



普通高等教育“十三五”创新型规划教材
理论+实践+数字资源一体化规划教材

紧扣教学大纲，突出重点
强化应用能力，迁移拓展
支持教学做考，立体资源

主审 魏平俊
主编 王新掌 朱 军

电机与拖动

DIANJI

YU TUODONG



电子科技大学出版社



普通高等教育“十三五”创新型规划教材
理论+实践+数字资源一体化规划教材

主审 魏平俊
主编 王新掌 朱 军
常州大学图书馆藏书章

电机与拖动

◀ DIANJI

◀ YU TUODONG



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动 / 王新掌, 朱军主编. —成都: 电子

科技大学出版社, 2016.8

ISBN 978-7-5647-3590-6

I. ①电… II. ①王… ②朱… III. ①电机②电力传

动 IV. ①TM3③TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 089714 号

电机与拖动

主 编 王新掌 朱 军

出 版: 电子科技大学出版社(成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 杜 倩

责任编辑: 万晓桐

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 天津市蓟县宏图印务有限公司

成品尺寸: 203mm×260mm 印张 17.5 字数 430 千字

版 次: 2016 年 8 月第一版

印 次: 2016 年 8 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-3590-6

定 价: 36.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

前言 PREFACE

本教材是在电子科技大学出版社组织的普通高等教育“十三五”创新型规划教材编写会议精神的指导下,为适应普通高等教育的“产学研、校企合作”的要求,着力贯彻以“强应用”为目的、以“必需、够用”为度的编写特色的基础上编写而成的。本教材在编写过程中既注意学习、吸收有关院校近期力学教学内容改革的成果,又尽量反映编者长期从事教学所积累的经验 and 体会,更加注重与实践相结合。

本书包括“电机学”和“电力拖动基础”两门课程的主要内容,合并为《电机与拖动》,总学时数为 60~70 学时,根据具体教学要求可以取舍相应内容。

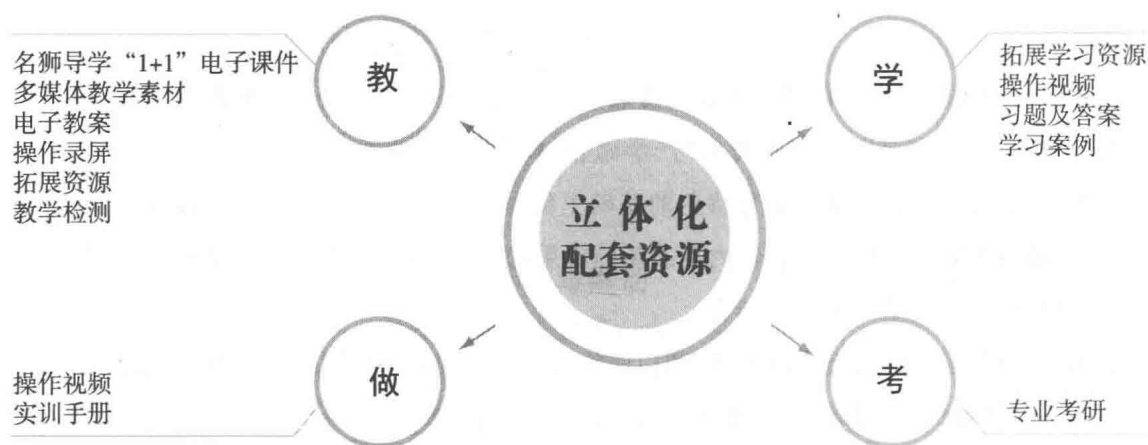
全书内容包括:电机与电力拖动基础知识、变压器、异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步电机、直流电动机、直流电动机的电力拖动、电力拖动系统中的电机选择和控制电机。涵盖了电机学、电力拖动和控制电机三门课程的基本教学内容,主要包括电机的工作原理、基本结构和运行特性以及拖动系统中电动机的启动、调速、制动和电动机的选择等内容。

