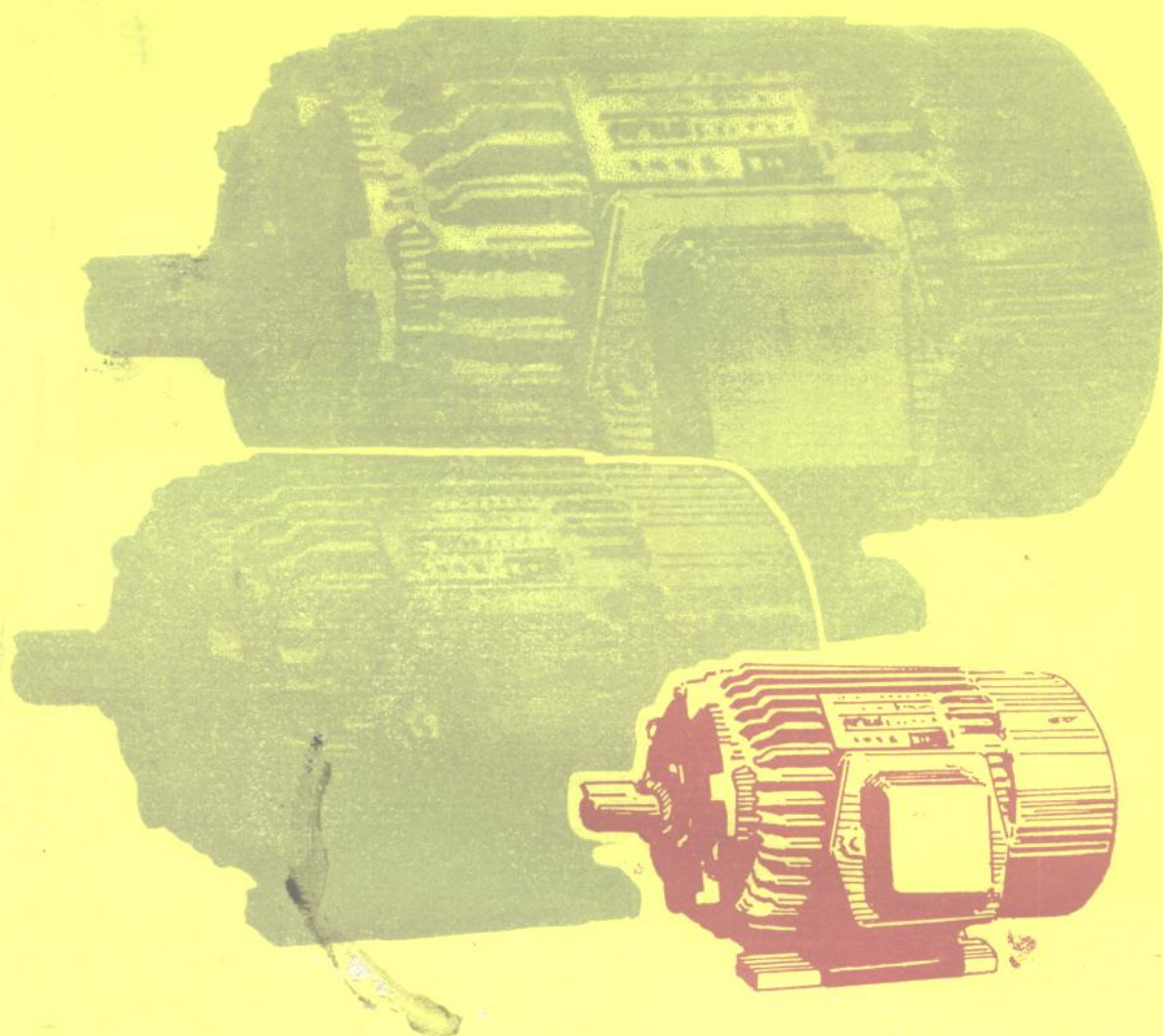




# 电机学

杨长能 编

重庆大学出版社

365242

# 电 机 学

杨 长 能 编

重庆大学出版社

## 内 容 提 要

本书内容包括：直流电机，变压器，三相异步电动机，单相异步电动机，同步电动机，控制电机。从应用角度出发，介绍了各种电机的基本结构、工作原理、内部电磁过程、工作特性以及基本的试验方法和使用方法等。内容重点突出，概念清楚，深入浅出，各章附有小结及大量例题、思考题与习题，便于自学。

本书适用于高等工科院校工业电气自动化专业以及电气类专业的师生使用，也可供电气工程技术人員参考。

## 电 机 学

杨长能 编

责任编辑 黄开植

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆大学出版社印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：18.75 字数：468千  
1993年1月第1版 1993年1月第1次印刷

印数：1—3000

标准书号：ISBN 7-5624-0452-6 定价：5.24元  
TM·28

〔川〕新登字020号

## 前 言

本书是根据全国高等工业学校自动化专业类《电机及拖动基础》教学大纲中电机学部分的要求编写的。此外，还根据该大纲中电力拖动基础部分另编了一本《电力拖动基础》（重庆大学出版社1989年1月出版）。将《电机学》和《电力拖动基础》分开，可以使两部分内容更加系统，每一部分内容前后部分之间的联系更加紧密，同时使用也比较灵活。

本书共分6章，内容包括：直流电机，变压器，三相异步电动机，单相异步电动机，同步电动机，控制电机。每一章最后一节为小结，章后附有较多的思考题及习题，以帮助读者更好地理解 and 掌握各章的主要内容。全部内容的讲授约需80~90学时。

