

高职高专电气系列教材

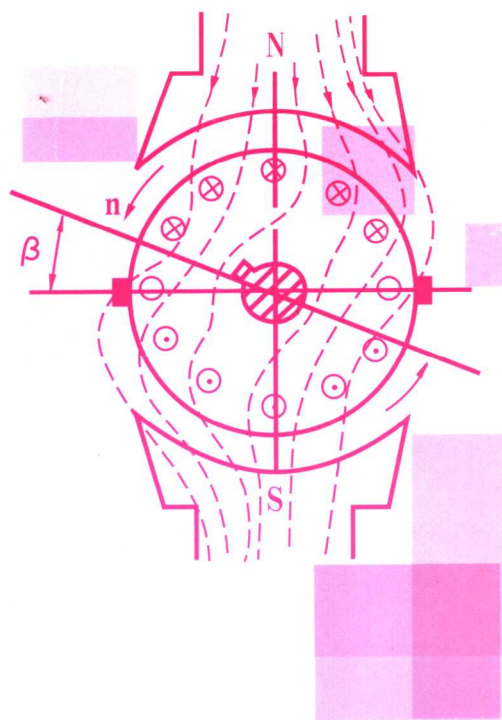
GAOZHI GAOZHUAN DIANQI XILIE JIAOCAI

电机及拖动基础

DianJi Ji TuoDong JiChu

■ 主 编 诸葛致

■ 副主编 张小兰



重庆大学出版社

内 容 提 要

本书阐述了直流电动机、变压器、异步电动机的基本结构、工作原理、电磁关系及运行特性,主要分析了直流电动机和异步电动机的机械特性及其起动、调速、制动的基本原理,分析了微控电机及部分新型电机的基本结构和工作原理,并简单介绍了同步电动机的工作原理及电动机的选择等方面的知识。

本书是高职高专电气类专业的理论教材,与实践教材《电机及拖动实训》配合使用效果更佳。此书也可供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机及拖动基础/诸葛致主编. —重庆:重庆大学出版社,2004.9
(高职高专电气类系列教材)
ISBN 7-5624-3186-8

I. 电... II. 诸... III. ①电机—高等学校:技术学校—教材②电力传动—高等学校:技术学校—教材
IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 086000 号

电机及拖动基础

主 编 诸葛致

副主编 张小兰

责任编辑:周 立 何建云 版式设计:周 立
责任校对:廖应碧 责任印制:秦 梅

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鹤盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址: <http://www.cqup.com.cn>

邮箱: zsk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

四川外语学院印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:13.25 字数:331千
2004年9月第1版 2004年9月第1次印刷

印数:1—5000

ISBN 7-5624-3186-8/TM·100

定价:18.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

前言

本书是高职高专电气类专业的专业基础理论教材,实践教材为《电机及拖动实训》,两者配合使用效果更佳。

本书阐述力求通俗易懂、层次清晰、详略得当、深入浅出,注重理论联系实际,同时吐故纳新,及时吸收新知识,尽量与实际应用保持一致。

本书共分8章,主要内容为直流电机的工作原理、直流电机的运行及拖动、变压器、异步电动机的工作原理、异步电动机的运行及拖动、同步电动机、微控电机、电动机的选择等。每章均有小结,并附有适量的习题。

本书由桂林电子工业学院诸葛致主编,重庆电力高等专科学校张小兰任副主编。第1章由陕西工业职业技术学院李明编写,第2章由重庆工业高等专科学校张跃宏编写,第3章由贵州工业大学职业技术学院向俐霞编写,第4章及第6章由重庆电力高等专科学校张小兰编写,第5章由贵州理工职业技术学院肖波编写,第7章、第8章及绪论由桂林电子工业学院诸葛致编写。

本书的编写,得到了桂林电子工业学院诸葛逸之先生的关注和支持,同时也参阅了一些相关书籍和文献,在此,向诸葛逸之先生和相关文献作者一并表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,不足和错误之处在所难免,恳请读者不吝批评指正。

编者

2004年1月

目 录

绪 论	(1)
0.1 本课程的性质和任务	(1)
0.2 本课程常用的基本知识	(2)
0.3 常用的基本定律	(5)
第 1 章 直流电机	(8)
1.1 直流电机的基本工作原理	(8)
1.2 直流电机的主要结构及用途	(10)
1.3 直流电机的绕组	(16)
1.4 直流电机的磁场	(20)
1.5 直流电机的电枢电动势和电磁转矩	(24)
1.6 直流电机的换向	(26)
1.7 直流电机的铭牌数据	(29)
习 题 1	(30)
第 2 章 直流电动机的运行及拖动	(33)
2.1 电力拖动动力学基础	(33)
2.2 直流电动机的运行原理	(36)
2.3 他励直流电动机的机械特性	(41)
2.4 他励直流电动机的起动	(46)
2.5 他励直流电动机的调速	(49)
2.6 他励直流电动机的制动	(53)
小 结	(61)
习 题 2	(62)
第 3 章 变 压 器	(64)
3.1 变压器的工作原理和结构	(64)
3.2 单相变压器的空载运行	(69)
3.3 单相变压器的负载运行	(73)
3.4 变压器的参数测定	(77)
3.5 变压器的运行特性	(80)
3.6 三相变压器	(83)
3.7 自耦变压器与仪用互感器	(86)
小 结	(90)
习 题 3	(90)