本书在编写过程中,按照教学大纲的要求,本着以培养高素质专业人才为出发点,在保证基础知识、理论深度和强化实践应用的前提下,同时也考虑了后续课程对本课程的要求,以便更好地为专业培养目标服务,在内容的选择和问题的阐述方面作了一些新的探索。(1)在教学内容上,在电机理论部分强化了电路和磁路之间的关系及内在联系,本科阶段变压器和电机的学习主要是将其磁路转化成相应的电路形式来进行研究;(2)在章节编写方面将变压器、交流电机及其拖动放在一起学习,它们自成一个系统,接着再学习直流电机及其拖动和控制电机;(3)为学好电机和变压器,强调了必须熟练掌握它们的磁场分布、磁动势平衡方程、电压方程、电流方程和转矩平衡方程等知识;(4)强调了直流电机和交流电机磁场的区别,特别是着重分析了交流电机旋转磁场的形成过程;(5)在电力拖动方面强调了负载与电机的匹配问题,先确定负载的功率、转速要求、工作制形式等,然后依此选择电机的种类和功率。

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,将启发式教学和探究性自主学习式教学思想融入教材中,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。总之,力求做到叙述和分析问题简明、概念清晰和突出重点。

为了便于学生对概念的理解,提高分析和解决问题的能力,本书在学习训练方面作了调整和充实,设有例题、思考题和练习题等内容,突出了重点和难点。为给教师和学生自主学习提供完整的教学资源,最大限度地满足教学需要,还编写和制作了与本书配套的多媒体教学课件,从而形成了较为完整的立体化教学系统。

Ⅰ 丛书立体化配套资源



本教材由河南理工大学电气工程与自动化学院王新掌和朱军任主编,其中绪论、第一章的前两节、第二章、第三章、第五章和第六章由王新掌编写,第一章后两节、第四章、第七章、第八章和第九章由朱军编写。

全书由承蒙魏平俊主审,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,对此表示衷心的感谢。

在编写过程中,参考了一些国内外的著作和文献,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

目录 CONTENTS

绪 论	1
0.1 电机与电力拖动技术发展概况	1
0.2 电机与电力拖动的一般分析方法	3
0.3 课程的性质和任务	4
0.4 本教材的内容安排	4
0.5 课程学习方法建议	4
第 1 章 电机与电力拖动的基础知识	6
1.1 电机的分类及其基本功能	7
1.2 磁路基本知识	7
1.3 电力拖动基础	18
第 2 章 变压器	31
2.1 变压器的基本结构、分类和额定值	33
2.2 变压器的工作原理	37
2.3 变压器的等效电路和向量图	44
2.4 标么值	48
2.5 变压器的参数测定	50
2.6 变压器的工作特性	53
2.7 三相变压器及其联结组	57
2.8 三相变压器的并联运行	60
2.9 特殊变压器	61

第 3 章 异步电动机	71
3.1 三相异步电动机的基本结构与工作原理	73
3.2 三相交流异步电动机的绕组	79
3.3 三相交流绕组的磁动势	83
3.4 三相交流绕组的感应电动势	85
3.5 三相异步电动机的等效电路	86
3.6 三相异步电动机的功率和转矩	91
3.7 异步电动机的工作特性和参数测定	97
3.8 单相异步电动机	100
第 4 章 三相异步电动机的电力拖动	107
4.1 三相异步电动机的机械特性	108
4.2 三相异步电动机的起动	114
4.3 三相异步电动机的调速	127
4.4 三相异步电动机的制动	139
4.5 异步电动机的各种运行状态	147
第 5 章 同步电机	151
5.1 同步电机的基本结构和额定值	153
5.2 三相交流同步发电机的工作原理	158
5.3 三相交流同步发电机的稳态分析	160
5.4 三相交流同步发电机的功率和转矩	165
5.5 同步电抗、定子漏抗和电枢等效磁动势的测定	168
5.6 三相交流同步发电机的运行特性	171
5.7 三相交流同步发电机的并联运行	172
5.8 三相交流同步补偿机	178
5.9 三相交流同步发电机的不对称运行	178
5.10 三相交流同步发电机的三相突然短路	179
第 6 章 直流电机	184
6.1 直流电机的工作原理	186
6.2 直流电机的基本结构、励磁方式和额定值	188
6.3 直流电机的电枢绕组	192
6.4 直流电机磁场和电枢反应	197
6.5 直流电机的感应电动势和电磁转矩	199
6.6 直流电动机的运行分析	200
6.7 直流发电机的运行分析	204

