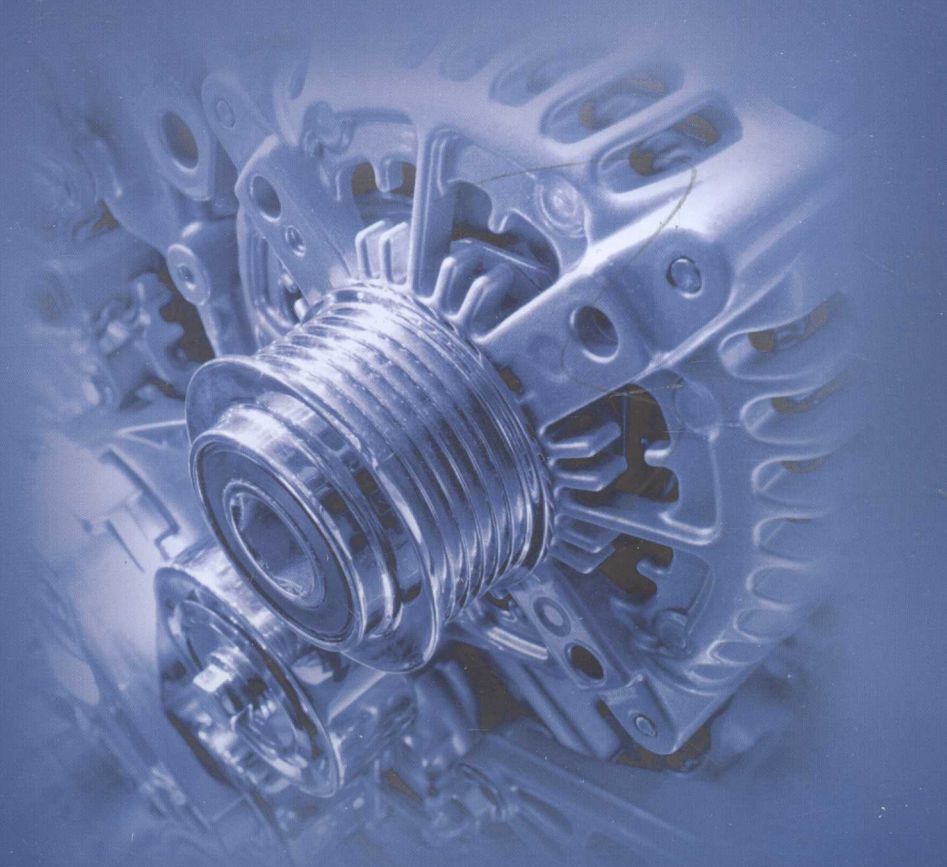
 普通高等教育“十二五”规划教材

电机与电力拖动基础

尹 泉 周永鹏 李浚源 编著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

电机与电力拖动基础

尹 泉 周永鹏 李浚源 编著

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 简 介

本书是高等院校自动控制工程、电气自动化、机电一体化、自动化等专业学生必修的一门核心专业基础课教材。内容涉及交、直流电动机和变压器的基本原理、结构、控制模型,交、直流电动机的启动、调速、制动运行控制特点,以及基于电动机稳态模型的基本控制方法。

本书在李浚源教授主编的《电力拖动基础》(2000年版)基础上进一步精选和归纳了电力拖动技术的基本原理和控制技术,增加了永磁同步、无刷直流、直线和双馈电机等近年来应用十分广泛的内容,系统、完整地反映了现代电力拖动技术的发展和全貌,对重要内容的分析增强了图形的对照说明,阐述与推证都比较详细,便于读者自学。

本书适合作为自动控制工程学科自动化专业及其他相关专业的本科生教材,也可作为从事电气自动化和电力拖动控制技术科研人员的一本系统、完整的专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电力拖动基础/尹 泉 周永鹏 李浚源 编著. —武汉:华中科技大学出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-5609-9119-1

I. 电… II. ①尹… ②周… ③李… III. 电力传动-高等学校-教材 IV. TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 123695 号

电机与电力拖动基础

尹 泉 周永鹏 李浚源 编著

策划编辑: 谢燕群

责任编辑: 江 津

责任校对: 周 娟

责任监印: 周治超

出版发行: 华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编: 430074 电话: (027)81321915

录 排: 武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷: 通山金地印务有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 24.25

字 数: 615 千字

版 次: 2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 45.00 元



华中出版

本书若有印装质量问题, 请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线: 400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前言 Preface



本教材是在2000年由华中科技大学出版社出版、李浚源、秦忆、周永鹏编著的《电力拖动基础》教材基础上编写完成的。作为高等院校自动化专业“电力拖动与电气控制”课程教学用书,其主要内容包括直流电机原理与拖动基础、变压器原理、交流异步电动机原理与拖动基础、交流同步电机原理与拖动基础、一些其他常用电机的原理与控制方法以及相关电机电器控制系统的构成原理与电路图绘制方法等。

在原教材使用的10多年间,电气自动化电力拖动技术有了长足的进步,一些新的电机结构、新的控制技术不断涌现,计算机仿真与辅助设计也变得更加便捷。这次编著,参考了这10余年间技术的发展要求和教学积累,对原教材的大部分章节都进行了一定的改写和补充,但教材的主线仍然以控制为目标,分析原理、结构的目的在于建立控制模型。

