



普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

# 电机与拖动

## 第2版

© 孙建忠 刘凤春 主编

DIANJI YU TUODONG



免费电子课件



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

013032497

TM3-43  
19-2

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

# 电机与拖动

第2版

主 编 孙建忠 刘凤春  
参 编 曲兵妮 牟宪民 任 齐  
陈 燕 许春雨  
主 审 陈希有



机械工业出版社

TM3-43  
19-2



北航

C1640096

702380810

本书为普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材。

本书主要阐述电机的基本理论和基本分析方法,各类电动机电力拖动的基本原理和方法。包括电机学基础知识、直流电机、变压器、异步电机和同步电机的基本理论、控制电机的原理与应用、电力拖动基础、直流电动机的电力拖动、异步电动机的电力拖动和同步电动机的电力拖动以及电力拖动系统中电动机的选择。

本书是《电机与拖动》立体化教材的主教材,与其配套出版的还有《电机与拖动——Matlab 仿真和学习指导(978-7-111-25052-4)》辅助教材和《电机与拖动多媒体教学光盘(978-7-89482-790-6)》电子音像教材。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化和自动化等相关专业的教材,也可作为有关工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动/孙建忠,刘凤春主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2013.4

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

ISBN 978-7-111-41448-3

I. ①电… II. ①孙…②刘… III. ①电机—高等学校—教材②电力传动—高等学校—教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第027143号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘丽敏 责任编辑:刘丽敏 苑文环

版式设计:霍永明 责任校对:李婷 肖琳

封面设计:张静 责任印制:邓博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2013年4月第2版第1次印刷

184mm×260mm·21.75印张·537千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-41448-3

定价:39.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

## 第2版前言

随着社会的不断进步和科学技术的快速发展,传统的电机学与电力电子技术、控制理论、计算机技术和材料科学等现代科学技术的结合越来越紧密,呈现出智能化、高性能化和结构多样化等发展趋势。本教材正是为了适应新时期高水平研究型大学电气工程学科的发展而编写的。总教学时数为60~72学时,对于一些选学内容,章、节前标有“\*”。

《电机与拖动》是电气工程及其自动化和自动化等专业的专业基础课,涵盖了电机学、电力拖动和控制电机三门课程的基本教学内容,主要包括电机的工作原理、基本结构和运行特性,以及电力拖动系统中电动机的起动、调速、制动和电动机的选择等内容。

针对研究型大学的教学特点,本教材在编写时突出夯实基础、拓宽视野两大特点,在基本概念和基本理论方面的阐述上不吝篇幅,将重点内容讲清讲透。在深入剖析电机与拖动基础理论的同时,介绍各类电机的最新成果和动态,体现电机领域的最新进展与发展趋势,既为后续课程的学习打好基础,又激发了学生的学习兴趣,培养了学生的学习能力和创新思维能力。

本教材吸收了作者多年从事电机及其控制的教学与科研经验,以及作者主持及参与《电机与拖动》课程教学改革成果,将启发式教学和探究型学习与自主学习式教学思想融入到教材中,教材体系符合学生的认知规律,富有启发性;教材突出重点,分解难点,将难以理解的知识点采用学生易于接受的方式表述,如将异步电机在不同运行情况下的参数变化问题通过算例进行讲解;本教材还把交流电机的绕组、磁动势和电动势等内容进行分解,在异步电机理论中进行了简要介绍。

本教材仍保留了第1版教材的结构体系,即适当压缩直流电机的内容,加重异步电机和同步发电机内容,在此基础上,增加了节能变压器、永磁材料和异步发电机在风力发电中的应用等内容,并对同步电动机的自控式变频和他控式变频调速系统等内容进行了完善,对控制电机的结构 and 应用进行了修订。各章都适当增加了例题,例题解答注重启发式分析,引导学生掌握分析问题和发现问题的方法。

本教材中的各种电机额定值等技术参数都符合最新国家标准的要求,并在正文中标明了数据来源的国家标准号和标准名称。例题、思考题与习题中的数据,均来自实际生产厂商提供的产品技术数据。

本教材由大连理工大学孙建忠和刘凤春任主编,其中,第1章、第4章、第7章和第9章由孙建忠编写,第3章、第5章和第10章由刘凤春编写,第2章、第6章、第8章由任齐、曲兵妮、陈燕、许春雨共同编写,第11章由牟宪民编写。

本教材第1版出版后,被国内多所高校采用,受到了师生的普遍好评,不少师生通过邮件和电话与作者进行讨论,并对教材提出了许多建设性的建议和意见,在此深表谢意。本书

第1版承蒙大连理工大学陈希有教授主审，在教材第2版出版之际，对陈希有教授的贡献再次表示衷心感谢。本书在编写中参考了国内外有关著作和文献，在此对这些文献的作者一并致谢。

由于编者学识有限，难免存在失误或不当之处，尚祈广大读者不吝批评指教。

编者

# 第1版前言

《电机与拖动》是原“电机学”、“电力拖动”和“控制电机”等课程的有机结合。全书分上、下两篇。上篇为电机学，包括电机学基础知识、直流电机、变压器、异步电机和同步电机的基本理论，以及控制电机的原理与应用等。下篇为电力拖动，包括电力拖动基础知识和直流电动机、异步电动机与同步电动机的电力拖动，以及电力拖动系统中电动机的选择等。总学时数为60~72学时，章、节前标有“\*”的部分为选学内容。

