

○ 王彤宇 著

电磁轴承系统的 动力学分析与参数设计

DYNAMICS ANALYSIS AND PARAMETERS DESIGN
OF ACTIVE MAGNETIC BEARING

 吉林大学出版社

长春理工大学教材建设系列丛书

电磁轴承系统的动力学分析 与参数设计

王彤宇 著

吉林大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁轴承系统的动力学分析与参数设计 / 王彤宇著.

长春: 吉林大学出版社, 2008.9

(长春理工大学教材建设系列丛书)

ISBN 978-7-5601-3941-8

I. 电... II. 王... III. ①电磁轴承—动力学分析—高等学校—教材②电磁轴承—参数—设计—高等学校—教材
IV. TH133.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 139261 号

长春理工大学教材建设系列丛书

书名: 电磁轴承系统的动力学分析与参数设计

作者: 王彤宇 著

责任编辑、责任校对: 邵宇彤

吉林大学出版社出版、发行

开本: 787×1092 毫米 1/16

印张: 5.375 字数: 126 千字

ISBN 978-7-5601-3941-8

版权所有 翻印必究

社址: 长春市明德路 421 号 邮编: 130021

发行部电话: 0431-88499826

网址: <http://www.jlup.com.cn>

E-mail: jlup@mail.jlu.edu.cn

封面设计: 李立嗣

长春市新颖印业有限责任公司印刷

2008 年 10 月第 1 版

2008 年 10 月第 1 次印刷

定价: 28.00 元

前 言

磁轴承是一种利用磁场力将转子无机械接触地悬浮在空间的新型高性能轴承。近百年来，它的发展经历了由无源到有源的过程。

利用磁力使物体处于无接触悬浮状态的设想是人类一个古老的梦。磁轴承的理论研究始于 19 世纪 30 年代，当时的研究工作侧重于使用永磁铁的无源磁轴承。1842 年物理学家恩休从数学上证明了单靠永久磁体是不能使一个铁磁体在所有六个自由度上都保持在自由、稳定的悬浮状态。到了 1939 年，布朗贝克对此作了更进一步的剖析：唯有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。但迄今为止，由抗磁体所产生的磁力实在太小，因而没有工程应用价值。虽然无源磁轴承在理论上有着这样或那样的缺陷，但由于其结构简单、无需控制，在空间制导和导航等领域仍获得了一定的应用。

为了使由铁磁体所得到的力能够应用于稳定的自由悬浮，必须根据物体的悬浮状态连续不断地调节磁场，这可以通过可控电磁铁来实现。这是最早的关于有源磁轴承（或称电磁轴承）的构想。实现这一目标的设想发表于 1937 年，当时在弗吉尼亚大学研究电磁悬浮的比姆斯和霍姆斯，将一些小钢球悬浮起来，并使之高速旋转，用以测量其材料强度，所达到的转速高得惊人（ $18 \times 10^6 \text{ r/min}$ ），在这一转速下旋转时，钢球由于离心力的作用而爆裂。这项有意义的实验，为电磁轴承的发展奠定了基础。

近年来，转子动力学、控制理论、高性能导磁材料和大规模集成电路等工程技术理论的发展，为电磁轴承的小型化、轻量化及长寿命提供了工程条件，而空间技术的飞速发展以及电磁轴承在工业技术领域应用的巨大潜力，推动了电磁轴承研究的不断深入，已经到了实际应用的阶段。

电磁轴承是一种典型的机械电子产品，其研究领域涉及到机械学、转子动力学、电磁学、电子学、控制理论和计算机科学等多学科知识。电磁轴承技术的研究在众多工业技术领域内的应用，标志着对传统支承技术的全新的革命。因此，电磁轴承的发展与研究越来越受到国内外工程界和学术界的广泛关注。

从应用角度看，磁轴承的潜力尚未得到充分发掘；就发展状况而言，其本身也远未达到替代其它轴承的水平。原因除造价昂贵及设计理论尚不成熟外，还在于磁性材料的性能及磁轴承系统的控制方法尚有许多课题亟待研究和解决。

