

电机在国民经济中起着举足轻重的作用。它以电磁场作为媒介将电能转变为机械能,实现旋转或直线运动(这种类型的电机又称为**电动机**);或将机械能转变为电能,给用电负荷供电(这种类型的电机又称为**发电机**)。因而,电机是一种典型的机电能量转换装置。

电机的种类繁多,除了传统的直流电机、交流电机(异步和同步)以及功率在 1kW 以下的驱动微电机之外,还有一类是以实现信号转换为目的的电机,这类电机又称为控制电机。控制电机包括:伺服电机、测速发电机、力矩电机、旋转变压器、自整角机、直线电机以及超声波电机等。

采用电机作为动力源拖动生产机械运动,由此组成的系统即为**电力拖动系统**,有时又称为**电气传动**(electric drive)系统。随着相关技术的发展,电力拖动系统的功能也越来越完善。它不仅可以实现生产机械的速度调节(相应的系统又称为**调速系统**),而且可以实现位置的跟踪控制(相应的系统又称为**位置伺服系统**或**随动系统**)以及力或加速度的控制(相应的系统又称为**张力控制系统**)。实现上述功能的电力拖动系统称为**运动控制系统**(motion control system)。

0.1 电机与电力拖动技术的发展概况

1. 电机与电机学的发展概况

迄今为止,电机的问世与电机理论的发展已有一个多世纪的历史。1820 年前后,法拉第(Faraday)发现了电磁感应现象并提出了电磁感应定律,组装了第 1 台直流电机样机;1829 年亨利(Henry)制造了第 1 台实用的直流电机;直至 1837 年,直流电机才真正变为商业化产品。1887 年特斯拉(Tesla)发明了三相异步电动机。此后,其他各种类型的电机相继问世。各类电机无论在结构材料上、特性上,还是在运行原理上都存在较大差异。应该讲,各类电机的采用,标志着以煤和石油为主要能源体系的电气化时代的开始,从而为现代工业奠定了基础。作为机

电能量转换装置,电机既可以作为电动机用于电气传动,也可以作为发电机用于发电。应该讲,迄今为止世界上几乎所有的电能都是通过同步发电机发出的,而所发出的大部分电能是通过电动机消耗的。

在当今工业和日常生活中,人们到处都可以找到电机的踪影。从以煤和石油为原料的火力发电厂中的汽轮发电机、以水资源为动力的水轮发电机、以风为动力的风力发电机,到高压输电、配电的变压器,从工厂的自动生产线、车间的机床、机器人到家庭中的家用电器甚至电动玩具等,电机几乎无处不在。

目前,电机制造业的发展主要有如下几大趋势:(1)大型化;单机容量越来越大,如60万千瓦及以上的汽轮发电机。(2)微型化;为适应设备小型化的要求,电机的体积越来越小,重量越来越轻。(3)新原理、新工艺、新材料的电机不断涌现;如无刷直流电机、开关磁阻电机、直线电机、超声波电机等。

随着电力电子技术、控制理论、可以实现各种软算法的微处理器技术、电气与机械信号的检测与数字信号处理技术以及永磁材料等方面的迅猛发展,电机领域也面临着前所未有的机遇与挑战。一方面这些技术和理论对电机领域的渗透和综合改变了传统电机采用固定频率、固定电压的供电模式,从而为各类电机提供了更加灵活的供电电源和控制方式,大大提高了电力拖动系统的动、静态性能;另一方面,也使得以符号法(仅处理正弦波)为基础的传统电机理论受到挑战。于是,能够建立各类电机数学模型的电机统一理论便应运而生。以此为基础,采用统一矢量变换理论的矢量控制技术在伺服系统和变频调速系统中得到广泛应用。这一迹象表明,电机理论与技术进入了一个全新的发展阶段。

2. 电力拖动系统的发展概况

从结构上看,电力拖动系统经历了最初的“成组拖动”(即单台电动机拖动一组机械)、“单电机拖动”(即单台电动机拖动单台机械)到“多电机拖动”(即单台设备中采用多台电动机)几个阶段。每一阶段生产机械所采用电机的数量有所不同。