由于电机学是一门重要的专业基础课，因此在内容的选择上，既重视基础理论、基本原理、基本概念和基本方法，又注意到专业的针对性。本书除介绍普通电机以外，还介绍自动控制中常用的控制电机。普通电机中又以介绍电动机和变压器为主，发电机为辅。本书从应用角度出发，着重介绍电机的基本结构、工作原理、内部电磁过程、工作特性以及基本的试验方法和使用方法等。编写时，力求重点突出，概念清楚，深入浅出，便于自学，同时又结合专业，使内容少而精。

本书可作为普通高等工业学校和成人高校工业电气自动化以及电气类专业的教材及教学参考用书，也可供电气工程技术人員参考。

由于编者水平有限，书中难免有不少缺点错误，恳请读者批评指正。

编 者

一九九一年十一月

# 目 录

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| 绪论                        | ( 1 )   |
| 第一章 直流电机                  | ( 7 )   |
| §1-1 直流电机的结构、铭牌数据及主要系列    | ( 7 )   |
| §1-2 直流电机的工作原理            | ( 11 )  |
| §1-3 直流电机的电枢绕组            | ( 14 )  |
| §1-4 直流电机的磁场              | ( 22 )  |
| §1-5 直流电动机                | ( 30 )  |
| §1-6 直流发电机                | ( 41 )  |
| §1-7 直流电机的换向              | ( 48 )  |
| §1-8 小结                   | ( 53 )  |
| 思考题                       | ( 56 )  |
| 习题                        | ( 58 )  |
| 第二章 变压器                   | ( 62 )  |
| §2-1 变压器的用途与分类            | ( 62 )  |
| §2-2 变压器的结构及铭牌数据          | ( 63 )  |
| §2-3 单相变压器的空载运行           | ( 66 )  |
| §2-4 单相变压器的负载运行           | ( 72 )  |
| §2-5 变压器参数的测定             | ( 78 )  |
| §2-6 变压器的运行特性             | ( 83 )  |
| §2-7 三相变压器                | ( 86 )  |
| §2-8 自耦变压器                | ( 99 )  |
| §2-9 仪用互感器                | ( 104 ) |
| §2-10 小结                  | ( 107 ) |
| 思考题                       | ( 112 ) |
| 习题                        | ( 115 ) |
| 第三章 三相异步电动机               | ( 122 ) |
| §3-1 三相异步电动机的结构、铭牌数据及主要系列 | ( 122 ) |
| §3-2 三相异步电动机的工作原理         | ( 127 ) |
| §3-3 三相异步电动机的定子绕组         | ( 131 ) |
| §3-4 三相异步电动机的定子磁势及磁场      | ( 140 ) |
| §3-5 转子不动时的异步电动机          | ( 155 ) |
| §3-6 转子旋转时的异步电动机          | ( 161 ) |
| §3-7 三相异步电动机的功率及转矩        | ( 171 ) |

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| §3-8 三相异步电动机的工作特性及机械特性·····    | ( 174 ) |
| §3-9 三相异步电动机参数的测定·····         | ( 181 ) |
| §3-10 小结·····                  | ( 184 ) |
| 思考题·····                       | ( 188 ) |
| 习题·····                        | ( 190 ) |
| <b>第四章 单相异步电动机</b> ·····       | ( 192 ) |
| §4-1 单相异步电动机的工作原理·····         | ( 192 ) |
| §4-2 单相异步电动机的类型·····           | ( 198 ) |
| §4-3 三相异步电动机的单相运行·····         | ( 202 ) |
| §4-4 小结·····                   | ( 204 ) |
| 思考题·····                       | ( 205 ) |
| 习题·····                        | ( 205 ) |
| <b>第五章 同步电动机</b> ·····         | ( 207 ) |
| §5-1 同步电动机的结构、铭牌数据及主要系列·····   | ( 207 ) |
| §5-2 同步电动机的基本工作原理·····         | ( 209 ) |
| §5-3 同步电动机的电势平衡方程式及相量图矢量图····· | ( 209 ) |
| §5-4 同步电动机的功率平衡及功角和矩角特性·····   | ( 215 ) |
| §5-5 同步电动机的励磁调节及V形曲线·····      | ( 221 ) |
| §5-6 同步电动机的起动·····             | ( 225 ) |
| §5-7 同步电动机与异步电动机的比较·····       | ( 229 ) |
| §5-8 小结·····                   | ( 229 ) |
| 思考题·····                       | ( 231 ) |
| 习题·····                        | ( 232 ) |
| <b>第六章 控制电机</b> ·····          | ( 233 ) |
| §6-1 概述·····                   | ( 233 ) |
| §6-2 伺服电动机·····                | ( 234 ) |
| §6-3 测速发电机·····                | ( 246 ) |
| §6-4 自整角机·····                 | ( 255 ) |
| §6-5 旋转变压器·····                | ( 264 ) |
| §6-6 步进电动机·····                | ( 269 ) |
| §6-7 小结·····                   | ( 280 ) |
| 思考题与习题·····                    | ( 283 ) |
| <b>习题答案</b> ·····              | ( 287 ) |
| <b>主要参考书目</b> ·····            | ( 291 ) |

# 绪 论

## 一、本课程的性质、任务及内容

本课程是工业电气自动化专业的一门重要专业基础课。它既有理论性，又带有实践性，它在阐述基本理论的同时，还适当地介绍一些在生产实践中分析和处理问题的工程方法，使理论与实践密切结合。它在整个专业学习中具有承上启下的作用。是电类有关专业的同志所必须学习和掌握的课程。

本课程的任务是使学生掌握常用电机的基本结构、工作原理、内部电磁过程、运行特性以及分析计算和实验操作的基本方法、基本技能，为后续专业基础课及专业课的学习准备必要的基础知识，同时也为从事工业电气自动化工程技术工作和科学研究奠定初步基础。

