

● “十五”国家重点图书

● 机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

# 磁力轴承的基础 理论与应用

胡业发 周祖德 江征风 著

“十五”国家重点图书  
机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

# 磁力轴承的基础理论与应用

胡业发 周祖德 江征风 著



机械工业出版社

本书以主动磁力轴承转子系统的设计为主线，系统地介绍了轴向磁力轴承的结构设计、径向磁力轴承的结构设计、单自由度磁悬浮控制系统、五自由度磁悬浮控制系统、磁悬浮位移传感器和功率放大器、磁力轴承的支承特性、磁悬浮转子动力学、磁悬浮转子系统的耦合分析等有关方面的基础理论和具体的设计方法。本书还介绍了国外有关磁力轴承的几种典型工业应用。

本书可以作为磁悬浮技术方面的参考书和研究生教材，也可供从事磁力轴承研究与设计方面的工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

磁力轴承的基础理论与应用/胡业发等著. —北京: 机械工业出版社, 2006. 3

“十五”国家重点图书

ISBN 7-111-18548-X

I. 磁... II. 胡... III. 电磁轴承 IV. TH133.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 011617 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 邓海平 蔡开颖 责任编辑: 蔡开颖 邓海平

版式设计: 张世琴 责任校对: 陈延翔

封面设计: 马精明 责任印制: 洪汉军

北京原创阳光印业有限公司印刷

2006 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

787mm × 1092mm  $\frac{1}{16}$  · 14.75 印张 · 341 千字

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

# 序

随着我国经济的高速发展，中国早已成为一个世界制造大国，但是还远未成为一个世界制造强国。我国机电产品普遍存在着技术含量少、没有自主知识产权的现象。因而产品附加值低、高精尖的产品少。与常规轴承不同，磁力轴承采用电磁力基于反馈控制原理来支承转子，具有无摩擦、无磨损、高速度、高精度、低功耗等一系列独特性能，因而可以广泛应用于高速、高精度的旋转机械。它是一种典型的高技术含量、高附加值机电一体化产品。国外已经将磁力轴承成功应用于高速、高精度机床主轴、高速真空泵、离心机、鼓风机、陀螺仪等产品中。然而，由于磁力轴承支承技术涉及机械、电子、传感、控制、计算机等多学科领域，我国要将磁力轴承应用于工业产品中还存在着一系列理论与方法有待研究与解决，国内磁力轴承的研究整体上还处在实验研究阶段。

本书从磁力轴承的结构设计理论与方法开始，由浅入深地逐步展开了轴向磁力轴承结构设计的理论与方法、径向磁力轴承结构设计的理论与方法、单自由度磁悬浮控制系统数学模型的建立、五自由度磁悬浮控制系统的构成、磁悬浮转子动力学、磁悬浮转子耦合分析等内容，还介绍了国外磁力轴承的应用实例。提出了磁力轴承结构优化设计理论与方法，阐述了磁力轴承支承特性与广义支承刚度的概念并推导出其计算公式，分析了磁悬浮转子动力学与磁力轴承控制系统之间的关系，指出了磁悬浮转子中存在的耦合现象并推导出相应的耦合系数计算方法。

本书作者是我国较早一批从事磁悬浮技术研究的学者之一，在该领域从事研究工作多年。作者在阅读大量国内外文献的基础之上，结合自己的研究成果撰写了这本学术专著。由于磁力轴承有着广泛的应用前景，磁悬浮技术还处在方兴未艾的发展阶段，还需要广大读者在使用与阅读过程中批评指正，推动磁悬浮技术在我国的研究、开发与应用，为掌握具有自主知识产权的磁力轴承产品，为提高我国机电产品的高科技含量与高附加值而共同奋斗。

中国科学院院士

熊有伦

于武汉

# 前 言

随着 21 世纪知识经济的到来,传统的制造业发生了根本的变化。以知识为特征、以计算机应用为手段的先进制造技术发展迅猛。在此背景下,广泛应用于航空、汽车、冶金、化工、石油、制冷等工业的高速精密转子(如磨床电主轴、数控加工中心主轴、航空发动机、真空泵、离心机、回转式压缩机、汽轮机、电动机、陀螺仪、铰子、鼓风机等)正在向高速度、高精度、自动化、智能化方向发展。轴承作为高速精密转子的关键部件其要求越来越高、性能指标越来越复杂。现有的滚动或滑动轴承已很难综合满足这些要求。

磁力轴承是利用电磁力将被支承件稳定悬浮在空间的一种高性能机电一体化轴承。与传统的轴承相比,其主要特点为:①完全消除磨损,轴承寿命理论上是无限的;②转速只受转轴材料的限制,可高达 200m/s;③精度高,能达亚微米级;④功耗是普通轴承的 10%;⑤阻尼、刚度可调可控,便于智能控制;⑥转子的运转特性可以监测和控制;⑦无润滑和密封装置,没有环境污染。这些特性使得磁力轴承成为满足高速精密转子综合性能要求的理想支承。因此,在工业中有着广泛的应用前景和极其重要的商业价值。

然而,由于磁力轴承涉及到机械、电子、计算机、控制、传感等多学科技术,其设计理论与方法十分复杂,到目前为止还没有非常成熟的理论体系。本书在参考国内外同行的研究基础之上,结合作者多年的研究成果与经验,系统地提出了磁力轴承的结构设计、单自由度磁悬浮控制系统、五自由度磁悬浮控制系统、磁悬浮位移传感器和功率放大器、磁力轴承的支承特性、磁悬浮转子动力学、磁悬浮转子系统的耦合分析等有关方面的基础理论和具体的设计方法。书中还介绍了国外有关磁力轴承的几种典型工业应用。

