铁模块来源于实际应用，均为直流电磁铁模块，因此电压和电流输入值均只能取正值，但在仿真模拟的过程中出现了，控制电压输入为负值的情况，如下图所示：

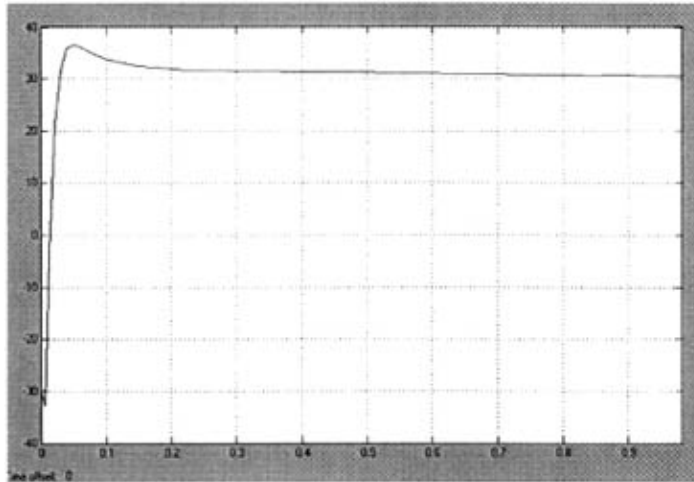


图 4-16 控制电压 1s 内的变化曲线

u 的初始值位于一个大约位于 -30V 的位置，这个控制信号不能满足设计的需求，因为不可能将一个负值信号输入给电压调节器，那样会引起控制信号的紊乱，严重时会导致硬件设施的损坏。为了避免出现这种情况，笔者在控制器的输出端，加了一个截止函数 u_limit 。该函数的功能就是将输入系统对象所有小于零的控制信号，都截止在零值。相应的控制电压曲线图如下：

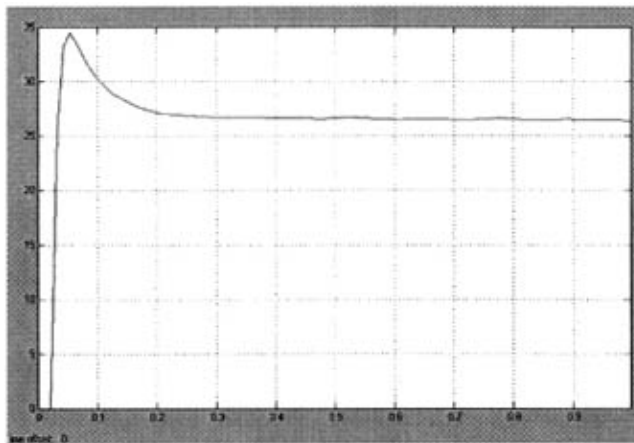


图 4-17 控制电压 1s 内的变化曲线

从图上可以看到，原本为负值的一段由于截止函数 u_limit 的作用，为零信号，而后的变化也较为平稳，最后稳定在 24V 左右，满足系统对电压控制信号的要求。

还有一个重要的问题就是 x_1, x_3 的初始值问题。因为 x_1 的初值是系统固有的，就是列车

静止没有悬浮时电磁铁与轨道的距离，没有调节的余地。对于 x_3 的选择，我们可以进行一个实验，应为无论励磁电流 x_3 取什么样的初值，只要保证大于零，最后都稳定在 25A 左右，我们可以从一个较小的值开始，设 $x_{3_ini}=15A$ ，可以得到气隙变化的如下曲线：

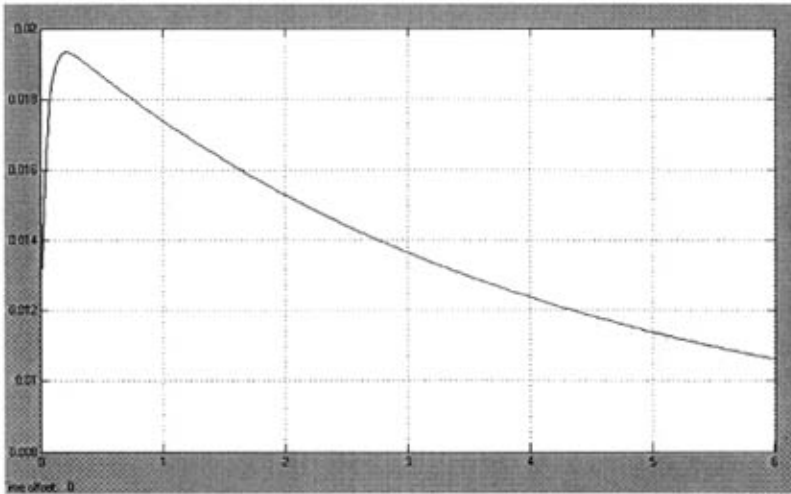


图 4-18 气隙 x_1 在 x_3 初值为 15A 时的变化曲线

可以看到系统明显有一个接近 50%的超调，这个在实际中是绝对不允许的，因为系统在向下方向上没有自由度，而有向下作用力的结果只能迫使列车对轨道上平面施加一个突然的压力，这种对系统调节毫无作用，甚至有害的力应该尽量避免。鉴于此，我们可以将初值进一步调大，至 30A，气隙波形如下：

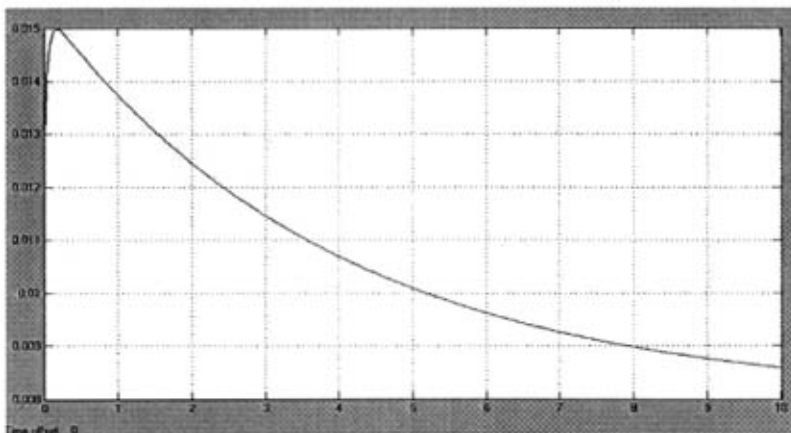


图 4-19 气隙 x_1 在 x_3 初值为 30A 时的变化曲线

尽管初值大小已经超过稳态值，但可以看到气隙仍然有超调，仍然不满足无超调的设计要求，不过已经大大改善，将初值进一步调大，放至 50A，可以得到如下气隙波形：

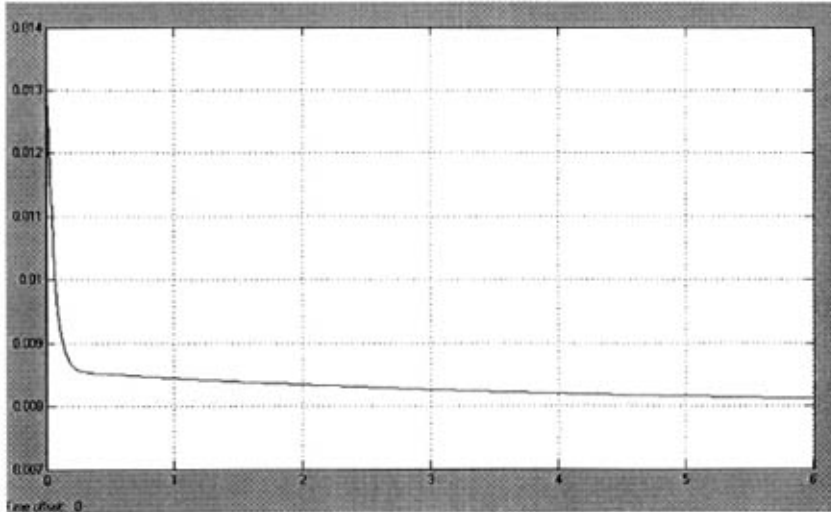


图 4-20 气隙 x_1 在 x_3 初值为 50A 时的变化曲线

可以看到，系统没有超调，单调递减，快慢变化满足设计要求。

§ 4.2.1.3 仿真运行结果分析

代入实际的参数值，取初值 $x_{10} = 0.013$ ，参考值 $y_r = 0.008, \dot{y}_r = \ddot{y}_r = 0$ ，励磁电流初始值 $i_0 = 50A$ ，取这个值的原因上一节分析部分已经提到。运行得到如下的气隙变化曲线：

