

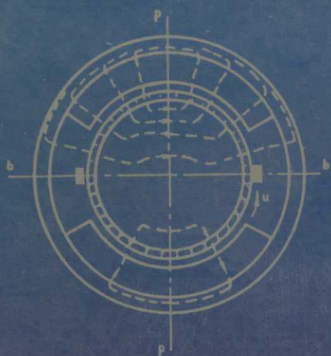
永磁 直流微电机

(原理、设计及稳速系统)

王宗培 主编



东南大学出版社



ISBN 7-81023-692-X

TM · 1 定价: 9.00 元

永磁直流微电机

(原理、设计及稳速系统)

王宗培 主编

东南大学出版社

(苏)新登字第 012 号

内 容 简 介

本书系统地叙述了永磁直流微电机的工作原理、计算和设计方法;介绍了永磁直流微电机的机辅设计和优化设计方法,并给出了永磁直流微电机的校核计算程序、综合程序和优化程序;对永磁直流微电机的稳速系统作了较全面的介绍,并对电子稳速系统作了详尽的分析。

可供微特电机的研制、使用人员及高等学校有关专业的师生参考。

责任编辑 朱珉

永磁直流微电机

王宗培 主编

东南大学出版社出版发行

南京四牌楼 2 号

南京佳美电脑印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/32 印张 17.3 字数 389 千

1992 年 11 月第 1 版 1992 年 11 月第 1 次印刷

印数: 1—2000 册

ISBN7-81023-692-X

前 言

由于永磁材料的发展,特别是铁氧体永磁材料性能指标的改进,促进了永磁直流微电机的迅速发展,使它成为微型电机中应用广泛、产量最大的一种类型。

本书的前半部分,系统地叙述永磁直流微电机的原理与设计。原理部分结合设计部分的要求来讲,包括机电能量转换的基本原理、转矩系数和电势系数、永磁磁路的静态和动态工作点、电枢反应、换向、电动机的基本参数和运行分析等。设计部分包括:性能与主要尺寸之间的关系、主要尺寸、永磁体尺寸、冲片尺寸及绕组数据的确定,给出电磁计算的程序和计算实例,计算机辅助和优化设计方法。本书的后半部分为永磁直流微电机的稳速系统,对直流微电机的稳速系统进行了较系统的介绍。对电子稳速系统作比较详尽的分析,包括它的作用原理、稳定性分析、稳速精度计算和稳速系统的设计等。作为实例,分析和介绍了具体的盒式录音机电动机的稳速电路。

在编写本书时,力求理论结合实际,所引用的数据及计算例题等,都取自国内外的样机和实物,书中的内容,有一些是传统的电机理论著作中还没有分析过的问题,反映了作者在实际工作中的经验和研究成果,例如少槽电机在原理和设计方面的特点;铁氧体永磁直流微电机设计和计算方面的一些特殊问题;电子稳速电路的若干分析等等。

本书由王宗培主编。第一章由丁金全编写,第二到第八章由王宗培、卢道英编写,第九、十章由刘宝廷、程树康编写,第十一到第十四章由胡方兴、王晓明编写。

刘大椿同志审阅了本书稿，并提出了宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。由于水平有限，书中可能会有不少缺点、错误，欢迎读者指正。

作者于 1990 年 4 月

目 录

第一章 概述	1
§ 1-1 永磁直流微电机的特点、用途及分类	1
§ 1-2 各类永磁直流电机的特点及发展	2
§ 1-3 基本技术要求	16
§ 1-4 型号命名和相应的标准	16
第二章 永磁直流电动机的工作原理	19
§ 2-1 单个线圈电枢的电磁转矩	19
§ 2-2 单个线圈电枢的感应电势	21
§ 2-3 电磁功率与可逆原理	23
§ 2-4 多个线圈的电枢	24
§ 2-5 电枢铁心槽内线圈的转矩与电势	26
§ 2-6 电势系数(K_e)和转矩系数(K_T)	
§ 2-7 三槽电动机	32
§ 2-8 电动机的损耗	38
第三章 空载磁路及其计算	42
§ 3-1 永磁直流微电机的磁路	42
§ 3-2 永磁磁路的一般特性	43
§ 3-3 瓦片形永磁体电动机的磁路计算	57
§ 3-4 环形永磁体电动机的磁路计算	60
§ 3-5 永磁电动机主磁路计算的特点	63
§ 3-6 漏磁导的计算	77
第四章 永磁磁路的动态工作点及电枢反应	90
§ 4-1 均匀磁化永磁体在均匀外磁场 作用下的动态工作点	90

