

Technology
实用技术

电工电子实践

电机学基础实践

闫智 张勇 陈琦 编



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

电工电子实践

电机学基础实践

闫 智 张 勇 陈 琦 编

章 节 名 称	编 者	审 核 者
第一章 绪论	闫智	张勇
第二章 直流电机	张勇	陈琦
第三章 交流电机	陈琦	闫智
第四章 变压器	闫智	张勇
第五章 异步电动机	张勇	陈琦
第六章 同步电动机	陈琦	闫智
第七章 特种电机	闫智	张勇
第八章 电机控制	张勇	陈琦
第九章 电机测试	陈琦	闫智
第十章 电机应用	闫智	张勇

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是“电工电子实践”丛书之一。书中从电机的基础知识及其应用实践两个方面进行讲解。在电机学基础方面,重点讲述直流电机、变压器、感应电机、同步电机和特种电机的基本结构、工作原理及运行特性,并简要地介绍了电动机选择的原则以及和电机相关的晶闸管、稳压电源等电子学相关知识;在应用实践方面,主要论述直流电机的调速以及运行特性实践,单相变压器参数测定以及运行特性实践,单相和三相感应电动机运行特性实践,三相同步电动机的起动和相位特性实践,步进电机参数测定以及运行特性实践等。

本书可以作为工科院校非电机专业的教材,也可供该领域的工程技术人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电机学基础实践/闫智等编. —北京:科学出版社,2008
(电工电子实践)

ISBN 978-7-03-023294-6

I. 电… II. 闫… III. 电机学 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 169775 号

责任编辑:赵方青 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2009 年 1 月第一次印刷 印张: 17 1/4

印数: 1—5000 字数: 335 000

定 价: 32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

前 言

现代高等教育的任务是培养具有创新精神和实践能力的高级专门人才。从这一要求出发,结合本人在本科教学中的经验编写本书,可以作为工业自动化等非电机专业教材。

培养具有创新精神和实践能力的高级专门人才,就必须强调实践教学的重要性。许多知识,只有在实践中才能心领神会,实践是能力培训的重要环节。现今社会是知识大爆炸的年代,在有限的时间里,学生们需要学习和了解的知识很多。为了解决课时与知识容量之间的矛盾,我们在分析了当前教学现状和社会需求的基础上,确定了深化基础知识、降低理论深度、加大应用实践比重的方针,并作为本书编写的依据。

本书的主要特点是:

(1)侧重基本理论和基本概念的阐述,并始终强调实践应用。

(2)没有将电机原理与电力拖动完全割裂开分别讲述,而是将二者有机地结合起来。电力拖动的内容多数是以实践的方式来表述。

(3)内容叙述通俗易懂、循序渐进,并且书中配有大量的例题和习题,便于自学,同时也具有很宽的适用人群。

参加本书编写的有闫智(主编和第1、2、5章)、张勇(第3、4章)、陈琦(第6、7章)。在该书编写过程中,赵建强教授提供了大量的参考资料,张立毅教授也提出了很多宝贵的意见。在此,表示衷心感谢。

由于编者水平有限,加之编写时间比较仓促,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2008年11月

目 录

第 1 章 直流电机	1
1.1 直流电机工作原理	2
1.2 直流电机的结构与分类	4
1.2.1 直流电机的结构	4
1.2.2 直流电机的分类	8
1.3 直流电机的电枢反应	9
1.4 直流电机的感应电动势和电磁转矩	10
1.5 直流他励电动机	13
1.6 直流并励电机	15
1.6.1 直流并励电动机的启动、制动及反转实践	16
1.6.2 用调节磁场法控制电机转速实践	19
1.6.3 用调节电压法控制电机转速实践	20
1.7 直流串励电动机	21
1.7.1 直流串励电动机的绕组电阻测定实践	22
1.7.2 直流串励电动机的负载特性实践	24
1.8 直流复励电动机	26
1.9 直流电动机的功率和转矩关系	27
1.10 直流他励发电机	29
1.11 直流并励发电机	31
1.11.1 直流并励发电机的空载特性实践	34
1.11.2 直流并励发电机的负载特性实践	36
1.12 直流串励和复励发电机	37
1.13 直流发电机的功率和转矩关系	40
第 2 章 变压器	43
2.1 变压器的工作原理	44