尽管交流拖动技术已成为电力拖动自动控制系统驱动的主流,但鉴于现代交流拖动技术的核心仍然是借助于一系列坐标变换,将交流电机的控制变换为一种类似于对直流电机的控制,如果对直流电机的控制方法和特点不熟悉,掌握、理解现代交流拖动技术将是十分困难的,因此本书仍从直流电机原理与拖动控制方法入手,在建立了扎实的直流电机拖动控制概念之后,再进入交流电机原理与拖动控制方法的学习。本着由浅入深的原则,本教材主要分析交流电机的稳态控制模型,对于现代交流拖动采用的交流电机动态模型则留待后续课程“运动控制系统”中详细分析讨论,以避免重复。

本书共分10章,与原教材相比内容进行了一定变更。第1章为绪论,将本书要用到的一些主要数学、物理知识作了简要回顾;第2、3章为直流电机部分;第4章为变压器原理,加强了物理描述;第5章为异步电机原理与结构,加强了对旋转磁场、等值电路形成的描述;第6章讨论异步电动机的基本控制方法,考虑到现代交流拖动系统中同步电机应用日益广泛,对同步电机部分作了较大变动;第7章和第8章分别讨论了同步发电机和电动机的原理、结构与控制方法,并增加了永磁同步电动机相关内容;第9章对常用控制电机的叙述中,增加了无刷直流电机、双馈电机、直线电机、磁悬浮等内容,介绍了它们的典型结构、控制原理,以及在风力发电、轨道交通中的应用;第10章介绍电动机的电器控制方法。

本书按授课66学时、实验6学时编写。参考学时安排为绪论和直流电机16学时,变压器8学时,异步电机原理与控制18学时,同步电机12学时,其他电机6学时,电器控制6学时。也可将电器控制部分安排自学,教学按授课60学时、实验4学时来安排。

本书由华中科技大学尹泉、周永鹏、李浚源编著,其中,第5~9章由尹泉编写,其余各章由周永鹏编写。所有编写工作都是在李浚源、秦忆等2000年编著的教材基础上完成的,在此对两位教授的前期编写工作表示诚挚感谢。

由于编写时间仓促,书中一定会有不够完善和错误的地方,殷切希望读者批评指正。

编者

2013年7月

目录 Content



第1章 绪论	(1)
1-1 电机与拖动技术概貌	(1)
一、电机及电力拖动技术的发展概况	(1)
二、电机及电力拖动在自动化学科中的地位	(2)
1-2 相关的物理与数学概念	(3)
一、磁场	(4)
二、安培环路定律(全电流定律)	(8)
三、磁路与电路	(8)
四、两个重要的物理定律	(10)
五、电磁感应定律的四种表达形式	(13)
六、傅里叶级数	(14)
习题与思考题	(15)
第2章 直流电动机原理	(16)
2-1 直流电机的基本工作原理、结构和额定数据	(16)
一、直流电机的基本原理	(16)
二、直流电机的基本结构	(19)
三、直流电机的铭牌数据	(21)
2-2 直流电动机的结构特征与工作特性	(22)
一、主磁极与主极磁场	(22)
二、电枢绕组	(24)
三、电枢反应	(30)
四、换向	(32)
五、励磁方式	(36)
2-3 电磁转矩与电枢电动势	(37)
一、电磁转矩	(38)
二、电枢电动势	(39)
2-4 电势平衡方程与功率平衡方程	(41)
一、电势平衡方程	(41)
二、功率平衡方程	(42)
2-5 转速特性和机械特性	(44)
一、他励直流电动机的转速特性和机械特性	(45)
二、串励直流电动机的机械特性	(46)
三、复励直流电动机的机械特性	(48)

小结	(48)
习题与思考题	(49)
第3章 直流电力拖动原理	(51)
3-1 直流拖动系统的运动方程	(51)
一、单轴系统的运动方程	(51)
二、工作机械的负载转矩特性	(53)
三、拖动系统的稳定运行条件	(54)
四、电枢反应对机械特性的影响	(56)
3-2 直流电动机的启动与调速	(57)
一、直流电动机的启动	(57)
二、直流电动机的转速调节	(59)
三、调速指标	(61)
四、调速时的功率与转矩	(63)
五、直流电力拖动系统的动态过程	(64)
六、他励式直流电动机转速调节的机电过程	(67)
七、直流电动机运行时的励磁保护	(73)
3-3 直流电动机的制动运行状态	(74)
一、制动的分类	(75)
二、他励直流电动机的回馈制动	(77)
三、他励直流电动机的反接制动	(80)
四、他励直流电动机的能耗制动运行状态	(83)
五、串励和复励直流电动机的制动运行	(85)
3-4 永磁式直流电动机	(85)
小结	(89)
习题与思考题	(91)
第4章 变压器原理	(94)
4-1 变压器基本工作原理、结构与额定数据	(94)
一、基本结构	(94)
二、理想变压器的运行原理	(95)
三、额定数据	(97)
4-2 变压器运行分析	(98)
一、空载运行分析与一次侧绕组等值电路	(98)
二、变压器的负载运行与 T 形等值电路	(103)
三、变压器运行特性	(111)
四、变压器空载合闸时的过电流现象	(112)
4-3 三相变压器	(114)
一、三相变压器的磁路	(114)
二、三相变压器绕组的连接方式和磁路系统对电势波形的影响	(115)
三、磁路形式和绕组连接方式对电动势波形的影响	(123)
四、标么制	(124)

