

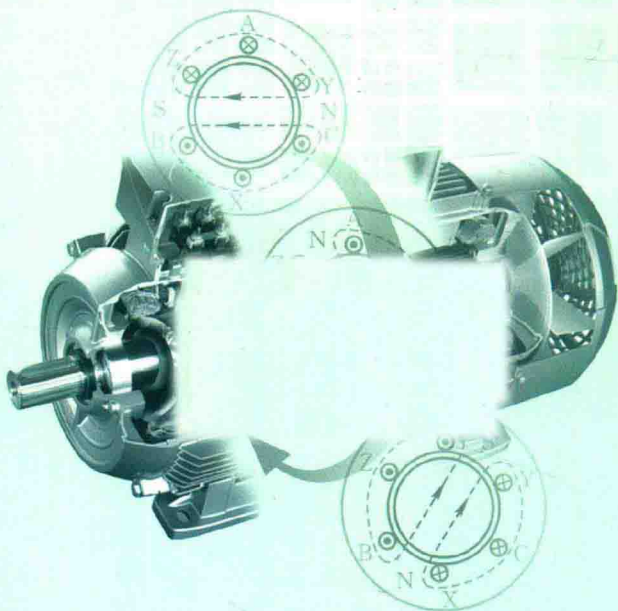


西安交通大学“十三五”规划教材
普通高等教育电气类专业“十三五”规划教材

电机学 (第3版)

习题解析及实验指导

阎治安 孙 萍 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

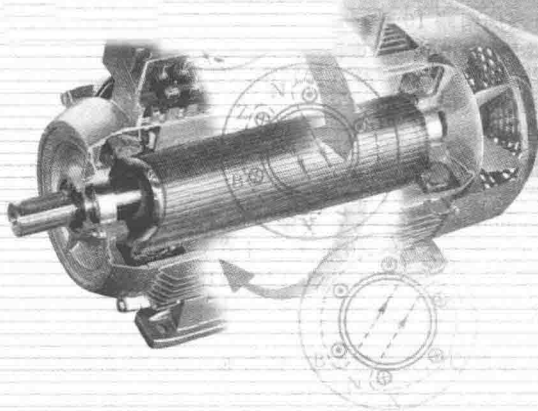


西安交通大学 “十”
普通高等教育电气类专业

电机学 (第3版)

习题解析及实验指导

阎治安 孙 萍 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书是配合西安交通大学出版社出版的普通高等教育“十一五”国家级规划教材——阎治安教授、苏少平、崔新艺副教授编著的《电机学》(第3版)一书的使用而编写。书中每篇第一部分总结了该篇内容的要点和基本习题的解析方法;第二部分对教材中的全部习题作了详细的解答,而且适当地补充了附加题;对一些概念性较强的典型题目(含实验题目)给出了基本理论指导,并对重点、难点题目给出了解题思路和注释;本书第五篇对电机基本实验内容进行了较详尽的阐述,用以提高学生的应用操作能力。在附录里给出了模拟考试题和参考答案,以便读者检查自己对基本概念、常用计算分析方法的理解和掌握程度。

本书可作为“电机学”或“电机拖动及控制”课程的主要学习参考书,是电气及自动化类大学生学习该课程的配套辅导教材。本书还可以作为相关专业硕士研究生报考人员的复习用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机学(第3版)习题解析及实验指导/阎治安,孙萍编著.——西安:西安交通大学出版社,2016.6
ISBN 978-7-5605-8562-8

I. ①电… II. ①阎… ②孙… III. ①电机学-高等学校-教学参考资料 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 115640 号

书 名 电机学(第3版)习题解析及实验指导
编 著 阎治安 孙 萍
责任编辑 任振国

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路10号 邮政编码710049)
网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 陕西元盛印务有限公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 15.625 字数 286千字
版次印次 2016年6月第3版 2016年6月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-8562-8/TM·119
定 价 28.00元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdjgy31@126.com