2.2	变压器的基本结构和分类	45
2.3	变压器的空载运行	51
2.4	变压器的负载运行	57
2.5	变压器参数测定	66
2.5.1	测定变压器的匝数比实践	66
2.5.2	测定变压器的绕组电阻实践	67
2.5.3	变压器的空载特性实践	68
2.5.4	变压器的短路特性实践	70
2.6	变压器运行特性	71
2.7	变压器的极性	75
2.7.1	测定变压器的极性实践	76
2.8	三相变压器	77
2.8.1	三相变压器的联接组	78
2.8.2	用单相变压器实现三相连接实践	82
2.8.3	三相变压器的并联运行	85
2.9	特种变压器	86
2.9.1	自耦变压器	87
2.9.2	互感器	89
第3章 感应电机		93
3.1	三相感应电动机的基本结构	94
3.1.1	三相感应电动机的主要部件	94
3.1.2	三相感应电动机的铭牌数据	96
3.2	三相感应电动机的工作原理	97
3.2.1	旋转磁场	97
3.2.2	工作原理	98
3.3	三相感应电动机的感应电动势和磁通势	99
3.3.1	电压平衡方程式	99
3.3.2	磁通势平衡方程式	100
3.4	三相感应电动机的运行原理	101
3.4.1	三相感应电动机的空载运行	101
3.4.2	三相感应电动机的堵转运行	102
3.4.3	三相感应电动机的负载运行	102
3.4.4	三相感应电动机的等效电路	104

3.4.5	三相感应电动机的功率平衡和转矩特性	107
3.5	三相感应电动机的工作特性	109
3.6	三相感应电动机的参数测定	112
3.6.1	空载试验	112
3.6.2	短路试验	113
3.7	三相感应电动机的机械特性	115
3.7.1	电磁转矩三种表达式	115
3.7.2	三相感应电动机的人为特性	120
3.8	三相感应电动机的启动	123
3.8.1	笼型感应电动机的启动方法	124
3.8.2	绕线型感应电动机的启动方法	130
3.9	三相感应电动机实践	133
3.9.1	测定三相感应电动机绕组的电阻实践	133
3.9.2	三相感应电动机空载特性实践	134
3.9.3	三相感应电动机堵转特性实践	135
3.9.4	三相感应电动机的负载特性实践	137
3.10	单相感应电动机	140
3.10.1	单相感应电动机的工作原理	140
3.10.2	单相感应电动机的启动方法	141
3.10.3	单相感应电动机的启动特性实践	143
3.10.4	单相感应电动机的空载特性实践	145
第4章	同步电机	151
4.1	同步电机工作原理	152
4.2	同步电机分类与结构	154
4.3	同步电动机运行分析	159
4.4	同步电动机的功率关系、功角特性和矩角特性	165
4.5	同步电动机的功率因数的调节	169
4.6	三相同步电动机的启动和相位特性实践	172
4.7	同步发电机运行分析	176
4.8	同步发电机的功率、转矩关系与运行特性	179
4.9	三相同步发电机的特性实践	181
4.10	同步发电机与电网并联运行	185

第 5 章 特种电机	189
5.1 步进电机	190
5.1.1 步进电机工作原理和基本特性	190
5.1.2 步进电机的正转或反转特性实践	192
5.1.3 测定一个脉冲的旋转角度实践	193
5.1.4 根据励磁方法测定脉冲角度实践	193
5.1.5 测定启动特性实践	195
5.1.6 测定变速特性实践	197
5.2 伺服电动机	199
5.2.1 直流伺服电动机	200
5.2.2 交流伺服电动机	202
5.3 力矩电动机	208
5.4 测速发电机	210
5.4.1 直流测速发电机	211
5.4.2 交流测速发电机	212
5.5 自整角机	215
5.5.1 力矩式自整角机	216
5.5.2 控制式自整角机	217
5.6 旋转变压器	219
5.7 直线电动机	222
第 6 章 电动机的选择	227
6.1 电动机选择的基本内容	228
6.2 电动机发热与冷却	235
6.3 电动机工作方式	238
6.4 电动机的额定功率的选择	240
6.4.1 连续工作方式电动机额定功率的选择	240
6.4.2 短时工作方式电动机额定功率的选择	244
6.4.3 断续周期工作方式电动机额定功率的选择	245
6.4.4 电动机额定功率的工程选择方法	245
第 7 章 与电机相关的电力电子学介绍	247
7.1 晶闸管	248
7.1.1 晶闸管基本原理	248

7.1.2	晶闸管的静态特性实践	252
7.1.3	控制功率的测定实践	255
7.1.4	相位控制实践	257
7.2	电源电路	258
7.2.1	概述	258
7.2.2	整流电路特性的测定实践	259
7.2.3	有平滑电路的整流电路特性实践	261
7.2.4	三端稳压器的稳压电路特性实践	263