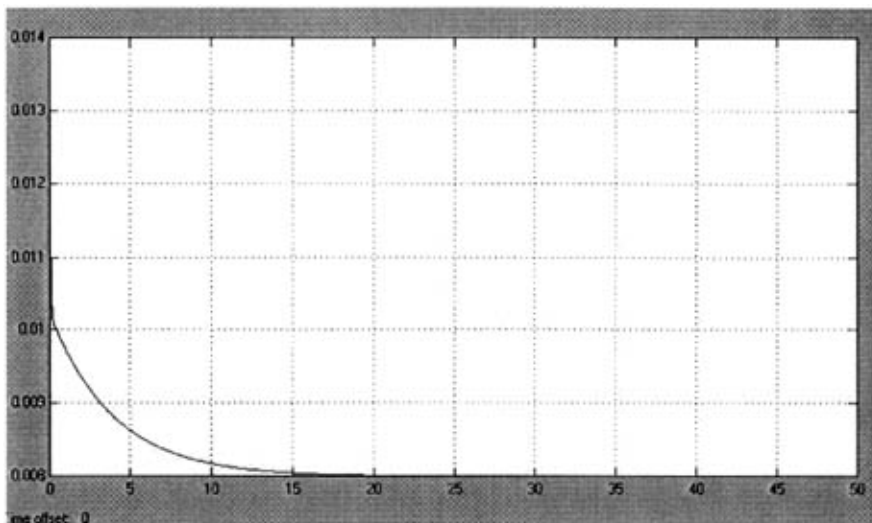


图 4-21 悬浮气隙 50s 变化曲线图

系统输出的静态误差小于 1%，远远小于系统设计要求的 5% 的误差率。可以看到，系统在 20s 后就进入稳定悬浮状态，为了能够更加清晰的看到调节的过程，本文将前 20s 的过程放大，得到的曲线如下：

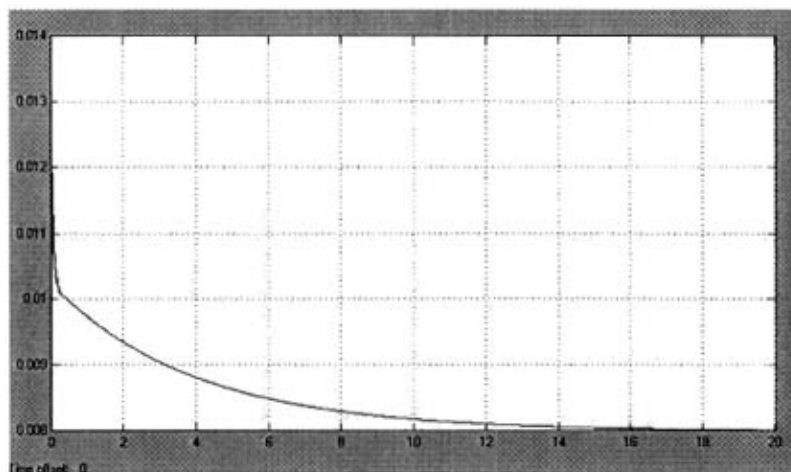


图 4-22 悬浮气隙 20s 变化示意图

可以看到，系统在很短的时间内从起始位置悬浮，进入系统设计允许的 8~10mm 的悬浮气隙范围之内，然后再以缓慢的速度逼近参考位置 8mm，并且在 10s 内基本完成悬浮过程，符合设计要求。

为了能够更好的观察和分析起始阶段的控制效果，尤其是系统对于超调的严格禁止，我们需要进一步考察控制系统在短时间内的控制效果，给出悬浮气隙在起浮后 2s 内的变化曲线：

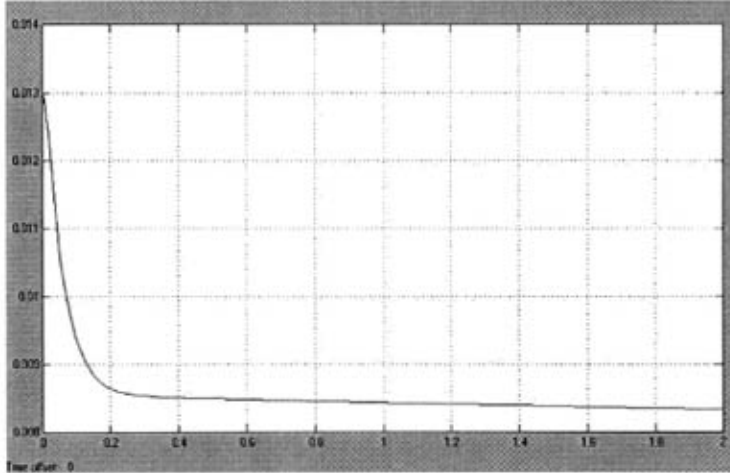


图 4-23 悬浮气隙 2s 变化示意图

从上图可以看到，系统输出单调递减，没有超调，以较快速率进入 10% 的误差后再以较慢的速率进行微调，效果非常理想。

为了更好的考察动态性能，可以参看气隙的速率变化曲线：

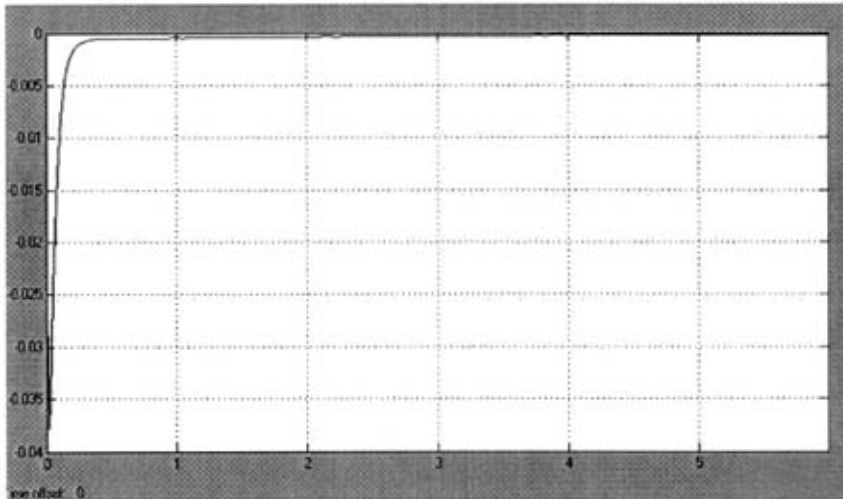


图 4-24 悬浮气隙变化率变化曲线

由上图我们不难看出，气隙速率在仅在开始阶段有一个突变，而后保持一个相对的稳

定，这是气隙保持静态稳定的关键，并且气隙速率在 1s 之内就基本完成了调节变化，这对于磁浮列车悬浮过程的快速性和稳定性的综合，是至关重要的。

为了考察系统的鲁棒性，可以在状态反馈中加入一个正弦的扰动信号 sine ，振幅为 0.001m （相当于参考值的 12.5%），频率为 1Hz ，模拟传感器在测量和传输信号过程中产生的波动对控制性能的影响，可以得到气隙和扰动的波形为：

