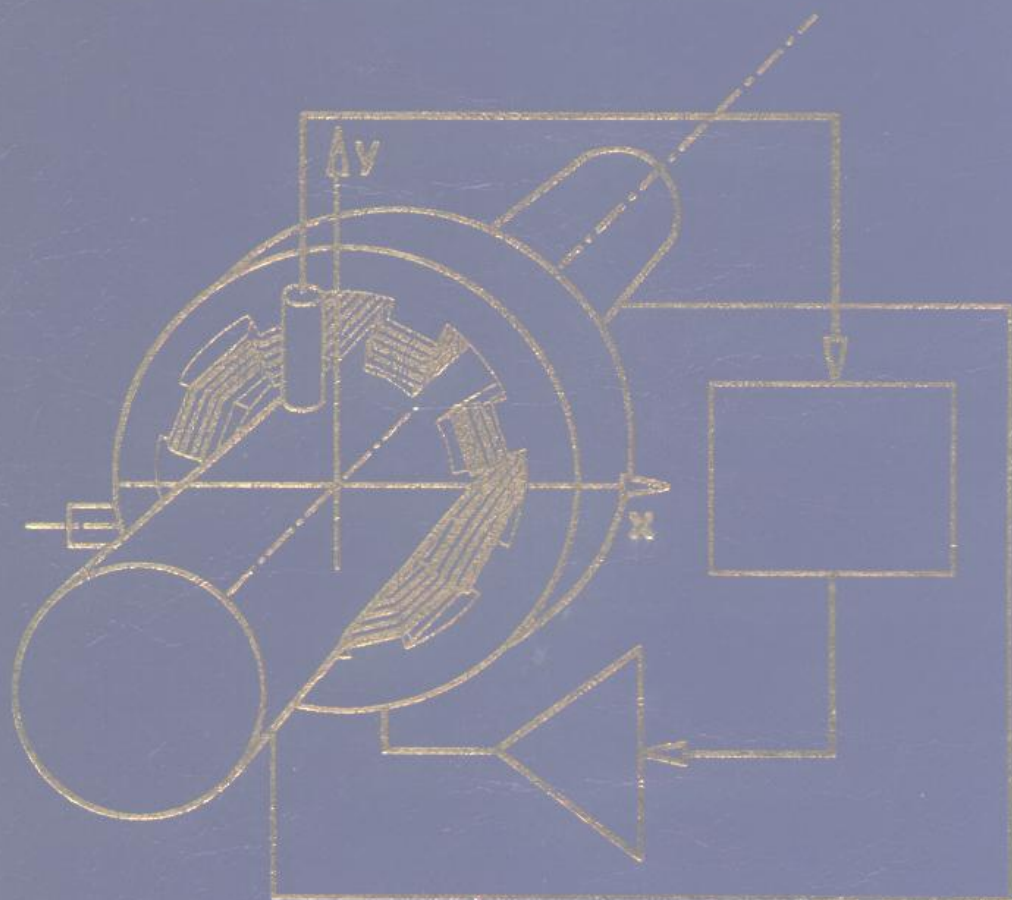


主动磁轴承

基础、性能及应用

G.施布策 H.布鲁斯 A.特拉克斯勒 著
虞烈 袁崇军 译 谢友柏 校



Springer-Verlag

著作权合同登记 图字:军-1996-009号

图书在版编目(CIP)数据

主动磁轴承 基础、性能及应用/虞烈,袁崇军译. — 北京:新时代出版社,1997.3

ISBN 7-5042-0335-1

I. 主… II. ①虞… ②袁… III. ①电磁轴承-性能②电磁轴承-应用 IV. TH133.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 00039 号

Originally Published in German under the title:

“Magnetlager” by Schweitzer, G., Traxler, A., and Bleuler, H.

