

新型
驱动
器及
其应
用



新型 驱动器

杨宜民
编著

及其应用

机械工业出版社

机
械
工

132
30

新型驱动器及其应用

杨宜民 编著



机械工业出版社

本书共分 19 章,介绍了新型交流电动机、新型直流电动机、直接驱动电动机、直线电动机、专用小功率电动机、步进电动机、磁致伸缩驱动器、压电驱动器、仿生型步进式驱动器、超声波驱动器、MH 驱动器、SMA 驱动器、超导驱动器、橡胶驱动器、静电驱动器、高分子凝胶驱动器、光驱动器、二自由度驱动器等 18 种新型驱动器,对它们的结构、工作原理、控制和应用等作了较详细的说明。书末有附录,为读者设计新型驱动器的控制电路提供了方便。

本书可作为高等院校机、电类专业的学生、研究生的教材或参考书,也可供机、电类专业老师、研究人员、工程技术人员等参考。

新型驱动器及其应用/马九荣编著. —北京:机械工业出版社, 1997. 12

ISBN 7-111-05865-8

I. 新… II. 杨… III. 驱动器-基本知识 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 16961 号

出 版 人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 贡克勤 版式设计: 霍永明 责任校对: 唐海燕

封面设计: 赵京京 责任印制: 卢子祥

机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·14 印张·335 千字

0 001—2 000 册

定价: 22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

驱动器是一切自动化装置和设备的动力部件,它的体积、重量、价格和性能在很大程度上决定了自动化装置和设备的体积、重量、价格和性能。因此,长期以来人们十分重视驱动器的研究和开发,近几年每年召开一次“国际新型驱动器”的学术研讨会,对其进行专门的讨论和交流。随着电子技术、材料科学的发展,目前新型驱动器的研究和开发已取得巨大的成果,并对提高自动化装置和设备的性能起着重大的作用。

作者于1986年受国家教育委员会的派遣,到日本筑波大学从事“新型驱动器和微机器人”的学术研究。在筑波大学2年期间,由于学术研究的需要,作者较广泛地收集了国际上有关新型驱动器研究的资料。回国后,作者承担了国家863高科技计划、国家自然科学基金、广东省“八五”机电一体化重点攻关、广东省自然科学基金等多项科研课题,先后研制了微型直线驱动器、仿生型步进式直线驱动器、仿生型步进式旋转驱动器、NC机床精密进给直线驱动器、新型压电式变形镗杆、二坐标微驱动器、MR-1型微机器人和MR-2型微机器人,这些科研成果为本书增色不少。1994年作者再次受国家教育委员会的派遣,到日本东京大学从事“新型驱动器和微机器人”的学术研究。1995年回国后,对1992年拟写的本书初稿作了一些修改和补充。所以相信本书具有新颖性、实用性,且内容较丰富,对读者会有一定的启发和帮助。

广东工业大学的章云、李传芳、程良伦、周学才、李医民、林汉荣等老师对本书所引用的一些研究成果作出了很大贡献;冯焱生、符曦、张占松、许立梓、庞启淮、陈湘坤等老师为本书提供一些资料;长春光机所博士后吴一辉女士为本书提供资料,提出不少宝贵意见,并审阅全部书稿;柯燕娇女士对本书的写作给予理解、支持和鼓励。在此,均表示衷心的感谢!

国家教育委员会给予作者两次出国学习的机会,对本书的诞生起决定性作用;广东工业大学的领导对本书的出版给予了大力支持。在此致以崇高的敬意和衷心的感谢!