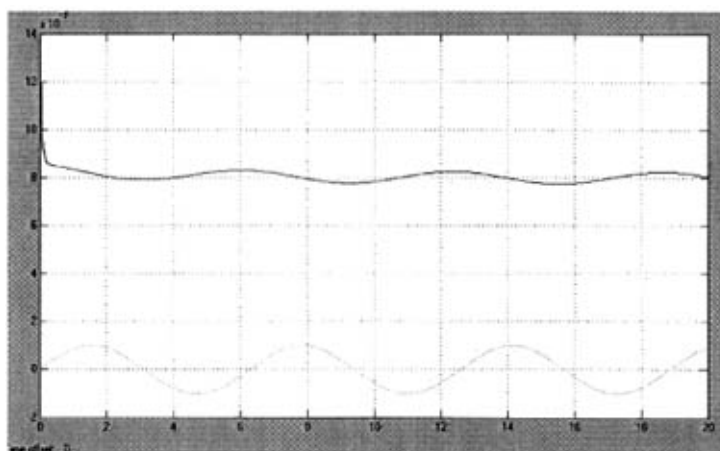


图 4-25 气隙与扰动信号对比图（上为气隙、下为扰动）

可以看到反馈干扰虽然对系统有一定影响，但是已经被控制器控制在干扰信号幅值的 10%。考虑到干扰信号的频率一般都较高，可以将扰动的频率进一步设大，至 1000Hz ，可以得到气隙和扰动信号变化曲线：

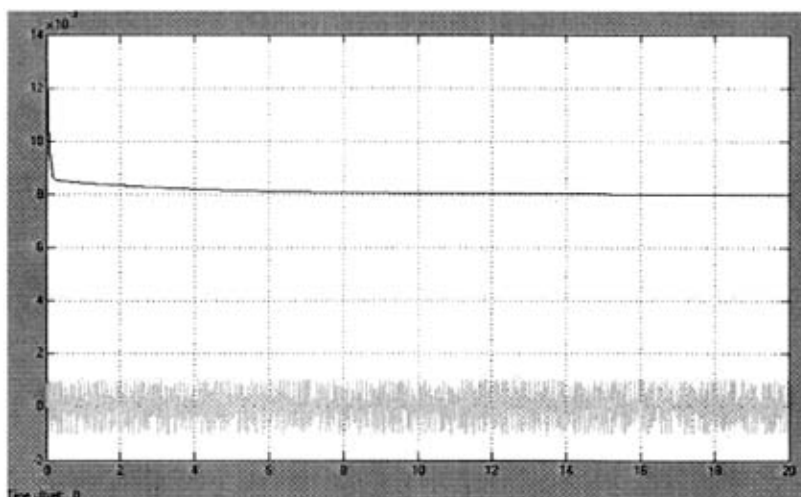


图 4-26 气隙与扰动信号图

为了更清楚的观察系统输出与扰动信号之间的关系，我们给出一副放大的波形：

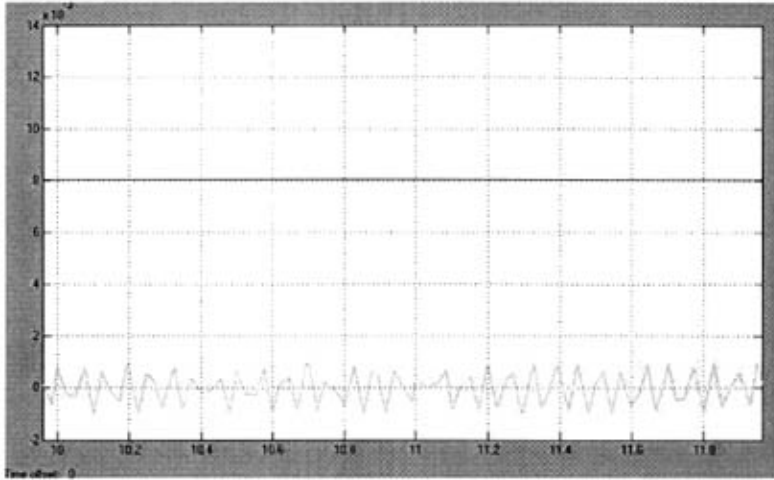


图 4-27 稳态时气隙和扰动信号的对比

由途中的对比可以得出，控制系统鲁棒性非常好，对高频的扰动信号并不敏感，仍然能够保持非常高的稳定性。综上所述，基于反馈线性化滑模控制是一种能够满足动态、静态调节性能，鲁棒性好，调节能力强的控制方法。

§ 4.3 各种方案优缺点比较

经典 PID 控制可操作性较强，但是参数整定比较麻烦，反应速度也不能保证；PI 状态反馈控制器，稳态效果虽然好，但是不能满足磁浮列车系统的实时性要求；反馈线性化极点配置方法，是一种不错的方法，但在实际的使用中，亦很难满足系统的时变性和实时性要求，故也不能采纳。

综合考虑比较好的方法，应该是能够快速调节，并且能够对干扰有较强抵抗能力的滑模控制，也是本文分析至此，比较推荐的一种方法。

§ 4.4 小结

本章在第三章论述的基础上，对线性化完成的模型进行各种控制方法的尝试，并对每种方法使用后的结果进行了分析，比较了各种方法的利与弊。分析了以下方法：

- ①PI 状态反馈控制；
- ②反馈线性化极点配置方法；
- ③基于反馈线性化的滑模控制。

以上分析都将悬浮控制系统独立于车载运行控制系统考虑，如果进行下一步研究，可以将控制信号的解耦作为进一步工作的重点。

第五章 影响悬浮控制的其他因素分析

在上一章中，本文对磁浮模型进行了动力学分析，并且对同一个悬浮系统模型，运用多种控制方法，从传统控制方法，到非线性、变结构控制方法，给出了仿真结果和结果分析。然而这些分析都在如下的假设下进行：

①忽略绕组漏磁通；②忽略铁芯和导轨中的磁阻，即认为磁势均匀降在气隙上。

此外，影响悬浮的因素还有很多，例如悬浮斩波器，会车情况，隧道路况等等，将在本章中加以简要介绍和分析。

§ 5.1 对悬浮斩波器的研究

§ 5.2.1 传统斩波器

悬浮斩波器是磁悬浮列车中一个很重要的系统，它直接控制列车的悬浮，其性能优劣直接关系到列车的成败。悬浮斩波器的原理就是在悬浮气隙发生变化时，能够使电磁铁电流迅速做出相应调整，从而改变电磁悬浮力的大小。使悬浮气隙基本保持恒定。根据电磁悬浮系统(EMS)要求响应快、耐冲击的特点，磁悬浮列车一般采用H型两象限斩波器。它既可以向负载提供能量，也可以迅速将负载电路反接入电源，向电网回馈能量。

如图5-1所示为H型斩波器的主电路结构，这是一个全桥电路，桥的每臂由可控型元件IGBT (T_1, T_2)和不可控制元件(D_2, D_4)组成，负载(电磁铁)接在AB之间，并用 L_o 和 R_o 组成的串联电路来等效，E为滤波电容， R_1, R_2, R_3, R_4 和 $C_1, C_2, C_3, C_4, D_1, D_2$ 组成吸收回路，用霍尔元件检测电磁铁电流。