本课程的内容包括：直流电机，变压器，三相异步电动机，单相异步电动机，同步电动机，控制电机。

## 二、本课程的特点及学习方法

1. 综合性 在电机中，电、磁、力、能量等多种规律同时起作用，各量互相约束、互相影响，因此必须全面分析问题，切忌孤立、片面地看问题。

2. 实用性 虽然是多种规律同时起作用，但它们又不一定是同等的。为了能运用理论来解决实际问题，有必要运用工程观点和工程方法，根据具体的实际情况，忽略某些次要的因素，将问题简化，因此必须注意实际条件，抓住主要矛盾。

3. 基础性 本课程是一门专业基础课而且电机类型很多，不可能面面俱到，因此必须抓住基本理论和基本方法，做好习题和实验。

4. 规律性 虽然电机的类型很多，而且各有其个性和特点，但也有其共性或规律性。例如在电磁规律方面，它们都遵循电磁感应定律和电磁力定律，并以磁场作为媒介来实现机电能量的转换或信号的传递与变换。因此必须在掌握个性的基础上，掌握规律性的东西，从而找出各部分内容之间的联系，使认识进一步深化。

## 三、电机的基本类型及用途

电机是用以实现机电能量转换或信号传递与变换的一种电磁机械。其工作原理基于电磁感应定律和电磁力定律。实现机电能量转换的电机称为普通电机或动力电机；实现信号传递与变换或小功率能量转换的电机称为控制电机或特殊电机。

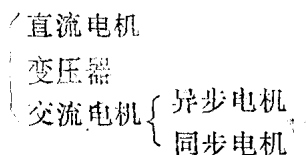
普通电机按其功能和用途不同，可分为：

发电机——将机械能转换为电能，用作电源；

电动机——将电能转换为机械能，用作原动机，以拖动各种生产机械运转；

变压器——将一种电压的交流电能转换为同一频率的另一种电压的交流电能，用以改变交流电压。

由于电能有直流和交流两种，所以普通电机按电能种类不同，又分为：



电机的用途十分广泛，它渗透到生产、国防及生活的各个领域，是一种重要的动力设备。

在电力工业中，电能的生产、传输、分配及使用都是以电机作为主要的动力设备，如将水力、热力、风力、太阳能、原子能等转换为电能，都要使用发电机。要把发电厂发出来的电能通过输电线路传输到远方，需要用高压输电，例如110kV、220kV、500kV等，传输的电功率越大，距离越远，输电电压就越高，而发电机发出来的电压比输电电压低，目前我国多数发电机的电压等级是10kV以下，这就需要用变压器将电能的电压升高后才能输送到远方。到了一个用电区域后，还要根据各用户所需的功率及距离，采用不同的电压等级将电能送到各个用户去。到了具体的用电单位，又要把电压降到用电设备所需要的电压等级，如6kV、3kV、380V/220V等，再分配给各个用电设备去使用，这些都要利用变压器来改变电压。

在其它工业、农业、交通、运输上以及家用电器中，更是广泛地应用各种电动机作原动机去拖动各种机械运转。例如各种机床、机械、抽水机、电车、起重机以及电风扇、录音机、洗衣机等，都是常见的使用电机的实例。

以上仅就普通电机的应用作了一个轮廓的介绍，至于控制电机的应用，在第六章将会谈到。

#### 四、电机所遵循的基本电磁规律

电机种类虽多，但都遵循以下基本电磁规律：

1. 电路定律 包括电路的欧姆定律及基尔霍夫第一定律、第二定律。
2. 磁路定律 下面扼要地介绍一下有关磁路定律的基本知识。

##### (1) 磁路中的几个物理量

**磁感应强度** 在磁场中的某一点上，单位正电荷以单位速度向着与磁场方向垂直的方向运动时所受到的电磁力，称为该点的磁感应强度，以字母 $B$ 表示。 $B$ 的单位在国际单位制中为韦伯/米<sup>2</sup>，即特斯拉(T)，在cgs单位制中为高斯(Gs)。1T=10<sup>4</sup>Gs。

**磁通量** 磁通量即磁感应强度的通量，简称磁通，以字母 $\Phi$ 表示。 $\Phi$ 的单位在国际单位制中为韦伯(Wb)，在cgs单位制中为麦克斯韦(Mx)。1Wb=10<sup>8</sup>Mx。在均匀磁场中，通过垂直于磁场面积 $S$ 的磁通量为：

$$\Phi = BS$$

**磁通密度** 垂直于磁场的单位面积上所通过的磁通量，叫做磁通密度，也以字母 $B$ 表示：

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

因此，磁通密度和磁感应强度在数值上是一致的，单位也相同。

**磁动势** 线圈中通以电流就会产生磁场，它取决于电流 $I$ 与线圈匝数 $W$ 的乘积 $IW$ ，这一

乘积就叫做磁动势，简称磁势，以字母 $F$ 表示，即 $F=IW$ 。磁势是产生磁通的“推动力”。 $F$ 的单位在国际单位制中为安匝或安培（A），在cgs单位中为吉尔伯（Gi）。 $1\text{A}=1.26\text{Gi}$ 。

磁场强度 磁场强度又称磁化力，以字母 $H$ 表示。对于粗细均匀的磁路来说， $H$ 就是每单位长度磁路上的磁势，设磁路长度为 $l$ ，则

$$H = \frac{F}{l}$$

$H$ 的单位在国际单位制中为安培/米（A/m），在cgs单位制中为奥斯特（Oe）。 $1\text{A/m}=1.26 \times 10^{-2}\text{Oe}$ 。