4-4 电力拖动自动控制系统中的特殊变压器	(126)
一、整流变压器	(126)
二、脉冲变压器	(128)
三、电流互感器	(131)
小结	(132)
习题与思考题	(134)
第5章 异步电动机原理	(136)
5-1 三相异步电动机的基本工作原理与基本结构	(136)
一、异步电动机的基本工作原理	(136)
二、旋转磁场的形成	(138)
三、三相异步电动机的基本结构	(142)
四、三相异步电动机的铭牌数据	(144)
5-2 三相异步电动机的定子绕组与磁势	(145)
一、一相定子绕组及其磁势	(145)
二、交流电动机绕组磁势的性质	(156)
5-3 三相异步电动机的运行分析	(162)
一、转子静止、转子绕组开路时异步电动机内的电磁关系	(162)
二、转子堵转、转子绕组短路时的磁势平衡方程式	(165)
三、转子旋转时异步电动机内的电磁过程	(170)
四、笼型异步电动机转子的相数和极对数	(175)
5-4 利用等值电路分析三相异步电动机的功率与转矩	(176)
一、功率平衡方程	(176)
二、转矩平衡方程	(178)
5-5 异步电动机的机械特性	(182)
一、用物理表达式描述的机械特性	(182)
二、机械特性的参数表达式	(185)
三、机械特性的实用表达式	(188)
5-6 三相异步电动机的参数测定与缺相运行	(189)
一、短路试验对定子阻抗参数的测定	(189)
二、空载试验对励磁支路参数的测定	(191)
三、三相异步电动机的缺相运行	(192)
四、三相异步电动机的动态模型	(192)
小结	(196)
习题与思考题	(197)
第6章 三相异步电动机的电力拖动	(199)
6-1 三相异步电动机的启动	(199)
一、直接启动与存在的问题	(199)
二、绕线转子三相异步电动机的启动	(201)
三、三相笼型转子异步电动机的启动	(203)
6-2 三相异步电动机的调速	(208)

一、改变转差率调速	(208)
二、改变磁极对数调速	(213)
三、改变定子绕组供电电源频率调速——变频调速	(216)
6-3 三相异步电动机的制动	(222)
一、三相异步电动机的回馈制动	(222)
二、三相异步电动机的反接制动	(225)
三、三相异步电动机的能耗制动	(228)
小结	(231)
习题与思考题	(232)
第7章 交流同步发电机	(234)
7-1 同步发电机的结构与基本工作原理	(234)
一、同步发电机的结构	(234)
二、同步发电机的感生电压	(236)
7-2 同步发电机的等值电路	(239)
一、同步发电机负载运行时的电枢反应影响	(239)
二、隐极发电机的等值电路	(240)
三、同步发电机等值电路的相量图	(241)
7-3 凸极结构对电枢反应磁场的影响	(243)
一、凸极电机电枢磁势的 d, q 分解——双反应理论	(243)
二、电枢反应磁势的折算	(244)
三、直轴、交轴电枢反应电抗	(245)
四、凸极同步发电机的相量图	(246)
7-4 同步发电机的功率和转矩	(248)
一、同步发电机的功率	(248)
二、隐极式同步电机的功角特性	(249)
三、凸极同步发电机的功角、矩角特性	(250)
四、功角的双重物理意义	(250)
7-5 同步电机参数测定与额定数据	(251)
一、同步电机参数的实验测定	(251)
二、同步电机的额定数据	(254)
7-6 同步发电机的负载运行特性	(255)
一、同步发电机接无穷大电网负载时的运行特性	(255)
二、发电机性质的物理解释	(257)
小结	(258)
习题与思考题	(259)
第8章 同步电动机运行基本原理	(260)
8-1 同步电动机运行原理	(260)
一、同步电机的可逆原理	(260)
二、隐极同步电动机等值电路	(261)
三、同步电动机的机械特性、功率与转矩	(262)

四、附加转矩与磁阻电机	(267)
8-2 同步电动机的运行特性	(267)
一、负载变化对同步电动机运行的影响	(267)
二、励磁变化对同步电动机运行的影响	(269)
三、同步电动机的工作特性和 V 形曲线	(271)
四、同步电机的启动与特性比较	(273)
8-3 永磁同步电动机	(276)
一、永磁同步电动机的结构	(276)
二、同步电动机的稳态性能	(278)
三、永磁同步电动机的效率与功率因数特性	(280)
四、永磁同步电动机的速度调节	(281)
小结	(282)
习题与思考题	(282)
第 9 章 其他常用电机	(285)
9-1 单相异步电动机	(285)
一、由单相电源供电的异步电动机运行原理	(285)
二、单相异步电动机的等值电路	(287)
三、单相异步电动机的分类与启动方法	(291)
四、三相异步电动机的单相运行	(294)
9-2 步进电动机	(296)
一、步进电动机的基本工作原理与控制方法	(296)
二、步进电动机的工作特性与运行参数	(299)
三、步进电动机的主要类型	(302)
9-3 无刷直流电动机	(305)
一、无刷直流电动机的结构与工作原理	(306)
二、无刷直流电动机的结构类型	(309)
三、无刷直流电动机的数学模型	(310)
四、无刷直流电动机的调速	(314)
五、无刷直流电动机的制动	(314)
六、无位置传感器控制	(316)
七、转矩脉动问题	(318)
9-4 直线电动机与磁悬浮	(319)
一、直线感应电动机的基本结构和工作原理	(320)
二、交流同步直线电动机与磁悬浮	(323)
9-5 双馈电机与风力发电	(326)
一、变速双馈风力发电机的基本工作原理	(328)
二、双馈风力发电系统的组成	(329)
三、双馈异步风力发电机的工作原理	(331)
9-6 其他常用电机	(335)
一、直流测速发电机	(335)

