



磁力机械学

赵韩 田杰 著


Magnet Mechanics



磁力机械学

Magnet Mechanics

赵韩 田杰 著

 高等教育出版社

内容简介

本书在介绍了电磁场、磁性材料基本理论的基础上,提出了磁力机械设计的基本思想。磁力机械设计中,电磁场分布、电磁力的计算是重要的设计过程。书中重点介绍了常用的电磁场分析方法,即磁路法、积分方程法、有限元法、边界元与边界点法。对典型磁力机械的设计方法与步骤进行了介绍。

本书可以作为磁力机械学研究的参考书和研究生教材,也可以供从事磁力机械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

磁力机械学/赵韩,田杰著. —北京:高等教育出版社, 2009. 6

ISBN 978 - 7 - 04 - 025609 - 3

I. 磁… II. ①赵…②田… III. 磁学 - 应用 - 机械学 IV. TH112

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 038482 号

策划编辑 刘占伟 责任编辑 薛立华 封面设计 刘晓翔
责任绘图 尹 莉 版式设计 王 莹 责任校对 殷 然
责任印制 韩 刚

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	中原出版传媒投资控股集团 北京汇林印务有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787 × 1092 1/16	版 次	2009 年 6 月第 1 版
印 张	11.5	印 次	2009 年 6 月第 1 次印刷
字 数	220 000	定 价	30.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 25609-00

前 言

磁力具有很多优点,如易于控制、节约能源、减少污染、结构简单、加工容易等,越来越受到人们的重视。在由运动电荷磁效应产生的磁阻力与洛伦兹力的各类工程应用中,除发电机外还有一类以这两种力作为驱动源实现能量转换、动力执行、运动传递的机器与机构,目前在应用领域内广泛称为磁力机械。磁力机械在节能、环保、结构及可控性诸方面优点独特,其理论与应用研究日益受到重视,最明显的表现就是国内外发明的磁力机械越来越多,如磁力吸盘、磁力弹簧、磁力减振器、磁力齿轮、磁力联轴器、磁悬浮轴承、磁力变扭器、电磁离合器和制动器、飞轮电池、人工心脏瓣膜、汽车尾气净化装置等。

虽然磁力机械的发明不断增多,应用持续大幅度增加,但在其设计方面却比较落后,基本上还处于较原始的试凑法,即通过反复实验来设计产品。究其原因,一方面是因为从事电磁研究的人员对磁力机械不了解,而从事机械研究的人员对电磁专业也不了解并深感头痛,由此在两学科的交叉处形成了一定的空缺;另一方面是由于电磁研究涉及的理论较深,且不很成熟,给研究带来了非常大的难度。

机械学是一门古老的学科,但因其涉及的研究领域不断扩大,始终焕发着活力。磁力机械的种类已较多,涉及的理论和应用面也较广,有必要建立“磁力机械学”这一新的机械学的分支交叉学科以及磁力机械的设计理论与方法,为工程设计提供必要的设计依据和参考资料,减少设计的盲目性,提高磁力机械设计的效率和质量,促进这一领域的研究进一步深入以及应用的进一步拓宽。

十几年来,著者主持完成了多项与磁力机械相关的基金项目 and 与企业合作的项目,本书总结了其中的部分研究成果。这些课题主要有:微型稀土永磁齿轮的设计理论与实验研究(国家教委优秀青年教师基金项目,编号:950204A2);小型及微型稀土永磁齿轮的设计理论与实验研究(国家自然科学基金项目,编号:950208A2);磁力机械学系统与理论的研究(国家自然科学基金项目,编号:59975027);电动汽车用飞轮电池的关键技术研究(教育部博士点基金项目,编号:010208B2);考虑多场耦合效应的磁力机械设计 with 实验研究(国家自然科学基金项目,编号:50475070);管绞机主轴磁性支承的开发研究(企业合作研究开发项目)。

