

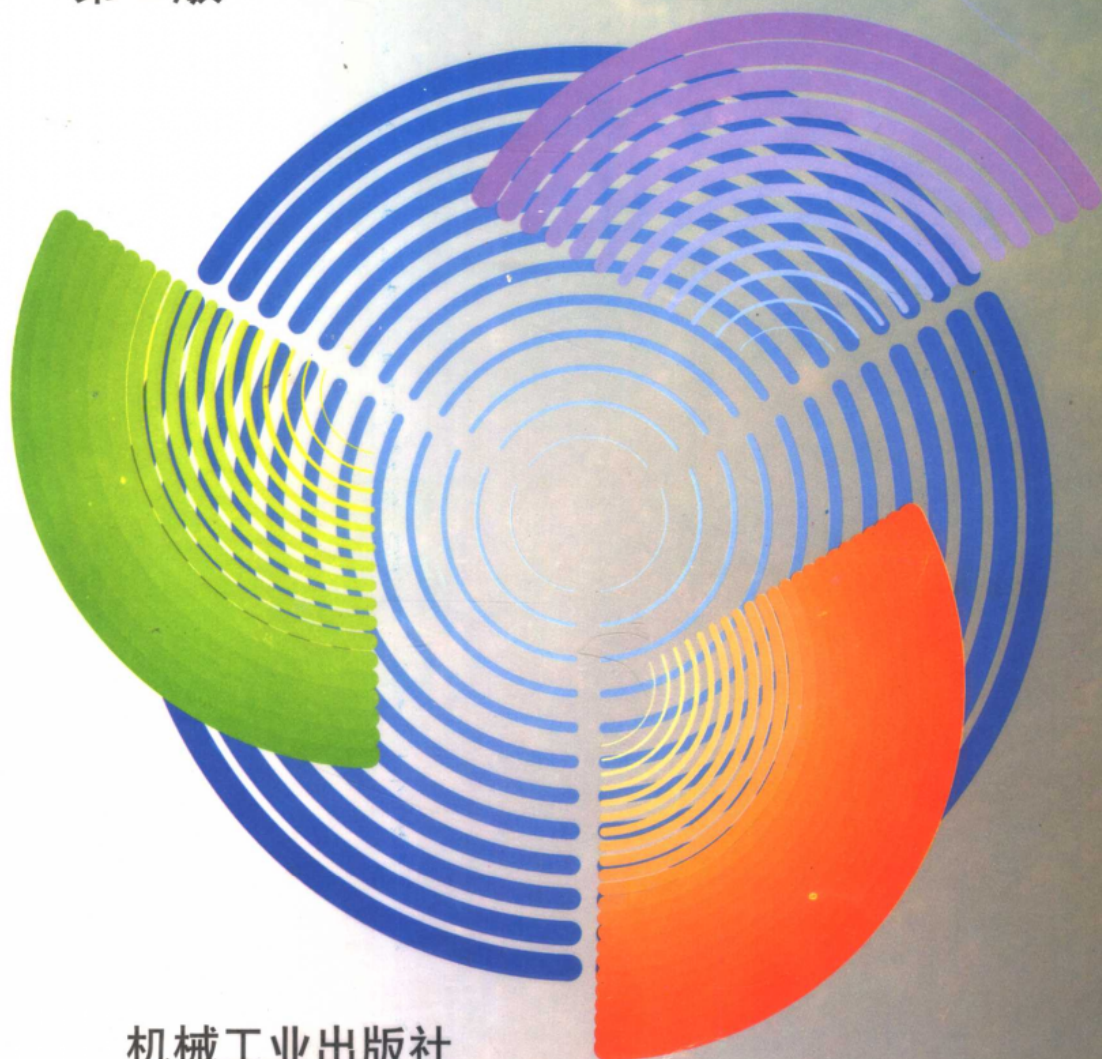


普通中等专业教育机电类规划教材

电机原理

浙江温州机械工业学校 徐 虎 编
浙江机械工业学校 胡幸鸣

第2版



机械工业出版社

01
2



数据加载失败，请稍后重试！

普通中等专业教育机电类规划教材

电 机 原 理

第 2 版

浙江温州机械工业学校 徐 虎 编
浙江机械工业学校 胡幸鸣



机 械 工 业 出 版 社

本书主要叙述直流电机、变压器、三相异步电动机的基本结构,基本的电磁关系和能量转换关系、工作原理、运行特性及应用等;简要分析单相异步电动机、三相同步电动机的结构、原理、特点;对常用控制电机的结构、特性及用途也有较详细地叙述。

本书的特点是以培养生产第一线中等技术、技艺型人才为出发点,理论与实践相结合,增强图解分析,减少繁琐的数学推导,缩减课时;其次是在重要的小节末有小结,章末有联系实际的思考题和习题,便于学生复习提高。此外,列有专业英语词汇、附录中列有常用的直流电动机、三相电力变压器、三相异步电动机的常规数据,便于读者查阅。

本书适用于中等专业学校工业企业电气自动化专业,也适用于机电一体化专业和电类其他专业,也可作为职工大学和高等职业技术学校的教材及电机工程技术人员的参考资料。

本书的图形符号、文字符号、量和单位及相关电机标准均采用国家最新标准。

图书在版编目(CIP)数据

电机原理 / 徐虎, 胡幸鸣编. —2版. —北京: 机械工业出版社, 2000.5
ISBN 7-111-06093-8

I. 电... ①徐... ②胡... III. 电机-理论-专业学校-教材
IV. TM301

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第07397号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑: 贡克勤 版式设计: 冉晓华 责任校对: 孙志筠