第 7 章 直流电动机的电力拖动	213
7.1 他励直流电动机的机械特性	214
7.2 他励直流电动机的起动和反转	219
7.3 他励直流电动机的调速	223
7.4 他励直流电动机的制动	226
7.5 他励直流电动机的四象限运行	233
第 8 章 电力拖动系统中电动机的选择	236
8.1 电动机选择的基本原则	238
8.2 电动机的发热与冷却	242
8.3 电动机的工作制	244
8.4 电动机额定功率的选择	246
8.5 电动机的经济运行	253
第 9 章 控制电机	255
9.1 伺服电动机	256
9.2 步进电动机	259
9.3 测速发电机	262
9.4 自整角机	264
参考文献	270

绪 论

0.1 电机与电力拖动技术发展概况

在国民经济各部门中,广泛地使用着各种各样的生产机械,目前拖动生产机械的原动机一般都采用电动机,这种以原动机来拖动生产机械的拖动方式称为“电力拖动”。电力拖动之所以得到广泛应用,是因为它具有许多优点。

(1)电动机是一种将电能转变为机械能的电机,而电能具有许多宝贵的特点,它能够以很小的损失输送很远的距离,而且在使用电能的地方,电能分配也非常简便;

(2)电动机的种类和类型繁多,可以充分地满足各种不同类型的生产机械对原动机的要求;

(3)电动机的控制方法简便,并且可以实现遥控和自动控制。

电力拖动系统主要由电动机、传动机构、电源、控制设备和生产机械组成。

电机是电动机和发电机的统称,它是一种将电能转换成机械能或机械能转换成电能的电磁装置。电机是随着生产的发展而发展的,反过来,电机的发展又促进了社会生产力的不断提高。

1.电机的发展历程

大致可分成三个阶段:直流电机的产生和形成、交流电机的形成和电机理论、设计和制造工艺逐步完善。

(1)直流电机的产生和形成

1821年英国科学家法拉第发现了载流导体在磁场中受力的现象,并于1831年又发现了电磁感应定律。1834年德国的雅可比发明了直流电动机,1870年比利时工程师格拉姆发明了直流发电机,与此同时,德国的西门子接着制造了性能更好的发电机,并着手研究由电动机驱动的车辆,1879年西门子公司制成了3马力的电机车,后来美国发明大王爱迪生试验的电机车已达12~15马力,但当时的电动机全是直流电机,只限于驱动电车。

1873年海夫纳·阿尔泰涅克发明了鼓形电枢绕组,采用开槽结构,将绕组的有效部分放入槽内。1880年,爱迪生提出采用叠片铁芯,以减少4铁芯损耗、降低电枢绕组的温升。鼓形电枢绕组、电枢开槽和叠片结构,一直沿用至今。1884年,出现了换向极和补偿绕组。1885年开始使用炭粉做电刷。

1886年,霍普金生兄弟确立了磁路的欧姆定律。1891年,阿尔诺特建立了直流电枢绕组理论,这些理论使直流电机的设计和计算建立在更为科学的基础上。直到19世纪90年代,直流电机已具备现代直流电机的主要机构特点。

(2)交流电机的形成

法国人皮克希应用电磁感应原理制成了最初的交流发电机,西门子公司的阿特涅于1873年发明

了交流发电机;1888年克罗地亚出生的美籍发明家特斯拉发明了两相交流电动机,它根据电磁感应原理制成,又称感应电动机;1889年,伟大的俄国天才工程师多利沃-多布罗沃利斯基设计并制出了三相感应电动机;1902年瑞典工程师丹尼尔森首先提出同步电动机构想。

