

高等工科院校系列教材

电机及电力拖动基础

吴浩烈 主编



重庆大学出版社

21
3

921

383624

1118

电机及电力拖动基础

吴浩烈 主编



重庆大学出版社

内 容 简 介

全书内容包括:直流电机,直流电机的电力拖动,变压器,交流电机的绕组、磁动势和电动势,三相异步电动机,三相异步电动机的电力拖动,单相异步电动机和三相同步电动机,控制电机,电力拖动系统电动机的选择,共九章。讲述了各种电机和变压器的基本结构、工作原理、特性及使用方法。本书主要作为高等工科院校工业电气自动化专业、应用电子技术专业、电气技术专业 and 机电一体化专业等工自类专业的专科教材,也可作为职工大学和业余大学同类专业的教材,还可供工程技术人员进修及工作参考。

DY84/58



重庆大学出版社出版发行
新华书店经销
重庆建筑大学印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:20.5 印张 字数:512 千
1996年4月第1版 1996年4月第1次印刷
印数:1—10000

ISBN 7-5624-0729-0/TM·43 定价:17.00 元

(川)新登字 020 号

序

近年来我国高等专科教育发展很快,各校招收专科生的人数呈逐年上升趋势,但是专科教材颇为匮乏,专科教材建设工作进展迟缓,在一定程度上制约了专科教育的发展。在重庆大学出版社的倡议下,中国西部地区 14 所院校(云南工学院、贵州工学院、宁夏工学院、新疆工学院、陕西工学院、广西大学、广西工学院、兰州工业高等专科学校、昆明工学院、攀枝花大学、四川工业学院、四川轻化工学院、渝州大学、重庆大学)联合起来,编写、出版机类和电类专科教材,开创了一条出版系列教材的新路。这是一项有远见的战略决策,得到国家教委的肯定与支持。

质量是这套教材的生命。围绕提高系列教材质量,采取了一系列重要举措:

第一,组织数十名教学专家反复研究机类、电类三年制专科的培养目标和教学计划,根据高等工程专科教育的培养目标——培养技术应用型人才,确定了专科学生应该具备的知识和能力结构,据此制订了教学计划,提出了 50 门课程的编写书目。

第二,通过主编会议审定了 50 门课程的编写大纲,不过分强调每门课程自身的系统性和完整性,从系列教材的整体优化原则出发,理顺了各门课程之间的关系,既保证了各门课程的基本内容,又避免了重复和交叉。

第三,规定了编写系列专科教材应该遵循的原则:

1. 教材应与专科学生的知识、能力结构相适应,不要不切实际地拔高;
2. 基础理论课的教学应以“必须、够用”为度,所谓“必须”是指专科人才培养规格之所需,所谓“够用”是指满足后续课程之需要。
3. 根据专科的人才培养规格和人才的主要去向,确定专业课教材的内容,加强针对性和实用性;
4. 减少不必要的数理论证和数学推导;
5. 注意培养学生解决实际问题的能力,强化学生的工程意识;
6. 教材中应配备习题、复习思考题、实验指示书等,以方便组织教学;
7. 教材应做到概念准确,数据正确,文字叙述简明扼要,文、图配合适当。

第四,由出版社聘请学术水平高、教学经验丰富、责任心强的专家担任主审,严格把住每门教材的学术质量关。

出版系列专科教材堪称一项“浩大的工程”。经过一年多的艰苦努力,系列专科教材陆续面市了。它汇集了中国西部地区 14 所院校专科教育的办学经验,是西

部地区广大教师长期教学经验的结晶。

纵观这套教材,具有如下的特色:它符合我国国情,符合专科教育的教学基本要求和教学规律;正确处理了与本科教材、中专教材的分工,具有很强的实用性;与出版单科教材不同,有计划地成套推出,实现了整体优化。

这套教材立足于我国西部地区,面向全国市场,它的出版必将对繁荣我国的专科教育发挥积极的作用。这套教材可以作为大学专科及成人高校的教材,也可作为大学本科非机类或非电类专业的教材,亦可供有关工程技术人员参考。因此我不揣冒昧向广大读者推荐这套系列教材,并希望通过教学实践后逐版修订,使之日臻完善。

吴云鹏

1993年
仲夏

前 言

本书是参照工业电气自动化专业《电机及拖动基础》课程全国统一教学大纲和中央电大《电机与拖动》教学大纲要求,结合高等工科院校专科的特点而编写的专科教材,内容力求简明扼要,概念清楚,紧密结合专业,以够用为度,注意前后课程的衔接,为便于复习,每章后面均附有小结、思考题和习题。