封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳

赤峰森堡印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2000年4月第2版第9次印刷

787mm×1092mm¹/16·13.25 印张·317千字

67201—75200册

定价: 16.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话: (010) 68993821、68326677—2527

前 言

本教材是根据原国家机械工业委员会中等专业学校《电机原理》课程教学大纲编写的,其内容有直流电机(36学时)、变压器(23学时)、三相异步电动机(36学时)、其他交流电机(8学时)及控制电机(24学时)等五章,每章附有例题、思考题与习题,以便加深理解。

《电机原理》课程是工业企业电气化专业的一门技术基础课,在学习《数学》、《物理学》、《电工基础》等课程的基础上进行授课,并为《电力拖动基础》、《工厂电气控制设备》和《直流调速系统》等后续课程打下基础。通过本课程学习,能掌握一般的电机、变压器的工作原理、结构特点及其电磁关系和能量关系,且具有选择、使用和维护电机、变压器的基础能力;对单相异步电动机、同步电机和控制电机的特点、工作原理、运行特性及控制电机的误差分析等也应有所了解。

本教材的特点是理论联系实际,注重应用,免去过多的数学推导,力求通俗易懂。此外,注意到承前启后作用,把学过的课程和后续课程进行有机衔接。

在本教材中,列有专业英语词汇,以促进英语学习,提高英语水平。

本教材贯彻国家标准 GB3102 及 GB4728 的有关规定。

本教材由徐虎任主编并编写第一、二、五章以及绪论和附录,广西机械工业学校张彤高级讲师编写第三、四章。

本教材由上海电机制造技术专科学校谭恩鼎副教授主审。参加审稿的有姜孝定、龙合思、余剑雄、陈辉、王景山、焦凤兰、胡幸鸣、徐余法、郭环球等同志,对他们的辛勤劳动和热情帮助,表示衷心感谢。

在编写本教材过程中,承蒙刘希真、吴贵文、苏艳艳等老师的热情支持,在此表示感谢。由于我们水平有限,再加上时间仓促,难免有遗漏和错误,恳请读者批评指正。

编 者

1990年5月

再 版 前 言

本教材从1991年出版以来,受到不少中等专业学校及部分工程技术人员的欢迎,至1996年,已印刷了5次,总印数超过4万册。

1994年11月,机械工业部中等专业学校电类专业教学指导委员会在深圳召开会议,会上对本教材给予了充分肯定,认为经过几年使用证明,是一本较好的教材,并提出进一步修订的建设性意见,以达到内容精炼、利于教学的目的。

根据机械工业部中等专业学校电类专业教学指导委员会1996年修订的新的教学计划和《电机原理》课程教学大纲,总教学时数由原来127学时改为96学时(内含实验约20学时),其中各章教学时数相应调整为绪论1学时,直流电机33学时,变压器19学时,三相异步电动机30学时,其他交流电机4学时,控制电机9学时。

为此,各章内容相应作如下调整:①删除直流电机中“换向理论”,仅作简介;增加直流电动机“反转”的基本概念;②充实变压器联结组绘制方法的内容;③简化三相异步电动机“旋转磁场”的理论分析,删除“分数槽绕组”、“延边三角形减压起动”等内容;④删除同步电机“双反应理论”;⑤对“自整角机”及“旋转变压器”改作简单介绍等。

新版教材贯彻国家标准GB3102.1—93~GB3102.9—93中有关量、单位和符号的规定及GB4728电气图用图形符号的有关规定。

新版教材由浙江机械工业学校胡幸鸣高级讲师修订第三、四章,浙江温州机械工业学校徐虎高级讲师修订第一、二、五章及其绪论和附录。

新版教材仍由上海电机技术高等专科学校谭恩鼎副教授主审。参加审稿的有常州机械学校陈辉老师、广西机械工业学校罗权老师、内蒙古工业学校焦凤兰老师、山东机械工业学校管运生老师、成都市工业学校何巨兰老师、上海电机技术高等专科学校郭环球老师等。编者对他们的辛勤劳动和热情帮助,表示衷心感谢。对使用过本教材、提过宝贵意见的同志表示衷心感谢。

在修订过程中,焦凤兰高级讲师提供部分变压器内容,在此表示感谢。

由于编者水平有限,难免有遗漏和错误,恳请读者批评指正。

编 者

1997年3月

主要符号表

A ——线负荷；面积	I_{cr} ——临界电流
a ——直流电机电枢绕组并联支路对数；交流 电机绕组并联支路数	I_f 或 I_m ——励磁电流
B ——磁通密度(磁密)	I_N ——额定电流
B_{av} ——平均磁通密度	I_0 ——空载电流
$B_{C\cdot a}$ ——换向极下气隙磁通密度	I_{sc} 或 I_k ——短路电流
B_m ——磁通密度最大值	I_{st} ——起动电流
B_δ ——气隙磁通密度	I_μ ——磁化电流
b ——宽度；弧长	i ——电流的瞬时值
C ——常数；电容	J ——转动惯量
C_e ——电动势常数	j ——电流密度
C_T ——转矩常数	K ——换向片数；系数
D 或 d ——直径	k ——电压比；系数
D_a ——电枢外径	k_e ——电动势比系数
E ——感应电动势(交流为有效值)	k_i ——电流比系数
E_a ——电枢电动势	k_N ——绕组因数
E_m ——交流电动势最大值	L ——自感；电感
E_δ ——漏电动势	L_σ ——漏电感
E_{2s} ——异步机旋转时转子电动势有效值	l ——长度；导体有效长度
e ——电动势瞬时值；自然对数底	m ——级数；相数
e_c ——换向元件中的旋转电动势	N ——电枢导体总根数；匝数，拍数
e_L ——自感电动势瞬时值	N_y ——元件匝数
e_M ——互感电动势瞬时值	n ——转速
e_x ——电抗电动势	n_N ——额定转速
F ——磁通势；力	P ——功率
F_a ——电枢磁通势	P_M ——电磁功率
F_c ——换向极磁通势	P_N ——额定功率(额定容量)
F_f 或 F_m ——励磁磁通势	P_m ——机械功率
F_0 ——空载磁通势	P_o ——空载功率
F_δ ——气隙磁通势	P_1 ——输入功率
f ——频率；力；磁通势瞬时值	P_2 ——输出功率
f_N ——额定频率	p ——损耗；极对数
H ——磁场强度	$p_{ad}(p_s)$ ——杂散损耗(附加损耗)
h ——高度	p_c ——接触损耗
I ——电流(交流为有效值)	p_{Cu} ——铜耗
I_a ——电枢电流	p_{Fe} ——铁耗
I_c ——控制电流	p_m ——机械损耗
	p_o ——空载损耗