版权所有 侵权必究

前 言

本书的前一个版本已经使用8年,受到不少读者青睐,应读者要求再版并做充实和修改。本次经修订出版的《电机学(第3版)习题解析及实验指导》旨在满足目前教学改革需要,为适应大学电气工程、机电一体化、自动化类各专业面要拓宽,尤其为加强学生的实际操作和应用能力,本书增加了生产实践常用到的电机试验的内容,重视培养应用型人才。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材——阎治安教授、苏少平和崔新艺副教授等三人编著的《电机学(第3版)》一书的配套辅导教材。可以作为报考电气、自动化、机电类等相关专业硕士研究生考生复试的复习用书。

电机学是电气类各专业的-门重要的技术基础课。根据50余年的教学经验和积累,以及与学生的广泛接触和交流,作者感到有必要编写这本书,作为学习本课程的主要辅导及实验指导教材。

电机的应用已渗透到国民经济发展的各个领域,相关专业的同学必须学好电机学才能学好后续专业课,从而得心应手地从事课题研究。典型的电机学课程通常选择4种典型电机即变压器、直流电机、异步电机和同步电机来进行理论分析,并对学生进行技能培养,电机学内容重点就是要求读者掌握这4类电机的原理、结构、特性和应用。电机学的经典分析方法就是把电路和磁路的较复杂的问题等效为单一的电路问题,即折算后的等效电路、方程式和相量图(注:直流电机无相量图)的分析。对交流电机而言,等效电路、方程式和相量图是一致的,知道了其中之一,可以推导出另外两个。

电机的方程式包括电势表达式(直流式 $E_a = C_e n \Phi$, 交流式 $E_{p1} = 4.44 f N_1 \Phi K_{w1}$)和磁势表达式(直流电机和变压器公式 $F = IN$, 交流旋转电机公式 $F_1 = \frac{m_1}{2} \times 0.9$

$\frac{I_1 N_1}{p} K_{w1}$),还有电势平衡、磁势平衡、转矩平衡(指旋转电机)、功率平衡等方程式。

对比较深入的电机理论分析,还要掌握谐波分析法和对称分量法等。

需要指出,学习“电机学”课程,一定要认真、独立地做题,千万不可抄袭。本书可作为作业完成后的检查或自我批改,也是开始学习电机学时指导解题和做实验报告的理念和思路。尤其适合自学考试的学生,是自我检查作业的有效途径。参

考本辅导书,旨在节省读者宝贵的时间和精力,提高学习效率,要将重点放在电机的基本概念、基本方法和求解难题以及实验操作之技巧上。

本书由阎治安教授(2011年5月之前在西安交通大学任教38年,2011年至今在西京学院任教)、西安交通大学孙萍高级工程师、崔新艺副教授、西京学院张晓娟讲师及研究生季明月共同编写。其中阎治安教授编写第二、三篇并负责统稿,孙萍、张晓娟、季明月、阎治安共同编写第一、五篇,崔新艺编写第四篇的基本知识点和部分同步电机计算题,苏少平、高琳、刘新正三位副教授也曾提供部分期末试题。山东大学李光友教授对本书初稿作了认真的审阅,西安交通大学电机教研室的老师们和西京学院控制学院的老师们为本书的出版提出了积极的建议,并给予热情的支持,在此向他们一并表示感谢。

由西安交通大学出版社出版,阎治安、崔新艺、苏少平合作编写的《电机学》(第2版)教材,2006年8月被评为国家级“十一五”规划教材。西安交大的“电机学”课程也曾分别获校级、省级“精品课程”,本课程的网站地址为:ee.xjtu.edu.cn/dj,请广大读者学习时参考。由于编著者学识水平有限,本书中难免有不妥和错误之处,殷切希望读者尤其是同行们批评指正。

