



SHIYOU

中等专业学校教学用书

微 电 机

高敬德
编

石油工业出版社

前 言

本书是根据石油天然气总公司人事教育部（原石油工业部教育司）1986年11月制订的中等专业学校地震勘探仪器和石油地球物理测井专业“微电机教学大纲”编写的。

本书的主要内容包括驱动微电机和控制微电机。驱动微电机包括：微型直流电动机、微型异步电动机和微型同步电动机。控制微电机包括：伺服电动机、测速发电机、步进电动机、自整角机和旋转变压器。主要讲授各种电机的基本结构、工作原理、主要特性及使用注意事项。为了方便读者的选用，还收集了一些常用微电机的技术数据。

本书是为学过数学和电工学而没学过电机的读者编写的。书中插图较多，文字通俗易懂，物理概念清楚，内容具有一定的深度。

本书由石油天然气总公司中专教材编审委员会确定为石油中等专业学校地震勘探仪器和地球物理测井专业“微电机”课试用教材。本书也可作为中等专业学校自动化、仪器仪表等专业的教学参考书，还可供有关的中等技术人员参考。

本书在编写过程中曾得到华北石油学校王锡元老师（工程师）、天津市微电机公司潘泳台工程师等大力支持和帮助。天津大学自动化系电机教研室黄兴山副教授审阅了全书。在此，一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限，加之经验不足，错误和不妥之处一定不少，敬请读者批评指正。

编者 1987.12

目 录

绪论	(1)
第一章 基本定律	(3)
第一节 电磁力定律	(3)
第二节 电磁感应定律	(3)
第三节 电路定律	(5)
第四节 磁路及其定律	(6)
第五节 电机的损耗与定额	(7)
第二章 微型直流电动机	(8)
第一节 原理性直流电动机	(8)
第二节 微型直流电动机的结构	(9)
第三节 直流电动机的电枢绕组	(11)
第四节 电枢绕组的感应电势与电磁转矩	(15)
第五节 直流电动机的电枢反应	(18)
第六节 直流电动机的换向	(20)
第七节 直流电动机的工作分析	(21)
第八节 直流电动机的特性	(24)
第九节 串励电动机	(28)
第十节 无刷直流电动机	(30)
小结	(31)
复习题	(32)
部分微型直流电动机的技术数据	(32)
第三章 微型异步电动机	(34)
第一节 微型三相异步电动机的基本结构	(34)
第二节 定子绕组	(35)
第三节 旋转磁场与感应电势	(39)
第四节 三相异步电动机的工作分析	(45)
第五节 三相异步电动机的机械特性	(50)
第六节 三相异步电动机的起动、反转和调速	(53)
第七节 单相异步电动机	(54)
小结	(59)
复习题	(60)
部分微型异步电动机的技术数据	(61)
第四章 微型同步电动机	(63)
第一节 概述	(63)
第二节 永磁式同步电动机	(63)

第三节	磁阻式同步电动机	(66)
第四节	磁滞式同步电动机	(67)
第五节	低速同步电动机	(69)
第六节	TD 型同步电动机	(72)
小结		(72)
复习题		(73)
部分微型同步电动机的技术数据		(73)
第五章	伺服电动机	(76)
第一节	概述	(76)
第二节	直流伺服电动机	(77)
第三节	交流伺服电动机	(80)
小结		(84)
复习题		(84)
部分伺服电动机的技术数据		(84)
第六章	测速发电机	(89)
第一节	概述	(89)
第二节	直流测速发电机	(90)
第三节	异步测速发电机	(93)
小结		(95)
复习题		(95)
部分测速发电机的技术数据		(96)
第七章	步进电动机	(97)
第一节	概述	(97)
第二节	反应式步进电动机基本工作原理	(97)
第三节	单段反应式步进电动机	(98)
第四节	步进电动机的特性	(100)
第五节	步进电动机的选用	(101)
第六节	步进电动机的驱动电源	(102)
小结		(103)
复习题		(103)
部分步进电动机的技术数据		(103)
第八章	自整角机	(105)
第一节	概述	(105)
第二节	力矩式自整角机	(106)
第三节	控制式自整角机	(108)
第四节	自整角机的多台运行	(110)
第五节	自整角机的选用	(111)
小结		(111)
复习题		(111)
部分自整角机的技术数据		(112)