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1993

All Rights Reserved

本书中文简体版由斯普林格出版社授权新时代出版社独家出版发行。版权所有,翻印必究。

新时代出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

开本 850×1168 1/32 印张 7 180千字

1997年3月第1版 1997年3月北京第1次印刷

印数:1—1000册 定价:20.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

译 者 序

主动磁轴承是一种典型的机械电子产品,其研究涉及到机械学、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的知识。磁轴承技术研究及其在众多工业领域内的应用,标志着对于传统支承技术的全新的革命。也正因为如此,磁轴承技术正在受到越来越多的国内外专家、学者的关注与重视。

本书的第一作者 G. 施韦策(Gerherd Schweitzer)教授,是在国际上率先开展磁轴承研究的先行者之一,他在这一领域中所做的卓越贡献不仅在理论上,更重要的还表现在其为将磁轴承技术推向实际工程应用所做的卓有成效的努力。因此,本书除了较为详细地介绍了磁轴承系统结构及组成部分的基本原理、设计方法外,还以相当的篇幅叙述了这一高新技术的发展历史、研究现状和应用实例。书中所附的不少参考文献可供读者借以溯本求源。

本书的作者 G. 施韦策教授工作于瑞士联邦技术学院(ETH, 瑞士苏黎士)的机器人及机电一体化研究所;H. 布鲁勒(Hannes Bleuler)教授工作于东京大学(日本)生产技术研究所;A. 特拉克斯勒(Alfons Traxler)博士工作于迈可斯特拉克斯勒股份公司(瑞士苏黎士州,温特图尔)。

本书是根据斯普林格出版社的 1993 年德文版翻译而成的,在翻译过程中还参考了作者在 1994 年出版的本书英文版修订本。由于水平所限,译文中谬误不当之处,尚望不吝赐教。

借此机会谨向新时代出版社对于本书的出版所给予的多方面支持表示诚挚的谢意。

译者

1996. 05.

西安

前 言

磁轴承是一种典型的机械电子产品,由机械部件诸如传感器、功率放大器和控制器(也可以是微处理器)等结合电子元件构成。此外,软件也显得越来越为重要,因为它决定了产品的“智能”。由于能方便地买到集成化程度不断提高的电子元件,使得磁轴承在解决机器动力学领域内由传统的轴承引起的问题时越来越具有吸引力。磁轴承可应用于如下领域:真空技术、机床、透平机械等。这些独特轴承的特殊优越性在于不存在接触,从而为人们提供了采用新颖结构、无机械磨损运行、减少维修以及对转子的动力学行为可实现高速下的主动振动控制的可能。

本书的目的在于介绍有关磁轴承系统结构和各组成部件的基本知识,培养读者在工业应用和转子动力学领域中或在设计新机器时对所采用的磁轴承进行评估的能力,并能够在运行过程中正确地使用磁轴承。因此,这本书也可供在研究、开发和应用领域中采用磁轴承并开发新的应用领域的工程师和物理学家们参考。

本书产生于作者多年来在基础和工业应用领域的研究与开发工作。早在1971年,本书第一作者在慕尼黑工业大学就对磁轴承进行了研究,这应当感谢当时的力学教研室主持人马格纳斯(Magnus K),由于其远见卓识和宏伟的设想,使此项研究得以开展。

书中内容是作者根据在苏黎士联邦工学院(ETH)和埃斯林根技术学院(Technical Academy Esslingen)所开设的关于磁轴承的高等教学和继续教育课程的要求而安排的。内容结构本着由浅入深、由实例到一般的原则,重点在于有关理论背景及其与实际应用间的关系的阐述,各章末尾均附有参考文献。

如果没有苏黎士联邦工学院机电研究组的学生和科技人员的不断推动,这本书的问世是不可能的。特别感谢雷内·拉森诺伊尔(Rene. Larssonneur)博士对有关控制章节严格的审阅和 5.7 节中有关高速转子强度一节的编写。还要感谢西茂曼(P. Zimmermann)女士所做的抄写和协调工作以及斯普林格出版社(Springer-Verlag)在本书出版过程中对作者的高标准要求与耐心。