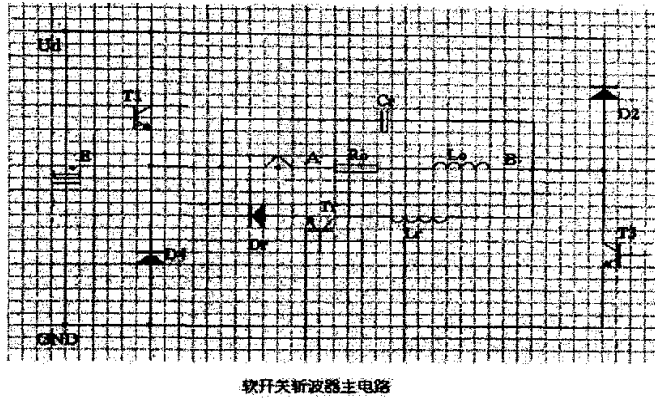


图 5-1 软开关斩波器主电路

给出了斩波器电路负载电流的工作波形。

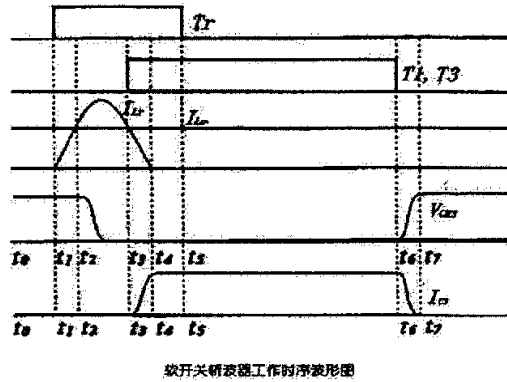


图 5-2 软开关斩波器工作时序波形图

§ 5.2.3 三电平悬浮斩波器

随着磁悬浮列车从中低速向高速发展，对悬浮斩波器的要求越来越高，尤其是电流响应速度要求越来越快。为了提高悬浮斩波器的电流响应速度，常采用提高电源电压的方法，例如高速磁悬浮列车的悬浮主电压就由中低速的240V提高到440V。但这样会使传统的悬浮斩波器中电流纹波也显著增大。于是又发展出交错并联地联结方式，以减小波动，但也都不能从根本解决问题。

借鉴磁悬浮轴承中三电平开关功放的理念，又设计出三电平悬浮斩波器，使其电流纹波和电源电压几乎无关，因此可以进一步通过提高电源电压的方法来提高电流响应速度，采用三电平悬浮斩波器还可以降低功率器件开关频率，功率开关通断过程中电压跳变只有

传统斩波器一半，有利于降低开关损耗。

三电平悬浮斩波器主电路和传统的悬浮斩波器完全一样，只是控制策略不同。其控制时序如下图所示。

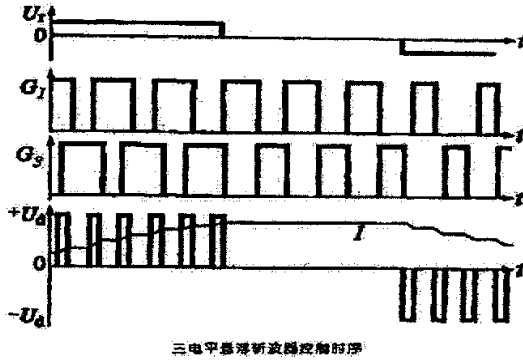


图 5-3 三电平悬浮斩波器控制时序

G_1, G_3 为两只 IGBT 的栅极驱动信号，当电流控制信号 U_r 大于零时，栅极驱动信号 G_1, G_3 占空比大于 50%， G_1, G_3 共同导通时，线圈中流过驱动电流， I 增加；当电流控制信号 U_r 小于零时， G_1, G_3 占空比小于 50%，在共同关断的时间段里，线圈通过 D_2, D_4 续流，线圈电流 I 减小。当 U_r 等于零时，占空比等于 50% 时， T_1, V_3 任何时刻都

只有一个导通，另一个关断。

对于三电平悬浮斩波器，当物入 $U_r=0$ 时，物出为恒定电流 I ，理想状态下，输出电流为恒流，但由于回路电阻的存在，故电流值会下降。

忽略 IGBT 和二极份导通压降称电滚纹波为

$$\frac{I_w}{I} = \sqrt{\frac{2\exp(-\frac{T}{\tau}) + \frac{T}{\tau}\exp(-\frac{T}{\tau}) - 2 + \frac{T}{\tau}}{2I^2[\exp(-\frac{T}{\tau}) - 1]}} \quad (5-1) \quad \text{式中 } \tau = \frac{L}{R}$$

由上式可见，三电平悬浮斩波器输出恒定电流时，电流纹波大小与直流电源电压 U_d 无关。由于电流响应速度 $di/dt=U_d/L$ ，所以 U_d 越大，电磁铁电流响应越快，因此可以通过提高电源电压值来提高电磁力响应速度而不会增加电流纹波。

而对于传统的悬浮斩波器中，当输入的电流控制信号为零，即线圈中流过恒定电流时，电流纹波为：

$$\frac{I_w}{I} = \frac{U_d}{4\sqrt{3}L\pi} \quad (5-2)$$

上面各式中：

$i(t)$ —— t 时刻线圈中的电流值

$i_w(t)$ ——电流与 I 的差值

I —— $i(t)$ 的平均值

I_w —— $i_w(t)$ 的有效值

L—线圈电感值

T—方波周期

f—方波频率

由上式可见,传统的悬浮斩波器中,当L, f, I恒定时,电流纹波大小取决于 U_d ,因此不能通过大幅度提高电源电压的方式来提高电流响应速度。

采用三电平悬浮斩波器,输出电流纹波与供电电源电压无关,理论上可以采用大幅度提高电源电压的方式来提高悬浮电磁铁的力响应速度。

而且在输出电压为零时,电磁铁线圈和电源滤波电容之间没有电流流动,在电容上没有功率损耗。功率管开关频率比电磁铁工作频率低一半,功率管上的开关损耗减小了一半,提高了功放效率,使系统可靠性得以提高。

§ 5.2 会车受力分析

两列车交会通过时,作用于车体上的空气压力分布向导向特性试验的重点放在横向位移上。这些位移数据是从激光间隙传感器测出的转向架表面和导轨表面之间的相对位移,减去导轨检测车测出的导轨线圈中心和导轨表面(走行表面和侧壁)之间的相对位移而得出的。上海磁悬浮试验线有一曲线导轨区段,其最小曲线半径为 8000m,最大超高角为 10° ,以减少离心力。根据这些技术条件,车辆运行的横向中心要对正曲线导轨的中心线。即使运行速度超过 500 km/h,横向位移的试验值与计算值也完全一致,这证实横向导向特性完全符合设计要求。

两列车交会通过试验两列车交会通过试验是磁悬浮试验线中的主要成果之一。试验中,两列车以 1000 km/h 的相对速度交会通过。在车辆低速限定的传统铁路系统及单线试验线的宫崎磁悬浮试验线上,都没有达到这次试验所得到的结果。

磁悬浮试验线两导轨的间距在决定磁悬浮试验线南、北两导轨的间距时,考虑了两列车交会通过时的乘坐舒适度。当两列车交会通过时,空气压力的分布沿列车运动,所产生的压力影响列车的车辆动力学特性。列车产生的压力分布见图 5-4。

认为压力波动幅度与列车速度的平方成正比,分别把两列车视为“基准列车”和“相向列车”。基准列车的压力分布对相向列车的影响取决于两列车之间的横向间距(导轨间距)。横向间距越小,压力分布的影响就越大;反之影响就越小。此外,磁悬浮系统与传统铁路系统的不同之处就是有导轨侧壁。过去在宫崎磁悬浮试验线进行运行试验时,对压力的测定表明,

导轨侧壁压力分布的影响很小。有可能把新干线试验数据进行外推来评定磁悬浮试验线压力分布影响的关系。原来建议把导轨间距定在 5m 以上。使用这种间距测算出两列磁悬浮列车(都以 500 km/h 的速度交会运行)交会通过时所产生的压力分布,与两列新干线列车(以一般速度运行)交会通过时所产生的压力分布大致相当。考虑到各种外在因素,而把横向间距定为 5.8m,这是磁悬浮试验线目前的技术标准。