编者

2016年3月于西安

目 录

前言

第一篇 直流电机	(1)
1.1 基本知识点	(1)
1.1.1 直流电机的原理、结构和额定值	(1)
1.1.2 直流电机的磁场分析	(4)
1.1.3 直流电机的电势、功率、转矩平衡	(5)
1.1.4 直流电机的特性和应用	(7)
1.1.5 直流电机换向	(10)
1.2 习题解析	(11)
第1章 直流电机结构、原理及额定值	(11)
第2章 直流电机基本理论	(15)
第3章 直流发电机	(18)
第4章 直流电动机	(20)
第二篇 变压器	(28)
2.1 基本知识点	(28)
2.1.1 变压器的结构	(28)
2.1.2 变压器的主要额定值	(28)
2.1.3 变压器的变压原理及空载运行	(28)
2.1.4 变压器的负载运行	(30)
2.1.5 变压器的等效电路及相量图	(31)
2.1.6 变压器的参数测定	(32)
2.1.7 标么值	(32)
2.1.8 变压器的运行性能	(33)
2.1.9 三相变压器的铁心结构	(34)
2.1.10 变压器的联结组	(34)
2.1.11 三相变压器的励磁电流和电势波形	(36)
2.1.12 三相变压器的并联运行	(36)
2.1.13 自耦变压器和互感器	(37)

2.1.14	三相变压器的不正常运行	(38)
2.2	习题解析	(39)
第5章	变压器的结构、原理及额定值	(39)
第6章	变压器的基本理论	(42)
第7章	三相变压器	(50)
第8章	自耦变压器、三绕组变压器和互感器	(58)
第9章	变压器的暂态运行	(59)
第三篇	交流旋转电机的共同问题和异步电机	(62)
3.1	共同问题基本知识点	(62)
3.1.1	交流旋转电机的三相绕组	(62)
3.1.2	交流旋转电机的电势	(63)
3.1.3	交流旋转电机的磁势	(64)
3.1.4	高次谐波磁势简介	(65)
3.2	共同问题习题解析	(66)
第10章	交流绕组	(66)
第11章	交流电势	(73)
第12章	交流磁势	(77)
3.3	异步电机基本知识点	(82)
3.3.1	异步电动机工作原理	(82)
3.3.2	异步电机的结构及额定值	(83)
3.3.3	异步电动机的运行分析	(84)
3.3.4	异步电动机的特性、启动、调速方法	(87)
3.3.5	单相异步电动机	(90)
3.4	异步电机习题解析	(91)
第13章	异步电机的基本理论	(91)
第14章	三相异步电动机的启动及调速	(110)
第15章	单相异步电动机	(120)
第四篇	同步电机	(124)
4.1	基本知识点	(124)
4.1.1	同步电机的基本结构和原理	(124)
4.1.2	同步电机的磁场和电枢反应	(126)
4.1.3	时-空统一相量图	(126)
4.1.4	同步电抗	(127)

4.1.5	同步发电机的电势方程式和相量图	(128)
4.1.6	同步发电机的参数测定和稳态运行特性	(129)
4.1.7	同步发电机的并网	(131)
4.1.8	同步发电机的功角特性	(132)
4.1.9	同步发电机并网后的功率调节	(133)
4.1.10	同步电动机	(134)
4.1.11	同步发电机的不对称运行和突然短路	(136)
4.2	习题解析	(138)
第16章	同步电机原理、结构和额定值	(138)
第17章	同步发电机的基本理论	(139)
第18章	同步发电机的并网运行	(146)
第19章	同步电动机	(153)
第20章	同步发电机的不正常运行	(157)
第五篇	电机的实验指导	(161)
第21章	电机的基本实验指导	(161)
21.1	电机试验基本实验知识	(161)
21.1.1	电机型式试验	(161)
21.1.2	电机检查试验	(161)
21.1.3	绝缘性能试验	(161)
21.1.4	绕组直流电阻的测量方法	(164)
第22章	电机的基本教学实验	(165)
22.1	实验一 认识实验与直流发电机实验	(165)
22.1.1	实验目的	(165)
22.1.2	实验内容	(165)
22.1.3	实验步骤	(165)
22.1.4	实验报告	(167)
22.2	实验二 直流电动机及其拖动实验	(167)
22.2.1	实验目的	(167)
22.2.2	实验内容	(167)
22.2.3	实验步骤	(167)
22.2.4	实验报告	(168)
22.3	实验三 变压器参数测定	(168)
22.3.1	实验目的	(168)
22.3.2	实验内容	(169)

