



应用型本科机电类专业“十三五”规划精品教材

# 电机与拖动

DIANJI YU TUODONG



主编 王海文 葛敏娜 王楠



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



应用型本科机电类专业“十三五”规划精品教材

# 电机与拖动

DIANJI YU TUODONG



主 编 王海文 葛敏娜 王 楠

副主编 盛道清 葛卫清 张翠芳

白 冰 王炜富



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

## “十三五”规划精品教材 内 容 简 介

本书采用方程式、相量图和等效电路三种方式对电机的主要电磁物理量的特性及相互关系进行阐述及表示,对重要内容进行分析,利用图形的对照进行说明比较。本书以电磁感应定律和载流导体在磁场中的受力为基础来介绍各种电机的工作原理,内容上着重比较了不同电机的相同点和不同点,以便读者掌握各类电机的特点。本书的阐述与推证都比较详细,便于读者自学。

本书主要讲解电机与电力拖动的基本理论和基础知识,主要内容包括电力拖动系统的动力学基础、直流电机原理、他励直流电动机的运行、变压器、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步电动机、特种电机和电动机的选择,每章后面附有思考题与练习题,供读者学习和复习用。

本书可作为应用型普通高等院校自动化、电气自动化、机械电子工程等专业的教材或参考书,也可供相关工程技术人员参考。

为了方便教学,本书还配有电子课件等教学资源包,任课教师和学生可以登录“我们爱读书”网([www.ibook4us.com](http://www.ibook4us.com))免费注册并浏览,或者发邮件至 [hustpeiit@163.com](mailto:hustpeiit@163.com) 索取。

### 图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动/王海文,葛敏娜,王楠主编. —武汉:华中科技大学出版社,2018.8

应用型本科机电类专业“十三五”规划精品教材

ISBN 978-7-5680-4447-9

I. ①电… II. ①王… ②葛… ③王… III. ①电机-高等学校-教材 ②电力传动-高等学校-教材  
IV. ①TM3 ②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 191453 号

### 电机与拖动

DianJi yu TuoDong

王海文 葛敏娜 王楠 主编

策划编辑:康序

责任编辑:舒慧

责任监印:朱玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

电话:(027)81321913

邮编:430223

录排:华中科技大学惠友文印中心

印刷:武汉首壹印刷有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:17.5

字数:453千字

版次:2018年8月第1版第1次印刷

定价:38.00元



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

“电机与拖动”是研究交、直流电机原理及其启动、调速、制动等拖动基础理论、分析方法、基本特性,以及变压器的运行原理、特性及工程应用等的一门专业基础课程,是自动化、电气自动化、机械电子工程等专业的学生学习后续专业课所必需的主要技术基础,也是从事工业自动化、电气工程、电力系统、电力拖动、电机及控制、水电工程等领域工作的重要理论和技术基础,其内容为工科专业的学生奠定了扎实的工程实践基础,是当今工科专业的学生必修的强电基础课。本课程理论与实践结合比较紧密,而其原理部分较为抽象复杂,对初学者来说不容易理解,历来都是难教难学的课程之一。

随着我国高等教育规模的不断扩大,高等教育由精英教育方向逐步向大众教育方向转变。教育对象的特点发生了较大的变化,应用型人才的培养已经成为一批院校的培养目标。本书在编写过程中,结合应用型本科专业的人才培养目标和专业教学需要,本着基本理论够用即可、易教易学的原则,重点突出基础理论的实际应用,尽量使学生掌握扎实的理论基础,但又不追求理论深度,在打好基础的前提下,以培养学生实际工程能力为目标,强调“重基本理论、基本概念,淡化过程推导,突出工程应用”。同时,本书编者对相关内容做了删减与调整,适当删减了部分理论性强又较为抽象的内容,增强了教学内容的针对性和实用性。

本书由大连工业大学王海文、大连工业大学艺术与信息工程学院葛敏娜、沈阳科技学院王楠担任主编,由武汉科技大学盛道清、东莞理工学院城市学院葛卫清,以及大连工业大学艺术与信息工程学院张翠芳、白冰、王伟富担任副主编。全书共10章,其中王海文编写第10章和附录,葛敏娜编写第3、7章,王楠编写第1章,盛道清编写第2章,葛卫清编写第9章,张翠芳编写第4、8章,白冰编写第6章,王伟富编写第5章。王虹元、武文册、吴凡、刘浩、万达、王雪、冯晓玉、王淼、刘春萌协助进行了资料的整理工作。