本书共分 5 章：

第一章 绪论。阐述了电磁轴承的工作原理、技术指标、分类以及电磁轴承技术国内外发展现状。

第二章 电磁轴承系统的动力学分析与建模。讨论了由电磁轴承支承的转子系统的基本动力学特性，建立了转子系统的动力学模型及模态分析。

第三章 电磁轴承系统建模及控制策略。建立电磁轴承控制系统数学模型，控制策略优化，分析技术指标与系统结构参数之间的关系。

第四章 控制器参数设计及仿真。讨论电磁轴承系统控制器性能指标设计时主要考虑的问题；阐述了电流控制策略在实际应用方面的优越性；对设计结果进行了仿真实验。

第五章 电磁轴承的结构设计方法。针对 8 磁极结构分析了结构的一般设计原则，提出了电磁轴承结构设计的一般步骤，以径向电磁轴承为例给出了电磁轴承结构设计实例。

本书可供从事工科院校机械设计及理论、机械电子工程等专业师生使用，同时也可供从事电磁轴承研究、设计、制造的工程技术人员学习和参考。

本书在撰写过程中，得到了许多人的关心和帮助，作者在此忠心感谢所有提供关心、帮助、支持老师、同事和参考文献的作者们，书中凝聚着你们的友情和智慧！

由于作者水平有限，书中难免有不妥甚至错误之处，殷切希望读者提出宝贵意见。

作 者

2008 年 8 月

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 电磁轴承的工作原理、特点及分类.....	2
1.2.1 电磁轴承的工作原理.....	2
1.2.2 电磁轴承的特点.....	3
1.2.3 电磁轴承的分类.....	4
1.3 电磁轴承系统的技术指标.....	7
1.4 磁轴承系统在工业领域中的应用及其发展动向.....	7
1.4.1 磁轴承系统在工业领域中的应用.....	7
1.4.2 磁轴承研究的发展动向.....	8
第二章 电磁轴承系统的动力学分析与建模.....	12
2.1 引言	12
2.2 五自由度电磁轴承—转子系统的构成.....	12
2.3 电磁轴承—转子系统动力学分析.....	13
2.3.1 模型及动力学方程.....	13
2.3.2 运动稳定性	17
2.3.3 算例	17
2.3.4 系统的固有振动.....	18
2.4 转子系统的临界转速和转子激励.....	19
2.4.1 静不平衡和动不平衡.....	19
2.4.2 临界转速和转子激励.....	20
2.5 通过共振区域时刚性转子系统的性能分析.....	24
2.5.1 在临界转速区域上转子的位置.....	25
2.5.2 无阻尼转子通过临界转速区时的最小驱动力矩.....	26
2.6 电磁轴承转子系统动力学仿真.....	27
2.6.1 仿真目的	27
2.6.2 有限元模型概述.....	28
2.6.3 仿真	28
第三章 电磁轴承系统建模及控制策略	30
3.1 引言	30
3.2 单自由度电磁轴承系统的构成与建模.....	30
3.2.1 电磁轴承的作用力及其传递函数.....	30
3.2.2 电磁铁线圈的电学方程.....	32
3.3 系统控制方式及控制策略的选择.....	34
3.3.1 系统的控制方式.....	35
3.3.2 系统实现自动平衡的控制方法.....	37
3.3.3 系统控制策略的选择.....	39
3.4 电磁轴承系统的状态描述.....	41

3.5 电磁轴承的技术指标与系统参数的关系.....	41
3.5.1 电磁轴承系统的刚度及其最优线性范围.....	41
3.5.2 电磁轴承系统的阻尼.....	44
3.5.3 电磁轴承系统的最大承载能力.....	45
3.5.4 电磁轴承-转子系统回转精度与控制电流的关系.....	46
第四章 控制器的参数设计及仿真.....	48
4.1 引言.....	48
4.2 系统的品质指标.....	48
4.2.1 静态品质指标.....	49
4.2.2 动态品质指标.....	49
4.3 系统开环极点及校正.....	49
4.3.1 不考虑静态品质指标的校正方法.....	50
4.3.2 Ross-Warren 校正的设计方法.....	50
4.3.3 滞后补偿对静态品质指标的影响.....	51
4.4 功率放大器与位置传感器的选择.....	53
4.4.1 功率放大器的选择.....	53
4.4.2 位置传感器的选择.....	55
4.5 系统仿真.....	59
4.5.1 系统的时域仿真.....	59
4.5.2 系统的频域辅助设计.....	64
第五章 电磁轴承的结构设计方法.....	68
5.1 引言.....	68
5.2 电磁铁的结构及设计原则.....	68
5.2.1 电磁铁的结构.....	68
5.2.2 电磁轴承结构设计的基本原则.....	69
5.3 电磁轴承结构设计的一般步骤.....	69
5.3.1 结构设计的一般步骤.....	69
5.3.2 结构设计实例.....	71
参考文献.....	75

第一章 绪 论

1.1 引言

磁轴承是一种利用磁场力将转子无机械接触地悬浮在空间的新型高性能轴承。近百年来,它的发展经历了由无源到有源的过程。

利用磁力使物体处于无接触悬浮状态的设想是人类一个古老的梦,但实现起来并不容易。磁轴承的理论研究始于 19 世纪 30 年代^[1],当时的研究工作侧重于使用永磁铁的无源磁轴承。1842 年物理学家恩休(Earnshovo)从数学上证明了单靠永久磁体是不能使一个铁磁体在所有六个自由度上都保持在自由、稳定的悬浮状态^[2]。到了 1939 年,布朗贝克(Braunbek)对此作了更进一步的剖析^[3]:唯有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^[4]。但迄今为止,由抗磁体所产生的磁力实在太小,因而没有工程应用价值。虽然无源磁轴承在理论上有着这样或那样的缺陷,但由于其结构简单、无需控制,在空间制导和导航等领域仍获得了一定的应用^{[5][6][7]}。