本教材是编者在总结多年从事电机的教学和科研工作基础上编写的，具有以下特点：

首先，根据电机学科的发展趋势，适当地压缩直流电机的内容。讲清直流电机的结构和原理，对直流电机的绕组、电枢反应、换向等问题只做简要介绍，以他励直流电动机为例介绍直流电机的电力拖动，使学生既能全面了解直流电机的特点，又不需花费过多的学时。

其次，适当加重同步发电机的教学内容，以适应电气自动化专业的教学需要。针对目前同步电动机的发展和应用现状，同步电动机电力拖动中着重介绍永磁同步电动机、无刷直流电动机、开关磁阻电动机等现代调速系统。

在讲清电机与拖动基础理论的同时，介绍各类电机的最新成果和动态，体现当代电机技术的最新进展与趋势，力争使学生树立机电一体化的概念，既为后续课程的学习打好基础，又激发学生的学习兴趣。

全书侧重于基本原理和基本概念的阐述，强调基本理论的实际应用。在讲清各种电机的基本结构、基本原理、基本分析方法的基础上，介绍其应用要旨、实际系列等；各章所选例题与习题大量来自工程实际问题，通过学习培养学生解决实际问题的能力。

突出重点，分解难点。将不易理解的知识变为易于接受的方式叙述，如将异步电机在不同运行情况下的参数变化等难点问题在例题中讲解；把交流电机的绕组、磁动势和电动势等内容进行分解，在异步电机理论中简要介绍。

本书是一套立体化教材，除主教材外，还配套出版《电机与拖动 MATLAB 仿真和学习指导》和《电机与拖动多媒体教学光盘》。

本书由大连理工大学孙建忠教授和刘凤春副教授担任主编，第1、4、7、9章由孙建忠编写，第3、5、10章由刘凤春编写，第6、11章由刘彦呈编写，第2、8章由任齐、曲兵妮编写。

本书承蒙大连理工大学陈希有教授主审，他对全书进行了仔细审阅，提出了许多极其宝贵的建议和意见，对此表示衷心感谢。本书在编写中参考了一些国内外有关的著作和文献，在此对这些文献的作者一并表示感谢。

由于编者学识有限，书中难免存在失误或不当之处，敬请广大读者不吝批评指教。

编者

## 常用符号表

$A$	面积; 线负荷; 散热系数	$f_1$	异步电动机定子电流频率
$a$	直流电枢绕组的并联支路对数 交流绕组的并联支路数	$f_2$	异步电动机转子电流频率
$B$	磁感应强度 (磁通密度)	$f_v$	三相绕组合成磁动势的 $v$ 次谐波的频率
$B_a$	电枢磁场磁通密度	$G$	发电机的文字符号
$B_{ad}$	直轴电枢磁场磁通密度	$G$	系统转动部分的重量
$B_{aq}$	交轴电枢磁场磁通密度	$H$	磁场强度
$B_{av}$	气隙中磁通密度的平均值	$H_\delta$	气隙磁场强度
$B_x$	气隙中任意点处的磁通密度	$h$	高度
$C$	电容, 热容量	$I$	直流电流, 交流电流有效值
$C_E$	电动势常数	$i$	电流的瞬时值
$C_T$	电磁转矩常数	$I_0$	空载电流
$D$	转动部分的回转直径, 调速范围	$I_N$	额定电流
$D_a$	电枢直径	$I_1$	变压器一次电流; 交流电机定子电流
$E$	直流动势或交流电动势的有效值	$I_{1N}$	变压器一次侧的额定电流 (线值)
$e$	电动势的瞬时值	$I_2$	变压器二次电流; 异步电机转子电流
$E_0$	空载电动势, 励磁电动势	$I_{2N}$	变压器二次侧的额定电流 (线值)
$E_1$	变压器一次绕组和电机定子绕组由主磁通感应的电动势有效值 (相值)	$I_2'$	$I_2$ 的折算值
$E_2$	变压器二次绕组和电机转子绕组由主磁通感应的电动势有效值 (相值)	$I_a$	直流电机的电枢电流
$E_2'$	$E_2$ 折算到一次侧或定子侧的折算值	$I_f$	直流励磁电流
$E_{y1}$	一个线圈的感应电动势	$I_m$	交流励磁电流
$E_{q1}$	$q$ 个线圈的合成电动势	$I_\mu$	磁化电流
$E_\Phi$	相电动势	$I_S$	短路电流
$E_{ad}$	直轴电枢反应电动势	$I_{st}$	起动电流
$E_{aq}$	交轴电枢反应电动势	$J$	拖动系统的转动惯量
$e_r$	换向时的电抗电动势	$j$	转动机构的转速比
$e_a$	换向时的电枢反应电动势	$k$	变压器的电压比, 比例系数
$F$	磁动势, 电磁力	$k_i$	异步电动机定子、转子的电流比
$F_0$	励磁磁动势	$k_e$	异步电动机定子、转子的电动势比
$F_a$	电枢磁动势	$k_{dl}$	基波分布因数
$F_{ad}$	直轴电枢磁动势	$k_{dv}$	$v$ 次谐波的分布因数
$F_{aq}$	交轴电枢磁动势	$k_{q1}$	基波节距因数
$F_1$	三相绕组基波合成磁动势的幅值	$k_{qv}$	$v$ 次谐波的节距因数
$F_{y1}$	一个整距线圈的基波磁动势幅值	$k_{w1}$	基波绕组因数
$F_{q1}$	$q$ 个分布整距线圈的基波合成磁动势幅值	$k_{wv}$	$v$ 次谐波绕组因数
$F_{qv}$	$q$ 个线圈的 $v$ 次谐波磁动势幅值	$k_m$	过载倍数 (过载能力)
$F_{\Phi 1}$	单相绕组的基波磁动势幅值	$L$	自感
$F_{\Phi v}$	单相绕组 $v$ 次谐波磁动势幅值	$L_{1\sigma}$	变压器一次绕组的漏磁电感, 异步电机定子一相绕组的漏磁电感
$f$	频率	$L_{2\sigma}$	变压器二次绕组的漏磁电感, 异步电机转子一相绕组的漏磁电感
$f_N$	额定频率	$l$	长度
		$M$	电动机的文字符号