两列车交会通过时作用于车体的外力当两列车交会通过时,决定车辆动力学特性的主要因素是作用于车辆的外力,这是由作用于车体表面的空气压力所产生的。为获得这些外力的试验数据,用靠中间车纵向中央截面外边的几个点来测定压力分布。下图为从测定压力值得到的在两列车交会通过时的时间间隔内,作用于车辆单位长度的横向力、垂向力和侧滚力矩的值。

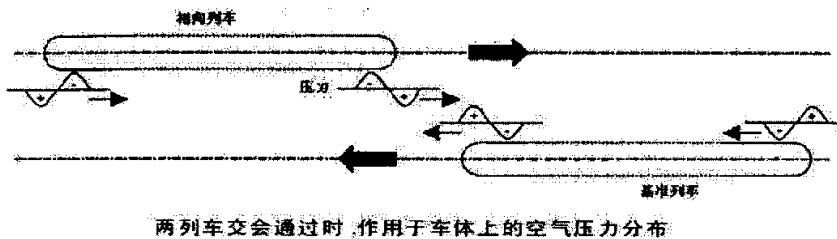


图 5-4 会车时作用于车体的空气压力分布图

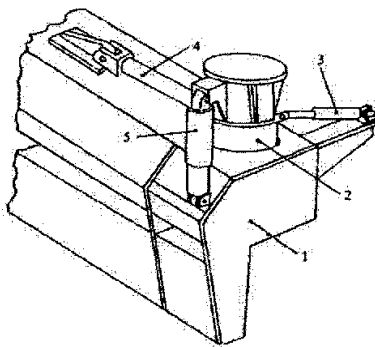
还测定了车辆纵向的压力分布,从而证实压力分布沿车体以近似于两列车相对速度(约 1000 km/h)的速度运动。图 6 为两列车交会通过前后瞬间车体周围的压力分布。作用于车辆的横向力比垂向力、侧滚力矩都要大的多。测出车体周围的压力分布与传统铁路的相似。

§ 5.3 悬浮二次悬挂系统结构分解、力学分析

空气弹簧用作磁悬浮列车的二系悬挂,可以降低运行中的车体与转向架之间的耦合频率,还可以改善旅客乘坐舒适性。因为空气弹簧是采用高度调节气阀实行高度控制的,故多节车辆联挂时,能够保持地板高度一致。

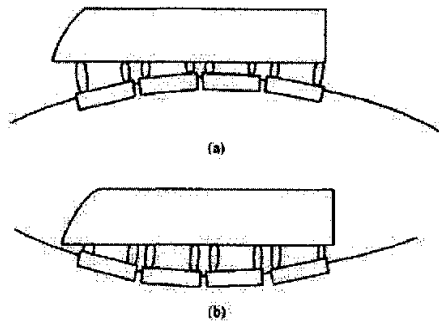
但是,受磁悬浮列车支承电磁铁均匀串接的分布方式所限制(主要是尽量减少电磁铁的端部效应,形成电磁滑板形式),其转向架在车体地板下的分布,也是均布的、为此,当列车进入轨道的竖曲线、弯道顺坡时,转向架与车体地板之间的高度将发生变化,直接影响

空气弹簧的高度调节。高度阀的安装位置及调节速度甚至会破坏二系悬挂的正常工作。



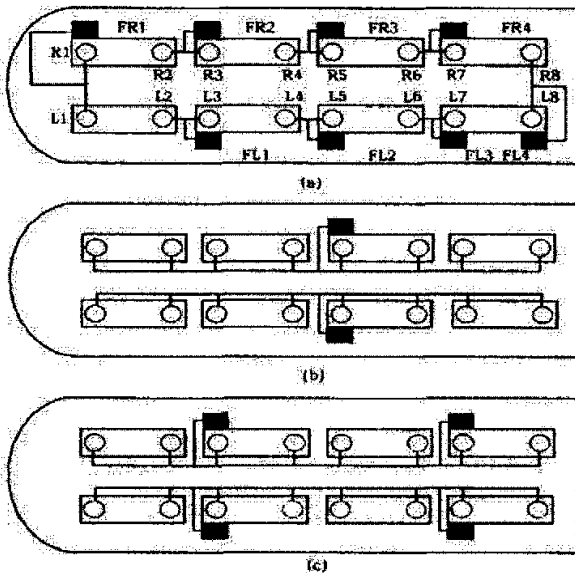
空气弹簧在转向架上的安装位置

- 1—转向架；2—空气弹簧；3—横向拉杆；
- 4—动力推杆；5—阻尼器



磁悬浮列车过竖曲线时的空气弹簧的工作状态

- (a)凸竖曲线上空气弹簧分布状态；
- (b)凹竖曲线路上空气弹簧分布状态



空气弹簧的连接方式

- (a)早期的空气弹簧的安装位置；(b)两侧空气弹簧并联，每侧使用一个高度调节阀；(c)每侧2组空气弹簧，每组4个空气弹簧并联，一组空气弹簧使用一个高度调节阀

这样的空气弹簧的高度调节方式，可以使相邻2个转向架的端部高度保持一致。由高度阀FR1调节的空气弹簧R1与L1，高度阀FL4调节的空气弹簧R8与L8，形成了三点控制方式，与旅游大客车相同。

但是，在过凸凹竖曲线的实际使用中发现，当转向架打折使调节阀的测量平面超过无效区时，对应的空气簧要排气或充气，并且这个过程与过曲线时所要求的压短的空气簧排气、拉长的空气簧充气正好相反。尤其是在过缓和曲线顺坡时，轨道平面扭曲，调节阀的测量面不在同一平面上时更严重，甚至造成几组空气弹簧失压，引起转向架模块的两端受到的车厢的压力不一致，即悬浮电磁铁的支撑力大幅度变化。

为了使支承车厢的空气弹簧内的气压能够一致，我们也曾试图用图3(b)的连接方式，即将车厢两侧的空气弹簧并联，各使用一只高度调节阀来调节高度。尽管这种调节方式可以使车厢两侧的高度保持一致，但由于车厢上的重量分配不可能都均匀，故造成不是头低尾

为了使支承车厢的空气弹簧内的气压能够一致，我们也曾试图用图3(b)的连接方式，即将车厢两侧的空气弹簧并联，各使用一只高度调节阀来调节高度。尽管这种调节方式可以使车厢两侧的高度保持一致，但由于车厢上的重量分配不可能都均匀，故造成不是头低尾

高，就是头高尾低，在负载不均时更为严重。

最后，权衡各种调节方式，我们选择了上图的连接方式，使 16 个空气弹簧形成 4 组，每组的 4 个空气弹簧并联，保持一致的气压，并分别用 4 个高度调节阀来控制悬挂高度，很好地解决了车体高度调节不一致的问题。

当然，如果不是因为转向架的结构所限制，采用前 2 台转向架的 8 个空气弹簧为一组，后 2 台转向架的 8 个空气弹簧为另一组的并联，则更理想。此时只需要采用 2 组高度调节阀就可以满足空气弹簧的调节要求。

经过上述的分析过程，终于使磁悬浮试验车可以顺利地通过线路上的各种轨道曲线。

空气弹簧及减振器的特性和选择要点：

因为我们采用的是旅游大客车的现成膜式空气弹簧（德国与日本的常导磁悬浮列车也是采用膜式空气弹簧），为了保证这种膜式空气弹簧不侧翻，我们使用了纵向动力推杆和横向拉杆对其进行约束，所以，该空气弹簧只承受垂向支承力。含有空气弹簧的二系悬挂系统，如果不使用减振器，则运行中车辆将象船一样自由摇晃。