本书共分 10 章:第 1 章概括介绍了磁力轴承发展历史及趋势、磁力轴承工作原理及分类、磁力轴承支承技术的特点及其典型的工业应用。第 2 章介绍了磁力轴承基础理论,包括电磁场的基本理论、磁性材料及其特性、磁路的分析与计算、磁力轴承电磁力的计算。第 3 章介绍了磁力轴承的具体结构设计,按两类磁力轴承分别进行设计:轴向磁力轴承的结构设计与径向磁力轴承的结构设计的方法和步骤,由于涉及到磁场与磁极,因此有磁场的计算与分析、磁极数的分析。第 4 章介绍了磁力轴承系统数学模型的建立。从单自由度磁悬浮控制系统数学模型的建立开始,推导出五自由度磁悬浮转子系统数学模型、轴向磁力轴承与径向磁力轴承控制系统数学模型。磁力轴承中非常重要的一环是控制系统的设计,所以第 5 章介绍了磁力轴承控制系统的设计与分析,包括 PID 软件设计与硬件设计。第 6 章详细介绍了功率放大器与位移传感器的设计。由于磁力轴承的支承特性与转子动力学问题都与其他轴承不同,因此第 7 章介绍了磁力轴承的支承特性,提出磁力轴承等效刚度与等效阻尼概念、磁力轴承静态特性、典型控制规律下的磁力



轴承支承特性。第8章分析磁悬浮转子动力学,包括刚性转子数学模型的建立与刚性转子性能分析,以及基于弹性支承的柔性磁悬浮转子动力学。磁力轴承是一个十分复杂的系统,存在多场耦合的问题,因此第9章对磁悬浮转子系统中的耦合进行了分析,包括径向磁力轴承中的力耦合、径向磁力轴承之间的力耦合、力矩耦合、轴向磁力轴承引起的力矩耦合、磁悬浮转子系统的转矩耦合、磁悬浮转子系统的传感器偏置耦合、径向磁力轴承磁极之间的磁耦合。磁力轴承在工业中已经有一些应用,并将在更多的领域中发挥优势。第10章介绍了磁力轴承的铣削主轴、磁悬浮硬盘驱动器、磁悬浮陀螺仪及其他领域的应用现状。

本书由胡业发、周祖德、江征风共同编写,王晓光、苏义鑫、丁国平、王春麟、吴华春、钟毅等对本书的编写提供了很大帮助。

本书涉及的研究工作得到国家自然科学基金重点项目、国家重大基础研究项目、国防科工委基础研究和教育部重点科技项目的资助,在此表示衷心的感谢!

本书是“十五”国家重点图书,是机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目。本书的读者对象主要为从事磁力轴承研究工作的大学教师、科研人员、研究生和工程技术人员。

由于磁力轴承在我国的发展方兴未艾,加上作者水平有限,书中的不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

# 目 录

序

前言

## 第1章 绪论

- 1.1 磁力轴承的发展历史与趋势 ..... 1
- 1.2 磁力轴承的工作原理与分类 ..... 4
- 1.3 磁力轴承支承技术的特点 ..... 7
- 1.4 磁力轴承的工业应用 ..... 8
- 1.5 本章小结 ..... 12
- 参考文献 ..... 12

## 第2章 磁力轴承基本理论

- 2.1 电磁场的基本理论 ..... 14
- 2.2 磁性材料及其特性 ..... 17
- 2.3 磁路的分析与计算 ..... 19
- 2.4 磁力轴承电磁力的计算 ..... 21
- 2.5 本章小结 ..... 23
- 参考文献 ..... 24

## 第3章 磁力轴承的结构设计与分析

- 3.1 轴向磁力轴承的结构设计 ..... 27
- 3.2 径向磁力轴承的结构设计 ..... 29
- 3.3 磁力轴承结构设计的方法和步骤 ..... 32
- 3.4 磁力轴承磁场的计算与分析 ..... 34
- 3.5 磁力轴承磁极数的分析 ..... 43
- 3.6 本章小结 ..... 45
- 参考文献 ..... 45

## 第4章 磁力轴承系统数学模型

- 4.1 单自由度磁悬浮控制系统数学模型 ..... 46
- 4.2 五自由度磁悬浮转子系统数学模型 ..... 50

- 4.3 轴向磁力轴承控制系统数学模型 ..... 54
- 4.4 径向磁力轴承控制系统数学模型 ..... 56
- 4.5 本章小结 ..... 64
- 参考文献 ..... 64

## 第5章 磁力轴承控制系统的设计与分析

- 5.1 磁力轴承 PID 控制 ..... 65
- 5.2 控制系统的硬件设计 ..... 74
- 5.3 本章小结 ..... 82
- 参考文献 ..... 83

## 第6章 功率放大器与位移传感器

- 6.1 功率放大器的设计 ..... 84
- 6.2 功率放大器设计示例 ..... 91
- 6.3 磁力轴承系统的传感器 ..... 94
- 6.4 本章小结 ..... 101
- 参考文献 ..... 102

## 第7章 磁力轴承的支承特性

- 7.1 磁力轴承刚度与阻尼的定义 ..... 103
- 7.2 磁力轴承刚度与阻尼的计算 ..... 107
- 7.3 磁力轴承的广义刚度 ..... 109
- 7.4 磁力轴承支承特性的分析 ..... 111
- 7.5 本章小结 ..... 114
- 参考文献 ..... 115