第 1 章

直流电机

电机是一种实现机电能量转换的电磁装置。将直流电能转换为机械能的称为直流电动机；反之，将机械能转换为直流电能的称为直流发电机。

直流电动机的主要优点是启动性能和调速性能好，过载能力大，易于控制。因此，应用于对启动性能要求较高的生产机械，例如电力机车、轧钢机、大型机床、船舶机械、造纸和纺织机械等。直流发电机主要用作直流电源，为直流电动机、电解、电镀等提供所需的直流电能。

直流电机的主要缺点是结构复杂，使用有色金属多，生产工艺复杂，价格昂贵，有换向问题，因而限制了它的极限容量，运行可靠性差。随着近年电力电子技术的迅速发展，在很多领域，直流电动机有逐步被交流电动机取代的趋势，但是它仍将在许多场合继续发挥作用。

本章重点

通过学习直流电机，可以掌握电机的基本原理及其在各种领域的相互作用。这即是电流与磁的关系，也和动能及电能有密切的关系。学习直流电机是以后学习电机学的重要一步。直流电机有许多种类及各种各样的特性，因此在现代仍广泛应用于交通工具或工厂中。

本章目的

1. 了解直流电机的基本原理及构造。
2. 掌握直流电动机的使用方法及控制转速的方法。
3. 掌握直流发电机的特性及其用途。

1.1 直流电机工作原理

1. 电磁力定律和电磁感应定律

由电磁力定律可知,放在磁场中的导体中有电流流过时导体受到电磁力的作用。可以用左手定则确定电磁力的方向,即把左手伸开,大拇指与其他四指垂直成 90° ,如图 1.1 所示,让磁感应线指向手心,四指指向电流的方向,则大拇指指向就是导体所受到的电磁力的方向。

由电磁感应定律可知,在磁场中做相对运动的导体将产生感应电动势。可以用右手定则确定感应电动势的方向,即把右手伸开,大拇指与其他四指垂直成 90° ,如图 1.2 所示,让磁感应线指向手心,大拇指指向导线运动方向,则其他四指的指向就是感应电动势的方向。

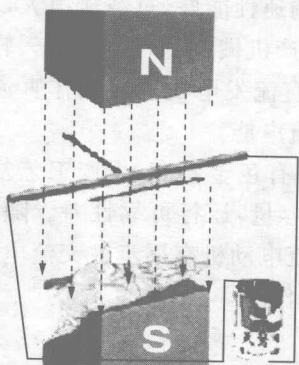


图 1.1 左手定则

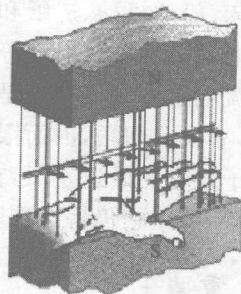


图 1.2 右手定则

2. 直流电机的原理

(1) 直流电动机工作原理

图 1.3 是直流电动机的原理图,N 和 S 是一对固定的磁极。磁极之间有一个可以转动的铁质圆柱体,称为电枢铁心(图中没有画出),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。

将直流电源正极加于电刷 A,电源负极加于电刷 B,则线圈 abcd 中有电流流过,电流的流向为 $+$ \rightarrow A 换向片 \rightarrow 1 \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow 换向片 2 \rightarrow B

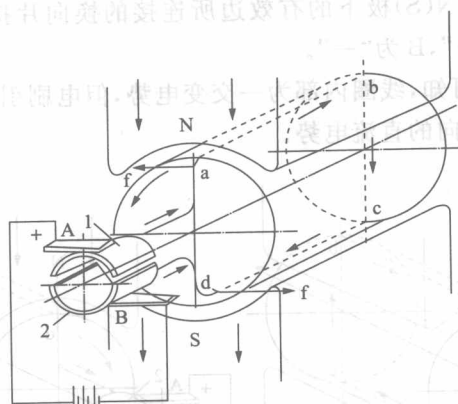


图 1.3 直流电动机工作原理图

→。导体所受电磁力的方向用左手定则确定,在此瞬时,ab 位于 N 极下,受力方向从右向左,cd 位于 S 极下,受力方向从左向右,电磁力对转轴便形成一电磁转矩 T 。在 T 的作用下,电枢逆时针旋转起来。