VIII

Q ——热量；无功功率	X_e ——漏电抗
R 或 r ——电阻	y ——节距；合成节距
R_a ——电枢回路总电阻	Z ——电枢槽数；阻抗
R_f ——励磁回路总电阻	Z_L ——负载阻抗
R_L ——负载电阻	Z_m ——励磁阻抗
r_c ——接触电阻	Z_{sc} 或 Z_k ——短路阻抗
R_m ——磁阻	Z_r ——转子齿数
S ——元件数；视在功率	Z_u ——虚槽数
S_N ——额定视在功率；变压器额定容量	z ——阻抗的模
s ——转差率	α ——系数；角度；信号系数；旋转角；槽距角
s_{cr} ——临界转差率	α_e ——有效信号系数
s_N ——额定转差率	β ——系数；角度
T ——转矩；时间常数；周期	γ ——电导率
T_1 ——原动机转矩；输入转矩	δ ——气隙长度
T_2 ——输出转矩；负载转矩	η ——效率
T_j ——惯性转矩	η_{max} ——最大效率
T_M ——电磁转矩；机电时间常数	η_N ——额定效率
T_N ——额定转矩	θ ——温度；功率角；失调角
T_0 ——空载转矩	θ_b ——步距角
t ——时间；齿距	λ ——比漏磁导；散热系数；转矩倍数
U ——电压(交流为有效值)	λ_M ——最大转矩倍数(过载能力)
U_f ——励磁电压	μ ——磁导率
U_N ——额定电压	τ ——极距；温升
u ——电压瞬时值；虚槽数	τ_N ——额定温升
u_{sc} 或 u_k ——短路电压；阻抗压降标么值	Φ ——磁通
v ——线速度、相对线速度	Φ_m ——主磁通最大值
v_a ——电枢线速度	ϕ ——磁通瞬时值
W ——能量(储能)	Ψ ——磁链
X ——电抗	ψ ——内功率因数角
X_a ——电枢反应电抗	Ω ——机械角速度
X_m ——励磁电抗	ω ——电角速度；角频率
X_l ——同步电抗	φ ——相位角；功率因数角
X_{sc} 或 X_k ——短路电抗	ν ——谐波次数；相对转速

目 录

前言	
再版前言	
主要符号表	
绪 论	1
第一章 直流电机	3
第一节 概 述	3
第二节 直流电机的基本工作原理	3
第三节 直流电机的结构	6
第四节 直流电机的铭牌及主要系列	10
第五节 直流电机的电枢绕组	12
第六节 直流电机的磁场	19
第七节 直流电机的电枢电动势 及电磁转矩	24
第八节 直流发电机的运行	26
第九节 直流电动机的运行	35
第十节 直流电机的换向简介	47
思考题和习题	51
第二章 变压器	54
第一节 概 述	54
第二节 变压器的结构及工作原理	56
第三节 变压器的额定值及系列	60
第四节 单相变压器的空载运行	61
第五节 单相变压器的负载运行	68
第六节 变压器参数测定	75
第七节 变压器的运行特性	79
第八节 三相变压器	82
第九节 自耦变压器	94
第十节 仪用变压器	96
思考题和习题	98
第三章 三相异步电动机	101
第一节 概 述	101
第二节 三相异步电动机的结构	103
第三节 三相异步电动机的工作原理	106
第四节 三相异步电动机的定子绕组	110
第五节 三相异步电动机的转子绕组	118
第六节 三相异步电动机绕组的 电动势	119
第七节 三相异步电动机的磁 通势	124
第八节 三相异步电动机的空载 运行	127
第九节 三相异步电动机的负载运行	129
第十节 三相异步电动机的 等效电路及相量图	132
第十一节 三相异步电动机 的功率及转矩	136
第十二节 三相异步电动机 的工作特性	141
第十三节 三相异步电动机 参数的测定	142
第十四节 三相异步电动机的起动	144
第十五节 三相异步电动机的调速	150
思考题和习题	156
第四章 其他交流电机	158
第一节 单相异步电动机	158
第二节 三相同步电机	162
思考题和习题	168
第五章 控制电机	170
第一节 概 述	170
第二节 伺服电动机	171
第三节 测速发电机	178
第四节 步进电动机	182
第五节 自整角机简介	189
第六节 旋转变压器简介	190
思考题和习题	191
附录	193
附录 A Z2 系列电动机部分数据	193
附录 B 直流电机火花等级 (GB755—87)	197
附录 C SJ _i 系列电力变压器部 分数据	198
附录 D Y 系列三相异步电动机 部分数据	202
参考文献	203

绪 论

电机(electrical machine),是一种将能量或信号进行变换的电磁装置(electromagnetic device),它的工作原理是基于电磁感应定律和电磁力定律。

