

电机学



类目：机械类

书名：电机学

主编：王仕仙 冷芳 卢丽俊

出版社：湖南大学出版社

开本：大 16 开

书号：978-7-5667-3245-3

使用层次：通用

出版时间：2023 年 9 月

定价：49.80 元

印刷方式：双色

是否有资源：是



机械类创新融合教材
“互联网+”教育改革新理念教材

机械类创新融合教材
“互联网+”教育改革新理念教材

电机学

电机学

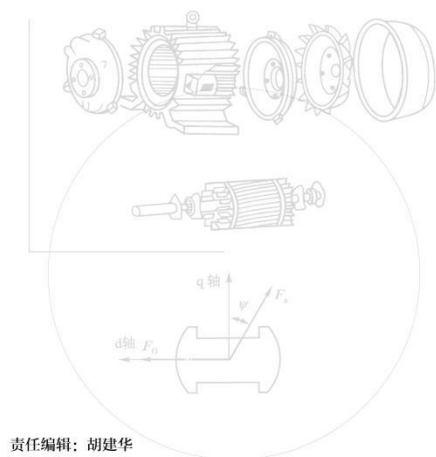


主编 © 王仕仙 冷 芳 卢丽俊

电机学 DIANJIXUE

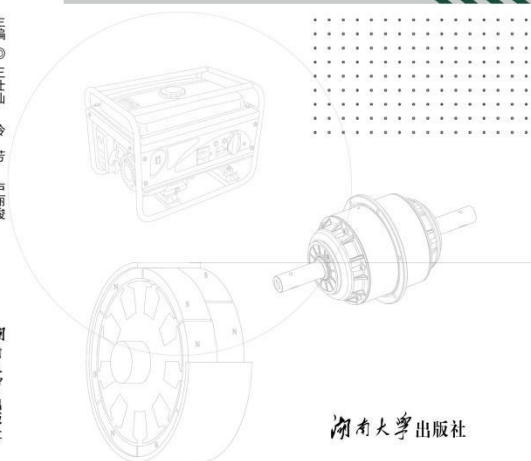
主编 © 王仕仙 冷 芳 卢丽俊

湖南大学出版社



责任编辑：胡建华

封面设计：旗语书装

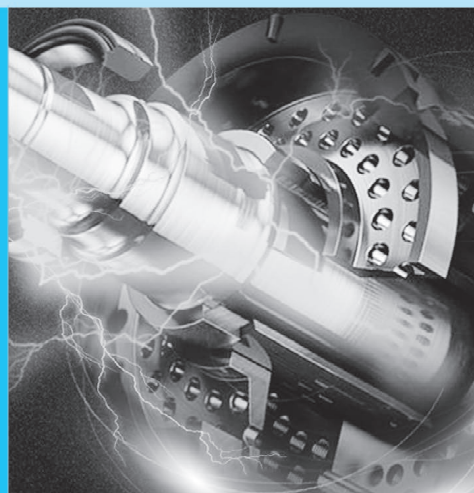


湖南大学出版社



机械类创新融合教材
“互联网+”教育改革创新理念教材

电机学

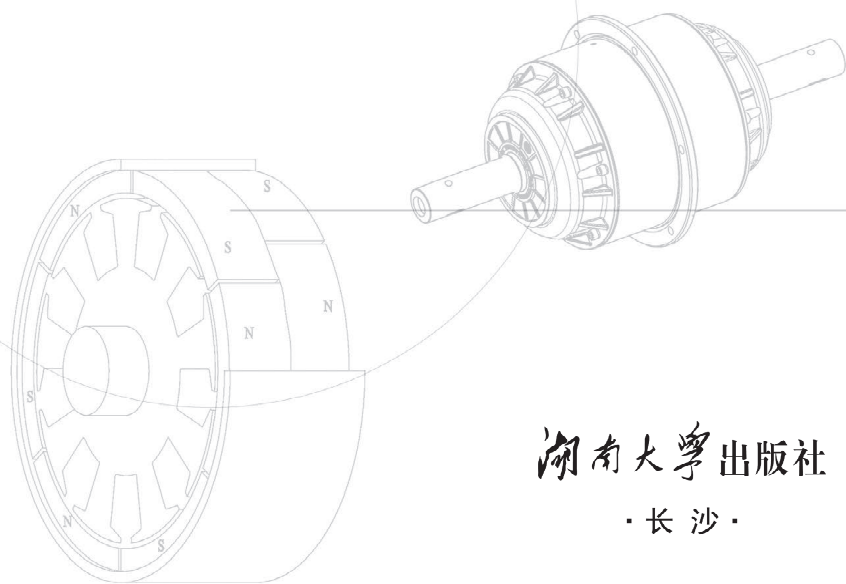


主 编 ◎ 王仕仙 冷 芳 卢丽俊

主 审 ◎ 徐 靖

副主编 ◎ 王晨丰 莫爵超 任桐慧

王彦新



湖南大学出版社

· 长 沙 ·

图书在版编目(CIP)数据

电机学 / 王仕仙, 冷芳, 卢丽俊主编. — 长沙 :
湖南大学出版社, 2023. 12
ISBN 978-7-5667-3245-3

I. ①电… II. ①王… ②冷… ③卢… III. ①电机学
IV. ①TM3

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 173026 号

电机学

DIANJI XUE

主 编: 王仕仙 冷 芳 卢丽俊

责任编辑: 吴颖辉

印 装: 廊坊市鸿煊印刷有限公司

开 本: 880 mm×1230 mm 1/16 印 张: 13.5 字 数: 320 千字

版 次: 2023 年 12 月第 1 版 印 次: 2023 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5667-3245-3

定 价: 49.80 元

出 版 人: 李文邦

出版发行: 湖南大学出版社

社 址: 湖南·长沙·岳麓山 邮 编: 410082

电 话: 0731-88822559(营销部), 88821174(编辑室), 88821006(出版部)

传 真: 0731-88822264(总编室)

网 址: <http://www.hnupress.com>

电子邮箱: xiaoshulianwenhua@163.com

版权所有, 盗版必究

图书凡有印装差错, 请与营销部联系

PREFACE

前言

电机学是电气类专业的一门重要的基础课,是研究电机及电力拖动系统基础理论的课程,它能直接为工农业生产服务。该课程内容抽象,理论性强,与工程实践结合紧密,通常被学生认为是一门难学的课程。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标,符合职业教育的课程基本要求和有关岗位资格和技术等级要求,符合职业教育的特点和规律,具有明显的职业教育特色,符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可作为学历教育教学用书,也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书侧重于稳态部分基本原理和基本概念的阐述,力争做到概念准确,同时强调基本理论的应用,让学生掌握分析电机的基本方法,建立牢固的物理概念,为学习后续课程和今后解决日常遇到的工程问题做好准备。

本书简化了一些复杂的数学推导过程,重在基本理论及其应用的表述,但不刻意追求理论的系统性。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

CONTENTS

第一章 绪 论	1
第一节 电机概述	2
第二节 电机分析常用的基本定律	4
第三节 电机常用材料及铁磁材料特性	7
第四节 磁路分析与计算	10
第五节 电机的机电能量转换过程与损耗	16
第六节 电机常用的分析方法和步骤	17
本章小结	18
思考练习	20
第二章 直流电机的基本工作原理和结构	22
第一节 直流电机的基本工作原理	23
第二节 直流电机的基本结构	24
第三节 直流电机的励磁方式	25
第四节 直流电机的型号和额定值	26
本章小结	27
思考练习	27
第三章 直流电机的运行原理及运行特性	29
第一节 直流电枢绕组简介	30
第二节 直流电机的电枢电动势和电磁转矩	35
第三节 直流电机的电枢反应	36
第四节 直流电机的换向简介	40
第五节 直流发电机的运行原理	42

第六节 直流电动机的运行原理	45
本章小结	54
思考练习	55
第四章 变压器	57
第一节 变压器的原理与结构	58
第二节 变压器空载运行	62
第三节 变压器负载运行	66
第四节 变压器的参数测定	71
第五节 标么值	74
第六节 变压器的运行特性	76
第七节 三相变压器	79
第八节 变压器并联运行	85
第九节 特种变压器	87
本章小结	93
思考练习	94
第五章 交流电机的绕组、电动势和磁动势	97
第一节 交流绕组简介	98
第二节 交流绕组的感应电动势	104
第三节 交流绕组的基波磁动势	110
本章小结	117
思考练习	118
第六章 三相异步电动机的基本结构和基本工作原理	120
第一节 三相异步电动机的基本结构	121
第二节 三相异步电动机的基本工作原理	123
第三节 三相异步电动机的型号和额定值	125
本章小结	127
思考练习	127
第七章 三相异步电动机的运行原理	129
第一节 三相异步电动机的空载运行	130
第二节 三相异步电动机的负载运行	132
第三节 三相异步电动机的等效电路	135
第四节 三相异步电动机的功率平衡和转矩特性	139
第五节 三相异步电动机的工作特性	143

第六节 三相异步电动机在不对称电压下的运行分析	147
第七节 单相异步电动机	148
本章小结	151
思考练习	152
第八章 三相异步电动机的起动和调速	154
第一节 三相异步电动机的起动	155
第二节 深槽式和双笼式异步电动机	159
第三节 三相异步电动机的调速方法简介	162
本章小结	164
思考练习	165
第九章 同步电机	166
第一节 同步电机基本原理与结构	167
第二节 同步电机磁场分析——电枢反应	171
第三节 同步电动机运行分析	174
第四节 同步电动机功率关系和功角特性	178
第五节 同步电动机的功率因数调节	182
第六节 同步电动机的起动	184
第七节 同步发电机运行分析	186
第八节 同步发电机的运行特性	188
第九节 同步发电机与电网并联运行	192
第十节 同步发电机的不对称运行	197
本章小结	201
思考练习	203
参考文献	206



第一章 绪 论

学习目标

- 了解本课程的性质及其学习方法；
- 了解电机的基本概念及其常用的分类方法；
- 掌握电机常用的基本定律；
- 了解电机中使用的材料及其特性；
- 掌握电机的各种损耗产生的原因及影响因素；
- 了解电机的发热、冷却相关内容；
- 掌握电机常用分析方法与步骤。

学习重难点

- 电机基本作用原理；
- 铁磁材料及其特性；
- 磁路定律及磁路计算；
- 电机的损耗分析。

第一节 电机概述

一、电机的基本概况

1. 电机的定义与分类

电机是以磁场为媒介，基于电磁感应原理实现机电能量转换或电能特性变换的电磁装置。

电机的分类方法很多，按运动方式来分，可以分为旋转电机和静止电机（即变压器）两种，其中旋转电机又可根据电流性质分为直流电机和交流电机，其中交流电机包括异步电机和同步电机两类。