同时感谢我们各自的夫人格尔达(Gerda)、蒂西(Tchie')和莫尼卡(Monika),感谢她们的支持以及对我们的家庭留下了很少的时间所给予的理解。

G. 施韦策, H. 布鲁勒, A. 特拉克斯勒
(Gerhard Schweitzer, Hannes Bleuler, Alfons Traxler)

1992 年苏黎士

目 录

第一章 绪 论

1.1 磁轴承的工作原理	1
1.2 作为机械电子产品的磁轴承	3
1.3 磁轴承在交通、物理学和机械工程中的应用	4
1.4 磁轴承分类	8
1.5 支承转子的磁轴承特点	14
1.6 主动磁轴承在研究与工业中的应用实例	16
参考文献	22

第二章 简单刚体的磁悬浮

2.1 作为控制回路单元的磁轴承	25
2.2 闭环控制:磁轴承系统	29
2.3 采用 PD 和 PID 控制的电流控制	32
2.4 电流控制还是电压控制	37
2.5 状态方程	39
2.6 状态反馈控制设计	42
参考文献	45

第三章 磁轴承系统的组成部分

3.1 基本原理	46
3.2 铁磁材料的特性	48
3.3 磁路	50
3.4 磁力	53
3.5 轴承磁铁设计	57

3.6	功率放大器	65
3.7	磁轴承系统中的传感器	67
3.8	永磁轴承	74
	参考文献	78

第四章 磁轴承的特性

4.1	几何图形	79
4.2	承载力估计	80
4.3	激磁方式与线性化	82
4.4	转子中的铁损耗	83
4.5	空气损耗	86
4.6	圆周速度	86
4.7	磁执行器的响应	86
4.8	系统特性的测量	90
	参考文献	94

第五章 刚性转子动力学

5.1	引言	95
5.2	惯性特性	95
5.3	弹性支承转子的固有振动	99
5.4	转速的影响	104
5.5	静不平衡和动不平衡	108
5.6	临界转速和转子激励	110
5.7	高速下的强度问题	117
	参考文献	123

第六章 刚性转子的磁轴承

6.1	被控装置结构	125
6.2	低速时的控制	126
6.3	状态反馈	130

6.4 高速下的模型	132
6.5 控制设计	134
参考文献	141

第七章 弹性转子动力学

7.1 概述	142
7.2 通过固有振动建模	142
7.3 弹性转子的不平衡	147
7.4 有限元模型及软件包	149
7.5 模态分析	153
参考文献	161

第八章 弹性转子的磁轴承

8.1 被控装置辨识	162
8.2 模型简化	163
8.3 执行器-传感器位置	167
8.4 弹性转子控制设计的其它准则与限制	168
参考文献	171

第九章 数字控制

9.1 为什么要数字控制	172
9.2 硬件	173
9.3 由微分方程到差分方程	175
9.4 采样时间	181
9.5 控制设计	183
9.6 控制程序	183
参考文献	186

第十章 目标实现

10.1 铣床主轴应用实例	187
---------------------	-----

10.2 保持轴承.....	197
10.3 可靠性及安全.....	202
参考文献.....	204
名词术语索引.....	206

第一章 绪 论

1.1 磁轴承的工作原理

在磁悬浮领域中,应用最广泛的就是主动磁轴承。图 1-1 表明了一个简单磁轴承的组成部分及其功能。传感器检测出转子偏离参考点的位移,作为控制器的微处理器将检测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,控制电流在执行磁铁中产生磁力从而使转子维持其悬浮位置不变。悬浮系统的刚度、阻尼以及稳定性由控制规律决定。

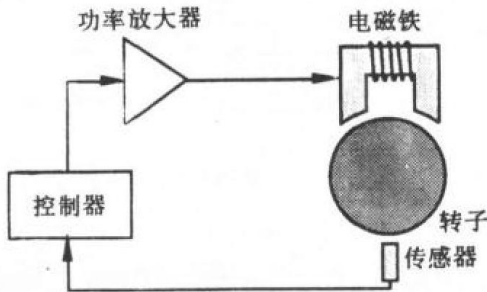


图 1-1 主动磁轴承的工作原理

刚度和阻尼可在物理极限范围内广泛地变动,亦可根据技术要求进行调节,甚至可以在运行过程中加以改变。图 1-2 展示了根据上述原则建立起来的一个演示模型,其中采用了一个简单的光敏三极管对位移进行光测量。