为了使得由铁磁体所得到的力能够应用于稳定的自由悬浮,必须根据物体的悬浮状态连续不断地调节磁场,这可以通过可控电磁铁来实现。这是最早的关于有源磁轴承(或称电磁轴承)的构想。实现这一目标的设想发表于 1937 年,当时在弗吉尼亚大学研究电磁悬浮的比姆斯(Beams)和霍姆斯(Holmes),将一些小钢球悬浮起来,并使之高速旋转,用以测量其材料强度,所达到的转速高得惊人(18×10^6 r/min),在这一转速下旋转时,钢球由于离心力的作用而爆裂^{[8][9][10]}。这项有意义的实验,为电磁轴承的发展奠定了基础。

近年来,转子动力学、控制理论、高性能导磁材料和大规模集成电路等工程技术理论的发展,为电磁轴承的小型化、轻量化及长寿命提供了工程条件,而空间技术的飞速发展^{[11][12]}以及电磁轴承在工业技术领域应用^{[13][14]}的巨大潜力,推动了电磁轴承研究的不断深入,已经到了实际应用的阶段。

电磁轴承是一种典型的机械电子产品,其研究领域涉及到机械学、转子动力学、电磁学、电子学、控制理论和计算机科学等多学科知识。电磁轴承技术的研究在众多工业技术领域内的应用,标志着对传统支承技术的全新的革命。因此,电磁轴承的发展与研究越来越受到国内外工程界和学术界的广泛关注。

自 1988 年起,国际上每两年举行一届磁轴承国际会议,交流和研讨该领域的最新研究成果。目前研究工作较为活跃并处于领先地位的主要有瑞士联邦工学

院 (ETH)、美国 Maryland 大学和 Verginia 大学、日本东京大学和英国 Glacier、美国 Arcon、MIT、SatCon 等生产厂家。

国内对磁轴承的研究起步于 80 年代初, 西安交通大学、清华大学、国防科技大学、哈尔滨工业大学、天津大学、上海交通大学、长春光学精密机械研究所和上海微电机研究所等单位均开展了相应的研究工作。

从应用角度看, 磁轴承的潜力尚未得到充分发掘; 就发展状况而言, 其本身也远未达到替代其它轴承的水平。原因除造价昂贵及设计理论尚不成熟外, 还在于磁性材料的性能及磁轴承系统的控制方法尚有许多课题亟待研究和解决。

1.2 电磁轴承的工作原理、特点及分类

1.2.1 电磁轴承的工作原理

图 1.2.1 为一个利用电磁力对转子实现无接触、可控磁悬浮的工作原理图。这

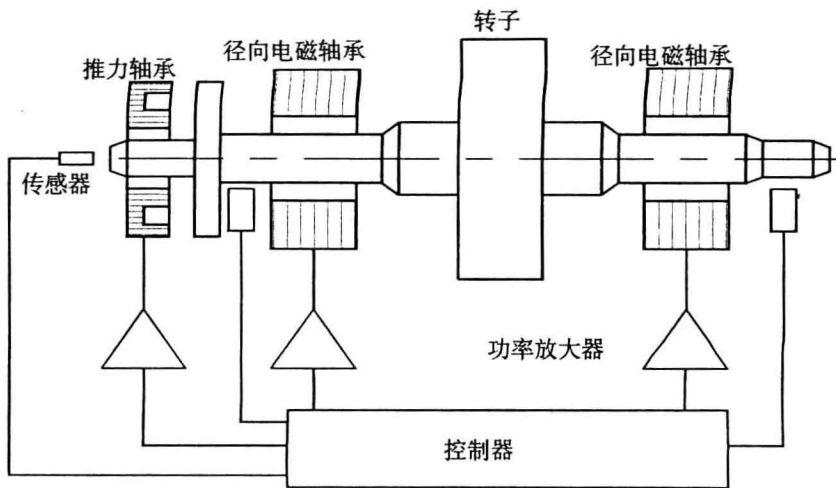


图 1.2.1 五自由度电磁轴承—转子系统

里, 转子一方面受到重力的作用, 另一方面还受到可控电磁力的作用。稳态时, 电磁力和转子重量互相平衡; 在动态受扰时 (包括机械参数和电器参数扰动), 动态电磁力依据转子位置的变化而不断地得到调整, 并校正转子位置, 从而使转子始终稳定地悬浮在平衡位置附近。