电能是现代能源中应用最广的二次能源,它的产生和变换比较经济,传输和分配比较容易,使用和控制比较方便。而电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制等,都离不开电机。因此,电机在国民经济中占有重要地位。

在电力工业中,发电机和变压器是电站和变电所中的主要设备;在机械、冶金、石油、煤炭和化学工业及其他工业企业中,广泛地应用电动机去拖动各种生产机械;在交通运输业中,随着城市交通运输和电气铁道的发展,需要大量的牵引电动机;在航运和航空业中,需要船用电机和航空电机;随着农业机械化的发展,电力排灌、脱粒、榨油等农业机械的日趋广泛,都要规格不同的电动机;在自动控制技术中,各种各样的控制电机作为检测、放大、执行和解算元件;在日常生活中,也离不开各种各样的小功率电机……。

电机品种繁多,按其功能来看,可分为

- (1) 发电机 把机械能转换成电能。
- (2) 电动机 把电能转换成机械能。
- (3) 变压器、变流机、变频机、移相器分别用于改变电压、电流、频率及相位。
- (4) 控制电机 作为控制系统中的元件。

按其电源性质,可分为直流电机(包括直流发电机、直流电动机和直流控制电机)及交流电机(包括交流发电机、交流电动机和交流控制电机),而后者又有异步电机和同步电机之分。在电机使用场合中,应用脉冲电源的电动机,称为步进电动机。当然,也有直流电机通以交流电源的电机,即所谓“交流-换向器电机”,或称交-直流电机。

电机工业的发展,同国民经济和科学技术的发展有着密切的联系,它的发展历史,至今尚不到200年。从1831年法拉第发现电磁感应现象起,到本世纪初,具备各种电机基本型式为止,作为电机工业的初期发展时期。电机工业的近代发展时期是在本世纪。在上阶段实践基础上,总结了运行、设计和制造经验,对电机理论探讨进一步深化,材料、设计、工艺不断地改进,经济指标日益提高,运行特性不断改善。

由于科学技术突飞猛进,电气化时代进入核能、计算机和自动化阶段,不仅对普通电机提出性能良好、运行可靠、单位容量的重量轻、体积小的要求,而且对控制电机提出高可靠性、高精度、快速响应的要求,只有这样才能实现计算机的“中枢神经”的作用,才能完成人工无法完成的快速复杂的精巧运动。

我国的电机制造工业,从新中国成立以来,发生了巨大变化,仅50年,就建立了独立自主的完整体系。特别是在1965年研制成功世界上第一台双水内冷汽轮发电机,显示出我国广大电机工程技术人员在中国共产党领导下,对电机的新原理、新结构、新工艺、新材料、新品种、新运行方式和调试等探索和研究,均取得了不少成就。

当前,我国生产的汽轮发电机有6、12、25MW的空冷系列;50、100、200、300、600MW

的氢外冷和氢内冷系列(200、300MW 为定子水内冷,转子氢冷);双水内冷汽轮发电机有 12、25、50、100、125、300MW 系列,600MW 的双水内冷汽轮发电机也即将投入生产。电力变压器方面,主要系列为 220kV 级产品,近来还生产 500kV 级。由于输配电工程需要,也生产 10、35、110kV 等系列变压器,目前变压器容量能达 360MVA。在直流电机方面,单机容量达 7MW,电压在 1000V 左右,产品标准接近国际水平。在交流电机方面,系列生产的有中小型、中型和大型感应电机和同步电机,其中最重要的是按国际电工委员会(IEC)标准自行设计的 Y 系列中小型感应电动机,取代了 JO₂ 系列。此外,为满足工农业及国防工业的发展要求,还生产数以千种的控制电机及特殊电机。

目前,我国有关科研部门,正在研制和生产从 Y 系列异步电机派生的 YX 系列节能电机,在变极节能、变频调速方面,也取得可喜成绩。

尽管如此,但与一些工业发达国家相比,在技术上还有一定距离,还需作更大努力。

本课程是在学习数学、物理学、电工基础等课程基础上,研究直流电机、变压器、交流电机和控制电机的基本理论,同时也联系科学实验和生产实际问题,以期达到下列要求:

- 1) 掌握常用直流电机、变压器、三相异步电动机的基本结构和基本理论(电磁关系和能量转换关系)。
- 2) 了解单相异步电动机、同步电机及几种常用控制电机的特点、结构、工作原理、运行特性和用途。
- 3) 了解交、直流电动机的起动、调速、制动及反转的基本知识。
- 4) 掌握电机实验的基本方法和技能,具有选择、使用和维护与电机实验相关的仪表仪器的能力。
- 5) 了解电机今后发展动向。

欲使本课程学有成效,必须以电磁感应定律为主线,理解和掌握电和磁的基本概念、电路的第一和第二定律、全电流定律、电磁力定律等。此外,还要有机械制图、结构、工艺、材料等诸方面的知识。

为了深入掌握本课程有关内容,应在教学过程中选择适当课外作业进行练习(本课程各章均附有思考题和习题,供参考),同时建议安排一定学时习题课和讨论课,以启发引导及提高学生运算、理解能力,同时也起到巩固理论知识的作用。此外,需进行必要实验,一是对基本原理和理论计算加以验证,二是培养学生独立工作能力,提高实验技能和动手能力。

为了培养学生成为具有德、智、体全面发展的中级技术人员,使学生毕业后能胜任基层的生产组织管理工作或在生产第一线承担安装、调试、实验、技术管理等工作,为此,在教学实习中,应对各种典型电机、变压器进行操作和练习,使其理论知识与实践技能密切结合。