一个实际的转子需要多个磁铁组成,如图 1-3 所示,这些磁铁由一个多变量控制器相互联接在一起,相应的硬件示于图 1-4 中。转子长约 0.8m,质量为 12kg。用一个 CCD 传感器测量位移并

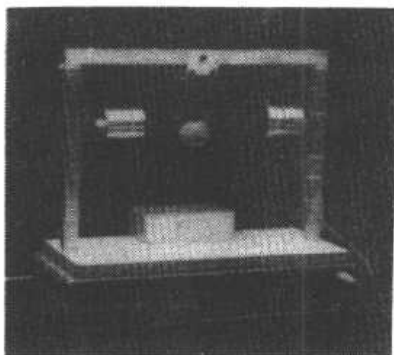


图 1-2 演示轴承

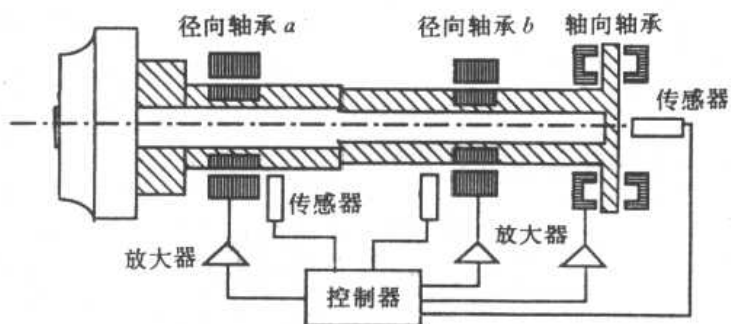
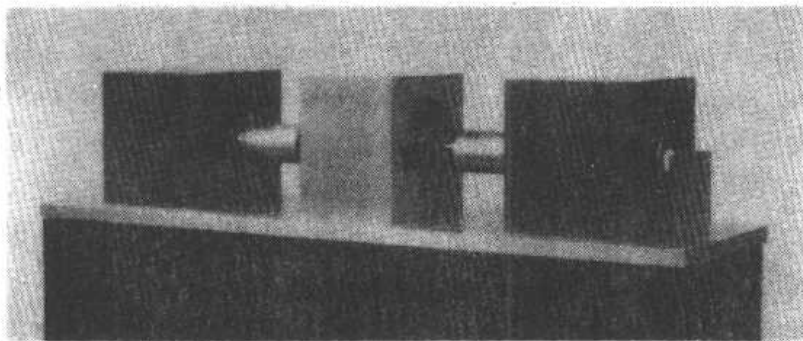


图 1-3 转子在一个平面内的支承框图

图 1-4 左、右磁轴承支承的转子(中间驱动)⁽¹⁾

能为微机控制器直接生成数字信号。该示范转子的气隙相当大,为10mm。作为一种新颖的、尚未普遍采用的机器部件,磁轴承属于机械电子这一类的产品。有关磁轴承的主要特征将在下一节讨论。

1.2 作为机械电子产品的磁轴承

机械电子学属于结合机械工程、电气工程和计算机等学科在内的交叉学科。一个典型的机械电子系统通常都包括信号的检测、处理和输出三部分。输出信号可以产生力或运动,以便达到驱动执行机构作功的目的。传感器和微机使机械系统得到了完善,这样的系统能够感受自身环境的变化并且通过适当的信息处理方法能对这些变化作出反应,所有这些都使得这种系统有别于传统的机械系统。图1-5是机械工程、电气工程和计算机科学三者间的相互