该系统实际上由三部分组成:

传感器及信号前置处理单元。转子在任意时刻的位置信号由传感器拾取, 必要时, 这种初始信号还可以经过相应的前置处理后再送往控制器。目前所采用的传感器多为非接触式的电感、电容或电涡流传感器。

调节控制单元。由传感器所拾取的实时信号和参考信号比较后得到误差信号, 根据控制理论或给定的控制策略, 求出转子恢复到初始平衡位置所需要的矫正信

号。

执行单元。该单元由功率放大器和电磁铁组成。矫正信号经过功率放大器放大后，变成足够的电流或电压输出，以驱动电磁铁产生相应的恢复力，迫使转子恢复到平衡位置，从而实现了转子在无接触状态下的稳定悬浮。

对于一个实际的转子系统来说，通常转子重量由两个径向电磁轴承支承。而为了限制转子在轴向的位移，还必须安装一个轴向电磁推力轴承。这样至少需要五个传感器测量转子在水平、垂直和轴向上的线位移。对刚性转子来说，转子空间位置的转角变化可以由位移信号换算得到，而不必单独测量。这些测量信号被送到控制器，经模拟或数字运算后送入放大器产生控制电流或电压，以驱动电磁铁产生维持转子稳定悬浮的电磁力。因而上述系统通常被称为五自由度电磁轴承—转子系统。

1.2.2 电磁轴承的特点

电磁轴承是一种高科技机电一体化产品，具有许多特殊的性能^[15]，正是由于它具有这些特殊的性能，才使得电磁轴承在航空航天、涡轮机械、真空技术以及机床等领域倍受青睐。

1. 无接触、无须润滑、无磨损、低功耗（仅为传统轴承功耗的 $1/20 \sim 1/5$ ），可显著延长使用寿命，降低维护费用。

2. 回转速度高

电磁轴承系统允许转子高速旋转，其转速只受材料强度的限制。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。实际上，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 $350m/s$ ^[16]。由于不需要润滑与密封，而且轴径可以取得比较大，给设计带来了许多优越性，如轴的刚性更大，且对振动不敏感。图 1.2.2 是几种轴承支承下的转速与直径的关系曲线。

3. 承载能力强

电磁轴承单位面积上的承载能力（比载荷）取决于铁磁材料和轴承磁铁的设计，大约为 $20N/cm^2$ ，也可以达到 $40N/cm^2$ 。参考面积是轴承

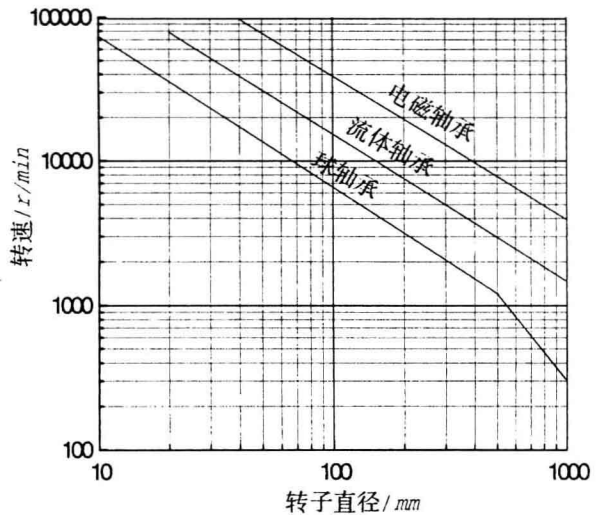


图 1.2.2 不同轴承支承的转子直径与转速的关系

的横截面积，因而电磁轴承的最大承载能力主要是轴承体积的函数。

4. 动态性能优越

电磁轴承的动态性能取决于所采用的控制规律，这样就有可能在物理极限内使刚度和阻尼与轴承的工作环境甚至与运行状态和转速相适应。术语“刚度”和“阻尼”不仅包括传统的静态部分（即弹簧和阻尼常数），而且还包括与频率有关的动刚度。这使得人们有可能利用电磁轴承进行隔振，使转子平稳地通过临界转速区，甚至当系统受到非守恒扰动时稳定转子。

5. 回转精度高（ $\leq 0.05\mu\text{m}$ ）^[17]

转子的回转精度，主要取决于控制环节中信号的测量精度，而且可以通过对控制系统对转子的运行状态进行在线诊断和监控。

6. 可靠性好

为了对电磁轴承实施控制，需要对转子的全部或部分状态变量进行测量。这些测量信号还可用于不平衡大小的评估和运行状况的在线监测，从而提高了系统的可靠性。

7. 具有自动平衡的特性

由于气隙的存在，可使转子绕其自身的惯性轴旋转，从而消除了不平衡力，使机身的振动大大降低。

电磁轴承技术是一项迅速发展的新技术，目前还很难对今后的应用作出明确的评估，也不大容易被接受，其原因在于：

1. 价格昂贵

由于电磁轴承尚处于发展阶段，不能形成批量生产，而且结构复杂，从而导致电磁轴承的价格极高。

2. 设计理论不成熟

在一些电磁轴承应用的特例中，虽然在安全性、可靠性、能耗以及最优设计等方面取得了令人满意的结果。但是，在设计理论方面仍有许多不成熟的地方，急需开展进一步的研究工作。