22.3.3	实验步骤	(169)
22.3.4	实验报告	(172)
22.4	实验四 三相变压器联结组实验	(173)
22.4.1	实验目的	(173)
22.4.2	实验内容	(173)
22.4.3	实验步骤	(174)
22.4.4	实验报告	(176)
22.5	实验五 三相异步电动机的参数测定	(176)
22.5.1	实验目的	(176)
22.5.2	实验内容	(176)
22.5.3	实验步骤	(176)
22.5.4	实验报告	(179)
22.6	实验六 三相异步电动机的运行特性实验	(179)
22.6.1	实验目的	(179)
22.6.2	实验内容	(180)
22.6.3	实验步骤	(180)
22.6.4	实验报告	(180)
22.7	实验七 三相同步发电机的工作特性实验	(181)
22.7.1	实验目的	(181)
22.7.2	实验内容	(181)
22.7.3	实验步骤	(181)
22.7.4	实验报告	(185)
22.8	实验八 三相同步发电机的并联运行实验	(186)
22.8.1	实验目的	(186)
22.8.2	实验内容	(186)
22.8.3	实验步骤	(186)
22.8.4	实验报告	(189)
22.9	实验九 三相同步电动机实验	(189)
22.9.1	实验目的	(189)
22.9.2	实验内容	(189)
22.9.3	实验步骤	(190)
22.9.4	实验报告	(193)

附录 1 西安交通大学本科生期末考试题	(194)
西安交大本科生期末考试题 1	(194)
西安交大本科生期末考试题 2	(196)
西安交大本科生期末考试题 3	(199)
西安交大本科生期末考试题 4	(202)
附录 2 攻读硕士学位研究生入学复试试题	(206)
攻读硕士学位研究生入学复试模拟试题 1	(206)
攻读硕士学位研究生入学复试模拟试题 2	(208)
西安交通大学 2014 年硕士生招生复试试题	(210)
西安交通大学 2015 年硕士生招生复试试题	(213)
附录 3 各种试题参考答案	(216)
1. 西安交通大学本科生期末考试题参考答案(4 份)	(216)
2. 攻读硕士学位研究生入学复试试题参考答案(4 份)	(230)
参考文献	(240)

第一篇 直流电机

1.1 基本知识

1.1.1 直流电机的原理、结构和额定值

1. 原理

直流电机(DC Electrical Machines)按其工作原理不同分为发电机和电动机两种。

直流发电机的工作原理归纳为：

- ①原动机拖动转子以 $n(\text{r/min})$ 旋转；
- ②电机内部须有(直流励磁的或永久磁钢的)磁场存在；
- ③电枢导体切割磁场感应电势 $e_{\text{大小}} = Blv$ ，其(瞬时)方向用右手定则判断，注意导体电势的性质为交流电，而经过换向器和电刷引出的电势才为直流电，故直流发电机可以供给直流电能。

直流电动机的工作原理归纳为：

- ①将电枢绕组(通过电刷端和换向器)接通直流电源，电枢导体便有电流 i_a 流通；
- ②电机内部有磁场存在；
- ③载流的转子导体在磁场中受到电磁力 $f_{\text{大小}} = Bli_a$ ，其方向用左手定则判断；
- ④电磁力作用于转子就产生了电磁转矩 $T(= \sum f \frac{D}{2})$ ， T 使转子以转速 $n(\text{r/min})$ 旋转，以拖动物机械负载。

同一台电机，结构上不作任何改变，既可作为发电机运行，也可作为电动机运行，这就是电机的可逆性原理。

另外，为了得到最大的直流电势，电刷的位置总是与几何中线上的导体相接触。

2. 结构

凡旋转电机的基本结构总是由定子(Stator)和转子(Rotor)两大部分组成。直流电机的结构图如图 1.1 所示。对小型直流电机，定子和转子的基本构成描述如下。