当电枢转到 90° ,电刷不与换向片接触,而与换向片间的绝缘片相接触,此时线圈中没有电流流过,故电磁转矩 $T=0$ 。但由于机械惯性的作用,电枢仍能转过一个角度,电刷 A、B 又将分别与换向片 2、1 接触。线圈中又有电流流过,此时,导体 ab、cd 中电流改变了方向,即为 $b \rightarrow a$, $d \rightarrow c$,且导体 ab 转到 S 极下,ab 所受的电磁力方向从左向右,cd 转到 N 极下,cd 所受的电磁力方向从右向左。因此,线圈仍然受到逆时针方向电磁转矩的作用,电枢始终保持同一方向旋转。

(2) 直流发电机工作原理

当直流发电机的电枢被原动机拖动,并以恒速 v 逆时针方向旋转时,如图 1.4(a)所示,线圈两个有效边 ab 和 cd 将切割磁力线,而感应产生电动势。其方向用右手定则确定,导体 ab 位于 N 极下,导体 cd 位于 S 极下,产生电势方向分别为 $b \rightarrow a$, $d \rightarrow c$ 。若接通外电路,电流从换向片 1 \rightarrow A \rightarrow 负载 \rightarrow B \rightarrow 换向片 2。电流从电刷 A 流出,具有正极性,用“+”表示;从电刷 B 流入,具有负极性,用“-”表示。

当电枢转到 90° 时,线圈有效边 ab 和 cd 转到 N、S 极之间的几何中心线上,此处磁密为零,故这一瞬时感应电势为零。

当电枢转到 180° 时,导体 ab 和 cd 及换向片 1、2 位置互换,如图 1.4(b)所示。导体 ab 位于 S 极下,导体 cd 位于 N 极下,线圈两个有效边产生的感应电势方向分别为 $a \rightarrow b$, $c \rightarrow d$,电势方向恰与开始瞬时相反。外电路中流过的电流从换向片 2 \rightarrow A \rightarrow 负载 \rightarrow B \rightarrow 换向片 1。由此可见,电刷

A(B)始终与转到N(S)极下的有效边所连接的换向片接触,故电刷极性始终不变 A为“+”,B为“-”。

由以上分析可知,线圈内部为一交变电势,但电刷引出的电势方向始终不变,为一单方向的直流电势。

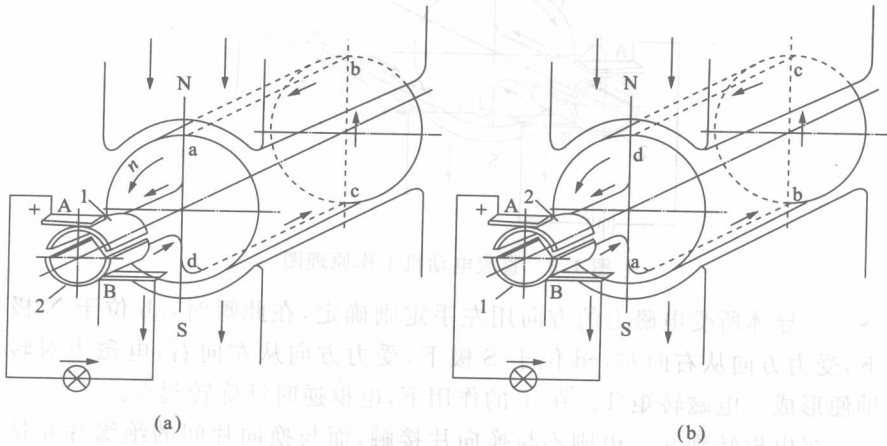


图 1.4 直流发电机工作原理

1.2 直流电机的结构与分类

1.2.1 直流电机的结构

直流电机由静止的定子和旋转的转子两大部分组成,在定子和转子之间有一定大小的间隙(称气隙),如图 1.5 所示。

1. 定子

直流电机定子的作用是产生磁场和作为电机的机械支撑。主要由机座、主磁极、换向极和电刷装置等组成。

(1) 机座

电机定子部分的外壳称为机座,见图 1.5。机座兼起机械支撑和导磁路两个作用,它既用来作为安装电机所有零件的外壳,又是联系各磁极的导磁铁轭。机座通常为铸钢件,也有采用钢板焊接而成的。