空气弹簧的应用改善了车辆的二系悬挂品质，提高了舒适性和平稳性。由于在磁悬浮列车的结构中，转向架具有特殊分布形式，我们在研制的过程中，对二系的调试花费了大量的时间和精力，但却为下一批实际应用的车辆的技术进步，奠定了良好的基础。

我们认识到：

(1) 空气弹簧降低了二系悬挂的固有频率，使其与悬浮控制系统的调节频率大大拉开，减少了相互间的耦合及共振的条件。

(2) 空气弹簧如选用液体减振器，应该选用具有双向一致特性的产品，而现有的车用减振器大多是双向异性，在车厢点头时会产生快速抽动及不适感。

(3) 可增加附加气室及节流孔，以取代液体减振器。

(4) 运行试验时选用阻尼系数可调的减振器或可调节流孔，以扩大阻尼调节范围，获得最佳的二系悬挂的特性和效果。

(5) 由于空气弹簧的低频率特性，车厢以上的重量和质量，在悬浮控制系统的快速调节过程中，并不是以静力力的方式作用在转向架上，这样就要求悬浮控制系统的设计参数必须具有较宽的动态稳定裕度，这也是需要引起重视的问题。

尽管常导中低速试验型磁悬浮列车已经运行成功，但仍有许多试验工作要继续进行，其中同样包括二系悬挂的进一步改进。相信通过实验的不断深入，车辆运行的效果将会越

来越好。

§ 5.4 磁浮列车隧道受力分析

可以设想,当速度为 500km/h 的磁浮列车进入隧道时,列车所受到的空气阻力要比明线上大得多。这方面的研究对以后磁浮长大干线的建设有着十分重要的现实意义。这一小节就从空气动力学基本原理出发,给出列车通过隧道时空气阻力随时间变化的计算公式,并在我们建立仿真模型的时候加以运用。

设列车的速度为 v_0 , 列车截面积为 A_0 , 列车的长度为 L_0 , 隧道截面积为 A , 隧道长度为 L , 隧道和列车间的环状空间中气流相对于列车的速度(即侧向风速)为 v_s 。根据气动的连续性方程和非恒定流的伯努利方程可得列车驶入隧道时侧向风速满足的微分方程为:

$$\begin{aligned} & [(1-a)L + av_0t] \frac{dv_s}{dt} + \frac{1}{2} [\xi_1' + (2a-a^2)\xi_2 + \lambda' \frac{v_0t}{4R} - (1-a)^2 \lambda \frac{L-v_0t}{4R}] v_s^2 \\ & + (1-a) [\xi_2 + \lambda \frac{L-v_0t}{4R} - 1] v_0 v_s - \frac{1}{2} [\xi_2 + \lambda \frac{L-v_0t}{4R} - 1] v_0^2 = 0 \end{aligned} \quad (5-3)$$

式中: $a = A_0/A$, 称为阻塞比; λ' 为环状空间沿程阻力系数; λ 为隧道沿程阻力系数; R' 为环状空间的水力半径; R 为隧道的水力半径; ξ_1' 为气流由列车前方进入环状空间的进口局部阻力系数, 查资料得: $\xi_1' = 0.06b_0/\pi d$, b_0 为列车宽度, d 为隧道的直径; ξ_2 为隧道出口的局部阻力系数^[40]。

用同样方法可以推导出列车在隧道内运行时侧向风速满足的微分方程:

$$\begin{aligned} & [(1-a)L + aL_0] \frac{dv_s}{dt} + \frac{1}{2} [\xi_1' + \xi_2' + \lambda' \frac{v_0t}{4R} - (1-a)^2 [\xi_1 + \xi_2 + \lambda \frac{L-L_0}{4R}]] v_s^2 \\ & + (1-a) [\xi_1 + \xi_2 + \lambda \frac{L-L_0}{4R}] v_0 v_s - \frac{1}{2} [\xi_1 + \xi_2 + \lambda \frac{L-L_0}{4R}] v_0^2 = 0 \end{aligned} \quad (5-4)$$

同理可以推出列车驶出隧道时侧向风速满足的微分方程:

$$\begin{aligned} & (L + aL_0 - av_0t) \frac{dv_s}{dt} + \frac{1}{2} [\xi_2' + \lambda' \frac{L+L_0-v_0t}{4R} - 1 - (1-a)^2 [\xi_1 + \lambda \frac{v_0t-L_0}{4R}]] v_s^2 \\ & + (1-a) [\xi_1 + \lambda \frac{v_0t-L_0}{4R} + 1] v_0 v_s - \frac{1}{2} [\xi_1 + \lambda \frac{v_0t-L_0}{4R} + 1] v_0^2 = 0 \end{aligned} \quad (5-5)$$

列车穿越隧道时, 将列车划分为三段: 车头、车身和车尾, 总空气阻力为三部分所受空气阻力之和。根据以上微分方程可以推导列车在不同情况下的受力分析:

§ 5. 4. 1 列车驶入隧道时

将列车车头、车身和车尾所受空气阻力分别用 D_1 , D_2 和 D_3 表示。由于此时车身部分在洞内, 部分在洞外, 因此可以人为地将车身空气阻力分为洞内阻力 D_{2_in} 和洞外阻力 D_{2_out} 两部分, 分别计算后再叠加。所以, 根据非恒定流的伯努利方程和动量方程, 得到列车驶入隧道时空气阻力的计算公式:

$$D = D_1 + D_2 + D_3 = \left[\left[\frac{1}{2} \xi_1' + \frac{1}{2} a^2 - a \right] A + A_0 \right] \rho v_s^2 + \left[\rho (v_0 t - L_h) \frac{dv_s}{dt} + \left[\xi_2 + \lambda \frac{v_0 t - L_h}{4R} - 1 \right] \frac{\rho v_s^2}{2} \right] A_0 \\ + C_f \frac{\rho v_s^2}{2} S_0 (v_0 t - L_h) + C_f \frac{\rho v_s^2}{2} S_0 (L_0 - L_t - v_0 t) + C_{Dp} \frac{\rho v_0^2}{2} A_0$$

(5-6) 式中: ρ 为空气密度; S_0 为列车横断面周长; C_{Dp} 为综合考虑了形状对空气阻力的影响后所取的形状阻力系数, 在计算中取为 0.2; C_f 为空气与列车壁的摩擦阻力系数。根据施利希廷紊流阻力公式得 $C_f = 0.455 / (\lg R_{ei})^{2.58}$, 其中 $R_{ei} = U_\infty (L_0 - L_h - L_t) / \nu$, 称为平板雷诺数, 此处的 U_∞ 为无穷远处的来流速度, L_h 为车头长度, L_t 为车尾长度, ν 为运动粘性系数。

§ 5. 4. 2 列车在隧道内运行时

同理, 根据控制方程, 可得出列车在隧道内运行时空气阻力的计算公式:

$$D = \left[\left[\frac{1}{2} \xi_1' + \frac{1}{2} a^2 - a \right] A + A_0 \right] \rho v_s^2 + \left[\rho (L - L_h - L_t) \frac{dv_s}{dt} + \rho \lambda \frac{L - L_h - L_t}{4R} * \frac{v_s^2}{2} \right] A_0 \\ + C_f \frac{\rho v_s^2}{2} S_0 (L_0 - L_h - L_t) + C_{Dp} \frac{\rho v_s^2}{2} A_0 \quad (5-7)$$

§ 5. 4. 3 列车驶出隧道时

此时同样将车身空气阻力分为洞内阻力和洞外阻力两部分, 分别计算后叠加, 可得出列车驶出隧道时空气阻力的计算公式:

$$D = C_f \frac{\rho v_s^2}{2} S_0 (L + L_0 - L_i - v_0 t) + C_{Dp} \frac{\rho v_s^2}{2} A_0 - \rho (v_0 t + L_i - L_0 - L) \frac{dv_s}{dt} - \rho \lambda' \frac{L + L_0 - L_i - v_0 t}{4R} * \frac{v_s^2}{2} A_0$$