二、通用电动机	336
三、自整角机	337
四、旋转变压器	339
小结	341
习题与思考题	342
第 10 章 继电-接触器控制系统	344
10-1 电动机的电器控制方法	344
一、常用低压电器	344
二、笼型异步电动机的运行控制	353
三、笼型异步电动机的降压启动控制	360
四、绕线转子异步电动机转子串电阻启动控制	364
五、异步电动机的快速制动控制	366
10-2 电动机控制原理电路图的绘制	369
一、完整电气原理图的绘制原则	369
二、单页电路原理图的示例	371
三、多页电路图的示例	372
小结	373
习题与思考题	373
参考文献	375

第 1 章 绪 论



本教材主要介绍在自动控制领域用于电能和机械能相互转换装置的原理、模型和基本控制方法,重点介绍被称做电机的旋转电磁机械上,因为在自动化领域中绝大多数的机电能量转换都是通过它来实现的。

本书假设读者已经具备磁场和电路理论的基本知识,这些知识已在自动化专业本科学生的“大学物理”和“电路”课程中讲授。在学习旋转电机基本原理过程中,将会频繁使用一些重要的物理概念,为便于学习,本章将对相关电磁知识作一简要的回顾,为后续学习奠定一个良好的理论基础。

1-1 电机与拖动技术概貌

作为一种易生产、易传输、易分配、易使用、易控制、低污染的能源,电能是现代广泛应用的一种能量形式。为了方便地将电能生产出来,并方便地将它转换成机械能为人类服务,电机被发明出来。作为一种高效的机电能量转换工具,电机及其拖动控制系统在国民经济、国防装备的现代化发展和社会生活中发挥着越来越重要的作用。

一、电机及电力拖动技术的发展概况

最先制成电动机的人,据说是德国人雅可比。他于 1834 年前后制成了一种简单的装置:在两个 U 形电磁铁中间,装一个六臂轮,每臂带两根棒形磁铁。通电后,棒形磁铁与 U 形磁铁之间产生相互吸引和排斥作用,带动轮轴转动。后来,雅可比做了一具大型的装置并安在小艇上,用 320 个丹尼尔电池供电,1838 年小艇在易北河上首次航行,航速只有 2.2 千米每小时,与此同时,美国人达文波特也成功制出了驱动印刷机的电动机,印刷过美国电学期刊《电磁和机械情报》。但这两种电动机都没有多大商业价值,用电池作电源,成本太高,并不实用。直到第一台实用型直流发电机问世,电动机才得到广泛应用。1870 年,比利时工程师格拉姆发明了直流发电机,直流发电机的设计与电动机的很相似。后来,格拉姆证明向直流发电机输入电流,其转子会像电动机一样旋转。于是,这种格拉姆型电动机大量制造出来,效率也不断得到提高。与此同时,德国西门子公司制造出了更好的发电机,并着手研究由电动机驱动的车辆,制成了世界上最早的车。1882 年,爱迪生在纽约建立了第一座直流发电站,1879 年,在柏林工业展览会上,西门子公司不冒烟的车赢得观众的一片喝彩。西门子车的功率当时只有 3 马力,后来美国发明大王爱迪生试验的车功率已达 12~15 马力。但当时的电动机全是直流电机,只限于驱动车。1888 年 5 月,美籍塞尔维亚发明家特斯拉向全世界展示了他发明的交流电动机。它是根据电磁感应原理制成的,又称感应电动机,这种电动机结构简单,使用

交流电,不像直流电动机那样需要整流、容易产生火花,因此,很快被广泛应用于工业和家用电器中。

由于直流电动机具有良好的控制特性,自诞生以来,它一直在要求高控制性能(宽范围调速,高精度的转速、转矩、转角控制)的电力拖动领域中占据着主导地位,这种状况直至 20 世纪由于交流电动机控制方法在理论上的突破和功率电子技术、微处理器技术的进步使控制的实现变得容易,才发生了根本性的转变。一种称为矢量控制的技术和交流变频、交流调压技术的进步,使交流电动机从原来的难以控制变得已能像对直流电动机一样进行控制,获得的控制性能已完全可与直流电动机系统相媲美,同时由于结构上的本质区别,交流电动机结构简单、免维护、无火花,高速性能明显优于直流电动机,价格低廉,并能节约铜材,在现代工业控制领域,交流电动机拖动系统取代直流电动机拖动系统已成为一种趋势。不过,直流系统也还有它的一些优势领域,例如,传统的直流拖动系统在各种舰船、车辆、卫星、移动式机器人等移动设备中仍然占有一定地位。直流调速系统更易于获得较高的性能指标,特别是在低速、超低速下运行时的稳速性能与交流调速系统相比仍保有一定优势,如高精度稳速系统的稳速精度可以达到数十万分之一,宽调速系统的调速比可达到 1:10000 以上,千瓦以上功率等级、中等以下惯量的系统快速响应时间可以达到几十毫秒。