## 第8章 磁悬浮转子动力学

- 8.1 转子动力学基础 ..... 116
- 8.2 磁悬浮刚性转子数学模型的建立 ..... 120
- 8.3 磁悬浮刚性转子性能分析 ..... 122
- 8.4 基于弹性支承的柔性磁悬浮



转子动力学 .....	125	耦合 .....	164
8.5 本章小结 .....	134	9.7 磁悬浮转子系统耦合特性的实验	
参考文献 .....	134	测试 .....	169
		9.8 本章小结 .....	176
		参考文献 .....	177
<b>第9章 磁悬浮转子系统中的耦合分析</b>		<b>第10章 磁力轴承的典型应用</b>	
9.1 径向磁力轴承中的力耦合 .....	136	10.1 磁力轴承铣削主轴 .....	179
9.2 径向磁力轴承之间的力耦合、		10.2 磁悬浮硬盘驱动器 .....	184
力矩耦合 .....	140	10.3 磁悬浮陀螺仪 .....	206
9.3 轴向磁力轴承引起的力矩耦合 ..	144	10.4 磁力轴承的其他应用 .....	215
9.4 磁悬浮转子系统的转矩耦合 .....	149	10.5 本章小结 .....	224
9.5 磁悬浮转子系统的传感器偏置		参考文献 .....	224
耦合 .....	151		
9.6 径向磁力轴承磁极之间的磁			



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 磁力轴承的发展历史与趋势

利用磁力使物体处于无接触悬浮状态是人类一个古老的梦想，人们试图采用永久磁铁实现物体的稳定悬浮，均未成功。直到 1840 年英国剑桥大学的恩休 (S. Earnshaw) 教授从理论上证明了单靠永久磁铁是不能使物体在空间六个自由度上都保持稳定悬浮的。唯有采用抗磁性材料才能依靠选择恰当的永久磁铁结构与相应的磁场分布而实现稳定悬浮。

为了使得由铁磁体所得到的力能够用于稳定的自由悬浮，必须根据物体的悬浮状态连续不断的调节磁场，这可以通过可控电磁铁来实现。实现这一目标的设想发表于 1937 年，主要用于两个完全不同的领域：交通学和物理学。同年，肯珀 (Kemper) 申请了一项有关悬浮技术的专利，专利提出了采用新的交通办法的可能，并在参考文献 [2] 中介绍了与此相关的实验：电磁铁的磁极面积为  $30\text{cm} \times 15\text{cm}$ ，磁感应强度为  $0.25\text{T}$ ，功率为  $250\text{W}$ ，气隙为  $15\text{mm}$ ，承载量为  $210\text{kg}$ 。在控制中它采用了电感或电容式传感器以及电子管放大器，这一实验正是稍后出现的磁悬浮列车的前身。

1957 年法国 Hispano-Suiza 公司第一个提出了利用电磁铁和感应传感器组成主动 (有源) 全悬浮系统的设想，并取得了法国专利 (French Patent 1186527, November, 1957)，这是现代磁悬浮技术的开始。然而，由于控制理论、控制元件、控制电路等方面的问题没有解决，早期的磁悬浮研究主要侧重于被动 (无源) 悬浮。麻省理工学院出版的文献总结了在 1974 年以前的研究。由于被动悬浮刚度小、阻尼差，所以主要应用于仪器仪表，无法应用于大负载、高刚度的主轴部件。

20 世纪 60 年代中期，随着控制元器件的不断发展和完善，法国、日本、美国相继对主动磁悬浮投入了研究。1969 年法国 SEP 公司开始研究主动磁悬浮系统的特性，1972 年将第一个磁力轴承应用于卫星导向器飞轮支承。与此同时，美国 NASA 系统也投入了大量的人力物力来开发主动和被动磁悬浮混合型磁力轴承在卫星飞轮上的应用。在日本，森美郎、金子礼三等在 1965 年、1968 年分别发表了“可控磁力轴承的基础研究——第一报告、第二报告”的论文，提出了磁力轴承线性化理论，并建立了采用一个电磁铁的主动控制磁力轴承数学模型，为单自由度控制的磁力轴承研究奠定了基础。

20 世纪从 70 年代末到 80 年代初，随着现代控制理论的发展，电子元器件技术的日臻完善，人们逐步开始将主动磁力轴承推广应用到工业设备中，相应的控制方法也从单自由度控制 (古典控制理论) 发展到多自由度控制 (现代控制理论)。作为磁力轴承发展的代表人物，法国 S2M 公司的 H. Haberman 和 L. Liard 相继于 1979 年、1980 年发表了论文，全面介绍了主动磁力轴承的工作原理、性能以及 S2M 公司的应用情况，但没有给

出设计理论和设计方法。1977年，S2M公司开发出了世界上第一台转速为 $2 \sim 4r/min$ 的高速机床电主轴。1981年，S2M公司在Hanover欧洲国际机床博览会上，首次向公众推出了B20/500主轴系统，并在 $35000r/min$ 下进行了钻、铣削的现场演示，其高速、高效、高精度、低功耗的优良性能引起了国际上的关注。1983年，该公司又在第五届欧洲国际机床博览会上展出了系列磁力轴承及其主轴部件。其后该公司与日本精工精机公司合资建立了JMB (Japan Magnetic Bearing. LTD)公司，与美国Kollmorgen公司共建了MBI (Magnetic Bearing. INC)公司。形成了以S2M总公司和JMB、MBI两个子公司为基地的全球生产、销售和研究开发磁力轴承的体系。在日本，1981年，日本的松村文夫等人采用现代控制理论，建立了多输入多输出的径向磁力轴承数学模型。NTN东洋轴承公司于1984年推出了高速铣削磁力轴承主轴、超高速磨削主轴部件，并有已标准化的径向磁力轴承和轴向磁力轴承产品。