本书在编写过程中,参考了兄弟院校的资料及其他相关教材,并得到许多同

人的关心和帮助,在此谨致谢意。

为了方便教学,本书还配有电子课件等教学资源包,任课教师和学生可以登录“我们爱读书”网([www.ibook4us.com](http://www.ibook4us.com))免费注册并浏览,或者发邮件至 [hustpeiit@163.com](mailto:hustpeiit@163.com) 索取。

由于编者水平有限、编写时间仓促,书中难免有错误和疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编者  
2018年3月

目  
录

## CONTENTS

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 第1章 绪论 .....                   | (1)  |
| 1.1 电机与拖动技术概述 .....            | (1)  |
| 1.1.1 电机与拖动技术的发展概况 .....       | (1)  |
| 1.1.2 本课程在专业中的作用、任务及课程目标 ..... | (2)  |
| 1.2 相关的物理与数学概念 .....           | (3)  |
| 思考题与练习题 .....                  | (14) |
| 第2章 电力拖动系统的动力学基础 .....         | (15) |
| 2.1 电力拖动系统的运动方程 .....          | (15) |
| 2.2 负载的转矩特性 .....              | (17) |
| 2.3 电力拖动系统的稳态分析——稳定运行的条件 ..... | (18) |
| 2.3.1 电力拖动系统稳定运行的概念 .....      | (18) |
| 2.3.2 电力拖动系统稳定运行的条件 .....      | (19) |
| 2.4 电力拖动系统的动态分析——过渡过程分析 .....  | (21) |
| 2.4.1 电力拖动系统动态分析的假设条件 .....    | (21) |
| 2.4.2 电力拖动系统转速的动态方程 .....      | (22) |
| 2.4.3 电力拖动系统转矩的动态方程 .....      | (22) |
| 2.4.4 电力拖动系统热过程的动态方程 .....     | (23) |
| 2.4.5 过渡过程时间的计算 .....          | (24) |
| 2.5 多轴电力拖动系统的简化 .....          | (24) |
| 2.5.1 系统等效的原则和方法 .....         | (25) |
| 2.5.2 多轴旋转系统等效为单轴旋转系统的方法 ..... | (25) |
| 2.5.3 直线运动系统等效为旋转运动系统的方法 ..... | (28) |
| 思考题与练习题 .....                  | (30) |
| 第3章 直流电机原理 .....               | (31) |
| 3.1 直流电机的基本工作原理 .....          | (31) |
| 3.1.1 直流电动机的基本工作原理 .....       | (31) |
| 3.1.2 直流发电机的基本工作原理 .....       | (32) |
| 3.2 直流电机的结构及铭牌 .....           | (33) |

|       |                           |      |
|-------|---------------------------|------|
| 3.2.1 | 直流电机的结构                   | (33) |
| 3.2.2 | 直流电机的铭牌                   | (35) |
| 3.3   | 直流电机的磁路、空载时的气隙磁通密度与空载磁化特性 | (37) |
| 3.3.1 | 直流电机的磁路                   | (37) |
| 3.3.2 | 空载时气隙磁通密度的分布波形            | (38) |
| 3.3.3 | 空载磁化特性                    | (39) |
| 3.3.4 | 直流电机的励磁方式                 | (40) |
| 3.4   | 直流电机的电枢绕组                 | (41) |
| 3.4.1 | 电枢绕组的常用术语                 | (41) |
| 3.4.2 | 单叠绕组                      | (43) |
| 3.4.3 | 单波绕组                      | (45) |
| 3.5   | 电枢电动势与电磁转矩                | (47) |
| 3.6   | 直流发电机的运行原理                | (48) |
| 3.6.1 | 直流发电机稳态运行时的基本方程           | (48) |
| 3.6.2 | 直流发电机稳态运行时的功率关系           | (49) |
| 3.7   | 直流电动机的运行原理                | (51) |
| 3.7.1 | 他励直流电动机稳态运行时的基本方程         | (52) |
| 3.7.2 | 他励直流电动机稳态运行时的功率关系         | (53) |
| 3.7.3 | 直流电动机的工作特性                | (55) |
| 3.8   | 直流发电机的运行特性                | (55) |
| 3.8.1 | 他励直流发电机的运行特性              | (55) |
| 3.8.2 | 并励直流发电机                   | (57) |
| 3.9   | 串励和复励直流电动机                | (58) |
| 3.9.1 | 串励直流电动机的机械特性              | (58) |
| 3.9.2 | 复励直流电动机的机械特性              | (60) |
| 3.10  | 直流电机的换向                   | (60) |
|       | 思考题与练习题                   | (61) |
| 第4章   | 他励直流电动机的运行                | (63) |
| 4.1   | 他励直流电动机的机械特性              | (63) |
| 4.1.1 | 机械特性的一般形式                 | (63) |
| 4.1.2 | 固有机械特性                    | (63) |
| 4.1.3 | 人为机械特性                    | (64) |
| 4.2   | 他励直流电动机的启动                | (65) |
| 4.2.1 | 直接启动                      | (65) |
| 4.2.2 | 电枢回路串电阻启动                 | (66) |
| 4.2.3 | 降压启动                      | (69) |
| 4.3   | 他励直流电动机的调速                | (69) |
| 4.3.1 | 调速指标                      | (69) |
| 4.3.2 | 调速方法                      | (71) |
| 4.3.3 | 调速方式与负载类型的配合              | (74) |
| 4.4   | 他励直流电动机的制动                | (74) |