第一章 直流电机

本章主要阐述换向器式直流电机的工作原理、基本结构、电路系统和磁路系统及其特点,然后分别阐述直流电机作为发电机和电动机运行时的电磁过程及工作特性。

第一节 概 述

直流电机(direct current machine),是指发出直流电流的直流发电机(direct current generator)或通以直流电流而转动的直流电动机(D. C. Motor),前者将机械能变换为电能,而后者将电能变换为机械能,它们的结构特点是转轴上带有换向器(commutator)。

直流电机有很多优点:对于直流发电机,它是大型同步发电机的励磁电源及化学工业中的电镀电解等设备的直流电源,尽管大功率晶闸管整流电源已有应用,由于某些指标仍不及它,目前仍不能完全取代它;在电力拖动或自动控制系统中,直流电动机得到广泛应用。

但是,直流电机制造工艺复杂,造价较高,维护困难,特别是在运行过程中产生火花,因而在易爆场合和对干扰敏感场合,直流电机几乎不能采用。

尽管如此,目前低压大电流直流电源,仍采用直流发电机,在电力拖动系统中,直流电动机仍是一种重要电机,我们对它的研究,仍有现实意义。

第二节 直流电机的基本工作原理

一、直流发电机的基本工作原理

1. 电磁感应与右手定则

从物理学中可知,在一个均匀磁场 B 中,当放置一根有效长度为 l 的导体,作垂直切割磁力线运动时,则在导体 l 上产生感应电动势。这种由于导体切割磁力线而在导体上感应电动势的现象,称为电磁感应(electromagnetic induction)。其电动势的大小,取决于单位时间内切割磁力线多寡,按法拉第定律来计算:

$$e = Blv \quad (1-1)$$

其中 v 为导体运动的速度;而电动势 e 的方向按右手定则确定,即将右手掌伸开,让磁力线指向掌心,大拇指指向导体运动方向,则与大拇指成 90° 的其余四指所指方向,便是导体中感应电动势的方向,如图 1-1 所示。

如果一匝对称线圈 $abcd$ (两有效边为 l_{ab} 及 l_{cd}),置于按正弦规律变化磁场 $B_x = B_m \sin x$ 中,线圈两个端点 a 和 d 分别与线圈一起转动的两个铜环焊接,再在两个铜环上分别压着固定不动的两个电刷 A 和 B (见图 1-2)。当线圈以 v 速度作逆时针旋转时,则在 A 、 B 两刷间电动势为

$$e_{AB} = e_{ad} = e_{cd} + e_{ab} = 2B_m l_{ab} v \sin x$$

由此可见,导体等速运动切割磁力线时,导体上感应电动势在时间上也按正弦规律变化,

即同 B_x 的规律变化，而不是直流电动势。显然，如果磁场波形呈礼帽形的话，则导体中感应电动势在时间上也呈礼帽形。

2. 交流电动势到直流电动势的变换

如果将图 1-2 中的两个铜环去掉一个，而将留下的一个剖成互相绝缘的两半圆环，线圈两个端点分别接在两半环上，将 A、B 两刷也分别压在两个半圆环上，且固定不动，其位置分别与磁极 N、S 对正，电机线圈仍以逆时针方向旋转，如图 1-3 所示。那么在图示瞬间，导线 ab 处于 N 极下，与 A 刷连接，电动势 e_{ab} 由 b 指向 a ，则 A 刷为“+”；当线圈转过 180° 时，导体 cd 处于 N 极下，且与 A 刷连接，电动势 e_{cd} 由 c 指向 d ，则 A 刷仍为“+”。

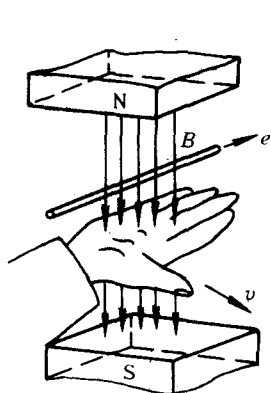


图 1-1 电磁感应及右手定则

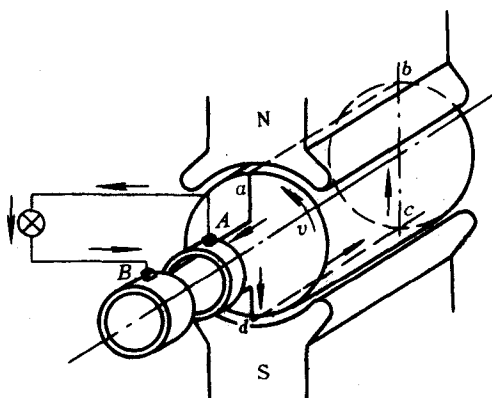


图 1-2 交流发电机原理模型

可见，A 刷始终与处于 N 极下导体连接，不管哪根导体，一旦转到 N 极下，所产生电动势方向都一样，永远指向 A 刷，故 A 刷为正极。同理，B 刷始终为“-”刷，永为负极。显然，对某根导体来说，如 ab ，在 N 极下电动势由 b 指向 a ，转过 180° 后，处于 S 极下，电动势由 a 指向 b ，即导体内部电动势为交流电动势，但电刷两端间电动势却不变，A 刷永为正，B 刷永为负，都是直流电动势。

图 1-4 为一个线圈交流电动势经两个半圆铜环与电刷配合变直流后在电刷两端引出的电动势波形，它显然是半波整流状态，有明显脉动。如果把一个圆铜环剖为互相绝缘的四等分（每等分称换向片，整个环称换向器），分别与两个线圈连接，则脉动将减半。