磁导率 铁磁物质的磁性能要用 $B$ 和 $H$ 的关系来表示， $B$ 与 $H$ 的比值叫做磁导率或导磁系数，以字母 $\mu$ 表示，即

$$\mu = \frac{B}{H}$$

$\mu$ 的单位在国际单位制中为亨/米（H/m）。

磁阻 表示磁路对磁通所起的阻碍作用，它只与磁路的尺寸及磁路材料的导磁率有关，以字母 $R_m$ 表示。对于粗细均匀的磁路，设磁路长度为 $l$ ，截面积为 $S$ ，则

$$R_m = \frac{l}{\mu S}$$

$R_m$ 的单位在国际单位制中为1/亨（1/H）。

## (2) 磁路的欧姆定律

磁路的欧姆定律描述磁路中磁势 $F$ 、磁通 $\Phi$ 、磁阻 $R_m$ 三者之间的关系，即

$$\Phi = \frac{F}{R_m}$$

它与电路的欧姆定律很相似。

## (3) 安培环路定律（全电流定律）

在闭合磁回路中，磁场强度的线积分等于作用在该回路上的总磁势，即

$$\oint H \cdot dl = IW$$

式中 $IW$ 也就是该磁回路所包围的全电流。为此，这个定律也叫全电流定律。

工程应用中遇到的磁路，其几何形状是比较复杂的，直接利用上述安培环路定律的积分形式进行计算，有一定的困难。为此，在计算磁路时，要进行简化。办法是把磁路分成几段，几何形状规则的为一段，找出它的平均磁场强度，再乘上这段磁路的平均长度，得磁压降（即消耗的磁势），最后把各段磁路的磁压降加起来，就得到总磁势。即

$$\sum_1 H_k l_k = IW$$

式中， $H_k$ 是磁回路中第 $k$ 段磁路的磁场强度； $l_k$ 是第 $k$ 段磁路的平均长度； $H_k l_k$ 是第 $k$ 段磁路的磁压降（即消耗的磁势）； $IW$ 是作用在整个磁回路上的磁势，即磁回路所包围的全电流； $W$ 是励磁线圈的匝数。

上式可以理解为：消耗在任一闭合磁回路上的磁势，等于该磁回路所包围的全电流。这

就是在本书中多处用到的全电流定律。

#### (4) 磁路的基尔霍夫定律

串联磁路：如果通过磁路各部分的磁通相同，这种磁路称为串联磁路。设通过磁路各部分的磁通为 $\Phi$ ，则第 $k$ 段磁路的磁压降为

$$H_k l_k = \frac{B_k}{\mu_k} l_k = \frac{\Phi}{S_k} \cdot \frac{l_k}{\mu_k} = \Phi \frac{l_k}{\mu_k S_k} = \Phi R_{mk}$$

式中， $R_{mk} = \frac{l_k}{\mu_k S_k}$ 为第 $k$ 段磁路的磁阻。于是，根据全电流定律可得：

$$IW = \sum_1 H_k l_k = \sum_1 \Phi R_{mk}$$

在电路中， $IR$ 为电阻上的电压降。在磁路中， $\Phi R_{mk}$ 称为磁阻 $R_{mk}$ 上的磁压降。于是上式表明：作用在磁回路上的磁势等于各段磁路上的磁压降之和。这就叫磁路的基尔霍夫第二定律。

并联磁路：如果磁通分几股通过并联支路而闭合，这种磁路称为并联磁路。在磁路的节点处

$$\sum \Phi = 0$$

或流入节点的磁通之和等于流出节点的磁通之和。这就叫磁路的基尔霍夫第一定律。

3. 电磁感应定律（法拉第定律） 在旋转电机中，当导体在磁场中作垂直于磁力线的运动时，导体切割磁力线而产生的感应电势（称为切割电势或速度电势）为

$$e = Blv$$

其方向按右手定则确定。式中， $B$ 为导体所在处的磁通密度； $l$ 为导体在磁场中的长度； $v$ 为导体相对于磁力线的运动速度。

在变压器中，当穿过线圈的磁通交变时，在线圈中产生的感应电势（称为变压器电势）为

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt}$$

式中， $W$ 为线圈匝数。磁通的正方向和感应电势的正方向是采用右手螺旋定则来规定的。

4. 电磁力定律（毕奥-萨伐定律） 处于磁场中的载流导体，要受到力的作用，这个力称为电磁力。当电流的方向与磁力线的方向垂直时，电磁力为

$$f = Bli$$

其方向按左手定则确定。式中， $B$ 为导体所在处的磁通密度； $l$ 为导体在磁场中的长度； $i$ 为导体中的电流。

电磁感应定律和电磁力定律是电机中的重要电磁规律，是电机实现能量转换的重要基础。

5. 铁心损耗 当铁心中通过随时间交变的磁通时，铁心中有能量损耗，称为铁心损耗。它是由涡流现象和磁滞现象引起的。

涡流是电磁感应现象的产物。铁心中的交变磁通在铁心中产生感应电势，由于铁心也是导体，在这感应电势的作用下就会引起电流，称为涡流。涡流遇到铁心的阻力，便产生了与

电路中的 $i^2R$ 同样性质的功率损耗，称为涡流损耗。它与磁通交变的频率 $f$ 及磁通密度最大值 $B_m$ 有关。每单位体积铁心的涡流损耗可表示为

$$p_e = k_e f^2 B_m^2$$

$k_e$ 是比例常数。

减小涡流损耗的有效措施是不用实心铁心，而用叠片式铁心。铁心用薄钢片叠成，片与片之间互相绝缘，阻断了电流的通路，从而减少了涡流损耗。

磁滞现象是铁心在反复磁化过程中的产物。在交流磁路中，铁心处于反复磁化过程中，当铁心上的线圈通以交变电流时，对应于电流由零增到正最大值，随后又下降过零而到负最大值，最后又回到零，磁化力 $H$ 也经历了同样的变化过程，即由 $0 \rightarrow +H_m \rightarrow 0 \rightarrow -H_m \rightarrow 0$ ， $H_m$ 为最大磁化力。在 $H$ 变化时，磁通密度 $B$ 亦随之而变，但是 $B$ 的变化始终是滞后于 $H$ 的变化的。它们的关系如图0-1的 $B$ - $H$ 曲线所示。例如当 $H$ 到达零时， $B$ 还没有到零，保留有剩余磁通密度 $B_r$ ，而当 $H$ 开始反向增大时， $B$ 还没有反向。这种现象称为磁滞现象。 $B$ 与 $H$ 关系的这一表现称为磁滞回线。