1893年左右,开耐莱和司坦麦茨开始用向量来分析交流电路;1894年,海兰特发表了“多相感应电动机和变压器的图解确定法”的论文,它是感应电机理论中的第一篇经典论文;同年,弗拉利斯采用脉振磁场分解两个大小相等、旋转方向相反的磁场的方法来分析单相感应电动机,这种方法就是双旋转磁场理论;1894年前后,波梯建立了交轴磁场理论;1899年,在研究凸极同步电动机的电枢反应时,勃朗台尔提出双反应理论,此理论是分析凸极电机的基础。

(3) 电机理论、设计和制造工艺逐步完善

由于逐渐采用氢冷、氢内冷、油冷和水冷却等冷却方法,大容量发电机和电动机不断出现,目前,汽轮发电机的单机容量已超过1000MW。1918年,福提斯古提出了求解三相不对称问题的一般方法即对称分量法,使不对称运行时交流电机内部的物理情况得以搞清楚,并使同步电机和感应电机的分析方法初步统一。1926—1930年,道赫提和聂克尔导出了凸极同步电机的稳态电压方程和向量图,直轴和交轴同步电抗,稳态和瞬态时同步电机的功角特性,以及三相和单相突然短路时的短路电流,初步建立起同步电机稳态和瞬态分析的理论和计算方法,同时许多学者研究并提出了电枢漏抗、同步电抗和直轴瞬态电抗的计算公式和测定方法,为同步电机稳态和瞬态参数的计算确立了基础。1929年派克发表了“同步电机的双反应理论——通用分析方法”的经典论文,使交流电机的瞬态分析理论得以建立。

1920—1940年,许多学者对双笼和深槽电机的理论和计算方法,谐波磁场所产生的寄生转矩及其削弱,感应电机的噪声等问题进行了一系列的研究,使感应电机的运行性能得到明显提高。

20世纪40年代前后,自动控制寄生得到很大的发展,此时出现了一系列新的控制电机,如交流测速发电机、自整角机、伺服电动机和旋转变压器等。

1954年,学者提出空间矢量法,并导出旋转坐标系中感应电机的空间矢量电压方程,为后来感应电机速度和转矩的矢量控制打下了基础,同一时期,还提出用频率法来分析和求解交流电机的各种瞬态过程和非正常运行情况,它为交流电机的瞬态分析做出了新贡献。

1965年后,计算机逐步被引入电机工程的各个领域,各种电机内的磁场分布,参数的不饱和及饱和值,以及电机内三维温度场的分布等都可以用计算机得到数值解。

20世纪70年代,由于大电流晶闸管的发展,出现了便于控制、体积小、噪声小的大容量直流电源,从而使直流电动机良好调速性能得以进一步发挥。使用由电力电子器件所构成的变频器作为交流电动机的调频电源,可使感应电动机和同步电动机得到平滑、宽广的调速,并具有较高的效率,从而改进了交流电动机的调速性能。1971年,学者提出模仿直流电机转矩的控制规律,利用坐标变换理论,将交流电机的磁场解耦,提出交流电机的“矢量变换控制”,加上电力电子技术的发展,使交流电动机的速度和转矩控制技术发生了一次飞跃。

20世纪80年代以后,由于永磁材料、电力电子和自动控制技术的发展,使永磁无刷电机和开关磁阻电机等新型电机得到较快的发展。

未来,电机发展趋势为:(1)向高性能、轻薄短小化、永磁化、无铁芯化、无刷化、机电一体化、智能化和组合化方向发展;(2)向多用途、多品种和多适应性方向发展;(3)向小型化、精细化,减少材料使用量、节能、高效和优质的中小型电机等方向发展;(4)向低速电机、高速电机、高温超导电机、超声波电机、直线电机、伺服电机、防爆电机、轨道交通牵引电机和磁悬浮电机等方向发展。

2. 电力拖动的发展历程

电力拖动系统大致经历了3个阶段。

(1) 成组拖动系统: 一台电动机通过天轴及机械传动系统带动整个车间的生产机械。它具有能量损耗大、生产率低、劳动条件差等特点, 容易出事故, 一旦电动机发生故障, 成组的生产机械将停车, 甚至整个车间的生产都可能停下来。