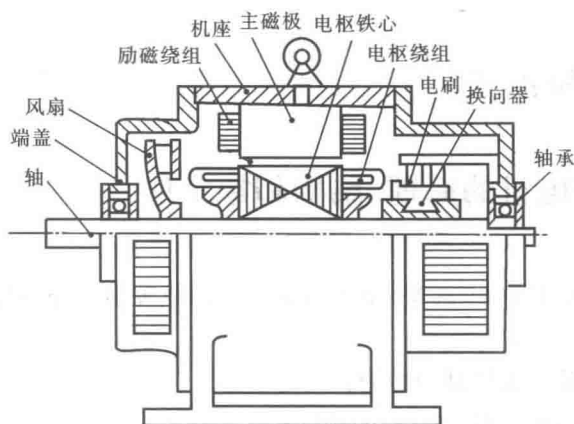
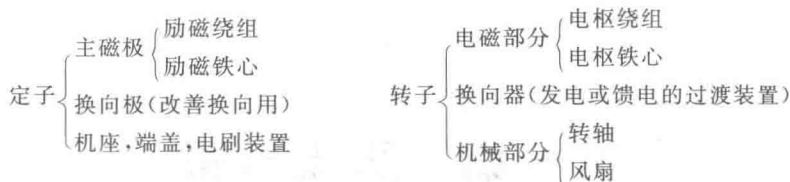


图 1.1 直流电机的结构图

3. 额定值

额定值是电机按规定方式运行时允许的各物理量的值,直流电机的额定值(Rating)主要有:

- ①额定电压 U_N , 额定励磁电压 U_{fN} , 单位均为 V;
- ②额定电流 I_N , 额定励磁电流 I_{fN} , 单位均为 A;
- ③额定转速 n_N , 单位为 r/min(即转/分钟);
- ④额定功率 P_N , 单位为 W, 即计算量纲为 W, 但 P_N 值大于 1 000 W 时, 单位用 kW 表示; P_N 表示额定的输出功率, 电机的效率用 $\eta (= \frac{P_2}{P_1})$ 表示, 则有

$$\text{直流发电机 } P_N = U_N I_N$$

$$\text{直流电动机 } P_N = U_N I_N \eta_N = P_{1N} \eta_N$$

注: P_N 特指额定状态时的输出功率; P_{1N} 特指额定状态时的输入功率; P_2 泛指输出功率; P_1 泛指输入功率。

4. 电枢绕组

电枢绕组一般装在直流电机的转子上, 是最重要的部件之一, 在能量转换中电枢绕组起着关键作用。这里仅作简介, 详细分析请参考专著。

原始的电枢绕组采用环形绕组,环形绕组比较直观,讲原理时使用方便,但环形绕组制造困难,容易损坏。后来直流绕组均改进为鼓形绕组,按线圈之间的联接规律不同,将鼓形绕组分为叠绕组、波绕组和混合绕组。叠绕组和波绕组还可分别绕制成单叠、复叠和单波、复波式绕组。各种绕组的规律常用绕组展开图来表示。