合肥工业大学的杨红博士后、王勇博士、杨志轶博士分别参与了上述项目的研究工作。在此表示衷心的感谢。

由于磁力机械的理论与应用研究方兴未艾,也因著者的水平、经验和时间有限,书中的不妥之处敬请专家、学者和广大学者批评指正。

著者
2008年5月

主要符号表

I	电流, A
q	电荷, 电荷量, C
φ	电位, V
U	电压, V
E	电场强度, V/m
D	电位移, C/m ²
ε_0	真空的介电常数, F/m
ε_r	相对介电常数
J, δ	电流密度, A/m ²
K	面电流密度, A/m
U	磁位差, A
H	磁场强度, A/m
B	磁感应强度, Wb/m ²
Φ	磁通, Wb
μ	磁导率, H/m
μ_0	真空磁导率, H/m
μ_r	相对磁导率
M	磁化强度, A/m
m	磁偶极矩, A/m ²
ρ	电阻率, $\Omega \cdot m$
R_m	磁阻, 1/H
G	磁导, H
A	矢量磁位, Wb/m
χ	磁化率
j, H_c	内禀矫顽力, A/m

目 录

第一章 绪论	1
1.1 磁学理论与应用的发展历史	2
1.1.1 磁学理论的发展历史	2
1.1.2 磁学的现代应用	3
1.2 磁力机械的应用与磁力机械学的研究现状	3
1.3 典型磁力机械简介	4
参考文献	11
第二章 电磁场的基本理论	13
2.1 静电场及恒定电流	13
2.1.1 静电场	13
2.1.2 恒定电流	15
2.2 磁感应强度 B 和磁场强度 H	18
2.3 毕奥 - 萨伐定律	19
2.4 磁场的高斯定理和安培环路定律	20
2.5 标量磁位及拉普拉斯方程	23
2.6 矢量磁位及泊松方程	24
参考文献	26
第三章 磁性材料及其特性	27
3.1 物质的磁性	27
3.2 磁矩与磁化强度	28
3.3 磁性材料的磁化过程	30

3.3.1	技术磁化	30
3.3.2	动态磁化过程	31
3.4	软磁材料与永磁材料	33
3.4.1	软磁材料	33
3.4.2	永磁材料	36
	参考文献	40
第四章	磁力机械设计	43
4.1	磁力机械设计的基本思想	43
4.2	磁力机械的类型分析	44
4.3	磁力机械设计的基本内容	46
4.4	磁力机械的应用特点	47
4.5	磁力机械设计中的电磁计算与分析方法	48
4.5.1	磁路法	48
4.5.2	图解法	49
4.5.3	实验法	49
4.5.4	解析法和近似解析法	49
4.5.5	数值计算法	50
4.6	磁力机械的传力计算	51
4.6.1	载流导体在磁场中受到的力	51
4.6.2	磁质在磁场中受到的力	51
4.6.3	两种不同媒质分界面上的电磁力	52
	参考文献	55
第五章	磁路计算及其在磁力机械中的应用	57
5.1	磁路及其定律	57
5.1.1	磁路的基本概念	57
5.1.2	磁路基本定律	59
5.2	气隙磁导的计算	62
5.3	磁路计算及应用	69
5.3.1	线性磁路的计算	69
5.3.2	非线性磁路的计算	71
5.3.3	永磁磁路计算	73
	参考文献	77

第六章 用积分方程法求解磁力机械电磁场	79
6.1 磁场积分方程法的基础理论	79
6.2 磁场积分方程法的建模与迭代算法	82
6.2.1 平行平面场	82
6.2.2 轴对称场	83
6.2.3 三维场	84
6.3 磁场积分方程法在磁力机械中的应用	85
6.3.1 稀土永磁齿轮传动机构的物理模型	85
6.3.2 磁场积分法在永磁齿轮传动机构场分析中的应用	87
6.3.3 稀土永磁齿轮传动机构的电磁计算程序设计	89
6.3.4 稀土永磁齿轮传动机构磁场计算结果	90
参考文献	91
第七章 有限元法求解磁力机械电磁场	93
7.1 概述	93
7.2 泛函与条件变分问题	94
7.3 模型生成	97
7.4 采用四边形单元剖分时的有限元法	97
7.4.1 标准矩形单元的插值函数	98
7.4.2 变分问题的离散化	99
7.4.3 四节点任意四边形等参数单元	103
7.5 边界条件和周期性条件的处理	107
7.5.1 齐次强加边界条件	108
7.5.2 非齐次强加边界条件	108
7.5.3 对称性条件的处理	110
7.5.4 周期性条件的处理	111
7.6 磁性联轴器的设计	112
7.6.1 径向磁性联轴器的有限元模型及求解	112
7.6.2 磁性联轴器的力矩特性	120
参考文献	122
第八章 边界元法及边界点法	125
8.1 边界元方法基本理论	125
8.1.1 边界积分方程	125