从系统上看,电力拖动系统经历了最初仅采用继电器-接触器组成的断续控制系统,到后来普遍采用由电力电子变流器供电的连续控制系统两大阶段。连续控制系统包括由相控变流器或斩波器供电的直流电力拖动系统,以及由变频器或伺服驱动器供电的交流调速系统两大类。后者包括由绕线式异步电动机组成的双馈调速系统、由异步与同步电动机组成的变频调速与伺服系统等。

目前,随着电力电子技术、控制理论以及微处理器技术的发展,电力拖动系统的性能指标上也上了一大台阶。不仅可以满足生产机械快速起、制动以及正、反转的要求(即所谓的四象限运行状态),而且还可以确保整个电力拖动系统工作在具有较高的调速、定位精度和较宽的调速范围内。这些性能指标的提高使得设备的生产率和产品质量大大提高。除此之外,随着多轴电力拖动系统的发展,过去许多难以解决的问题也变得迎刃而解,如复杂曲轴、曲面的加工,机器人、航天器等

复杂空间轨迹的控制与实现等。

目前,电力拖动系统正朝着网络化、信息化方向发展。包括现场总线、智能控制策略以及因特网技术在内的各种新技术、新方法均在电力拖动领域中得到了应用。电力拖动的发展真可谓是日新月异。考虑到电力拖动系统是各类自动化技术和设备的基础,其理论与技术的发展必将对我国当前的现代化进程起到巨大的推动作用。

0.2 电机学与电力拖动系统的一般分析方法

电机本质上是一种借助于电磁场实现机电能量转换的装置,因此,对电机的分析自然涉及到有关电、磁、力、热以及结构、材料和工艺等方方面面的知识。对于以电磁作用原理进行工作的各类电机,常用的分析方法有两种:一种是采用电路和磁路理论的宏观分析方法;另一种是采用电磁场理论的微观分析方法。前者将电路和磁路问题统一转换为电路问题,然后利用电路的分析方法求解电机的性能;后者则首先利用有限元方法将整个磁路进行剖分,然后利用电磁场方程和边界条件求出各个微元的磁场分布情况,最后再获得整个电机的运行性能和结构参数。除此之外,也可以采用能量法,利用分析力学中的哈密顿(Hamilton)原理或拉格朗日(Lagrange)方程,建立电机的矩阵方程,最后再求解电机的运行性能和结构参数。鉴于本教材主要解决的是电机稳态性能的问题,故重点讨论路的分析方法。

在分析电机和拖动系统时,一般按如下几个步骤进行:

- (1) 先讨论电机的基本运行原理和结构。
- (2) 根据结构的具体特点,对电机内部所发生的电磁过程进行分析,重点讨论电机内部的电路组成(或绕组结构)和空载或负载时电机内部的磁势和磁场情况。
- (3) 利用基尔霍夫定律、电磁感应定律、安培环路定理、电磁力定律,并根据电机内部的电磁过程,写出电磁过程的数学描述即基本方程式,如电压平衡方程式、磁势平衡方程式和转矩平衡方程式,并将其转变为等效电路和相量图的表达形式。
- (4) 利用上述数学模型对电机的运行特性和性能指标进行分析计算。在各种稳态特性中,以电动机的机械特性和发电机的外特性最为重要。
- (5) 根据电动机所提供的机械特性和负载的转矩特性讨论各类拖动系统的稳定性、起制动特性、各种调速方案的特性。
- (6) 讨论电动机的各种运行状态以及四象限运行情况。

在分析电机内部的电磁过程并建立数学模型时,经常用到下列方法和理论:

- (1) 当忽略铁心饱和时,经常采用叠加原理对电机内部的气隙磁势、气隙磁场、气隙磁场所感应的电势进行分析计算。当考虑铁心饱和时,则把总磁通分为

主磁通和漏磁通进行处理。主磁通流经主磁路、而漏磁通则流经漏磁路,相应的磁路性质可分别用励磁电抗和漏电抗来描述,从而可将磁路问题转变为统一的电路问题进行处理。

(2) 当交流电机(或变压器)的定、转子(或一次侧、二次侧)绕组匝数、相数以及频率不相等时,可以在保持电磁关系不变的前提下,利用折算法将其各物理量归算至绕组某一侧,然后再建立数学模型。