3. 磁性材料性能及轴承控制方法尚有许多课题亟待研究和解决。

1.2.3 电磁轴承的分类

除了前面已经提到的电磁轴承外，还有许多其它方法可以产生磁场力并将物体无接触地悬浮起来。有些方法虽然不能使物体稳定、自由地悬浮起来，但至少在其中某些自由度上的悬浮是可以实现的。图 1.2.3 给出了对磁力和磁悬浮的大致分类^[18]。

这一分类系统地覆盖了所有已经知道的磁轴承的形式，根据磁力的计算和表示方法可以将磁轴承区分为两大类（参见图 1.2.3）。当然，对于这两大类轴承，

其基本的物理原理，即运动中的电荷产生磁效应的原理是相同的。对于第一种情况，在还不涉及到原子或亚原子量级时，工程中已经找到了一种关于量子物理的极好处理方法—采用磁导率 μ 来描述磁场介质，即 $\mu = \mu_r \mu_0$ ，而 μ_r 则取决于材料，和第二种情况下的洛伦茨力相反，这种情况下所受到的磁力被称为磁阻力。这样一种磁力总是发生在具有不同相对磁导率 μ_r 的介质、亦即铁和空气介质的表面上，力的方向则垂直于不同材料的表面。磁导率的差别越大，所产生的力 f 也越大。对于 $\mu_r \gg 1$ 的铁磁材料来说，磁阻力可能会很大，这就为工业应用创造了基本的前提。

实现悬浮的另一个前提是作用在物体上的磁力切实地使物体保持在稳定的悬浮状态，正如在 1.1 节中所提到的，对于由被动力（在图 1.2.3 中用符号 P 来标明）亦即由永久磁体所组成的系统来说，要在一个刚体的所有自由度上都同时实现稳定是不可能的，因此这就需要采取主动办法即控制环节，以不断使磁场适应刚体的运动。这一举措导致了图 1.2.3 中 A 类主动磁轴承的产生。

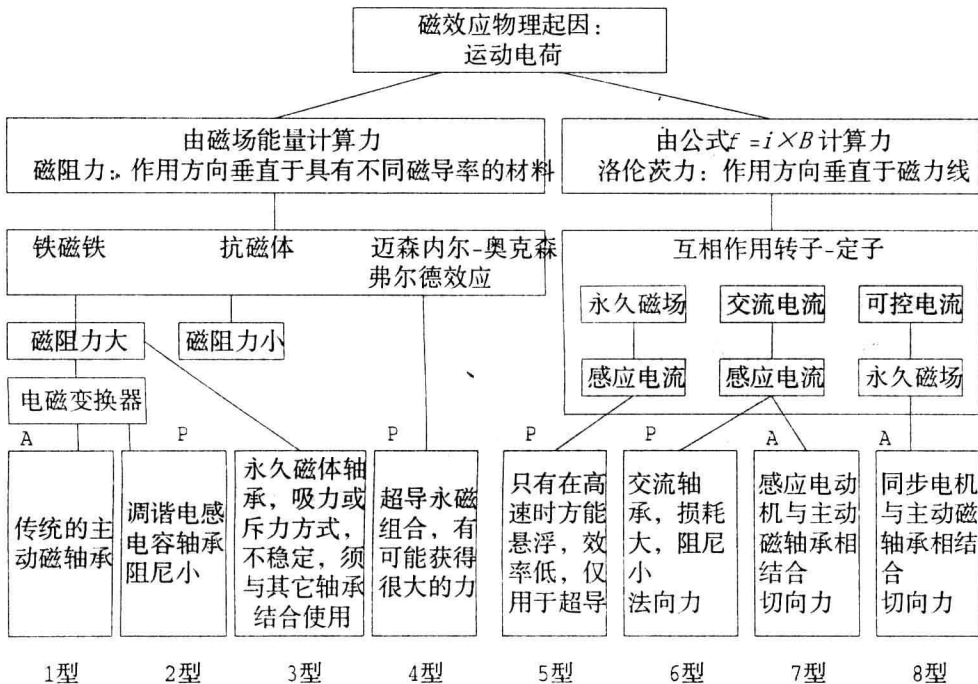


图 1.2.3 磁轴承及磁悬浮的分类

A—仅在主动控制时稳定；P—无控制时即可稳定

主动磁阻力轴承归入 1 型磁轴承中，即便在这一组中也还可以区分为其它不同的形式，比如根据实现主动控制的方法来划分，可分为磁场控制、磁通控制、定子与转子间的距离控制或者在自传感轴承情况下所采用的电感控制等。