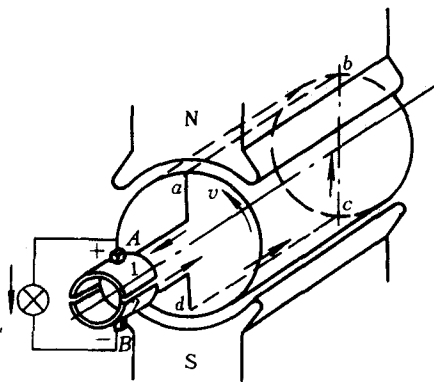


图 1-3 利用换向器获得直流电动势

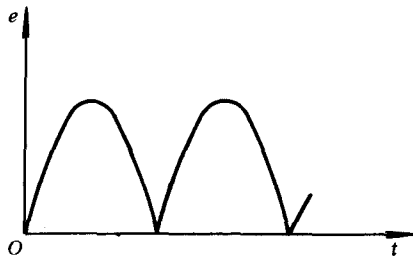


图 1-4 一匝线圈电刷两端电动势的波形

为了使电动势的脉动程度减小,在实际电机中,电机的转动部分不只一个线圈,而是由许多个线圈均匀分布在电机转动部分表面,按一定的规律连接起来(详见本章第五节)。如若电机每磁极下的导体数大于8时,电动势脉动的幅度将小于1%。

从上述的直流发电机工作原理表明,电机线圈中的感应电动势是交流的,借助于换向器和电刷配合作用,才把交流电动势“换向”成为直流电动势。由于这个原因,则把上述这种电机称为换向器式直流电机。

二、直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理是基于电磁力定律,若磁场 B_x 与导体 l 互相垂直,且导体 l 中通以电流 i ,则作用于载流导体 l 上的电磁力(用字母 f_x 表示)为

$$f_x = B_x i l \quad (1-2)$$

力的方向按左手定则来确定。

欲使电动机连续旋转,必须使载流导体在磁场中所受到的电磁力形成一种方向不变的转矩(torque)。这点,则用换向器和电刷装置配合来实现。

图1-5是直流电动机工作原理示意图,它的电刷A、B两端恒加直流电压 U ,在图示位置瞬间,导体 l_{ab} 处于N极下,而电流从 a 到 b ,则导体 l_{ab} 受到电磁力作用而向左,导体 l_{cd} 处于S极下,电流是从 c 到 d ,所受到电磁力作用而向右,从而形成一转矩,使线圈逆时针方向旋转;当转过 90° 时,电刷不与换向片接触,而与换向片间绝缘接触,此时线圈无电流,转矩消失,但由于惯性作用,转子仍向前转,那么导体 l_{ab} 与 l_{cd} 对换位置,即 l_{cd} 处于N极下,与A刷连接, l_{ab} 处于S极下,与B刷连接,电流从 d 进 a 出,导体 l_{cd} 受电磁力作用,其方向向左, l_{ab} 受电磁力作用,方向向右,保持原来转矩方向不变,从而使电动机继续沿着逆时针方向旋转。

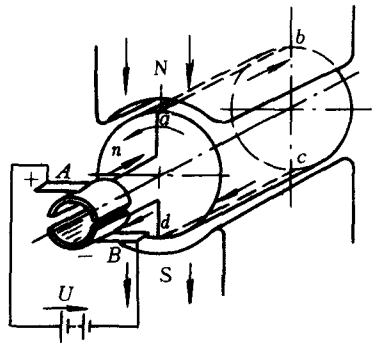


图1-5 直流电动机工作原理示意图

由此可见,直流电动机的换向器及电刷装置是将直流电流引入处于N极(或S极)下的导体,而不是恒接入某个线圈,才使电动机有单一方向的转矩。

显然,此时产生转矩是脉动的,如果每极换向片数增至8片以上(相应也增加线圈数),就可使转子上得到几乎不变的转矩。

从电工知识可知,当直流电机为发电机运行时,电机内部的电动势 E_a 必然大于电刷两端电压(电网电压) U ,才有电流 I_a 输出。但由于 I_a 与励磁磁场作用,则在转子上将产生一个转矩,它的方向与电机旋转方向相反,故称为制动转矩,该转矩和空载转矩(主要是摩擦转矩)一起,与原动机转矩平衡,故发电机不断从原动机吸取机械能而转换为电能,供给电网。

如果降低发电机转速(即降低切割速度)或减弱磁场(未改变方向),则发电机电动势 E_a 将下降。当 $E_a < U$ 时,则 I_a 将向相反方向流动,但端电压 U 未变,励磁磁场极性也未变,则从电磁力定律可知,转子上转矩改变方向,而与原动机转矩方向一致,那么原动机可脱开,而电机从电网吸取电能转换为机械能,电机从发电机状态过渡到电动机状态。

在电动机运行时,转子导体切割磁力线,也要产生电动势。但与电网电压方向相反,故称为反电动势。

由此可见,发电机与电动机,两者并无本质上差别,只是外界条件不同而已。所以,同一台电机,既可为发电机运行,也可以为电动机运行,只仅仅改变电流 I_a 的方向。这就是电机可逆原理。

值得注意的是,根据力学原理,无论是发电机还是电动机,要在一定转速下运行(即不产生角加速度),必须使合成转矩为零。对于发电机,制动转矩等于外加转矩,对于电动机,则是电磁转矩等于负载转矩。

例 1-1 如图 1-3 直流发电机带上负载(灯泡),在线圈 $abcd$ 中有电流通过,且与电动势同方向。问导体 ab 和 cd 是否受电磁力作用? 如果有的话,则电磁力的作用方向如何?

答 由于导体 ab 和 cd 处于气隙磁场中,当它们有电流通过时,便受到电磁力作用。按左手定则,它的方向与旋转方向相反。

例 1-2 在图 1-5 中,当电动机旋转起来后,导体 ab 和 cd 能否切割气隙磁场而感应电动势? 如果有的话,则电动势方向如何?