本书的绪论、第一、二、四、八章和 § 7-1 由贵州工学院吴浩烈编写。第六、九章和 § 7-2 由攀枝花大学刘正德编写。第三、五章由四川轻化工学院夏忠毅编写。全书由吴浩烈主编。

本书由清华大学李发海教授主审,中央广播电视大学王岩副教授也对书稿进行了仔细审阅,他们对书稿提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心感谢。

在编写过程中主要参考了顾绳谷主编的《电机及拖动基础》、侯恩奎主编的《电机与拖动》、应从实主编的《电机及拖动基础》及其他院校的教材,在此一并表示衷心谢意。

由于编者水平有限,书中缺点和错误之处在所难免,欢迎批评指正。

编 者

1995 年 6 月

主 要 符 号 表

A	线负载
a	直流电机电枢绕组并联支路对数;交流电机电枢绕组并联支路数
B	磁通密度
B_{av}	平均磁通密度
B_m	磁通密度最大值
B_δ	气隙磁通密度
C_e	电动势常数
C_T	转矩常数
D	直径
D_a	直流电机电枢铁心外径
E	感应电动势
E_a	直流电机电枢绕组感应电动势
E_m	感应电动势最大值
E_1	变压器原边电动势;交流电机定子绕组感应电动势
E_2	变压器副边电动势;异步电动机转子不动时的感应电动势
E_{S1}	变压器原边漏电动势
E_{S2}	变压器副边漏电动势
E_ν	ν 次谐波电动势
e	电动势的瞬时值;自然对数数底
e_L	直流电机换向元件中的自感电动势
e_M	直流电机换向元件中的互感电动势
e_r	直流电机换向元件中的电抗电动势
e_a	直流电机换向元件中的电枢反应电动势
F	电机磁动势
F_a	直流电机电枢磁动势
F_{ad}	直轴电枢反应磁动势
F_{aq}	交轴电枢反应磁动势
F_f	励磁磁动势
F_0	空载磁动势
f	频率;力;磁动势瞬时值
f_N	额定频率
f_1	定子电路频率
f_2	转子电路频率

f_ν —— ν 次谐波频率
 GD^2 ——飞轮矩
 H ——磁场强度
 I ——电流
 I_a ——直流电机电枢电流
 I_N ——额定电流
 I_0 ——空载电流
 I_{Fe} ——铁耗电流
 I_μ ——励磁电流
 I_1 ——变压器原边电流;交流电机定子电流
 I_2 ——变压器副边电流;异步电机转子电流
 I_f ——励磁电流
 I_{st} ——起动电流
 J ——转动惯量
 K ——直流电机换向片数;系数
 k ——变压器的变比
 k_e ——异步电机电动势变比
 k_i ——异步电机电流变比
 k_q ——交流绕组的分布系数
 k_w ——交流绕组的绕组系数
 k_y ——交流绕组的短距系数
 k_μ ——饱和系数
 L ——自感系数
 l ——有效导体的长度
 M ——互感系数
 m ——相数;直流电动机起动级数
 N ——直流电机电枢绕组总导体数;步进电动机的拍数
 n ——转速
 n_N ——额定转速
 n_1 ——同步转速
 n_0 ——直流电动机理想空载转速
 P_N ——额定功率
 P_{em} ——电磁功率
 P_{mec} ——总机械功率
 P_1 ——输入功率
 P_2 ——输出功率
 p ——极对数
 p_{ad} ——附加损耗

p_{Cu} ——铜损耗
 p_{Fe} ——铁损耗
 p_{mec} ——机械损耗
 p_f ——励磁损耗
 p_k ——短路损耗
 p_0 ——空载损耗
 Q ——无功功率
 q ——每极每相槽数
 R ——电阻
 R_a ——直流电机电枢回路电阻
 R_{cr} ——直流发电机励磁回路的临界电阻
 R_f ——励磁回路电阻
 R_L ——负载电阻
 R_m ——磁阻
 r_1 ——变压器原边绕组电阻;异步电机定子电阻
 r_2 ——变压器副边绕组电阻;异步电机转子电阻
 r_k ——变压器、异步电机的短路电阻
 r_m ——变压器、异步电机的励磁电阻
 S ——直流电机元件数;变压器视在功率
 s ——异步电机转差率
 s_m ——临界转差率
 s_N ——额定转差率
 T ——转矩;周期;时间常数;电磁转矩
 T_L ——负载转矩
 T_m ——最大电磁转矩
 T_N ——额定转矩
 T_{st} ——起动转矩
 T_0 ——空载制动转矩
 T_1 ——输入转矩
 T_2 ——输出转矩
 U ——电压
 U_k ——变压器短路电压
 U_N ——额定电压
 U_1 ——变压器原边电压;交流电机定子电压
 U_2 ——变压器副边电压;异步电机转子电压
 U_{20} ——变压器副边空载电压
 u_k ——短路电压百分值
 u_{kr} ——短路电压的有功分量