(3) 在对交流电机或变压器的稳态特性进行分析计算时,经常要用到符号法、基本方程式、等效电路以及相量图等工具。

(4) 在研究凸极电机(包括直流电机、凸极同步电机、开关磁阻电机等)的特性时,经常要采用双反应理论,即将各物理量分解到直轴和交轴上进行研究。

(5) 在非正弦磁场或非正弦电压的分析过程中,经常要用到谐波分析法,即将非正弦磁势(磁场)或电压利用傅里叶级数展开成一系列正弦谐波磁势(磁场)或谐波电压,然后再单独讨论各次谐波的效果。最终借助于叠加原理对系统的总响应进行求解。

(6) 在讨论多轴电力拖动系统时,经常要按照能量保持不变的原则将多轴系统等效为单轴系统进行处理。

上述各种方法和理论分散到各个章节中,相关章节将对其逐一进行介绍。

0.3 课程的性质与任务

众所周知,现有工业控制系统不外乎两大类:一类是运动控制系统,它主要涉及与动作类有关的被控对象,如机器人、机床类生产机械等;另一类是过程控制系统,它涉及到过程类的被控对象,如压力、流量、温度等的控制。而电机及其拖动负载,作为运动控制系统的执行机构和控制对象,在运动控制系统中占据着重要地位。就运动控制系统而言,只有了解和熟悉执行机构和被控对象的特点和规律,才能有效地设计控制策略,选择合适的控制回路和电力电子变流器,最终获得稳、准、快的系统性能。“电机与拖动”课程就是为了解决这一问题而为自动化类专业(包括工业和电气自动化)开设的一门专业基础课。它具有承前启后的作用,承前就是它需要掌握像“电路”、“电磁学”等基础知识,启后意味着它要为后续课程如“运动控制系统”(包括交、直流调速系统以及位置伺服系统)等服务,因此它是工业自动化专业及相关专业的重头课程。确切地讲,“电机与拖动”应该由两门课程组成:一门是“电机学”;另一门是“电力拖动基础”。前者内容涉及各种类型的电机结构、内部电磁过程及其数学描述、机械特性及外特性的分析与计算;后者涉及各种不同类型电机与不同类型负载的配合问题以及电机拖动不同负载的起、制动与调速性能等。对于如何具体确保起、制动和调速性能以及相关控制线路与系统则不属于本书的讨论范围。

0.4 本教材的结构、各章节内容与教学安排

本教材的内容主要包括三大部分：(1)传统电机学；(2)电力拖动基础；(3)微特电机。传统电机学部分的内容主要涉及一般电机(包括直流电机、变压器、异步电机与同步电机)的运行原理、电磁过程与描述以及基本特性的分析与计算；电力拖动基础部分则讨论了电力拖动系统的一般问题，其内容涉及由各类电机组成拖动系统的起动、调速以及制动的方法、分析与计算；在前两大部分内容上注意了电机与电力拖动知识的融合与统一问题。本教材将两部分内容穿插进行，应该讲，电机学与电力拖动部分内容各有分工。电机学更强调各类电机所能提供的外部特性(尤其是电动机的机械特性)，而电机的内部结构与电磁关系对外部特性仅起到了铺垫和辅助的作用。电力拖动部分则更强调电动机外部机械特性的应用。它包括电动机与机械负载的配合即稳定性问题、系统的起制动与调速方法的分析与计算等问题；微特电机部分则包括驱动微电机以及控制电机的工作原理与特性曲线。

本教材共分13章。根据多年教学经验，考虑到自动化专业的学生对有关电磁场理论和磁路知识的生疏，本书第1章作为预备知识首先对有关电路和磁路的基本物理量、基本电磁定律以及有关磁性材料的基本知识进行了简要回顾。而对有关电力拖动的基础知识则放在第3章即他励直流电动机的电力拖动中介绍，旨在即学即用。