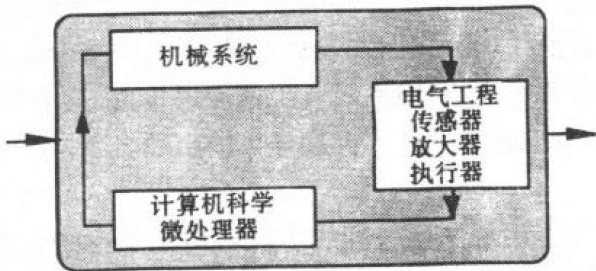


图 1-5 机械电子系统

该系统由外界拾取信号并对之进行智能处理,例如,以力或运动作出反应。联结机械、电气工程和计算机科学等不同知识领域的方法由基础工程科学、系统理论、控制技术及信息处理提供

联系以及所形成的机械电子产品。机器人、数控内燃机、自调节机床、自动驾驶车辆等均是机械电子产品的实例。这类产品的典型特征是它们具有高度的系统知识和软件,而这些特征在产品设计与运行中是必不可少的。软件装在产品内部,代表产品的主要部分。因此,有充分的理由将软件称为机械零件。

由于磁轴承由机械、电气和软件三大部分组成,它是一种典型的机械电子产品,可作为研究这类产品的结构、设计的极好例子。

各种对机械装置建模及控制器设计所需的方法都可以由此得到说明与解释。以磁轴承支承的转子为例,对诸如传感器和微处理器这样的重要部件及其性能与应用将加以介绍和讨论。但是,下一节还是先对磁轴承的历史发展、技术状况及其应用等方面作简要介绍。

1.3 磁轴承在交通、物理学和 机械工程中的应用

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。早在1842年,恩休(Earnshaw)就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,人们已经对磁轴承的技术应用表现出实际的兴趣,布朗贝克(Braunbek)对此作了更进一步的物理剖析^[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,由抗磁所产生的磁力实在太小,因而没有工程应用价值。只有等到将来某一天,随着具有抗磁性能的高温超导体的出现,这种情况才会随之改观。

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地调节磁场,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:交通及物理学。本书结合机械工程领域的电磁悬浮的转子,将这些设想以及后来改进的方案作为主体予以简要介绍。

1937年,肯珀(Kemper)申请了一项有关悬浮支承的专利^[5],专利提出了采用新的交通办法的可能,并在参考文献[6]中介绍了与此相关的实验:电磁铁的磁极面积为 $30 \times 15 \text{cm}^2$,磁感应强度为 0.25T ,功率为 250W ,气隙为 15mm ,承载为 210kg 。在控制中他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浮列车的前身。60年代,英国、日本和德国根据不同的设

计方案,制造出了磁浮列车的样车。早在1977年,由德国航空公司(Messerschmitt-Bölkow-Blohm)研制成功的KOMET型磁浮列车,在一段专门的实验轨道上时速达360km。德国目前正在讨论有关建设新线路以供正常营运的决定。电动型悬浮原理也极具竞争力,过去的研究主要是在德国和日本,目前日本还在继续这方面的开发工作。

磁浮列车MAGLEV(Magnetically Levitated Vehicle),是采用电磁原理、通过铁轨上的许多磁铁将车辆无接触地悬浮起来,如图1-6所示。这种磁铁的承载能力可以用“磁轮”这一术语来表征。图1-7~图1-10均引自戈特采恩(Gottzein)的论文^[7,8],它们展示了“磁轮”的机械结构、单个磁轮的电气装置以及相应的控制结构,其中每个电磁铁都是分开单独控制的。

