

© 张燕红 著

主动磁悬浮系统的驱动 及控制技术



Driving and Control Technology of Active Magnetic Levitation System

主动磁悬浮支承技术是利用电磁铁产生的受控电磁力使被浮体无接触悬浮的一种新型支承技术，它具有无污染、无接触、无需润滑、无摩擦及精度高等优点，分为旋转支承和平面支承两种支承方式

主动磁悬浮系统的 驱动及控制技术

张燕红 著



内 容 简 介

本书系统论述了主动磁悬浮驱动及控制系统的设计。全书主要内容涵盖了主动磁悬浮技术简介及应用、主动磁悬浮系统的结构与工作机理,主动磁悬浮系统的建模及分析、主动磁悬浮系统的驱动性能分析、主动磁悬浮导轨的颤振分析、主动磁悬浮系统的非线性功放、主动磁悬浮系统的特征主导型控制、主动磁悬浮系统的性能分析。

本书针对主动磁悬浮系统中的驱动及控制问题,全面研究了两种典型的主动磁悬浮支承系统中的功放、非线性功放、主导型控制方法等,具有工程应用价值。本书适合作为电气工程、控制工程、机械工程等学科领域的高校师生的参考用书,尤其适合从事磁悬浮系统的研究与设计的相关科研和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

主动磁悬浮系统的驱动及控制技术 / 张燕红著. —南京:东南大学出版社,2017. 11

ISBN 978-7-5641-7496-5

I. ①主… II. ①张… III. ①磁浮铁路 IV. ①U237

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 292262 号

主动磁悬浮系统的驱动及控制技术

出版发行 东南大学出版社

出版人 江建中

社 址 南京市四牌楼 2 号

邮 编 210096

经 销 全国各地新华书店

印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 700 mm×1000 mm 1/16

印 张 9.25

字 数 181 千字

版 次 2017 年 11 月第 1 版

印 次 2017 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5641-7496-5

定 价 36.00 元

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830)

前 言

主动磁悬浮技术是利用电磁铁产生的受控电磁力对转子或者导轨等物体无接触地悬浮支承的一种新型技术,其支承系统主要分别应用于两种对象,一种是用于旋转对象,如主动磁悬浮轴承;另一种是用于平动支承对象。由于主动磁悬浮技术具有无直接接触、无摩擦、无润滑、无污染等显著的优点,成为国内外研究人员的研究热点问题,也具有广泛的应用前景。

对于一个主动磁悬浮支承系统而言,其中的核心理论和技术是主动磁悬浮理论及其支承技术,系统主要由四部分组成:位置传感与检测、信号控制与调节、电源与功率放大以及被浮体。本书针对主动磁悬浮系统中的驱动与控制问题,重点对功率放大部分存在的问题和不足进行分析研究;对主动磁悬浮导轨系统中存在的颤振问题进行分析并提出一种新型的控制策略。主要研究内容如下:

(1) 设计了主动磁悬浮旋转支承结构和平面支承结构,分析了主动磁悬浮导轨的工作机理,针对主动磁悬浮系统中的电磁机构进行了一定的分析,建立了主动磁悬浮支承系统的数学模型,着重对主动磁悬浮支承系统中的刚度—阻尼特性进行了分析与计算。

(2) 在分析研究了主动磁悬浮支承系统的基本工作原理的基础上,又分析和讨论了磁悬浮支承系统对功率放大器的要求,提出了适合不同类型磁悬浮支承系统的功率放大器设计方案。采用线性器件构建主动磁悬浮支承系统用的模拟功率放大器,采用开关器件构建磁悬浮支承系统用的开关功率放大器;并对可能由于磁悬浮支承部件材料的 $B-H$ 磁化曲线引起的电磁力非线性影响进行了分析讨论,设计了一种以克服这种非线性影响为目的的智能化功率放大器。

(3) 根据磁性材料的非线性特征,通过对磁性材料的测试,找出磁性材料非线性对系统性能的影响并提出一种非线性功放,能够在特殊设计的程序控制下实现“根据磁性材料的非线性特性自动调整功放的增