(2) 单电动机拖动系统: 一台电动机拖动一台生产机械系统。它省去了大量的中间传动机构, 使机械结构大为简化, 提高了传动效率, 增强了灵活性, 可以更好地满足生产机械的要求。

(3) 多电机拖动系统: 一台生产机械中的每一个工作机构分别由一台电动机拖动。它大大简化了生产机械的机械结构, 可以使每一个工作机构各自采用最合理的运动速度, 进一步提高了效率。如龙门刨床、铣床等都是多电机拖动系统。

随着生产的发展, 不断对拖动系统提出新要求, 如要求提高加工精度和工作速度, 要求快速启动、制动和逆转, 实现很宽范围内的调速和整个生产过程的自动化等, 这就需要有一整套自动控制设备组成的“自动化的电力拖动系统”。

0.2 电机与电力拖动的一般分析方法

1. 分析和求解电机问题的一般方法

分析和求解电机问题的一般方法有以下两种。

(1) 从场的角度以微观方式研究电机。用有限元法和有限差分法等数值计算的方法求解电机内的电场、磁场、温度场、流场和应力场等物理量的分布。研究生阶段采用此种方法。

(2) 从路的角度以宏观方式研究电机。将磁场量转换成电路量, 如将磁阻、磁导转换成电抗建立等效电路模型、电压方程、电流方程、转矩平衡方程、能量平衡方程和向量图等, 然后研究电机的运行情况。因为从路的方面研究电机比较简单, 所以本科阶段主要从路的方面来研究电机。

研究电机问题的基本步骤如下:

- ① 建立电机的物理模型, 赋予各量参数;
- ② 先分析电机空载, 再分析电机负载情况;
- ③ 分主磁通和漏磁通进行研究, 其中, 主磁通是非线性的, 漏磁通近似是线性的;
- ④ 分析清楚电机磁场分布情况, 从磁饱和及不饱和两种情况分析;
- ⑤ 将电机的磁路转换成电路形式, 应用折算的方法计算出二次端折算到一次端的电压、电流、电阻、电抗和阻抗值, 列出变压器和交流电机的基本方程, 据此画出它们的等效电路模型和向量图;
- ⑥ 利用得到的基本方程和等效电路, 研究电机的工作特性、效率等性质。

分析同步发电机的不对称情况时, 还用到对称分量法和双反应理论; 分析直流电机绕组时, 主要关注转子绕组; 分析交流电机绕组时, 主要关注定子绕组; 分析交流电机的磁动势时, 要分单相、两相和三相分别研究。

2. 分析和求解电力拖动问题的一般方法

分析和求解电力拖动问题时, 需要从下列几个方面着手:

- (1) 先分析负载, 搞清楚负载的额定功率、转矩要求、工作制和转速要求等, 分清楚负载属于恒转矩

负载、恒功率负载还是通风机、泵类负载；

(2) 根据负载情况,选择电机的类型、电机的额定功率、电压等级、电机的转速、电机的结构形式、安装形式、电机的型号等参数;

(3) 选择好电机类型后,分析电机的固有机特性、人为机械特性、实现电机的起动和反转的方法、电机的调速方法和电机的制动方法,从中确定该系统具体采用的起动和反转方法、调速方法和制动方法;

(4) 结合负载和电机,组成电机和负载匹配的电力拖动系统。

0.3 课程的性质和任务

电机与电力拖动是电气工程及其自动化专业的一门专业基础课,它需要先学习高等数学、大学物理、复变函数、电路理论和电磁场等课程之后,才能学习的一门课程,该课程又为学习自动控制理论、自动控制系统、发电厂电气部分和电力系统分析等课程奠定了基础,起到承上启下的作用。

学习完本课程后应达到下列要求:

- (1) 掌握常用交、直流电机及变压器的基本理论;
- (2) 掌握电机的工作原理、主要性能和用途;
- (3) 掌握分析电动机的机械特性和各种运转状态的基本理论;
- (4) 掌握电力拖动系统中电动机调速方法的基本原理和技术经济指标;
- (5) 掌握选择电动机的原则和方法;
- (6) 掌握电机的基本实验方法与技能,并具有熟练的运算能力;
- (7) 了解电机与电力拖动今后的发展方向。