从第2章开始则进入正题。首先对有关直流电机的基本运行原理、结构、电磁关系与数学描述(即基本关系式和等效电路)以及直流电机的特性特别是直流电动机的机械特性进行了详细讨论。本章最后对直流电机的特殊问题——换向进行了简要介绍。在直流电机的基本运行原理的介绍过程中注意了其与后面第10章无刷直流电机的对比，从而起到了前后呼应的作用。在本章教学过程中可适当删减有关直流电机电枢绕组展开图的知识，仅需通过简单绕组引出直流电枢绕组的特点即可，对有关换向问题也可点到为止。

考虑到课时有限，为节省教学课时应趁热打铁，在结束有关直流电动机内容后，直接进入直流电动机拖动的内容即第3章，并通过第3章引入电力拖动的基础知识与一般知识如电力拖动系统的动力学方程式、多轴拖动系统转动惯量的折算问题以及电力拖动系统的稳定性问题。在此基础上，再讨论有关他励直流电动机拖动系统的各种起制动与调速方法、分析计算以及四象限运行问题。

第4章内容则是考虑了目前直流拖动系统中广泛采用的结构：“变流器+直流电动机”。具体说来，其中的变流器包括由晶闸管组成的相控变流器和PWM直流变换器(或斩波器)。由于这两种供电方式所提供的电源具有脉动性质，导致直流电动机的电枢电流在轻载时出现断续，相应的机械特性呈现不同的特点。为

此,本章对其进行了专门讨论。考虑到本章内容有可能与其他课程如“电力电子技术”、“直流调速系统”有重叠,讲授时可根据本校其他课程的实际教学情况对本章内容进行选讲或不讲,学生可根据自己的情况进行自学。

第5章介绍了有关单、三相变压器的共同问题:基本工作原理、结构、电磁过程、数学模型以及特性的分析计算。对三相变压器的特殊问题如极性、组别问题以及由磁路结构与电路联结带来的空载电势波形问题,通过单独一节进行了讨论。本章最后对电力拖动系统中两类常用的变压器:自耦变压器与电压、电流互感器的运行原理和注意事项进行了简要说明。鉴于变压器与三相异步电机电磁作用机理的相似性,本章的主要分析方法和知识可以推广至下一章三相异步电机的分析过程中。

与第5章章节安排类似,第6章分别讨论了三相异步电机的基本工作原理、结构、电磁过程、数学模型以及特性的分析计算。所不同的是,三相异步电机的电磁过程较为复杂,它涉及到单相绕组通以单相交流电产生脉振磁场和三相定子绕组通以三相对称电流产生旋转磁场的问题。应该讲,这部分内容比较抽象,因而也是电机学中比较难以理解的部分。由于该部分内容是三相交流电机(异步与同步)的共同问题和运行基础,因此必须掌握基本结论。讲授时宜采用比喻的方法,使其形象化。对于交流绕组的内容可进行适当删减,以引出后面必要的结论为目的。本章中,三相异步电动机的机械特性应为重点内容。

同第3章一样,第7章也是在结束了有关三相异步电动机的内容之后,直接讨论了有关三相异步电动机电力拖动系统的各种起制动与调速方法、分析计算以及四象限运行问题,内容涉及生产实际中经常碰到的基本知识。本章为后续“交流调速系统”课程的基础,需重点讲授。

第8章介绍了同步电机的基本工作原理、结构、电磁关系、数学模型、特性的分析计算。除了掌握功率角的概念以及相量图的分析与计算外,本章应重点掌握的内容是两条曲线:一条是相当于同步电动机机械特性的功角特性;另一条是反映同步电动机功率因数调整的V形曲线。本章可作为本课程的基本内容进行讲授,而将有关同步电动机电力拖动以及目前应用较多的永磁同步电动机与永磁无刷直流电动机内容放至下两章介绍。一方面可以保持与传统教学的一致,另一方面,又可以根据具体课时情况适当选讲最新内容。

第9章首先介绍了有关同步电动机的拖动问题,即同步电动机的起动、制动与调速方法及相关问题分析。然后重点讨论了同步电动机变频调速过程中应注意的问题以及同步电动机的两种基本控制方式:他控方式和自控方式。