尽管作者已作了努力,但错漏、不妥之处在所难免,恳请读者给予批评和指正。

杨宜民

1997年4月于广东工业大学

目 录

前言

第一章 电气式驱动器的发展

动向 1

第一节 驱动器的定义 1

第二节 驱动器的发展动向 1

第二章 新型交流电动机 5

第一节 概述 5

第二节 高磁永磁式同步电动机 6

第三节 电动机和传感器一体化的永磁 同步电动机 15

第四节 自制动异步电动机 20

第五节 外转子异步电动机 23

第六节 三相盘式异步电动机 24

第三章 新型直流电动机 27

第一节 概述 27

第二节 有沟铁心型直流电动机 27

第三节 无沟铁心平滑电枢型直流电动机 ... 28

第四节 盘式永磁直流电动机 29

第五节 杯形转子直流电动机 30

第四章 直接驱动电动机 36

第一节 概述 36

第二节 3 相 VR 型 DD 电动机的构造及 技术参数 36

第三节 3 相 VR 型 DD 电动机的控制 系统 38

第四节 3 相 VR 型 DD 电动机的特性 40

第五节 DD 电动机的应用与选择 42

第五章 直线电动机 43

第一节 概述 43

第二节 直线脉冲电动机 (LPM) 43

第三节 直线感应电动机 (LIM) 46

第四节 直线直流电动机 (LDM) 48

第六章 专用小功率电动机 55

第一节 洗衣机专用电动机 55

第二节 密封式制冷压缩机专用电动机 58

第三节 某些家用电器专用电动机 60

第四节 某些器具和设备专用电动机 63

第七章 步进电动机 69

第一节 概述 69

第二节 磁阻式 (VR 型) 步进电动机 70

第三节 永磁式 (PM 型) 步进电动机 71

第四节 混合式 (HB 型) 步进电动机 76

第五节 步进电动机的控制装置 78

第六节 步进电动机的应用 83

第八章 磁致伸缩驱动器 86

第一节 概述 86

第二节 磁致伸缩材料的特性 87

第三节 磁致伸缩驱动器的设计 89

第四节 驱动器的设计举例 93

第九章 压电驱动器 (元件) 95

第一节 概述 95

第二节 压电材料的特性 95

第三节 双压电型驱动元件 96

第四节 积层压电驱动元件 100

第五节 积层压电元件的应用举例 104

第十章 仿生型步进式驱动器 110

第一节 概述 110

第二节 仿生型步进式直线驱动器 110

第三节 仿生型步进式旋转驱动器 114

第四节 仿生型步进式驱动器的特点 和应用 116

第十一章 超声波驱动器 117

第一节 概述 117

第二节 超声波驱动器的动作原理 117

第三节 超声波驱动器的构成材料 119

第四节 超声波驱动器的结构和特性 120

第五节 超声波驱动器的特点 125

第十二章 金属氢化物 (MH) 驱

动器 126

第一节 概述 126

第二节 MH 驱动器的动作原理 126

第三节	MH 驱动器的机械结构	127	第六节	实用化课题	168
第四节	MH 驱动器的数学模型	128	第十七章	高分子凝胶驱动器	169
第五节	控制系统和 MH 驱动器的特性 ...	131	第一节	概述	169
第六节	使用珀尔帖元件的 MH 驱动器 ...	133	第二节	高分子凝胶的刺激种类	169
第七节	MH 驱动器的应用	135	第三节	研制高分子凝胶驱动器的注意 事项	173
第十三章	形状记忆合金 (SMA)		第四节	高分子凝胶驱动器的特点	174
	驱动器	137	第十八章	光驱动器	176
第一节	SMA 的动作特性	137	第一节	概述	176
第二节	SMA 线圈元件的设计	138	第二节	光致伸缩驱动器	176
第三节	二方向性 SMA 驱动器	139	第三节	光辐射计和光驱动器	177
第四节	SMA 驱动器的控制	140	第四节	光热驱动器	178
第五节	SMA 驱动器的应用举例	141	第五节	光驱动器的特点及其应用	181
第六节	SMA 驱动器的特点与展望	144	第十九章	二自由度驱动器	182
第十四章	超导驱动器	145	第一节	二自由度驱动器开发研究的背景 和目的	182
第一节	超导现象和超导材料	145	第二节	平面型二自由度驱动器	182
第二节	超导驱动器的工作原理	147	第三节	圆柱型二自由度驱动器	183
第三节	超导驱动器的分类及其结构	148	第四节	光学读写头专用二自由度 驱动器	185
第四节	关于超导驱动器的其它问题	150	第五节	二自由度微位移驱动器	189
第十五章	橡胶驱动器	151	附录		194
第一节	概述	151	附录 A	半导体应变片	194
第二节	橡胶驱动器的构造及其 动作原理	151	附录 B	运算放大器	194
第三节	单自由度橡胶驱动器	153	附录 C	3583 高电压大电流运算放大器 ...	197
第四节	三自由度橡胶驱动器	156	附录 D	INA104 超高精度仪表放大器	198
第五节	橡胶驱动器的应用举例	157	附录 E	AD521 和 AD522 测量放大器	201
第十六章	静电驱动器	161	附录 F	3650 光耦合线性隔离放大器	205
第一节	概述	161	附录 G	PWM 组件 HEF 4752	207
第二节	静电驱动器的发展史	161	附录 H	PWM 组件 SLE 4520	211
第三节	静电驱动器的特征	163	参考文献		215
第四节	静电驱动器的原理结构及其优 缺点	164			
第五节	静电驱动器的应用	168			

第一章 电气式驱动器的发展动向

第一节 驱动器的定义

《WEBSTER》中是这样定义“驱动器”的：

actuator; one that actuates; specif: any of various electric hydraulic, or pneumatic mechanism by means of which something is moved or controlled indirectly instead of by hand (as a motor that turns the rudder of a large ship or moves the elevators of an airplane or an air-brake cylinder operated by a motorman)

动词“驱动”的说明如下：

actuate vt 1: to put into mechanical action (most of the hydraulically operated items of equipment are actuated by pistons and cylinders)

可见，所谓驱动指的是对任何物体产生机械动作。所谓驱动器指的是能产生驱动作用的器件或装置，即不是人类的手，而是间接动作或控制机器的电气、气体、液体的机构。

利用气体或液体的压力的驱动器称气压或液压驱动器。利用电磁力的驱动器称为电动机。

第二节 驱动器的发展动向

随着生产的发展、人类生活水平的提高，对 3A（办公室自动化，家庭自动化、工厂自动化）装置的要求越来越高，即要求 3A 装置的体积小、重量轻、各种性能好，价格便宜。在现实生活中，几乎所有 3A 装置都用到驱动器，并且 3A 装置的性能很大程度取决于驱动器的性能。换言之，解决了驱动器的体积、重量、各种性能、价格等问题，也就基本上解决了 3A 装置的体积、重量、各种性能、价格等问题。因此，长期以来人们十分重视开展驱动器的研究，近十多年来取得较大的进展，归纳起来主要是通过下列的方法，提高驱动器的各种性能：采用高磁性材料；采用化学加工方法制作绕组；开发特殊型驱动器。

一、高磁性材料的利用

材料科学的发展为驱动器的制造提供了各种高磁性材料，从而促进了电动机的小型化，并提高了电动机的各种性能，这部分内容主要在第二章“新型交流电动机”中加以说明。新研制出来的环形铁心螺旋绕组电动机就是一个典型的例子。

环形铁心螺旋绕组电动机的基本结构如图 1-1a 所示。由于电动机转速高，反电动势大，线圈匝数可以减少，所以可采用高磁性环形铁心和单层线圈。这种电动机的特点是制作简单，齿槽效应小，易得到轴向支持力。这种电动机在 OA（办公室自动化）中得到广泛的应用，例如可用于激光打字机的多角镜驱动，如图 1-1b 所示。