第九章 旋转变压器..... (114)

第一节 概述..... (114)

第二节 正余弦旋转变压器..... (115)

第三节 线性旋转变压器..... (118)

第四节 旋转变压器的特性..... (120)

第五节 旋转变压器的选用..... (120)

小结..... (121)

复习题..... (121)

部分旋转变压器的技术数据..... (122)

附录一 微电机型号编制方法..... (125)

附录二 实验指导书..... (130)

主要参考书..... (134)

绪 论

微电机是指尺寸和容量较小的一类电机。微电机分驱动微电机与控制微电机。

驱动微电机是驱动各种小型运动体的电机。一般是指机壳外径不大于 160mm 或轴的中心高不大于 90mm, 功率从几瓦到 750W 的小电机。驱动微电机分为: 微型直流电动机、微型异步电动机和微型同步电动机等。

控制电机是指在自动控制系统与计算装置中用作执行、检测、解算元件的电机。它的机壳外径从 12.5mm 到 130mm, 功率从数百毫瓦到数百瓦。控制电机分为: 伺服电动机、测速发电机、步进电动机、自整角机和旋转变压器。

驱动微电机的结构、工作原理、分析方法与一般电机相同。控制电机与一般电机也没有本质区别。驱动微电机着重于起动和运转状态的能力指标, 而控制电机则着重于特性的高精度和快速响应。

微电机广泛应用于工业、农业、交通、国防、科技和日常生活等各个方面。驱动微电机用于各种电动工具、日用电器、医疗器械、自动记录仪表、钟表、音像设备、计算机和无线电探测装置等设备中。控制电机更是工业自动化系统、现代科学技术和军事装备中必不可少的重要元件。它的使用非常广泛。例如, 火炮和雷达的自动定位、舰船方向舵的自动操纵、飞机的自动驾驶、机床加工过程的自动控制和显示以及电子计算机、自动记录仪表、音像设备等装置中均离不开控制电机。

微电机在测井仪器中也有很多应用, 例如在 JD-581 多线井下电测仪中就用了九台微电机。调试时作为动力的是一台直流电动机; 带动机械换流装置的是一台单相异步电动机; 带动时钟的是一台同步电动机; 进行角度变换和接收的用了五台自整角机; 仪器上还用了一台测速发电机。

微电机是电机工业中的一个新兴部门, 它随着工业自动化、科学技术和军事装备的发展而迅速发展起来。

我国的微电机工业是从 50 年代后期才发展起来的, 现在微电机的生产厂家遍及全国, 产品的数量和品种已能满足需要。由于我国微电机发展历史较短, 在产品的数量、品种及性能方面与国际先进水平还有一定差距。个别产品如卫星姿态控制电机已达到当今国际先进水平, 还有一些产品达国际 70 年代水平, 其它则相当于国际 60 年代水平。

近几年来由于电子技术的飞速发展, 推进了工厂自动化、办公室自动化及家庭自动化, 因而驱动微电机得到了很快的发展。在工业发达的国家里, 驱动微电机年产量均以数千万台计, 如美国的分马力电动机在 1981 年年产量超过 2 亿台, 又如日本 70W 以下的微电机, 1982 年为 3.5 亿台, 1983 年近 5 亿台, 1985 年约为 6.36 亿台, 1987 年达到 7.8 亿台。在数量飞快增加的同时, 对产品也提出了更高的要求, 除了性能好、效率高、价格便宜外, 还要求控制简单。现今还出现了控制与电机一体化趋向, 如德国一家电机制造厂生产的电动机, 将控制装置放在出线盒里。国外驱动微电机发展的趋向是: 采用计算机辅助设计, 合理选用材料, 改进结构和工艺, 零件标准化和通用化, 提高微电机效率、控制与电机一体化、研制智能电机。