这一现象表明铁磁物质在反复磁化，磁分子来回翻转过程中是有阻力的，相应地就产生了类似于摩擦生热的能量损耗，称为磁滞损耗。它与磁化时的最大磁通密度 $B_m$ 和电流的频率 $f$ 有关。每单位体积铁心的磁滞损耗可表示为

$$p_h = k_h f B_m^n$$

$k_h$ 是比例常数， $n$ 一般取1.6或2。

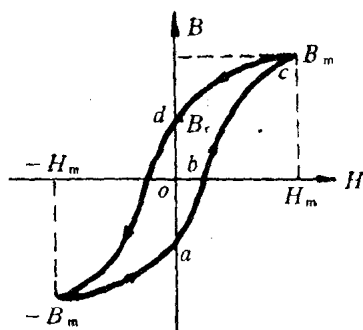


图0-1 铁磁物质的 $B$ - $H$ 曲线

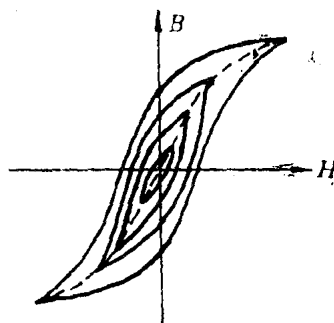


图0-2 磁滞回线族

6. 磁化曲线 描述材料磁性能的 $B$ - $H$ 曲线叫做磁化曲线。铁磁物质的磁化曲线如图0-1所示。它表现为回线的形式，称为磁滞回线。从图上可以看到，当 $H$ 由小增大，例如由零增大到最大值 $H_m$ ，曲线沿 $abc$ 段上升。当 $H$ 减小时，曲线沿另一段 $cd$ 下降，构成一个对称的磁滞回线。因此， $B$ 和 $H$ 是多值的函数关系。但是，对用作电机、变压器铁心的硅钢片材料来说，这一回线是很窄的，这类材料称为“软磁材料”。对于这类材料，常用“基本磁化曲线”来表示 $B$ 和 $H$ 的关系。改变最大磁化力 $H_m$ ，可得到不同的磁滞回线，图0-2表示不同 $H_m$ 下的磁滞回线族。把这些回线的顶点联起来，得到图0-2中的一条虚线，这条虚线就叫做“基本磁化曲线”。由于各回线都很窄，这条曲线可以用来表示 $B$ 和 $H$ 的关系，这样就简便多了。由于这条曲线在第一、三两象限内对称，所以只需画出第一象限的部分，如图0-3所

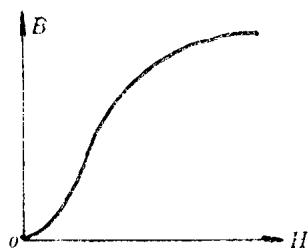


图0-3 铁磁物质的基本磁化曲线

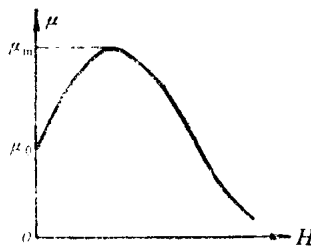


图0-4 铁磁物质的 $\mu$ - $H$ 曲线

示。通常所讲的 $B$ - $H$ 曲线就是这条“基本磁化曲线”。

基本磁化曲线表明了铁磁材料的磁饱和现象。当 $B$ 增加到一定程度时，随着 $H$ 的增加， $B$ 增加得很少，说明材料进入到饱和段。由于 $B$ - $H$ 曲线是非线性的，因此，由 $B$ 与 $H$ 的比值所定义的磁导率 $\mu$ 不是常数。铁磁物质的 $\mu$ - $H$ 曲线如图0-4所示。

由于 $B = \Phi / S$ ， $H = F / l = IW / l$ 。当磁路材料的尺寸大小一定时， $B \propto \Phi$ ， $H \propto IW \propto I$ 。因此， $B$ - $H$ 曲线可以用 $\Phi$ - $IW$ 曲线或 $\Phi$ - $I$ 曲线表示。 $\Phi$ - $IW$ 曲线或 $\Phi$ - $I$ 曲线可以由实验方法来测定。在分析电机、变压器时，常用 $\Phi$ - $I$ 曲线来表示材料的磁化曲线。 $I$ 为励磁电流。

空气的磁化曲线是线性的，它是一条通过坐标原点的直线，因此 $\mu = \frac{B}{H} = \text{常数}$ 。

电机除遵循以上的基本电磁规律外，在其能量的转换过程中还需遵循能量守恒定律。即输入的能量（或功率）与输出及损耗的能量（或功率）必须相平衡。

# 第一章 直流电机

## §1-1 直流电机的结构、铭牌数据及主要系列

### 一、直流电机的结构

任何旋转电机都具备静止和转动两大部分，静止部分称为定子，转动部分称为转子。定子和转子的结构因电机而异。图1-1是直流电机的结构图，图1-2是直流电机的剖面图。现对各主要部件的结构及其作用简述如下：