按用途来分，电机可分为：

- (1) 发电机，将其他形式的能量转换为电能。
- (2) 电动机，将电能转换为机械能。
- (3) 变压器，按要求改变交流电压等级。
- (4) 控制电机等特种电机。

2. 电机在国民经济中的应用

电能是现代社会中最重要、应用最广泛的能源，具有易于控制和使用等突出特点。电能的生产、传输、变换和使用都是由电机来完成的，电机在现代社会几乎所有行业和部门中都占据着重要的地位。

对电力工业本身来说，电机就是发电厂和变电站的主要设备。火电厂利用汽轮发电机（水电厂利用水轮发电机）将机械能转换为电能，电能经各级变电站利用变压器改变电压等级，再进行传输和分配。此外，发电厂的多种辅助设备，如给水泵、鼓风机、调速器、传送带等，也都需要电动机驱动。

在机器制造业和其他所有轻、重型制造工业中，电动机的应用也非常广泛。各类工作母机，尤其是数控机床，都须由一台或多台不同容量和型式的电动机来拖动和控制。各种专用机械，如纺织机、造纸机、印刷机等也都需要电动机来驱动。一个现代化的大中型企业，通常要装备几千乃至几万台不同类型的电动机。

在石油和天然气的钻探及加压泵送过程中，在煤炭的开采和输送过程中，在化学提炼和加工设备中，在电气化铁路和城市交通以及作为现代化高速交通工具之一的磁悬浮列车中，在建筑、医药、粮食加工工业中，在供水和排灌系统中，在航空、航天领域，在制导、跟踪、定位等自动控制系统以及脉冲大功率电磁发射技术等国防高科技领域，在加速器等高能物理研究领域，在伺服传动、机器人传动和自动化控制领域，在电动工具、电动玩具、家用电器、办公自动化设备和计算机外部设备中，总之，在一切工农业生产、国防、文教、科技领域以及人们的日常生活中，电机的应用越来越广泛。一个工业化国家的普通家庭，家用电器中的电机总数在 50 台以上；一辆现代化的小轿车，其内装备的各类微特电机已超过 60 台。事实



上,电机发展到今天,早已成为提高生产效率和科技水平以及提高生活质量的主要载体之一。

纵观电机发展,其应用范围不断扩大,使用要求不断提高,结构类型不断增多,理论研究不断深入。特别是近40年来,伴随着电力电子技术和计算机技术的进步,尤其是超导技术的重大突破和新原理、新结构、新材料、新工艺、新方法的不断推动,电机发展更是呈现出勃勃生机,其前景是不可限量的。

二、课程性质、内容及学习方法

1. 课程性质

“电机学”是电气工程及其自动化专业必修的基础课,是研究电机及电力拖动系统基础理论的学科,它能直接为工农业生产服务。

2. 课程内容及任务

本课程系统地阐述旋转电机(直流电机、异步电机及同步电机)及变压器的基本结构、基本电磁关系、基本分析方法及基本特性,交、直流电力拖动系统运行性能、电机选择及实验方法。

通过学习本课程,应该达到如下要求:

(1) 掌握常用交、直流电机及变压器的基本原理(结构、工作原理、电磁关系、功率关系及基本特性)。

(2) 掌握交、直流电动机的机械特性及各种运转状态(正反转、起动、制动)。

(3) 掌握电力拖动系统的分析与计算。

(4) 掌握交、直流电动机的调速方法及技术经济指标。

(5) 掌握选择电机的原理与方法。

(6) 掌握电机实验方法。

3. 课程学习方法

由于本课程是专业基础课,兼具理论性和专业实用性的特点,又与工程实际紧密结合,因此,学习过程中应注意以下几个问题:

(1) 理论联系实际,重视科学实验和工程实践;

(2) 抓住重点,牢固掌握基本概念、基本原理和主要特性;

(3) 注重类比方法,在分析电机的共性和特点的过程中,加深对原理和性能的理解;

(4) 充分预习和复习,认真对待习题。

第二节 电机分析常用的基本定律

各种电机都是以电磁感应来实现基本工作原理的，本节简要介绍描述电、磁、动力学相关物理量之间关系的基本定律。

一、磁场的基本物理量

1. 磁感应强度（磁通密度）

磁感应强度 B 是描述磁场内某点的磁场强弱及方向的物理量，单位为特（特斯拉），单位符号为 T。

为了形象地描绘磁场，往往采用磁力线来表示磁场。磁力线是无头无尾的闭合曲线，其方向与产生它的电流方向之间满足右手螺旋关系，如图 1-1 所示，图中画出了直线电流及线圈电流产生的磁力线。

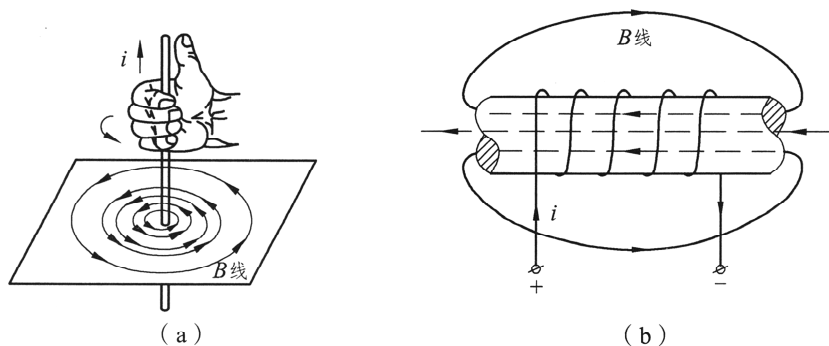


图 1-1 电流磁场中的磁力线

2. 磁通

穿过某一截面 S 的磁感应强度 B 的总量，即穿过截面 S 的磁力线根数称为磁感应通量，简称磁通，用 Φ 表示，单位为韦（韦伯），单位符号为 Wb。

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

在均匀磁场中，如果截面 S 与 B 垂直，如图 1-2 所示，则式 (1-1) 变为

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-2)$$

式中， B 为磁通密度，即磁感应强度； S 为面积。

3. 磁场强度

磁场强度 H 是计算磁场时引入的辅助物理量，单位为安（安培）/米，单位符号为 A/m。

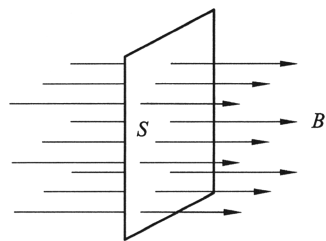


图 1-2 均匀磁场中的磁通

它与磁通密度 B 的关系为

$$B = \mu H \quad (1-3)$$

式中, μ 为磁场媒介的磁导率。

二、安培环路定律——描述电流产生磁场的规律

当导体中有电流流过时, 就会产生与该载流导体相交链的磁通。安培环路定律正是描述电流与其产生磁场之间关系的定律。

安培环路定律: 在磁场中, 沿任意闭合磁回路的磁场强度线积分等于该回路所交链的所有电流的代数和, 即

$$\oint_l H dl = \sum i \quad (1-4)$$

式中, $\sum i$ 就是该磁路所包围的全部电流的代数和, 规定电流方向与闭合回路绕行方向符合右手螺旋关系的取正号, 反之取负号。因此, 式 (1-4) 也称全电流定律。

如图 1-3 所示, 电流 i_1 、 i_2 、 i_3 产生的磁场, 沿封闭曲线磁场强度满足关系 $\oint_l H dl = i_1 + i_3 - i_2$ 。

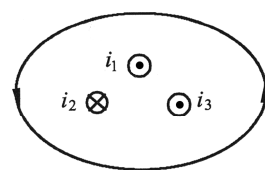


图 1-3 安培环路定律

三、电磁感应定律——描述磁场产生电势的规律

这里电磁感应定律分线圈电动势和运动电动势两种进行说明。

1. 线圈感应电动势

当与线圈交链的磁链 Ψ 随时间变化时, 线圈中将感应电动势 e , e 的大小等于线圈所交链的磁链对时间的变化率, e 的方向符合楞次定律, 数学描述为

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-5)$$

2. 运动导体感应电动势

导体在磁场中运动切割磁力线, 导体中将产生感应电动势:

$$e = \int (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad (1-6)$$

式中, $\mathbf{v}$ 为导体运动的线速度, 单位为 m/s ; $\mathbf{B}$ 为导体所处的磁通密度, 单位为 T ; $\mathbf{l}$ 为导体的有效长度, 单位为 m ; e 为导体中感应电动势, 单位为 V 。

若磁场均匀、导线为直线, 且运动方向、磁场方向和导体三者相互垂直, 则有

$$e = B \times \mathbf{v} \times \mathbf{l} \quad (1-7)$$

电动势方向由右手定则判定: 伸开右手, 磁力线从手心穿过, 大拇指指向导体相对于磁场的运动方向, 则四指所指的方向为感应电动势的方向, 如图 1-4 所示。

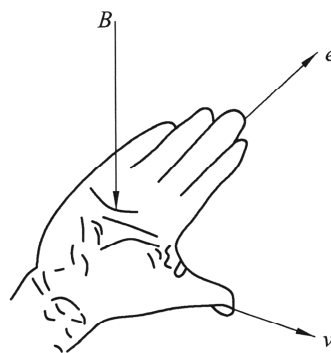


图 1-4 确定导体电动势方向的右手定则

四、电磁力定律——描述电磁作用产生力的规律

载流导体在磁场中会受到力的作用，这种力是磁场与电流相互作用所产生的，故称为电磁力，其大小为

$$df = i dl \times \vec{B} \quad (1-8)$$

式中， B 为导体所在位置的磁通密度，单位为 T； i 为导体中的电流，单位为 A； l 为导体在磁场中的有效长度，单位为 m； f 为作用在导体上的电磁力，单位为 N·m。