二、化学加工方法的利用

（一）超小型电机

计算机中的磁头驱动器、盒式录像机的磁带驱动器等，要求驱动器轻薄小。如果用原来的制作绕组方法是不能满足这种要求的。于是人们开发了照相刻蚀、电镀方法来制作绕组。

用作盒式录像机驱动的新型无刷直流电动机如图 1-2a 所示。这种新型电动机厚度为 4mm。其中，4 层绕组厚度为 0.7mm，永久磁铁厚度为 1mm。如果有一种可以通过磁通，而不能通过电流的材料，则后磁轭可以紧贴绕组，使电动机厚度更小。再者，如图 1-2b 所示，漏磁通通过托座产生轴向力，使电动机稳定旋转。如果后磁轭和绕组一体化，则不需要托座，电动机的厚度可进一步减小。

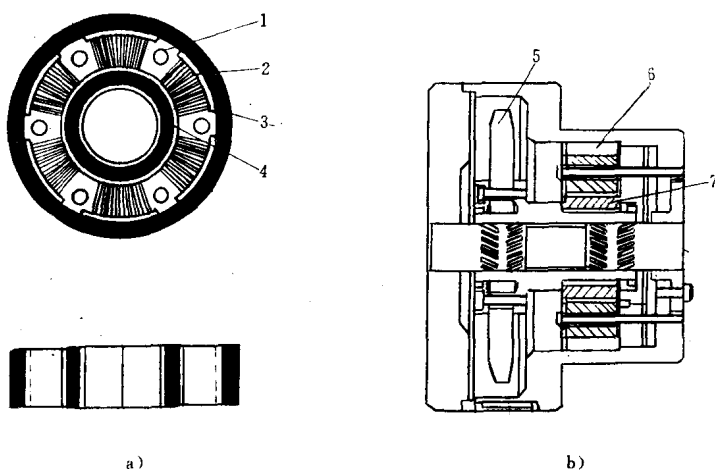


图 1-1 环形铁心螺旋绕组电动机

a) 基本构造 b) 用于多角镜的驱动

1、6—定子铁心 2—转子绕组 3—外壳 4、7—转子铁心 5—多角镜

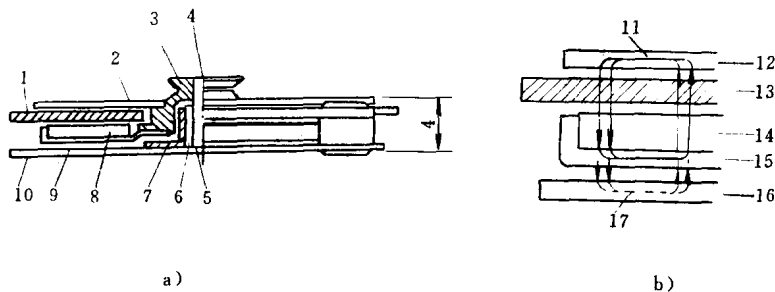


图 1-2 新型无刷直流电动机的基本构造（录像机驱动用）

a) 断面 b) 磁路

1、13—绕组 2、12—后轭 3—滑轮 4—轴 5—托板 6—金属板 7—套
8、14—永久磁铁 9、15—转子轭 10、16—托座 11—主磁通 17—漏磁通

计算机软盘驱动用的无刷 DC 电动机的基本截画图如图 1-3 所示。后磁轭是静止的，含有印制基板。电动机的厚度为 6mm，绕组厚度为 1.5mm。FDD（软磁盘直接驱动）的场合，由于旋转速度不太高，静止的后磁轭的热耗不太大。

(二) 微型电动机

医学工程、生物工程等领域的研究，急需体积极小的微驱动器，采用上述的方法制成的驱动器还不能满足要求，近几年人们正从事利用硅技术（IC 制造技术）制作微电动机的研究。德国弗琅贺费微机构研究所最近研制出几种新型微电动机，是最有代表性的。

1. 带滑动磁铁直线微电动机

带滑动磁铁直线微电动机的构造如图 1-4 所示。永久磁铁在以玻璃底片和二块硅片所形成的通道中运动、磁铁垂直磁化,其大小为 $0.7\text{mm} \times 1.8\text{mm} \times 0.9\text{mm}$,通道宽度为 0.8mm 。硅表面上有 8 对平面绕组,每个平面绕组有三匝,外周长度为 $800\mu\text{m}$,绕组间的横向中心距为 $900\mu\text{m}$,纵向中心距为 $1700\mu\text{m}$,绕组电阻为 0.28Ω 。这种直线电动机的输出力为 $150\mu\text{N}$,速度为 24cm/s 。

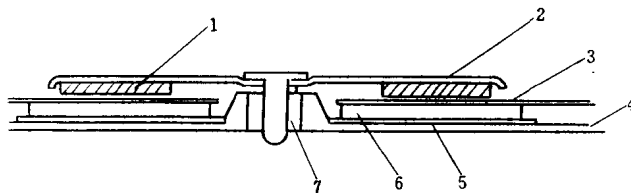


图 1-3 新型无刷 DC 电动机的截面图

(计算机软盘驱动用)

1—永久磁铁 2—转子 3—印制基板 4—FDD 座
5—后轭 6—绕组 7—轴承

2. 带磁性滚子直线微电动机

带磁性滚子直线微电动机的基本结构如图 1-5 所示。绕组的几何尺寸与图 1-4 相同,磁性滚子为圆柱形,直径为 1.0mm ,厚度为 0.75mm ,玻璃材料间的通道宽度为 0.85mm 。这种直线微电动机的最大输出力为 $141\mu\text{N}$,速度为 110m/s 。