8.1.2	数值离散	126
8.1.3	方程求解及待解量的计算	129
8.2	边界点方法基本理论	130
8.2.1	边界点法方程的建立及边界量的解算	130
8.2.2	计算任意点的场量	131
8.3	边界点法建模的几个边界问题的处理	132
8.3.1	平面域外问题的处理	132
8.3.2	多媒质的耦合问题	133
8.4	边界点法的应用实例	135
	参考文献	137
第九章	典型磁力机械的设计	139
9.1	电磁离合器的设计	139
9.1.1	电磁离合器的原理和结构	139
9.1.2	摩擦片式电磁离合器的设计	142
9.2	磁力轴承系统的设计	147
9.2.1	径向永磁轴承设计	148
9.2.2	轴向电磁轴承设计	150
9.2.3	转轴设计	154
9.3	大尺寸磁悬浮支承的设计	155
9.3.1	磁力悬浮支承控制系统	156
9.3.2	磁悬浮支承结构设计	157
9.3.3	磁悬浮支承结构计算结果	160
9.4	飞轮电池储能装置设计	161
9.4.1	飞轮转子设计	162
9.4.2	电机选择与能量转换	167
9.4.3	飞轮电池主体结构的设计过程	170
	参考文献	171

第一章 绪 论

磁力机械是一类使用永磁或电磁的机械装置,有着悠久的历史,但是直到稀土永磁出现后才得以真正形成一个新的应用领域。与传统的机械相比,磁力机械有一些独特的性质,其理论和设计等方面也有很大的不同,涉及多个学科门类。传统的机械学和机械设计等理论与方法,已不能满足对磁力机械的研究,有必要建立一种新的交叉学科——磁力机械学来研究越来越多出现的磁力机械。因此,本书将磁力机械学定义为是一门涉及机械学、磁学、电磁学、控制、材料等多个学科领域,主要用于研究磁力机械理论与设计方法的一门新的科学。

众所周知,电磁相互作用是自然界四大相互作用力之一。一个稳定的电流在导线中流过,能在导线周围产生一个静磁场,但需不断消耗电能。于是人们尽量用永磁体代替电流在空间形成一个静磁场。由于磁源科学的进步,永磁材料的性能不断提高,目前永磁材料发展到第三代——NdFeB 稀土永磁材料,它的矫顽力、剩磁、最大磁能积都得到了很大的提高,同时制造工艺日益成熟,被广泛应用在机械领域。

磁力具有很多优点,如易于控制、节约能源、减少污染、结构简单、加工容易等,越来越受到人们的重视,在机电装备中的应用也越来越广泛。磁力分电磁和永磁两大类,相应的,磁力机械分电磁磁力机械和永磁磁力机械两大类。磁力机械包括磁力吸盘、磁力弹簧、磁力减振器、磁力齿轮、磁力联轴器、磁悬浮轴承、磁力变扭器、电磁离合器和制动器、飞轮电池、人工心脏瓣膜、汽车尾气净化装置等。稀土永磁在这一领域的应用还在开拓与发展之中,前景十分广阔。磁力机械的种类是多种多样的,但其原理是相同的,即利用磁体同极性的排斥力或异极性的吸引力。

下面将部分磁力机械的发展、工作原理和应用作一简单介绍。

1.1 磁学理论与应用的发展历史

1.1.1 磁学理论的发展历史

人类认识磁现象和应用磁性材料的历史已很悠久。我国春秋时期的《管子·地数》(公元前六百多年)所述“上有慈石者,其下有铜金”,是最早关于磁石的记载。公元前约 585 年,古希腊哲学家 Thales 也记载了摩擦生电和磁石吸铁的磁现象;而东汉王充的《论衡·是应篇》(公元 82 年左右)中“司南之杓,投之于地,其柢指南”这一关于司南(指南针的前身,如图 1-1 所示)的描述,表明我国早在汉代就已对磁现象加以利用,所发明的指南针是我国人民对人类进步所做的巨大贡献之一。