若磁场与导体相互垂直，则有

$$f = B \times i \times l \quad (1-9)$$

电磁力的方向可用左手定则判定，如图 1-5 所示，伸开左手，磁力线从手心穿过，四指指向电流的方向，则大拇指所指的方向即为电磁力的方向。

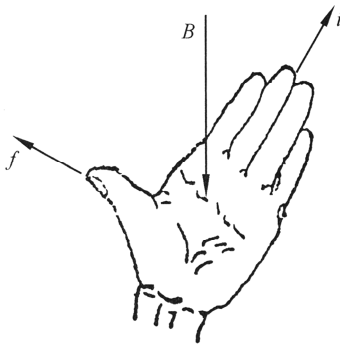


图 1-5 确定载流导体受力方向的左手定则

五、电路定律

电路定律大家相对熟悉，这里只做简单总结，详细分析请参考《电路分析》。

1. 基尔霍夫电流定律

在集总参数电路中的任一广义节点，所有支路电流的代数和恒等于零，即

$$\sum i = 0 \quad (1-10)$$

式中， i 为支路电流，单位为 A。

2. 基尔霍夫电压定律

在集总参数电路中的任一广义回路，所有支路或元件电压的代数和恒等于零，即

$$\sum u = 0 \quad (1-11)$$

式中， u 为支路电压，单位为 V。

六、牛顿第二运动定律

根据牛顿第二运动定律，做直线运动的刚体，作用在电动机轴上的电动力 F 与阻力 F_L 以及速度变化时产生的惯性力 ma 之间必须遵循下列基本运动方程式，即

$$F - F_L = ma \quad (1-12)$$

式中， F 为刚体上的作用力，单位为 N； m 为刚体质量，单位为 kg； a 为运动加速度，单位为 m/s^2 。

做旋转运动的刚体，作用在电动机轴上的电动力 F 与阻力 F_L 以及速度变化时产生的惯性力 ma 之间必须遵循下列基本运动方程式，即

$$F - F_L = ma \quad (1-13)$$

式中， F 为刚体上的作用力，单位为 N； m 为刚体质量，单位为 kg； a 为运动加速度，单位为 m/s^2 。

第三节 电机常用材料及铁磁材料特性

一、电机常用材料

电机是依据电磁感应定律实现能量转换的，因此，电机中必须要有电流通道和磁通通道，亦即通常所说的电路和磁路，另外，电机中还需要有能将电、磁两部分融合为一个有机整体的结构材料。

根据功能，我们把电机常用的材料分为 4 类：

(1) 导电材料。导电材料作为电机中的电路，常采用导电性能好、电阻损耗小的材料，如紫铜或铝。

(2) 绝缘材料。绝缘材料作为电路（导电材料）和其余部分之间的电气隔离，常采用介电强度高而且耐热强度好的材料，如聚酯漆、环氧树脂、玻璃丝带、电工纸、云母片、玻璃纤维板等。

(3) 铁磁材料。铁磁材料又称导磁材料，作为电机中的磁路，常用磁导率极高（可达真空磁导率的数百乃至数千倍）的硅钢片、钢板和铸钢等。

(4) 结构材料。结构材料使各部分构成整体，支撑和连接其他机械。结构材料要求机械强度好、加工方便，常用铸铁、铸钢、铝合金及工程材料。

这 4 种材料中，铁磁材料的特性直接影响电机的磁场，故这里做重点介绍。

二、铁磁材料的特性

1. 铁磁材料的导磁性与饱和性

磁导率是用来衡量材料导磁性能的物理量，它与磁场强度的乘积等于磁感应强度，即

$$B = \mu H \quad (1-14)$$

式中， μ 为磁导率，单位为亨/米（H/m）； H 为磁场强度； B 为磁通密度。

真空的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m，而铁磁材料的 $\mu \gg \mu_0$ ，一般电机所采用的铁磁材料的 μ 为 μ_0 的 2 000~8 000 倍。因此，铁磁材料具有高的导磁性。

研究发现，铁磁材料由许许多多的磁畴构成，每个磁畴相当于一个小永磁体，具有较强的磁矩，如图 1-6 所示。在未磁化的材料中，所有磁畴排列杂乱，因此材料对外不显磁性，如图 1-6（a）所示。当外部磁场施加到这一材料时，磁畴就会沿施加的磁场方向转向，所有的磁畴平行，铁磁材料对外表现出磁性，如图 1-6（b）所示。因此，当外磁场加到铁磁材料时，铁磁材料会产生比外部磁场单独作用更强的磁场，这也是铁磁材料的磁导率比非铁磁材料大得多的原因。



图 1-6 铁磁材料的磁化

在磁性材料的磁化过程中,随着励磁电流的增大,外磁场和附加磁场都将增大,但当励磁电流增大到一定值时,几乎所有的磁畴都与外磁场的方向一致,附加磁场就不再随励磁电流的增大而继续增强,整个磁化磁场的磁感应强度接近饱和,这种现象称为磁饱和现象。

2. 铁磁材料的磁化曲线

磁性材料的磁化特性可用磁化曲线 $B=f(H)$ 来表示,如图 1-7 所示。此曲线可分成三段: Oa 段的 B 与 H 差不多成正比地增加; bc 段的 B 增加较缓慢,增加速度下降; c 点以后部分的 B 增加很小,逐渐趋于饱和。

由此可见, B 与 H 不成正比,所以磁性材料的磁导率 μ 不是常数,它将随着 H 的变化而变化,如图 1-7 中 $\mu=f(H)$ 曲线。

若将铁磁材料进行周期性磁化, B 和 H 之间的变化关系就会变成如图 1-8 中的 $abcdefa$ 所示形状。 H 开始从零增加到 H_m 时, B 值将沿 Oa 从零增加到 B_m ; 以后逐渐减小磁场强度 H , B 值将沿曲线 ab 下降。当 $H=0$ 时, B 值并不为零,而等于 B_r , B_r 称为剩余磁通密度,简称剩磁。要使 B 值从 B_r 减小到零,必须加上相应的反向外磁场,此反向磁场强度称为矫顽力,用 H_c 表示。铁磁材料所具有的这种磁通密度 B 的变化滞后于磁场强度 H 的变化的现象,叫做磁滞。呈现磁滞现象的 $B-H$ 闭合回线,称为磁滞回线,如图 1-8 中的 $abcdefa$ 所示。曲线段 $abcd$ 为磁滞回线下降分支, $defa$ 为磁滞回线上升分支。



铁磁材料的磁化曲线

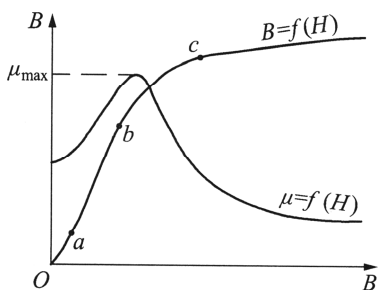


图 1-7 磁化曲线

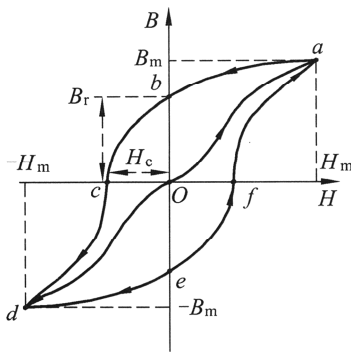


图 1-8 铁磁材料的磁化特性

对于同一铁磁材料,选择不同的磁场强度 H_m 反复磁化时,可得出不同的磁滞回线,将各条磁滞回线的顶点连接起来所得的曲线称为基本磁化曲线或平均磁化曲线。起始磁化曲线与平均磁化曲线相差甚小,如图 1-9 的虚线所示。

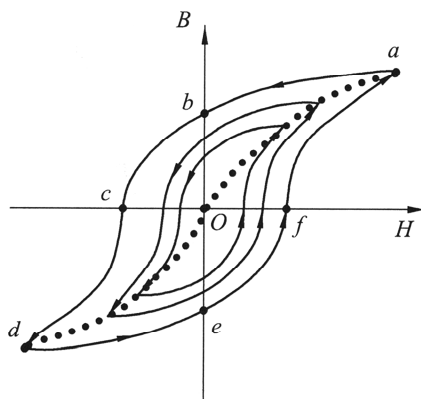


图 1-9 铁磁材料的基本磁化曲线

铁磁材料的磁导率 μ 除了比 μ_0 大得多外，还与磁场强度以及物质磁化状态的历史有关，所以铁磁材料的 μ 不是一个常数。在工程计算时，不按 $H=B/\mu$ 进行计算，而是按铁磁材料的基本磁化曲线计算。

磁滞回线较窄、剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都小的铁磁材料属于软磁材料，如硅钢片、铁镍合金、铁淦氧、铸钢等。这些材料磁导率较高，磁滞回线包围面积小，磁滞损耗小，多用作电机、变压器的铁芯。

磁滞回线较宽、剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都大的铁磁材料属于硬磁材料，如钨钢、钴钢、铝镍钴、铁氧体、钕铁硼等，硬磁材料主要用作永久磁铁。

3. 铁磁材料的磁滞现象与磁滞损耗

铁磁材料中的磁畴在外磁场作用下，发生移动和倒转时，彼此之间产生“摩擦”。由于这种“摩擦”的存在，当外磁场停止作用后，磁畴与外磁场方向一致的排列便被保留下来，不能恢复原状。铁磁材料这种磁通密度的变化滞后于磁场强度的变化的现象称为磁滞现象。

铁磁材料在交变磁场的作用下而反复磁化的过程中，磁畴之间不停地互相摩擦，消耗能量，因此引起损耗。这种损耗称为磁滞损耗。磁滞回线面积越大，损耗越大。磁通密度最大值 B_m 越大时，磁滞回线面积也越大。试验表明，交变磁化时，磁滞损耗 p_h 与磁通的交变频率 f 成正比，与磁通密度的幅值 B_m 的 n 次方成正比，与铁芯重量 G 成正比，即

$$p_h = C_h f B_m^n G \quad (1-15)$$

式中， C_h 为磁滞损耗系数；对一般的电工用硅钢片， $n=1.6\sim 2.3$ 。由于硅钢片的磁滞回线面积较小，所以电机和变压器的铁芯都采用硅钢片。

4. 铁磁材料的涡流

因铁芯是导电的，当通过铁芯的磁通发生交变时，根据电磁感应定律，在铁芯中将产生感应电动势，并引起环流。这些环流在铁芯内部围绕磁通呈旋涡状流动，如图 1-10 所示，称为涡流。涡流在铁芯中引起损耗，称为涡流损耗。

设涡流为 i_e ，涡流回路的电阻为 R_e ，涡流感应电动势 $E_e \propto f \times B_m$ ，则涡流损耗 $p_e = i_e^2 R_e = E_e^2 / R_e \propto f^2 \times B_m^2$ 。可见，频率越高，

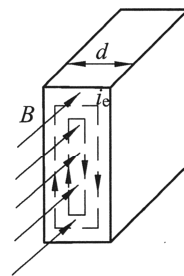


图 1-10 一片硅钢片中的涡流

磁通密度越大, 感应电动势就越大, 涡流损耗也越大; 铁芯的电阻越小, 涡流损耗就越小。对电工钢片, 涡流损耗还与钢片厚度 d 的平方成正比, 经推导可知, 涡流损耗为

$$P_e = C_e d^2 f^2 B_m^2 G \quad (1-16)$$

式中, C_e 为涡流损耗系数。可见, 为了减小涡流损耗首先应减小钢片的厚度, 所以电工钢片的厚度做成 $0.35 \sim 0.5 \text{ mm}$; 其次是增加涡流回路的电阻, 所以电工钢片中常加入 4% 左右的硅, 变成硅钢片, 用以提高电阻。