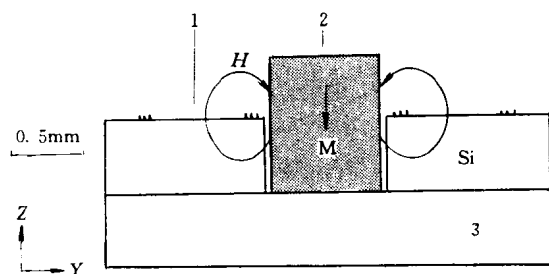


图 1-4 带滑动磁铁直线微电动机的构造

1—绕组 2—永久磁铁 3—玻璃

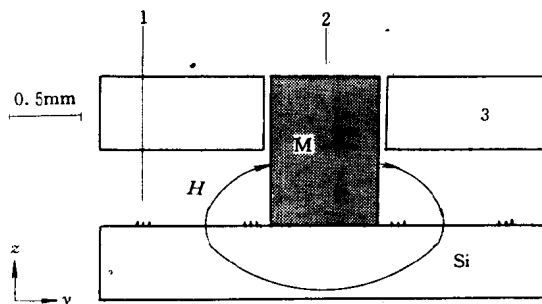


图 1-5 带磁性滚子直线电动机的基本结构

1—绕组 2—永久磁铁 3—玻璃

3. 带旋转磁铁微电动机

带旋转磁铁微电动机的基本结构如图 1-6 所示。永久磁铁的直径为 1.4mm ,厚度为 1.0mm 。中间导孔的直径为 1.5mm 。每个绕组有 5 匝,电阻为 1.4Ω 。每转 4 步或 8 步,绕组极性如图 1-7 所示,速度可达 2000r/min 。

4. 带滑动磁铁两自由度微电动机

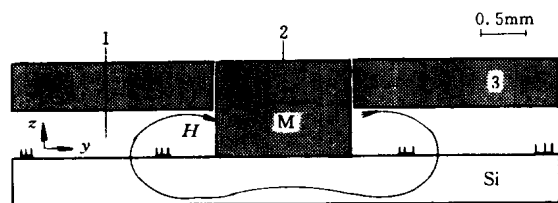


图 1-6 带旋转磁铁微电动机的基本结构

1—绕组 2—永久磁铁 3—玻璃

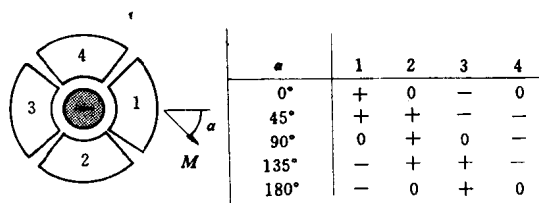


图 1-7 微电动机运行时绕组的极性

带滑动磁铁两自由度微电动机如图 1-8 所示。由图可知,永久磁铁能在平面内运动。永久磁铁的直径为 1.5mm,厚度为 1.0mm。每个矩形绕组有 8 匝,外周长为 2.4mm,电阻为 2.2Ω ,微电动机的输出力可达 1.6mN。

此外,美国、日本和欧洲各国在这方面作了大量的研究工作。

三、特殊型驱动器的开发

为了提高 3A 装置中的驱动器的技术水平,除了采用高磁性材料、改进绕组的制作方法外,还开发了采用新工作原理的各种驱动器。已开发出来的特殊型驱动器有:压电驱动器、

仿生型驱动器、超声波驱动器、MH 合金驱动器、形状记忆合金驱动器、超导驱动器、橡胶驱动器、磁致伸缩驱动器、静电驱动器、高分子凝胶驱动器、光驱动器、二自由度驱动器等等。这些驱动器有突出的优点,也还有不足之处,等待人们不断地加以改进。在本书中将逐一加以介绍。

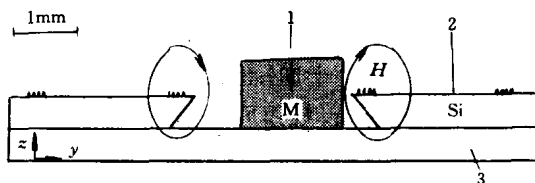


图 1-8 带滑动磁铁两自由度微电动机的基本结构

1—永久磁铁 2—绕组 3—玻璃

第二章 新型交流电动机

第一节 概 述

如表 2-1 所示,交流电动机较之机械式整流的直流电动机的最主要优点是结构简单、维护方便、易高速化、寿命长等,所以在各个领域中得到广泛应用。但是交流电动机最大缺点是调速困难,限制了它在某些领域中的应用。近 20 年来,由于电力电子技术的发展,先后出现了大功率半导体开关器件: 闸流管 (SCR)、静电感应型闸流管 (SISCR)、控制可关断闸流管 (GTO)、大功率晶体管 (GTR)、大功率场效应晶体管 (MOSFET) 以及大功率元件的模块化、IC 化,再加上计算机的硬件和软件的发展,使交流电动机的变频调速问题得到解决,并实用化。目前,国产长城系列交流电动机变频调速装置是一种综合国内外先进技术的较理想的产品。

另一方面,随着材料科学的发展,为了适应某些特殊要求,交流电动机的结构也出现创新,主要表现在采用高磁性材料、电动机和传感器一体化。下面主要介绍这些新型交流电动机的结构及其控制系统,并简单介绍自制动异步电动机、外转子异步电动机、三相盘式异步电动机。

表 2-1 交流电动机和直流电动机的比较

项 目 \ 型 式	同步交流电动机	异步交流电动机	机械整流式直流电动机
电动机结构	较简单	简单	复杂
整流机构	晶体管整流	晶体管整流	电刷、整流子
峰值转矩	受永磁材料的性能限制	不大受限制	受整流火花、永磁材料性能的限制
散热	只有定子绕组发热,有利	转子、定子都发热,要考虑对策	转子发热、不利
高速化	较容易	容易	较难
大容量化	较难	容易	困难
制动	容易	相当难	容易
控制方法	较复杂	复杂	简单
磁通	利用永磁材料	2 次磁通	利用永磁材料
感应电压	电枢感应电压	2 次阻抗中的电压	电枢感应电压
整流作用	整流器	整流器+滑差	电刷、整流子
环境适应性	优秀 (可防爆)	优秀 (可防爆)	因有火花,受到限制
维护	简单	简单	较复杂
寿命	长	长	较短