#### 1. 定子

直流电机定子的作用是产生磁场并作为电机的机械支撑。由主磁极、换向极、机座和电刷装置等组成。

(1) 主磁极 主磁极又称主极，它的作用是产生直流电机的主磁场。绝大多数直流电机的主磁极都是电磁铁，由直流电流励磁，因此它由铁心和励磁绕组两部分组成，如图1-3所示。主极铁心是用1~1.5mm厚的钢板冲片叠压紧固而成，上面较窄部分叫极身，下面较

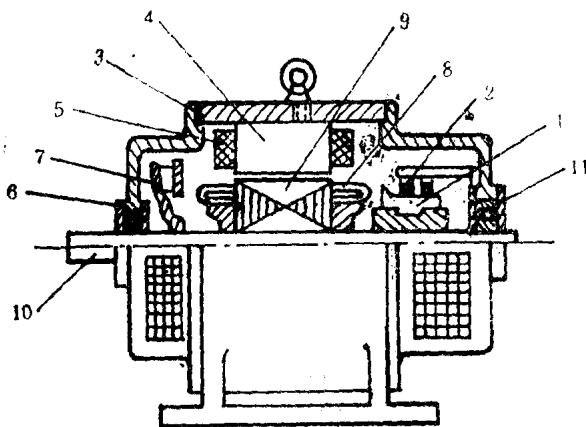


图1-1 直流电机结构图

- 1—换向器 2—电刷装置 3—机座 4—主磁极  
5—励磁绕组 6—端盖 7—风扇 8—电枢绕组  
9—电枢铁心 10—轴 11—轴承

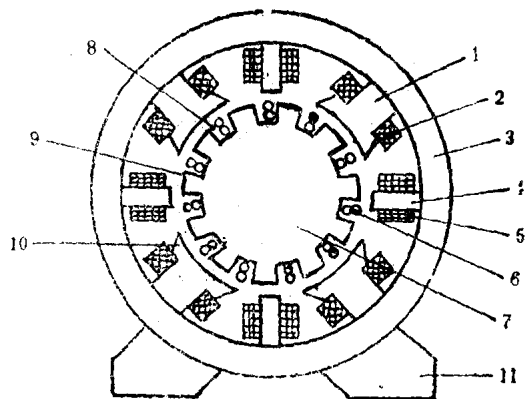


图1-2 直流电机剖面图

- 1—主磁极 2—励磁线圈 3—磁轭（机座）  
4—换向极 5—换向极绕组 6—电枢绕组  
7—电枢铁心 8—电枢槽 9—电枢齿  
10—极靴 11—底脚

宽的部分叫极靴，其作用是使主磁极磁通密度沿极下气隙空间尽可能均匀地分布。励磁绕组套在铁心外面，整个磁极用螺钉固定在机座上。各主极上的励磁绕组大多采用串联连接，以保证每极励磁电流相等。各励磁绕组的连接应保证通过励磁电流时，相邻磁极的极性相反，即相邻磁极的极性呈N极S极交替排列。

某些小直流电机的主磁极由永久磁铁制成，其磁场很弱，这种电机叫做永磁直流电机。

(2) 换向极 换向极又称附加极或间极，它安装在两个主极之间，其作用是改善电机的

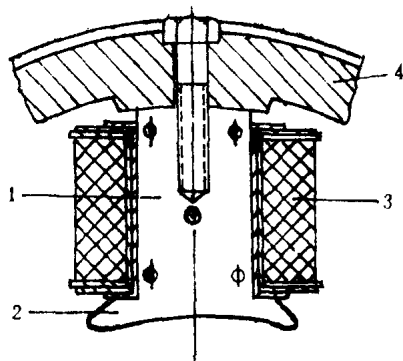


图1-3 主磁极  
1—铁心 2—极靴 3—励磁绕组 4—机座

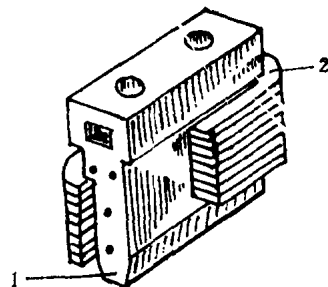


图1-4 换向极  
1—换向极铁心 2—换向极绕组

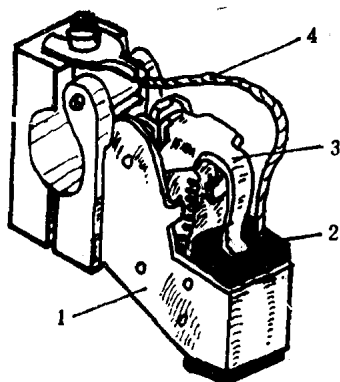


图1-5 电刷及刷握装配图  
1—刷握 2—电刷 3—压紧弹簧  
4—铜丝辫

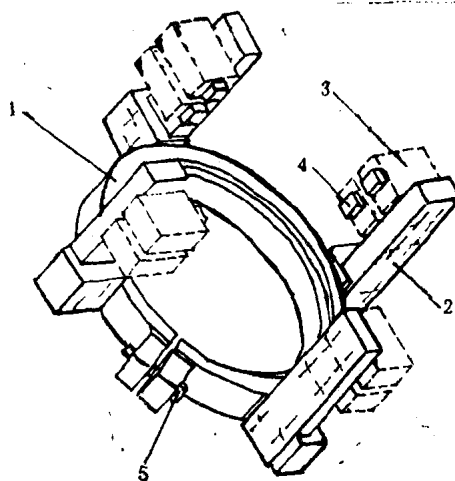


图1-6 直流电机的座圈装置  
1—圈座(刷杆座) 2—刷杆 3—刷握  
4—电刷 5—把紧螺钉

换向。换向极也是由铁心和绕组两部分组成,如图1-4所示。换向极铁心的形状比主极简单,一般都由整块钢板加工而成。换向绕组和电枢绕组串联,其匝数少而导线较粗。

(3) 机座 机座有两个作用,一是起机械支撑作用,主磁极、换向极以及支撑中、小型电机转子的两个端盖都固定在机座上;另一作用是起导磁的作用,是电机磁路的一部分,因此又叫做定子磁轭。机座通常由铸钢铸成或由钢板焊成。