在电机和变压器中, 通常把磁滞损耗和涡流损耗合在一起, 称为铁芯损耗, 简称铁耗。

对于一般的电工钢片, 正常工作点的磁通密度 B 为 $1 \text{ T} < B_m < 1.8 \text{ T}$, 铁芯损耗可近似为

$$p_{Fe} = p_h + p_e \approx C V_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G \quad (1-17)$$

式中, G_{Fe} 为铁芯的损耗系数; G 为铁芯重量。可见, 铁芯损耗与频率的 1.3 次方、磁通密度的平方及铁芯重量成正比。

第四节 磁路分析与计算

一、磁路的概念

磁场以场的形式存在, 分析复杂, 工程上总是力图将场的问题化简为路的问题求解, 即用磁路来代替磁场进行分析。

磁路是磁通所通过的闭合路径, 是以高导磁性材料构成的使磁通被限制在所确定的路径之中的一种结构 (和电流在电路中被导体所限制极为相似)。

图 1-11 所示是电机的几种常用磁路结构。图 (a) 是普通变压器的磁路, 它全部由铁磁材料组成; 图 (b) 是旋转电机的磁路, 也是由铁磁材料和空气隙组成。图中虚线表示磁通的路径。

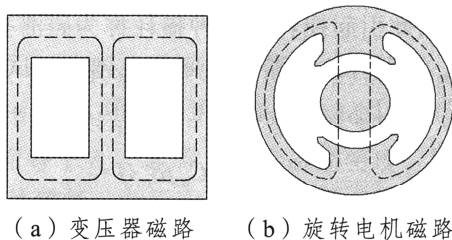


图 1-11 电机的几种常用磁路结构

我们用与电路类比的方法来进行磁路的分析计算。因此, 类比电路基本定律, 引入表达磁动势 F 、磁通 Φ 和磁路结构 (如材料、形状、几何尺寸等) 关系的磁路基本定律, 有磁路欧姆定律、磁路基尔霍夫第一定律和磁路基尔霍夫第二定律等, 下面分别予以讨论。

二、磁路基本定律

1. 磁路欧姆定律

图 1-12 是一个简单无分支磁路的示意图。铁芯上绕有 N 匝线圈，通以电流 i 产生的沿铁芯闭合的主磁通 Φ 。设铁芯截面面积为 S ，平均磁路长度为 l ，铁磁材料的磁导率为 μ (μ 不是常数，随磁感应强度 B 变化)。

忽略漏磁通，并且认为磁路 l 上的磁场强度 H 处处相等，于是根据全电流定律有

$$\oint H dl = Hl = Ni \quad (1-18)$$

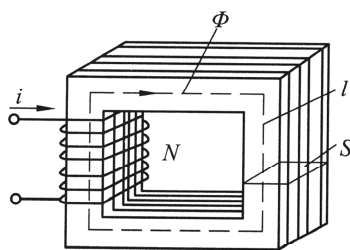


图 1-12 无分支磁路

因 $H = B/\mu$, $B = \Phi/S$, 于是可得

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{Ni}{l/(\mu S)} = A_m F$$

$$\text{或} \quad F = Ni = Hl = \frac{Bl}{\mu} = \Phi \frac{l}{\mu S} = \Phi R_m = \frac{\Phi}{A_m} \quad (1-19)$$

式中, $F = Ni$ 为磁动势; $R_m = \frac{l}{\mu S}$ 为磁阻; $A_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu S}{l}$ 为磁导。

式 (1-19) 即所谓的磁路欧姆定律, 与电路欧姆定律相似。它表明, 当磁阻 R_m 一定时 (即确定磁路情况下), 磁动势 F 越大, 所激发的磁通量 Φ 也越大; 而当磁动势 F 一定时, 磁阻 R_m 越大, 则产生的磁通量 Φ 越小。

在磁路中, 磁阻 R_m 与磁导率 μ 成反比, 空气的磁导率 μ_0 远小于铁芯的磁导率 μ_{Fe} , 这表明漏磁路 (空气隙) 的 R_m 远大于铁芯的 R_m , 故分析中可忽略漏磁通 Φ_o 。

根据式 (1-19) 和 $L = \Psi/i$, 有 $L = N\Phi/i = N^2 A_m$ 。

2. 磁路基尔霍夫第一定律

如果铁芯不是一个简单的回路, 而是带有并联分支的磁路, 从而形成磁路的节点, 则当忽略漏磁通时, 在磁路任何一个节点处, 磁通的代数和恒等于零, 即

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-20)$$

式 (1-20) 与电路第一定律 $\sum i = 0$ 形式上相似, 因此称为磁路的基尔霍夫第一定律, 就是磁通连续性定律。若令流入节点的磁通定为 (+), 则流出该节点的磁通定为 (-), 如图 1-13 封闭面处有

$$\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0$$

磁路基尔霍夫第一定律表明, 进入或穿出任一封闭面的总磁通量的代数和等于零, 或穿

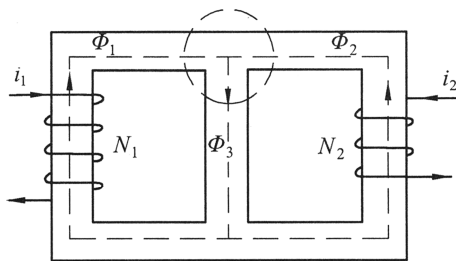


图 1-13 磁路欧姆定律

入任一封闭面的磁通量恒等于穿出该封闭面的磁通量。

3. 磁路基尔霍夫第二定律

工程应用中的磁路，其几何形状往往是比较复杂的，直接利用安培环路定律的积分形式进行计算有一定的困难。为此，在计算磁路时，要进行简化。

简化的办法是把磁路分段，几何形状相同的分为一段，找出它的平均磁场强度，再乘上这段磁路的平均长度，求得该段的磁位降（也可理解为一段磁路所消耗的磁动势）；然后把各段磁路的磁位降相加，结果就是总磁动势。即沿任何闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁位降的总和，这就是磁路基尔霍夫第二定律，用公式表示为

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum i = iN \quad (1-21)$$

式中， H_k 为磁路里第 k 段磁路的磁场强度，单位为 A/m； l_k 为第 k 段磁路的平均长度，单位为 m； iN 为作用在整个磁路上的磁动势，即全电流数，单位为安·匝； N 为励磁线圈的匝数。

式 (1-21) 也可以理解为：消耗在任一闭合磁回路上的磁动势，等于该磁路所交链的全部电流。

图 1-14 中所示磁路可分为两段，一段为铁磁材料组成的铁芯，总长度为 $2l_1 + 2l_2 - \delta$ ，磁场强度为 H_1 ；另一段为气隙，长度为 δ ，磁场强度为 H_δ 。铁芯上有两组线圈，一组线圈的电流为 i_1 ，线圈的匝数为 N_1 ，另一组线圈的电流为 i_2 ，线圈的匝数为 N_2 ，由磁路基尔霍夫第二定律可得

$$H_1 (2l_1 + 2l_2 - \delta) + H_\delta \delta = i_1 N_1 + i_2 N_2$$

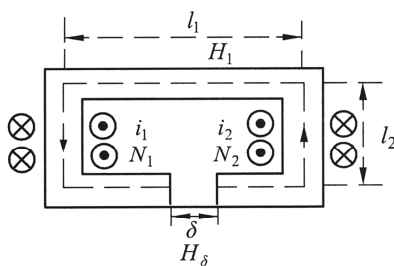


图 1-14 磁路基尔霍夫第二定律

三、磁路和电路的类比和区别

图 1-15 是相对应的两种电路和磁路。我们将磁路和电路进行类比，可以发现磁路中的某些物理量与电路中的某些物理量有对应关系，同时磁路中某些物理量之间与电路中某些物理量之间也有相似的关系，类比关系见表 1-1。

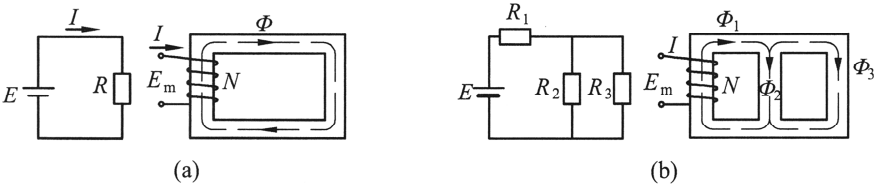


图 1-15 对应的电路和磁路

表 1-1 磁路和电路的类比关系

物理量		基 本 定 律	
磁路	电路	磁 路	电 路
磁动势 F	电动势 E	欧姆定律 $\Phi = F/R_m$	欧姆定律 $I = E/R$
磁通量 Φ	电流 I	基尔霍夫第一定律 $\sum \Phi = 0$	基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$
磁阻 R_m	电阻 R	基尔霍夫第二定律 $\sum F = \sum \Phi R_m$	基尔霍夫第二定律 $\sum e = \sum u$
磁导 A	电导 G		

但是，要注意电路与磁路仅是数学形式上的类似，它们有着本质的区别：

- (1) 电路中有电流就有功率损耗，磁路中恒定磁通下没有功率损耗。
- (2) 电流全部在导体中流动，而在磁路中没有绝对的磁绝缘体，除在铁芯的磁通外，空气中也有漏磁通。
- (3) 电阻为常量，磁阻为变量。
- (4) 对于线性电路可应用叠加原理，而当磁路饱和时为非线性，不能应用叠加原理。

四、磁路的计算

1. 直流磁路及其计算

直流磁路计算有已知磁通 Φ 求磁动势 F ，或已知磁动势 F 求磁通 Φ 两类问题。直流电机的磁路计算属于第一类问题，所以我们主要介绍第一类问题的计算，然后简单介绍第二类问题。

已知磁通 Φ 求磁动势 F 的计算步骤如下：

- (1) 将磁路进行分段，每一段磁路应是均匀的（即材料相同，截面相同），算出各段的截面积 S （单位为 m^2 ）及磁路的平均长度 l （单位为 m ）。
- (2) 根据已给定的磁通 Φ （单位为 Wb ），由 $\Phi/S = B$ 计算出各段的磁通密度（单位为 T ）。对于分支磁路，给定的 Φ 只是某一支路的，因此往往要结合磁路基尔霍夫第一、第二定律，

以确定另外各支路的磁通。

(3) 根据各段的磁通密度 B ，求出对应的磁场强度 H （单位为 A/m ）。有两种类型：①对铁磁材料，由相应的基本磁化曲线（或表格）从 B 查出 H ；②对空气隙或非磁性间隙，由 $H=N/\mu_0$ 算出，其中 $\mu_0=4\pi\times 10^{-7} H/m$ （真空磁导率）。

(4) 根据各段的磁场强度 H 和磁路段平均长度 l ，计算各段磁压降 Hl 。

(5) 由磁路基尔霍夫第二定律，求出 $F=IN$ （单位为安·匝），并计算出线圈电流 I 。如果 F 是磁路磁场的源，则线圈称为励磁线圈，算出的电流称为励磁电流。