0.4 本教材的内容安排

本教材依照下列顺序内容进行讲解:绪论、电机与电力拖动的基础知识、变压器、异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步电机、直流电机、直流电动机的电力拖动、电力拖动系统中电动机的选择和控制电机。电机与电力拖动的基础知识讲解了一些基础知识,特别强调怎样由磁场向电路转变的方法;变压器、异步电机和同步电机都属于交流部分,它们自成一个小系统,故安排到一起讲解;分析完交流部分进入直流电机及其拖动系统;接着分析电力拖动系统中电动机的选择,这一部分相对重要,它关系到电力拖动系统能否正常运转,能否匹配,它是学习电机与电力拖动的核心内容;最后介绍控制电机,学时较短,可以作为自学内容。

0.5 课程学习方法建议

本课程既具有较强的理论性,又有一定的工程性。分析各种电机的原理和运行特性时,不但涉及电压、电流随时间变化,还要涉及磁动势和磁场在空间的分布和变化;不但涉及定子、转子绕组间的电

磁耦合关系和机电关系,还要涉及转子与原动机(或机械负载)之间的动力学关系。鉴于上述情况,学习本课程时需注意以下几点。

(1)首先要弄清楚各种电机的基本结构,主要部件的作用和构成。因此需要到电机实验室、电机厂实地参观或通过观察电机图片和视频等途径,对实物建立初步印象。

(2)在分析电机和变压器的空载和负载时,要注意主磁场、电枢磁场和漏磁场在电机内是如何分布的,合成磁场是如何形成的,各种磁通的作用是如何表达的。

(3)注意推导基本公式(电动势公式、磁动势公式、电磁转矩公式和电压电流公式)和基本方程时有哪些假设;推导时用了哪些基本电磁定律、力学定律和原理等。自己要会独立推导一遍重要公式,找出其中的关键点。

(4)要注意磁场参量怎样转换成电路参量。

(5)注意变压器和交流电机的相似性,分析方法的异同性;注意直流电机换向的重要性;注意同步发电机中隐极和凸极电机的分析方法的不同性,分析同步发电机不对称时,采用的对称分量法的重要性。

(6)建立电力拖动系统时,首先分析负载情况,根据负载参数确定电机种类、电压等级等量,以保证系统的稳定性。

(7)要学会总结知识点,多做习题,勤动脑筋,将磁场分布、向量图等深深地映入脑中。

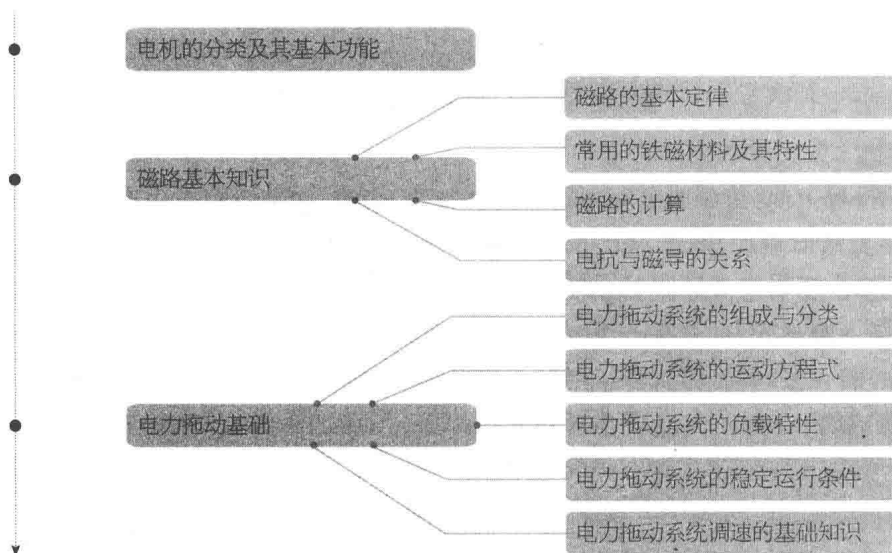
第1章 电机与电力拖动的基础知识

【知识目标】

1. 熟练掌握磁路基本定律；
2. 熟悉铁磁材料的磁化、常用铁磁材料和铁芯损耗；
3. 掌握电抗与磁导之间的关系；
4. 掌握电力拖动系统的组成，电力拖动系统的运动方程式、负载特性、稳定运行条件；
5. 熟悉调速的基础知识。