第10章针对目前伺服领域中应用较多的两种自控式永磁同步电动机:永磁同步电动机和永磁无刷直流电动机分别进行了详细讨论。根据表面永磁与内置永磁同步电动机的结构特点重点讨论了这两种永磁同步电动机的数学模型(电压平衡方程式、相量图),并介绍了各自矩角特性的特点。最后,利用相量图对相应

永磁同步电动机的控制策略分别进行了分析,并给出了其典型调速系统的框图。对于永磁无刷直流电动机,则重点讨论了其基本运行原理、内部电磁关系、驱动控制方式以及静、动态数学模型以及调速系统的组成。

第 11 章针对当前科研和工程实际中引起普遍关注的开关磁阻电机进行了专门介绍。鉴于其结构和电磁转矩的产生机理与传统伺服系统中广泛采用的步进电动机相同,故此。本教材单独为这两种电动机开辟了一章即双凸极变磁阻电机。在介绍变磁阻电机的基本运行原理和电磁过程之前,首先简要回顾了有关机电能量转换的基本知识,包括采用能量法确定电磁转矩的方法。然后对有关开关磁阻电机与步进电机的结构、运行原理、电磁过程、特性以及驱动分别进行了介绍。本章可以作为综合性较强的内容进行选讲,或作为自学能力较强同学的自学参考。

基于前面各章介绍的知识,第 12 章对电力拖动系统中经常采用的各类微特电机尤其是实现机电信号转换的控制电机的基本工作原理、特性进行了讨论。这些微特电机包括:家电用的各类单相异步电动机,用于伺服驱动系统中的交、直流伺服电动机与力矩电机,作为转速测量用的交、直流测速发电机,实现机械角度远距离传输用的自整角机,完成转角和转速测量用的旋转变压器,直接输出直线运动的直线电机以及基于逆压电效应的超声波电动机。

第 13 章针对电力拖动系统的方案选择、各种工作制电动机的容量选择以及与其相关的发热与冷却问题进行了讨论。

0.5 本课程的学习方法

本课程尽管是一门专业基础课,但同时又是一门实践性很强的独立课程。考虑到电机是实现电能与机械能转换的装置,而电能与机械能的转换是通过电磁场来完成的,因此要了解和熟悉电机的各种特性,就需要分析电机内部的电磁过程。鉴于电磁场的抽象性,因而增加了该课程的难度。而电力拖动基础则涉及到对系统的基本指标要求与方法的实现等问题,必然涉及到要用系统的观点看问题。因此,学习本课程时一定要以物理概念为主、工程计算为辅。除了了解基本运行原理与电磁过程外,重点应掌握各类电动机的机械特性以及其与生产机械配合时的起、制动方法与调速方案,并通过实验和仿真加深对相关知识的理解和掌握。只有理论与实际相结合,才能真正学好本门课程。

内 容 简 介

本章主要解决下列两个基本问题:

- (1) 在机电能量转换过程中,电机内部主要涉及到哪些基本物理量和电磁定律?这些电磁定律在电机内部具体体现怎样的物理概念?
- (2) 磁性材料有哪些特点与特性?

从能量角度看,旋转电机是一种机电能量转换装置。电动机借助于内部电磁场将输入的电能转换为机械能输出。发电机则相反,它由原动机(如汽轮机、柴油机或汽油机等)提供动力(动能),借助于内部电磁场将输入的机械能转换为电能输出。因此,电磁场在电机内部起到了相当重要的作用。为了熟悉和掌握电机的运行理论与特性,就必须首先了解有关电磁学的基本知识与电磁学定律。

一般来讲,对于电磁场的分析不外乎有两种方法:一种是采取场的分析方法;另一种是采取路的分析方法。前者是一种微观分析方法,它通过偏微分方程,并借助于有限元等方法具体分析某一单元或某一点的电磁场情况,这种方法较为准确,但计算量较大;后者是一种宏观分析方法,它将闭合磁力线所经过的路径看作是由几段均匀磁路组成,然后将磁路问题等效为电路问题,最终统一求解电路。尽管这种方法在准确性方面存在一定的限制,但由于其计算简单,计算精度也足以满足大部分工程实际需要,因而得到了广泛应用。本书主要采用路的分析方法,通过将有关磁路问题转换为电路问题获得有关电机的等效电路。然后,借助于等效电路对电机的性能进行分析和计算。为此,本章首先简要回顾了有关电磁学的基本知识与电磁学定律。