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| 4.4.1 能耗制动             | (75)         |
| 4.4.2 反接制动             | (77)         |
| 4.4.3 回馈制动             | (80)         |
| 4.5 他励直流电力拖动系统的过渡过程    | (82)         |
| 4.5.1 过渡过程的数学分析        | (82)         |
| 4.5.2 过渡过程时间的计算        | (84)         |
| 4.5.3 启动过渡过程           | (85)         |
| 4.5.4 能耗制动过渡过程         | (85)         |
| 4.5.5 反接制动过渡过程         | (87)         |
| 4.6 他励直流电动机的建模及仿真      | (91)         |
| 4.6.1 直流电动机的启动         | (91)         |
| 4.6.2 直流电动机的调速         | (99)         |
| 思考题与练习题                | (103)        |
| <b>第5章 变压器</b>         | <b>(105)</b> |
| 5.1 变压器的基本结构、工作原理与额定数据 | (105)        |
| 5.1.1 变压器的基本结构         | (105)        |
| 5.1.2 理想变压器的运行原理       | (106)        |
| 5.1.3 变压器的额定数据         | (108)        |
| 5.2 变压器的空载运行和负载运行      | (109)        |
| 5.2.1 变压器的空载运行         | (109)        |
| 5.2.2 变压器的负载运行         | (111)        |
| 5.3 标么值                | (113)        |
| 5.4 变压器的等效电路和参数测定      | (115)        |
| 5.4.1 变压器负载运行时的等效电路    | (115)        |
| 5.4.2 变压器的参数测定         | (117)        |
| 5.5 变压器的运行特性           | (120)        |
| 5.5.1 变压器的外特性与电压变化率    | (121)        |
| 5.5.2 变压器的效率特性         | (121)        |
| 5.6 三相变压器              | (123)        |
| 5.7 电力拖动系统中的特殊变压器      | (133)        |
| 5.7.1 自耦变压器            | (133)        |
| 5.7.2 电压互感器            | (134)        |
| 5.7.3 电流互感器            | (135)        |
| 5.7.4 其他特殊用途变压器        | (135)        |
| 5.8 变压器的 MATLAB 仿真     | (136)        |
| 5.8.1 变压器负载运行状态仿真      | (136)        |
| 5.8.2 变压器连接组别仿真        | (140)        |
| 5.9 变压器的维护及故障分析        | (144)        |
| 5.9.1 变压器的维护           | (144)        |
| 5.9.2 变压器常见故障分析        | (144)        |
| 思考题与练习题                | (147)        |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 第6章 三相异步电动机                  | (149) |
| 6.1 三相异步电动机的基本结构和工作原理        | (149) |
| 6.1.1 三相异步电动机的基本结构           | (149) |
| 6.1.2 三相异步电动机的工作原理           | (152) |
| 6.1.3 三相异步电动机的铭牌             | (155) |
| 6.2 交流绕组                     | (161) |
| 6.2.1 交流绕组的基本知识              | (161) |
| 6.2.2 三相单层绕组                 | (162) |
| 6.2.3 三相双层绕组                 | (164) |
| 6.3 交流电机绕组的感应电动势             | (164) |
| 6.3.1 导体的感应电动势               | (165) |
| 6.3.2 线圈的感应电动势               | (165) |
| 6.3.3 线圈组的感应电动势              | (166) |
| 6.3.4 相绕组的感应电动势              | (167) |
| 6.4 交流电机绕组的磁动势               | (168) |
| 6.4.1 单相绕组的磁动势               | (168) |
| 6.4.2 三相绕组的基波合成磁动势           | (169) |
| 6.5 三相异步电动机的空载运行             | (170) |
| 6.5.1 三相异步电动机空载运行时的电磁关系      | (171) |
| 6.5.2 三相异步电动机空载运行时的基本方程和等效电路 | (171) |
| 6.6 三相异步电动机的负载运行             | (172) |
| 6.6.1 三相异步电动机负载运行时的电磁关系      | (172) |
| 6.6.2 转子绕组各电磁量               | (173) |
| 6.6.3 三相异步电动机负载运行时的基本方程      | (174) |
| 6.6.4 三相异步电动机负载运行时的等效电路      | (175) |
| 6.7 三相异步电动机的功率平衡和转矩平衡        | (178) |
| 6.7.1 三相异步电动机的功率平衡           | (178) |
| 6.7.2 三相异步电动机的转矩平衡           | (179) |
| 6.8 三相异步电动机的工作特性及其测试方法       | (181) |
| 6.8.1 三相异步电动机工作特性的分析         | (181) |
| 6.8.2 用实验法测三相异步电动机的工作特性      | (182) |
| 6.9 三相异步电动机参数的测定             | (182) |