这一时期研究的主要特点是：将转子作为刚体处理；忽略陀螺效应的影响；尽管建立了多输入多输出的数学模型，控制系统还是采用单自由度控制，即忽略各自由度之间的耦合；商业化的磁力轴承控制系统均为模拟控制。

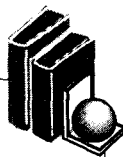
与此同时，国际上磁悬浮技术却达到了理论研究的高峰。1988年6月，在瑞士苏黎士召开了第一届国际磁力轴承学术会议。会议就磁力轴承在空间技术、物理学、机器人、机床、真空泵等方面的理论与工业应用进行了广泛的交流。会议商定以后每两年召开一次国际磁力轴承学术交流会。1990年7月在日本东京大学召开了第二届国际磁力轴承学术会议，与第一次会议相比，这次会议涉及的应用范围更广、参加的国家更多。到目前为止，已召开了九次国际会议，将磁力轴承的理论研究与工业应用推向高潮。

进入20世纪90年代，随着机械向高速度、高精度发展，将转子作为刚体来处理已无法满足精度要求，磁悬浮控制开始转向柔性转子的控制。1990年瑞士联邦理工学院提出了柔性转子研究的问题，日本千叶工业大学进行了柔性转子的研究，将转子进行离散化，建立磁悬浮系统的状态方程，从而进行磁悬浮控制系统的设计，这使得磁力轴承的控制系统越来越复杂。因此，采用滑模控制、模糊控制、非线性控制、 $H^\infty$ 控制、 $\mu$ 控制等先进控制理论进行磁悬浮研究的越来越多。1994年发表的文献总结了几种典型控制规律的特点，在静态特性、响应速度、鲁棒性、抗干扰、刚度等五个指标上比较了各种控制规律的优缺点，并指出了各种控制规律的应用特征。

20世纪90年代计算机技术得到飞速发展，计算机的性能、价格比越来越高，为磁力轴承采用计算机数字控制提供了可能。1990年G. Schweitzer教授提出了数字控制问题，1994年发表的文献探讨了高速磁悬浮转子数字控制问题，1996年在日本召开的第五届国际磁力轴承学术研讨会上，将数控磁力轴承作为一个专题来研究。

磁力轴承在性能不断提高的同时，应用领域逐步扩展。1998年瑞士联邦理工学院的R. Vuillemin和B. Aeschlimann等人提出了磁悬浮硬盘驱动器，对磁悬浮硬盘从结构到控制进行了研究；同年，美国弗吉尼亚大学的M. J. Baloh和P. E. Allaire等人提出了磁悬浮人工心脏泵；还有无传感器的磁力轴承（将传感器与磁力轴承合二为一）；无支承电动机（将电动机与磁力轴承合二为一）等。

在国内，1982年清华大学的张祖明、温诗铸就小钢球的单自由度磁悬浮进行了理论



分析和试验研究。1983年上海微电机研究所采用径向被动、轴向主动的混合型磁悬浮研制了我国第一台全悬浮磁力轴承样机。这些研究由于模型简单、刚度小、负载低,离工业应用还有很大距离。1988年哈尔滨工业大学的陈易新等提出了磁力轴承结构优化设计理论和方法,建立了主动磁力轴承机床主轴控制系统数学模型,这是国内首次对主动磁力轴承全悬浮机床主轴从结构到控制进行的系统研究。同年,国防科技大学的杨泉林采用状态反馈原理探讨了磁悬浮控制的多自由度解耦问题。随后,清华大学、西安交通大学、武汉理工大学、北京工业大学、南京航空航天大学、天津大学、上海大学等相继投入人力和物力进行研究。国防科技大学、西南交通大学用磁悬浮技术研究成功磁悬浮列车。

1998年,上海大学开发了磁力轴承控制器(600W)用于150m<sup>2</sup>制氧透平膨胀机的控制,在实验室获得成功;2000年清华大学与无锡开源机床集团有限公司合作,实现了内圆磨床磁力轴承电主轴的工厂应用实验。结果表明,内圆磨床磁力轴承电主轴系统在主轴转速、回转精度、磨削刚度和稳定性等方面初步满足工厂应用要求。

1991年作者在武汉理工大学获湖北省自然科学基金项目“高速磁力轴承的试验研究”的资助,对磁悬浮技术进行了深入的研究并取得了重大进展。1993年通过了湖北省科委组织的专家鉴定,磁力轴承性能(如承载力、精度、刚度等)处于国内领先水平,接近国际先进水平。

然而,由于磁力轴承研究涉及到机械、电子、计算机、控制、传感等多学科技术,国内的研究从整体上来说还处在理论研究阶段,没有成功的应用实例。到目前为止,国内外还没有一套成熟的理论和设计方法,阻碍了磁力轴承进一步的推广应用。

纵观国内外磁力轴承的应用与发展,21世纪有关磁力轴承的理论研究与发展呈现以下趋势:

1) 从模拟控制转向数字控制。

2) 从PID稳定性控制转向采用现代控制理论、鲁棒控制理论、非线性控制理论、自适应控制理论、智能控制理论的应用研究。

3) 从刚性转子的研究转向柔性转子的研究。

4) 将传感器与轴承进行混合控制,提出了无传感器的磁力轴承。

5) 将驱动与轴承进行混合控制,引入了无支承电动机的概念。

6) 提出零功耗磁力轴承,即超导磁力轴承等。

尽管磁悬浮控制技术得到飞速发展,目前在磁力轴承的研究方面仍存在着以下问题:

1) 将转子作为柔性体进行处理导致了磁力轴承控制系统的复杂化,如何处理转子结构的非线性与控制系统的非线性。

2) 探索更为有效的磁力轴承先进控制理论与方法。

3) 磁力轴承控制系统与转子结构动态特性之间的协调与匹配。

4) 磁力轴承支承特性对转子特性的影响。

5) 磁力轴承结构与控制的耦合、各控制系统之间的耦合。

6) 磁力轴承结构与控制系统的综合优化设计。

7) 磁力轴承系统的设计理论和设计方法,通用的设计软件。

8) 磁力轴承生产的标准化和批量化。

只有很好地解决上述问题，才能有力地推动磁力轴承的工业化应用。

## 1.2 磁力轴承的工作原理与分类

磁力轴承系统按工作原理可分为三类：主动磁力轴承（Active Magnetic Bearing）、被动磁力轴承（Passive Magnetic Bearing）、混合磁力轴承（Hybrid Magnetic Bearing）。

### 1.2.1 主动磁力轴承

主动磁力轴承利用可控电磁力将转轴悬浮起来，它主要由转子、电磁铁、传感器、控制器和功率放大器等组成。电磁铁安装在定子上，转子悬浮在按径向对称放置的电磁铁所产生的磁场中，每个电磁铁上都装有一个或多个传感器，以连续监测转轴的位置变化情况。从传感器中输出的信号，借助于电子控制系统，校正通过电磁铁的电流，从而控制电磁铁的吸引力，使转轴在稳定平衡状态下运转，并达到一定的精度要求。图 1-1 所示为一个主动磁力轴承系统的组成部分及工作原理。传感器检测出转子偏离参考点的位移后，作为控制器的微处理器将检测到的位移转换成控制信号，然后功率放大器将这一控制信号转换成控制电流，控制电流在执行电磁铁中产生磁力从而使转子维持其稳定悬浮位置不变。悬浮系统的刚度、阻尼以及稳定性由控制系统决定。

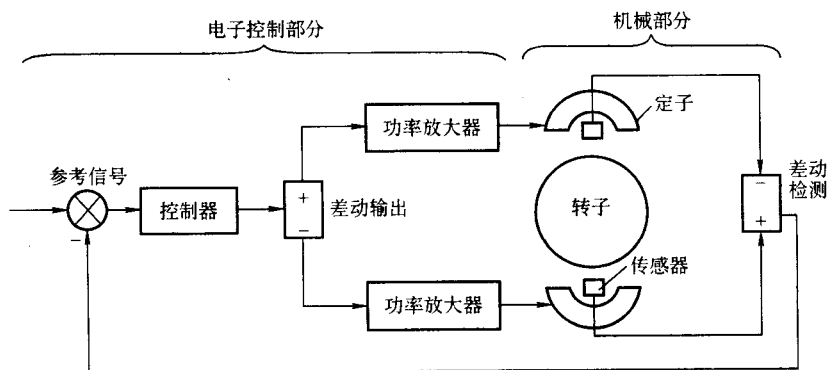


图 1-1 磁力轴承系统的组成部分及工作原理

主动磁力轴承按控制方式的不同可分为电流控制和电压控制，按支承方式的不同可分为径向磁力轴承和轴向磁力轴承。目前，在主动磁力轴承中，应用最广泛的是直流控制型磁力轴承。

主动磁力轴承的机械部分一般由径向轴承和轴向轴承组成，如图 1-2 所示。径向轴承由定子（电磁铁）、转子构成；轴向轴承由定子（电磁铁）和推力盘构成。为克服涡流损耗，定子及转子（轴颈部分）套环均采用冲片叠成。径向轴承的电磁铁类似于电动机的定子结构，磁极数可以是 8 极、16 极或者更多。

由于主动磁力轴承具有转子位置、轴承刚度和阻尼可由控制系统确定等优点，所以在磁悬浮应用领域中，主动磁力轴承得到了最为广泛的应用，而且主动磁力轴承的研究

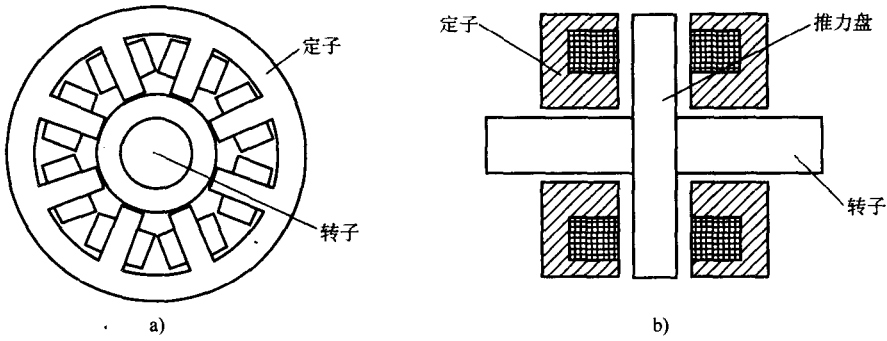
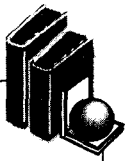