由于自动控制系统的不断完善和宇宙航行等科学技术的飞速发展控制电机得到了很大的发展。在一些科学技术先进的国家，近十几年来，控制电机的年生产增长率约为 10~20%。控制电机的品种日益增多，在原有基础上又生产出无刷直流伺服电动机、无接触式自整角机、多极旋转变压器……。现在对控制电机提出了更高的要求，有许多新的发展方向：其一是提高精度；第二是进一步提高可靠性和适应性，相继研究出各类无刷电机和在各种环境下工作的电机；第三是进一步小型化，简化结构，采用新材料，发展组合电机；第四是发展特殊性能和特殊用途的电机，设计出了低速、低惯量和直线电机；第五是开展新原理、新结构的研究，象霍尔一类电机的研制，已不再限于一般电磁理论，是一门多学科互相渗透的边缘科学。

第一章 基本定律

我们所要研究的电机，是以电、磁的基本定律为理论基础的。先将电、磁基本定律及有关知识简单回顾一下。

第一节 电磁力定律

通电导体在磁场中要受到电磁力的作用。当载流导体与磁力线方向垂直时，导体所受力的大小与导体的电流 I 、磁通密度 B 及导体在磁场中的长度 L 成正比，即

$$F = BLI \quad (1-1)$$

式中 F ——导体受的电磁力，N；

B ——磁通密度，T；

L ——导体有效长度，m；

I ——导体中流的电流，A。

如果磁力线的方向不与导体相垂直，则应将磁通密度分解成两个分量，即与导体垂直的分量和与导体平行的分量。与导体平行的分量不能对导体产生电磁力，式 (1-1) 中的 B 应取与导体垂直的分量。

导体受力的方向，可用左手定则确定。将左手伸开置于磁场中，让磁力线穿入手心，四指指向电流方向，则与四指垂直的拇指指示的便是导体受力的方向，如图 1-1 所示。

在各种电机中，位于转子上的载流导体所受的电磁力，乘以导体至旋转圆心的距离，便可得到转矩 M ，即

$$M = BLIr \quad (1-2)$$

式中 M ——电磁转矩，N·m；

r ——旋转半径，m；

B 、 L 、 I 的含义及单位与式 (1-1) 同。

第二节 电磁感应定律

导体在磁场中作切割磁力线运动，当磁通密度 B 、导体长度 L 和导体运动速度 v 三者互相垂直时，导体中感应电势的大小等于三者的乘积，即

$$E = BLv \quad (1-3)$$

式中 E ——导体中感应电势, V;
 v ——导体的运动速度, m/s;
 B 、 L 的含义及单位同前。

若 B 、 L 、 v 三者不互相垂直时, 导体中的感应电势也可用式 (1-3), 但 B 、 v 对 L 应取互相垂直的分量。

感应电势的方向, 可由右手定则确定。将右手置于磁场中, 让磁力线穿入手心, 姆指指向导体相对磁场的运动方向, 与姆指垂直的四指则指示感应电势的方向, 如图 1-2 所示。

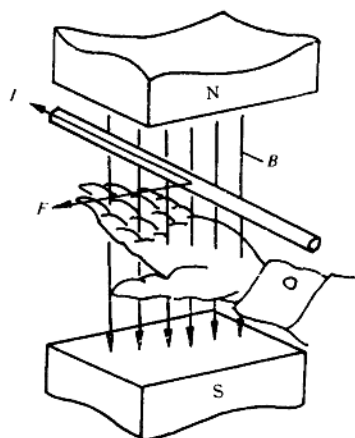


图 1-1 左手定则

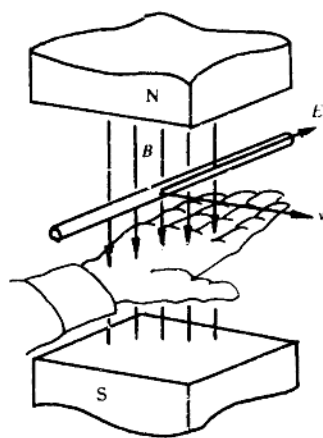


图 1-2 右手定则

线圈中交链的磁通量发生变化时, 线圈中产生感应电势, 其数值与磁通量的变化率 $\frac{d\Phi}{dt}$ 成正比, 其方向总是使它的感应电流产生的磁通阻碍原来磁通量的变化。