$M$	互感	$S$	视在功率
$m_1$	交流电机定子相数	$S_N$	额定视在功率
$m_2$	异步电机转子相数	$s$	转差率
$N$	磁极	$s_N$	额定转差率
$N$	每相绕组的串联匝数, 电枢导体数	$s_m$	临界转差率 (最大转矩时的转差率)
$N_1$	变压器一次绕组匝数	$T_0$	空载转矩
$N_1$	变压器二次绕组匝数	$T_1$	输入转矩
$N_y$	每个线圈的匝数	$T_2$	输出转矩
$n$	转子转速	$T_e$	电磁转矩
$n_N$	额定转速	$T_{em}$	最大 (临界) 电磁转矩
$n_0$	空载转速	$T_N$	额定转矩, 额定输出转矩
$n_1$	同步转速	$T_{eN}$	额定电磁转矩
$n_v$	$v$ 次谐波旋转磁场转速	$T_{st}$	起动转矩, 堵转转矩
$\Delta n$	转速差	$t$	时间
$P$	有功功率	$U$	U 相、U 相绕组
$P_N$	额定功率, 额定输出功率	$U$	直流电压, 交流电压有效值
$P_{IN}$	额定输入功率	$U_N$	额定电压
$P_1$	输入功率	$U_1$	变压器一次侧相电压, 定子相电压
$P_2$	输出功率	$U_{1N}$	变压器一次侧额定电压 (线值)
$P_e$	电磁功率	$U_2$	变压器二次侧电压 (线值)
$P_{em}$	最大电磁功率	$U_{2N}$	变压器二次侧额定电压 (线值)
$P_m$	机械功率, 最大功率	$U_0$	空载电压; 零序电压
$P_{Cu}$	铜耗	$U_s$	短路电压; 异步电机堵转电压
$P_{Fe}$	铁耗	$u$	电压的瞬时值
$P_{ad}$	附加 (杂散) 损耗	$V$	V 相, V 相绕组, 电压的单位
$P_{fw}$	机械损耗	$V_R$	电压调整率
$P_0$	空载损耗, 空载功率	$v$	线速度
$P_s$	短路功率, 堵转功率	$W$	W 相, W 相绕组
$p$	磁极对数	$W$	功; 能
$Q$	无功功率, 槽数, 热量	$W_m$	磁场能量
$Q_1$	异步电机定子槽数	$W_e$	电能, 电场能量
$Q_2$	异步电机转子槽数 (或导条数)	$X$	电抗
$q$	每极每相槽数	$X_a$	电枢反应电抗
$R$	电阻	$X_{ad}$	直轴电枢反应电抗
$R_1$	变压器一次侧一相绕组的电阻, 交流电机定子一相绕组的电阻	$X_{aq}$	交轴电枢反应电抗
$R_2$	变压器二次侧一相绕组的电阻, 异步电机转子一相绕组的电阻	$X_s$	同步电抗
$R_a$	电枢电阻	$X_d$	直轴同步电抗
$R_f$	励磁绕组电阻	$X'_d$	直轴瞬态电抗
$R_m$	励磁电阻, 磁阻	$X_q$	交轴同步电抗
$R'_2$	$R_2$ 的折算值	$X''_d$	直轴超瞬态电抗
$R_s$	变压器或异步电机的短路电阻	$X_m$	励磁电抗
$S$	磁极	$X_s$	短路电抗
		$X_\sigma$	漏电抗
		$X_{1\sigma}$	变压器一次侧一相绕组的漏电抗



	异步电机定子一相绕组的漏电抗	$\lambda$	单位面积的磁导
$X_{2\sigma}$	变压器二次侧一相绕组的漏电抗, 异步电机转子一相绕组的漏电抗	$\mu$	磁导率
$X'_{2\sigma}$	$X_{2\sigma}$ 的折算值	$\mu_0$	空气磁导率
$y$	电枢绕组的合成节距	$\mu_{Fe}$	铁心磁导率
$y_1$	电枢绕组的第一节距	$\eta$	效率
$y_2$	电枢绕组的第二节距	$\eta_N$	额定效率
$Z$	阻抗	$\eta_m$	最大效率
$Z_m$	励磁阻抗	$\theta$	角度, 功率角, 温升
$Z_S$	短路阻抗	$\theta_N$	额定功率角, 额定温升
$Z_1$	变压器一次绕组的漏阻抗, 交流电机定子一相绕组的漏阻抗	$\alpha$	角度, 相邻两槽间的电角度
$Z_2$	变压器二次绕组的漏阻抗 异步电机转子一相绕组的漏阻抗	$\beta$	负载系数, 线圈节距的短距角, 机械特性的斜率
$Z'_{2\sigma}$	$Z_{2\sigma}$ 的折算值	$\delta$	气隙长度, 静差率
$\Phi$	磁通量	$v$	谐波次数
$\Phi_0$	空载磁通; 同步电机每极的主磁通	$\tau$	极距, 时间常数
$\Phi_m$	变压器或异步电机的主磁通幅值	$\varphi$	相角; 功率因数角
$\Phi_\sigma$	漏磁通	$\varphi_1$	变压器一次侧功率因数角 交流电机定子一相电路的功率因数角
$\Phi_{ad}$	直轴电枢反应磁通	$\varphi_2$	变压器二次侧功率因数角 交流电机转子一相电路的功率因数角
$\Phi_{aq}$	交轴电枢反应磁通	$\Omega$	转子的机械角速度
$\Phi_v$	$v$ 次谐波磁通	$\Omega_1$	同步机械角速度
$\Lambda$	主磁路磁导	$\omega$	角频率, 电角速度
$\Lambda_\sigma$	漏磁路磁导	$\psi$	磁链, 内功率因数角
		$\rho$	转动部分的回转半径