【能力目标】

1. 能够利用磁路基本定律解决磁路问题；
2. 能够将磁路转化成电路；
3. 会建立电力拖动系统的运动方程式，并分析其稳定运行条件。



1.1 电机的分类及其基本功能

电机在各个领域内都得到了广泛的应用,种类繁多,性能各异,分类方法也很多,各种分类方法未必涵盖所有电机,主要有下列两种常用的分类方法。

第1种,按照电机在能量转换和信号传递中所起的作用,电机可分为下列几类。

(1)发电机:将机械功率转换成电功率。

(2)电动机:将电功率转换成机械功率。

(3)变压器、变流器、变频机和移相器:将一种形式的电能转换成另一种形式的电能。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,如将交流电变为直流电;变频机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。

第2种,按照电机的结构特点及电源性质的不同,电机可分为下列几类。

(1)静止电机:变压器。

(2)旋转电机:包括直流电机和交流电机,交流电机又可分为同步电机和异步电机。其中电流为直流的电机称直流电机;电流为交流电的电机称为交流电机;同步电机是交流电机的一种,其转子的转速和定子磁场的转速相同,主要用于发电机;异步电机也是一种交流电机,其转子的转速与定子磁场的转速不相同。

1.2 磁路基本知识

1.2.1 磁路的基本定律

1. 磁路

磁通(磁力线)通过的路径称为磁路。磁路分为直流磁路和交流磁路。若励磁电流为直流,磁路中的磁通恒定,不随时间而变化,这种磁路称为直流磁路,如直流电机中的磁路便是直流磁路;若励磁电流为交流,磁路中的磁通随时间变化而变化,这种磁路称为交流磁路,如变压器和交流电机中的磁路便是交流磁路。

2. 磁路的基本定律

分析和计算磁场时,常用到两个基本定律:一个是安培环路定律,另一个为磁通连续性定律,由这两个定律又可得到磁路的欧姆定律、磁路的基尔霍夫第一和第二定律。

(1) 安培环路定律

沿着任何一条闭合路径 L , 磁场强度 H 的线积分值 $\int_L H \cdot dl$ 等于该闭合路径所包围的所有电流

值的代数和,这便是安培环路定律,如式(1-1)所示。

$$\int_L H \cdot dl = \sum i \quad (1-1)$$

式中,若电流的正方向与闭合路径 L 的环行方向符合右手螺旋关系, i 取正号,否则取负号,如图 1-1 所示, i_1 和 i_2 的正方向向上,取正号; i_3 的正方向向下,取负号,故有 $\int_L H \cdot dl = i_1 + i_2 - i_3$ 。

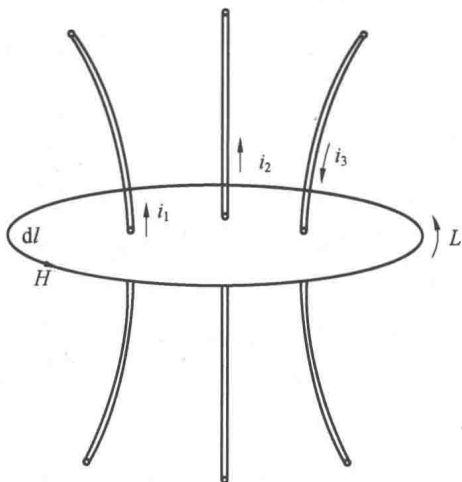


图 1-1 安培环路定律

(2) 磁路的欧姆定律

具有铁芯的磁路如图 1-2 所示,铁芯上绕有 N 匝线圈,线圈中通有电流 i ,铁芯截面积为 A ,磁路的平均长度为 l ,铁芯的磁导率为 μ 。若不考虑漏磁通,即认为磁通都被约束在铁芯内,并认为各截面内的磁场均匀分布, B (或者 H) 的方向总是沿着回线的切线方向且大小处处相等,此时式(1-1)可以简化为