按惯例正方向, 即感应电势 E 与磁通 Φ 的正方向符合右手螺旋定则, 感应电势的数字表达式为

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-4)$$

式中 e ——回路中感应电势, V;
 $\frac{d\Phi}{dt}$ ——磁通变化率, Wb/s;
 W ——线圈匝数。

第三节 电 路 定 律

电路定律包括：欧姆定律、克希荷夫第一定律、第二定律。

欧姆定律——在一段电路中，电流 I 与这一段电路两端的电压 U 成正比，与电阻 R 成反比，其表达式为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-5)$$

式中 I ——电流，A；

U ——两端电压，V；

R ——电阻， Ω 。

第一定律——在电路的任一节点上，流入电流等于流出电流，或说电流的代数和为零，

$$\Sigma I = 0 \quad (1-6)$$

第二定律——沿任一回路绕行一周，电势的代数和等于电压降的代数和。在列方程时，需先标出正方向，与绕行方向一致者取正，反之取负，第二定律的表达式为

$$\Sigma E = \Sigma U \quad (1-7)$$

在交流电路中，(1-5)、(1-6)、(1-7) 三个公式应改写成：

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{Z} \quad (1-8)$$

$$\Sigma \dot{i} = 0 \quad (1-9)$$

$$\Sigma \dot{E} = \Sigma \dot{U} \quad (1-10)$$

式中各量均为复数量。

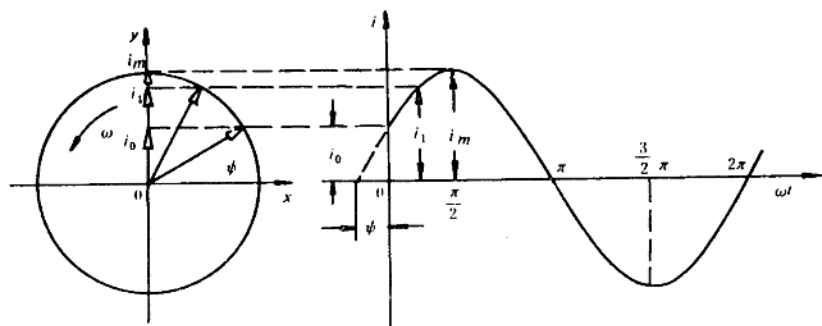


图 1-3 正弦量的曲线表示及向量表示

正弦量可用旋转向量表示：在直角坐标系中画出一个向量，其长度等于交流电量的最大值，与横坐标轴间的夹角等于初相角，按逆时针方向旋转的角速度等于交流电的角速度。旋转向量在纵坐标轴上的投影，即为交流电在这一时刻的瞬时值，如图 1-3 所示。

三相对称系统即三个大小相等，相位互差 120° 的三相交流电，可用三个大小相等互差 120° 电角度的旋转向量表示。

第四节 磁路及其定律

永久磁铁周围存在磁场，磁场可用磁力线表示。通电导体或线圈也产生磁场，电流与磁场间的方向可由右手定则或右手螺旋定则确定。对通电直线导体，用右手握住导线，姆指指电流方向，其余握着的四指指示磁力线方向。若是通电线圈，右手握线圈，弯曲的四指指示线圈中电流方向，则与四指垂直的姆指指示磁场方向。

铁磁物质导磁性能比空气大得多，在电机中绝大部分磁通在铁心中走，仅有很少的一部分在铁心外走，前者称主磁通，后者称漏磁通，磁通经过的路径称磁路。按上述方法把磁场化为磁路来研究，磁路计算的基本公式是全电流定律。全电流定律指出，沿磁场中任一闭合回路，磁场强度的线积分等于该回路所包围的电流的代数和，其数学表达式

$$\oint H_l dL = \sum I \quad (1-11)$$

式中 H_l ——沿回路切线方向的磁场强度， A/m ；

$\sum I$ ——回路所包围的电流的代数和， A 。

在电机中，磁路常可分成几部分，各部分的磁场强度取作常值，于是积分形式的 $\oint H_l dL$ 便可用 $\sum H_l L_i$ 来代替，式 (1-11) 可改写成

$$\sum H_l L_i = \sum I \quad (1-12)$$

磁路的欧姆定律为：磁通量与磁势 IW 成正比，与磁阻 R_m 成反比，数学表达式为

$$\Phi = \frac{IW}{R_m} \quad (1-13)$$

式中 Φ ——磁通量， Wb ；

IW ——磁势（电流与匝数之积）， A ；

R_m ——磁阻， $\Omega \cdot S$ 。

磁阻公式类似电阻公式

$$R_m = \frac{L}{\mu S} \quad (1-14)$$

式中 R_m ——磁路的磁阻, H^{-1} ;