(4) 电刷装置 电刷装置的作用是把直流电压、直流电流引入或引出。它主要由电刷、刷握、刷杆及刷杆座组成。图1-5是一个电刷及刷握的装配图。电刷是以石墨为主要材料制成的导电块,安放在刷握内,并由压紧弹簧压紧在转子的换向器表面上,在电刷上嵌有铜丝辫,用以引入、引出电压和电流。刷握用螺钉固紧在刷杆上,刷杆的数目与电机主极数目一样多,刷杆在换向器外表面上沿圆周方向均匀分布。全部刷杆都装在同一个可以转动的圈座(称为刷杆座)上,如图1-6所示。当转动这个圈座时,就可以调整刷杆在换向器外表面上的相对位置。当把位置调整好后,使用螺钉将它固定在电机的端盖上。

## 2. 转子

直流电机的转子通常称为电枢，它的作用是产生感应电势和电磁转矩。它由电枢铁心、电枢绕组、换向器、轴和风扇等组成。

(1) 电枢铁心 电枢铁心有两个作用：一是嵌放电枢绕组；另一作用是作为电机主磁路的一部分。由于它和主磁场间有相对运动，因此为了减小铁心内的涡流损耗与磁滞损耗，电枢铁心由涂有绝缘的0.5mm厚的硅钢片叠压而成，然后固定在转轴上。电枢铁心上的槽是为了嵌放电枢绕组的。图1-7是电枢铁心冲片及电枢铁心装配图（轴上还装了换向器）。

(2) 电枢绕组 电枢绕组是直流电机的主要电路部分，其作用是产生感应电势和电磁转矩，它是电机实现机电能量转换的关键部件。电枢绕组由绕组元件组成，绕组元件由铜线或铝线预先绕制而成，放在电枢铁心槽中，如图1-7(b)所示。元件与铁心之间互相绝缘，然后用槽楔压紧，再用钢丝或玻璃丝带扎紧，以防止离心力将绕组甩出槽外。元件的两个出线端分别接在换向器的两块换向片上，并通过换向片将各个元件按一定规律联接起来，就构成了电枢绕组。

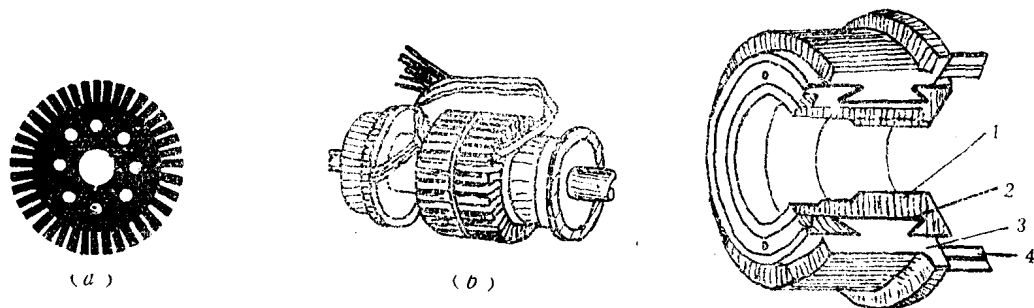


图1-7 电枢铁心冲片和铁心  
(a)电枢铁心冲片 (b)电枢铁心

图1-8 换向器  
1—V形套筒 2—云母环  
3—换向片 4—连接片

(3) 换向器 在直流发电机中，换向器的作用是将电枢绕组中的交流电势整流成电刷上的直流电势；在直流电动机中，换向器的作用是将外部直流电源所提供的直流电流变换为电枢绕组内的交流电流，保证电动机能产生恒定方向的转矩（见直流电机的基本工作原理）。换向器由许多换向片组成，换向片之间常用云母绝缘。换向器的结构如图1-8所示。

## 二、直流电机的铭牌数据

为了保证电机的可靠运行和具有良好的性能而对有关的物理量所规定的数值，称为电机的额定数据或额定值。这些数据都标明在电机的铭牌上，所以又称为电机的铭牌数据。

直流电机的铭牌数据主要有：

- (1) 额定功率（或称额定容量） $P_N$  (kW)；
- (2) 额定电压 $U_N$  (V)；
- (3) 额定电流 $I_N$  (A)；
- (4) 额定转速 $n_n$  (r/min)；
- (5) 额定励磁电压 $U_{fN}$  (V)；
- (6) 额定励磁电流 $I_{fN}$  (A)；
- (7) 励磁方式。

电机的额定效率通常不标在铭牌上,但可在产品手册或样本中查到。

必须注意到,额定功率是指电机的额定输出功率,对发电机来说,是指电刷上输出的电功率;对电动机来说,是指轴上输出的机械功率,因此直流发电机的额定功率为:

$$P_e = U_e I_e \quad (1-1)$$

而直流电动机的额定功率为

$$P_e = U_e I_e \eta_e \quad (1-2)$$

式中  $\eta_e$  是直流电动机的效率。它是直流电动机额定输出功率  $P_e$  (机械功率) 与额定输入功率  $U_e I_e$  (电功率) 之比。

额定数据是电机运行的基本数据。直流电机运行时,若各物理量的实际值都等于额定值,称为满载运行,或叫做额定运行状态。在额定运行状态下工作,电机能可靠地运行,并具有良好的性能。