第 4 章 异步电动机	(92)
4.1 三相异步电动机的基本工作原理	(92)
4.2 三相异步电动机的结构	(93)
4.3 三相异步电动机的铭牌数据	(96)
4.4 三相异步电动机的定子绕组	(97)
4.5 三相异步电动机的电磁关系	(101)
4.6 三相异步电动机的功率与转矩	(112)
4.7 三相异步电动机的工作特性	(114)
4.8 三相异步电动机参数的测定	(115)
习题 4	(117)
第 5 章 三相异步电动机的运行与拖动	(119)
5.1 三相异步电动机的运行特性	(119)
5.2 三相异步电机的起动	(124)
5.3 三相异步电动机的制动	(131)
5.4 三相异步电动机的调速	(136)
习题 5	(146)
第 6 章 同步电机	(148)
6.1 同步电机的主要结构和用途	(148)
6.2 同步电动机的基本工作原理	(150)
6.3 同步电动机的起动	(151)
习题 6	(153)
第 7 章 微控电机	(154)
7.1 单相异步电动机	(154)
7.2 伺服电动机	(159)
7.3 力矩电动机	(166)
7.4 微型同步电动机	(166)
7.5 步进电动机	(169)
7.6 旋转变压器	(175)
7.7 自整角机	(181)
7.8 测速发电机	(188)
7.9 直线电动机	(192)
小 结	(195)
习题 7	(196)
第 8 章 电动机的选择	(198)
8.1 电动机的绝缘材料与允许温升	(198)
8.2 电动机的工作方式	(199)
8.3 电动机的选择	(200)
小 结	(202)
习题 8	(202)
参考书目	(203)

绪 论

电机分为发电机、电动机和变压器三大类。变压器的工作原理与异步电动机本质上是一样的,可以把变压器看做一种不旋转的电机。发电厂中的汽轮机、水轮机等动力机械带动发电机,将燃料燃烧的热能、水的势能、原子核裂变产生的原子能,通过发电机转变为电能。发电机发出的电压一般为 10.5 kV,可直接输送到附近的地区,若远距离输送则会产生巨大的损耗,输送的距离越远则损耗越大。为了减小输电线路的损耗,可用升压变压器将电压升高到 110 kV、220 kV、330 kV、500 kV、750 kV,输电的距离越远,则采用的电压越高。我国在 2003 年建成了第一条 750 kV 的超高压输电线路。

经过长距离输电,到了用电区后,用变压器进行逐级降压。到工厂或者生活区后再用变压器降至 380 V/220 V,带动电动机拖动机械设备,如机床、轧钢机、搅拌机、各种生产线等,把电能转变为机械能。

另外还有许多微控电机,常在自动控制系统中作执行元件、检测元件、解算元件。微控电动机功率较小,通常在几百瓦以内。

0.1 本课程的性质和任务

“电机及拖动基础”是电气工程及自动化专业、自动化专业的主要专业技术基础课程。在此之前须先学习完高等数学、大学物理、电路原理等课程。本课程的任务是使学生掌握电机的基本结构、工作原理、电磁关系、运行特性、起动方法、调速方法、制动方法及各种分析方法、计算方法。

课程涉及的知识较广,理论性和实践性都很强,而且前后知识的逻辑性也很强,往往前面的知识未学好,后面的知识就比较难学。

本课程主要阐述直流电机、异步电机和变压器的理论知识,与本书配套的实践教材《电机及拖动实训》主要讲授直流电机的使用与维修、异步电机的使用与维修、变压器的使用与维修、小型变压器的设计与制作等实际工作经验。《电机及拖动实训》采用实际生产中使用的实物和实际生产中出现的故障为例,详细叙述了电机和变压器如何安装、调试和维修,深刻剖析了故障原因和解决方法,力图用实际工作经验让学生对电机和变压器做到能用、会用、会修进

而巧用、巧修。除此之外,特别是对一些稍不注意便造成人身和设备伤害的地方给予了特别提醒,并作了具体的分析。

总之,应将本课程的理论教材和实践教材结合起来使用,才能真正做到理论联系实际,才能做到学以致用,这样才能更好地达到教学目的,真正为以后的专业课程和实际工作打下扎实的基础。

0.2 本课程常用的基本知识

电机是通过磁场耦合实现能量转换的,磁场的强弱及分布不仅影响电机的性能,还决定电机的重量和体积。

0.2.1 基本概念

(1) 磁场强度

载流导体产生的磁场在某一点的强度叫做磁场强度 H , 磁场强度的单位为安/米, 符号为 A/m 。

(2) 磁感应强度

在载流导体的周围存在一个磁场, 在磁铁的周围也存在一个磁场。在磁场中某点的磁场强度乘以磁性材料的导磁率 μ 叫做磁感应强度 B , 即

$$B = \mu H$$

磁感应强度是描述磁场的强弱、方向及分布情况的物理量, 单位为特, 符号为 T 。可用一些曲线来表示磁场的强弱、方向及分布情况, 这些曲线称为磁力线。磁力线的疏密反映了磁场的强度即表示磁感应强度 B 的大小, 曲线箭头表示磁场的方向, 磁力线的分布表示了磁场的分布情况。