# 目 录

第2版前言	
第1版前言	
常用符号表	
第1章 电机学基础知识	1
1.1 电机的基本功能与主要类型	1
1.2 电机的基本原理	2
1.2.1 磁场的基本概念	2
1.2.2 磁路及其基本定律	4
1.2.3 电磁感应定律	7
1.2.4 线圈的电路方程	8
1.2.5 电磁力定律与电磁转矩	9
1.2.6 电机的可逆性原理	10
1.3 电机的制造材料	10
1.3.1 概述	10
1.3.2 铁磁材料的重要特性	12
1.3.3 永磁材料的特性	14
1.3.4 电机中常用的永磁材料	17
思考题与习题	19
第2章 直流电机	20
2.1 直流电机的工作原理	20
2.1.1 直流电动机的工作原理	20
2.1.2 直流发电机的工作原理	21
2.2 直流电机的基本结构和额定值	22
2.2.1 直流电机的基本结构	22
2.2.2 直流电机的电枢绕组	23
2.2.3 直流电机的额定值	25
2.2.4 直流电机按励磁方式分类	26
2.3 直流电机的磁场和电枢反应	27
2.3.1 直流电机的空载磁场	27
2.3.2 电枢磁动势	28
2.3.3 电枢反应	29
*2.3.4 电枢反应对换向的影响及改善换向的措施	30
2.4 直流电机的感应电动势和电磁转矩	32
2.4.1 直流电机的感应电动势	32
2.4.2 直流电机的电磁转矩	33
2.5 直流电动机的运行分析	33
2.5.1 直流电动机的基本方程	33
2.5.2 直流电动机的工作特性	34
2.6 直流发电机的运行分析	37
2.6.1 直流发电机的基本方程	37
2.6.2 他励直流发电机的工作特性	38
2.6.3 并励直流发电机的自励过程与外特性	40
思考题与习题	42
第3章 变压器	44
3.1 变压器的基本结构、分类与额定值	44
3.1.1 变压器的基本结构	44
3.1.2 变压器的分类	48
3.1.3 变压器的额定值	50
3.2 变压器的工作原理	51
3.2.1 变压器各电磁量的参考方向	51
3.2.2 变压器的空载运行	52
3.2.3 变压器的负载运行	57
3.3 变压器的等效电路和相量图	59
3.3.1 绕组折算	59
3.3.2 T形等效电路	60
3.3.3 近似和简化等效电路	61
3.3.4 变压器负载运行时的相量图	62
3.4 标么值	64
3.4.1 标么值的定义	64
3.4.2 采用标么值的优点	64
3.5 变压器的参数测定	66
3.5.1 变压器的空载试验	67
3.5.2 变压器的短路试验	68
3.6 变压器的运行特性	71
3.6.1 变压器的外特性与电压调整率	71
3.6.2 变压器的损耗与效率特性	72
3.7 三相变压器及其联结组	76
3.7.1 三相变压器的类型	76