2 型轴承，即调谐 LC 电路轴承在一个稍微偏离共振态的 LC 自激电路中具有稳定的刚度特性，这里的 LC 电路是由电磁轴承线圈的电感和一个电容组成，转

子的机械位移会改变电磁铁的电感， LC 电路在共振态附近工作，并按在转子运动离开电磁铁时电路趋于共振的方式调谐，这样就导致了来自交流电压源电流的增加，从而将转子拉回到平衡位置。所产生的力和刚度虽然不是很大，但对于某些仪器设备应用也已经足够了。由于这种方式在无控制环节的情况下即可稳定，因而被称为“被动式”。电源由一个以定常频率工作的交流电源组成。其主要缺陷是不能产生阻尼，亦即缺乏像机械阻尼或主动轴承那样的附加手段，因此这样的系统是趋于不稳定的。

3 型轴承，即无超导体的铁磁性永久磁铁轴承无法在所有自由度上都能保持悬浮物体位置的稳定。然而运用永久磁铁仅在一个方向上支承物体或者是减轻作用在传统轴承上的附和倒是相当可能的，并且已经得到了相当广泛的应用。

4 型轴承取决于抗磁效应 $\mu_r < 1$ 的情况。但是，只有超导体的抗磁效应（迈森内尔—奥克森弗尔德（Meissner-Ochsenfeld）效应）所产生的磁场力足够大，在工程上才有实用价值。目前这项研究虽然尚处于实验室阶段，但今后它在工业上的应用前景是显而易见的。

当定子和转子的相对运动足够快时，就能够感应出很大的涡流，此时可在没有主动控制的情况下形成电动型悬浮（5 型）。在高速运动时所产生的斥力很大，足以将运动件托起。这种轴承在用于高速列车方面已研究得极为透彻，间或也用作转子轴承的。

6 型轴承依赖于交流与感应电流间的相互作用，产生与 5 型轴承一样的被动悬浮，只不过现在由交变磁通代替了相对运动。同样地，在正常传导时，如果考虑功率消耗，相对说来，由涡流所产生的悬浮力仍然太小，效率很低，有时这种轴承被称做交流轴承，其阻尼性能极差^[19]。

交流电流和感应电流之间的相互作用也可以通过主动系统实现，产生了以下两种利用洛伦茨力的磁轴承形式，即 7 型和 8 型。7 型轴承在某些方面和感应电机相似。但是在电机中力作用在圆周方向上并产生驱动力矩；而在轴承中为了支承转子，力不得不作用在径向方向上。在这种情况下，比如说定子，有两种不同的绕组形式，第一种对应于非周期驱动的绕组，从而产生力偶以驱动转子；第二种绕组当电流通过时在径向方向上产生一力分量，通过对电流施以适当的控制，采用气隙传感器进行反馈并与旋转磁场保持同步，即可使转子的悬浮保持稳定。这样一种驱动和磁悬浮的结合业已获得了成功，这样的结合虽然控制复杂，但对于诸如共振阻尼器或特别短的磁轴承-驱动装置等有趣的设计方案说来还是可行的。

最后，8 型轴承，除了转子的感应电流被永久磁化了的转子所代替外，其余方面都和 7 型轴承相似。这样的洛伦茨力主动磁轴承已经由比切塞尔（Bichsel）将

同步电机与主动轴承结合在一起而实现了。

1.3 电磁轴承系统的技术指标

描述电磁轴承系统的技术指标目前来说是一个新的问题。M.Swenn 和 W.Michand 曾对这个问题进行了研究^[20]。从实用的角度看,电磁轴承系统的性能可由下列指标来说明。

1. 承载能力

电磁轴承系统的承载能力是它的基本性能。首先与电磁铁的设计—铁心的材料、体积、线圈的匝数、偏磁电流、气隙的大小以及磁极截面积等因素有关,其次也与电源和控制器的设计有关^[21]。

2. 刚度

电磁轴承的刚度取决于控制器的性能。在采用传统的线性 PID 调节器时,系统具有如图 1.3.1 所示的类似于“浴盆”形状的幅频特性曲线,这条曲线表明了电磁轴承系统在阶跃干扰力作用下的响应变化趋势,说明了系统对转子的定位能力和精度。

3. 阻尼

电磁轴承系统的阻尼也是由控制器提供的,上述“浴盆”曲线的左右两段,实际上是与刚度和阻尼共同有关的幅频特性曲线。

4. 系统的品质指标

电磁轴承系统的品质指标包括静态品质指标和动态品质指标。静态品质指标主要指系统静态时的位置误差;而动态品质指标则指描述系统的频响特性,同时也包含系统在干扰因素下的相对稳定性。