| 6.9.1 短路(堵转)试验               | (182) |
| 6.9.2 空载试验                   | (183) |
| 思考题与练习题                      | (184) |
| 第7章 三相异步电动机的电力拖动             | (186) |
| 7.1 三相异步电动机的启动               | (186) |
| 7.1.1 直接启动与存在的问题             | (186) |
| 7.1.2 鼠笼式三相异步电动机降压启动         | (187) |
| 7.1.3 绕线式三相异步电动机的启动          | (194) |
| 7.2 三相异步电动机的调速               | (200) |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 7.2.1 变极调速 .....               | (200) |
| 7.2.2 变频调速 .....               | (201) |
| 7.2.3 改变电动机的转差率调速 .....        | (202) |
| 7.3 三相异步电动机的制动 .....           | (204) |
| 7.3.1 三相异步电动机的能耗制动 .....       | (204) |
| 7.3.2 三相异步电动机的反接制动 .....       | (205) |
| 7.3.3 三相异步电动机的回馈制动 .....       | (208) |
| 思考题与练习题 .....                  | (209) |
| <b>第8章 同步电动机</b> .....         | (210) |
| 8.1 同步电动机的基本结构、工作原理与额定数据 ..... | (210) |
| 8.2 同步电动机的电磁关系 .....           | (212) |
| 8.3 同步电动机的功率关系及功角特性与矩角特性 ..... | (215) |
| 8.3.1 功率关系 .....               | (215) |
| 8.3.2 功角特性与矩角特性 .....          | (216) |
| 8.4 同步电动机的功率因数调节 .....         | (218) |
| 8.5 同步电动机的启动方法 .....           | (219) |
| 8.6 微型同步电动机 .....              | (220) |
| 8.6.1 永磁式微型同步电动机 .....         | (221) |
| 8.6.2 反应式微型同步电动机 .....         | (221) |
| 8.6.3 磁滞式微型同步电动机 .....         | (222) |
| 思考题与练习题 .....                  | (223) |
| <b>第9章 特种电机</b> .....          | (224) |
| 9.1 测速发电机 .....                | (224) |
| 9.1.1 直流测速发电机 .....            | (224) |
| 9.1.2 交流异步测速发电机 .....          | (225) |
| 9.2 单相异步电动机 .....              | (227) |
| 9.2.1 单相单绕组异步电动机的工作原理 .....    | (227) |
| 9.2.2 单相异步电动机的类型及启动方法 .....    | (228) |
| 9.2.3 单相异步电动机的调速 .....         | (232) |
| 9.2.4 三相异步电动机的单相运行 .....       | (233) |
| 9.3 伺服电动机 .....                | (233) |
| 9.3.1 直流伺服电动机 .....            | (234) |
| 9.3.2 交流伺服电动机 .....            | (236) |
| 9.4 步进电动机 .....                | (237) |
| 9.4.1 概述 .....                 | (237) |
| 9.4.2 基本结构 .....               | (237) |
| 9.4.3 工作原理 .....               | (238) |
| 9.5 直线电动机与磁悬浮 .....            | (239) |
| 9.5.1 感应式直线电动机的基本结构和工作原理 ..... | (240) |
| 9.5.2 交流同步直线电动机与磁悬浮 .....      | (243) |
| 思考题与练习题 .....                  | (246) |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 第 10 章 电动机的选择 .....              | (248) |
| 10.1 电动机的发热和冷却 .....             | (248) |
| 10.1.1 电动机的发热 .....              | (248) |
| 10.1.2 电动机的冷却 .....              | (249) |
| 10.1.3 电动机的允许温升 .....            | (249) |
| 10.2 电动机的工作制 .....               | (250) |
| 10.3 电动机类型、形式、额定电压和额定转速的选择 ..... | (252) |
| 10.3.1 电动机类型的选择 .....            | (252) |
| 10.3.2 电动机形式的选择 .....            | (253) |
| 10.3.3 电动机额定电压的选择 .....          | (253) |
| 10.3.4 电动机额定转速的选择 .....          | (253) |
| 10.4 电动机额定功率的选择 .....            | (254) |
| 10.4.1 连续工作制电动机额定功率的选择 .....     | (254) |
| 10.4.2 短时工作制电动机额定功率的选择 .....     | (256) |
| 10.4.3 周期性断续工作制电动机额定功率的选择 .....  | (256) |
| 思考题与练习 .....                     | (257) |
| 附录 A 电机主要符号 .....                | (258) |
| 附录 B 直流电动机常见故障分析 .....           | (261) |
| 附录 C 三相异步电动机常见故障分析 .....         | (263) |
| 参考文献 .....                       | (267) |

