

OHM

大学参考教材系列

电机学

(上)

仁田工吉 冈田隆夫
(日) 安陪 稔 上田皖亮 编著
仁田旦三

冯 浩 译



科学出版社

www.sciencep.com

43
9

OHM 大学参考教材系列

电机学

(上)

仁田工吉 冈田隆夫
〔日〕安陪 稔 上田皖亮 编著
仁田旦三

冯浩 译

科学出版社

北 京

图字:01-2003-3489 号

Original Japanese language edition

Daigaku Katei Denki Kiki(1) (Kaitei 2 Han)

By Koukichi Nitta, Minoru Abe, Tanzou Nitta, Takao Okada and Yoshisuke Ueda

Copyright © 1992 by Koukichi Nitta, Minoru Abe, Tanzou Nitta, Takao Okada and Yoshisuke Ueda

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version published by Science Press, Beijing

Under license from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2003

All rights reserved

大学課程

電気機器 (1) (改訂2版)

仁田 工吉・岡田 隆夫

安陪 稔・仁田 旦三

オーム社 2002

图书在版编目(CIP)数据

电机学(上)/(日)仁田工吉等编著;冯浩译. —北京:科学出版社,2004
(OHM 大学参考教材系列)

ISBN 7-03-012181-3

I. 电… II. ①仁… ②冯… III. ①电机-高等学校-教材 ②电器-
高等学校-教材 IV. ①TM3 ②TM5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 086494 号

责任编辑 王 炜 崔炳哲 责任制作 魏 谨

责任印制 刘士平 封面设计 李 力

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

2004 年 1 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2004 年 1 月第一次印刷 印张: 7 3/8

印数: 1—5 000 字数: 181 000

定 价: 17.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

前 言

本书是 OHM 大学参考教材——《电机学(上)(下)》的修订版。编写本书是为满足电机学初学者的需要,所以试图从电机的基本原理到电机在尖端技术领域的应用都尽可能予以介绍,力求内容全面,通俗易懂。为此目标,各位作者在写作中付出了极大的努力。当然,最后完成的书稿与理想的目标仍有一定差距,我们深感遗憾。希望各位教师在以本书作为教科书组织教学时,根据具体情况补充有关内容。

本书初版(1970 年 4 月发行)由林千博博士、仁田工吉博士合编,编写的重点放在电机学的基础方面。修订本书时,在继续保持原有特色的同时,更多地考虑了设计者的需要。

本书上册从变压器开始讲起,在讲述各种电机的基本原理的同时,较多地介绍了各种电机的应用,并增加了第 1 章“电机基础知识”和第 6 章“电机设计基础”。本书下册则更以用户为重点,介绍了以电力电子技术应用为主体的各种电机的应用,以及最近发展起来的控制电机及超导电机。

由于篇幅所限,有些部分未能详细说明,不妥之处请各位批评指正。

编著者

编著者简介

- 工学博士 仁田工吉 1934年毕业于京都帝国大学工学部，现任德岛大学名誉教授
- 工学博士 冈田隆夫 1955年毕业于京都大学工学部，现任关西大学教授，京都大学名誉教授
- 工学博士 安陪 稔 1956年毕业于京都大学工学部，现任福山大学教授，京都大学名誉教授
- 工学博士 上田晁亮 1959年毕业于京都大学工学部，现任京都大学研究生院电气工程专业教授
- 工学博士 仁田旦三 1967年毕业于京都大学工学部，现任东京大学研究生院工学研究学科电气工程专业教授

第 1 章 电机基础知识	1
1.1 电机概论	1
1.2 电磁力和感应电动势	4
1.2.1 电流产生的磁场	4
1.2.2 电磁力	5
1.2.3 电磁感应	6
1.2.4 感应电动势的种类	7
1.2.5 磁路与电路	7
练习题	11
第 2 章 变压器	12
2.1 变压器的工作原理	12
2.1.1 理想变压器	12
2.1.2 实际变压器	17
2.2 变压器的结构	25
2.2.1 铁 心	25
2.2.2 线圈及其配置	26
2.2.3 冷却方式	28
2.2.4 绝缘套管	29
2.2.5 变压器油	31
2.2.6 三相变压器	31
2.3 等效电路与变压器的特性	32
2.3.1 变压器的额定值	32