5. 控制器的带宽与系统的绝对稳定性

稳定是电磁轴承系统实现上述指标的必要条件。控制器则是系统稳定的关键部件,它的参数选取范围不仅与前述结构参数有关,也与控制器的带宽有关。

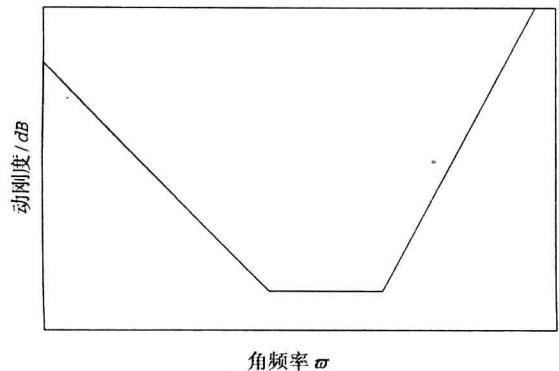


图 1.3.1

1.4 磁轴承系统在工业领域中的应用及其发展动向

1.4.1 磁轴承系统在工业领域中的应用

磁轴承的各种优越性能使其在下列领域中发挥着重要作用。

1. 真空及超净室技术

磁轴承不存在任何机械磨损,因而也不会引起相关的污染,必要时,甚至可以使磁场力透过容器壁发生作用而将轴承安装在真空容器外面。

2. 机床

磁轴承的主要优点是在相对高承载能力的条件下能够保持高精度和高转速。

3. 透平机械和离心机

磁轴承的优点是能够对振动予以控制和阻尼，并获得预定的动态性能。另外，由于不用润滑剂，因此也就不再需要密封，可以进一步简化结构。

图 1.4.1 至图 1.4.4 展现的实例说明了磁轴承广阔的应用前景^{[22]-[25]}。

1.4.2 磁轴承研究的发展动向

从应用角度看，磁轴承的潜力尚未得到充分发掘。就发展状况而言，其本身也远未达到替代其它轴承的水平。原因除造价昂贵及设计理论尚不成熟外，还在于磁性材料的性能及轴承系统的控制方面尚有许多课题亟待研究和解决。下面将近年来国内外工程界和学术界研究热点问题归纳如下：

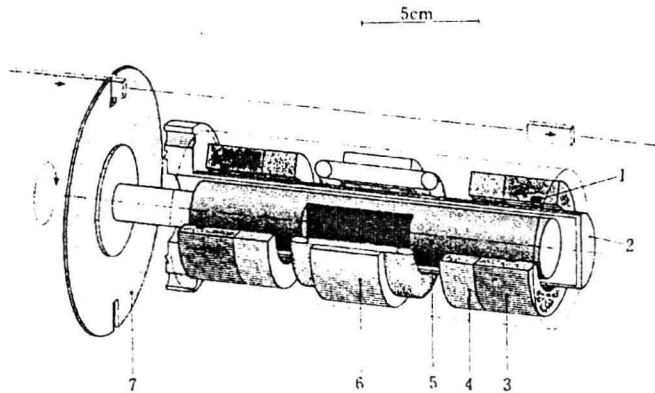


图 1.4.1 分子束斩波器 (KfA Jülich) ^[22]

- 1-测量径向位移的传感器系统；2-带连接法兰的真空室；3-环行磁体（轴向磁化）；
4-主动轴承；5-轴；6-磁阻同步电机；7-调制盘

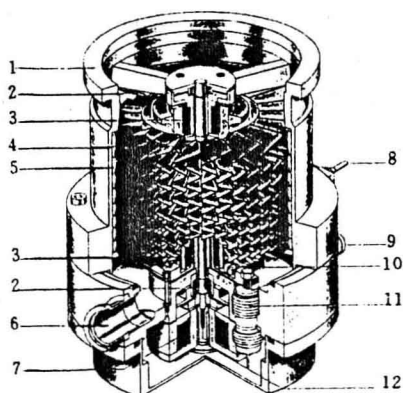


图 1.4.2 由 Pfeiffer AG Wetzlar 制造的采用主动磁轴承和永久磁铁的透平分子泵，其它一些公司亦生产完全由主动磁轴承的透平分子泵；系磁轴承在工业中的最早应用^[23]

1-高真空端；2-辅助轴承；3-永磁轴承；4-转子；5-定子；6-预真空连接管；7-轴向磁轴承；8-安全阀；9-电器接头；10-径向振动传感器；11-阻尼元件；12-轴向传感器