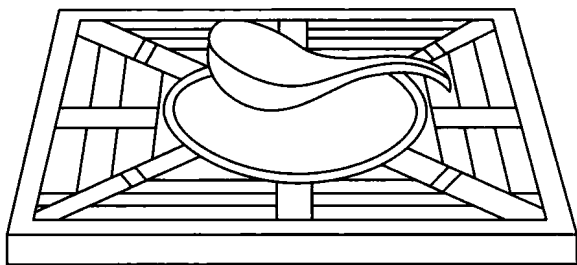


图 1-1 我国古代发明的司南

英国人在 1269 年前后描述了磁石的 N 极和 S 极,验证了同性相吸和异性相斥的现象。16 世纪后,人们开始从实验和理论上对电和磁作系统研究。1785 年,法国人库仑通过扭秤实验研究电荷间的作用力而发现的库仑定律开辟了近代电磁理论研究的新纪元。1820 年初,丹麦科学家奥斯特从实验中发现了电流磁效应,成为电磁学发展史的又一里程碑。此后,毕奥-萨伐、拉普拉斯定律给出了电流磁效应的定量描述,安培从奥斯特的实验中总结了右手螺旋法则和安培定律,深化了人们对电流磁效应的认识。与此同时,电工学中最重要基本定律欧姆定律和基尔霍夫定律相继发表。英国的法拉第和美国的亨利分别于 1831 年和 1830 年各自独立地发现了电磁感应现象,法拉第根据电磁感应原理发明了世界上第一台直流发电机,并提出场的观念和力线概念。俄国人楞次给出了确定感应电流方向的楞次定律。电磁感应成为电磁学史上的重大发现。

英国物理学家麦克斯韦通过假说将法拉第的力线观念用数学公式表达,形成了自己的电磁理论,于 1865 年发表,并被后来的赫兹实验所验证。该理论经后人整理而成的麦克斯韦电磁场方程组,标志着经典电磁学理论体系的建立。洛伦兹提出电子论将麦克斯韦电磁理论应用到微观领域,爱因斯坦提出狭义相对论证明麦克斯韦方程组满

足洛伦兹变换,完善了经典电磁学理论体系。

从麦克斯韦电磁场理论建立至今,磁学已成为物理、电气、材料、化学、冶金和其他工程学科领域内的学者和工程师共同研究的一个开放领域。磁性物理学对材料微观理化结构和相互作用机理的阐述,改变了磁性材料的设计和加工方式;工程师的实际经验结合磁场设计理论和分析方法的不断完善,使高性能的磁性装置的设计制造成为可能;新技术、新材料、新工艺在磁领域的应用,尤其是近代计算机技术、计算方法和实验研究技术的应用,促进了电磁理论,特别是计算电磁学理论研究的深入和磁应用领域的空前发展。

1.1.2 磁学的现代应用

20世纪中叶以来,伴随着计算机存储器使用的铁氧体磁心和磁记录材料的出现和需求量的增加,以及以磁放大器为代表的非线性磁性应用的相继问世,磁性应用技术得到迅猛发展。磁的应用从传统的强电应用领域扩展到计算机与信息技术、测试与自动控制、传动与动力系统等领域。各类磁性功率器件不断增多;利用磁性材料的各种磁效应(磁致伸缩效应、热磁效应、磁光效应和电磁效应等),人们开发了多种磁性传感器和其他测量器件;磁性材料作为信息产品的基础材料应用于各类存储设备;磁性设备和装置作为动力和控制元件(各类电动机、变压器、电感、传感器、继电器、电磁铁、开关电源和磁无源器件等)广泛应用于工业动力系统和自动控制系统中。如今,磁的应用已渗透到人们生产和生活的方方面面,严格区分磁应用的类型、尽数磁器件的所有应用实例已是件困难的事。

在工程磁学应用研究中,与磁的一些前沿应用领域同样值得关注的是磁学与相关学科的学科交叉的理论与应用发展。目前广泛应用的磁力机械,就是引人关注的一个磁应用领域。

1.2 磁力机械的应用与磁力机械学的研究现状

利用磁能产生的力或力矩,驱动或控制置于磁场中的执行构件,使其按确定的运动或动力要求动作的机器或机构,称为磁力机械。磁力作为机械设备传动部件或执行器的动力源时,设备一般具有易于控制、节能环保、结构简单等优点,因此近年来这方面的开发和应用越来越受重视。目前采用永磁、电磁或永磁与电磁混合结构的各类磁力机械已有很多,在机械、化工、汽车、土木、电力、国防和核工业等很多工程领域得到广泛应用。