将闭合磁路进行分段，分别求出各段磁路的磁压降，然后应用磁路基尔霍夫定律，将回路各段磁压降相加而得磁动势的方法，称为磁路的分段计算法。

对于磁路计算的第二类问题，即已知磁动势求磁通，常可用试探法，即先假定一个磁通量 Φ ，计算得 F 。如果算出的 F 与给定的磁动势相等，则 Φ 就是所求；如果 F 与给定的磁动势不等，则经分析决定 Φ 应增加还是减小后，再计算磁动势，直至相等为止。试探法也称逐次近似法，这种方法可用计算机求解。

【例 1-1】 在图 1-16 中，铁芯用 DR530 叠成，它的截面面积 $S=2\times 4\times 10^{-4} m^2$ ，铁芯的平均长度 $l_{Fe}=0.3 m$ ，空气隙长度 $\delta=5\times 10^{-4} m$ ，线圈的匝数 $N=3$ 匝。试求产生磁通 $\Phi=10.4\times 10^{-4} Wb$ 时所需要的励磁磁动势 IN 和励磁电流 I 。考虑到气隙磁场的边缘效应，在计算气隙有效面积时，通常在长、宽方向各增加一个 δ 值。

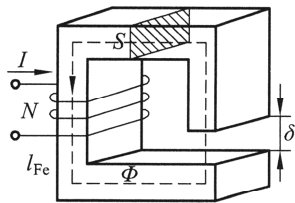


图 1-16 简单串联磁路

解 铁芯内磁通密度为 $B_{Fe}=\frac{\Phi}{S}=\frac{10.4\times 10^{-4} Wb}{2\times 4\times 10^{-4} m^2}=1.3 T$

从图中 DR530 的磁化曲线查得，与铁芯内磁通密度对应的 H_{Fe} 为 $800 A/m$ 。

铁芯段的磁位降 $H_{Fe}l_{Fe}=800 A/m\times 0.3 m=240 A$

空气隙的磁通密度 $B_{\delta}=\frac{\Phi}{S_{\delta}}=\frac{10.4\times 10^{-4} Wb}{2.05\times 4.05\times 10^{-4} m^2}=1.253 T$

空气隙的磁场强度 $H_{\delta}=\frac{B_{\delta}}{\mu_0}=\frac{1.253 T}{4\pi\times 10^{-7} m^2}=9.973\times 10^5 A/m$

空气隙的磁位降 $H_{\delta}l_{\delta}=9.973\times 10^5 A/m\times 5\times 10^{-4} m=498.6 A$

励磁磁动势 $F=NI=H_{\delta}l_{\delta}+H_{Fe}l_{Fe}=498.6 A+240 A=738.6 A$

励磁电流 $I=\frac{F}{N}=\frac{738.6 A}{3}=246.2 A$

2. 交流磁路及其计算

在交流系统中，电压和磁通的波形非常接近于时间的正弦函数。可以采用如图 1-17 所示的闭合铁芯磁路作为模型（即没有气隙），来描述磁性材料稳态交流工作的励磁特性。设磁路

长度为 l ，贯穿铁芯长度的横截面面积为 S ，并假设铁芯磁通 Φ 按正弦规律变化，因此

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t = B_m S \cos \omega t \quad (1-22)$$

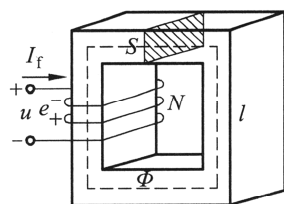


图 1-17 简单磁路

式中， Φ_m 为铁芯磁通的幅值； B_m 为磁密的幅值； ω 为角频率 $\omega = 2\pi f$ ， f 为电源频率。

从式 (1-5) 知，在 N 匝绕组中感应的电势为

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} = \omega N \Phi_m \sin \omega t = 2\pi f N \Phi_m \sin \omega t \quad (1-23)$$

由于铁芯磁化曲线的非线性，因此励磁电流 i_f 的波形不同于磁通的正弦波形。励磁电流随时间变化的函数曲线，可以用作图法描绘出来，如图 1-18 所示。

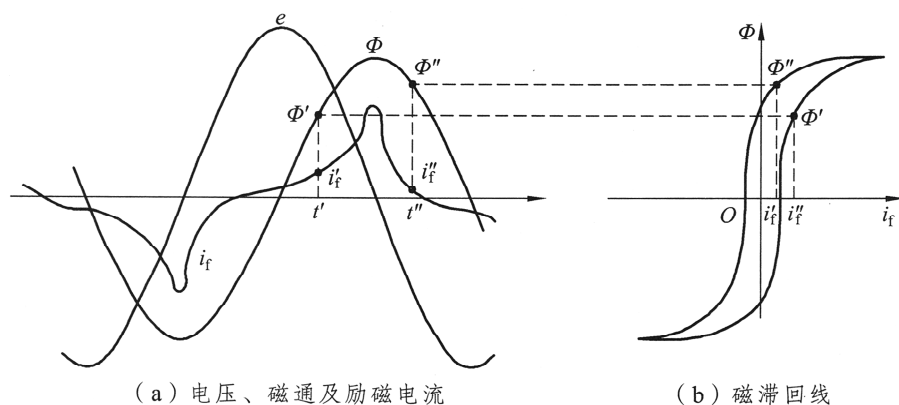


图 1-18 励磁现象

在时刻 t' ，磁通为 Φ' 而电流为 i_f' ；在时刻 t'' ，相应的值为 Φ'' 和 i_f'' 。注意到，由于磁滞回线是多值的，需要从磁滞回线的磁通上升段仔细选取上升磁通值（图 1-18 中 Φ' ）；同样，磁滞回线的磁通下降段，必须选作求取下降磁通值（图 1-18 中 Φ'' ）。可见，磁滞回线由于饱和效应而变平，故励磁电流的波形为尖顶波。

励磁电流提供产生铁芯磁通所需要的磁动势，部分能量作为损耗耗散，引起铁芯发热，其余能量以无功功率出现。无功功率在铁芯中不耗散，由励磁电源循环供给和吸收。

在直流磁路中，励磁电流是恒定的，在线圈和铁芯中不会产生感应电动势，在一定的电压下，线圈中的电流决定于线圈本身的电阻 R ，磁路中没有损耗。在交流磁路中，由于磁通在变化，将产生两种损耗，即涡流损耗和磁滞损耗。

第五节 电机的机电能量转换过程与损耗

一、机电能量转换过程简述

电机在进行能量转换的过程中，存在着电能、机械能、磁场储能和热能四种能量形态。无论是发电机把机械能转换为电能，还是电动机将电能转换为机械能，在能量转换过程中，都是以耦合磁场作为媒介，而且，满足能量守恒原理。即

$$\text{输入能量} = \text{耦合磁场储能} + \text{损耗} + \text{输出能量}$$

能量平衡关系如图 1-19 所示。

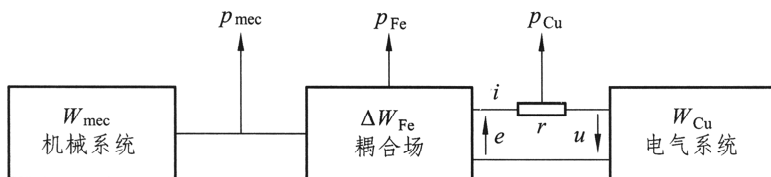


图 1-19 能量转换示意图

对电动机有：吸收电能→气隙（耦合磁场）→电磁功率→电磁转矩→驱动负载（机械功率）。

对发电机有：机械功率（原动机）→气隙（耦合磁场）→电磁转矩→电磁功率→输出电能。

可见，电机进行机电能量转换的关键是耦合磁场对电气系统和机械系统的作用和反作用。

耦合磁场对电气系统的作用或反作用是通过感应电动势表现出来的。当与电机绕组交链的磁通发生变化时，绕组内就会感应出电动势。正因为有了感应电动势，发电机才能向电气系统输出电磁功率（ $P_{em} > 0$ ），而电动机亦能从电气系统吸取电磁功率（ $P_{em} < 0$ ）。

耦合磁场对机械系统的作用或反作用是通过电磁力或电磁转矩表现出来的。以旋转电机为例，当置于耦合磁场中的电机绕组内有电流流过时，由电磁力定律可知转子就受到电磁转矩的作用。在发电机中，电磁转矩对转子起制动作用，而在电动机中是起驱动作用。于是，原动机必须克服制动性质的电磁转矩，即输入机械功率给发电机，才能拖动发电机以恒速旋转，将机械能转换为电能输出。对电动机，要拖动生产机械、输出机械功率，就必须汲取电磁功率以产生具有驱动性质的电磁转矩，维持转子的恒速旋转，将电能转换为机械能。

总观电机的机电能量转换过程，起重要作用的是电磁功率和电磁转矩，而无论是电磁功率还是电磁转矩，都需要通过耦合磁场——气隙磁场的作用才能产生，因此，联系电气系统和机械系统的耦合磁场具有极为重要的地位。



机电能量转换过程简述

二、电机的损耗、发热与冷却

1. 电机的损耗

电机的损耗可分为以下 4 种。

(1) 电路损耗：电流通过导电材料引起的损耗，由于导电材料常采用铜材料，故又称其为铜耗，表示为 p_{Cu} 。

$$p_{Cu} = I^2 R \quad (1-24)$$

(2) 磁场损耗：磁路中的铁芯损耗（包括磁滞损耗和涡流损耗），又称铁耗，表示为 P_{Fe} 。根据前面的分析，有

$$p_{Fe} \propto f^{1.3} B_m^2$$

(3) 机械损耗：机械运动产生的损耗，表示为 p_{mec} 。

(4) 附加损耗：其他原因引起的损耗。

4 个损耗中，铜耗与负载电流有效值的平方成正比，负载变化时铜耗必然要变化，故又称铜耗为可变损耗；其他 3 类损耗在负载变化时变化很小，可以忽略，故又统称为不变损耗。

电机运行产生的损耗全部转换为热能，引起电机温度升高。

2. 电机的发热与冷却

温度过高会影响耐热能力最弱的绝缘材料，使其寿命大大缩短，严重时可能将电机烧毁。所以对于不同的绝缘材料，有相应的最高允许工作温度。在此温度下长期工作，绝缘材料的电性能、机械性能和化学性能不会显著变坏；如超过此温度，则这些性能迅速变坏或引起绝缘材料快速老化。因此电机各部分应该因其结构材料的不同而有一个最高工作温度的限值。

为了保证电机正常运行和具有适当的寿命（能正常运行的使用年限），电机各部分的温升不应超过一定数值，也就是说电机各部分的允许温升有一定的最大值。

可以通过提高电机的散热能力来降低电机的温升，以提高冷却效果。必要时可以采用冷却介质对电机进行冷却。所谓冷却介质是指能够直接或间接地把定子和转子绕组、铁芯以及轴承的热量带走的物质，如空气、水和油类等。