L ——磁路长度, m;

S ——磁路截面积, m^2 ;

μ ——导磁率, H/m 。

因为铁磁材料的导磁率 μ 不是常值, 因而 R_m 也不是常值, 随磁路的饱和而增大。在有气隙的磁路中, 因气隙中的磁导率 μ_0 远小于铁磁材料中的导磁率 μ , 故气隙磁阻远大于铁磁材料中的磁阻。气隙增大一点, 磁阻就显著增大, 要保持磁通量 Φ 不变, 就必须显著增加安匝数。

交流电路中的电抗, 实质上是反映线圈及磁路性质的电路参数。因为电抗

$$X = 2\pi fL \quad (1-15)$$

式中 X ——电抗, Ω ;

f ——频率, s^{-1} ;

L ——电感, H。

电感 L 是单位电流的磁通链 Φ , 即

$$L = \frac{\Phi}{i} = \frac{W \frac{W_i}{R_m}}{i} = W^2 \frac{1}{R_m} = W^2 \lambda_m \quad (1-16)$$

式中 L ——电感量, H;

Φ ——磁通链, $\Phi = W\phi$, Wb;

W ——线圈匝数;

λ_m ——磁导, H。

可见电感 L 是与线圈匝数的平方成正比, 而与磁导成正比。磁路不饱和时, λ_m 值是常值, L 是常值, 电抗 X 是常值。磁路饱和时, 电抗不是常值。

第五节 电机的损耗与定额

电机是能量转换的电磁机械, 电动机是把电能转变成机械能, 发电机是把机械能转变成电能。能量转换过程中必有损耗: 绕组中有电流流, 电阻上产生铜损 I^2R ; 磁通在铁心中变化时, 产生磁滞和涡流损耗, 称铁损; 旋转电机还有风阻摩擦等机械损耗。

损耗的能量转变为热能, 将使电机的温度升高。电机是由铁、铜和绝缘材料构成的, 绝缘材料允许的最高温度是有限度的, 如 E 级绝缘材料允许最高温度是 120°C , B 级绝缘允许的最高温度是 130°C 。

驱动电机的额定功率是指在规定条件下, 以额定功率运行时, 它的稳定温度接近但不超过最高允许温度。如果电机过载运行, 电机的温度就要超出允许温度, 严重时损坏电机。控制电机的额定数据主要是由特性的精度而定的。

第二章 微型直流电动机

直流电动机是把直流电能转换为机械能的动力源,用以拖动小型机械负载。微型直流电动机可用于要求起动转矩较高,转速范围变化较大和配上稳速器后用在电源电压波动和负载变动情况下要求转速恒定的场合。如驱动计算机、自动化仪器仪表、医疗器械及其它小型机械设备中的某些机械负载。测井仪器中井下仪器的推靠器是用直流电动机带动的。

微型直流电动机按励磁方式分:电磁式的和永磁式的,永磁式的具有体积小、效率高等优点。

本章主要讨论直流电机的基本结构、工作原理及主要特性。

第一节 原理性直流电动机

一、原理性直流电动机的结构

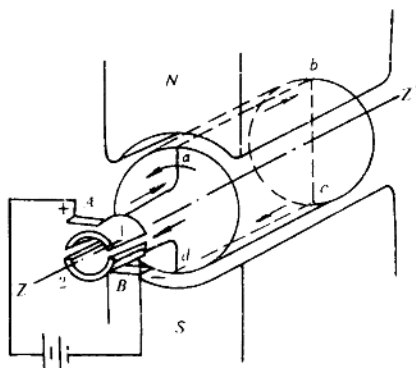


图 2-1 直流电动机原理图

图 2-1 表示一台最简单的直流电动机的原理图。固定部分称定子,它主要由磁极 N 和 S 组成。转动部分称转子,是一个绕 $Z-Z'$ 轴转动的铁心,其上装有线圈 $abcd$,线圈两端接到称为换向片的两个互相绝缘的半圆形铜环 1 和 2 上。换向片与轴是绝缘的,能随轴一起转动。电刷 A 和 B 在空间固定不动,它与换向片滑动接触,且与外电路相连。