u_{kx} ——短路电压的无功分量
 v ——线速度
 W_c ——直流电机电枢元件匝数;交流绕组线圈匝数
 x ——电抗
 x_k ——短路电抗
 x_L ——负载电抗
 x_m ——励磁电抗
 x_1 ——变压器原边漏电抗;交流电机定子漏电抗
 x_2 ——变压器副边漏电抗;异步电机转子不动时的漏电抗
 y ——节距;直流电机电枢绕组的合成节距
 y_k ——直流电机换向器节距
 y_1 ——直流电机第一节距;交流电机绕组节距
 y_2 ——第二节距
 Z ——电机槽数;阻抗
 Z_L ——负载阻抗
 Z_m ——励磁阻抗
 Z_R ——步进电动机转子齿数
 Z_1 ——变压器原边漏阻抗;异步电机定子漏阻抗
 Z_2 ——变压器副边漏阻抗;异步电机转子漏阻抗
 α ——角度;槽距角
 β ——角度;变压器负载系数
 γ ——角度
 δ ——气隙长度
 η ——效率
 $\eta_{\max}$ ——最大效率
 θ ——角度;温度
 θ_s ——步进电动机的步距角
 μ ——磁导率
 μ_{Fe} ——铁磁性材料磁导率
 μ_r ——相对磁导率
 ν ——谐波次数
 τ ——极距;温升
 $\tau_{\max}$ ——绝缘材料允许的最高温升
 Φ ——主磁通;每极磁通
 Φ_m ——主磁通最大值
 Φ_{s1} ——原边漏磁通
 Φ_{s2} ——副边漏磁通
 Φ_1 ——基波磁通

Φ_ν —— ν 次谐波磁通
 Φ_0 ——空载磁通;励磁磁通
 φ ——相位角;功率因数角
 φ_1 ——变压器原边功率因数角;异步电机定子边功率因数角
 φ_2 ——变压器副边功率因数角;异步电机转子电路功率因数角
 ψ ——磁链;相位角
 Ω ——机械角速度
 Ω_1 ——同步机械角速度
 ω ——电角速度;角频率

电学、磁学和力学单位符号

Wb——韦伯
Mx——麦克斯韦
Gs——高斯
H——亨利
 Ω ——欧姆
Hz——赫兹
A——安培(安)
V——伏特(伏)
kV——千伏
W——瓦特(瓦)
kW——千瓦
var——乏
kvar——千乏
kVA——千伏安
rad/s——弧度/秒
r/min——转/分
m——米
N——牛顿
N·m——牛顿·米
N·m²——牛·米²

目 录

绪 论	(1)
§ 0-1 电机及电力拖动在国民经济中的作用	(1)
§ 0-2 本课程的性质、任务、内容和特点	(2)
§ 0-3 本课程常用的电磁定律与公式	(2)
第一章 直流电机	(8)
§ 1-1 直流电机的基本工作原理	(8)
§ 1-2 直流电机的结构、额定值和主要系列	(10)
§ 1-3 直流电机的电枢绕组	(14)
§ 1-4 直流电机的磁场	(20)
§ 1-5 直流电动机	(25)
§ 1-6 直流发电机	(30)
§ 1-7 直流电机的换向	(35)
小 结	(41)
思考题	(42)
习 题	(44)
第二章 直流电机的电力拖动	(46)
§ 2-1 电力拖动系统的运动方程式	(46)
§ 2-2 工作机构的转矩、力、飞轮矩和质量的折算	(48)
§ 2-3 负载的机械特性	(54)
§ 2-4 他励直流电动机的机械特性	(56)
§ 2-5 他励直流电动机的起动	(64)
§ 2-6 他励直流电动机的过渡过程	(68)
§ 2-7 他励直流电动机的调速	(74)
§ 2-8 他励直流电动机的制动	(81)
小 结	(90)
思考题	(91)
习 题	(92)
第三章 变压器	(96)
§ 3-1 变压器的原理、结构及额定值	(96)
§ 3-2 变压器的空载运行	(100)
§ 3-3 变压器的负载运行	(104)
§ 3-4 变压器参数的测定	(111)
§ 3-5 变压器的运行特性	(113)
§ 3-6 三相变压器的联接组别	(118)
§ 3-7 变压器的并联运行	(125)
§ 3-8 自耦变压器和仪用互感器	(129)
小 结	(133)