§ 4—2	简单的永磁磁路的动态工作点	94
§ 4—3	理想化的电枢	98
§ 4—4	电枢反应	100
§ 4—5	可逆与不可逆去磁	102
§ 4—6	电刷不在几何中性线的影响	103
§ 4—7	少槽电机电枢反应的特殊问题	104
第五章	永磁直流微电机的换向	108
§ 5—1	换向的经典理论	108
§ 5—2	电感电势及其计算	115
§ 5—3	换向区	121
§ 5—4	换向过程的其它影响	124
§ 5—5	电刷及其选用	129
§ 5—6	压敏电阻	142
第六章	永磁直流微电机的稳态运行	145
§ 6—1	永磁直流微电机的机电模型	145
§ 6—2	永磁直流微电机的工作特性	151
§ 6—3	调整特性曲线族及若干参数的较精确值	159
第七章	小容量永磁直流电动机设计	163
§ 7—1	基本技术要求	163
§ 7—2	设计的一般考虑	168
§ 7—3	电机常数与主要尺寸的确定	174
§ 7—4	电磁负荷比与主要尺寸确定	179
§ 7—5	永磁体尺寸的确定	181
§ 7—6	电枢铁心	184
§ 7—7	电枢绕组	187
第八章	电磁计算程序及例题	191
§ 8—1	电磁核算举例	191
§ 8—2	电磁方案的分析与讨论	120
§ 8—3	样机分析及改进	205

第九章 永磁直流电动机计算机辅助设计	121
§ 9-1 概述	212
§ 9-2 曲线拟合	213
§ 9-3 插值法	218
§ 9-4 非线性方程组的数值解法	222
§ 9-5 校核程序的编制	227
§ 9-6 校核程序的例	232
§ 9-7 设计综合程序的例	245
第十章 永磁直流电动机的优化设计	268
§ 10-1 优化设计	268
§ 10-2 优化设计的数学描述及基本概念	269
§ 10-3 网格法	272
§ 10-4 罚函数法	273
§ 10-5 无约束问题的一维寻优方法	278
§ 10-6 胡克—吉夫斯法(Hooke—Jeeves)	285
§ 10-7 鲍威尔法(Powell)	291
§ 10-8 单纯形法	295
§ 10-9 电机优化程序的编制	307
第十一章 永磁直流微电机稳速系统综述	330
§ 11-1 永磁直流微电机稳速技术的发展	330
§ 11-2 转速、转速变动及稳速指标	332
§ 11-3 永磁直流电动机的控制模型和电路模型	336
§ 11-4 永磁直流微电机稳速系统的基本原理	344
§ 11-5 机械稳速电动机	345
§ 11-6 电子稳速电动机	352
§ 11-7 电压伺服电动机	356
§ 11-8 频率伺服电动机	359
§ 11-9 锁相伺服电动机	364
§ 11-10 其它类型的直流微电机稳速系统	374