$$Ni = Hl \quad (1-2)$$

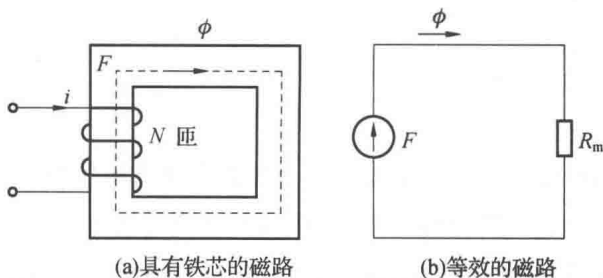


图 1-2 不带分支具有铁芯的磁路

由于在各截面内的磁感应强度 B 都均匀分布,且垂直于各截面,故有

$$\phi = \int_A B \cdot da = BA \quad (1-3)$$

又有

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

式(1-2)可以写成

$$Ni = \frac{B}{\mu} l = \phi \frac{l}{\mu A} \quad (1-5)$$

或者

$$F = \phi R_m \quad (1-6)$$

式中, $F = Ni$ 为作用在铁芯磁路上的安匝数, 称为磁路的磁动势, 单位为 A, 磁动势的方向与线圈电流的方向之间符合右手螺旋关系(如图 1-2(a) 中所示); R_m 称磁阻, $R_m = \frac{l}{\mu A}$, 单位为 A/Wb, 磁阻的倒数称磁导, 用 Λ_m 表示, $\Lambda_m = \frac{1}{R_m}$, 单位为 Wb/A。

式(1-6)表示作用在磁路上的磁动势 F 等于磁路内的磁通量 ϕ 乘以磁阻 R_m , 此关系称为磁路的欧姆定律。 F 比拟为电路中的电动势 E , 磁通量比拟为电路中的电流 i , 磁阻 R_m 比拟为电路中的电阻, 图 1-2(b) 为相应的等效磁路图。

(3) 磁通连续性定律

穿过任一闭合面的总磁通量恒等于零, 这就是磁通连续性定律, 其数学表达式为

$$\oint_A B \cdot da = 0 \quad (1-7)$$

式中, da 的正方向规定为闭合面的外法线方向。

(4) 磁路的基尔霍夫第一定律

若铁芯磁路是带有并联分支的磁路, 如图 1-3 所示, 中间的铁芯柱上加有磁动势 F 时, 磁通的路径将如图 1-3 中虚线所示, 令穿出闭合面 A 的磁通为正, 进入闭合面的磁通为负, 根据磁通连续性定律有

$$-\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0 \quad (1-8)$$

或

$$\sum \phi = 0$$

该定律称为磁路的基尔霍夫第一定律, 比拟于电路中的基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$ 。

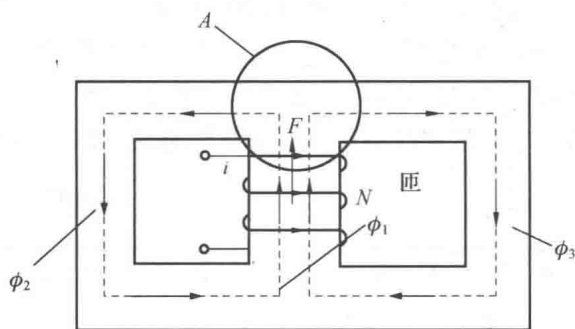


图 1-3 带有并联分支的磁路

(5) 磁路的基尔霍夫第二定律

作用在任何闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁路磁位降的代数和, 该定律称为磁路的基尔霍夫第二定律。如图 1-4 所示, 根据安培环路定律有

【注意】

铁磁材料的磁导率 μ 不是一个常数, 由铁磁性材料构成的磁路, 其磁阻也是随着磁通密度的变化而变化, 因此磁路中的磁通量 ϕ 不是随着磁动势 F 的增大而正比增大, 即它们之间是非线性关系, 磁路也是非线性的。