从上述磁力机械研究和应用的现状看,在未来一段时间内,磁力机械将会在以下几方面得到发展。

1) 磁力机械的应用领域将会不断加大。目前磁力机械的应用情况已显现了这种发展趋势。新型磁力机械将会不断被开发利用,尤其在一些常规机械不能胜任的极端工况下,磁力机械的应用将成为有效的解决方案。

2) 考虑耦合和非线性的磁力机械系统建模方法,将使设计和分析模型更趋合理。一些磁力机械中考虑位移场、温度场和电磁场等多场耦合效应的数学模型能更真实地反映系统工作过程的动态行为,运用非线性理论和现代数值模拟技术对模型求解得出的系统结构和控制参数将更趋合理和精确,系统动力学品质相应地会得到提高。

3) 相关学科理论的发展将使磁力机械系统设计计算的精度和效率不断提高。计算电磁学的发展将带动磁力机械学磁场设计理论和方法的完善,设计中一些长期使用的试凑方法和经验参数将被精确的计算方法和数据取代。一些现代控制方法的不断成熟,将提高磁力机械控制系统的综合性能。系统结构的实体建模、结构和控制参数的仿真与优化、多物理场场量的数值模拟与分析等相关应用软件已经并将继续提高磁力机械设计的效率和水平。

4) 工程领域内的技术进步,将克服目前一些磁力机械中存在的制造困难和性价比低等问题。磁应用领域的新材料、新工艺、新技术将使复杂结构的磁力机械的加工制造成为可能,性价比得到提高,从而也为磁力机械的开发和应用拓宽空间。

从一些典型磁力机械的设计生产过程看,目前我国磁力应用的数量虽不断增多,但总体说来由于研究基础仍较薄弱、涉及学科交叉等客观原因而使磁力机械并没有形成较系统成熟的设计理论和方法,而长期以来国外在相关产品上可供借鉴的资料也非常少见,这样的现状给磁力机械的深入研究和提高应用水平带来了一定难度。建立来源于机械学和电磁学等学科理论而相对独立的磁力机械系统理论体系,对磁力机械的理论和应用研究是必要的。在这方面作者做了一些基础工作,提出的建立“磁力机械学”这一全新的交叉学科和体系结构的思想得到国内同行认可,并在国家自然科学基金和一些企业合作项目的支持下,通过总结已有理论和应用研究基础、借鉴本领域内新的研究成果、引入新的理论分析方法,对磁力机械设计理论和方法进行了较深入和系统的研究和探讨,初步形成了“磁力机械学”的理论体系。国内有关研究单位在一些新型磁力机械的研究和开发中也做了卓有成效的工作,积累了许多可行的设计方法。相信随着电磁学和机械学等相关领域内科技人员的共同努力,磁力机械学的设计方法将会不断得以完善,磁力机械设计的效率和质量将会得到提高。

1.3 典型磁力机械简介

1. 磁力吸盘

磁力吸盘,是一种装卸简便、节能、多功能的高效能夹具。实践证明,磁力吸盘具有结构简单、设计合理、吸力大而均匀、使用方便、适用范围广泛、加工精度高、维修方

便、使用寿命长等特点,广泛应用于各类平面磨床、工具磨床、铣床、刨床的材料加工;此外采用永磁磁力吸盘吸持工件,可进行吊运、镗削、钻孔或划线等作业。

目前应用的吸盘种类繁多,但大都是电磁式的,由于制作上的原因,使电磁磁力吸盘上的吸力较小而且不均匀,工作时潜伏着一定的危险性。随着永磁材料的进展及磁路设计上的进步,近年来为了节省能源、简化结构、消除噪声等需要,国内外都在积极寻求采用永磁磁力吸盘以代替使用半个多世纪的电磁磁力吸盘。