二、直流电动机基本工作原理

参看图 2-1,电刷 A 接于电源正极,电刷 B 接于负极,电流从 A 刷流入,从 B 刷流出。这时线圈中的电流方向是从 a 流向 b ,再从 c 流向 d 。根据电磁力定律可知,载流导体在磁场中要受力,其方向由左手定则确定。如图上所示之瞬间, N 极范围的导体 ab 受力方向向左,而 S 极范围内的导体 cd 受力方向向右。力乘以导体至转动轴心的距离便得到转矩,线圈将受到一个逆时针方向的转矩作用,使其沿逆时针方向转动。当导体 dc 转至 N 极范围,导体 ab 转至 S 极范围时,换向片 2 与刷 A 接触,换向片 1 与刷 B 接触。线圈中的电流改变了方向,从 d 流向 c ,再从 b 流向 a 。此时,导体 dc 受力方向向左,而导体 ab 受力方向向右,但线圈所受转矩方向仍为逆时针方向,转子继续沿逆时针方向转动。当导体 ab 再转至 N 极范围,导体 dc 转至 S 极范围,如前所述。这样,转子能一直转下去,这就是直流电动机的基本工作原理。

转子旋转,导体切割磁力线要产生感应电势 E ,其方向由右手定则确定,感应电势的方向与电流方向相反,称反电势。 E 与电流 I 反向,吸收电功率,反电势是电动机中能量转换

的关键因素。关于能量平衡、电势平衡及转矩平衡问题，将在以后的章节中阐述。

直流电机是以电磁力定律和电磁感应定律为理论基础，借换向装置实现外电路的直流电与电机绕组中交变电流之间相互转换的旋转电机。

第二节 微型直流电动机的结构

微型电磁式和永磁式直流电机的结构，如图 2-2 与图 2-3 所示，具体结构还可看电机实物。

任何旋转电机都由两大部分组成：一是静止部分，称定子；二是转动部分，称转子（在直流电机中常称为电枢）；定子和转子间有空气隙。

一、定子部分

1. 机壳

是用钢或铝制的，具有固定和支撑作用，钢壳又是电机磁路的一部分。

2. 主磁极

它产生电机的主磁场，按励磁方式分电磁式和永磁式两类。电磁式磁极是由铁心和线圈组成，铁心分可拆卸与不可拆卸，励磁线圈是由绝缘铜线绕成的。不可拆卸磁极铁心与励磁线圈组成的定子，如图 2-4 所示。永磁式磁极是用永磁材料制成的，它的上面无励磁线圈，如图 2-5 所示。

3. 电刷装置

它是由电刷、刷座和调节压力的弹簧等零件组成。在空间固定的电刷装置保持电刷与换向器的滑动接触，连接电枢与外电路。

4. 端盖

它也起固定和支撑作用。

二、转动部分

1. 转轴

固定电枢铁心、绕组、换向器，带动机械负载。

2. 电枢铁心绕组

电枢铁心是由 0.5 毫米厚的硅钢片冲制叠成的，它是电机磁路的一部分。绕组是由绝缘铜线绕成的线圈组成的，线圈嵌放在电枢铁心槽内，端头按一定规律焊接在换向片上，电枢绕组是电机的电路部分，它是电机的核心部件。