益”的作用,从而消除系统中这方面的非线性的影响,尽可能满足主动磁悬浮支承技术在数控机床中应用的要求。

(4) 针对平面多点支承的主动磁悬浮导轨中存在的主动式过约束,分析了过约束产生颤振的机理,提出了一种磁阻尼控制的新方法,用于解决多点支承的主动磁悬浮系统中的颤振问题。建立了主动磁悬浮导轨工作台平面的法向磁阻尼模型,并对相应的磁阻尼力进行了相关的计算,为解决多点支承的主动磁悬浮导轨中的颤振提供了必要的理论依据。

(5) 解决了主动磁悬浮导轨系统中的颤振问题之后,提出了一种特征主导型控制策略,根据导轨运行状态,把导轨的工作区间分为平动段、过渡段和冲击段三种不同的工作状态,针对导轨运行时间较长的平动段及特点,采取PID主导控制策略,分析了特征主导型控制的相位同步与强度转换过程,进一步提升了主动磁悬浮导轨的性能,对最终克服平面多点支承系统的技术难点起到至关重要的作用。

(6) 研究并搭建了主动磁悬浮导轨系统的硬件及实验平台。构建了基于DSP TMS320F28335的主动磁悬浮导轨控制系统的模拟实验平台,进行了相关的硬件、软件调试等实验研究,尤其针对主动磁悬浮导轨系统中的主要控制芯片、位移传感器等进行了相关的研究,并进行了相应的参数分析及关键部分的硬件电路设计。

本书在撰写的过程中,参阅了国内外大量的相关著作和文献,尤其是张建生教授提供了很多技术方面的指导,也提供了很多参考资料。在此,向本书所引用文献的作者及张建生教授表达衷心的感谢。由于作者水平有限,书中难免有不足之处,敬请广大读者批评指正。

本书受到了以下项目的资助:江苏高校品牌专业建设工程资助项目(TAPP,项目负责人:朱锡芳,项目编号:PPZY2015B129)、“十三五”江苏省重点学科项目——电气工程重点建设学科、2016年度江苏省高校重点实验室建设项目——特种电机研究与应用重点建设实验室。

编者

2017年6月

目 录

1	绪论	(1)
1.1	研究背景	(1)
1.2	磁悬浮支承技术的研究现状	(3)
1.2.1	磁悬浮支承技术的国外状况	(3)
1.2.2	磁悬浮支承技术的国内状况	(5)
1.2.3	高档数控机床的应用现状	(7)
1.2.4	主动磁悬浮系统驱动装置的研究现状	(8)
1.3	磁悬浮支承的关键技术	(9)
1.4	主动磁悬浮系统中功放形式	(11)
2	主动磁悬浮支承系统的结构及工作机理	(14)
2.1	主动磁悬浮支承系统的两种典型形式	(14)
2.1.1	主动磁悬浮旋转支承结构	(14)
2.1.2	主动磁悬浮平面支承结构	(15)
2.2	主动磁悬浮系统的电磁机构设计	(16)
2.2.1	电磁参数的设计	(16)
2.2.2	电磁铁的设计	(18)
2.3	主动磁悬浮支承系统电控部分的结构	(19)
3	主动磁悬浮支承系统的建模及分析	(21)
3.1	磁悬浮支承系统的单自由度数学建模	(21)
3.2	磁悬浮支承系统的刚度阻尼特性分析	(25)
3.3	主动磁悬浮平面进给导轨系统的力学模型	(27)
3.3.1	磁悬浮平面导轨系统建模	(27)
3.3.2	磁悬浮平面导轨系统模型简化	(28)
3.4	多自由度磁悬浮支承系统的建模	(33)
4	主动磁悬浮驱动装置的性能分析	(38)
4.1	主动磁悬浮系统的承载能力	(38)

4.1.1	驱动输出电流与刚度的关系	(38)
4.1.2	驱动电流与动刚度的关系	(40)
4.2	开关功放的驱动方式	(41)
4.3	改进型线性功放	(43)
4.4	磁性材料的影响	(46)
4.5	扩大功放功率范围的方法	(46)
4.5.1	典型的线性功放原理	(47)
4.5.2	智能化电源	(47)
4.5.3	多管并联与均流技术	(48)
4.6	PWM 开关功放设计	(50)
4.7	恒流斩波开关功放	(50)
4.8	主动磁悬浮支承系统中功放的性能比较	(51)
5	主动磁悬浮驱动电路设计	(53)
5.1	开关功放的输出电路	(53)
5.2	开关管驱动电路	(54)
5.2.1	驱动方式	(54)
5.2.2	IR2110 驱动器	(55)
5.3	非线性功放开关管的控制模式	(56)
5.3.1	PWM 控制模式	(57)
5.3.2	恒流斩波控制模式	(58)
5.4	外围电路的设计	(59)
5.4.1	栅极负偏置 IR2110	(59)
5.4.2	自举元器件的分析	(59)
5.4.3	IR2110 驱动的扩展	(60)
5.4.4	抗干扰电路的设计	(61)
5.4.5	开关管保护电路	(62)
5.4.6	反馈校正回路设计	(63)
5.5	电源、功放与控制关系	(65)
6	主动磁悬浮导轨的颤振分析	(67)
6.1	主动磁悬浮平面多点支承	(67)
6.1.1	平面多点支承的颤振	(67)