(3) 磁感应通量(磁通量)

磁场穿过截面 A 的通量叫做磁感应通量 Φ , 简称磁通量 Φ , 即

$$\Phi = \int_A B dA$$

若是均匀磁场, 且截面 A 与 B 垂直, 则上式变为

$$\Phi = BA$$

即

$$B = \Phi/A$$

Φ 为通过截面 A 的磁通量, 单位为韦, 符号为 Wb 。 B 为通过单位截面积的磁通量, 故磁感应强度 B 也称为磁通密度, 简称磁密, 故

$$1 T = 1 Wb/m^2$$

0.2.2 铁磁材料及其特性

(1) 铁磁材料及其磁化

铁磁材料主要有铁、镍、钴及其合金。铁磁材料中存在许多天然磁化区, 这些磁化区称为磁

畴。在常态下,各个磁畴无规则排列,总的磁效应几乎抵消,对外不显磁性。但在外部磁场的作用下,磁畴就顺着外磁场的方向转为同一方向,即磁畴整齐排列起来,对外显出磁性,此时说此铁磁材料被磁化了,形成了磁化磁场。

铁磁材料因磁畴的整齐排列而形成的磁化磁场要比非铁磁材料强得多,即铁磁材料的磁导率 μ_{Fe} 要比非铁磁材料的磁导率大得多。

(2) 磁导率

任何空间都可导磁,不管空间中是否有介质。在真空中,磁力线照样可以形成闭合回路,只是磁场相对较弱而已,换句话说,真空也可导磁,只不过磁导率小而已。磁导率是用来衡量磁性材料导磁性能优劣的物理量。经实验测定真空磁导率 μ_0 约为 $4\pi \times 10^7 \text{ T} \cdot \text{m}/\text{A}$,这是一个常数。铁磁材料的磁导率约为真空磁导率的数千倍。另外,非铁磁材料的磁导率仅比真空磁导率稍大一些而已。

(3) 磁化曲线

在非铁磁材料中,磁通密度 B 与磁场强度 H 之间成线性关系,其曲线为一条直线,如图0.1所示,直线的斜率就约等于 μ_0 。

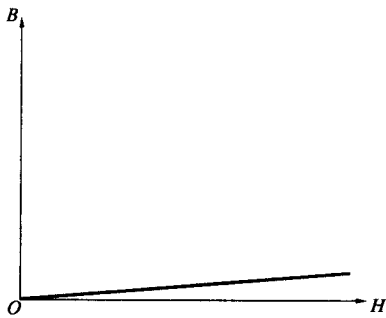


图 0.1 非铁磁材料的 $B-H$ 曲线

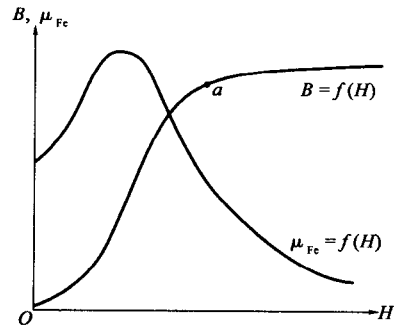


图 0.2 铁磁材料的磁化曲线及磁导率曲线

铁磁材料的导磁性能好,其磁导率约为真空磁导率的数千倍,但其大小会随外加磁场强度的变化而变化,其磁化曲线为非线性关系,如图 0.2 所示。开始时,随外加磁场强度的增加,磁导率逐渐增加,铁磁材料中大量的磁畴开始转为同一方向,趋向外加磁场, B 值增加很快,此时铁磁材料的磁导率较高,随着电流的进一步增加,磁场强度进一步加强,大多数的磁畴已趋向外加磁场方向,可转向的磁畴越来越少, B 值增加的量越来越小,此时铁磁材料趋向饱和,此时的磁导率明显减小,如图 0.2 所示。

磁化曲线的转弯点称为饱和点,也称为膝点。在设计电机和变压器时,尽量用较小的励磁电流(即尽量小的磁场强度)获取较大的磁通量。设计时,使电机或变压器工作在接近饱和点(a 点),以减少铁磁材料的用量,从而减小电机的体积和重量。

(4) 磁滞回线

当铁磁材料磁感应强度达到饱和点 a 点后,把载流导体的电流降为0即外加磁场强度 H 降为0时,磁感应强度 B 并不为0,而尚有一个值 B_r ,如图0.3所示。在去掉外磁场之后铁磁材料内仍然保留的磁通密度 B_r ,称为剩余磁通密度,简称剩磁。若要使 B 值从 B_r 减小到0,必须加上方向与原来相反的磁场,当 B 值为0的反向磁场强度 H_c 称为矫顽力。