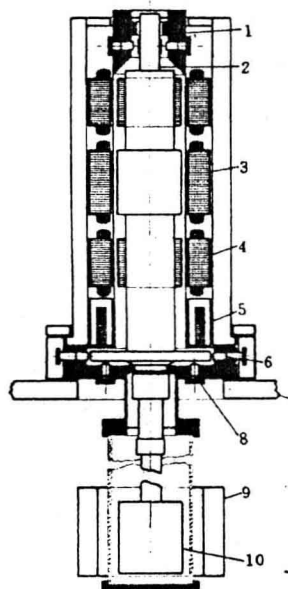


图 1.4.3 晶体取向生长离心机，用于斯图加特的麦克斯-普兰克固态物理研究所^[24]

1-真空腔；2-转子；3-电机；4-径向轴承；5-轴向轴承；6-径向传感器；7-支座；8-轴向传感器；9-加热炉；10-坩埚

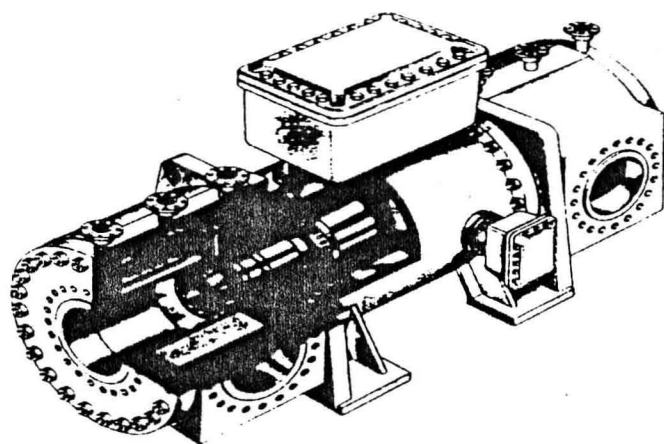


图 1.4.4 由 Sulzer/ACEC 磁轴承有限公司制造的管道压缩机 MOPICO，功率 6MW，转速 9000 r/min

1. 新材料的研究

铁磁材料的特性对磁轴承的性能产生很大影响。例如，磁轴承的转速受铁磁材料离心力限制，电磁力的大小和线性度受材料饱和磁密和磁滞特性的限制等。此外，磁轴承的功耗还受到铁磁材料涡流损耗的影响。为减少涡流损耗，在制造轴径时需将铁磁材料制成薄片后叠在一起与主轴压配，普通材料会因残余应力而使转速受到限制。

新材料的研制成功无疑将使磁轴承突破这些限制。如近年来发展起来的一种用粉末制成的铁磁材料，能够使涡流损耗大大降低。还有些新型材料具有很高的饱和磁密和机械强度，线速度可达 300m/s ^[17]，特别适用于高速转子。此外，近年来得到迅速发展的稀土永磁材料也因结构轻巧、能耗低而极具应用前途。有专家因此预言，未来磁轴承的发展趋势将是以永磁铁为偏置的被动与主动混合控制模式。可以预计，这些新材料的推广普及将会有效减小磁轴承的体积和能耗，而大大提高承载能力。

目前，超导磁轴承的研究也引起广泛关注。其突出优点在于利用超导材料可直接实现稳定悬浮，而不必施加主动控制。近年来，氧化物超导体的发现对超导磁轴承的研究起到重要的推动作用。但到目前为止，超导磁轴承还处在实验阶段，尚无实用的高温超导材料，超导磁轴承在工作时仍需充液氮来降温。此外，单纯依靠超导体的磁轴承在承载能力和刚度方面尚不能与电磁铁磁轴承相比。因此，目前研究的系统都是将超导磁轴承与其它类型轴承混合使用。

2. 磁轴承系统的主动控制研究

1) 磁轴承系统的数字控制

数字控制具有集成度高、控制性能好的优点，正在逐步替代传统的模拟控制而成为当今磁轴承发展的主流。早期实现磁轴承数字控制的硬件是普通计算机，后来逐渐被专用处理器替代。目前应用最普遍的是数字信号处理器(DSP)，这种配备高速数据采集及多指令处理功能的处理器将高速运算能力与微机操作系统结合在一起，运算速度远高于普通计算机，还可以采用多处理器结构以提高系统的容错能力。

数字控制所面临的主要问题是实时性。对于磁轴承这类开环不稳定系统，控制器要具有相位超前的功能，频带通常要达到 1kHz 以上。影响相位的因素主要是 A/D 和 D/A 的转换时间以及控制参数的计算时间。计算量过大，采样频率就会相应降低，这就使一些复杂算法的应用受到限制。然而，随着近年来微处理器技术的飞速发展，不久的将来，实时性问题将不再是制约磁轴承发展的障碍。

2) 柔性转子—磁轴承系统的主动控制

利用磁轴承刚度、阻尼特性可调的特点来优化系统的动态特性是转子主动控