2.3.2	电压变化率	33
2.3.3	损耗与效率	35
2.4	变压器的联接与运行	38
2.4.1	变压器的极性	38
2.4.2	变压器的三相联接	38
2.4.3	三相联接的等效电路	38
2.4.4	V 联接	41
2.4.5	三相联接系统中的谐波	41
2.4.6	相数变换	42
2.4.7	并联运行	46
2.4.8	负载运行时的电压调整方式	46
2.5	特殊变压器	47
2.5.1	单线圈变压器	47
2.5.2	仪表用变压器	48
2.5.3	漏磁变压器	50
2.5.4	感应调压器	51
2.5.5	非谐振变压器	52
2.6	变压器的试验	54
2.6.1	绝缘强度试验	54
2.6.2	极性试验	55
	练习题	55

第 3 章 感应电机 58

3.1	多相感应电动机的原理与结构	58
3.1.1	转矩的产生原理	58
3.1.2	多相交流电流产生的旋转磁场	59
3.1.3	转子的结构	65
3.1.4	电枢绕组与磁动势分布	68
3.2	电动势, 电流, 等效电路及相量图	71

3.2.1	一次绕组与二次绕组	71
3.2.2	一次绕组及二次绕组中的感应电动势	71
3.2.3	漏阻抗与等效电路	72
3.2.4	等效电路参数的测定	74
3.2.5	相量图	77
3.3	圆 图	78
3.3.1	感应电动机的圆图	78
3.3.2	圆图与感应电动机的机械输出功率	79
3.3.3	圆图与感应电动机的转矩	81
3.3.4	由圆图可求取的其他特性	84
3.4	转速-转矩曲线与线性类比	85
3.4.1	感应电动机的转速-转矩特性曲线	85
3.4.2	线性类比特性	87
3.5	转速-输出功率特性曲线	87
3.6	笼型电动机的起动问题	88
3.7	特殊笼型感应电动机	89
3.8	感应电动机的起动及转速控制	90
3.8.1	绕线式电动机的起动	90
3.8.2	笼型电动机的起动	90
3.8.3	感应电动机的转速控制	91
3.9	感应发电机及感应制动器	94
3.9.1	感应发电机	94
3.9.2	感应制动器	95
3.10	单相感应电动机	95
3.10.1	单相感应电动机的结构和原理	95
3.10.2	单相感应电动机的起动方法	97
练习题		98

第 4 章 直流电机 100

- 4.1 直流电机的原理与结构 100
 - 4.1.1 直流电机的原理 100
 - 4.1.2 直流电机的结构 102
 - 4.1.3 励磁方式 106
 - 4.1.4 感应电动势 107
 - 4.1.5 转 矩 108
 - 4.1.6 电动机的类型及用途 109
- 4.2 电枢绕组 110
 - 4.2.1 电枢绕组的种类 110
 - 4.2.2 电刷位置与中性点 117
 - 4.2.3 电枢铁心的安装与换向片之间的位置的确定 117
- 4.3 磁 路 118
 - 4.3.1 直流电机的磁路 118
 - 4.3.2 安培匝数的计算方法 119
- 4.4 电枢反应 121
 - 4.4.1 去磁磁动势与交叉磁动势 121
 - 4.4.2 换向极 123
 - 4.4.3 补偿绕组 123
- 4.5 换 向 124
 - 4.5.1 换 向 124
 - 4.5.2 换向特性的数理解析 126
 - 4.5.3 改善换向的方法 129
 - 4.5.4 电 刷 129
- 4.6 发电机的特性 131
 - 4.6.1 他励发电机 131
 - 4.6.2 并励发电机 133
 - 4.6.3 串励发电机 137

4.6.4	复励发电机	138
4.7	电动机的特性	140
4.7.1	各种直流电动机	140
4.7.2	并励电动机	142
4.7.3	串励电动机	144
4.7.4	复励电动机	146
4.8	损耗、效率及温升	147
4.8.1	损耗的分类	147
4.8.2	固定损耗的测定方法	149
4.8.3	效 率	152
4.8.4	温 升	153
4.9	直流电机的运行	155
4.9.1	直流发电机的并联运行	156
4.9.2	直流电动机的起动	158
4.9.3	直流电动机的调速	161
4.9.4	制 动	163
	练习题	165