从机电能量转换的观点看,电机可以分为发电机和电动机两大类。实际上,从电机运行原理来看,任一电机既可工作于发电状态也可工作于电动状态,上述分类是从该电机的主要用途和主要工作状态的角度来进行分类的。作为自动化学科的专业基础课程,本书侧重于从控制的角度讨论电动机实现电力拖动的基本知识,有关发电机方面的知识可参阅电力、发配电专业的相关教材。

二、电机及电力拖动在自动化学科中的地位

在电能未被人类掌握之前,自动化系统就早已被大量使用。最早的自动控制系统甚至可以追溯到公元前,那时的自动化系统是以水力作为动力的。第一个在工业过程中应用的自动化系统是 James Watt 在 1769 年发明的蒸汽机速度调节器,它还不是以电能为动力的。因而自动化一般可以划分为电类自动化和非电类自动化两大类,而电类自动化又可按其组成结构、研究重点分为过程自动化和单机自动化。在单机自动化中,按照控制系统构成方式,还可进一步划分为开环控制和闭环控制两大类型。作为机电能量转换的工具,电机在电类自动化系统中是不可缺少的。用电机拖动机械运动称为电力拖动,也称为电气传动。电机及其拖动技术是电气自动化技术的重要基石之一,它是自动化专业的一门核心专业基础课程。它与自动化专业其他重要课程之间的关系和地位如图 1-1 所示。

由图 1-1 可见,电机和电力拖动在现代电气自动控制系统中占有十分重要的地位,只有深入了解和掌握作为被控对象关键器件——电机的控制特性,才有可能完成高品质电气自动控制系统的设计。同时,随着现代电力变换技术和控制技术的发展和进步,高品质电力拖动的实现越来越离不开相关技术的支持,机电一体化已成为电力拖动的设计趋势,因此在深入学习电机拖动知识的同时,也要重视功率电子技术、自动控制原理、计算机技术、检测技术等相关专业知识的学习。

电力拖动是一门既带专业性又带基础性的课程,它与电路理论的性质很不同,在电路理论中所要解决的问题是理性化了的,比较单纯,但在电力拖动中要求运用理论来解决实际问题,

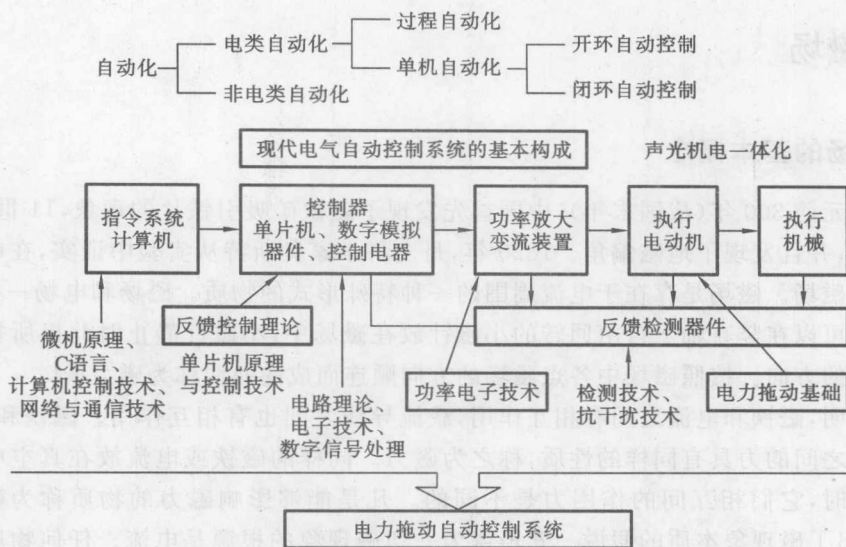


图 1-1 电力拖动在自动化学科中的地位

而实际问题的客观情况常常是比较复杂、综合的。因此在分析时,有必要先将问题简单化,找出主要矛盾,运用理论知识加以解决,这样得到的结论足以正确反映客观规律,当然还有一定程度的近似性。在此基础上,再深入分析较次要的矛盾,得到更精确的解答。在实际生产工作中所发现的问题,常常是这样逐步来掌握它的规律的。在课程学习时要处处从实际出发,不能仅满足于公式中数学上的关系,还必须通过公式的符号看到它们所代表的物理量之间的关系,同时重视数学计算,重视实验。

作为自动化专业的基础课程,为突出控制专业的特点,本课程的侧重点放在电机运行原理、模型、控制特性和方法的分析方面,对交、直流电机作为电动机用于电力拖动运行时的运行原理、数学模型,以及开环状态下电动机的启动、调速和快速制动的基本方法作深入、详细的讨论,为它们的闭环控制奠定基础。与电机制造专业的侧重点不同,本课程对电机的结构如铁芯、绕组等和如何通过改进结构来提高电机性能等仅作一般性简略介绍,也不同于电力系统专业,对电机以发电作为主要运行状态的内容也不列作重点。