第二节 高磁永磁式同步电动机

一、概述

由于高磁永磁式同步电动机具有体积小、惯性小、效率高和能运行于单一功率因数等明显优点，所以在 70 年代末期和 80 年代初期已引起了从事电动机及驱动系统技术的学者和研究人员的注意和重视。英国学者 Merrill 最早提出了称之为“Permasyn”的永磁式交流电动机的设计方案，德国西门子（Siemens）研制成功了“BuriedMagnet”转子。从 1979 年开始，英国著名学者、利物浦大学 K. J. Binns 教授长期致力于高磁永磁式同步电动机及其驱动系统的理论研究和技术开发工作。此外，英国曼彻斯特大学 B. J. Chalmers 教授、波兰学者 P. M. Petczewski 以及意大利学者 Alfio Consoli 等都对永磁式同步电动机作了深入的研究。

目前，高磁永磁式电动机所用的磁性材料包括有 Alnico（Al、Ni、Fe、Co 磁性合金），Ceramic（陶瓷），Rare Earth（聚合键稀土族 Cobalt, Samarium Neodymium 和 Manganese-Aluminum-Carbon）Nd-F-B（钕-铁-硼合金），Barium（钡）或 Strontium（锶）等铁磁性材料。随着高磁性材料的不断开发和应用，以及电动转子加工技术和加工工艺的不断完善和提高，高磁永磁式电动机发展的最大障碍之一——材料价格和制造价格会下降，这将进一步推动高磁永磁式电动机的发展和应用。

永磁式转子电动机驱动系统，目前主要应用于两个方面：其一为交流同步拖动系统，应用于正弦变频、变压或电流型逆变器供电的调速系统。由于这种系统中的永磁式电动机力求维持与供电频率同步，故不需进行速度或位置反馈。其二为自调整或无刷直流电动机拖动系统和位置随动系统，这种系统需要转子位置反馈和闭环速度控制。

目前，高磁永磁式同步电动机应用于高性能交流伺服系统和变频调速系统已获得了相当满意的运行效果。可以预料，高磁永磁式电动机及其驱动系统在理论研究和实践应用方面将会不断完善和提高，在某些方面或一定程度上将有可能会逐步取代现有的规范电动机及其驱动系统。

二、高磁永磁式同步电动机的性能结构

1. 磁性材料

目前，用于高磁永磁式电动机的磁性材料，包括有 AlNiCo（铝、镍、钴、铁磁性合金），Ferrite（铁淦氧磁性材料），Rare Earth（含钐或钕聚合键稀土族磁性材料），MnAlC（锰、铝、碳磁性材料），Ceramic（陶瓷）和 Nd-F-B Alloys（钕、铁、硼合金）等。通用的高磁性材料的磁性和物理性能见表 2-2。

表 2-2 通用的高磁性材料的磁性和物理性能

磁性材料	顽磁 Br T	矫顽力-Hc kA · m ⁻¹	B · H 最大 kJ · m ⁻³	感应密度 kg · m ⁻³ × 10 ³	最大运行温度 ℃	可逆性温度系数 ℃ ⁻¹	居里温度 ℃
AlNiCo V	1.28	50	41	7.3	550	-0.016	870
AlNiCo VII	0.90	127	48	7.3	550	-0.005	870
Ceramic 7	0.36	255	23	4.9	350	-0.200	450
Ceramic 8	0.40	247	29	4.9	350	-0.200	450

(续)

磁性材料	顽磁 Br T	矫顽力-Hc $\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$	$B \cdot H$ 最大 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	感应密度 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 10^3$	最大运行温度 $^{\circ}\text{C}$	可逆性温度系数 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	居里温度 $^{\circ}\text{C}$
Rare Earth 钴 B2 (聚合键)	0.55	360	48	5.1	120	-0.040	*
Rare Earth 钴 H-90A	0.82	597	122	8.2	250	-0.042	710
Rare Earth 钴 H-90B	0.87	653	142	8.3	250	-0.042	710
Rare Earth 钴 H-99A	0.97	477	176	8.5	250	-0.035	870
MnAlC	0.58	190	45	5.0	300	-0.140	350

注：超过 120℃ 时聚合键分离。

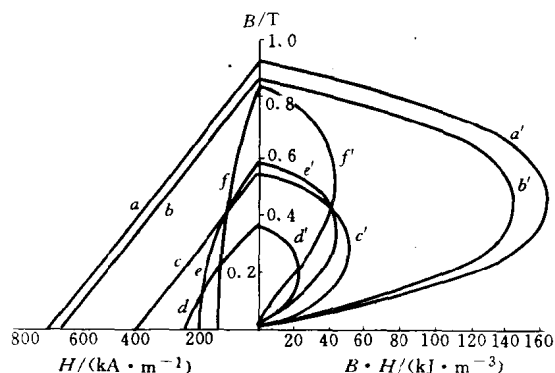


图 2-1 高磁性永磁材料的 $B \cdot H$ 性能和 $B-H$ 曲线
 a—H22-A (稀土族) b—H22-B (稀土族) c—HERA (聚合键稀土族) d—Ceramic8 (导向性铁钨氧化物)
 e—MnAlC f—AlNiCo