(5-8) 上式中的一些参数值可以参见表 5-1。

表 5-1 列车经过隧道的参数

参数	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	$v(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	C_{Dp}	ξ_1	ξ_2	λ	λ'
数值	1.21	14.9	0.2	0.5	1.0	0.02	0.025

§ 5.5 磁悬浮列车仍然存在的问题

§ 5.5.1 磁悬浮列车的不足

- (1) 磁悬浮系统是以电磁力完成悬浮、导向和驱动功能的，断电后磁悬浮列车的安全保障措施，尤其是列车停电后的悬浮问题仍然是要解决的问题。其高速稳定性和可靠性还需很长时间段的运行考验。
- (2) 常导磁悬浮技术的悬浮高度低，因此对线路的平整度、路基下沉量及道岔结构方面的要求较超导技术更高。
- (3) 超导磁悬浮技术由于涡流效应，悬浮能耗较常导技术更大，冷却系统重，强磁场对人体与环境都由影响

§ 5.5.2 磁悬浮列车可能发生的事故

- (1) 当断电后，高速运行的列车因无法有效悬浮，车身与轨道强烈摩擦滑行，可能引起车体起火，又因为方向无法控制，在巨大的惯性力作用下，特别是轨道存在弯曲半径的地方，列车车底环轨道部分可能发生扭曲变形，造成人员伤亡和车体损坏。当发生下列情况时，亦会发生以上事故，如控制失灵、通讯中断或控制通讯信号受其它电磁信号强烈干扰等。
- (2) 常导磁悬浮技术的悬浮高度较低，因此对线路的平整度、路基下沉量及道岔结构方

面的要求较超导技术更高。当线路不平度较大时，因温度、湿度等因素等原因造成轨道变形，特别当路基下沉较严重时，车体底部会与轨道发生碰撞摩擦，也会导致列车无法正常运行，停止甚至起火。

- (3) 磁悬浮列车时速高达 400~500km，途径的小型动物特别时鸟类会对列车造成冲击，使车体损坏。轨道上的异物会使车体与轨道的缝隙堵塞，间隙无法有效控制，造成车体颠簸，甚至与轨道碰撞摩擦。
- (4) 轨道上存在或从侧面突然出现的较大型异物，与列车相撞，可能导致车体发生变形或毁灭性破坏。
- (5) 磁悬浮列车是靠电磁运行，车内电路复杂，出现异常时，可能引起火灾。

总结以上磁悬浮列车系统可能发生的事故，可分为两大类：磁悬浮列车失去悬浮力，与轨道发生摩擦、冲撞；磁悬浮列车与其他物体发生碰撞。

§ 5.6 小结

本章对磁浮列车悬浮系统中、以及悬浮系统之外影响悬浮控制的装置和因素进行了分析，主要包括一下几个方面：

- ①悬浮斩波器的设计对系统的影响；
- ②会车时的受力分析；
- ③磁浮列车二次悬挂系统的结构分析；
- ④磁浮列车在隧道中的受力分析，对悬浮力的影响；
- ⑤磁浮列车仍然存在的问题。

第六章 结束语

我国的高速交通网络一直是国家的建设重点，“十一五”计划中磁浮列车的国产研究已作为重大研究项目获得国家支持，国内数十家研究单位参与磁浮交通的研究，浙江大学也是其中之一。在韦巍教授的指导和大力支持下，我们磁浮研究小组对磁浮列车直线电机模型、悬浮控制系统模型及列车运动控制系统进行了简化、研究。本文正是在这样的研究背景下，对磁浮列车的悬浮控制装置进行了深入的研究，所做的主要工作有：

1. 应用电磁场分析对悬浮控制磁场进行了数值分析。
2. 用大型仿真分析软件MATLAB建立了TR08型列车悬浮控制电磁铁装置的有限元模型，同悬浮控制的实验结果比较，验证了模型的正确性。
3. 基于所建立的模型，详细分析了悬浮控制力与速度、励磁电流、气隙之间的关系。
4. 优化了悬浮控制磁铁的结构参数，并分析不同悬浮磁铁故障对悬浮控制力的影响。
5. 采用滑模控制器仿真情况下的悬浮控制，并在不同路况下验证了控制器的有效性。

由于本人研究水平有限，时间以及具体试验装置的限制，要建立仿真一个真正的复杂的悬浮控制系统，除本文所研究的问题外，仍有很多的研究和开发工作需要，这些工作包括：

1. 悬浮控制问题的实质是变边界的电磁场分析问题，本文对悬浮控制磁铁进行分析时，做了较多简化研究的假设，将问题简化到单磁铁空间进行分析。
2. 对悬浮力与各影响变量之间的数值拟合，是在仿真模型的基础上获得的，尚需经过实验的进一步修正。
3. 本文所设计的悬浮控制器模型，是在简化了列车参数以及路况影响因素的基础上得到的仿真结果。
4. 本文没有考虑情况，列车悬浮的能耗、乘坐舒适性等方面的问题。

磁浮列车的悬浮问题，涉及因素较多，是一个值得进一步深入研究的问题。

参考文献

1. 吴祥明, 磁浮列车[M], 上海科学技术出版社, 2003
2. 韦巍, 智能控制技术[M], 机械工业出版社, 2000
3. 蒋静坪, 计算机实时控制系统[M], 浙江大学出版社, 1992
4. 刘金琨, 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M], 清华大学出版社, 2005
5. 林国斌, 磁浮列车悬浮与导向系统, 车辆技术国产化及系统接口技术研究 第三章
6. 邓妮, 磁浮列车涡流制动系统建模及紧急控制策略的研究, 浙江大学硕士论文, 2006年3月
7. 刘华清等, 德国磁悬浮列车[M], 西安: 电子科技大学出版社, 1995
8. 磁浮列车悬浮系统技术与造价评估子课题组, 磁浮列车悬浮技术与造价评估(Z96007-7)报告[R], 北京: 铁道科学研究院, 1996
9. 刘恒坤, 常文森, 余龙华, 磁悬浮系统的非线性控制, 自动化技术与应用, 2005年第24卷第11期
10. 孙玉昆, 张昆仑, 磁悬浮列车的非线性鲁棒控制, 机车电传动[J], 2005年第6期
11. Mohand Mokhtari, Michel Marie, MATLAB 与 SIMULINK 工程应用[M], 电子工业出版社, 2001
12. 缪炳容, 肖守讷, 罗世辉, 金鼎昌, 雷成, 磁悬浮车辆结构动力学建模与仿真, 中国铁道科学, 2006年1月
13. 顾红生, 赵毅山, 磁悬浮列车在隧道内影响活塞风速的因素, 同济大学学报, 2003年第3期
14. 王兆祺, 赵毅山, 磁悬浮列车通过隧道时空气阻力的计算方法[J], 同济大学学报, 2003年第10期
15. 尹力明, 赵志苏, 空气弹簧在磁悬浮列车上的应用研究[J], 机车电传动, 2002年第5期
16. 杨建勇, 磁悬浮列车自动控制(ATC)系统研究, 西南交通大学博士学位论文, 2001
17. 张湘, 连级三, 张昆仑, 磁浮列车机械悬浮系统的自适应控制研究, 铁道学报, 2002年第3期