尽管直流拖动已逐渐淡出现代制造工业领域,但现代交流调速矢量控制的基本思想正是通过对交流电机数学模型的一系列变换,将其转换为与直流电机相似的模型实施控制的,没有对直流拖动原理的深刻理解,就很难清晰地把握矢量控制的精髓,给学习、掌握现代交流拖动带来障碍。那种认为交流拖动将全面取代直流拖动,直流拖动原理已不重要,可以从教学中舍弃的观点并不可取。基于这种思想,本教材仍然将直流拖动原理作为教学内容的重点。

1-2 相关的物理与数学概念

电机的能量变换是通过电磁感应作用实现的。分析电机内部的电磁过程及其所表现的特性时,要应用相关的电和磁的规律和定律。虽然我们假定读者早已在相关物理、电路理论课程中掌握了这些知识,但由于它们在电机拖动理论中的重要性,在此作一个简要的回顾还是有必要的。

一、磁场

1. 磁场的基本概念

约在公元前 300 年(战国末年),中国首先发现了磁铁矿吸引铁片的现象,11 世纪,沈括发明了指南针,并且发现了地磁偏角。1820 年,丹麦科学家奥斯特从实验中证实,在电流周围的空间存在着磁场。磁场是存在于电流周围的一种特殊形式的物质。磁场和电场一样具有方向性。把一个可以在竖直轴上自由回转的小磁针放在磁场中,小磁针静止时北极所指的方向就规定为磁场的方向。按照磁场中各点磁场的方向顺连而成的曲线称为磁力线。

实验证明,磁铁和电流之间有相互作用,载流导线之间也有相互作用。磁铁和磁铁之间、电流和电流之间的力具有同样的性质,称之为磁力。同样的磁铁或电流放在真空中和各种不同的介质中时,它们相互间的作用力是不同的。凡是能够影响磁力的物质称为磁质。1822 年,安培提出了磁现象本质的假说。安培认为一切磁现象的根源是电流。任何物质的分子中都存在回路电流,称为分子电流,分子电流相当于一个基元磁铁。在物质没有磁性的状态下,这些分子电流毫无规则地取各种可能的方向,因而它们在外界所引起的磁效应相互抵消,整个物体不显示磁性。当磁质位于磁场中时,在磁力的作用下,其分子电流与载流线圈一样要发生偏转而取一定的方向。磁质中分子电流在磁力作用下作有规则排列,称为介质的磁化。磁化了的物体对外界就会产生一定的磁效应。分子电流相当于分子中电子环绕原子核的运动和电子本身的自旋运动。因此,一切磁现象起源于电荷的运动,运动电荷间除了与静止电荷一样受到电力作用外,还受到磁力的作用。

2. 磁场和磁力线的方向

直线电流磁场的右手拇指定则:用右手握住导线,如果拇指指向电流方向,那么,其余四指就指向磁力线的旋转方向。

通电线圈磁场的右手螺旋法则:用右手握住线圈,使四指指向电流方向,则拇指所指的方向就是线圈内部磁力线的方向。磁力线从线圈内出来的一端为北极(N 极),磁力线进入线圈内部的一端为南极(S 极)。

3. 磁场的磁感应强度/磁通密度

设有一无限长载流直导线 AB,在它的附近悬挂一个载流的试验线圈 C,如图 1-2 所示。假设悬线没有扭力矩,则当线圈停止转动时,线圈的平面 XYyx 就和导线 AB 在同一平面内。线圈的法线 n 与导线相互垂直。

如果 AB 中产生磁场的电流强度和方向固定,则线圈在磁场中给定点上所受的磁力矩随线圈法线方向不同而改变,当线圈法线方向与该点磁场方向垂直时,线圈所受的磁力矩最大。最大磁力矩 T_{magmax} 与线圈中的电流强度 I 成正比,也与线圈的面积 S 成正比,而与线圈的形状无关。此电流强度和线圈面积的乘积称为线圈的磁矩 p_{mag} ,并有

$$p_{\text{mag}} \propto IS$$

当把一确定磁矩的线圈放在磁场中不同位置时,一般线圈所受到的最大磁力矩是不同的。但最大磁力矩和磁矩的比值,则仅与线圈所在的位置有关。例如,把线圈放在越靠近 AB 导线

的地方,作用在线圈上的最大磁力矩就越大。因此,可采用单位磁矩的线圈在磁场中各点所受最大磁力矩作为度量磁场强弱的量。

$$B \propto \frac{T_{\text{magmax}}}{p_{\text{mag}}} \propto \frac{T_{\text{magmax}}}{IS}$$

$$B = k \frac{T_{\text{magmax}}}{IS}$$

其中,比例系数 k 根据式中物理量的度量单位决定。

如果把单位磁矩的试验线圈放在磁场中的某点,则当线圈所受磁力矩为零时,线圈的正法线方向表示该点磁场的方向,线圈法线的正方向根据线圈中的电流按右手螺旋法则确定;当线圈法线与磁场方向垂直时,线圈所受磁力矩有一确定的最大值,表示该点磁场的强弱。同时表示上述方向和强弱的物理量称为磁感应强度,以符号 B 表示,简称 B 矢量。当磁矩为 $1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 的线圈位于磁场中某点时,如果它所受到的最大磁力矩为 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$,则该点的磁感应强度为 $1 \text{ Wb}/\text{m}^2$ 或 1 T (特斯拉)。

$$1 \text{ T} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m}) = 1 \text{ Wb}/\text{m}^2$$