6.1.2	平面多点支承的过约束分析	(69)
6.1.3	过约束点的判断	(71)
6.2	平面多点支承的法向磁阻尼	(73)
6.2.1	平面导轨工作台法向支承磁阻尼	(73)
6.2.2	磁阻尼消振分析	(76)
6.3	磁阻尼力的计算与分析	(79)
7	非线性功放的补偿算法	(83)
7.1	非线性功放的基本原理	(83)
7.1.1	非线性功放	(83)
7.1.2	非线性补偿	(84)
7.1.3	非线性功放的结构	(85)
7.1.4	非线性功放的应用	(86)
7.2	磁性材料的非线性	(88)
7.2.1	磁滞现象	(88)
7.2.2	磁滞回线族	(89)
7.2.3	电磁铁的非线性	(89)
7.3	非线性功放软件整体结构	(90)
7.4	功放的非线性补偿的实现	(91)
7.4.1	预测算法	(91)
7.4.2	分段线性化	(95)
7.4.3	预置参数法处理	(96)
7.4.4	非线性功放的信息处理	(98)
7.4.5	查表法补偿	(100)
7.5	PWM控制的软件	(101)
8	主动磁悬浮驱动系统的应用	(103)
8.1	基本参数	(103)
8.2	驱动系统的应用	(104)
8.3	分段线性化的效果	(106)
9	主动磁悬浮系统的特征主导型控制	(108)
9.1	特征主导型控制	(108)
9.2	特征主导型控制的相位同步与强度转换	(110)

9.3	导轨平动段的PID主导控制	(113)
9.3.1	PID主导控制的磁悬浮导轨系统	(113)
9.3.2	智能PID控制器中参数的确定	(114)
9.3.3	PID主导控制的流程	(115)
10	主动磁悬浮系统的性能分析	(118)
10.1	磁悬浮导轨控制系统组成	(118)
10.2	系统主要硬件组成	(119)
10.2.2	滤波器技术参数分析	(122)
10.2.3	信号检测电路设计	(124)
10.3	磁悬浮系统稳定性评估的一般方法	(125)
10.4	系统性能指标测试平台	(127)
10.4.1	系统实验平台	(127)
10.4.2	测试方法	(127)
10.4.3	传感器的标定	(128)
10.4.4	磁悬浮平台传感器布局	(129)
10.4.5	传感器选型	(129)
10.5	系统调试及系统参数验证	(130)
10.5.1	磁阻尼作用下的静态参数测试	(130)
10.5.2	冲击响应及动态测试数据及分析	(132)
	参考文献	(135)

高档数控机床中的主动磁悬浮支承技术分两大部分:一是主动磁悬浮支承的电主轴系统的研究开发,二是主动磁悬浮支承的机床导轨系统的开发研究。在磁悬浮电主轴研究中由磁悬浮电主轴设计、磁悬浮电主轴本体加工、控制器设计调试、功放设计调试、高灵敏涡流传感器的改造研究等工作组成。在主动磁悬浮支承的机床导轨系统的开发研究中由磁悬浮导轨设计、磁悬浮导轨本体加工、控制器设计调试、功放设计调试、高灵敏涡流传感器的设计研究等工作组成。