# 第1章 绪论

本书主要介绍在自动控制领域电能和机械能相互转换装置的原理、模型和基本控制方法,重点介绍电机的旋转电磁机械,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的过程中,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做一简要的回顾,为后续学习奠定一个良好的理论基础。

## 1.1 电机与拖动技术概述

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。

### 1.1.1 电机与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形电磁铁之间产生相互吸引和排斥的作用,带动轮轴转动。后来,雅可比做了一个大型的装置并装在小艇上,用三百二十个丹尼尔电池供电。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成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的商业价值,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。1869年,比利时出生的法国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,这种格拉姆型发电机大量制造出来,效率也不断提高。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电车。1882年,爱迪生在纽约建立了世界上第一座发电厂。1879年,在柏林工业展览会上,西门子公司不冒烟的电车赢得观众的一片喝彩。当时西门子电车的功率只有3马力,后来美国发明大王爱迪生试验的电车功率为12~15马力。但当时的电动机全是直流电动机,只限于驱动电车。1888年5月,塞尔维亚裔美籍发明家特斯拉向全世界展示了他发明的交流电动机。该交流电动机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能像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,因此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,直流电动机拖动系统还有一些优势领域,例如,传统的直流电动机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具有一定优势,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为 $1:10\,000$ 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为几十毫秒。

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,“电机与拖动”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。

## 1.1.2 本课程在专业中的作用、任务及课程目标

### 1. 本课程在专业中的作用和任务

本课程是自动化、机电一体化等专业的核心专业基础课程,是将电机学、电力拖动和控制电机等课程有机结合而成的课程。本课程的任务是使学生掌握直流电机、变压器、交流电机及控制电机的基本理论、主要结构、性能及应用;掌握电力拖动系统的运行特性、电机与拖动系统的选择、分析计算及实验方法;掌握各种控制电机的类别、构造及特点,以及各种控制电机在自动控制系统中的应用及发展方向。电机与拖动在自动化专业中的地位如图 1-1 所示。由图可以看到,电机与拖动技术是自动化技术的重要基石之一,在现代自动控制中占有十分重要的地位。