图 1-2 主动磁力轴承组成部分示意图

a) 径向轴承 b) 轴向轴承

一直是磁悬浮技术研究的重点。经过多年的努力，其设计理论和方法已经日趋成熟。

### 1.2.2 被动磁力轴承

被动磁力轴承作为磁力轴承的一种形式，具有自身独特的优势，它体积小、无功耗、结构简单。被动磁力轴承与主动磁力轴承最大的不同在于，前者没有主动电子控制系统，而是利用磁场本身的特性将转轴悬浮起来。从目前来看，在被动磁力轴承中，应用最多的是由永久磁体构成的永磁轴承。永磁轴承又可以分为斥力型和吸力型两种。

被动永磁轴承可同时被用做径向轴承和推力轴承（轴向轴承），两种轴承都可采用吸力型或斥力型。根据磁环的磁化方向及相对位置的不同，永磁轴承有多种磁路结构。但其最基本的结构有两种，如图 1-3 所示。

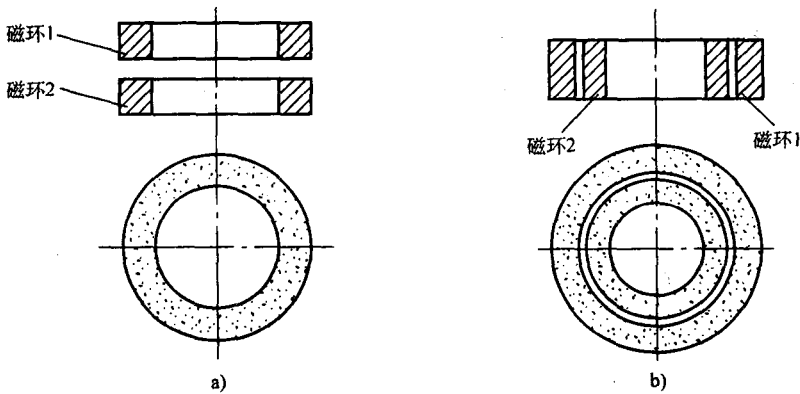


图 1-3 永磁轴承基本结构类型

永磁轴承可以由径向或轴向磁化环构成。刚度和承载力可以通过采用多对磁环叠加的方法来增加。如图 1-3a 所示，当磁环 1 和磁环 2 采用轴向充磁，且极性相同装配时构成吸力型径向轴承，按极性相对装配时则构成斥力型推力轴承。如图 1-3b 所示，当磁环轴向充磁，且按极性相同装配时构成斥力型径向轴承，按极性相对装配时则构成吸力型推力轴承。如果结合径向磁化情况可构成更多的结构形式。

另一类被动磁力轴承建立在吸力基础上，吸力作用在磁化了的软磁部件之间，如图 1-4 所示。当转子部件作径向运动时，吸力效应来自磁阻的变化，所以也称作“磁阻轴承”。这种轴承可以设计成永磁部分不旋转，仅仅软铁部分旋转，使系统具有更好的稳定性。

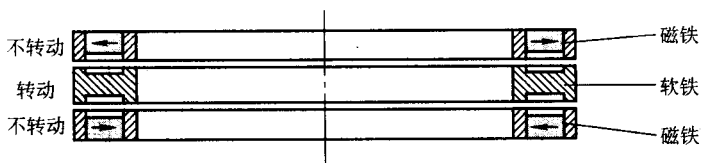


图 1-4 被动径向磁阻轴承

将磁阻轴承和主动电磁铁的稳定作用结合起来，可构成具有最小能耗的磁力轴承系统。

对于永磁轴承，当转轴上作用了一定载荷后，转子和定子磁环间的工作气隙将发生变化，最小工作气隙处的斥力要比最大气隙处的斥力大，从而使转轴径向位置发生变化，趋于平衡状态。如前所述，仅采用永磁轴承是不可能获得稳定平衡的，至少在一个坐标上是不稳定的。因此，对于永磁轴承系统，至少要有一个方向上引入外力（如电磁力、机械力、气动力等）才能实现系统的稳定。

### 1.2.3 混合式磁力轴承

混合式磁力轴承是在主动磁力轴承、被动磁力轴承以及其他一些辅助支承和稳定结构基础上形成的一种组合式磁力轴承系统。它兼顾了主动磁力轴承和被动磁力轴承的综合特点。

混合式磁力轴承是利用永久磁铁产生的磁场取代电磁铁的静态偏置磁场，这不仅可以显著降低功率放大器的功耗，而且可以使电磁铁的安匝数减小一半，缩小磁力轴承的体积，提高承载能力等。图 1-5 所示为一径向永磁偏置混合式磁力轴承的工作原理图。

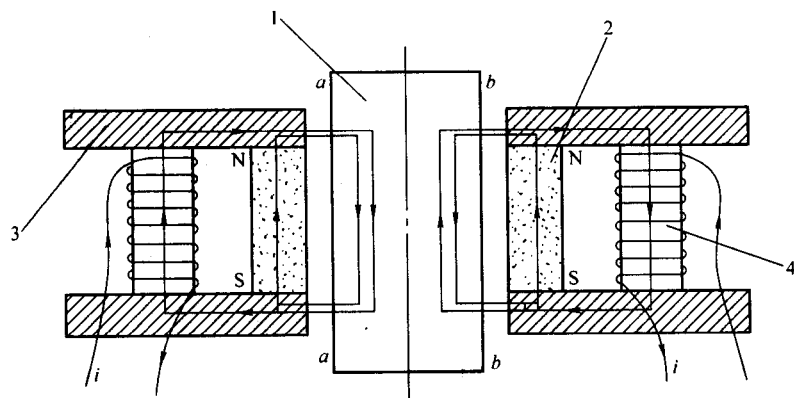
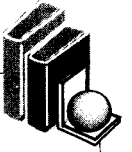