1.1 研究背景

用于高速机械加工的高档数控机床中的高速电主轴和快速进给导轨(平台)是实现高速加工的两项关键部件,而其中两者的支承技术指标决定了其性能的高低。主动磁悬浮轴承是当代科技领域中发展迅速的高科技支承部件之一,具有无机械摩擦磨损、无需润滑、适用转速极高、功耗小、噪音低等诸多的优点,非常适合作为高档高精度数控机床的支承部件。因此,如何利用磁悬浮支承技术来提高加工速度和精度,是在机床工业领域内应用磁悬浮支承技术(轴承)有待解决的关键问题之一。本书结合高档数控机床中的主要功能部件——磁悬浮电主轴和磁悬浮导轨对磁悬浮支承的具体要求,分析研究实现这一目标的可行性方案,并赋予实施,重点放在对磁悬浮专用驱动的研究上,主要是功率放大器的研究。根据磁悬浮的特点设计一种高可靠、高效率、宽频带、大功率放大器,使之能满足主动磁悬浮支承的电主轴系统和机床导轨系统的要求,分析和研究磁悬浮支承系统中专用驱动及控制的解决方案,旨在为今后的实际应用提供理论和技术方面的依据。为了更深入地研究磁悬浮专用功率放大器,本书对磁悬浮支承系统进行必要的讨论,并在一些与功放相关的方面做更细的分析与研究。在磁悬浮专用功率放大器的研究的基础上对线性功放、开关功放进行性能上的改造和频响分析,并且针对磁悬浮系统中铁芯材料非线性的特点专门提出和设计研究了一种新型功放——非线性功放,用来

抵消铁芯材料非线性的影响,从而使系统具有更好的稳态性能和动态性能,针对这一点进行了相应的实验,除了对主动磁悬浮专用驱动的设计和研发外,也针对主动磁悬浮导轨系统中存在的颤振问题进行了分析,找到产生颤振的原因,提出解决颤振的方法,提出一种特征主导型控制方法,提高了系统的控制精度。

在磁悬浮系统中应用的功率放大器主要有线性功率放大器和开关功率放大器。线性功率放大器的优点是可以对控制信号进行实时放大,在时间上信号没有断点,因此适合于小型快速的电磁轴承系统;但线性功率放大器在单线圈激励的模式下大多采用甲类放大电路,加之供电电压一般恒定,在低转速(或轻载)状态下,电源提供的能量大部分需要在功率放大器上耗散掉,其中主要是功率晶体管作为能量的消耗器件。因此,线性功放的主要缺点是功放电路的发热问题。提高功率放大器的输出就意味着提高功率晶体管的功率耗散容量,这不仅会导致系统的成本上升、系统无功功率(无功能耗)的增加、发热剧烈,甚至有可能在市场上找不到合适的功率晶体管。

开关功率放大器正是针对上述不足而提出的一种解决方案。主要思想是利用晶体管的开关特性,使之工作在开关状态,从而使晶体管的功率损耗、发热等问题得到某种程度上的解决。但开关功率放大器是使晶体管工作在中高频的开关状态。由此给系统的设计带来了新的问题,比较突出的是干扰问题和频响问题。开关功率放大器中的开关信号产生的“毛刺”会通过种种耦合散布在整个磁悬浮系统中,不仅影响控制的精度,而且严重时会导致系统无法正常工作。磁悬浮系统由于其工作的特殊性,对信号的响应速度也有相应的要求,即对功放电路的转换速率也有相应的要求。由于采用了开关电路,使系统的信号流在晶体管通断期间中断,这时系统实际处于瞬间失控状态。如果开关频率太低,可能引起系统的失稳,因此一般要求开关频率为频带的 20 倍以上,至少是转子最高转动频率的 40 倍以上(一般取 40~100 倍),通常在 10~100 kHz 之间,这就意味着研制的功率放大器具有功率大、频响快的特征。

在主动磁悬浮机床导轨中,由于主动型过约束的存在,工作台平面很容易产生“颤振”,这将难以控制主动磁悬浮导轨的稳定悬浮,更无法提高主动磁悬浮导轨的承载能力和控制精度。因此,本书针对多点支承的主动磁悬浮导轨系统的主动型过约束而产生的颤振问题,从理论上分析产生颤振的机理,提出一种产生主动式磁阻尼的新方法来解决颤振问题,形成一个磁阻尼控制的新技术;同时在控制策略上,根据主动磁悬浮导轨系统的动态特征,提出一种特征主导型的控制策略,使系

统的性能得到进一步的提升。这种方法可以使主动磁悬浮导轨在工业应用方面趋于成熟,为主动磁悬浮导轨的实际应用提供了一定的理论依据和技术支撑。

同时,由于主动磁悬浮支承系统中磁性材料的 $B-H$ 曲线具有非线性的特点,针对如何解决由磁性材料非线性因素带来的系统影响问题。提出了一种新型功率放大器——非线性功率放大器。