若将反向磁场强度继续增加, B 值变负,到 d 处时 B 值反向饱和。同样地,外加磁场减小到

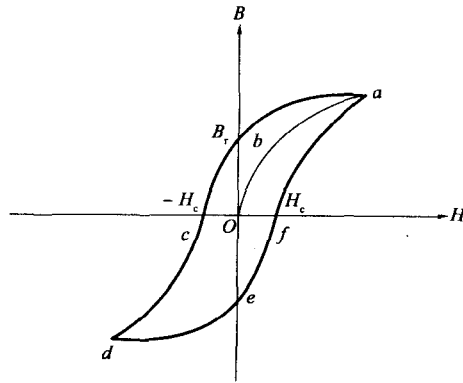


图 0.3 铁磁材料的磁滞回线

0 时, B 值并未回到 0, 当加上正方向磁场强度达 H_c 时, B 值才滞后到 0, 继续增加磁场强度 H , 曲线又回到 a 点, 形成一个闭合的回线。

由上述分析可知, 铁磁材料中的磁通密度 B 的变化总是滞后于磁场强度 H 的变化, 这种现象称为磁滞; 由于磁滞现象而形成的闭合回线称为磁滞回线。

0.2.3 铁磁材料的种类

按照磁滞回线形状的不同, 铁磁材料可分为软磁材料和硬磁材料两大类。

(1) 软磁材料

磁滞回线窄, 剩磁 B_r 和矫顽力都小的铁磁材料叫做软磁材料, 如图 0.4 所示。软磁材料的磁导率高, 磁滞损耗小, 如硅钢片、铁镍合金、铸铁等都属于软磁材料。电机和变压器的铁磁材料采用硅钢片, 故在计算时磁滞现象可忽略不计。

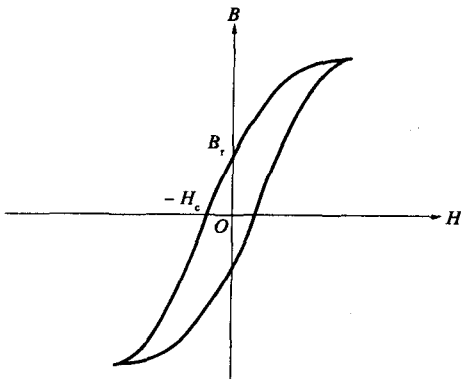


图 0.4 软磁材料的磁滞回线

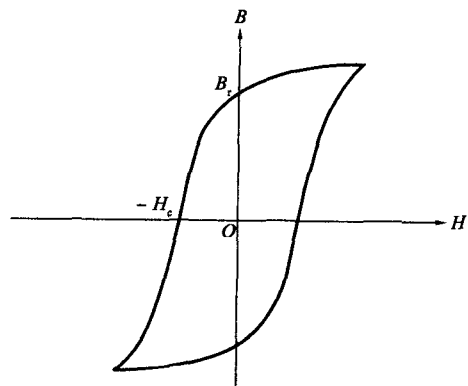


图 0.5 硬磁材料的磁滞回线

(2) 硬磁材料

磁滞回线宽, 剩磁 B_r 和矫顽力都大的铁磁材料称为硬磁材料, 如图 0.5 所示。由于剩磁大, 可做成永久磁铁, 故硬磁材料又称为永磁材料, 如铝镍钴、铁氧体、稀土钴、钕铁硼等都属于硬磁材料。

0.2.4 铁心损耗

(1) 磁滞损耗

在交变磁场中,铁磁材料被正方向、反方向反复交替磁化,其中的磁畴材料不停地改变方向而相互摩擦产生热量从而消耗能量,这种损耗常称为磁滞损耗。

分析及实验均表明,磁滞损耗 p_h 与磁场交变的频率 f 、铁心的体积 V 、磁滞回线的面积成正比。

(2) 涡流损耗

铁磁材料是导电的,故处于交变磁场中的铁磁材料会产生感应电动势,从而引起环流,俗称涡流。因涡流而在铁磁材料中引起的损耗称为涡流损耗。

分析及实验均表明,频率越高、磁密越大、感应电动势就越高,涡流损耗就越大;铁磁材料的电阻率越低,涡流损耗就越大;铁磁材料的厚度越厚,则涡流损耗越大。在异步电机和变压器中,电源的频率为 50 Hz,几乎不变,要达到一定的功率,其磁场密度需要一定的数值,故要减小涡流损耗,可采用电阻率大的铁磁材料,并尽量减少铁磁材料的厚度。因此在电机和变压器中,常采用含硅量较高、厚度较薄(0.35 ~ 0.5 mm)的硅钢片冲叠而成作为铁心。

铁心中的磁滞损耗和涡流损耗合称为铁心损耗,常简称为铁耗。

0.3 常用的基本定律

0.3.1 安培环路定律(全电流定律)