18. 刘少克, 德国磁悬浮列车 TR07 推进与悬浮系统[J], 机电传动, 2000 年第 3 期
19. 李莉, 孟光, 电磁型磁悬浮列车动力学研究综述[J], 铁道学报, 2003 年第 4 期
20. 谢云德, 常文森, 尹力明, 磁悬浮列车系统轨道动力学分析与实验研究[J], 国防科技大学学报, 1997
21. 刘立恒, 磁悬浮列车的 PID 控制器设计[J], 浙江万里学院学报, 2005 年第 4 期
22. 陈南翼, 张健, 高速列车空气阻力试验研究[J], 铁道学报, 1998 年第 5 期
23. 井门敦志等, 高速车辆の空气抵抗とその低減に関する风洞试验, 日本铁道总研报告, 1995, 9(1): 32~37
24. 荣先成, 陈喜红, 高速列车气动特性分析技术及其发展[J], 铁道学报, 1998 年第 2 期
25. 卢执中, 我国列车空气动力学研究的回顾与展望[C], 高速列车空气动力学研讨会, 长沙铁道学院, 1995
26. 张小钢, 刘应清, 高速列车湍流绕流三维数值模拟研究[C], 高速列车空气动力学研讨会, 西南交通大学, 1995
27. 应之丁, 夏寅荪, 邵丙衡, 轨道悬浮控制实验与研究[J], 上海铁道大学学报, 1999 年第 6 期
28. 李莉芳, 悬浮控制器自动控制系统, 重工科技, 2002. No. 2
29. 张永, 高温超导磁悬浮列车悬浮、导向及驱动的研究[D], 北京: 中国科学院电工研究所, 1999
30. 马大炜, 林台平, 关于高速列车悬浮距离的研究, 中国铁道科学, 1998. 01
31. 胡基士(西南交通大学电气工程学院), EMS 磁浮列车悬浮分析, 西南交通大学学报, 2001 年 2 月, 第 36 卷, 第 1 期, 44~47
32. 张昆仑、郭育华、王力, 电磁型磁浮列车悬浮斩波器输入电压的确定方法, 铁道学报, 1999 年第 21 卷
33. 蒋启龙(西南交通大学电气工程学院), 磁悬浮列车悬浮导向方案研究, 西南交通大学学报, 1996 年 10 月, 第 31 卷, 第 5 期, 533~539
34. 赵春发、翟婉明(西南交通大学列车与线路研究所), 磁悬浮车辆系统动力学研究, 中国铁道科学, 2003 年 8 月, 第 24 卷, 第 4 期, 139~141
35. 张金平、张奕黄(北方交通大学电气与电机研究所), 磁悬浮列车的原理及现状, 交通

- 科技, 2002 年 12 月, 总第 195 期, 第 6 期, 81~84
36. 谢云德、常文森, 电磁型 (EMS) 磁悬浮列车系统铅垂方向德建模与仿真, 铁道学报, 1996 年 8 月, 第 18 卷, 第 4 期, 47~54
 37. 蒋启龙、张昆仑、李 熹, 单磁铁悬浮系统的数字控制, 铁道学报, 1999 年增刊, 第 21 卷
 38. 周晓兵、龙志强、李云钢、杨泉林, 磁悬浮列车滑模变结构控制器设计及实现, 国防科技大学学报, 1997 年 8 月, 第 19 卷第 4 期
 39. 江 浩、连级三, 单磁铁悬浮系统的动态模型与控制, 西南交通大学学报, 1992 年第 1 期
 40. 李云钢、常文森, 磁浮列车悬浮系统的串级控制, 自动化学报, 1999 年 3 月, 第 25 卷第 2 期
 41. 刘 峰、龙志强、尹力明, 磁悬浮列车系统的鲁棒控制分析, 机车电传动, 1996 年第 5 期
 42. J. Kaloust, C. Ham, J. Sieghling, E. Jongekryg and Q. Han, Nonlinear robust control design for levitation and propulsion of a maglev system, IEE 20040547
 43. Mahdi Jalili-Kharaajoo, Mani Mesgarpour Tousi, Hassan Bagherzadeh and Aliraza Esna Ashari, Sliding mode control of voltage-controlled magnetic levitation systems, IEEE 2003
 44. Zi-Jiang Yang, Kouichi Miyazaki, Shunshoku Kanae and Kiyoshi Wada, Robust Position Control of a Magnetic Levitation System via Dynamic Surface Control Technique, IEEE 2004
 45. Lin L.C. and T.B.Gao, Feedback linearization and fuzzy control of conventional magnetic bearing, IEEE Trans. Control system technology, vol.5, pp.913-920,1997
 46. Yang, Z.J. and M. Minashima, Nonlinear control of a feedback linearizable voltage-controlled magnetic levitation system, Trans. IEE Japan, vol. 127-3, No.7, pp.1203-1211, 2001
 47. Johannes Graber (德)等, ICE3 列车直线悬浮控制装置, 国外机车车辆工艺, 2003
 48. J. Cheinrich, Huyakorn P S, Czienkiewicz O and Mitchell A R, An 'upwind' finite element scheme for two dimensional convective transport equation[J], International Journal for numerical in methods in engineering, 1997, 11: 131-143

49. Hahn S Y, Bignon J and Sabonnadiere J C, An 'upwind' finite method for electro -magnetic field problems in moving media[J], International Journal for numerical in methods in engineering, 1987, 24: 2071—2086
50. Ramakrishnan S V, Chen C L, Chakravartny S R, Szema K Y, .Numerical Simulation of Two Opposing High-Speed Trains In a Tunnel[C], AIAA, 95~0746
51. Kozo, Fujii and Takanobu, Ogawa, Aerodynamics of High-Speed Trains Passing by Each Other, Computers & Fluids, 1995, 24(8): 897~908
52. S Burkert, H Eilers, Fail-Safe Computer Aided Operations Control Systems for the Transrapid Maglev High-Speed Railway, 14th International Conference On Magnetically Levitated Systems, 1995
53. G. Lo Verso, A Fuzzy Control Technique for a Magnetically Levitated System, 14th International Conference On Magnetically Levitated Systems, 1995
54. K.Muramatsu, N.Takahashi, 3-D Eddy Current Analysis in Moving Conductor of Permanent Magnet Type of Retarder Using Moving Coordinate System, IEEE Transaction On Energy Conversion, Vol.14, No.4, 1999.12
55. Thomas W.Nehl, Bruno Lequesne, Nonlinear Two-Dimensional Finite Element Modeling of Permanent Magnet Eddy Current Couplings and Brakes, IEEE Transaction On Magnetics, Vol.30, No.5, 1994.9

致 谢

在论文工作完成之际，首先衷心感谢我的导师韦巍教授对课题和论文工作的精心指导。导师深厚的学术造诣、严谨的治学态度、敏锐的学术眼光以及宽厚豁达的人品深深的影响着我，使我终生受益。韦巍教授与我的每一次讨论至今仍历历在目，并将永远铭记在心。

衷心感谢参与项目的实验室同学刘静、卞建光、洪永潮、杜森森等，课题凝聚着他们的智慧和工作。在研究生学习期间得到了学长项基、王桂荣、李国阳、陈华杰、彭勇刚、高云园、付晓峰、韩进和已经离开浙大 01 级，02 级，03 级的师兄师姐的热情帮助和支持，在此向他们表示深深的谢意。

另外要感谢 05 级的众多师弟师妹等，他们聪明能干，在平时的工作、学习和生活中给予了我大力的支持和协助，在此向他们致以衷心的感谢。与你们在一起的生活与学习经历是我一生值得珍藏的回忆。

感谢审阅本文并提出宝贵意见的专家和教授。

还有以种种方式接触过我的生活对我有所裨益的诸位朋友，以及一直鼓励和支持我的家人，在此向大家致以深深的谢意，你们是我生存、前进的力量。

最后衷心地感谢所有关心和帮助过我的人们！

最后衷心地感谢所有关心和帮助过我的人们！

屠旭永

2006 年 5 月于求是园