本书的主要工作包含以下四个方面:

(1) 设计合适的线性功放,使之能够满足磁悬浮平台(模拟导轨)系统的支承条件,并根据磁悬浮系统的负载特点(感性负载),设计可随负载电感的变化而自行调节输出电压的智能化电源来实时调整功放的供电电压,使之在确保足够的动态范围的前提下尽量减少功放管上的压降,达到降低晶体管功耗和发热的目的。

(2) 设计开关型功率放大器,使之满足主动磁悬浮支承的电主轴系统的支承条件。具体指标为:输出电流 ≥ 10 A;输出电流信号的频率响应范围 ≥ 2 kHz。

(3) 针对普遍存在于主动磁悬浮导轨中的“颤振”问题,提出另外一种解决办法——磁阻尼控制,再施加一种主导型控制策略,从而提高系统的稳态性能和动态性能,使得系统的稳定域进一步扩大。

(4) 根据磁性材料 $B-H$ 曲线具有的非线性特点,设计具有自适应性的智能型非线性功放,用以补偿磁性材料的非线性特性带来的影响。

1.2 磁悬浮支承技术的研究现状

磁悬浮支承技术是 20 世纪 60 年代中期开始研究的一项新的支承技术,它标志着对传统支承技术的革命。磁悬浮支承技术涉及电力电子、控制理论、计算机技术、材料及机械制造等多门学科,因此,磁悬浮支承技术的发展过程也依赖于上述学科的发展。随着电子电路、机械设计、计算机控制及自动控制理论的飞跃发展,主动磁悬浮技术的研究与应用越来越广泛。目前,主动磁悬浮支承技术进入了一个攻关时期,如何提高主动磁悬浮系统的稳定性及控制精度,是把主动磁悬浮支承技术真正用于工业生产中的一个关键问题,国内外专家在这方面做了大量工作。

1.2.1 磁悬浮支承技术的国外状况

磁悬浮支承技术是 20 世纪 60 年代中期开始进入实用性研究的一项新的支承技术,其概念的提出则可以追溯到一个半世纪前。它的出现标志着对传统支承技

术的革命。

进入 20 世纪 60 年代以后,随着微电子器件、先进磁性材料及现代控制理论等相关学科领域技术的发展,法国、日本、美国、苏联等国纷纷开始投入人力、物力进行主动磁悬浮支承技术研究,不少国家已具备一定的研制与应用能力,从而揭开了磁悬浮轴承在航天器上应用的序幕。而后,磁悬浮支承技术也在高速轨道交通、卫星的高速导航陀螺、空气分离设备及特种电机(如高速离心机)中得到了应用。近年来,国外发展迅速的磁悬浮支承技术在机械基础方面的应用进展逐步加快,应用实例之一是主动磁悬浮轴承。早在 1842 年,英国的物理学家就证明了在任何形式布置的固定磁场和重力场中都不可能实现对任何一种静态磁铁组合进行稳定地悬浮;1937 年,德国的 Kemper 申请了一个关于磁悬浮技术的专利;同时,美国弗吉尼亚大学的 Beams 和 Holme 研制了离心机用混合磁轴承;1957 年,法国的 Hispano-Suiza 公司提出了利用电磁线圈和感应传感器组成主动型磁悬浮系统的方案,促进了现代磁悬浮技术的发展;1972 年,法国 SEP 公司将磁力轴承应用于卫星导向器飞轮支承;1976 年,法国的 SEP 公司和瑞典的 SKF 公司联合成立了 S2M 公司,专门研究和开发了超高速精密加工机床的磁轴承,于 1977 年研发了一台用于数控机床的高速磁悬浮电主轴;1981 年,S2M 公司在 Hanover 欧洲国际机床博览会上,推出了 B20/500 主轴系统,并现场演示以 35 000 r/min 的转速进行钻铣削的技术,其回转速率高、效率高、精度高、功耗低等特点引起了人们的广泛关注;1984 年,日本的 NTN 东洋轴承公司研制出了超高速磨削主轴部件,并已有标准化径向电磁轴承和轴向电磁轴承产品。20 世纪 90 年代,计算机逐步应用于各领域中,磁力轴承的数字化控制也逐步发展起来。1990 年,瑞士的 G. Schweitzer 教授提出了数字化磁悬浮控制,并于 1994 年发表了关于高速磁悬浮转子数字控制的文献;1993 年,苏黎世联邦工学院的 R. Schoeb 首次实现了交流电机的无轴承技术;1995 年,瑞士的 IBAG 公司研发了铣削电主轴,后来在一些西方国家投入工业应用;1996 年在日本召开的第 5 届国际磁轴承会议上,瑞士的 Philipp Buhler 等人介绍了切削机床用的数控磁轴承;2000 年,苏黎世联邦工学院的 S. Sliber 研制出无轴承单相电机,再一次在无轴承电机研究历史上前进了一步,降低了控制系统的费用;2002 年,德国 Darmsdat 工业大学机电研究所研制出了一种小型主动磁悬浮轴承,其转速达到 120 000 r/min;2006 年,第 10 届国际磁轴承会议上报告了日本 Ebara 公司研制的 480 °C 的高温磁悬浮轴承;2011 年,Revole 公司和 SKF 公司合作新建了一个磁轴承的生产厂,大大促进了磁轴承在工业应用方面的发展进程。2013 年,日本的 Y.