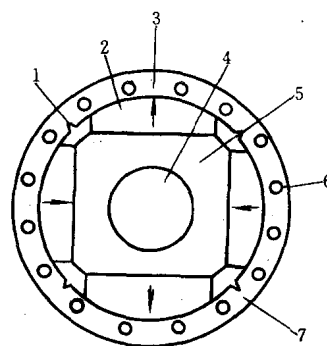


图 2-2 Permasyn 4 极转子结构
 1—减少漏磁的导向槽 2—磁体 3—层压环
 4—磁性轴 5—磁性衬套 6—笼条 7—铁桥
 → 起始磁化方向

通用的高磁性永磁材料的 $B \cdot H$ 性能和 $B-H$ 曲线如图 2-1 所示。

2. 永磁式电动机的转子结构

高磁永磁式电动机的转子结构形式多种多样，且各具特色。英国学者 Merrill 最早提出的称之为“Permasyn”的永磁式交流电动机的 4 极转子结构如图 2-2 所示。但是，这种形式的转子结构在设计中存在着磁极间漏磁和磁阻作用过小的实际问题，而且在电动机起动加电压时过于敏感和易出现部分退磁的危险。另外，由于输出环采用层迭结构，造成了机械结构的复杂性。

西门子永磁式电动机的转子结构如图 2-3 所示。转子与压铸笼连在一起且为嵌入式磁体结构，磁体和转子轴之间没有磁性材料，致使漏磁最小。而且，每个磁体还设有独立的磁体电路。

混合式永磁磁阻电动机的转子结构如图 2-4 所示。永

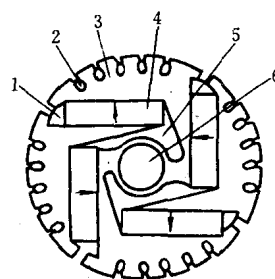


图 2-3 西门子永磁式电动机的转子结构
 1—非磁性衬垫 2—笼条 3—与压铸笼连在一起的层压片 4—磁体 5—非磁性衬垫 6—非磁性轴 → 起始磁化方向

磁通通的磁路和磁阻作用磁通的磁路基本是并行的,且起动时磁通磁路为低磁阻。磁阻的作用取决于磁极的凸出程度和磁通挡板的宽度,磁极弧度大小对电动机的输出转矩有决定性的影响。极靴宽度对电动机性能的影响见表 2-3。

表 2-3 极靴宽度对电动机性能的影响

极靴宽度 cm	空载电流 A	输出功率 W	最大效率 (%)	最大功率 因数
0.24	4.50	2980	78	0.63
0.48	4.08	2630	76	0.61
0.95	3.47	1970	72	0.59
1.59	3.53	1410	68	0.54

45kW 永磁式同步电动机的转子结构如图 2-5 所示。磁体截面呈矩形且相邻磁体按 T 形排列,磁体和非磁性轴之间设有铁桥。这种转子结构的设计特点是气隙的磁通密度超过了磁体的磁通密度以及每极的总磁通超过了每个磁体的总磁通。磁性材料可选用价廉的钡 (Barium) 或锶 (Strontium) 铁氧体材料或稀土族磁性合金。

3. 永磁式电动机的等效电路

凸极式同步电动机的等效电路如图 2-6 所示。

根据相量图理论可知,定子每相端电压的表达式为:

$$\bar{U}_a = (r + jX_q)\bar{I}_a + j(X_d - X_q)\bar{I}_a + \bar{E}_0 \quad (2-1)$$

式中, r 为定子电阻; X_q 为 q 轴电抗; X_d 为 d 轴电抗; $\bar{I}_a$ 为定子电流 $\bar{I}_a$ 的 d 轴分量; $\bar{E}_0$ 为开路电压。

$$j(X_d - X_q)\bar{I}_a = (R + jX)\bar{I}_a \quad (2-2)$$

$$R = (X_d - X_q)\sin\gamma\cos\gamma \quad (2-3)$$

$$X = (X_d - X_q)\sin^2\gamma \quad (2-4)$$

γ 为电动机的电枢反应角,即 $\bar{E}_0$ 与 $\bar{I}_a$ 之间的夹角。

R 和 X 取决于电动机的运行条件。可以证明,对于永磁式电动机当 $X_d < X_q$ 时, X 总是负值。 R 则依据于电动机的励磁情况可正可负。事实上,由于电枢反应具有去磁影响,故 R 为负值。

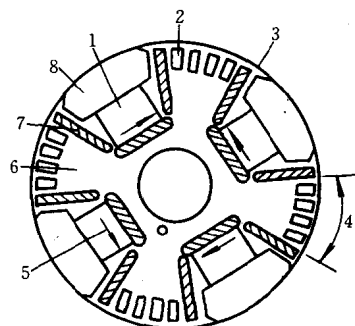


图 2-4 混合式永磁磁阻

电动机的转子结构

- 1—磁体 2—笼条 3—极靴宽度(0, 25cm)
4—磁极弧度(46.74°) 5—起始磁化方向
6—转子铁心 7—磁通挡板
8—通道(内含铜铝条)

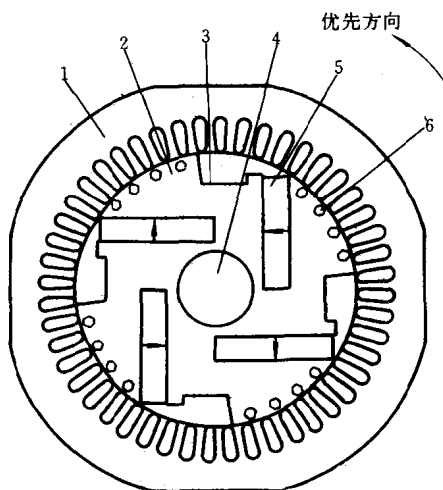


图 2-5 45kW 永磁式同步电动机的转子结构

- 1—定子铁层压片 2—转子铁层压片 3—非
磁性材料 4—非磁性钢轴 5—磁体 6—转
子笼条 (圆形) → 起始磁化方向

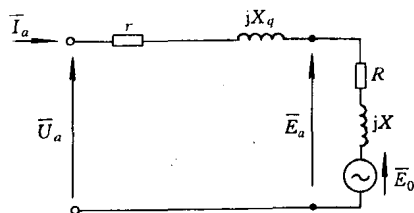


图 2-6 凸极式同步电动机的等效电路

由图 2-6 推算的电动机功率表达式为:

$$U_a I_a \cos \varphi = r I_a^2 + (X_d - X_q) \sin \gamma \cos \gamma I_a^2 + E_0 I_a \cos \gamma \quad (2-5)$$