3.7.2 三相变压器的联结组 .....	77	量图 .....	126
3.8 三相变压器的并联运行 .....	81	4.5.5 异步电动机的简化等效电路 .....	127
3.8.1 并联运行的理想状态及条件 .....	81	4.5.6 笼型绕组的磁极数和相数 .....	128
3.8.2 联结组对并联运行的影响 .....	82	4.6 三相异步电动机的功率和转矩 .....	129
3.8.3 电压比对并联运行的影响 .....	82	4.6.1 三相异步电动机的功率关系 .....	129
3.8.4 短路阻抗对并联运行的影响 .....	82	4.6.2 三相异步电动机的转矩关系 .....	130
3.9 特殊变压器 .....	84	4.6.3 三相异步电动机电磁转矩的物理表 达式 .....	131
3.9.1 自耦变压器 .....	85	4.6.4 三相异步电动机的转矩—转差率 特性 .....	132
3.9.2 三绕组变压器 .....	88	4.7 三相异步电动机的工作特性和参数 测定 .....	136
3.9.3 仪用互感器 .....	89	4.7.1 三相异步电动机的工作特性 .....	136
*3.10 节能变压器 .....	91	4.7.2 三相异步电动机的主要性能 指标 .....	137
3.10.1 非晶合金变压器 .....	91	4.7.3 三相异步电动机的参数测定 .....	138
3.10.2 卷铁心变压器 .....	92	4.8 单相异步电动机 .....	140
3.10.3 超导变压器 .....	94	4.8.1 单相异步电动机的工作原理 .....	140
思考题与习题 .....	96	4.8.2 两相绕组的磁动势 .....	141
<b>第4章 异步电机</b> .....	<b>99</b>	4.8.3 单相异步电动机的主要类型和 起动方法 .....	143
4.1 三相异步电动机的基本结构与工作 原理 .....	99	*4.9 三相异步发电机 .....	145
4.1.1 三相异步电动机的基本结构 .....	99	4.9.1 三相异步发电机的单机运行 .....	145
4.1.2 异步电动机的基本工作原理 .....	102	4.9.2 笼型三相异步发电机的并网 运行 .....	146
4.1.3 三相异步电动机的额定值和主要 系列 .....	105	4.9.3 双馈异步发电机变速恒频风力发 电系统 .....	147
4.2 三相交流电机的绕组 .....	107	思考题与习题 .....	149
4.2.1 交流绕组的基本概念 .....	107	<b>第5章 同步电机</b> .....	<b>151</b>
4.2.2 三相双层绕组 .....	109	5.1 同步电机的基本结构和额定值 .....	151
4.2.3 三相单层绕组 .....	110	5.1.1 同步电机的基本结构 .....	151
4.3 三相交流绕组的磁动势 .....	111	5.1.2 同步电机的励磁系统 .....	154
4.3.1 单相绕组的磁动势——脉振磁 动势 .....	111	5.1.3 同步电机的冷却方式 .....	155
4.3.2 三相绕组的合成磁动势——旋转 磁动势 .....	116	5.1.4 同步电机的基本类型 .....	156
4.3.3 三相定子绕组建立的磁场 .....	120	5.1.5 同步电机的额定值 .....	156
4.4 三相交流绕组的感应电动势 .....	120	5.2 三相同步电机的工作原理 .....	157
4.4.1 集中整距线圈的感应电动势 .....	120	5.2.1 三相同步电机的基本原理 .....	157
4.4.2 分布绕组的感应电动势 .....	121	5.2.2 同步电机的空载运行 .....	157
4.4.3 短距绕组的感应电动势 .....	122	5.2.3 同步电机的负载运行和电枢 反应 .....	158
4.4.4 相电动势 .....	122	5.2.4 三相同步电机的运行状态 .....	161
4.5 三相异步电动机的等效电路 .....	123	5.3 三相同步发电机的稳态分析 .....	162
4.5.1 转子磁动势和电动势 .....	123	5.3.1 隐极同步发电机的稳态分析 .....	162
4.5.2 定子、转子绕组的电压方程——频率 归算 .....	124		
4.5.3 绕组归算 .....	125		
4.5.4 异步电动机的等效电路和相			

5.3.2 凸极同步发电机的稳态分析 .....	165	<b>第7章 电力拖动基础</b> .....	211
5.4 三相同步发电机的功率和转矩 .....	169	7.1 电力拖动系统的组成与分类 .....	211
5.4.1 功率平衡方程 .....	169	7.2 电力拖动系统的运动方程式 .....	212
5.4.2 电磁功率与功角特性 .....	170	7.2.1 单轴电力拖动系统的运动方 程式 .....	212
5.4.3 电磁转矩与转角特性 .....	172	7.2.2 多轴电力拖动系统的折算 .....	213
5.5 三相同步发电机的运行特性 .....	173	7.3 电力拖动系统的负载特性 .....	218
5.5.1 外特性 .....	173	7.3.1 恒转矩负载 .....	218
5.5.2 调整特性 .....	173	7.3.2 恒功率负载 .....	219
5.5.3 效率特性 .....	174	7.3.3 通风机、泵类负载 .....	219
5.6 同步发电机与电网的并联运行 .....	174	7.4 电力拖动系统的稳定运行条件 .....	220
5.6.1 并联运行的条件 .....	174	7.5 电力拖动系统调速的基础知识 .....	221
5.6.2 并联运行的方法 .....	175	7.5.1 调速的基本概念 .....	221
5.6.3 有功功率的调节与稳定问题 .....	176	7.5.2 调速系统的主要性能指标 .....	221
5.6.4 无功功率的调节与V形曲线 .....	180	思考题与习题 .....	223
5.7 三相同步电动机与同步补偿机 .....	182	<b>第8章 直流电动机的电力拖动</b> .....	225
5.7.1 同步电动机的运行分析 .....	182	8.1 他励直流电动机的机械特性 .....	225
5.7.2 同步电动机的功率和转矩 .....	183	8.1.1 固有机械特性 .....	225
5.7.3 同步电动机的运行特性 .....	184	8.1.2 人为机械特性 .....	226
5.7.4 同步补偿机 .....	186	8.2 他励直流电动机的起动和反转 .....	227
*5.8 同步发电机的三相突然短路 .....	186	8.2.1 电枢回路串联电阻起动 .....	228
5.8.1 同步发电机突然短路的物理 过程 .....	186	8.2.2 降低电枢电压起动 .....	230
5.8.2 同步发电机的瞬态电抗 .....	189	8.2.3 他励直流电动机的反转 .....	231
5.8.3 同步发电机的超瞬态电抗 .....	190	8.3 他励直流电动机的调速 .....	231
思考题与习题 .....	191	8.3.1 电枢回路串联电阻调速 .....	231
<b>第6章 控制电机</b> .....	194	8.3.2 降低电枢电压调速 .....	232
6.1 伺服电动机 .....	194	8.3.3 减弱磁通调速 .....	233
6.1.1 交流伺服电动机 .....	194	8.3.4 调速方式与负载类型的配合 .....	233
6.1.2 直流伺服电动机 .....	196	8.4 他励直流电动机的制动 .....	236
6.2 步进电动机 .....	197	8.4.1 能耗制动 .....	236
6.2.1 基本工作原理 .....	197	8.4.2 反接制动 .....	238
6.2.2 反应式步进电动机 .....	199	8.4.3 回馈制动 .....	240
6.3 测速发电机 .....	201	8.5 他励直流电动机的四象限运行 .....	242
6.3.1 直流测速发电机 .....	201	思考题与习题 .....	243
6.3.2 交流异步测速发电机 .....	202	<b>第9章 异步电动机的电力拖动</b> .....	245
6.4 自整角机 .....	203	9.1 三相异步电动机的机械特性 .....	245
6.4.1 自整角机的结构 .....	203	9.1.1 固有机械特性 .....	245
6.4.2 力矩式自整角机的接线方式和工 作原理 .....	204	9.1.2 人为机械特性 .....	248
6.4.3 控制式自整角机 .....	204	9.2 三相异步电动机的起动 .....	250
6.5 旋转变压器 .....	206	9.2.1 笼型异步电动机的起动 .....	250
6.6 感应同步器 .....	208	9.2.2 高起动转矩的异步电动机 .....	256
思考题与习题 .....	210	9.2.3 绕线转子异步电动机的起动 .....	258