例 1 四极 16 槽直流电机的单叠绕组展开图如图 1.2,它所对应的某瞬时的等效电路图如图 1.3 所示。

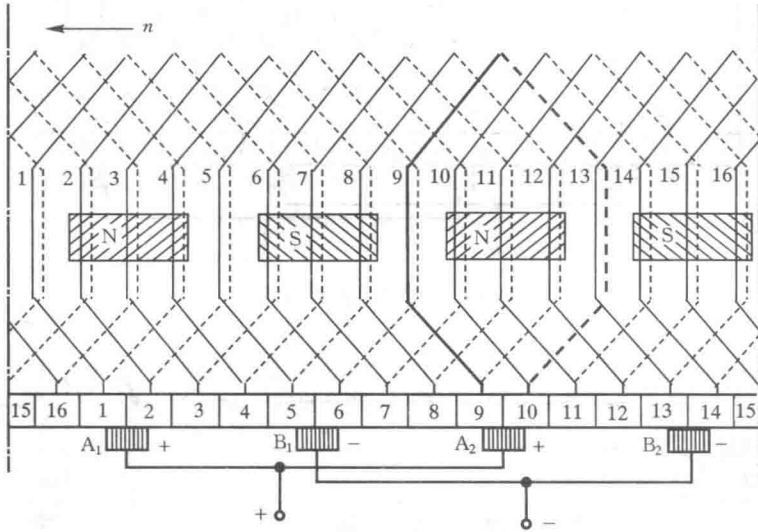


图 1.2 单叠绕组展开图

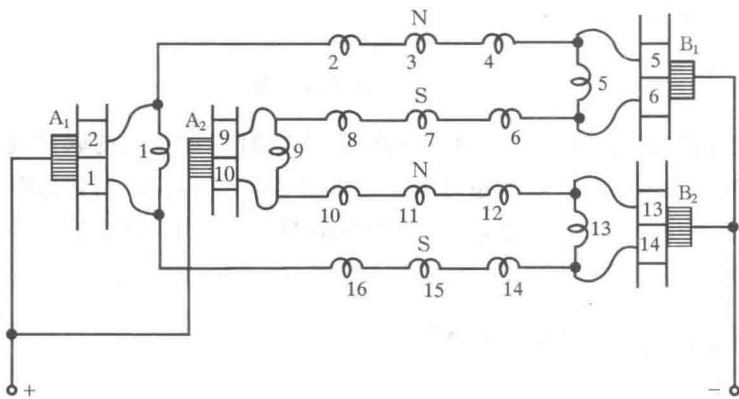


图 1.3 单叠绕组等效电路图

例 2 四极 15 槽直流电机的单波绕组展开图如图 1.4,它所对应的某瞬时的等效电路图如图 1.5 所示。

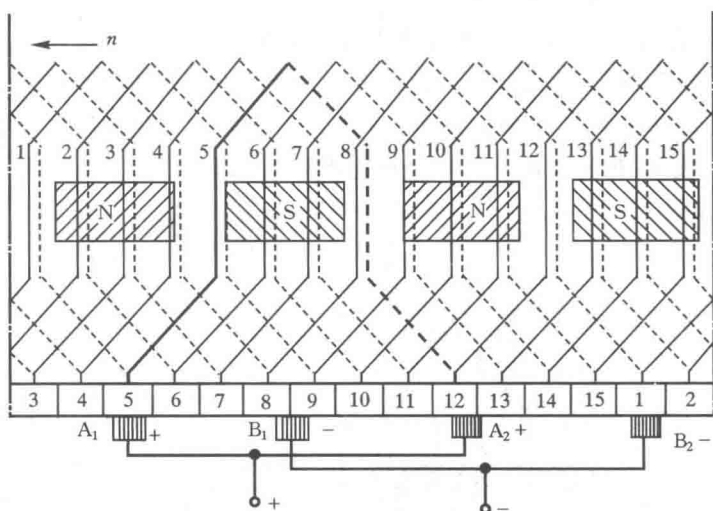


图 1.4 单波绕组展开图

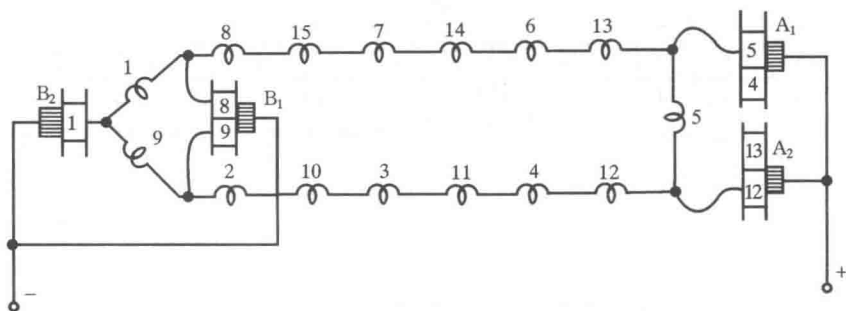


图 1.5 单波绕组等效电路图

对于非从事电机制造和设计的人员来说,不需对各种绕组的联接规律搞得很透彻,只需对不同绕组的并联支路对数 a 的计算弄清楚即可。例如由图 1.3 和图 1.5 可以明显看出:单叠绕组的 $a=p$,单波绕组的 $a=1$;也可证明复(或双)叠绕组的 $a=2p$,复(或双)波绕组的 $a=2$ 。