4. 磁力线密度与磁通量

磁场中磁力线密度规定为:通过某点上垂直于 B 矢量的单位面积的磁力线条数,它等于该点 B 矢量的数值。通过一个给定面的磁力线条数,称为通过此面的磁通量 Φ 或 B 通量,简称为磁通。在磁场中设想一个面积元 dS ,它的法线方向和该处 B 矢量之间的交角为 α ,根据磁力线密度的规定,通过 dS 的磁通量 $d\Phi$ 为

$$d\Phi = B dS \cos\alpha$$

而经过一个有限面的磁通量 Φ 为

$$\Phi = \int_S B \cos\alpha dS$$

在国际单位制中,磁通量的单位为 Wb 或 $\text{T} \cdot \text{m}^2$ 。在均匀磁场中,如果截面 S 与 B 垂直,则

$$\Phi = BS \quad (1-1)$$

5. B 与产生它的电流(励磁电流)之间的关系

磁感应强度 B 与产生它的电流(励磁电流)之间的关系可用毕奥(Biot)-萨伐(Savart)-拉普拉斯(Laplace)定律描述:

设在载流导线上沿电流方向取线元 $d\mathbf{l}$,其中通过电流强度为 I 。电流元 $I d\mathbf{l}$ 在真空中给定点 P 所产生的磁感应强度 $d\mathbf{B}$ 的大小与磁导率、 I 、 $d\mathbf{l}$ 及线元到点 P 的矢径 \mathbf{r} 间的夹角 $(d\mathbf{l}, \mathbf{r})$ 的正弦成正比,与由线元到点 P 的距离的平方成反比,即

$$d\mathbf{B} = \frac{k I d\mathbf{l} \sin(d\mathbf{l}, \mathbf{r})}{r^2}$$

方向垂直于由线元和矢径所决定的平面,指向由右手螺旋法则确定。比例系数 k 与磁场中的磁介质和单位制选取有关,与磁介质的磁导率 μ 成正比。上式称为电流元的磁感应强度。磁感应强度服从叠加原理:某一给定的电流分布在空间某点所产生的磁感应强度等于组成该电

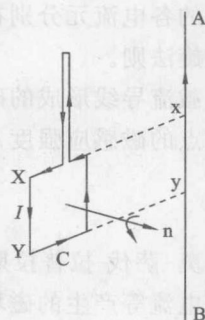


图 1-2 载流导线磁场对可自由转动载流线圈的作用

流分布的各电流元分别在该点上所产生的磁感应强度的矢量和。磁力线方向与电流方向满足右手螺旋法则。

当载流导线形成的磁场使磁质磁化时,磁质内任一点的总磁感应强度 B 等于载流导线产生在该点的磁感应强度 B_0 和所有未被抵消的分子电流产生在该点的附加磁感应强度 B' 的矢量和:

$$B = B_0 + B'$$

应用毕奥-萨伐-拉普拉斯定律分析不同几何形状电流产生的磁场,如无限长直电流、圆电流、螺线管电流等产生的磁场,可以得知其磁感应强度均与电流强度 I 、磁导率 μ 成正比,即

$$B \propto \mu I$$

6. 磁场强度

在任何磁质中,磁场中某点的磁感应强度(magnetic field intensity) B 与同一点上的磁导率 μ 的比值称为该点的磁场强度,即

$$H = \frac{B}{\mu}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

式中: μ_0 为真空的磁导率; μ_r 为磁介质的相对磁导率;对于真空, $\mu = 1$ 。

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \text{ 或 } \text{H/m} \approx 1/800000 \text{ H/m}$$

许多非磁性材料如铜、纸、橡胶、空气的 $B-H$ 关系与真空的几乎相等。变压器和旋转电机中用到的材料,其相对磁导率 μ_r 的典型值范围为 2000~80000。例如,铸钢的 μ_r 为 700~1000,各种硅钢片的 μ_r 为 6000~7000。随着材料科学的发展,现代一些合金材料的相对磁导率已达到 10^6 以上。 μ_r 值随磁通密度的大小会略微变化,定性分析时可暂时假设为常数处理。

在电工学科领域,常按照安培环路定理,使用 A/m 作为磁场强度 H 的单位。

7. 磁滞与涡流

铁、镍一类金属的分子具有一种相互紧密排列形成自己磁场的性质。在这些金属中,有许多被称为磁畴的小区域,其体积约为 10^{-12} m^3 。每一个磁畴中的原子间存在着非常强的电子“交换耦合作用”,使相邻磁矩都按它们的磁场方向排列指向相同的方向,这样,每个磁畴就类似于一个小的永久磁铁。整个铁块没有磁性是因为它包含的这些巨量小磁畴的方向是随机分布的。