9.3 三相异步电动机的调速 .....	263	10.6.2 开关磁阻电动机的工作原理 .....	305
9.3.1 变极调速 .....	263	10.6.3 开关磁阻电动机调速系统的	
9.3.2 变频调速 .....	267	特点 .....	306
9.3.3 调压调速 .....	270	10.6.4 开关磁阻电动机的应用 .....	308
9.3.4 绕线转子异步电动机转子串电阻		10.6.5 开关磁阻电动机与步进电动机的	
调速 .....	272	区别 .....	309
9.3.5 绕线转子异步电动机串级调速 ..	273	思考题与习题 .....	310
9.3.6 电磁调速电动机 .....	275		
*9.3.7 异步电动机调速中的矢量控制			
和直接转矩控制 .....	276		
9.4 三相异步电动机的制动 .....	280		
9.4.1 回馈制动 .....	280		
9.4.2 反接制动 .....	282		
9.4.3 能耗制动 .....	286		
9.4.4 软停车与软制动 .....	287		
9.5 异步电动机的各种运行状态 .....	287		
思考题与习题 .....	288		
<b>第10章 同步电动机的电力拖动</b> .....	<b>290</b>	<b>第11章 电力拖动系统中电动机的</b>	<b>选择</b> .....
10.1 同步电动机的机械特性及稳定		11.1 电动机选择的基本原则 .....	311
运行 .....	290	11.1.1 类型的选择 .....	311
10.1.1 同步电动机的机械特性 .....	290	11.1.2 额定功率的选择 .....	312
10.1.2 同步电动机的稳定运行 .....	291	11.1.3 电压等级的选择 .....	313
10.2 同步电动机的起动 .....	291	11.1.4 转速的选择 .....	313
10.2.1 拖动起动法 .....	292	11.1.5 结构型式的选择 .....	314
10.2.2 异步起动法 .....	292	11.1.6 安装型式的选择 .....	315
10.2.3 变频起动法 .....	293	11.1.7 工作制的选择 .....	315
10.3 同步电动机的调速和制动 .....	293	11.1.8 型号的选择 .....	315
10.3.1 同步电动机的调速方法概述 .....	293	11.2 电动机的发热与冷却 .....	316
10.3.2 同步电动机的制动方法 .....	294	11.2.1 电动机的发热过程与温升 .....	316
10.4 永磁同步电动机调速系统 .....	295	11.2.2 电动机的冷却过程与冷却	
10.4.1 永磁同步电动机的基本结构 .....	295	方式 .....	317
10.4.2 永磁同步电动机的调速原理 .....	296	11.3 电动机的工作制 .....	318
10.4.3 永磁同步电动机的特点和		11.3.1 连续工作制 (S1) .....	321
应用 .....	297	11.3.2 短时工作制 (S2) .....	321
10.5 无刷直流电动机调速系统 .....	298	11.3.3 断续周期工作制 (S3) .....	322
10.5.1 无刷直流电动机调速系统的基本		11.4 电动机额定功率的选择 .....	322
组成 .....	298	11.4.1 电动机的允许输出功率 .....	322
10.5.2 无刷直流电动机的工作原理 .....	300	11.4.2 拖动连续运行负载电动机额定功	
10.5.3 无刷直流电动机的特点与应用 ..	302	率的选择 .....	323
10.6 开关磁阻电动机调速系统 .....	303	11.4.3 拖动短时运行负载电动机额定功	
10.6.1 开关磁阻电动机调速系统的		率的选择 .....	327
组成 .....	304	11.4.4 拖动断续周期运行负载电动机额	
		定功率的选择 .....	329
		*11.5 电动机的经济运行 .....	330
		11.5.1 电动机的经济运行管理 .....	330
		11.5.2 电动机经济运行的基本参数 .....	330
		11.5.3 电动机的经济运行措施 .....	332
		思考题与习题 .....	333
		<b>参考文献</b> .....	<b>334</b>

# 第 1 章 电机学基础知识

电机（包括变压器和旋转电机）是实现能量转换和信号传递的电磁装置，在现代社会中起着极其重要的作用。

电机是电能生产、传输和分配的主要设备。在发电厂，发电机由汽轮机、水轮机、柴油机或其他动力机械带动，这些原动机将燃料燃烧的热能、水的位能、原子核裂变的核能等转化为机械能输入到发电机，由发电机将机械能转换为电能；发电机发出的电压再通过升压变压器升压后向远距离输送；在各用电区域，再通过不同电压等级的降压变压器将电压降低，供给用户。