式中, φ 为电动机的功率因数角。

由式 (2-5) 可见, 电动机的输入功率一部分消耗于定子电阻, 另一部分通过 P_M 和 P_R 传输到转子中去。

$$P_M = E_0 I_a \cos \gamma \quad (2-6)$$

$$P_R = \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \left(U_a E_0 \sin \delta - \frac{U_a^2}{2} \sin 2\delta \right) \quad (2-7)$$

式中, δ 为电动机的负载角。

d 轴电抗 X_d 和 q 轴电抗 X_q 的表达式为:

$$X_d = X_q + \frac{E_a - E_0}{I_a \sin \gamma} \quad (2-8)$$

$$X_q = \frac{U_a \sin \delta}{I_a \cos \gamma} + r \tan \gamma \quad (2-9)$$

$$\text{式中, } E_a = \frac{U_a \cos \varphi - r I_a}{\cos \gamma} \quad (2-10)$$

为了说明电动机空载和负载的损耗情况, 引入图 2-7 所示的永磁式同步电动机的等效电路。在忽略定子电阻的情况下, 则有:

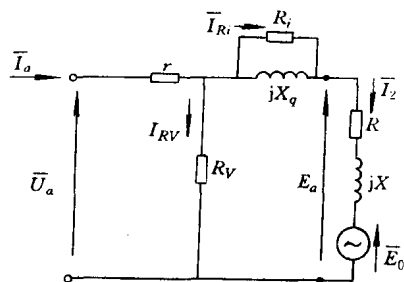


图 2-7 永磁式同步电动机的等效电路

$$\bar{U}_a = \frac{j R_i X_q}{R_i + j X_q} \bar{I}_2 + (R + j X) \bar{I}_2 + \bar{E}_0 \quad (2-11)$$

$$\bar{I}_{R_i} = \bar{I}_2 \frac{j X_q}{R_i + j X_q} \quad (2-12)$$

通过变换所得的 R_i 功率损耗的表达式为:

$$P_{R_i} = \frac{R_i X_q^2}{\Delta} (U_a^2 + E_0^2 - 2 U_a E_0 \cos \delta) \quad (2-13)$$

$$\text{式中, } \Delta = (R_i R - X_q X)^2 + [R_i X + X_q (R_i + R)]^2 \quad (2-14)$$

图中, 参数 R_v 及 R_i 可通过电动机试验数据进行计算获得。

三、高磁永磁式同步电动机控制系统

1. 同步电动机开环调速系统

永磁式同步电动机的转子结构如图 2-5 所示, 其结构特点是气隙磁通密度超过磁体磁通密度且直轴磁阻大于交轴磁阻, 致使磁阻转矩增加和扩大了稳定工作范围。转子所选用的磁性材料为钐-钴 (Samarium-Cobalt) 稀土族磁性材料。电机定子绕组绕制在 D60 框架上且为 4 极绕组, 产生的连续转矩为 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

同步电动机由电压型逆变器供电。逆变器由 6 个输出极模块组成且每相由两个模块并联而成。每极模块采用 220V, 9A 功率场效应管 (MOSFET) 作为主开关器件, 其等值正弦输出为 $350 \text{ V} \cdot \text{A}$ 。控制系统总体示意图和极模块电路开关辅助网络分别如图 2-8a 和图 2-8b 所示。开关辅助网络能保证并联模块之间良好的瞬间负荷分配和防止 MOSFET 的主体二极管损坏。逆变器采用载波频率为 19.2 kHz 的脉宽调制控制, 脉宽调制由 8 位微处理器 (Intel8085) 和小型数字电路实现。

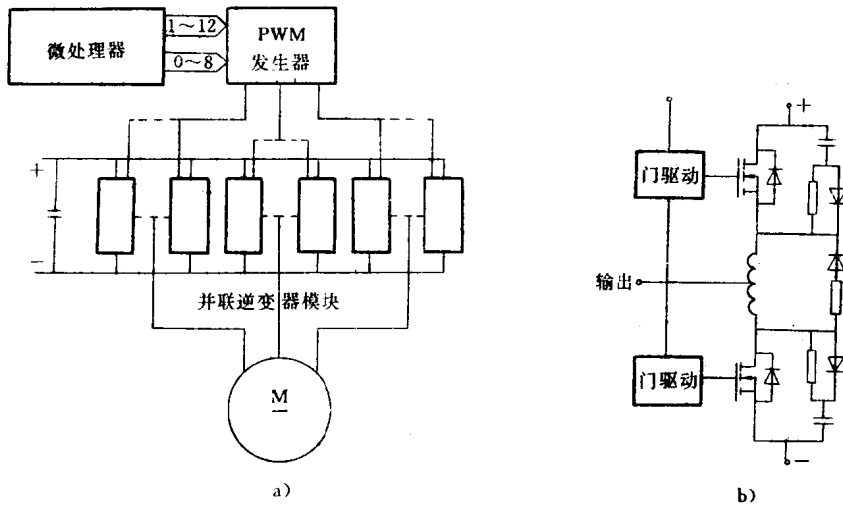


图 2-8 同步电动机的控制系统

a) 总体示意图 b) 极模块电路开关辅助网络

控制系统的标准模型必须同时考虑逆变器和同步电动机两个主要组成部分。逆变器可用理想三相正弦电压源和每相串联电阻的组合来表示，而串联电阻则表示功率半导体器件的导通损耗和负载有关的开关损耗。逆变器、永磁式电动机、控制系统的等效电路分别如图 2-9a、