3. 换向器

换向器是由许多楔形铜质换向片组成，片间用云母片互相绝缘、微型直流电机的换向器用塑料固紧成一圆筒形。换向器与转轴固定在一起，但互相绝缘。换向器和电刷实现外电路

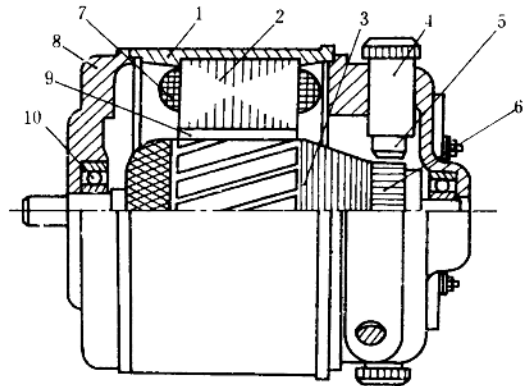


图 2-2 电磁式直流电机结构简图

- 1—机壳；2—定子铁心；3—电枢；4—电刷座；
5—电刷；6—换向器；7—励磁绕组；8—端盖；
9—空气隙；10—轴承

直流电与电枢绕组内交流电之间的相互转换。

电枢的结构、电枢铁心冲片与换向器，如图 2-6，图 2-7，图 2-8 所示。

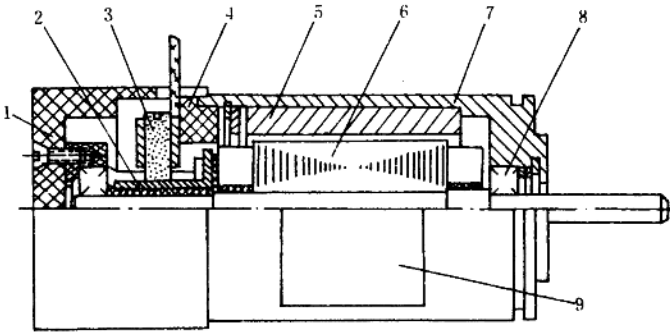


图 2-3 微型永磁直流电动机结构图

1—端盖；2—换向器；3—电刷；4—电刷架；5—磁极；6—电枢；7—机壳；8—轴承；9—铭牌

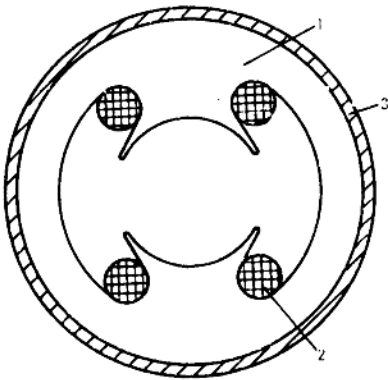


图 2-4 电磁式定子结构简图

1—冲片；2—励磁线圈；3—机壳

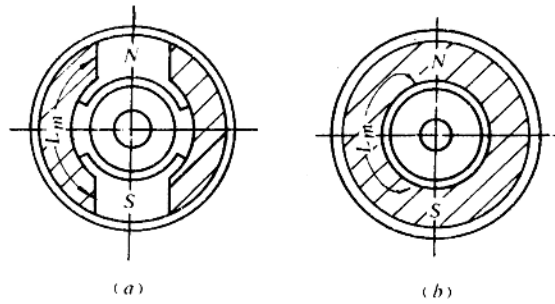


图 2-5 永磁定子结构

(a) —带软铁磁极式；(b) —圆筒式

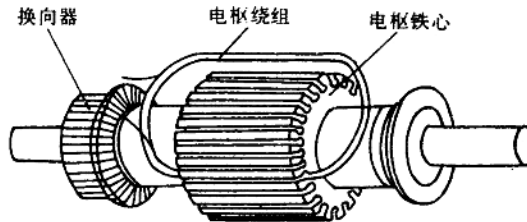


图 2-6 电枢铁心和绕组

三、空气隙

定、转子之间有空气隙，在小容量电机中仅为零点几毫米。因气隙磁阻很大，是磁路中的重要部分，它的大小对电机的性能有影响。

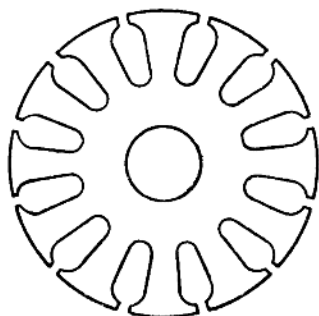


图 2-7 电枢铁心冲片

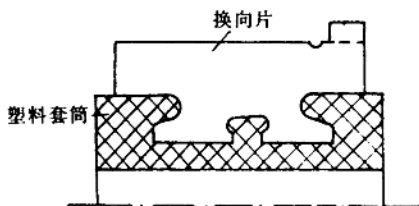


图 2-8 塑料换向器剖面图

第三节 直流电动机的电枢绕组

一、概述

电枢绕组是直流电动机中的核心部件，转矩与电势都是绕组产生的，它在能量转换过程中起着重要作用。

电枢绕组是由许多线圈（也称元件）按一定规律联接成闭合回路的总称。元件是由绝缘铜线绕制的，它的两个有效边放置在电枢铁心的两个槽中。直流电枢绕组是双层的，每个槽中放两层边。元件的两个端头分别接到两片换向片上，每一片上接两个端头。

表明绕组联接特点和规律的是绕组节距、节距主要有：

(1) 第一节距 y_1 ，它表示一个元件两个边间的距离，常以槽数表示。为了获得较大的转矩与电势，两有效边间的距离应是

$$y_1 \approx \tau \quad (2-1)$$

式中 τ ——极距，即沿电枢表面圆周上相邻两磁极间的距离。以长度表示