答 根据电磁感应定律,导体 ab 和 cd 与气隙磁场有相对运动,故能在 ab 和 cd 导体中感应电动势,其方向按右手定则确定,与导体中电流方向相反。

第三节 直流电机的结构

从电机工作原理可知,欲实现机电能量变换,电路和磁路之间必须有相对运动。所以,旋转电机必然具有静止和转动两大部分。固定不动部分称为定子(stator),它的主要作用是产生磁场,它由主磁极、换向极、机座、电刷装置等组成;转动部分称为转子(rotor),通常能量变换都在这里进行,故亦称电枢(armature),它的作用是产生电磁转矩和感应电动势,它由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成。在定、转子之间是空气隙(air gap),它虽然很窄,却是电机磁路的主要部分,对电机性能有很大影响。

图 1-6 是 Z2 型直流电机外形图,图 1-7 是直流电机主要部件图,图 1-8 是直流电机剖面图。下面对图中的主要部件结构及其作用作简要介绍。

一、静止部分——定子

1. 主磁极(main field pole)

它的作用是产生主磁场,由主磁极铁心和励磁线圈组成。图 1-9a 是主磁极铁心形状,它由薄钢板冲片叠压后紧固而成。绕制好的励磁线圈套在铁心上,然后将整个磁极用螺钉固定在机座上,如图 1-9b 所示。主磁极相邻极性呈 N 极和 S 极交替排列。为了使主磁极所生磁通在气隙中按一定规律分布,同时使励磁绕组牢固地套在主磁极铁心上,则把磁极铁心下部做成弧形,称之为极靴(pole shoe)。

2. 换向极

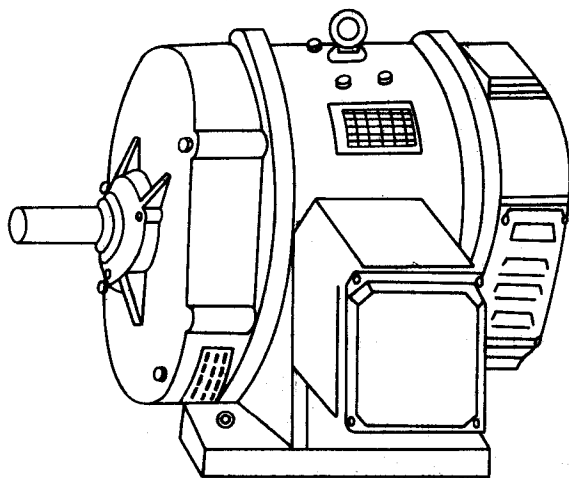


图 1-6 Z2 型直流电机外形图

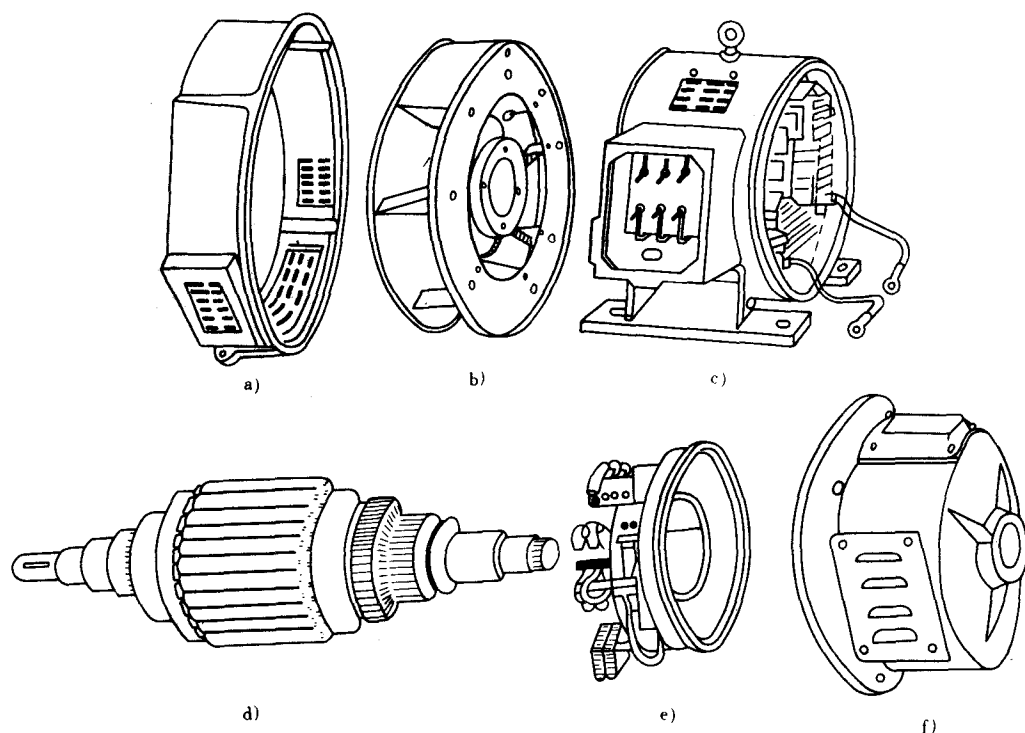


图 1-7 直流电机主要部件图

a)前端盖 b)风扇 c)定子 d)转子 e)电刷装置 f)后端盖

又称附加极或间极(inter pole),其作用是改善换向。换向极装在两主磁极之间,也呈N、S极交替排列。换向极也由铁心和绕组构成。如图1-10所示。它的铁心可用整块钢或钢板冲压制成,而换向极绕组必须与电枢绕组串联。