在磁场中沿任一闭合回路磁场强度的线积分等于穿过该回路所有电流的代数和,即

$$\oint_l H dl = \sum I$$

式中, $\sum I$ 就是该磁路包围的全电流,故此定律也称为全电流定律。在式中,凡电流与闭合回路环绕方向符合右手螺旋关系时取正,否则取负。图 0.6 中, i_1 、 i_2 取正号, i_3 取负号,故上式为

$$\oint_l H dl = i_1 + i_2 - i_3$$

若沿着 l 回线,磁场强度处处相等,即为均匀磁场,且闭合回路包围的总电流是一个 N 匝绕组线圈中的电流,则上式可简写为

$$Hl = Ni$$

0.3.2 电磁感应定律

若磁场不变,导体在磁场中相对运动,导体切割磁场而产生感应电动势,其大小为导体所在处的磁通密度 B 与导体的有效长度、导体相对于磁场的线速度 v 的乘积,即

$$e = Blv$$

方向用右手定则判断。无论任何原因,致使与线圈交链的磁链变化时,线圈中都产生感应电动

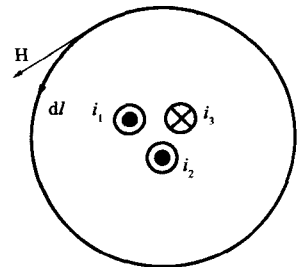


图 0.6 全电流定律

势 e , e 的大小等于与线圈相交链的磁链对时间的变化率, 而 e 的方向符合楞次定律(若该电动势产生一个电流而此电流产生的磁通将反对线圈中原磁链的变化)。根据电工惯例, 规定感应电动势的方向与磁通的正方向符合螺旋关系。故电磁感应定律可表示为

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = - N \frac{d\Phi}{dt}$$

式中, N 为线圈匝数, Φ 为穿过线圈的磁通。

0.3.3 电磁力定律(比奥-萨伐尔定律)

载流导体在与载导体垂直的磁场中受到的电磁力的大小等于导体所处的磁通密度 B 、导体有效长度 l 及导体中的电流的乘积, 即

$$f = Bli$$

电磁力的方向符合左手定则(磁力线垂直穿过左手手掌, 四指指向导体中电流的方向, 那么大拇指所指的方向就是导体所受的电磁力的方向)。

0.3.4 磁路的欧姆定律

若将全电流定律应用到如图 0.7 所示的磁路中, 则有

$$\oint_l H dl = Hl = \sum I = Ni$$

又因为 $H = \frac{B}{\mu} = \frac{\Phi}{\mu A}$, 故上式为

$$Ni = \frac{\Phi}{\mu A} l = \Phi \frac{l}{\mu A}$$

式中, Ni 是铁心磁路上的安匝数, 称为磁路的磁动势 F , 单位为安(A); $\frac{l}{\mu A}$ 为磁路中的磁阻, 记作 R_m , 则上式变为

$$F = \Phi R_m$$

上式表明磁路上的磁动势 F 等于磁路中的磁通量 Φ 乘以磁阻 R_m , 因与电路中的欧姆定律相似, 故称为磁路的欧姆定律。

磁路中的磁阻 R_m 与磁路的平均长度 l 成正比, 与磁路的截面积及铁磁材料的磁导率成反比。需要指出的是, 导电材料的电导率在常态下几乎是一个常数, 故其阻值几乎为一常数; 而铁磁材料的磁导率 μ 随磁感应强度 B 的饱和程度而变化, 不是一个常数; 故铁磁材料的磁导率不是一个常数。

0.3.5 磁路的基尔霍夫第一定律

磁路有时是一个简单的回路(见图 0.7), 有时又带有分支(见图 0.8), 任何闭合面上磁通的代数和为 0, 即

$$\sum \Phi = 0$$

若令进入封闭面的磁通为正, 穿出封闭面的磁通则为负, 则图 0.8 中, Φ_1 、 Φ_2 为正, Φ_3 为负, 根据上式则有

$$\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0$$

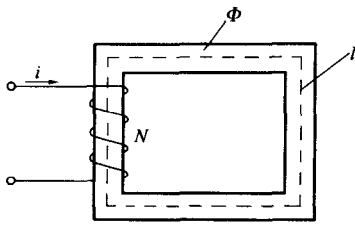


图 0.7 无分支磁路

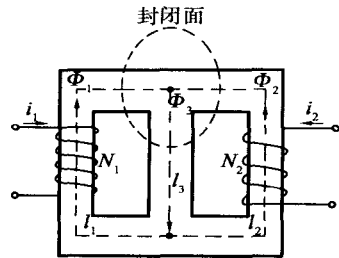


图 0.8 有分支磁路

0.3.6 磁路的基尔霍夫第二定律

磁路中各部分的材料和截面不同,那么各段的 B 和 μ 不同,计算时应按铁磁材料分段处理。每段磁路上磁场强度 H 与此段磁路长度 l 的乘积 Hl 称为该段磁路的磁压降,对于整个闭合磁路,则有

$$\oint H dl = \sum Hl = \sum Ni$$

即

$$\sum F = \sum \Phi R_m$$

上述两式的意思为:沿任一闭合面,磁压降的代数和等于磁动势的代数和。以图 0.8 为例,沿 l_1 、 l_2 组成的闭合回路,有

$$\begin{aligned} F_1 - F_2 &= N_1 i_1 - N_2 i_2 \\ &= H_1 l_1 - H_2 l_2 \\ &= \Phi_1 R_{m1} - \Phi_2 R_{m2} \end{aligned}$$

综上所述,磁路和电路在形式上是相似的,但物理本质不同:

1) 在电路中电流全部在导线中流过,在电气绝缘体中不能通过;在磁路中,不存在绝对的磁绝缘体,在磁场中,铁心中有磁通,在空气中即使在真空中也有磁通,只不过相对较少而已。故电路中存在有电动势而无电流的现象,磁路中有磁动势则必然有磁通量。