实际运行中,电机不一定总工作在额定状态。如果流过电机的电流小于额定电流,称为欠载运行;超过额定电流,称为过载运行。长期欠载或过载运行都不好。长期欠载,电机得不到充分利用,且运行效率不高,浪费能量;长期过载,电机可能因过热而损坏。

**例1-1** 一台Z<sub>2</sub>系列发电机,其部分数据如下:  $P_e = 180\text{kW}$ ,  $U_e = 230\text{V}$ ,  $\eta_e = 89.5\%$ , 求该发电机的额定输入功率  $P_1$  及额定电源。

**解** 额定输入功率

$$P_1 = \frac{P_e}{\eta_e} = \frac{180}{0.895} = 201.12 \text{ (kW)}$$

额定电流 
$$I_e = \frac{P_e}{U_e} = \frac{180 \times 10^3}{230} = 782.6 \text{ (A)}$$

**例1-2** 一台Z<sub>2</sub>系列电动机,其部分数据如下:  $P_e = 100\text{kW}$ ,  $U_e = 220\text{V}$ ,  $\eta_e = 89\%$ , 求该电动机的额定输入功率  $P_1$  及额定电流  $I_e$ 。

**解** 额定输入功率

$$P_{1e} = \frac{P_e}{\eta_e} = \frac{100}{0.89} = 112.36 \text{ (kW)}$$

额定电流 
$$I_e = \frac{P_1}{U_e} = \frac{112.36 \times 10^3}{220} = 510.73 \text{ (A)}$$

或 
$$I_e = \frac{P_e}{U_e \eta_e} = \frac{100 \times 10^3}{220 \times 0.89} = 510.73 \text{ (A)}$$

### 三、直流电机的主要系列

我国生产的直流电机,按照容量大小,结构型式,应用范围,性能水平等的不同,有以下主要的产品系列:

Z<sub>2</sub>系列小型直流电机。包括发电机和电动机,为一般用途,即应用于非湿热带地区,非多尘或无有害气体的场所,非严重过载或冲击性过载要求的情况下。

Z<sub>3</sub>系列小型直流电机。是在Z<sub>2</sub>系列后试制成功的新产品,包括发电机和电动机,为一般用途,可代替Z<sub>2</sub>系列小型直流电机。

ZD和ZF系列大、中型直流电机。ZD是直流电动机系列, ZF是直流发电机系列,为一

般用途。

关于直流电机的大小，通常是以额定功率和额定转速来划分的。因为电机几何尺寸的大小决定于转矩的大小；而转矩的大小又与电机额定功率和额定转速之比成正比。我国规定：

1500r/min、功率为200kW及以下的称为小型直流电机；

1500r/min、功率为200kW以上到1000r/min、功率为1250kW及以下的称为中型直流电机。

1000r/min及以下、功率为1250kW以上的称为大型直流电机。

以上介绍的Z<sub>2</sub>、Z<sub>3</sub>、ZD和ZF系列均为一般用途的直流电机。以下几种系列是特殊用途的直流电机，又称专用直流电机。

ZZY系列和ZZJ<sub>2</sub>系列是起重冶金用直流电动机。

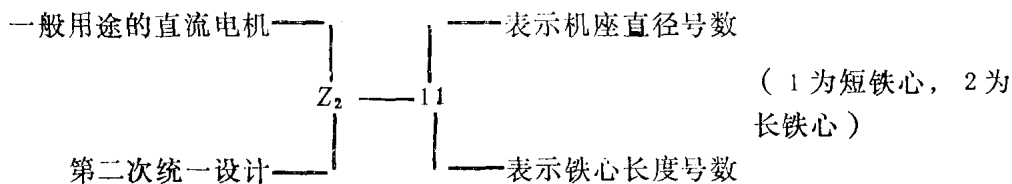
ZHC2系列是充电用直流发电机。

ZG系列是辊道用直流电动机。

ZBD、ZBF系列是龙门刨床用直流电机组。

还有其它一些专用直流电机的系列。各种系列的功率等级、转速等级、电压等级、绝缘等级、通风方式及结构型式等在电机产品样本上都可查到，这里就不再介绍了。

每一种电机产品都有一个型号，国产电机产品的型号一般采用大写印刷体的汉语拼音字母和阿拉伯数字表示，其中汉语拼音字母是根据电机的全名称选择有代表意义的汉字，再从该汉字的拼音中得到的。例如，Z<sub>2</sub>-11的意义为：



又如，Z<sub>2</sub>-112为11号机座、长铁心。

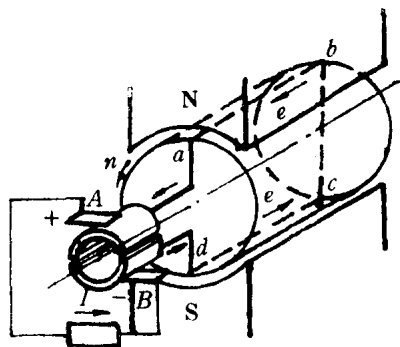


图1-9 直流发电机工作原理示意图

## §1-2 直流电机的工作原理

直流电机的实际结构是复杂的，为了阐明其基本原理，我们将实际的直流电机简化成图1-9所示的物理模型。图中N、S代表主磁极；可以转动的圆柱体代表电枢，上面的线圈abcd代表电枢绕组元件，并假设电枢绕组由一个元件组成。

元件的两端分别与两块换向片相联，换向片间互相绝缘，这两块互相绝缘的换向片就构成一个最简单的换向器。换向器装在轴上，和电枢一起旋转，换向器又与两个固定不动的电刷A、B相接触，通过电刷、换向器可以把电枢绕组abcd与外部电路相联接。

### 一、直流发电机的基本原理

当直流电机作为直流发电机使用时，其电枢是被原动机拖动以转速 $n$ 旋转的，而与电刷相联的外部电路则是发电机的负载（如图1-9所示）。