第六节 电机常用的分析方法和步骤

虽然电机的种类很多，分析研究方法也各有特点，但其基本步骤和基本方法还是有很多共同之处的，尤其是对旋转电机。下面综合介绍旋转电机的分析步骤和研究方法。

一、常用的研究方法

在分析电机内部磁场并建立分析模型时，常用方法有：

(1) 不计磁路饱和，用叠加原理分析电机内的各个磁场和气隙合成磁场以及与磁场——

对应的感应电动势。

(2) 在解决交流电机中由于定、转子绕组匝数不等、相数不等、频率不等而引起的困难时,常采用参数和频率折算方法进行等效处理。

(3) 各种电机都有对应的等效电路分析模型,一般电机的稳态分析均可归结为等效电路的求解,交流电机还要应用相量图分析方法。

(4) 交流电机的不对称运行分析采用对称分量法。

(5) 在研究凸极电机时,常用双反应理论。

二、基本分析步骤

对直流电机、变压器、异步电机、同步电机等多种电机类型进行分析时按以下的基本步骤进行:

(1) 分析电机的基本工作原理,并结合原理来分析电机的结构,对实物模型进行分析。

(2) 磁场分析(由空载到负载电机中磁场的建立及变化)。

(3) 应用基本定律,分析电机的电磁关系,建立电机中的电动势、磁动势、功率和转矩的平衡方程。

(4) 对基本平衡方程进行等效,推导出等值电路,建立电机的数学模型(基本方程)。

(5) 求解基本方程,分析电机的运行特性和基本控制方法。

(6) 研究各类电机的特殊问题。

本章小结

1. 电机基本作用原理

电机是以磁场为媒介,基于电磁感应原理实现机电能量转换或电能特性变换的电磁装置。分析电机基本作用原理首先应该掌握几个与电、磁相关的重要定律。

(1) 全电流定律(安培环路定律):描述电流励磁产生磁场的关系。

在磁场中沿任意闭合回路磁场强度的线积分等于穿过该回路的所有电流的代数和,即

$$\oint_l H \cdot dl = \int_s J \cdot dS$$

式中,电流方向与闭合回路环绕方向符合右手螺旋关系时为正,反之为负。

对于仅存在载流导体的情况: $\oint_l H \cdot dl = \sum I$

(2) 电磁感应定律:描述磁场在导体或线圈中感应的电动势与磁场大小之间的关系。

$$\text{变压器电势: } e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\text{运动电势: } e = \int (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l}$$

若磁场均匀、导线为直线,且运动方向、磁场和导线三者相互垂直,则有

$$e = Blv$$

(3) 电磁力定律：描述电磁感应产生力的关系。

载流导体在磁场中受力，其大小为： $\overline{d\boldsymbol{f}}=i\overline{d\boldsymbol{l}}\times\overline{\boldsymbol{B}}$ 。

(4) 电路定律。

基尔霍夫第一定律（电流定理）KCL： $\sum i=0$ 。

基尔霍夫第二定律（电压定理）KVL： $\sum u=\sum e$ 。

(5) 牛顿第二运动定律。

对平动刚体： $\sum \boldsymbol{f}=m\frac{d\boldsymbol{v}}{dt}$

对旋转刚体： $\sum \boldsymbol{T}=J\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}$

2. 磁路和磁性材料

(1) 安培环路定律：

$$\oint_L \boldsymbol{H}\cdot d\boldsymbol{l}=\sum i$$

(2) 磁路欧姆定律：作用在磁路上的磁动势 F 等于磁路内的磁通量与磁阻的乘积。

对一无分支磁路，设铁芯上绕有 N 匝线圈，线圈中通有电流 I ，铁芯截面面积为 A ，磁路平均长度为 l ，材料的磁导率为 μ ，不计漏磁通，且假定各截面上的磁通密度均匀，则有下列等式成立：

$$\Phi=\int \boldsymbol{B}\cdot d\boldsymbol{A}=BA$$

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

$$Ni=\frac{B}{\mu}l=\Phi\frac{l}{\mu A}$$

$$F=\Phi R_m=\frac{\Phi}{A_m}$$

(3) 磁路基尔霍夫第一定律：穿过任意闭曲面的总磁通恒等于零。

$$\oint_S \boldsymbol{B}\cdot d\boldsymbol{S}=0\rightarrow\sum\Phi=0$$

(4) 磁路基尔霍夫第二定律：任意闭合磁路中的磁动势恒等于各段磁路磁位降的代数和。

对磁路的学习可以采用与电路进行类比的方法，如表 1-2 所示。

表 1-2 磁路和电路的类比关系

物理量		基 本 定 律	
磁路	电路	磁 路	电 路
磁动势 F	电动势 E	欧姆定律 $\Phi=\frac{F}{R_m}$	欧姆定律 $I=\frac{E}{R}$
磁通量 Φ	电流 I	基尔霍夫第一定律 $\sum\Phi=0$	基尔霍夫第一定律 $\sum i=0$
磁阻 R_m	电阻 R	基尔霍夫第二定律 $\sum F=\sum\Phi R_m$	基尔霍夫第二定律 $\sum e=\sum u$
磁导 A	电导 G		

3. 电机的损耗分析

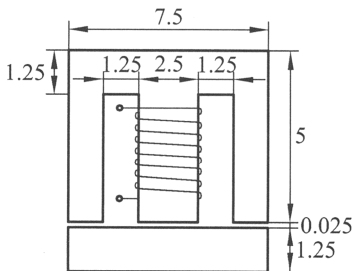
电机的基本损耗包括：铁耗、铜耗、机械损耗与附加损耗。

铁耗： $p_{Fe} = p_h + p_e = C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G$

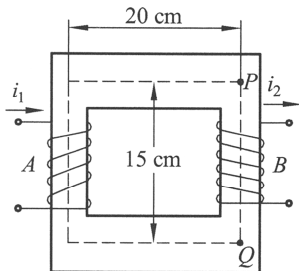
铜耗： $p_{Cu} = I^2 R$

思考练习

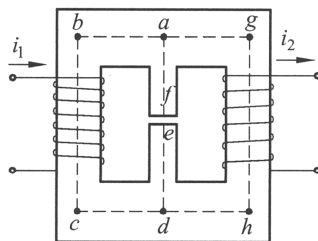
1. 试比较交流磁路和直流磁路的异同点。
2. 电机和变压器的磁路常采用什么材料制成？这些材料各有哪些主要特性？
3. 磁滞损耗和涡流损耗是什么原因引起的？它们的大小与哪些因素有关？
4. 一个带有气隙的铁芯线圈，若线圈电阻为 R ，接到电压为 U 的直流电源上，如果改变气隙的大小，问铁芯内的磁通 Φ 和线圈中的电流 I 将如何变化？若线圈电阻可忽略不计，但线圈接到电压有效值为 U 的工频交流电源上，如果改变气隙大小，问铁芯内磁通和线圈中电流是否变化？
5. 一个具有闭合的均匀的铁芯线圈，其匝数为 300，铁芯中的磁感应强度为 0.9 T，磁路的平均长度为 45 cm。试求：（1）铁芯材料为铸铁时线圈中的电流；（2）铁芯材料为硅钢片时线圈中的电流。
6. 有一环形铁芯线圈，其内径为 10 cm，外径为 5 cm，铁芯材料为铸钢。磁路中含有一空气隙，其长度等于 0.2 cm。设线圈中通有 1 A 的电流，如要得到 0.9 T 的磁感应强度，试求线圈匝数。
7. 题图 1-1 所示铁芯线圈，已知线圈的匝数 $N = 1\,000$ ，铁芯厚度为 0.025 m（铁芯由 0.35 mm 的 DR320 硅钢片叠成），叠片系数（即截面中铁的面积与总面积之比）为 0.93，不计漏磁。试计算：
 - （1）中间芯柱的磁通为 7.5×10^{-4} Wb，不计铁芯的磁位降时所需的直流励磁电流；
 - （2）考虑铁芯磁位降时，产生同样的磁通量时所需的励磁电流。
8. 题图 1-2 所示铁芯线圈，线圈 A 为 100 匝，通入电流 1.5 A；线圈 B 为 50 匝，通入电流 1 A。铁芯截面面积均匀，求 PQ 两点间的磁位降。



题图 1-1 铁芯 (单位: cm)



题图 1-2 铁芯线圈



题图 1-3 铁芯线圈

9. 题图 1-3 所示铸钢铁芯，尺寸见下表：

路径	截面积/ 10^{-4} m^2	长度/mm
<i>abcd</i>	4	50
<i>aghd</i>	5	75
<i>af</i>	2.5	10
<i>fe</i>	2.75	0.25
<i>ed</i>	2.5	10

左边线圈通入电流产生磁动势 1500 A。试求下列三种情况下右边线圈应加的磁动势值：

- (1) 气隙磁通为 $1.65 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 时；
- (2) 气隙磁通为零时；
- (3) 右边芯柱中的磁通为零时。



第二章 直流电机的基本工作原理和结构

学习目标

- 掌握直流电机的基本工作原理和主要结构；
- 掌握直流电机的励磁方式及各种励磁方式下电流之间的关系；
- 掌握直流电机的额定值及计算。

学习重难点

- 直流电机的基本工作原理；
- 直流电机的主要结构；
- 直流电机的励磁方式和额定值。

第一节 直流电机的基本工作原理

直流发电机的简单原理图如图 2-1 (a) 所示。与交流发电机不同的是, 直流发电机均采用固定的磁极和旋转的电枢, 有与旋转导体同步旋转的两个半圆形的换向片 (换向器) 和与换向片相接触的空间位置固定的电刷 A 和 B, 转子绕组的两边分别接到互相绝缘的弧形铜片 (换向片) 上, 线圈 $abcd$ 通过换向片和电刷与外电路接通, 从而形成一个闭合回路。由图可知, 当电机在原动机驱动下匀速旋转时, 导体内将感应交流电动势, 且电刷 A 的电位总是高于电刷 B 的电位, 电刷 A、B 两端将输出脉动的直流电动势, 其电动势波形如图 2-1 (b) 所示, 如果在两电刷间接一负载, 则负载上的电流是交流经过整流后的脉动电流。

图 2-1 只是直流发电机的简单模型, 实际上为减少磁路中的磁阻, 磁极间由磁轭相连, 磁极 N 和 S 之间尽量放入铁芯。另外导体数和换向片的数量很多, 电刷间输出的直流电动势的脉动系数大大减小。实践和分析表明, 当每极下面的元件数大于 8 时, 电压的脉动已经小于 1%, 可以认为是恒定的直流电压。