2) 在电路中有电流就有功率损耗 $I^2 R$;在恒定的磁通(恒定的直流产生的磁通)中,铁心中没有功率损耗。

3) 电路中导体的电阻率(或电导率)在一定的温度下是不变的;而在磁路中,铁磁材料的磁导率是随磁密 B 的变化而变化的,故其磁阻 R_m 随磁路中的磁密的变化而变化,饱和程度越高,磁阻就越大。

4) 大多数电路是线性电路,计算时可用叠加原理;在铁心磁路中,计算时不能应用叠加原理,特别是铁心磁路趋向饱和时,更不能应用叠加原理。

第 1 章

直流电机

直流电机按能量转换的方向可分为直流电动机和直流发电机。

一般而言,和交流电动机比较起来,直流电动机构造复杂,生产成本较高,维修不便,而且有换向问题。但直流电动机有良好的调速性能、较大的起动转矩和过载能力等很多优点,因此,那些对起动和调速要求较高的生产机械,如大型起重机、矿井提升设备、电气机车、船舶机械、龙门刨床、轧钢机、纺织机和造纸机等,仍大量采用直流电动机拖动。直流电动机尤其适用于高精度、高性能的自动控制系统。尽管随着电力电子元件和变流技术的发展、交流调速理论的完善,交流调速系统发展很快,在某些领域内有取代直流调速系统的趋势,不过在今后一个较长的时期内,直流电动机在电力拖动系统中仍将以其自身的特点,占有重要的地位。

虽然现在多用整流电源,但因直流发电机的供电质量较好,故在一些特殊工作场所,如作为大型同步发电机的励磁电源,电解、电镀和某些化工工业中,或要求很高的可靠性、特殊的供电参数时,直流发电机仍被应用。

直流电机虽有功率大小和用途不同的区别,但基本结构和基本电磁关系大体相同。本章主要阐述这两大基本问题。

1.1 直流电机的基本工作原理

直流电机的工作原理是基于电磁感应定律和电磁力定律,即绕组切割磁力线产生感应电动势和绕组电流在磁场中受力而产生电磁转矩。显然,一台直流电机要工作,至少需要磁场和绕组。此外,为了对外产生方向不变的直流电动势和连续同方向作用的电磁转矩,在电流的输入输出环节还需要所谓的换向元件。

以下以一个最简单的直流电机模型来说明它的基本工作原理。

1.1.1 直流发电机的基本工作原理

图 1.1 是一台最简单的直流发电机模型。N 和 S 是一对固定的磁极,可以是永久磁铁,也可以是电磁铁。磁极之间有一个可以转动的铁质圆柱体,称为电枢铁心。铁心表面固定一个用绝缘导体构成的电枢线圈 $abcd$,线圈的两端分别接到相互绝缘的两个弧形铜片上,弧形铜片

称为换向片。它们的组合体称为换向器,在换向器上放置固定不动而与换向片滑动接触的电刷 A 和 B ,线圈 $abcd$ 通过换向器和电刷接通外电路。电枢铁心、电枢线圈和换向器构成的整体称为电枢。电枢在原动机拖动下转动,把机械能转变为电能供给接在两电刷间的电负载。

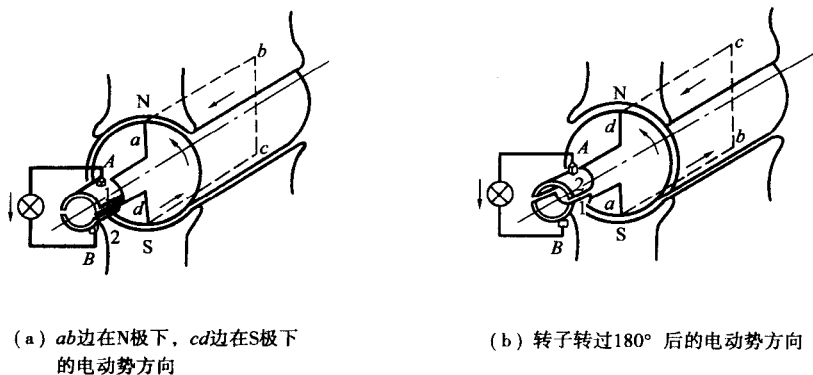


图 1.1 直流发电机工作原理图

1) 在图 1.1(a) 中,电枢逆时针旋转时,线圈两边 ab 与 cd 切割磁力线产生感应电动势,方向如图(a)所示,由 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$,电刷 A 为正极,电刷 B 为负极。外电路上的电流方向是由正极 A 流出,经负载流向负极 B ,可根据右手定则判断。

2) 当电枢转过 180° 之后,如图 1.1(b) 所示,此时线圈的电动势方向改变了,变成了由 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$,电刷 A 原来与换向片 1 接触,变为与换向片 2 接触,电刷 B 原来与换向片 2 接触,变为与换向片 1 接触,这样电刷 A 仍为正极,电刷 B 仍为负极。

以上分析表明,一个线圈边从一个磁极范围转到相邻异性磁极范围时,其电动势方向就改变一次,但对外电路而言,两电刷间电动势的方向是不变的,只是大小在零与最大值之间变化。