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2P} \quad (2-2)$$

式中 D_a ——电枢外径，m；

$2P$ ——磁极数， P 是磁极对数。

极距 τ 以虚槽数表示

$$\tau = \frac{Z_u}{2P} \quad (2-3)$$

式中 Z_u ——电枢虚槽数，槽中每两个元件边成一个单元槽，虚槽数为单元槽数乘实槽数。

把式 (2-3) 代入式 (2-1)，使得

$$y_1 \approx \tau = \frac{Z_u}{2P}$$

因 Z_u 常不能被 $2P$ 整除，把上式右边加或减去一个小数 ε ，使 y_1 凑成整数，一个元件的两个边必须放入两个整数槽中。因此有

$$y_1 = \frac{Z_u}{2P} \mp \varepsilon \quad (2-4)$$

式中 ε ——为使 y_1 凑成整数而取的一个小数。

$y_1 = \tau$ 时，称整距； $y_1 < \tau$ 时，称短距。

(2) 合成节距 y 为两个相邻元件对应边间的距离，常以虚槽数表示。

(3) 换向节距 y_k 是每一元件两端头所联的两片换向片间的距离，以片数表示。

绕组节距的意义，如图 2-9 所示。

因绕组是均匀分布的，每一个元件在电枢表面上和换向器上跨越的槽数和换向片数相等，有

$$y = y_k \quad (2-5)$$

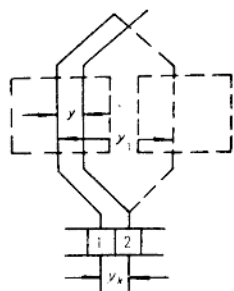


图 2-9 单叠绕组元件联接

按绕组联接规律的不同，直流电枢绕组分单叠绕组、单波绕组等多种型式。在微电机中，两极机是单叠绕组，四极机可以是单波绕组。

二、单叠绕组

单叠绕组的特点是每一个元件首端和末端接在相邻的两片换向片上，下一个元件的首端与前一个元件的末端接在同一换向片上。单叠绕组元件的联接如图 2-9 所示，串联的相邻元件，在电枢表面上前进一虚槽，在换向器上每次前进一片，即 $y = y_k = 1$ 。

图 2-10 是一台两极八个槽的单叠绕组的轴向示意图。我们把换向片、元件与槽都编上号。为了清楚起见，1 号元件的首端接 1 号换向片，1 号元件的上层边放在 1 号槽的上层，它的下层边 $1'$ 放在 5 号槽的下层，末端接 2 号换向片上。2 号元件的首端接 2 号换向片上，2 号元件的上层边放在 2 号槽的上层，它的下层边 $2'$ 放在 6 号槽的下层末端接到 3 号换向片上。余者类推，最后 8 号元件的末端与 1 号元件的首端接在一起，成闭合回路。

电刷的放置原则，是使绕组得到较大的转矩与感应电势。若元件端接是对称的，如图