§ 11-11 小结	374
第十二章 电子稳速电路的原理与分析	377
§ 12-1 电子稳速电路的基本原理	380
§ 12-2 盒式录音机电机电子稳速电路分析	386
§ 12-3 国外盒式录音机稳速电路分析	400
§ 12-4 小结	420
第十三章 电子稳速系统动、静态分析	424
§ 13-1 系统的概述及线性定常系统的假设	425
§ 13-2 系统的传递函数和方块图	427
§ 13-3 系统稳定的充要条件	435
§ 13-4 系统的相对稳定性	436
§ 13-5 系统的稳态分析	440
§ 13-6 系统相对稳定性的计算实例	442
§ 13-7 电子稳速电动机的稳速精度	446
§ 13-8 稳速精度的计算实例	462
第十四章 电子稳速电路参数的分析与设计	466
§ 14-1 基本电子稳速电路及其参数	467
§ 14-2 给定技术指标	469
§ 14-3 总体考虑	471
§ 14-4 电子稳速系统温度特性的分析	478
§ 14-5 电子稳速系统转速稳定度的分析	499
§ 14-6 电子稳速电路的设计要点	535

第一章 概 述

i-1 永磁直流微电机的特点、用途及分类

永磁直流微电机是由永磁体建立磁场的直流微电机。它除了具有一般电磁式直流电动机所具备的良好的机械特性和调节特性，可以用于要求起动转矩高、转速变化范围较大和配上稳速器后在电源电压及负载变动情况下要求转速稳定的场合外，还具有体积小、效率高（无激磁损耗）、结构简单等优点。特别是在小功率 100 W 以下的直流电机中，这些优点尤为突出。近年来，电子技术飞速发展，逻辑、固态器件的使用，扩大了电机的应用范围，出现了以可控硅、线性放大器、脉宽调制放大器为基础的电机控制装置；高性能、低成本的永磁材料的大量出现，如廉价铁氧体永磁和高性能的稀土永磁的广泛应用，使永磁直流微电机在近十年来出现了前所未有的发展。据资料报导，在 500 W 以下的直流微电机中，永磁式占 92%，而 10 W 以下的永磁式占 99%，据日本 1982 年报导，日本传统式永磁直流微电机日产量已超过 100 万台（包括简易型的玩具电机在内），西德 1981 年永磁直流微电机年产量亦达 2000 万台。我国永磁直流微电机的年产量也近 600 万台左右，可见永磁直流微电机发展之快。

永磁直流微电机的应用领域是十分广泛的，从便携式的电子设备，如各种游艺机、录音机、电唱机、剃须器、清扫

机、除尘器、自行车、汽车等，从家用电器到一些要求良好动态性能的精密速度和位置驱动系统即增量运动系统（如录像机、磁带机、精密机床、计算机外部设备及宇航等领域）都大量应用永磁直流微电机。

为适应不同的应用需要，永磁直流微电机的新结构和新品种不断增加，其分类也可有多种方法。

按电机的性能和特性可分为经济型（普及型）、精密型和动力型。它们之间并无明显的界线，只是精密型更强调控制性能而已。

按运动方式分类，又可分为旋转式和直线式两种。

按其结构特点可分为直流直线电动机及旋转式直流电动机。旋转式直流电动机又可分为：

有槽结构：

{ 传统式永磁直流电机
 直流力矩式电动机

无槽结构：

{ 有铁芯——无槽电枢直流电动机

 无铁芯 { 空芯杯电枢直流电动机
 印刷绕组直流电动机
 线绕盘式直流电动机

无刷结构：无刷直流电动机。

§ 1-2 各类永磁直流电机的特点及发展

一、传统结构永磁直流电动机

这类电机除采用永磁体激磁外，在结构上与电磁式直流

电动机无太大的区别，电枢铁芯仍以有槽的冲片叠制而成，电枢绕组安放在槽中，这是直流电动机中使用最广泛、产量最大的一种。目前录音机电机、电动玩具、电动剃须器等常用的三槽电枢电机就属于这一类。现在国外批量生产的简易小型永磁直流微电机价格仅 1.5~2 元。其原理如图 1-1。

目前国内生产 M 系列驱动用永磁直流电动机共 4 个机座号（定子外径 $\phi 20$ 、28、36、45 mm）65 个品种，是机械工业部系列，电子工业部、航空工业部等厂家也均有生产。SY 系列控制用永磁直流伺服电动机共 8 个规格（机座号分别为 $\phi 12$ 、16、20、24、