思考题	(133)
习 题	(135)
第四章 交流电机的绕组、磁动势和电动势	(137)
§ 4-1 交流电机的绕组	(137)
§ 4-2 交流绕组的磁动势	(146)
§ 4-3 交流绕组的电动势	(160)
小 结	(166)
思考题	(167)
习 题	(168)
第五章 三相异步电动机	(169)
§ 5-1 三相异步电动机的基本结构、额定数据和主要系列	(169)
§ 5-2 三相异步电动机的工作原理及转差率	(173)
§ 5-3 三相异步电动机的主磁通和漏磁通	(174)
§ 5-4 三相异步电动机转子静止时的电磁关系	(175)
§ 5-5 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系	(180)
§ 5-6 三相异步电动机的功率和转矩	(186)
§ 5-7 三相异步电动机的工作特性和参数测定	(189)
小 结	(192)
思考题	(193)
习 题	(194)
第六章 三相异步电动机的电力拖动	(195)
§ 6-1 三相异步电动机的机械特性	(195)
§ 6-2 三相鼠笼式异步电动机的起动方法	(201)
§ 6-3 三相绕线式异步电动机的起动方法	(208)
§ 6-4 三相异步电动机的调速方法	(213)
§ 6-5 三相异步电动机的制动运行	(223)
§ 6-6 根据异步电动机的技术数据计算异步电动机的参数	(228)
小 结	(232)
思考题	(234)
习 题	(235)
第七章 单相异步电动机和三相同步电动机	(237)
§ 7-1 单相异步电动机	(237)
§ 7-2 三相同步电动机	(241)
小 结	(253)
思考题	(254)
习 题	(255)
第八章 控制电机	(256)
§ 8-1 伺服电动机	(256)
§ 8-2 测速发电机	(261)
§ 8-3 步进电动机	(263)
§ 8-4 微型同步电动机	(268)
§ 8-5 自整角机	(270)

§ 8-6 旋转变压器	(276)
小 结	(280)
思考题	(281)
第九章 电力拖动系统电动机的选择	(283)
§ 9-1 电动机的种类、型式、额定电压与额定转速的选择	(283)
§ 9-2 电机的发热与冷却及电机工作方式的分类	(284)
§ 9-3 连续工作方式电动机额定功率的选择	(288)
§ 9-4 短时工作方式电动机额定功率的选择	(295)
§ 9-5 断续周期性工作方式电动机额定功率的选择	(297)
§ 9-6 鼠笼式异步电动机允许小时接通次数	(299)
§ 9-7 选择电动机额定功率的实用方法	(300)
小 结	(301)
思考题	(302)
习 题	(303)
习题答案	(305)
参考书目	(310)

绪 论

§ 0-1 电机及电力拖动在国民经济中的作用

电机是利用电磁作用原理工作的机械,电机的功能是进行机电能量(或信号)的转换和传递。电机按其用途不同可以分为发电机、电动机、变压器和控制电机四类。发电机是将机械能转换为电能,将机械能转换为直流电能的为直流发电机,将机械能转换为交流电能的为交流发电机,现代工业、农业、交通运输、科学技术、邮电通讯和日常生活等各个方面广泛应用的电能,几乎全部是由火电厂或水电站的交流发电机所发出的交流电能。电动机将交流或直流电能转换为机械能,用作拖动各种生产机械的动力,是国民经济各部门应用最多的动力机械,也是最主要的用电设备,各种电动机所消耗的电能占全国总发电量的60%以上。变压器是将一种电压的交流电能转换为另一种电压的交流电能,由于发电机发出的电压受绝缘材料和结构的限制,最高只能是27kV左右,进行远距离输电时,输电线路上将产生较大的电压降落和能量损耗,输电质量和经济性都无法保证,为此,在电厂或电站,需用变压器将电压升高,使输送功率不变的情况下输电线路中的电流明显减小,以求输电的经济,在用电中心和用电单位,再用变压器将电压降低到用电设备的电压等级,以求用电的安全。控制电机主要用于信号的变换与传递,在自动控制系统中作为多种控制元件使用,除国防工业应用较多以外,新兴的数控机床、计算机外围设备、机器人和音像设备等均需应用大量控制电机。