1.1.2 直流电机的磁场分析

1. 励磁方式

典型的直流电机绕组由定子磁极上的励磁绕组和转子上的电枢绕组构成,两个绕组如何联接(例如并联、串联等)就决定了直流电机是何种励磁方式,不同励磁方式电机的运行特性也各不相同。励磁方式共有 4 种:①他励式(或永磁式);②并

励式;③串励式;④复励式。

说明:①复励式直流电机接线有积(或加)复励和减(或差)复励之分,取决于串励磁通 $\Phi_{串}$ 与并励磁通 $\Phi_{并}$ 的方向相同或相反。

②他励绕组和并励绕组一般可通用,但串励和并(或他)励绕组绝不能通用。

③并励直流电机的励磁电流 I_f 、电枢电流 I_a 和负载电流 I 三者的关系要弄清楚:对于直流发电机 $I_a = I + I_f$;对于直流电动机 $I_a = I - I_f$ 。

④励磁损耗 p_f 只有 $(1 \sim 3)\% P_N$ 。实验接线时,励磁回路一般采用细导线,电枢回路一般采用粗导线。

2. 空载磁通

空载磁通密度 $B_0(x)$ 的分布波形呈“平顶波”。主磁通 Φ 的路径为闭合磁路, Φ 要经过:气隙①→电枢齿①→电枢轭→电枢齿②→气隙②→主磁极②→定子轭→主磁极①→气隙①。在这个闭合磁路中,虽然两段气隙是很小的,但励磁磁势的绝大部分是消耗在气隙中了。

3. 电枢反应

电枢磁通密度 $B_a(x)$ 的分布波形呈“马鞍形波”。电机负载后电枢磁场(用 B_a 代表)对空载磁场(用 B_0 代表)的影响称之为电枢反应。研究电枢反应的实质就是 $B_a(x)$ 与 $B_0(x)$ 合成后得 $B_s(x)$,再将 $B_s(x)$ 的波形与 $B_0(x)$ 比较可得电枢反应,其结论如下表所示。

		(直发) (直动)	
{	交轴 电枢反应 (负载后均存在)	使主磁密 $B_0(x)$ 波形畸变	前极端 减磁 增磁 后极端 增磁 减磁
	具有一定的饱和去磁作用		
		(直发) (直动)	
{	直轴 电枢反应 (仅在电刷偏移时才存在)	电刷若顺转向偏移一小角度时	减磁 增磁
	电刷若逆转向偏移一小角度时		增磁 减磁

1.1.3 直流电机的电势、功率、转矩平衡

定量分析直流电机问题常用下列基本方程式。

1. 直流电势表达式

$E_a = \frac{pN}{60a} n \Phi = C_c n \Phi$, 此式中的 E_a 对“直发”(直流发电机的简称)叫正电势(即 E_a 与 I_a 同向),对“直动”(直流电动机的简称)叫反电势(即 E_a 与 I_a 反向)。极对数 p 、并联支路对数 a 、电枢绕组总导体数 N 为结构参数。 n 为转速,单位是 r/min , Φ 为每极磁通,单位是 Wb 。

2. 电磁转矩表达式

$T = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Phi = C_T I_a \Phi$, 此式中的 T 的性质对“直发”为制动(即 T 与 n 反向)作用,对“直动”为拖动(即 T 与 n 同向)作用。 I_a 的单位为 A, Φ 的单位为 Wb, T 的单位为 $N \cdot m$ 。

3. 电势平衡方程式

直流发电机 $E_a = U + I_a R_a + 2\Delta U_b$

直流电动机 $U = E_a + I_a R_a + 2\Delta U_b$

注意到,对“直发” $E_a > U$,对“直动” $U > E_a$; R_a 为除电刷接触电阻外的电枢回路总电阻, ΔU_b 为一个电刷的压降,本书中一般取 $\Delta U_b = 1.0 \text{ V}$ 。

4. 功率平衡方程式

$$P_1 = \sum p + P_2$$

即输入功率 P_1 等于总的损耗 $\sum p$ 与输出功率 P_2 之和。

而总损耗 $\sum p = p_m + p_{Fe} + p_\Delta + p_f + p_{Cu}$, 它包括机械损耗 p_m , 铁耗 p_{Fe} 、附加损耗 p_Δ 、励磁损耗 p_f 和铜耗 p_{Cu} 。其中

$$P_f = U_f I_f = I_f^2 (R_f + r_f), \quad p_{Cu} = I_a^2 R_a + 2\Delta U_b I_a = p_a + p_b$$