1.1 电路的基本定律

1.1.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(KCL)指出：电路中流入某一节点电流的代数和等于零。即

$$\sum_n i_k = 0 \quad (1-1)$$

上式表明：在电路中，电流是连续的，流入某一节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。

1.1.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(KVL)指出：电路中任一闭合回路电压的代数和为零。即

$$\sum_n V_k = 0 \quad (1-2)$$

上式表明：在电路中，任一闭合回路的电势之和全部由无源元件所消耗的压降所平衡。

1.2 磁场的基本知识

下面简要介绍有关磁场的几个物理量。

1.2.1 磁感应强度

通电导体周围会产生磁场，磁场是一矢量。通常用磁感应强度 $\mathbf{B}$ 来描述磁场的强弱。通电导体中的电流与所产生的磁场之间符合右手螺旋关系，如图 1.1 所示。

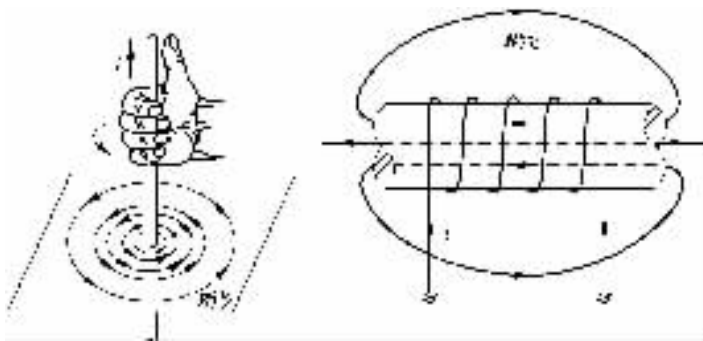


图 1.1 磁力线与电流之间的右螺旋关系

1.2.2 磁通 Φ

磁场的强弱可用磁力线的疏密来形象描述。穿过某一截面 S 的磁力线总数或磁感应强度 B 的通量又称为磁通量,一般用 Φ 来表示。即

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1-3)$$

对于均匀磁场,若 B 与 S 相互垂直,则上式变为

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-4)$$

由此可见,磁感应强度 B 反映的是单位面积上的磁通量,故又称为磁通密度(简称**磁密**)。通常,磁通 Φ 的单位为 Wb,韦[伯];磁密 B 的单位为 T,特[斯拉], $1\text{T}=1\text{Wb}/\text{m}^2$ 。

1.2.3 磁场强度 H

磁场强度 H 是表征磁场性质的另一基本物理量,它同样是一矢量。磁密 B 与磁场强度 H 的比值反映了磁性材料的导磁能力。于是 B 与 H 之间可用下式表示:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1-5)$$

其中, μ 为导磁材料的**磁导率**。真空的磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, 铁磁材料的磁导率 $\mu \gg \mu_0$, 即

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1-6)$$

式中, μ_r 为相对磁导率。对于各种矽钢片材料, $\mu_r = 6000 \sim 7000$; 对于铸钢, $\mu_r = 1000$ 。磁场强度 H 的单位为 A/m, 安[培]/米。

1.3 电磁学的基本定律

1.3.1 电生磁的基本定律——安培环路定理

通电导体周围所产生的磁场与导体内部电流之间符合下列安培环路定理,即

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum i_k \quad (1-7)$$

安培环路定理描述的是电生磁的基本定律。假定闭合磁力线是由 N 匝线圈电流产生的,且沿闭合磁力线 L 上的磁场强度 H 处处相等,则上式变为

$$HL = Ni \quad (1-8)$$

式中,安匝数 Ni 又称为磁动势(magneto-motive-force, MMF)(简称为**磁势**),通