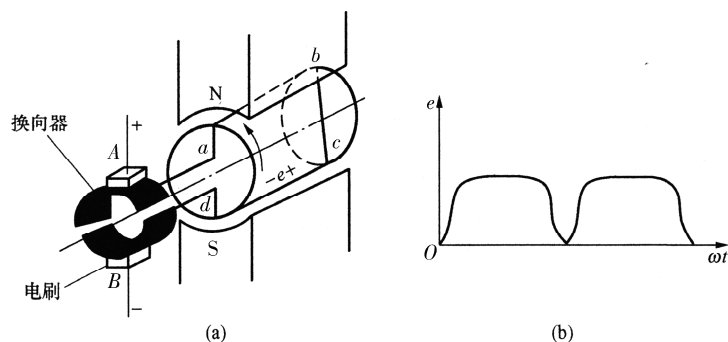


图 2-1 直流发电机

(a) 原理示意图; (b) 电刷间电动势的波形

若在图 2-1 (a) 的两电刷 A 和 B 间加上直流电源, 则在电源的作用下电流从电刷经换向器流向绕组, 绕组作为载流体在磁场作用下受到电磁力的作用, 对转轴形成转矩, 驱动转子旋转, 此时, 直流电机作电动机使用, 其原理示意图如图 2-2 所示。

无论是直流发电机还是直流电动机, 实质上都是具有换向装置的交流电机。

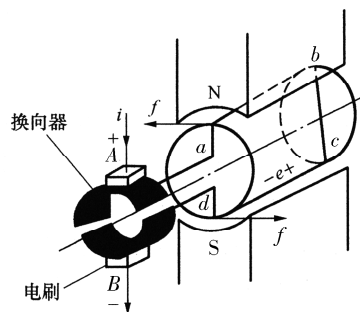


图 2-2 直流电动机原理示意图

第二节 直流电机的基本结构

直流电机由转子和定子两大主要部分组成，图 2-3 是直流电机横剖面示意图。

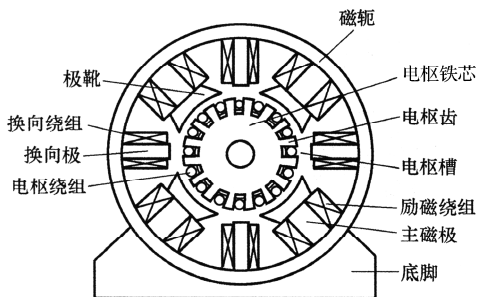


图 2-3 直流电机的横剖面



扫一扫
直流电机的
基本结构

定子是用来产生磁场和起电机的机械支撑作用，由主磁极、换向极、机座、端盖、轴承等组成，还有连接外部电路的电刷装置。

主磁极也称励磁磁极，一般为电磁式，用来产生主磁场，由铁芯和套在铁芯上的励磁绕组组成。主磁极铁芯由 1.0~1.5mm 厚的低碳钢板冲成一定形状，用铆钉把冲片铆紧，固定在机座上。主磁极铁芯分成极靴和极身，极靴的作用是使气隙磁通密度的空间分布均匀并减小气隙磁阻，同时对励磁绕组起支撑作用，如图 2-4 (a) 所示。

在相邻 N、S 主磁极铁芯之间设有改善换向的换向极或辅助极，如图 2-4 (b) 所示。换向极铁芯一般采用铸铁，换向极与磁轭铁芯之间设有非磁性板以调节磁阻。

电刷装置是直流电机重要组成部分，它连接外部电路和换向器，把电枢绕组中的交流电流变成外电路的直流电流或把外电路的直流电流变换为电枢绕组中的直流电流。电刷结构如图 2-4 (c) 所示。电刷采用接触电阻较高的碳刷、石墨刷和金属石墨刷，一般不用金属刷，因为金属电刷会产生火花。电刷被安装在电刷架上。

转子用来感应电动势、产生电磁转矩，由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴等组成，如图 2-5 (a) 所示。

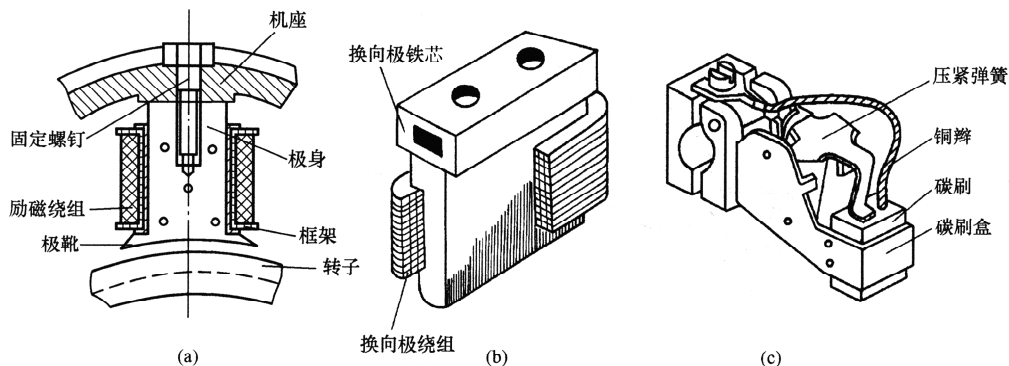


图 2-4 主磁极、换向磁极和电刷

(a) 主磁极；(b) 换向极；(c) 电刷

电枢绕组通常采用棉绕或绢绕的圆铜线或扁铜线制成的纤维绝缘电磁线。

电枢铁芯是主磁路的一部分。为了减少通过交变磁通时产生的磁滞损耗，通常用 0.5 mm 厚的低硅钢片冲压成型，钢片中的硅含量越高，损耗越少，但钢板变硬，一般含硅量取 1.5%~3.5% 为宜。沿电枢铁芯的外圆均匀开槽，槽内放绕组。为防止放在槽中的绕组在离心力的作用下甩出槽外，槽内设有槽楔。电枢铁芯有直接安装在轴上和安装在支架上的两种形式。

换向器又称整流子，由片间绝缘的换向片组合而成，与电刷配合，把电枢绕组中的交流电流变成外电路的直流电流或把外电路的直流电流变换为电枢绕组中的直流电流。换向器结构如图 2-5 (b) 所示。

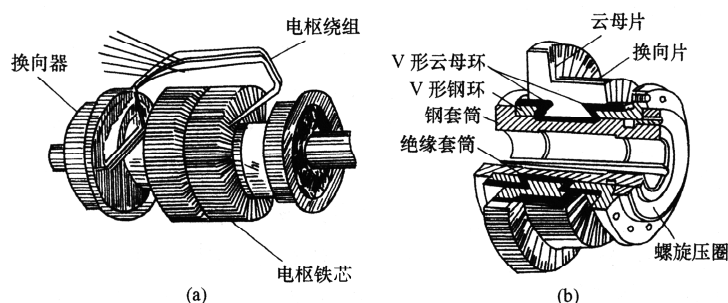


图 2-5 电枢铁芯装配图和换向器结构

(a) 电枢铁芯装配图；(b) 换向器结构图

第三节 直流电机的励磁方式

直流电机供给励磁绕组励磁电流的方式称为励磁方式，直流电动机的励磁方式有他励、并励、串励、复励四种，各种励磁方式的接线图如图 2-6 所示。

他励是指由其他的独立电源对励磁绕组进行供电的励磁方式，如图 2-6 (a) 所示，电流关系满足 $I_a = I_f$ ；并励是指电机的励磁绕组与电枢绕组相并联，如图 2-6 (b) 所示，电流之间的关系是 $I = I_a + I_f$ ；串励是指电机的励磁绕组与电枢绕组相串联，如图 2-6 (c) 所示，电流之间的关系是 $I_a = I = I_f$ ；复励电机有两个励磁绕组，一个与电枢绕组串联，另一个与电枢绕组并联，如图 2-6 (d) 所示，复励是串励和并励两种励磁方式的结合。复励中有积复励和差复励，当串励和并励产生的磁动势方向相同时称为积复励，相反时称为差复励，但差复励只用于电焊发电机。

直流发电机的励磁方式有他励和自励两种方式。自励是指发电机的励磁电流由发电机本身提供的励磁方式，包括串励、并励和复励三种。

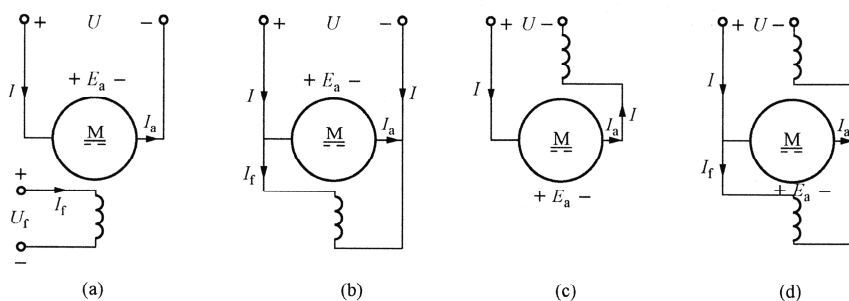


图 2-6 直流电动机各种励磁方式的接线

(a) 他励式；(b) 并励式；(c) 串励式；(d) 复励式

第四节 直流电机的型号和额定值

我国目前能自己设计制造的直流电机型号较多。其常见的系列有：

(1) Z2、Z3、Z4 系列是一般用途的中小型直流电机，Z3、Z4 系列与 Z2 系列相比，具有转动惯量小、调速范围广、体积小、质量轻，且能用于静止整流电源供电等优点。

(2) Z 和 ZF 系列是一般用途的大中型直流电机，Z 为电动机系列，ZF 为发电机系列。

(3) ZZJ 系列是冶金辅助拖动机械用的起重直流电动机。

(4) ZBF 和 ZBD 系列是用于龙门刨床的直流电动机。

当然还有很多其他系列的直流电机，可以查阅有关手册。

电机的额定值是电机制造厂家按照国家标准对产品在设计工作条件下所规定的一些基准值，额定值通常可从电机的铭牌上看到。

直流电机的额定值主要有：

1. 额定功率 P_N (W 或 kW)

对发电机，额定功率是指额定状态时出线端输出的电功率；对电动机，额定功率是指在额定状态时从轴上输出的机械功率。

2. 额定电压 U_N (V)

对发电机，额定电压是指在额定电流下输出额定功率时的端电压；对电动机，是指直流电源电压。

3. 额定电流 I_N (A)

对发电机，额定电流是指带额定负载时的输出电流，即

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} \quad (2-1)$$

对电动机，额定电流是指带额定机械负载时的输入电流，即

$$I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} \quad (2-2)$$

4. 额定转速 n_N (r/min)