在工农业生产和国民经济的各个领域，广泛应用电动机驱动各种生产机械和设备，一个现代化企业需要几百台甚至几万台各种不同的电动机；在高级汽车中，为了控制燃料和改善乘车感觉以及显示有关装置的状态，常常要使用 40 ~ 50 台电动机，而豪华轿车上的电机，则可多达 80 台；家用电器和一些高档消费品，如电唱机、摄录相机、VCD 视盘和 DVD 视盘等都需要配套电机，工业化国家一般家庭可用到 35 台以上的电机。

各种控制电机还被用做控制系统中的执行、检测、放大和解算元件。例如，火炮和雷达的自动定位，人造卫星发射和飞行的控制，舰船方向舵的自动操纵，以及机床加工的自动控制和显示等。

随着社会的发展和科学技术的进步，特别是近年来超导技术、磁流体发电技术、压电技术、电力电子技术和电子与计算机技术的迅猛发展，使电机技术的发展拥有了更加广阔的前景。

## 1.1 电机的基本功能与主要类型

按照电机在能量转换和信号传递中所起作用的不同，电机可以分为下列几类：

- 1) 发电机——将机械功率转换为电功率。
- 2) 电动机——将电功率转换为机械功率。
- 3) 变压器、变流器、变频器及移相器——将一种形式的电能转换为另一种形式的电能。其中，变压器用于改变交流电的电压；变流器用于改变电流的形式，如将交流变为直流；变频器用于改变交流电的频率；移相器用于改变交流电的相位。
- 4) 控制电机——在自动控制系统中起检测、放大、执行和校正作用，作为控制系统的控制元件。

按照电机的结构特点及电源性质的不同，电机主要可分为下列几类：

- 1) 静止电机——变压器。
- 2) 旋转电机——包括直流电机和交流电机，根据电机转速与同步转速的关系，交流电机又分为同步电机和异步电机。同步转速的概念将在下文详细介绍。

直流电机——电流为直流电的电机。

交流电机——电流为交流的电机。

同步电机——交流电机的一种，运行中转速恒为同步转速，电力系统中的发电机主要是同步电机。

异步电机——也是交流电机的一种，运行中电机转速不是同步转速，异步电机主要用做电动机。

电机的分类方法还有很多，由于电机的种类繁多，性能各异，各种分类方法未必能够涵盖所有的电机。本书采用前述第二种分类体系介绍电机的基本理论和应用。

## 1.2 电机的基本原理

电机是一种通过电磁感应原理来实现能量变换的设备，电和磁是构成电机的两大要素，缺一不可。电在电机中主要是以“路”的形式出现，即由电机内的线圈、绕组构成电机的电路。磁在电机中是以“场”的形式存在的。在工程分析计算中，常将磁场简化为磁路来处理。下面简要介绍电机中的一些重要概念。

### 1.2.1 磁场的基本概念

#### 1. 磁感应强度与磁力线

磁场是由电流产生的。表征磁场强弱的物理量是磁感应强度（Magnetic Flux Density），又称为磁通密度。它是一个矢量，用  $B$  表示，在国际单位制中其单位名称为特斯拉，简称为特（T）。磁场中各点的磁感应强度可以用磁力线的疏密程度来表示。磁力线是人为地设想出来、画出来的，并非磁场中真的有这种线存在。

图 1-1 为长直导线和螺线管载流时的磁力线分布图。

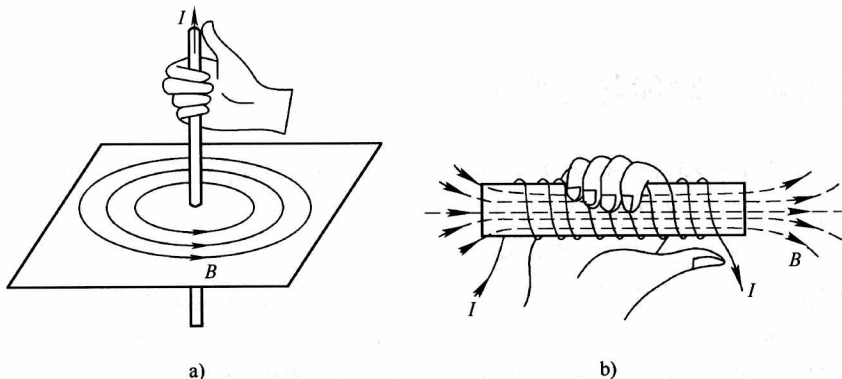


图 1-1 载流长直导线和螺线管的磁力线

a) 载流长直导线 b) 载流螺线管

由图可知，磁力线具有以下特性：

- 1) 磁力线的回转方向和电流方向之间的关系遵守右手螺旋定则。
- 2) 磁力线总是闭合的，既无起点，也无终点。
- 3) 磁场中的磁力线不会相交，因为磁场中每一点的磁感应强度方向都是确定的、唯