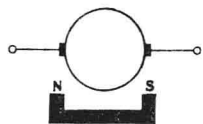


图 1-1 传统结构永磁直流电动机原理图

28、32、36、45 mm)。录音机等常用的三槽铁氧体永磁直流微电机，电子工业部的青峰机械厂、青岛微电机厂、上海复旦电容器厂及机械工业部的天津微电机厂等均有生产。国外以日本的产品在国际市场上声誉较高，松下 (National)、马渊 (Mabuchi)、三协 (San-Kyo) 等公司的产品质量较好。

二、无槽电枢表面绕组电机

无槽结构电机是适应一些对控制要求较高的应用而发展起来的。这种电机的共同特点是由于电枢不开槽，无齿磁密饱和，磁密可选得比较高，转动惯量小、转矩波动小、换向良好、电机寿命长、动态响应好，因此也称为低惯量电机。

无槽电枢表面绕组电机是 60 年代初，日本安川电机制作公司首先研制成功的，称为“Minertia motor”。这种电机除电枢上无槽及线圈直接被绑扎固定在铁芯表面外，与传统

式电机无什么差别，只是转子做成细长以便在减小惯性时尽量增大转矩，能在高速、快速响应下工作。结构如图 1-2。

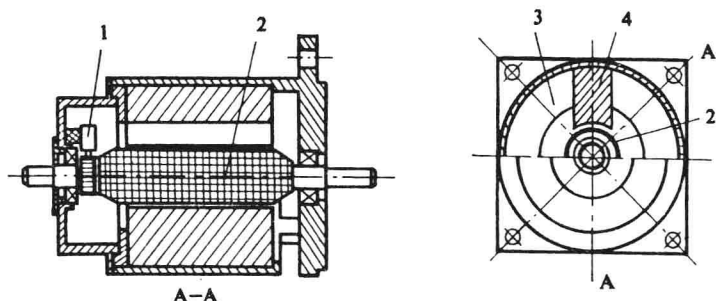


图 1-2 永磁式直流无槽电枢电动机结构图

1 — 电刷； 2 — 电枢； 3 — 永磁体； 4 — 磁极

这种电机气隙较大，气隙磁密可取得比一般传统电机大 1.5~2 倍，可达 1.1~1.7T，因而时间常数降低到 $1/4 \sim 1/9$ ，机电时间常数一般在 10 ms 左右，个别产品可达 0.75ms。与传统式有槽电机比较，转子铁芯直径之比为 0.43:1，铁芯长度之比为 2.5:1，体积之比为 0.4:1，重量之比为 0.3:1，转动惯量为传统电机的 10%。这就带来一系列优点：最大转矩可达额定转矩的 10 倍，由于转子不开槽，无齿槽效应，低速运行仍很平稳可靠，转矩波动只有 1~3%，（一般有槽电机为 7~10%），而且在脉冲电流很大（过载 10 倍）的情况下，电机的转矩——电流之间的关系线性度好。这类电机适合于各种功率负荷以及承受较大过载等工业自动化设备上，如磁带机、数控机床等。安川公司新产品机电时间常数为 0.75~4.7ms。

我国上海微电机研究所也研制过这种电机，时间常数为 10 ms 左右。

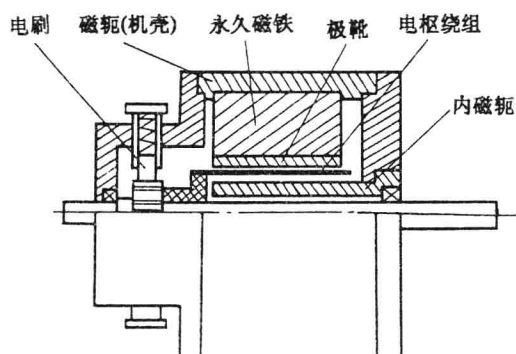
但是，由于无槽电枢电机的绕组直接分布在光滑的电枢表面，以环氧玻璃布带固定，对高速产品，往往需要采用特殊固定以防止较大的离心力和电磁拉力的破坏，工艺复杂。由于气隙较大，所以这种电机的定子磁体尺寸一般较大。此外，因为转子有铁芯，在高频高速情况下运行，铁损较大，特别是对小功率电机，铁损占总损耗的比例大，电机效率就低了，对以电池为电源的电机，过大的功耗是不允许的，要进一步降低损耗、提高伺服响应能力，就要去掉铁芯，这就是无铁芯电机。