这种单线圈直流发电机,虽然可以获得恒定方向的电动势和电流,但其大小是脉动的。这就是直流发电机的基本工作原理。

3) 直流发电机恒定电动势的产生。

上述的发电机,电动势方向虽然不变,但大小是脉动的,而且波动很大,这样的电动势是不符合实际要求的。要减小电动势的波动程度,可以在电枢上适当增加线圈数和换向片数。例如,在电枢上绕两个线圈,即每隔 90° 就有一个线圈边,这样换向后半波电动势将相差 90° 波动程度已显著减小。实际应用的直流发电机中线圈数总是较多的,磁极对数也不只是一对,故电动势的波动程度很小(实验和分析都表明,当每个磁极范围内的导体数目大于 8 时,电动势的波动程度就小于 1%),可以认为是恒定的直流电动势。

1.1.2 直流电动机的基本工作原理

如果在图 1.1(a)、(b) 中去除原动机,而在 A 、 B 电刷间改接入直流电源 U ,这时该电机模型就运行于电动机状态(见图 1.2),把电能转变为机械能。

1) 在图 1.2(a) 中所示的瞬间,直流电流通过电刷 A 、换向片 1、线圈边 ab 和 cd ,最后经换向片 2 及电刷 B 回到电源的负极。载流导体 ab 和 cd 在磁场中要受到磁场力的作用。根据左手定则,导体 ab 受力向左,导体 cd 受力向右,这样就产生一个转矩,使电枢沿逆时针方向旋转。

2) 当电枢转过 180° 之后,如图 1.2(b) 所示,此时线圈电流改变了方向,电流流经的途径

是通过电刷 A、换向片 2、线圈边 dc 和 ba ，最后经换向片 1 及电刷 B 回到电源的负极。这时两个线圈边受力的方向仍旧使电枢沿逆时针方向旋转。

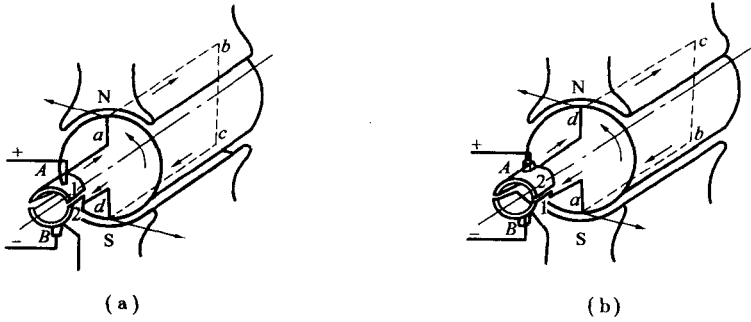


图 1.2 直流电动机工作原理图

从以上分析可以知道，一个线圈边从一个磁极范围转到相邻异性磁极范围时，通过线圈的电流方向就改变一次，电枢的转动方向仍保持不变。改变线圈中电流的方向是由换向器和电刷完成的。

在实际直流电动机中，有许多个线圈牢固地嵌在电枢铁心槽中。当线圈通过电流，在磁场中因受力而运动时，即带动整个电枢旋转，通过转轴便可带动其他机械工作。这就是直流电动机的基本工作原理。

3) 直流电动机恒定转矩的产生。

欲使电动机连续平稳地旋转，单靠一对换向片是达不到目的的。为了使载流导体在磁场中所受到的电磁力形成一种方向不变，大小也不变的恒定转矩，可以通过增加线圈数和换向片数来解决。如果每极换向片数增至 8 片以上（相应地也要增加线圈数），就可以使脉动的转子转矩变成几乎不变的恒定转矩。

1.1.3 直流电机的可逆性

现在来比较图 1.1(a)、(b) 和图 1.2(a)、(b)，除去原动机、电源及两台电机各自的负载（直流发电机电刷间的电负载；直流电动机转轴上的机械负载）这些外部设备，直流发电机和直流电动机在结构上是相同的，两者没有本质的区别。所不同的仅仅是外界所加的条件。也就是说，如果从轴上输入机械功率，电机作发电机运行，向外输出直流电功率；如果从电刷上输入电功率，电机作电动机运行，向外输出机械功率。这种运行状态的可逆性称作直流电机的可逆运行原理。但应注意：实际的直流发电机和直流电动机，因为设计制造时考虑了长期作为发电机或电动机运行性能方面的不同要求，在结构上稍有区别，因此并不像理论上分析的那样完全可逆。

电机的可逆性可用下图形象地表示：

1.2 直流电机的主要结构及用途

由上节直流电动机和直流发电机工作原理示意图可以看到，直流电机的结构应由定子和



转子两大部分组成。直流电机运行时静止不动的部分称为定子, 定子的主要作用是产生磁场; 运行时转动的部分称为转子, 其主要作用是产生电磁转矩和感应电动势。定子磁极和转子之间留有一定的间隙, 称为气隙。