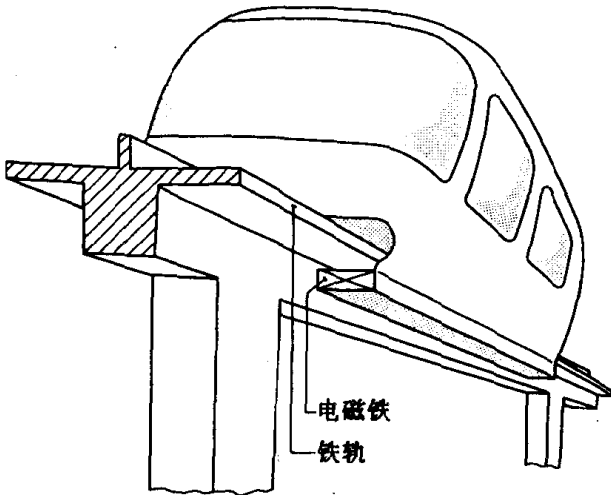


图1-6 高架轨道上的磁浮列车简图

图1-10说明了每个磁铁所需测量的气隙 S 、磁铁垂直运动的加速度 Z 以及磁通变化 Φ ,控制输入则为磁铁电压。有关控制设计部分可参阅大量的文献资料。

国际上定期召开会议专门讨论磁浮列车问题,在IEEE—Transactions on Magnetics杂志上经常介绍有关的磁性元件。杰

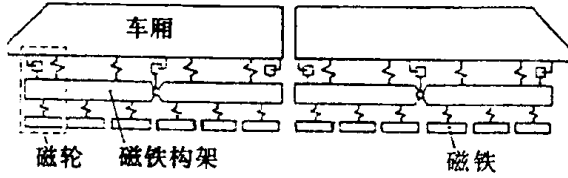


图 1-7 具有组合支承及制导系统的列车简图

实验样车 Transrapid 06 的技术规范数据为：制造年份：1982；质量：122kg；速度：400km/h；电机系统：同步线性电机，铁壳，功率，约 12MW；高架轨道，界宽 25m，钢筋混凝土双支承，高 5m

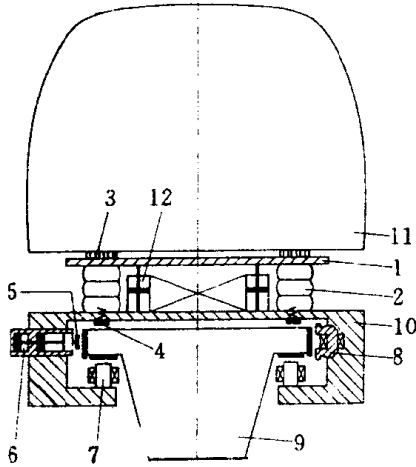


图 1-8 具有辅助支承及机械支承的“磁轮”机械结构简图

1—转向架；2—支持滑块；3—展平弹簧；4—承载着陆滑板；5—导向架；
6—紧急刹车-操纵油缸；7—悬浮磁铁；8—导向磁铁；9—基础(墩)；
10—悬浮架；11—车厢；12—底盘、稳定器。

沃特(Jayawant)、辛哈(Sinha)和荣格(Jung)已将适用于磁轴承应用的基本原理和实例集中整理在一起^[4,9,10]。

1937年，电磁铁另一个有意的应用是对物理试验装置结构的冲击。情况大致是这样：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