### 2. 课程目标

本课程是一门用电磁理论解决复杂的、具体的、综合的实际问题的课程。在电机运行中,电机内同时存在电、磁、力的相互作用。因此,本课程的目标是使学生牢固掌握电机的基本概念、基本原理和主要特性,学会结合电机的具体结构、应用电机的基本理论分析电机及拖动的实际问题,掌握一定的电磁计算方法,培养运算能力。同时,要求学生重视在教学过程中安排的实验、实习,包括参观电机厂等实践教学环节,培养学生掌握电机与电力拖动系统的基本实验方法与技能。具体要求如下。

首先,本课程所研究的对象是实物,是一个电、磁、机械的综合体,因此要求学生:

- (1) 弄清机械实物的具体结构;
- (2) 弄清电机内主要电磁物理量的特性及相互关系,并能用方程式、向量图和等效电路这三种主要方式来表示;
- (3) 能运用这些特性和关系,结合具体条件对电机的稳态运行进行初步分析,这也是本课程的主要任务和总体要求。

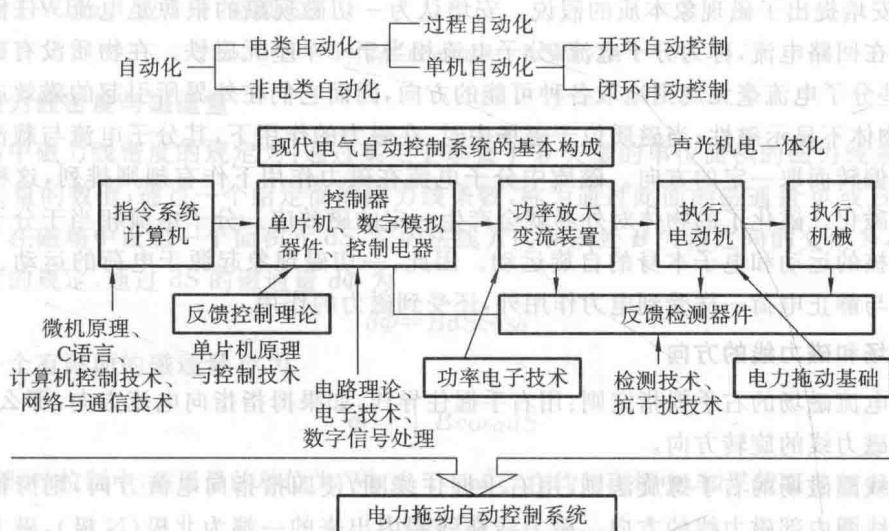


图 1-1 电机与拖动在自动化专业中的地位

其次,本课程前后的连贯性强。各种电机都存在共性,例如,各种电机的工作原理都是以电磁感应定律和载流导体在磁场中的受力为基础的,这就决定了在讲解后面的内容时要用到前面所学的知识。这就要求学 生不但要掌握前面所学的基本理论,而且在学习后续内容时要善于比较,找出不同电机的共同点和不同点,以便更好地掌握各类电机的特点。

最后,本课程以定性分析为主。这就要求学 生改变以往用套公式算题的方式完成学习任务的学习方法,而应把学习重点放在课后及时复习、钻研教材方面。在掌握电机中主要电磁物理量的特性及相互关系的基础上,结合具体条件,对电机的运行进行分析,认真思考章节后的思考题与练习题,培养分析问题和解决问题的能力,并且要勤于总结。

## 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,但由于它们在电机与拖动理论中的重要性,在此做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,它们之间的相互作用力是不同的。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,这种现象称为介质的磁化。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)。

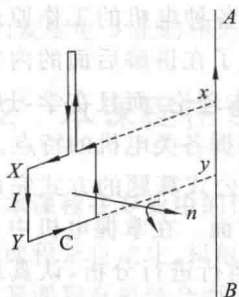


图 1-2 载流直导线磁场对可自由转动载流线圈的作用

## 3. 磁场的磁感应强度/磁通密度

设有一无限长的载流直导线 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,当线圈停止转动时,线圈所在的平面  $XYy_x$  就和导线 AB 在同一平面内,线圈的法线  $n$  与导线 AB 相互垂直。