(2) 主磁极

主磁极是一个电磁铁,如图 1.6 所示,由主磁极铁心和主磁极线圈两

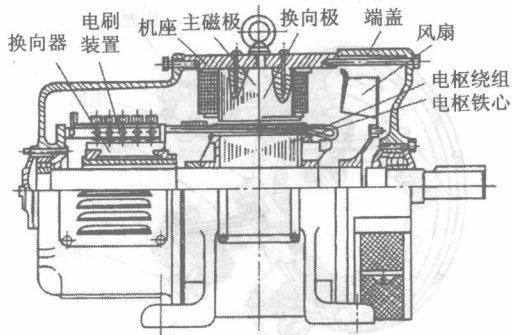


图 1.5 直流电机结构图

部分组成。主磁极铁心一般用 $0.5 \sim 1.5\text{mm}$ 厚的薄钢板冲片叠压后再用铆钉铆紧成一个整体。小型电机的主磁极线圈用绝缘铜线(或铝线)绕制而成,大中型电机主磁极线圈用扁铜线绕制,并进行绝缘处理,然后套在主磁极铁心外面。整个主磁极用螺钉固定在机座内壁上。

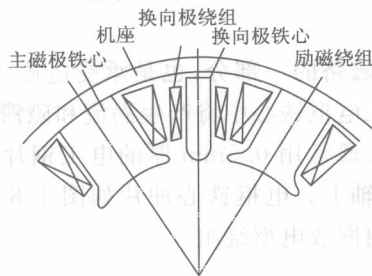


图 1.6 主磁极和换向极示意图

(3) 换向极

换向极又称为附加极,它装在两个主极之间,如图 1.6 所示,用来改善直流电机的换向。换向极由换向极铁心和换向极线圈构成。换向极铁心大多用整块钢加工而成。但在整流电源供电的功率较大电机中,为了更好地改善电机换向,换向极铁心也采用叠片结构。

(4) 电刷装置

电刷装置的作用是通过电刷与换向器表面的滑动接触,把转动的电枢绕组与外电路相连。电刷装置一般由电刷、刷握、刷杆、刷杆座等部分组成,如图 1.7 所示。电刷一般用石墨粉压制而成。电刷放在刷握内,用弹簧压紧在换向器上,刷握固定在刷杆上,刷杆装在刷杆座上,成为一个整体部件。

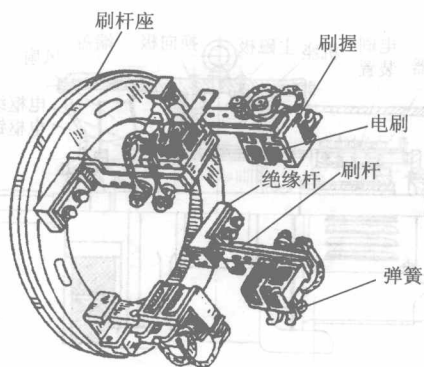


图 1.7 电刷装置

2. 转 子

转子又称电枢,主要由转轴、电枢铁心、电枢绕组和换向器等组成。

(1) 转 轴

转轴的作用是用来传递转矩,一般用合金钢锻压而成。

(2) 电枢铁心

电枢铁心是电机磁路的一部分,也是承受电磁力作用的部件。当电枢在磁场中旋转时,在电枢铁心中将产生涡流和磁滞损耗,为了减小这些损耗的影响,电枢铁心通常用 0.5mm 厚的电工钢片叠压而成,电枢铁心固定在转子支架或转轴上。电枢铁心冲片如图 1.8 所示,沿铁心外圈均匀地分布有槽,在槽内嵌放电枢绕组。

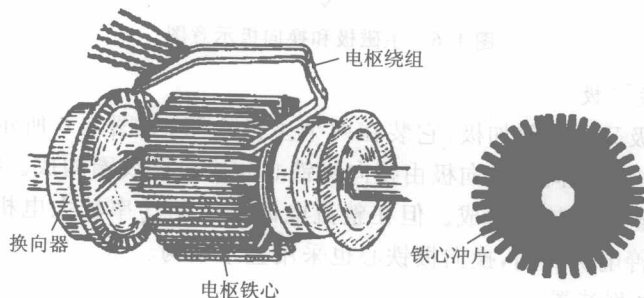


图 1.8 电枢铁心冲片和铁心

(3) 电枢绕组

电枢绕组如图 1.8 所示,它的作用是产生感应电势和通过电流产生电磁转矩,实现机电能量转换。它是直流电机的主要电路部分。电枢绕组通常都用圆形或矩形截面的导线绕制而成,再按一定规律嵌放在电枢槽内,上下层之间以及电枢绕组与铁心之间都要妥善地绝缘。