以平面磨床上的永磁磁力吸盘为例,下面说明磁力吸盘的工作原理。

通过永磁体做成的吸盘,经过动盘和静盘间相对移动,从而使吸盘达到两种状态:当动盘导磁条与静盘导磁条相对时是吸着状态,即吸盘处于工作状态,此时磁感应线从吸盘表面出来,经过铁质工件而回到吸盘内部,这样就把工件牢牢吸住,以便进行加工(图 1-2);当动盘与静盘错开一定位置,使动盘导磁条与静盘导磁条两个相搭接时,吸盘处于非工作状态,此时磁感应线还未达到吸盘表面时就在吸盘内部组成闭合回路,没有磁感应线从吸盘表面出来,故对工件不产生吸力,此时可取下工件(图 1-3)。

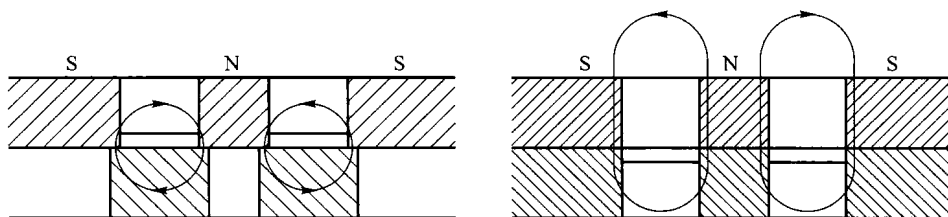


图 1-2 吸着状态

图 1-3 释放状态

2. 磁力轴承

磁力轴承是一种新型的高性能轴承,它是利用磁场力不使转轴产生机械摩擦,而又无润滑地悬浮在空间的非接触轴承。20 世纪 60 年代中期,法国、日本相继开始研制磁力轴承,1972 年法国将第一个磁力轴承用于卫星导向器飞轮支承上。到 20 世纪 70 年代末和 80 年代初,由于磁力轴承具有一系列独特的性能,就已逐步推广到火箭发动机、陀螺仪、太空实验室机器人、真空泵、压缩机、鼓风机、破碎机、透平机、发电机、离心泵和机床等各种工业产品上。1983 年在巴黎举行的第五届欧洲机床展览会上,法国 SZM 公司展出了磁力轴承及其主轴部件,这种主轴部件已在一些机床上得到应用,并取得了显著的效果。近几年来,日本已经使磁力轴承实用化,并在逐步扩大应用领域。在国内磁力轴承的研究也有一些进展,并取得了一些初步成果,多用于仪表和惯性器件及机床主轴上。

(1) 磁力轴承工作原理

磁力轴承主要由两部分组成:轴承本身及其电气控制系统。轴承由定子和转子组成,图 1-4 所示为磁力轴承的工作原理。定子上安装电磁铁,转子支承轴处装有铁磁

环。定子电磁铁产生的磁场使转子被支承在要求的平衡位置上,即转子由于电磁力的平衡作用而悬浮起来,使转子与定子无任何接触,空隙为 $0.3 \sim 1 \text{ mm}$ 。转子的位置由传感器检测,位置传感器将偏差信号输入微机,在微机中与处于正确位置时的参数值加以比较,然后向主电源发出信号,调节流向磁铁中的电流,改变磁力,从而保证轴承和轴颈始终保持适当的间隙。根据结构需要,转子也可在定子的外面。图 1-5 所示为向心磁力轴承的两种配置形式。图 1-6 是承受轴向载荷的轴承,转子夹在两个环形磁铁中间,轴向位置传感器通常装在轴端。磁力轴承电气控制系统方块图如图 1-7 所示。位置传感器信号同决定转子规定位置的信号比较,调节器根据偏差信号进行调节,然后把调节信号送到功率放大器,以改变电磁铁(定子)的电流,使转子恢复到理想位置。功率放大器决定了电磁铁的最大功率和控制系统的响应速度。由于通过电气控制系统控制电磁力(幅值和相位调制),不仅可调节轴承的刚度和阻尼,使之与机器运转时的干扰频率相适应,而且可保持转子本身处于自平衡运转状态,使转子绕其惯性主轴回转,而不是绕支承的轴线回转,因此不会产生因动不平衡而引起的附加载荷,也就不会引起振动。