当一个外磁场施加到铁块时,将引起那些原来指向其他方向的磁畴发生指向磁场方向的运动,使排列在原磁畴边界的原子被物理地旋转到外磁场方向,这些增加的和外磁场同方向排列的原子使铁块中的磁通增强,进而使更多的原子变换方向,进一步增强磁场的强度,形成一种正反馈效应,使得铁块中原来与外磁场方向相同和相近的磁畴体积增大,而原来与外磁场方向有较大偏离的磁畴体积缩小。因此,铁磁材料具有比空气高得多的磁导率。

随着外磁场强度的持续增加,材料中原来和外磁场方向不同的磁畴越来越多地转到与外磁场相同的方向,磁畴对磁场的进一步增强作用也越来越弱。最后,当所有的磁畴排列都与外磁场同方向时,任何进一步增加的磁势所增加的磁通都将仅能像它在真空中增加的一样多,形成铁磁材料的深度磁饱和点。这一磁化过程所对应的铁磁材料的初始磁化曲线如图 1-3 所示。

当外磁场移去时,磁畴并不能完全恢复原来的随机取向分布和体积分布。因为使铁磁材料中的原子改变方向需要能量。外磁场提供能量以完成它们的排列,外磁场移除后,没有能量使所有原子恢复到原来的排列方向。 B 值并不沿原来的初始磁化曲线下降,而是沿另一曲线 ab 下降,如图 1-4 所示。当 $H=0$ 时, B 没有回到 0, B_r 称为剩余磁感应强度,简称剩磁,铁块变为具有一定磁性的永久磁铁,直到有一个新的外能量来改变它们排列的状态为止。当 H 正负周期变化时, B 沿 $abca'b'c'a$ 回线变化, B 的变化总是落后于 H 的变化,这种现象称为磁滞现象。新的外能量可以是相反方向的磁势、大的机械撞击,也可以是加热。因而永久磁铁在受到加热、击打或坠落时可能会失去磁性。

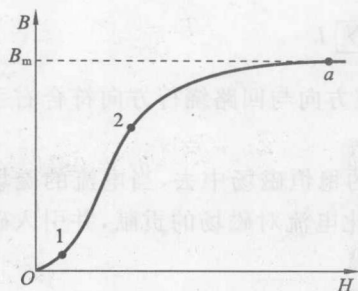


图 1-3 铁磁材料的初始磁化曲线

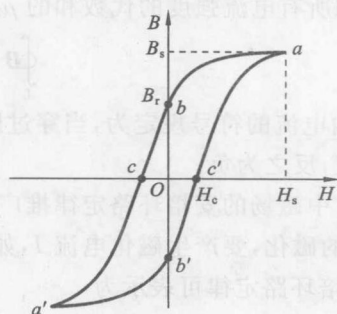


图 1-4 磁滞回线

铁磁质反复磁化时会发热,加剧分子振动、转动铁磁材料中的磁畴需要能量这一事实导致所有的变压器、电机中存在一种称为磁滞损耗的能量损失。铁芯中的磁滞损耗即是在加至铁芯的每个交流电流周期中使磁畴完成重新定向和体积变化所消耗的能量。

此外,一个随时间变化的磁通依照法拉第电磁感应定律会在铁芯中感生电动势。这种电动势会在铁芯中形成涡状电流,就像河流中的旋涡一样,称为涡流。涡流流过的铁芯具有电阻,也产生能量损耗,称为涡流损耗。涡流损耗能使铁芯发热。涡流损耗的能量与涡流流通的路径长短成正比,因此,铁芯一般用许多很薄的硅钢片叠压而成,之间用树脂等绝缘涂料隔开,使涡流的路径被限制在很小的范围内。因为绝缘层非常薄,它既可减小涡流,对铁芯的磁特性影响也非常小。涡流损耗正比于叠片厚度的平方,因此,叠片越薄,涡流损耗就越小。

习惯上常将铁磁材料中的磁滞与涡流损耗统称为铁耗。显然,铁耗与磁通变化的快慢(即励磁频率)有关。通常,铁耗中的涡流损耗按励磁频率的平方增加,也按磁通密度峰值的平方增加,通常电机铁芯均采用硅钢片叠压形成,其涡流损耗可表示为

$$P_{eb} = C_{eb} V \Delta^2 f^2 B_m^2 \quad (1-2)$$

式中: C_{eb} 为涡流损耗系数,其值取决于铁磁材料的电阻率; V 为铁芯的体积; f 为励磁频率; Δ 为硅钢片的厚度; B_m 为磁通密度的最大值。

磁滞损耗正比于励磁频率、铁芯的体积和磁滞回线的面积,而磁滞回线的面积与磁密最大值的 n 次方成比例。对于一般的电工钢片, $n=1.6\sim 2.3$ 。磁滞损耗可写成

$$P_h = C_h V f B_m^n \quad (1-3)$$

式中: C_h 为磁滞损耗系数,与铁磁材料的性质有关。

综上所述,铁耗可近似表示为

$$P_{Fe} = P_h + P_{eb} \approx C_{Fe} f^k G B_m^2 \quad (1-4)$$

式中: C_{Fe} 为铁耗系数; $k=1.3\sim 1.5$; G 为铁芯重量。