额定转速是指在电机额定运行时的转速。

除了以上的额定值以外，还有额定效率 η_N 、额定转矩 T_N 、额定温升 θ_N ，励磁方式、工作方式等。

本章小结

直流电机是实现机电能量转换的机械。直流电机的结构包括定子与转子两大部分：定子用来建立磁场，并作为机械支撑；转子即电枢，用来嵌入绕组，并兼做磁路，以感应电动势产生电磁转矩。定子和转子之间有一定的空隙。

直流电机的换向器在电机旋转时起换向作用，对直流发电机，是将电机内部的交流变成外部的直流；对电动机，是将外部的直流变成电机内部的交流，实现机电能量的转换。

直流电动机的励磁方式有他励、并励、串励和复励四种形式。

额定值是保证电机可靠地工作、具有规定的使用寿命并且具有良好性能的依据，电机的额定值与负载的匹配是电机能够发挥最大效率的基本保证。

思考练习

1. 为什么直流发电机能发出直流电流？如果没有换向器，将会是什么情况？
2. 试判断下列情况电刷两端电压的性质：
 - (1) 磁极固定，电刷与电枢同时旋转。
 - (2) 电枢固定，电刷与磁极同时旋转。
3. 在直流发电机中，为了把交流电动势转变成直流电压而采用了换向器装置，但在直流电动机中，加在电刷两端的电压已是直流电压，那么为什么还要安装换向器呢？
4. 如果将电枢绕组装在定子上，磁极装在转子上，换向器和电刷怎样装置才能作为直流电机运行？
5. 为什么直流电机电枢铁芯采用硅钢片叠成？磁极采用钢片叠成，而定子磁轭一般不用铸铁材料？
6. 直流电动机的励磁方式有哪几种？各有什么特点？各种励磁方式中各电流之间的关系如何？
7. 从原理上看，直流电机的电枢绕组可以只用一个绕组做成，但实际的直流电机的电枢绕组都是由许多绕组串联而成，为什么？
8. 一台直流电动机的铭牌数据如下：额定功率 $P_N = 55 \text{ kW}$ ，额定电压 $U_N = 110 \text{ V}$ ，额定

转速 $n_N = 1000 \text{ r/min}$ ，额定效率 $\eta_N = 85\%$ 。试求该电动机的额定输入功率 P_1 和额定电流 I_N 。

9. 一台直流发电机的铭牌数据如下：额定功率 $P_N = 200 \text{ kW}$ ，额定电压 $U_N = 230 \text{ V}$ ，额定转速 $n_N = 1450 \text{ r/min}$ ，额定效率 $\eta_N = 90\%$ 。试求该发电机的额定输入功率 P_1 和额定电流 I_N 。



第三章 直流电机的运行原理及运行特性

学习目标

- 了解直流电枢绕组的构成规律；
- 掌握直流电机电枢反应的性质及对电机的影响；
- 掌握直流电枢电动势和电磁转矩的大小及性质；
- 掌握直流电机的电动势、功率和转矩平衡方程；
- 掌握直流电动机的工作特性及起动、调速的方法和原理。

学习重难点

- 直流电枢绕组的连接规律及特点；
- 直流电机电枢反应性质、电枢绕组的感应电动势和电磁转矩；
- 稳态运行时直流电机的基本方程式和运行特性。

第一节 直流电枢绕组简介

电枢绕组是直流电机的重要部件，在机电能量转换中起着重要的作用。电枢绕组工作时产生电动势、流过电流并产生电磁转矩，它是实现能量转换的枢纽。

对直流电枢绕组的要求主要是：①满足电性能的要求，能感应出接近要求的电动势波形；②绕组的绕组材料能得到充分的利用；③结构简单，运行可靠，维修方便，换向良好。

一、电枢绕组的基本知识

直流电枢绕组是由多个形状相同的绕组元件、按照一定的规律连接组成的，根据连接的规律不同，电枢绕组可以分为单叠绕组、单波绕组、复叠绕组、复波绕组和混合绕组。本节主要以单叠绕组为例，分析电枢绕组的构成及连接的一般规律。下面介绍绕组的基本知识。

1. 元件

构成绕组的线圈为绕组元件，元件是组成电枢绕组的基本单元。每个元件或是单匝或是多匝，两端分别与两个不同的换向片相连接，如图 3-1 所示。

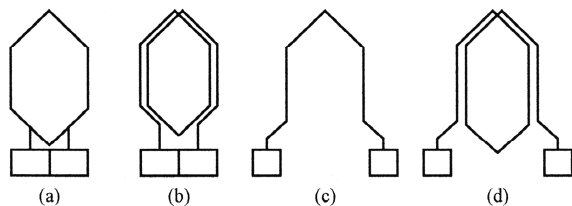


图 3-1 直流电枢绕组

(a) 单匝单叠；(b) 多匝单叠；(c) 单匝单波；(d) 多匝单波

2. 极距

一个磁极在电枢圆周上所跨的距离，称为极距，用 τ 表示，极距的表达式为

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad (3-1)$$

式中， D 为电枢外径。

3. 叠绕组

叠绕组是指串联的两元件总是后一个元件端接部分紧叠在前一个元件端接部分，整个绕组成折叠式前进，如图 3-2 (a) 所示。

4. 波绕组

波绕组是指把相隔约一对极距的同极性磁场下的相应元件串联起来，像波浪式前进，如图 3-2 (b) 所示。

5. 第一节距 y_1

同一元件的两个有效边在电枢表面所跨的距离称为第一节距 y_1 ，如图 3-2 所示。

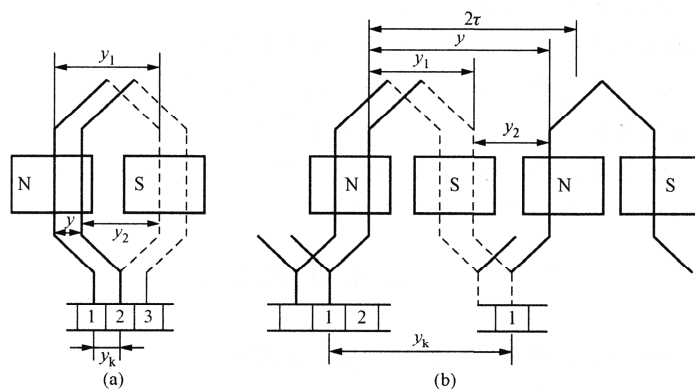


图 3-2 绕组节距示意图

(a) 叠绕组；(b) 波绕组

$y_1 = \tau$ 的线圈称为整距线圈， $y_1 < \tau$ 的线圈称为短距线圈， $y_1 > \tau$ 的线圈称为长距线圈。显然，在端接部分长距线圈比短距线圈多消耗铜线，所以一般不采用长距线圈。

y_1 一般表示式为

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \epsilon = \text{整数} \quad (3-2)$$

式中， Z 为电机电枢的槽数； ϵ 为小于 1 的分数，用来把 y_1 凑成整数，显然，取负号时为短距线圈，取正号时为长距线圈。

6. 合成节距 y

相串联的两个元件的对应边所跨的槽数称为合成节距 y ，图 3-2 (a) 中 $y=1$ 。

7. 换向节距 y_k

每一个元件首、末端所连的两换向片之间在换向器表面所跨的距离，称为换向节距 y_k 。通常用换向片数目表示换向节距，图 3-2 中 $y_k = \pm 1$ 。 $y_k = +1$ ，表示把每一个元件连成绕组时，连接的顺序是从左向右进行，叫右行绕组； $y_k = -1$ ，则连接顺序是从右向左进行，叫左行绕组。

单叠绕组的合成节距和换向节距相同，即 $y = y_k$ 。

8. 第二节距 y_2

第一个元件的下层边到与它相串联的第二个元件的上层边所跨的槽数称第二节距 y_2 ，如图 3-2 所示。对单叠绕组， $y = y_1 - y_2$ ，对单波绕组， $y = y_1 + y_2$ 。

二、单叠绕组

单叠绕组的特点是合成节距和换向节距均为 1，即 $y = y_k = 1$ 。

下面利用电枢绕组的展开图，说明单叠绕组的连接方法和特点。

【例 3-1】 已知一台直流电机的极数 $2p=4$ ，槽数 Z 、元件数 S 及换向片数 k 之间满足 $Z = k = S = 16$ ，画出单叠绕组的展开图。

解:

1. 计算

$$y = y_k = 1$$

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \epsilon = \frac{16}{4} = 4$$

$$y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3$$

2. 画出绕组的展开图

第一步,画电枢槽。分别画出 16 根等长、等距的实线与虚线,实线为上层边,虚线为下层边,将导体的上层边、下层边按顺序编号,该号码表示槽号,也是元件号。

第二步,安放磁极。让每个磁极宽度约为 0.7τ , 4 个磁极均匀分布在各槽之上,并标出 N、S 极性。

第三步,画换向器。用 16 个方块代表 16 个换向片,换向片编号与元件上层边所嵌放的槽号相同。

第四步,连接电枢绕组。从 1 号换向片出发,先将 1 号元件的上层边嵌入 1 号槽内,下层边嵌入 5 号槽内,并接到 2 号换向片上。然后从 2 号换向片出发,绕制 2 号元件,2 号元件的上层边嵌入 2 号槽,下层边嵌入 6 号槽,并回到 3 号换向片上。这样依次嵌放和连接 16 个元件。最后 16 号元件的下层边回到 1 号换向片,得到一个闭合绕组。

第五步,根据右手定则确定每个元件里的电动势方向。N 极下导体的电动势一个方向,S 极下导体电动势为另一个方向,位于两个磁极之间的导体不感应电动势。

第六步,放置电刷。在直流电机中,电刷数与主磁极数相同。本例中有四个电刷,它们均匀放在换向器表面圆周的位置,每个电刷的宽度等于每个换向片的宽度。放置电刷的原则是,要求正负电刷间得到的电动势最大。将电刷的中心线对准主磁极的中心线,就能满足要求。被电刷短路的元件正好是处于两个主磁极之间的中性线位置,此中性线也称为几何中性线。电刷这种放置法习惯称电刷放在几何中性线位置。

按照上述步骤,画出展开图,如图 3-3 所示。

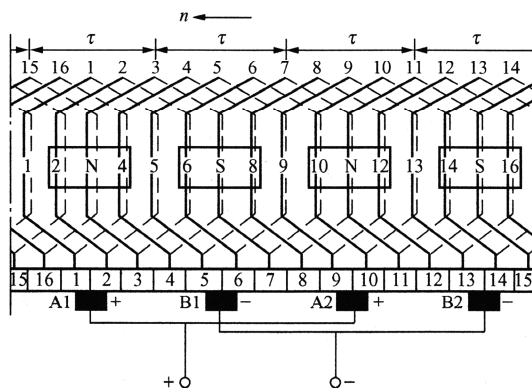


图 3-3 单叠绕组的展开图

3. 单叠绕组的并联支路图

从图 3-3 中可以看出,被电刷短路的元件 1、5、9、13 把闭合的电枢绕组分成了四个部