(4) 换向器

换向器的作用是机械整流,即在直流电动机中,它将外加的直流电流逆变成绕组内的交流电流;在直流发电机中,它将绕组内的交流电势整流成电刷两端的直流电势。换向器的结构如图 1.9 所示。换向器由许多换向片组成,换向片间用云母片绝缘。换向片凸起的一端称升高片,用以与电枢绕组端头相连,换向片下部作成燕尾形,利用换向器套筒、V 形压圈及螺旋压圈将换向片、云母片紧固成一个整体。在换向片与换向器套筒、压圈之间用 V 形云母环绝缘,最后将换向器压装在转轴上。

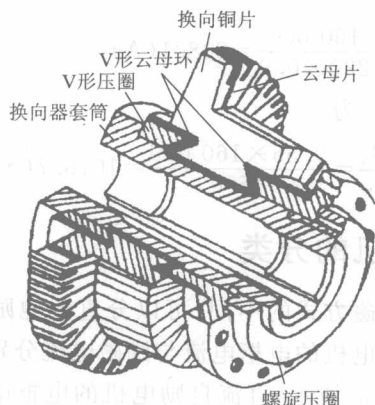


图 1.9 换向器

3. 直流电机的铭牌数据

- ① 额定功率(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 励磁方式和额定励磁电流 I_{fN} (A)。

关于额定功率,对于直流电动机来说,是指它的转轴上输出的机械功率;对于直流发电机来说,是指电刷端的输出电功率。因此直流电动机额定功率为 $P_N=U_N I_N \eta_N$,直流发电机额定功率为 $P_N=U_N I_N$,其中 η_N 是直流电动机的额定效率,它是直流电动机额定运行时输出机械功率与电源输入功率之比,即 $\eta_N = \frac{P_2}{P_1}$ 。

电动机轴上输出的额定转矩用 T_N 表示,其大小与额定功率 P_N 和转子角速度 Ω_N 有关,关系如下:

$$T_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{60}{2\pi n_N} \cdot P_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$$

【例 1.1】 一台直流电动机，其额定功率 $P_N = 160\text{kW}$ ，额定电压 $U_N = 220\text{V}$ ，额定转速 $n_N = 1500\text{r/min}$ ，额定效率 $\eta_N = 90\%$ ，求电动机的额定输入功率 P_1 、额定电流 I_N 和额定输出转矩 T_N 是多少？

解 额定输入功率为

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{160}{0.9} = 177.8(\text{kW})$$

额定电流为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{160\,000}{220 \times 0.9} = 808.1(\text{A})$$

额定输出转矩 T_N 为

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = \frac{9.55 \times 160\,000}{1500} = 1018.7(\text{N} \cdot \text{m})$$

1.2.2 直流电机的分类

直流电机按照励磁方式的不同，可以分直流他励电机和直流自励电机两大类。直流他励电机的电枢电流与励磁电流分别由两个独立的直流电源供电，如图 1.10(a)所示；直流自励电机的电枢电流与励磁电流由同一电源供电。

在直流自励电机中根据电枢绕组与磁场绕组的连接方式不同又分为直流并励电机、直流串励电机和直流复励电机三类。直流并励电机的电枢绕组与磁场绕组并联连接，如图 1.10(b)所示；直流串励电机的电枢绕组与磁场绕组串联连接，如图 1.10(c)所示；直流复励电机具有两个励磁绕组，一个为并励绕组，一个为串励绕组，如图 1.10(d)所示。

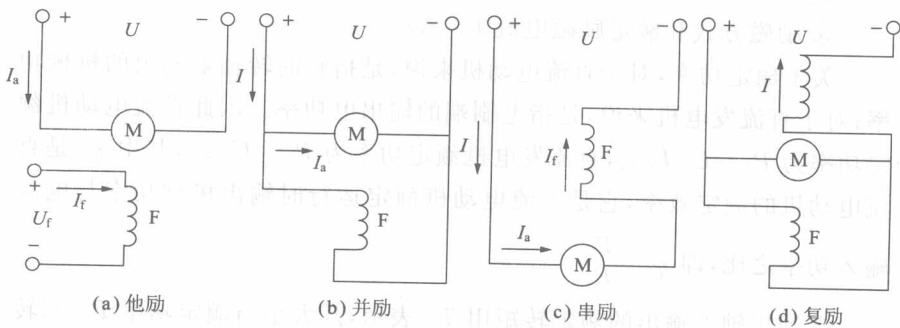


图 1.10 直流电机的励磁方式