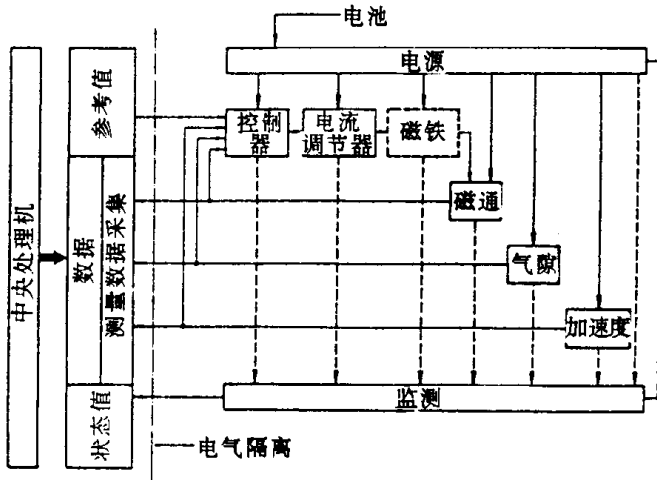


图 1-9 “磁轮”电气结构和基本控制系统框图

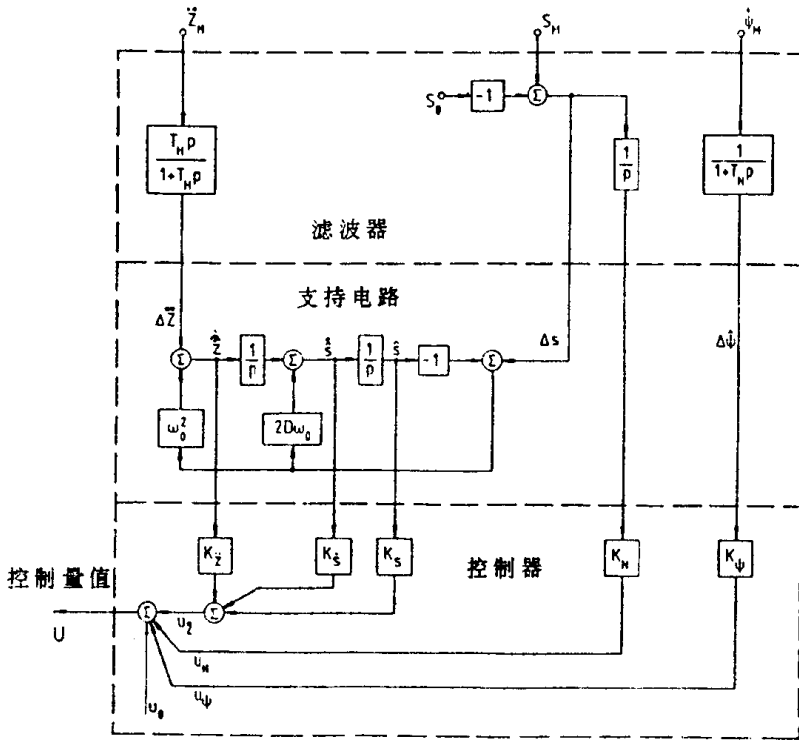


图 1-10 单个“磁轮”的控制器结构

高速旋转以测定其材料强度,所达到的旋转速度高得惊人即 $18 \times 10^6 \text{r/min}$ (300kHz),在这一转速下使得钢球由于离心力的作用而爆裂^[11~13]。

空间技术的飞速发展推动了磁轴承研究的不断深入。参考文献[14]设计的磁浮速度陀螺,根据磁轴承的控制信号就可直接计算出角速度。大约从1970年起,磁悬浮支承就已用在卫星姿态控制的动量飞轮上^[15],美国和日本至今还在进行这方面的研究工作。至于一些敏感部件的无振动支承,比如像卫星上的光学装置或微重力实验^[16,17],专家们都建议采用磁悬浮支承。

近年来,随着功率电子和信号处理元器件的出现以及控制理论和转子动力学的进展,磁悬浮技术得到了长足的发展。早在1975年,人们就采用了主动电磁阻尼对离心机的自激振动进行了理论和实验研究^[18]。哈帕曼(Habermann)和S2M(Société de Mécanique Magnétique)公司在磁轴承的工业应用方面做出了重要贡献^[19,20]。S2M公司是由SEP(French Société Européenne de Propulsion)公司派生出来的,创立于1976年。在此期间,已有好几家公司专门从事磁轴承的设计与制造。有关磁轴承当前技术发展水平的详细情况,可见于历届国际磁轴承论文集^[21,22]。目前,有人致力于研究如何将各种不同的磁性设计原理综合在一起,这些不同的设计原理包括用于磁浮列车的大气隙控制、高速旋转磁浮转子的控制、用于空间技术微重力实验的受力很小的轴承以及由超导电磁铁提供的各种潜在的新方法。

1.4 磁轴承分类

除了迄今已经涉及到的主动磁轴承外,还有许多其它方法可产生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1-11给出了对磁力和磁悬浮的大致分类^[23]。

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