电力拖动是指用电动机作为原动机拖动各种生产机械,例如金属切削机床、轧钢机、风机、水泵、起重机械和电力机车等。生产机械的运动部件可以归纳为传动机构和工作机构两部分,传动机构的作用是将电动机输出的机械能传递给工作机构,根据需要,传动机构还能改变转速和运动方式,最常见的有齿轮、涡轮蜗杆和卷筒—钢丝绳等。工作机构是指生产机械中直接进行工作的部分,例如车床的主轴、刨床的工作台、电梯的轿箱和轧钢机的轧辊等。早期的电力拖动采用单电动机拖动方式,即一台生产机械用一台电动机作为总的动力,再通过传动机构将动力分配到各个工作机构上去,带动各个工作机构协调工作,单电动机拖动方式的电气控制线路简单而机械结构比较复杂,维修麻烦,传动精度较差;现代的电力拖动大都采用多电动机拖动方式,即在同一台生产机械上,不同的工作机构采用多台电动机分别单独拖动,例如桥式起重机的大车、小车、主钩、辅钩均由各自独立的电动机拖动;A系列龙门刨床的各个工作机构分别用10台电动机单独拖动。多电动机拖动方式的电气控制线路复杂,机械结构简单,维修省事,控制方便且精度较高。电力拖动比起其他拖动方法(例如风力拖动、水力拖动、内燃机拖动等)具有许多无法比拟的优点,最主要的优点是启动、调速、制动、反转等都比其他方法容易实现,而且可得所需的静态特性和动态特性,特别是数控技术和电子计算机技术的应用,进一步提高了电力拖动的性能指标,使采用电力拖动时的生产率和产品质量进一步提高,为生产过程的自动化提供了十分有利的条件。

电能是国民经济中应用最为广泛的能源,而电能的产生、传输、分配和使用等各个环节都依赖于各种各样的电机;电力拖动是国民经济各部门中采用最多最普遍的拖动方式,是生

产过程电气化、自动化的重要前提。由此可见,电机及电力拖动在国民经济中起着极其重要的作用。

§ 0-2 本课程的性质、任务、内容和特点

“电机及电力拖动基础”是工业电气自动化专业的重要专业基础课之一,在整个专业教学计划中起承上启下的作用,它是“数学”、“物理学”和“电路与磁路”的后续课程,又是“控制理论”、“电力拖动自动控制系统”和“工厂电气控制设备”等专业课的先导课程。

“电机及电力拖动基础”课程的任务是使学生掌握各种电机和变压器的基本结构、工作原理和主要特性,并掌握各种电动机起动、调速、制动和反转的各种方法、原理、优缺点和适用场合;培养电机及电力拖动方面分析问题、解决问题的能力,包括一定的计算能力;学习测试各种电机、变压器的性能和参数的基本方法,进行实验技能的训练,为学习后续课程和今后的工作创造必要的条件。

本课程的内容包括:直流电机、直流电动机的电力拖动、变压器、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、单相异步电动机和三相同步电动机、控制电机和电力拖动系统电动机的选择,一共9个部分。

本课程的特点是理论性强、实践性也强。分析电机与电力拖动的工作原理要用电学、磁学和动力学的基础理论,既要有时间概念,又要有空间概念,所以理论性较强;而用理论分析各种电机和电力拖动的实际问题时,必须结合电机的具体结构、采用工程观点和工程分析方法,除要掌握基本理论以外,还应注意培养实验操作技能和计算能力,所以实践性也较强。鉴于以上原因,学习本门课程应该特别注意理论联系实际。

§ 0-3 本课程常用的电磁定律与公式

一、电路定律

各种电机、变压器内部均有电路,电路中各物理量之间的关系符合欧姆定律和基尔霍夫第一、二定律。

1. 欧姆定律

流过电阻 R 的电流 I 的大小与加于电阻两端的电压 U 成正比,与电阻 R 的大小成反比。对直流电路的公式为

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = IR, \quad R = \frac{U}{I}$$

对于正弦交流电路,电阻 R 改为阻抗 Z ,电压与电流以复数有效值表示,公式为

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} \quad \text{或} \quad \dot{U} = \dot{I} Z, \quad Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$$

2. 基尔霍夫第一定律(电流定律)

对电路中任意一个节点,电流的代数和等于零。对直流电路的公式为