一的。

## 2. 磁通量与磁通连续性定理

穿过某一截面  $A$  的磁感应强度  $B$  的通量称为磁通量 (Magnetic Flux), 简称磁通, 用  $\Phi$  表示, 定义为

$$\Phi = \int_A B dA \quad (1-1)$$

也就是说, 磁感应强度  $B$  在某截面  $A$  上的面积分, 就是通过该截面的磁通。在均匀磁场中, 如果  $B$  线与截面  $A$  的法线重合, 如图 1-2 所示, 则有

$$\Phi = BA \quad (1-2)$$

在国际单位制中, 磁通的单位名称为韦伯 (Wb)。

由于磁力线是闭合的, 因此, 对任意封闭曲面来说, 进入该闭合曲面的磁力线一定等于穿出该闭合曲面的磁力线。如规定磁力线从曲面穿出为正, 穿入为负, 则通过任意封闭曲面的磁通量总和必等于零, 即

$$\Phi = \oint_A B dA = 0 \quad (1-3)$$

这就是磁通连续性定理。磁通的连续性是一个重要的概念。

## 3. 磁场强度与磁导率

在磁场计算中, 还有一个重要的物理量称为磁场强度 (Magnetic Intensity), 它也是一个矢量, 用符号  $H$  表示, 在国际单位制中, 磁场强度的单位名称为安/米 (A/m)。在各向同性介质中, 它与磁感应强度  $B$  之间的关系为

$$B = \mu H \quad (1-4)$$

式中  $\mu$ ——磁导率, 表征磁场中介质的导磁能力, 单位是亨/米 (H/m)。

磁导率的大小随介质的性质而异。我们熟知的真空磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。在电机中应用的介质, 一般按其磁性能的不同分为铁磁物质和非铁磁物质。前者如铁、钢、钴、镍等, 它们的磁导率是真空磁导率的几百倍甚至上万倍, 并且与磁场强弱有关, 不是一个常数。后者如空气、铜、铝和绝缘材料等, 它们的磁导率与真空磁导率相差无几, 一律当做  $\mu_0$  处理。

众所周知, 导体和非导体的电导率之比, 其数量级可高达  $10^{16}$ 。所以一般电流是沿着导体流通的, 而称非导体为电绝缘体, 电主要以电路的形式出现。铁磁材料与非铁磁材料的磁导率之比, 其数量级仅为  $10^3 \sim 10^4$ 。所以磁力线不是仅集中在铁磁材料中, 而是在各个方向分布的, 有相当一部分磁力线是经非铁磁材料闭合的。因此, 磁是以场的形态存在的。

## 4. 磁场储能

磁场能够储存能量, 这些能量是在磁场建立过程中由其他能源的能量转换而来的。电机就是借助磁场储能来实现机电能量转换的。

磁场中的体能量密度  $w_m$  为

$$w_m = \frac{1}{2} BH \quad (1-5)$$

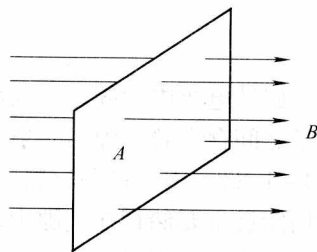


图 1-2 磁感应强度与磁通的关系



式中  $B$ ——磁场中某处的磁感应强度；

$H$ ——磁场中某处的磁场强度。

磁场的总储能  $W_m$  是磁能密度的体积分，即

$$W_m = \int_V w_m dV \quad (1-6)$$

对于磁导率为常数的线性介质，式 (1-5) 可写成

$$w_m = \frac{1}{2}BH = \frac{B^2}{2\mu} \quad (1-7)$$

旋转电机中的固定不动部分（定子）和旋转部分（转子）均由铁磁材料构成，在定、转子之间存在着气隙。一般气隙中的磁感应强度约为  $0.4 \sim 0.8\text{T}$ ，铁心中的磁感应强度约为  $1.0 \sim 1.8\text{T}$ 。因为铁磁材料的磁导率是空气磁导率的数千倍，由式 (1-7) 可知，旋转电机的磁场能量主要储存在气隙中，虽然气隙的体积远小于定、转子磁性材料的体积。实际上，电机的电气系统和机械系统是通过气隙磁场联系起来，从而实现机电能量转换的，所以把气隙磁场称为耦合磁场。

### 1.2.2 磁路及其基本定律

一般说来，磁场在空间的分布是很复杂的，不过，由于铁磁材料的磁导率很大，能使电机中绝大部分磁通集中在一定的路径中，因此，可以将“场”问题化简为“集中参数”的问题，即采用所谓磁路的方法来进行分析。

图 1-3 为两种电机中常见的磁路。由于铁磁材料的导磁性比空气好得多，所以大部分磁通经铁心闭合，这部分磁通称为主磁通，用  $\Phi$  表示。小部分磁通经由空气等非铁磁材料闭合，这部分磁通称为漏磁通，用  $\Phi_\sigma$  表示。如同把电流流过的路径称为电路一样，也可以把磁通通过的路径称为磁路。

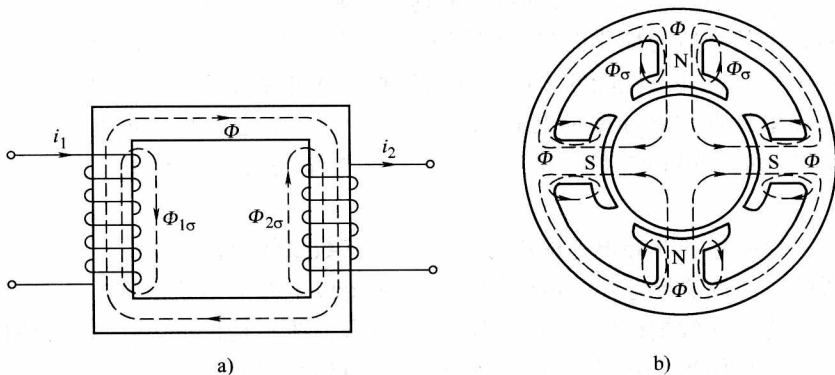


图 1-3 典型磁路

a) 变压器磁路 b) 直流电机磁路

下面介绍磁路中有关的基本定律和基本概念。

#### 1. 安培环路定律（全电流定律）

在磁场中，磁场强度沿任一闭合路径的线积分，等于该闭合路径所包围电流的代数和，即