Okada 教授提出的一种洛伦兹力型大间隙自支承轴承电机转子转速可达 9 000 r/min, 并尝试把它应用在离心心脏泵中, 目前还在继续研究中, 直至后来这种主动磁悬浮电主轴一直被广泛关注和研究。关于磁悬浮技术的发展状况可以从每隔两年召开一次的国际磁轴承会议(International Symposia on Magnetic Bearing, ISMB)上获悉。

经过多年的发展, 磁悬浮技术在主动磁悬浮导轨方面的应用也取得了较大的进展。1994 年, 德国的 Karl-Dieter Tieste 等人建立了一个磁悬浮导轨实验台并通过计算机仿真研究了导轨模型的柔度与频率之间的响应关系, 这是最早有关研究磁悬浮导轨的一个例子。2000 年, Martin Ruskowski 等人根据该磁悬浮导轨实验台建立了它的非线性数学模型。2002 年, 他们采用加速度测量和激光定位的方法来控制主动磁悬浮试验台的精度。1998 年, 日本的 Takenbi Mizumo 等人提出了一种具有磁悬浮导轨的直线运载装置模型; 2002 年, 美国的 Won-jong Kim 等人研制了一种磁悬浮驱动装置, 获得了较高的定位精度; 2003 年, 日本东北大学 Wei Gao 等人研制了一种三自由度磁悬浮平台; 2005 年, Jung H. Kim 等人开发了六自由度高精度磁悬浮平台, 同时, 美国的 Integrated Solutions 公司研制了一种精密磁悬浮运动平台; 2009 年, Rong-Jong Wai 等人开发出了一种六自由度长行程磁悬浮平台, 能实现大行程的进给, 直至后来这种长行程磁悬浮平台还在不断深入研究中。2010 年, Hsin-Jang Shieh 等人在控制方法上对磁悬浮平台进行研究; 2013 年, Chia-Hsiang Menq 等人对磁悬浮平台的伺服机构进行了可视化方面的研究; 2014 年, Kuo-Ho Su 等人在磁悬浮系统的干扰方面做了相关的研究; 2015 年, Rong-Jong Wai 等人研制了一种采用自适应模糊神经网络的混合型磁悬浮平台。

1.2.2 磁悬浮支承技术的国内状况

相对于国外对磁悬浮技术方面的研究, 国内在这方面的研究起步较晚, 但是相关的研究工作一直在高校和企业中开展, 并在理论分析方面取得了许多研究成果, 产品应用则刚刚起步。清华大学、西安交通大学、上海大学、南京航空航天大学、山东大学、江苏大学、深圳大学、哈尔滨工业大学、浙江大学、国防科技大学、北京航空航天大学、山东科技大学、南通大学、常州工学院等单位都先后开展了主动磁悬浮技术的研究, 其中, 南京航空航天大学、山东科技大学专门成立了磁悬浮技术研究所; 清华大学、西安交通大学、上海大学也成立了相应的磁悬浮研究机构, 对磁悬浮技术的发展及应用做了大量的研究工作; 上海大学、南通大学、常州工学院等相继进行了主动磁悬浮电主轴、导轨方面的研究。