下面对图 1.3 和图 1.4 中各主要结构部件分别做一简单介绍。

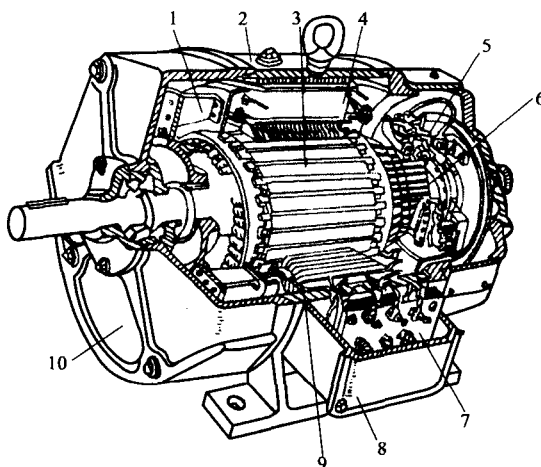


图 1.3 直流电机的结构图

1—风扇; 2—机座; 3—电枢; 4—主磁极; 5—电刷架; 6—换向器;
7—接线板; 8—出线盒; 9—换向极; 10—端盖

1.2.1 定子部分

定子的作用是产生磁场和作电机的机械支架。主要由主磁极、换向极、机座、端盖、轴承和电刷等部件组成。

(1) 主磁极

绝大部分的直流电机采用电磁铁的主磁极。主磁极由铁心及线圈两部分组成, 通过螺钉固定在机座上(见图 1.5)。

主磁极铁心通常采用 1 ~ 1.5 mm 的钢板冲片叠压而成。铁心的近气隙部分做成弧形, 使气隙中的磁通能均匀分布, 并能挡住套在铁心上的励磁绕组, 使其不致脱落。铁心的弧形部分通常称为极掌或极靴。将绕制好的线圈(通常称为励磁绕组), 套在铁心上组成主磁极。

主磁极的主要作用是产生主磁通。当励磁绕组通过直流电时, 铁心就成为一个固定极性的磁极。主磁极可为一对、两对或更多对数。为了保证各极励磁电流严格相等, 励磁绕组相互间一般采用串联, 而且在连接时要保证 N、S 极间隔排列。

励磁绕组用铜线(或铝线)在模具上绕制成型后, 装在铁心上。绕组与铁心之间垫有绝缘

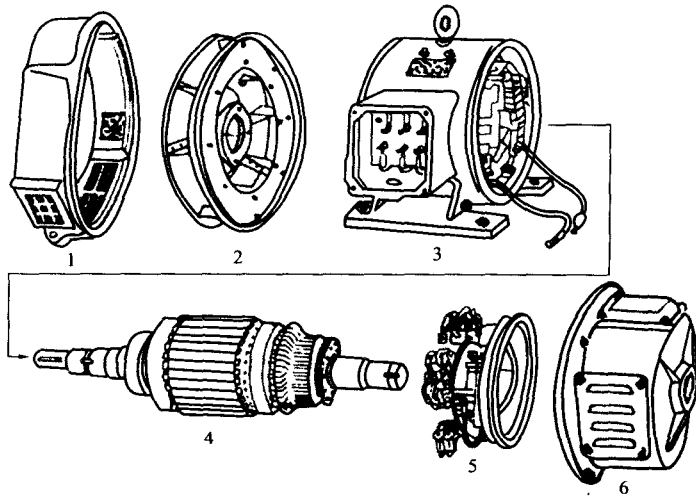


图 1.4 直流电机的组成部件

1—前端盖;2—风扇;3—机座;4—电枢;5—电刷架;6—后端盖

材料。

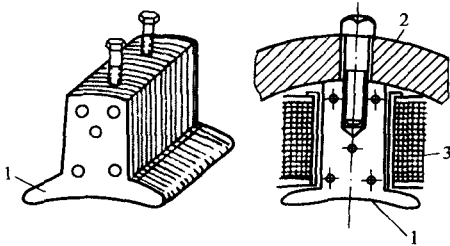


图 1.5 直流电机的主磁极

1—极掌;2—机座;3—励磁绕组

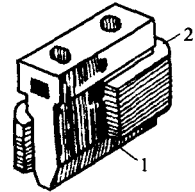


图 1.6 换向极

1—铁心;2—绕组

(2) 机座

机座通常用铸铁、铸钢或钢板焊接而成。机座中传导磁通的部分称为磁轭。机座的主要作用有三：一是作为磁轭传导磁通，是电机磁路的一部分；二是用来固定主磁极、换向极和端盖等部件；三是借助机座的底脚把电机固定在基础上。所以机座必须具有足够的机械强度和良好的导磁性能。

机座上通常还装有出线盒，电枢绕组和励磁绕组通过出线盒与外部连接。普通直流电机电枢回路的电阻比励磁回路小得多。

(3) 换向极

换向极又叫做附加极，由铁心和线圈组成。其铁心多用整块钢板加工而成，大容量电机也采用薄钢片叠压而成。其励磁绕组的匝数较少，并与电枢绕组串联（为了更好地抵消电枢反应的影响，见后述），故通过的电流较大，一般采用较粗的矩形截面导线绕制而成。换向极通常安装在两个相邻主磁极的中心线处，所以又称间极，其数目一般与主磁极数目相等（小功率直流电机也有不装设换向极或只装设主磁极极数一半的换向极），也用螺钉固定在机座上（见图