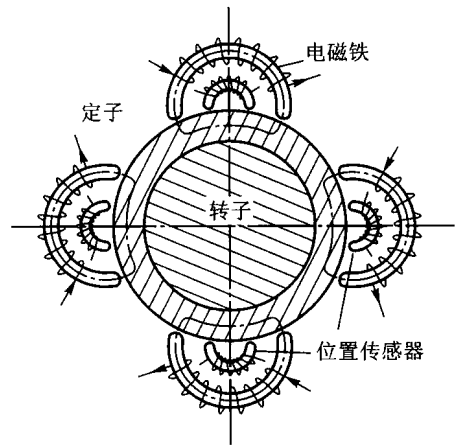


图 1-4 磁力轴承的工作原理

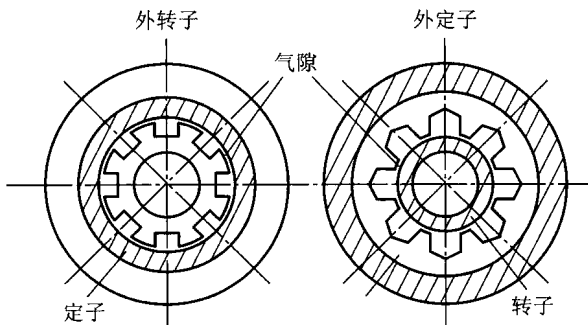


图 1-5 向心磁力轴承的两种配置形式

(2) 磁力轴承的优缺点

磁力轴承是非接触轴承,不需要润滑剂,其优点表现在非接触型和控制型两方面。非接触型的优点如下:

1) 无疲劳和磨损。由于电气机械元件的寿命比机械部件的应力疲劳要长得多,所以在理论上电气元件的寿命是无限的。

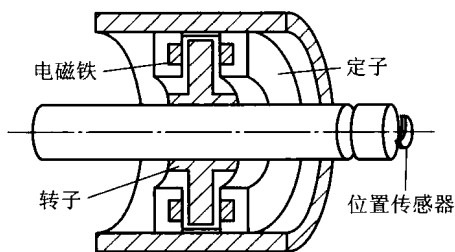


图 1-6 承受轴向载荷的轴承

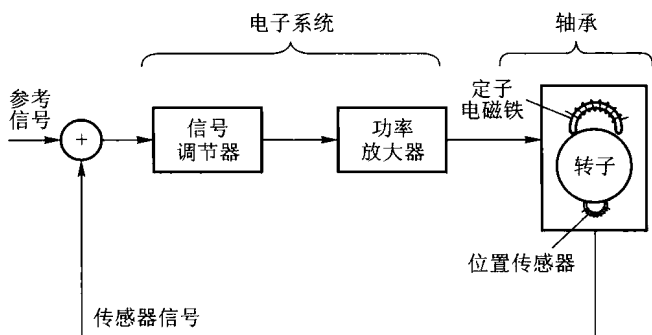


图 1-7 磁力轴承电气控制系统

2) 不需要润滑和密封。不需要润滑剂,因而省去了传统轴承所需要的润滑和密封装置;不会因润滑剂而污染环境。

3) 回转速度高。由于磁力轴承的间隙大,因此气隙处的圆周速度可高达 200 m/s,因此可突破传统轴承的速度限制。

4) 无振动、无噪声。磁力轴承的动态自平衡特性很好,从而大大降低了振动。

5) 发热小、功耗低。仅仅由于磁滞和涡流引起很小的磁损耗而消耗很小的功率,因此功率高。磁力轴承的能耗仅为传统轴承的 1/10 ~ 1/100。

6) 耐环境性。磁力轴承能在真空或腐蚀介质中使用,对环境温度不敏感,许用温度范围为 $-253 \sim 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$,轴承的加工精度和装配精度即使差一级也不影响功能的发挥,并且可靠性高,几乎不用维修。

控制型的优点如下:

1) 可进行位置控制。回转部件是绕其自身的惯性主轴回转的,即使回转部件对其支承轴线不平衡,仍可平稳运动,不会产生由于失衡离心力造成的附加载荷,无振动。

2) 刚度和回转精度高。

3) 全部回转特性都可以由位置传感器和电气控制系统的信息获得,因而可对机器的运行状态实行诊断和监控。这对于高性能机床的适应控制特别有利,因为提供了理想的数据来源。