自 20 世纪 90 年代后期,江苏大学、沈阳工业大学和南京航空航天大学等先后得到了国家自然科学基金资助,开展了无轴承电机的研究工作,并已经在理论和实验方面取得了一些成绩;西安交通大学轴承研究所在 1994 年就开发了一台转速为 24 000 r/min 的 5 自由度磁悬浮电主轴样机,实现了国内磁悬浮支承技术方面的突破;1997 年,西安交通大学的虞烈等人编译的《主动磁轴承基础、性能及应用》,将国外磁悬浮方面的先进理论引入国内;1998 年,上海大学汪希平博士领导的团队开发了 600 W 的磁力轴承控制器,用于 150 m³ 的制氧透平膨胀机的控制,在苏州制氧厂获得初步成功;1999 年又完成一台五自由度模拟 PID 控制的磁悬浮增压透平膨胀机样机,设计工作转速为 40 000 r/min,试验稳定转速为 33 000 r/min,最高转速为 37 kr/min;上海大学轴承研究室研制的一台制氧透平膨胀机则于 1999 年 3 月以其稳定试验转速 92 000 r/min、最高转速 96 900 r/min、动刚度 50 N/ μ m 及整机噪声小于 60 dB 等指标通过上海市科委组织的专家会议鉴定;2000 年,清华大学的张德魁、赵雷、赵鸿宾等人与无锡开源机床集团公司合作,实现了磁悬浮轴承内圆磨床电主轴的工厂应用实验,工厂实验表明,磁悬浮轴承内圆磨床电主轴系统在主轴转速、动态跳动、磨削刚度和稳定性等方面已经初步满足工厂应用的要求;上海大学轴承研究室于 2005 年开始分别与北京工业大学和广东某汽轮机有限公司合作,研究开发磁悬浮人工心脏泵和 28 kW 磁悬浮高速油泵机组。“十五”期间,在国防预先研究、国防技术基础研究等支持下,国防科技大学、上海航天局 812 所、北京航空航天大学等开展了以空间应用为目的的磁悬浮陀螺技术研究,已在磁悬浮陀螺关键技术方面取得重要进展。2006 年 11 月,国内成立了从事磁悬浮轴承产品研发和推广的飞旋科技有限公司,该公司于 2007 年 8 月成功研制了一台具有完全自主知识产权的磁悬浮分子泵,该泵的设计运行转速达到 27 000 r/min;2008 年,山东大学的刘淑琴等人设计了磁悬浮轴承开关功率放大器,并通过提高开关功放的响应来改善磁悬浮系统的性能;2009 年,由南京航空航天大学的徐龙祥教授团队研发、南京磁谷科技有限公司生产的具有自主知识产权的磁悬浮鼓风机,额定转速达到 40 000 r/min,在污水处理厂成功连续运行,被科技部和环保部列入国家重点新产品计划项目;2010 年底,海尔公司研发出了风冷磁悬浮机组,并于 2012 年 5 月 18 日在青岛举行了磁悬浮变频离心机应用交流会,同时成立了磁悬浮变频离心机专家顾问委员会。

由于磁悬浮技术是跨学科的综合应用技术,随着电力电子、高速单片机技术、电磁材料及机械加工技术的发展,经过广大磁悬浮研究人员的不懈努力,由磁悬浮支承技术组成的高可靠性的新产品逐步向应用型过渡。

1.2.3 高档数控机床的应用现状

1981年,法国 S2M 公司在欧洲国际机床展览会上首次展出了 35 000 r/min、22 kW 的电主轴,并作了切削演示;1995年,瑞士 IBAG 公司推出了 40 000 r/min、30 kW 的电主轴;迄今为止召开的 9 届国际磁轴承会议显示:机床工业是主动磁悬浮轴承的主要应用领域之一,其形式以装入式主动磁悬浮电主轴为主。由于机械部件的非接触,许多优点被体现出来,其中高速、高精度可视为之冠。在高档数控机床中使用可以获得超乎想象的效果,故有“新世纪机电一体化产品的典范”之美誉。国内从 1986 年开始,广州机床研究所与哈尔滨工业大学首先对“磁力轴承的开发及其在数控集成生产线上的应用”这一课题进行了研究。此后,清华大学、西安交通大学、天津大学、山东科技大学、南京航空航天大学等都在进行这方面的研究工作。