如果导线 AB 中产生磁场的电流强度和方向一定,则线圈在磁场中给定点上所受的磁力矩因线圈法线方向不同而改变。当线圈法线方向与该点的磁场方向垂直时,线圈所受的磁力矩最大,最大磁力矩  $T_{\text{magmax}}$  与线圈中的电流强度  $I$  成正比,与线圈的面积  $S$  也成正比,而与线圈的形状无关。电流强度和线圈面积的乘积称为线圈的磁矩  $p_{\text{mag}}$ ,并有

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

当把一确定磁矩的线圈放在磁场中的不同位置时,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,把线圈放在越靠近导线 AB 的地方,则作用在线圈上的最大磁力矩就越大。因此,可将单位磁矩的线圈在磁场中各点所受的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  $k$  由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,当线圈所受磁力矩为零时,线圈法线的正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  $1 \text{ Wb/m}^2$  或  $1 \text{ T}$  (特斯拉)。

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

#### 4. 磁力线密度与磁通量

磁场中磁力线密度的规定为:通过某点上垂直于  $\mathbf{B}$  矢量的单位面积的磁力线条数,等于该点  $\mathbf{B}$  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  $\Phi$  或  $B$  通量,简称磁通。在磁场中设想一个面积元  $dS$ ,它的法线方向和该处  $\mathbf{B}$  矢量之间的交角为  $\alpha$ ,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  $\Phi$  为

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

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

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

#### 5. 磁感应强度与产生它的电流(励磁电流)之间的关系

磁感应强度  $\mathbf{B}$  与产生它的电流(励磁电流)之间的关系可用毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律描述。

设在载流导线上沿电流方向取线元  $d\mathbf{l}$ ,其中通过的电流强度为  $I$ 。电流元  $I d\mathbf{l}$  在真空中对定点  $P$  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  $(I d\mathbf{l}, \mathbf{r})$  的正弦成正比,与线元到点  $P$  的距离的平方成反比,即

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

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的选取有关,与磁介质的磁导率  $\mu$  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  $\mathbf{B}$  等于载流导线在该点产生的磁感应强度  $\mathbf{B}_0$  和所有未被抵消的分子电流在该点产生的附加磁感应强度  $\mathbf{B}'$  的矢量和,即

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}'$$

应用毕奥-萨伐尔-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  $\mu$  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  $B$  与同一点上的磁导率  $\mu$  的比值称为该点的磁场强度,即

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

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

式中,  $\mu_0$  为真空的磁导率,  $\mu_r$  为磁介质的相对磁导率。对于真空,  $\mu_r = 1$ 。

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \text{ 或 } \text{H/m} \approx 1/800\,000 \text{ H/m}$$

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同,变压器和旋转电机用到的材料,其相对磁导率  $\mu_r$  的典型值范围为  $2000 \sim 80\,000$ 。例如,铸钢的  $\mu_r$  为  $700 \sim 1000$ ,各种硅钢片的  $\mu_r$  为  $600 \sim 7000$ 。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, $\mu_r$  值随磁通密度的变化而略微变化,定性分析时可暂时假设为常数。

在电工学科领域,常按照安培环路定理,使用  $\text{A/m}$  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而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  $10^{-12} \text{ m}^3$ ,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而指向相同的方向。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的磁畴的方向是随机分布的。

当一个外磁场施加到铁块上时,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加,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,而铁块中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大,材料中原来和外磁场方向不同的磁畴越来越多地转移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到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,直到有一新的外能量来改变原子的排列状态为止。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。因而永久磁铁在加热、受到击打或坠落时可能会失去磁性。

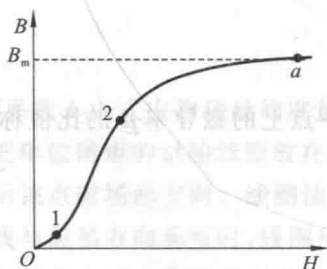


图 1-3 铁磁材料的初始磁化曲线

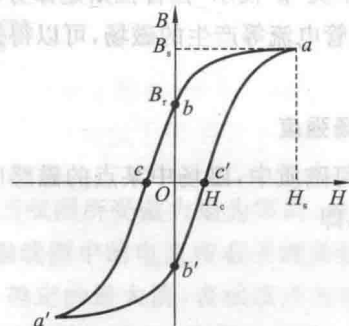


图 1-4 磁滞回线