若详细描述各项功率与损耗的关系用“功率流程图”,它是非常有效的方法。直流发电机和直流电动机的功率流程图分别如图 1.6(a)和(b)所示。

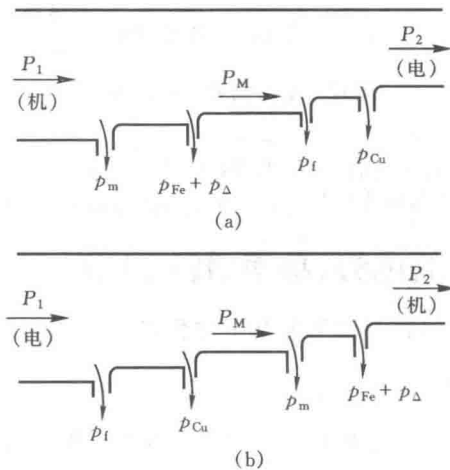


图 1.6 直流电机的功率流程图

(a) 直流发电机; (b) 直流电动机

5. 转矩平衡方程式

直流电动机 $T = T_0 + T_2$ (较常用)

直流发电机 $T_1 = T_0 + T$

T_0 为空载阻力转矩, $T_0 = \frac{P_0}{\Omega} = \frac{p_m + p_{Fe} + p_{\Delta}}{2\pi n / 60}$; T_2 为电动机的输出转矩, $T_2 =$

$$\frac{P_2}{\Omega}; T_1 \text{ 为发电机的输入转矩, } T_1 = \frac{P_1}{\Omega}; T \text{ 为直流电机的电磁转矩, } T = \frac{P_M}{\Omega} = \frac{E_a I_a}{2\pi n / 60}。$$

说明: 以上是直流电机定量计算和分析时的常用公式, 注意灵活应用并熟练掌握; 另外在分析直流电机的计算题时, 往往根据已知可先求出 $C_e \Phi$ 值, 这样将为后面的分析计算带来极大的方便, $C_e \Phi$ 的计算式根据电势表达式和电势平衡方程解得

$$\text{直动 } C_e \Phi = \frac{U_N - I_a \sum R_a}{n_N}; \quad \text{直发 } C_e \Phi = \frac{U_N + I_a \sum R_a}{n_N}$$

1.1.4 直流电机的特性和应用

直流发电机的特性有开路(或空载)特性和外特性; 直流电动机的特性有工作特性和机械特性。分别分析如下。

1. 直流发电机(DC Generator)

(1) 空载特性 $U_0 = f(I_f)$ 当 $n = n_N, I = 0$ 时, 调节励磁电流, 端电压 U_0 随励磁电流 I_f 变化的关系称之为“直发”的空载特性, 其曲线如图 1.7 所示。

注意: 并励直流发电机的建压条件有: ①电机内部要有剩磁; ②励磁电流产生的磁通与剩磁同方向; ③励磁回路的总电阻要小于建压时的临界电阻。

不同励磁方式的同一台电机的空载特性曲线是相似的或一致的。通过它可求取磁路设计的饱和程度。

(2) 外特性 $U = f(I)$ 当 $n = n_N, R_f = \text{常数}$ 时, 改变负载, 端电压 U 随负载电流 I 变化的关系称之为“直发”的外特性。

不同励磁方式的外特性曲线是不相同的, 例如他励式和并励式的同一台直流发电机的外特性曲线如图 1.8 所示。通过该曲线可求出该电机不同励磁方式时的

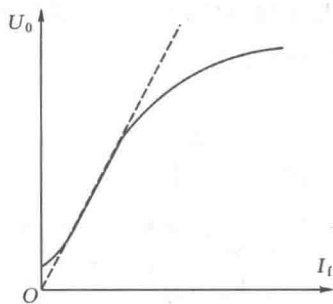


图 1.7 直流发电机的空载特性曲线