三、空芯杯电枢永磁直流微电机

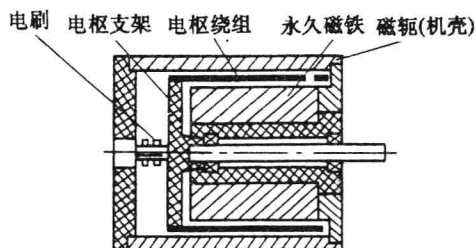
无铁芯电动机是近十几年新发展起来的一种高性能永磁直流电机。主要特点是电枢无铁芯，铁芯仅作为定子的一部分，电机运行时，仅电枢线圈旋转，故又称为动圈式电动机。定子永磁体产生的磁通与转子绕组上流过的电流相互作用产生转矩。

根据永磁体安放位置不同，该种电机有内磁式和外磁式两种结构（见图 1-3），电枢绕组按一定形式（直绕组或斜绕组）编织成薄壁圆筒状后用环氧树脂粘结成型与电枢支架粘结在一起呈杯子状。

这种电机在国外已系列化生产。西德、瑞士、荷兰、日本、英国、法国、美国和苏联均大量生产。电机尺寸从 $\phi 10 \sim 250$ mm，输出功率从零点几瓦到 5 kW 等数十种规格。据报导仅西欧年产量已超过 200 万台。其中西德、瑞士主要生产小机座号电机，还专门配有减速齿轮头，减速比由 3.45 : 1 至 98344 : 1。功率较大的电动机则与直流测速机或



(a) 外磁式



(b) 内磁式

图 1-3 空芯杯电枢永磁式直流电动机结构

其它速度传感器配套成组件。美、苏、英、日生产的这类电机主要用于磁带上作主导轮驱动电机。机电时间常数小于

1 ms 的称为超低惯量电机。目前这类电机以美国的 EC 公司、Micro switch 公司、日本的松下电器公司、安川公司、西德的福尔哈贝公司、瑞士的 Potescap、Minimotor 公司产品性能最优。瑞士、西德、日本、美国已获得制造该种电机电枢的专利。

这种电机因铁损为零，效率很高，目前最高效率达 80% 以上。目前最低惯量是采用在转轴上加钛金属的美国产品，电枢惯量降低到 $0.05 \text{ N} \cdot \text{cm}^2$ (1977 年数据)。IBM 公司采用陶瓷做转轴，质轻、弹性模量高。由于无铁芯电机惯量小、电感低(仅为有铁芯电机的 $1/10 \sim 1/100$)，因此整流好，电流对电压的响应好，控制性能优良，电机的理论加速度高，目前的最好水平是 1700000 rad/s (EC 公司 M-1600 电机)，灵敏度高，可成功地完成每秒 500 次起停。目前世界上空芯杯无铁芯永磁直流微电机最小机电时间常数为 0.31 ms (Micro switch 公司产品)。由于换向性能好，在小机座号产品中电刷又采用贵金属合金，典型产品寿命达 10000 h，伺服电机使用的电刷寿命达 20000 h，在较大容量的产品中一般用银石墨电刷。在某种意义上说，这时的电机寿命已不由电刷决定而取决于轴承了。

这类电机我国有不少厂家生产，上海微电机研究所、苏州电讯电机厂、成都电机厂、重庆微电机厂等均生产，机座号从 $\phi 16 \sim 110 \text{ mm}$ 。上海微电机研究所与苏州电讯电机厂共同研制的 130 W 超低惯量电机的机电时间常数达到 0.47 ms 。

1976 年日本奥林派司光学工业公司和奥林派司精机公司研究出一种新的无铁芯电机，取消了空芯杯电枢那种悬臂