3. 机座

机座(stator frame)通常由铸钢或厚钢板焊接制成,它有两个用途:一是用来固定主磁极、换向极和端盖;二是组成磁路的一部分,称该部分为磁轭(yoke)。

4. 电刷装置

电刷装置(brush equipment)是把直流电压和直流电流引入或引出的装置。它由电刷、刷握、刷杆座、压紧弹簧和铜丝辫等组成,如图1-11所示。从图中可见,

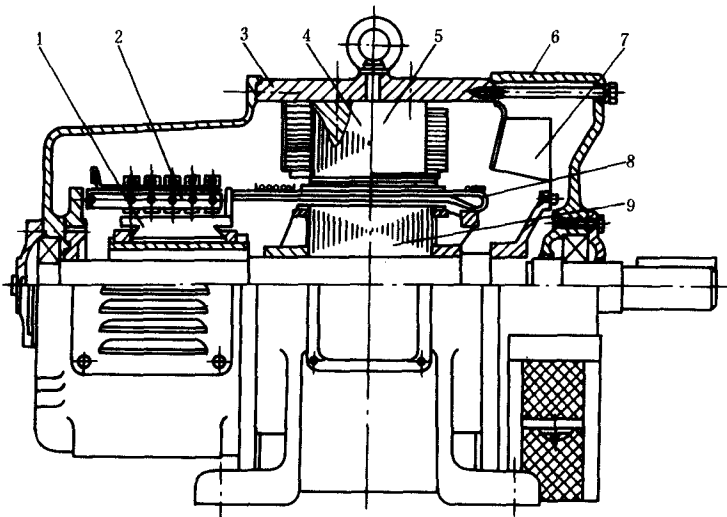


图 1-8 直流电机的剖面图

1—换向器 2—电刷装置 3—机座 4—主磁极 5—换向极
6—端盖 7—风扇 8—电枢绕组 9—电枢铁心

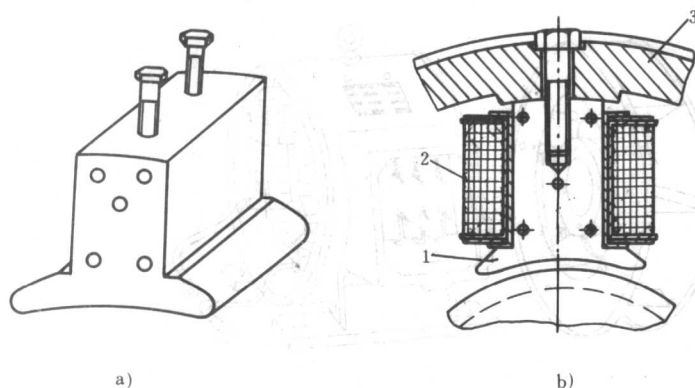


图 1-9 直流电机主磁极

a) 用薄钢板冲片叠成的主磁极铁心 b) 主磁极和线圈一起固定在机座上
1—主极铁心 2—励磁线圈 3—机座

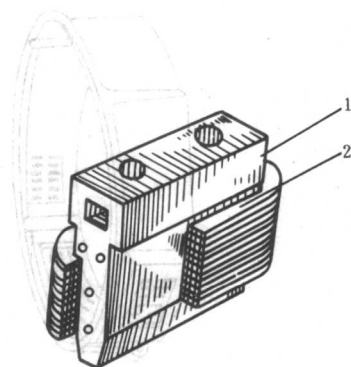


图 1-10 换向极

1—换向极铁心 2—换向极绕组

电刷放在刷握内，用压紧弹簧压紧在换向器上，而刷握固定在刷杆上，刷杆装在刷杆座上，且与刷杆座绝缘。刷杆座装在端盖上或轴承内盖上，然后将其整个装置固定。

5. 端盖

端盖(end bracket)一般用铸铁制成，其作用除装有轴承支撑转动部分外，还能保护电机免受外界侵蚀，同时也维护人身安全。

6. 补偿绕组

只有大容量电机在换向困难情况下，才安装补偿绕组(compensating winding)。它放置于主磁极的极靴内，且与主电路串联，以抵消极靴范围内电枢反应磁通势，以改善磁场性能。

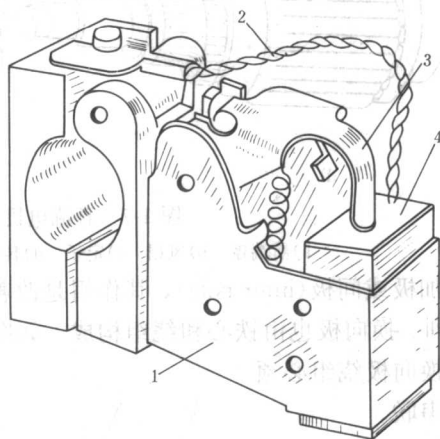


图 1-11 电刷装置

1—刷握 2—铜丝辫 3—压紧弹簧 4—电刷

二、转动部分——转子

1. 电枢铁心

电枢铁心(armature core)有两大作用，一是作为主磁路的一部分，二是嵌放电枢绕组。由于电枢(铁心和绕组的总称)与主磁场有相对运动而产生铁耗，为了减少铁耗，采用0.5mm厚硅钢片冲制后去毛刺，然后将表面氧化或涂漆(见图1-12a)，再在转子支架上或转轴上叠装而成，如图1-12b所示。

2. 电枢绕组

电枢绕组(armature winding)是由许多按一定规律联接起来的线圈(或称为元件)所组成，它是直流电机主要电路部分，是产生感应电动势或通过电流而产生电磁转矩，实现机电能量转换的关键部件。线圈通常用带绝缘的铜线绕制，两边分别放在不同槽中。