图 1-5 径向永磁偏置混合式磁力轴承的工作原理图

1—转子 2—永久磁铁 3—定子 4—线圈



图中转子1在永久磁铁2产生的静磁场吸力作用下,处于平衡位置(即中间位置),也称为参考位置。根据结构的对称性可知,永久磁铁产生的永久磁通在转子左右气隙 $a-a$ 和 $b-b$ 处是相同的。此时两气隙处对转子产生的吸力相等,即 $F_a = F_b$ 。假设转子受到一个向右的外干扰,转子将偏离参考位置向右运动,则转子左右气隙大小将发生变化,从而使其磁通变化。左边气隙增大,磁通 $\Phi_a$ 减小;右边气隙减小,磁通 $\Phi_b$ 增大。由磁场吸力与磁通的关系可知,此时转子所受吸力 $F_a < F_b$ 。此时,传感器检测出转子偏离参考位置的位移,控制器将这一位移信号变换成控制信号传给功率放大器,功率放大器将该控制信号变化成控制电流 $i$ ,该电流流经电磁铁线圈4使铁心内产生一平衡外来干扰的电磁磁通 $\Phi_d$ ,磁通 $\Phi_d$ 在气隙 $a-a$ 中与原有永磁磁通 $\Phi_a$ 叠加,而在气隙 $b-b$ 中与原有永磁磁通 $\Phi_b$ 相减。

当 $\Phi_a + \Phi_d \geq \Phi_b - \Phi_d$ ,即 $\Phi_d \geq (\Phi_b - \Phi_a) / 2$ 时,两气隙处产生的吸力 $F_a \geq F_b$ ,使得转子重新回到原来的平衡位置。同理,如果转子受到一个向左的外来干扰并向左运动,则可得到相反的结论。混合式磁力轴承的主动控制部分与全主动磁力轴承的工作原理是相同的。

由于通过永久磁铁产生偏置磁场,电磁铁产生控制磁场,因此永磁偏置混合式磁力轴承具有以下优点:

- 1) 采用永久磁铁提供偏置静磁场,电磁铁只是提供平衡负载或外界干扰的控制磁场,可以避免系统因偏置电流所产生的功率损耗,降低了线圈发热。
- 2) 混合式磁力轴承的电磁铁所需的安匝数相对于主动磁力轴承减少许多,有利于缩小磁力轴承的体积,节省材料。这种轴承具有体积小、质量轻、效率高等优点,适合于微型化、体积小的应用场合。

### 1.3 磁力轴承支承技术的特点

由于实现了无机械接触和电子控制,磁力轴承与普通轴承相比有以下特点:

#### 1. 表现在无机械接触方面的特点

1) 由于磁力轴承具有无接触、无润滑以及无磨损等特点,它可以用于真空技术、净室及无菌车间以及腐蚀性介质或非常纯净介质的传输。

2) 完全消除了磨损。因此,磁力轴承寿命实质上是控制电路元器件的寿命,比机械接触应力疲劳寿命要长得多。另外,通过对控制电路的冗余设计或更换,理论上可获得永久性工作寿命,比机械硬件冗余或轨道更换要方便得多。

3) 无需润滑和密封。磁力轴承不用相应的泵、管道、过滤器和密封件,不会因润滑剂而污染环境,特别适用于航空航天产品。

4) 耐环境性强。磁力轴承能在极高或极低的温度( $-253 \sim +450^\circ\text{C}$ )下工作。

5) 发热少、功耗低。磁力轴承仅由磁滞和涡流引起很小的磁损,因而效率高,功耗大约仅为普通轴承的 $1/10$ 。

6) 圆周速度高。磁力轴承转速只受转子材料抗拉强度的限制,因此磁力轴承圆周速度高。圆周速度的不断提高,为设计具有全新结构的大功率机器提供了可能性。如果采



用能承受高应力并同时具有优良的软磁特性的非晶态金属，圆周速度大约可达到 350m/s。

## 2. 表现在控制方面的特点

1) 可对转子位置进行控制。磁力轴承不同于其他轴承，即使转子不在轴承中心也能支承主轴。转轴可在径向和轴向自由移动。

2) 轴承刚度和阻力由控制系统决定，在一定范围内不但可自由设计，而且在运行过程中可控可调，所以轴承动态特性好。

3) 轴承可以自动绕惯性主轴旋转，而不是绕支承的轴线转动，因此消除了质量不平衡引起的附加振动。

4) 转子的控制精度，例如转子的回转精度，主要取决于控制环节中信号的测量精度。普通电感传感器的分辨率大约在 0.01 ~ 0.001mm 之间。

5) 为了对磁力轴承实施控制，需要对转子的全部或部分状态变量进行测量。这些测量信号还可以用于不平衡大小的评估和运行状态的在线监测，以提高系统的可靠性。

6) 磁力轴承不仅可以支承转子、阻尼振动和稳定转子，而且还可以作为激振器使用。对转子施加激振，利用激振信号和响应信号可以识别一些未知的转子特性。

当然，磁力轴承在目前的发展阶段中，也有一些缺点，现归纳如下：

1) 磁力轴承尚处于发展阶段，不能形成批量生产，而且结构复杂，成本较高，因此磁力轴承的价格和普通轴承相比还比较高。但目前已经可以看到磁力轴承大幅度降低成本的前景。