直线导轨是数控机床的另外一个重要部件。常用的 V-V 型滑动导轨和滚动导轨易产生爬行,液体静压导轨的液压装置大、辅助设备多、维修保养麻烦,油污染严重,气体静压导轨要求超洁净的使用防尘条件,加工困难。磁悬浮支承技术在数控机床方面的应用实例之二是主动磁悬浮导轨(Active Magnetic Guide, AMG),其实物图如图 1.1 所示。

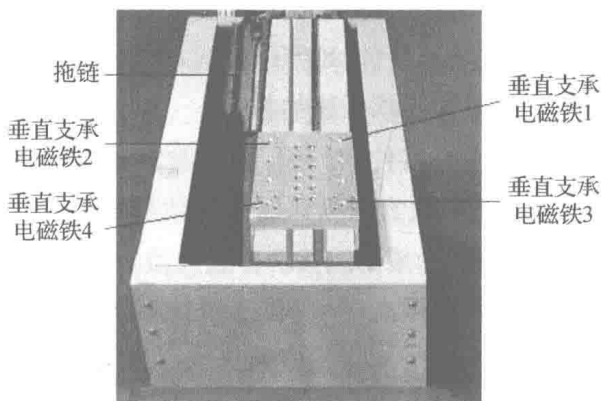


图 1.1 磁悬浮导轨的实物图

近年来,从目前国际四大机床展览会(欧洲 EMO、美国 IMTS、日本 JMTOF、中国 CIMT)上看到:用磁悬浮电主轴的数控机床不断出现。1999年5月,在巴黎举办的第 13 届欧洲国际机床展览会上,展出了许多当前世界最高水平的数控机床。主轴转速为(30 000~40 000) r/min 的数控机床已用于粗加工、精加工、超精加工;直线电机的数控机床快速移动速度达 120 m/min、160 m/min,磨床的砂轮线

速度可达 120 m/s、160 m/s 甚至 200 m/s,快速移动加速度可达 1 g 以上的机床展品增多,出现了装直线电机的加工中心、电加工机床、压力机以至大型机床。日本已有 6 家公司展出了装直线电机的高档数控机床。1995 年,瑞士 IBAG 公司开发了 40 000 r/min、30 kW 的铣床电主轴;2003 年,山东科技大学开发的小功率磁悬浮电主轴已在济南第四机床厂试验获得成功;2006 年,上海大学开发的 30 000 r/min、22 kW、回转精度小于 2 μm 的铣床电主轴和 0.8 m 磁悬浮平台(机床导轨)通过了国家 863 专家组的验收。

目前,在数控机床的主轴中,一般 7.5 kW 以上的电主轴转速几乎不超过 15 000 r/min。对于磁悬浮导轨,目前还未见这方面的产品报道。作为高档数控机床,进给动作的快速性主要取决于两个因素,一是提高进给电机的动力;二是减小导轨的摩擦系数。由于磁悬浮导轨可以将摩擦系数大大减小,从而有利于进给动作的快速性。

1.2.4 主动磁悬浮系统驱动装置的研究现状

在功率放大器方面的研究,国内外更可谓是百花齐放,各有特色。但归结起来无非是两类:线性功率放大器(简称线性功放)和开关功率放大器(简称开关功放)。线性功放以线性双极性功率放大晶体管为主,单管的输出功率一般不超过几百瓦;而开关功放用场效应晶体管或其组件(IGBT)构成,单管输出功率往往可以达到数千瓦以上,故成为大功率磁悬浮支承系统的首选。

在线性功率放大器中,由于器件的原因,通常输出功率较小,当一个自由度上输出功率大于 200 W 或输出电流大于 5 A 时很难找到合适的功率晶体管。因此,在大型的磁悬浮支承系统中很少采用线性功率放大器。在开关功放中,尽管功率、电流可以做得很大,但频响很难做高,一般在 2 kHz 以下。清华大学、南京航空航天大学、江苏大学、山东科技大学、北京航空航天大学及上海大学等单位在开发磁悬浮功放方面各有特色。清华大学和山东新东风光电子科技有限公司联合研制的开关功放,其输出电流可达 15 A(单自由度)、频响可满足 3 000 r/min 的工况要求;其他研究单位的功放其输出电流一般在 4~6 A(单自由度),频响则在 2 kHz 以下。