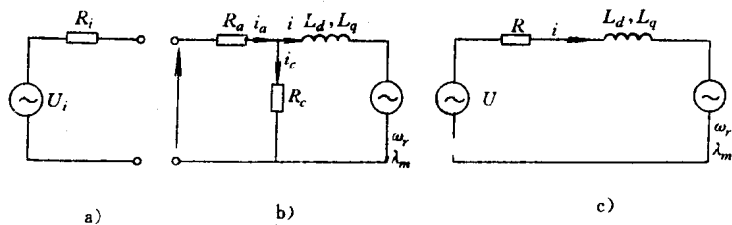


图 2-9 逆变器、永磁式电动机和控制系统的等效电路

a) 永磁式电动机 b) 逆变器 c) 控制系统

 R_i —逆变器输出电阻 R_a —定子电阻 R_c —铁心损耗电阻 L_d —直轴同步电感 L_q —交轴同步电感 ω_r —转子同步速度 λ_m —电动机励磁磁链

b、c 所示。电压源 U 和电阻 R 的表达式为：

$$U = \frac{U_i R_c}{R_i + R_a + R_c} \quad (2-15)$$

$$R = \frac{(R_i + R_a) R_c}{R_i + R_a + R_c} \quad (2-16)$$

控制系统电气性能的表达式为：

$$-U \sin \delta = R_{id} + \frac{d}{dt} \lambda_d - \lambda_q \omega_r \quad (2-17)$$

$$U \cos \delta = R_{iq} + \frac{d}{dt} \lambda_q + \lambda_d \omega_r \quad (2-18)$$

式中， λ_d 为直轴磁链； λ_q 为交轴磁链； δ 为负载角； ω_r 为转子同步速度。

电动机电磁转矩表达式为：

$$T_e = \frac{3}{2} P (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (2-19)$$

$$T_e = \frac{J}{P} \frac{d}{dt} \omega_r + \frac{B}{P} \omega_r + T_L \quad (2-20)$$

式中, P 为极对数; J 为转动惯量; B 为粘性摩擦系数; T_L 为负载转矩, i_d 为直轴定子电流; i_q 为交轴定子电流。

驱动系统动态方程可用一组一阶微分方程表示, 即:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \delta &= \omega_s - \omega_r \\ \frac{d}{dt} \omega_r &= \frac{3}{2} \frac{P^2}{J} [\lambda_m i_q + (L_d - L_q) i_q i_d] - \frac{B}{J} \omega_r - \frac{B}{J} T_L \\ \frac{d}{dt} i_d &= -\frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} i_q \omega_r - \frac{U}{L_d} \sin \delta \\ \frac{d}{dt} i_q &= -\frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} i_d \omega_r - \frac{\lambda_m}{L_q} \omega_r + \frac{U}{L_q} \cos \delta \end{aligned} \right\} \quad (2-21)$$

式中, ω_s 为供电电源频率。

控制系统的线性化的小信号状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta \delta} \\ \dot{\Delta \omega_r} \\ \dot{\Delta i_d} \\ \dot{\Delta i_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J} & \frac{3P^2}{2J} (L_d - L_q) i_q & \frac{3P^2}{2J} [\lambda_m + (L_d - L_q) i_d] \\ -\frac{U}{L_d} \cos \delta & \frac{L_q}{L_d} i_q & -\frac{R}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \omega_r \\ -\frac{U}{L_q} \sin \delta & -\frac{(\lambda_m + L_d i_d)}{L_q} & -\frac{L_d}{L_q} \omega_r & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega_r \\ \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

$$\dot{\Delta} = \frac{\partial \Delta}{\partial t}$$

实验结果表明, 当永磁式同步电动机运行于超前功率因数时, 控制系统难以稳定运行, 而电动机运行于高滞后功率因数时, 控制系统能在整个频率和负载范围内稳定运行。通过测量逆变器的输出相电压和相电流, 并调节逆变器电压以维持固定的相角, 则能保证永磁式电动机运行于固定的功率因数。

带功率因数控制的控制系统原理图如图 2-10 所示。相角测量的电压参考信号直接来自于 PWM 控制电路, Φ_{set} 与 Φ_m 之差乘以合适增益而获得逆变器的误差电压 ΔU , 误差信号加设死区以防止设定点出现振荡。当瞬时加速和减速时, 逆变器电压作为频率函数而被确定, 且永磁式电动机过激励而进一步改善稳定性能。

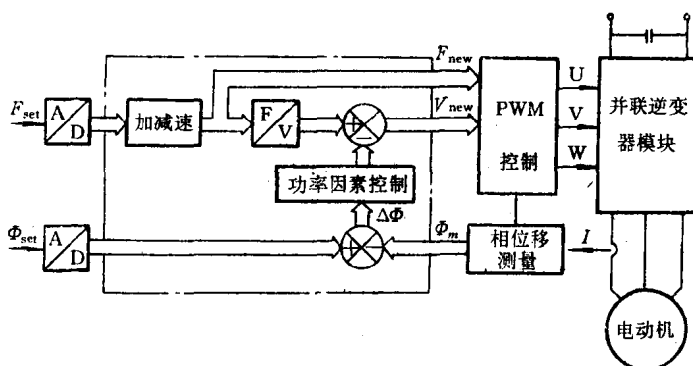


图 2-10 带功率因数控制的控制系统原理图