2) 由于磁力轴承技术涉及机械工程、电气工程、计算机等多种学科，基础知识比较复杂，大多数用户不具备此知识，因此这项新技术不大容易被接受。

3) 尽管在一些特例中，磁力轴承在安全性、可靠性、功耗等方面取得了令人满意的结果，但我们仍需要对通用的系统设计方法进行研究。

## 1.4 磁力轴承的工业应用

由于磁力轴承具有以上一系列独特的优越性，所以它有着极其重要的商业价值，在工业中有着广泛的应用前景。

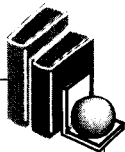
目前，国外磁力轴承主要应用于以下几个方面：

### 1. 军事工业中的应用

磁力轴承在这方面的应用既是最早的也是最成熟的。从 20 世纪 60 年代开始美国麻省理工学院德雷伯实验室就成功地进行了这方面的研究，主要研究对象是飞机、潜艇、导弹和航天飞行器制导系统中元件的磁悬浮。其应用包括坦克的控制、机动导弹发射装置运载工具的定位；火炮、坦克、导弹的发射控制系统，以及潜艇、飞机、火箭的制导等。

在低轨道卫星应用中，航天器的主要动力源是由光电转换器来提供电源。电源储存的能量（在 60min 太阳光照射时）能够满足 30min 无太阳照射时处在黑暗中的应用。因此，要求飞轮能量储存系统功耗尽可能低，美国马里兰大学与 NASA 系统合作，研制出磁悬浮飞轮能量储存系统。转速为 20000r/min，储存能量 15.9W·h，动量矩 54.8kg·m<sup>2</sup>/s，解决





了该问题。

从20世纪70年代起,磁悬浮支承就已经用在卫星姿态控制的动量飞轮上,美国、日本一直在进行这方面的研究工作。

美国 Calnetix 公司在磁力轴承在飞轮中的应用方面有很丰富的经验。在德克萨斯大学的机电中心有一套完整的操作系统以 40000r/min 的速度已经运转了一年。这个系统集成了一个 150kW 的高速 (40000r/min) 永磁电动机和磁力轴承,用来悬浮起一个能量为  $2\text{kW}\cdot\text{h}$  的合成飞轮。发动机舱周围的环境温度范围为  $-40\sim 63^{\circ}\text{C}$ , 而且有  $1.0\text{g}\sim 2.0\text{g}$  的频繁的冲击和振动负载以及偶尔超过  $8\text{g}$  的负载。一个同极径向磁力轴承和一个同极混合式磁力轴承可以控制重达  $61\text{kg}$  的转子在高达  $3\text{g}$  的正常负载下以及 30000r/min 到 40000r/min 的转速下运转。飞轮电池转子的发热在设计中是需要重点考虑的因素, UT-CEM 就选用了低功耗的永磁偏置磁力轴承。

Calnetix 公司也为 NASA 航天站的飞轮能量储存系统 (FESS) 研制了磁力轴承,其运行速度范围为 20000r/min 到 60000r/min,并能提供高于  $3.5\text{kW}\cdot\text{h}$  的能量,目前这种磁力轴承正在设计和制造中。

还有一些敏感部件的无振动支承,例如卫星上的光学装置或微重力实验,专家们都建议采用磁悬浮支承。

## 2. 真空和超净环境中的应用

硅片的生产在技术上是一个很大的挑战:必需在极洁净的环境下处理腐蚀性气体以保证硅片的蚀刻在亚微米的精度上;在经济上它同时也是一个很大的挑战:所有的设备都要求极高的可靠性,以保证能连续不断的运行价值数十亿美元的加工车间。这就是为什么所有世界级的半导体制造公司都承认设备的质量是最重要的。涡轮分子泵 (Turbo Molecular Pumps, TMPs) 在此行业的广泛应用是被公认的,而且它必须经过质量认证。由于磁力轴承无需油润滑,还可以抵抗腐蚀性气体并具有很高的可靠性,所以它很适用于涡轮分子泵。目前,法国 S2M 公司生产的磁力轴承和高速电动机已经有 60000 套用于半导体制造业的涡轮分子泵。

近几年来,由于半导体、光学镀膜、离子蚀刻和液晶显示器件等应用领域迅速发展,其质量要求越来越高,过去常用的有油污染的真空系统难以保证制备这些材料的纯度和质量,有逐渐被淘汰的趋势。这种系统已被无油污染的干式清洁真空泵取代。由于磁力轴承不存在机械磨损,不需润滑,不引起环境污染,必要时,甚至可以使磁力透过容器壁发生作用而将轴承安排在真空容器外面。因此,磁力轴承真空泵成为目前磁悬浮技术最大的工业应用领域。仅日本精工精机公司出口到美国的磁力轴承真空泵价值一年就达 8 亿美元。图 1-6 所示为磁力轴承分子真空泵。

## 3. 机床中的应用

磁力轴承在机床中主要用于超高速铣削、磨削机床。超高速加工一直是机械切削加工的一个发展方向。空气轴承因转子和轴承没有机械接触,使主轴获得高的线速度,但其致命的弱点是支承刚度低、阻尼差、承载能力小,不能满足高速机床主轴承载方面的要求。而磁力轴承允许在更高线速度的情况下,以其高刚度、大负载和良好的减振性弥补了空气轴承的不足。在超高速磨削方面,德国 Kapp 机床制造厂采用了法国 S2M 公司