第5章 同步电机 169

5.1	概 述	169
5.2	电枢绕组	171
5.3	电枢绕组中的电动势	172
5.3.1	频 率	172
5.3.2	机械角与电气角	173
5.3.3	集中绕组的感应电动势	173
5.3.4	分布绕组的电动势	176
5.3.5	绕组的电动势	177
5.3.6	三相绕组与联接	178
5.4	电枢反应	179

5.4.1	电枢反应与磁通分布	179
5.4.2	漏磁通	181
5.4.3	电枢绕组的磁动势	182
5.4.4	dq 坐标系中的同步电机的基本方程	184
5.4.5	同步发电机的相量图与等效电路	185
5.5	同步发电机的诸特性	186
5.5.1	特性曲线	186
5.5.2	短路比	188
5.5.3	同步阻抗与单位法	188
5.5.4	自 励	190
5.5.5	同步发电机的输出特性	191
5.5.6	励 磁	192
5.6	效率、损耗	193
5.6.1	损 耗	193
5.6.2	效 率	194
5.7	冷 却	195
5.8	同步电动机	195
5.8.1	同步电机的可逆性	195
5.8.2	同步电动机的转矩	196
5.8.3	电枢反应	196
5.8.4	同步电动机的特性	197
5.8.5	振 荡	199
5.8.6	同步调相机	200
5.8.7	起动方法	200
	练习题	201

第 6 章 电机设计基础 203

6.1	设计的思考方法	203
6.2	变压器设计中的基本思想	204

6.2.1	基本方程	204
6.2.2	确定变压器主要尺寸的基本思想	205
6.3	旋转电机的基本设计思想	207
6.3.1	基本方程	207
6.3.2	主要尺寸的考虑方法	209
6.3.3	分布绕组的励磁电流的计算公式	212
练习题		215
练习题简答		216

第 1 章 电机基础知识

本章将主要介绍电机的基本概况及发展历史，同时，为满足初学者的需要，还将介绍一些相关的电机学基础知识。

1.1 电机概论

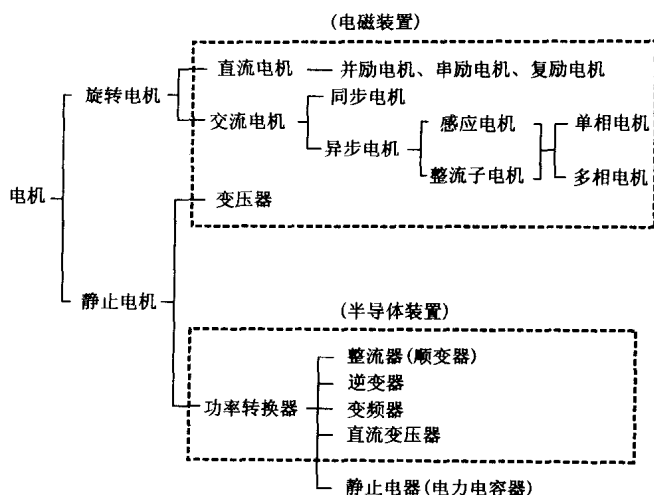
电机(electrical machines)是能量转换装置。把机械能(动力)转换成电能的装置称为**发电机**(generator)，与此相反，把电能转换成机械能的装置称为**电动机**(motor)。此外，在交流电能的转换装置中有**变压器**(transformer)，在频率转换进行交流-直流或直流-交流转换的装置中有**变流器**(converter)等。

在上述装置中作旋转运动的装置称为**旋转电机**(rotating machine)，静止的装置称为**静止电机**(static electric device)，这些装置统称为电机。另外，电动机中不但有作旋转运动的旋转电动机，也有作直线运动的直线电动机。

电机有直流电机与交流电机之分，交流电机中有单相电机与多相电机之分。目前，实际应用的电机主要按表 1.1 来进行分类。

表 1.1 中的旋转电机及变压器，其工作原理主要建立在电磁力与电磁感应定律等基础上，因此，被称为电磁装置，变流器其工作主要依靠可控硅及功率晶体管等电力电子器件，因此，称为半导体装置。

表 1.1 电机的分类



建立在电磁原理基础上的电磁装置已有 100 多年的发展历史，其理论基础由奥斯特、安培、法拉第、楞次、诺曼等人确立，现在我们看到的旋转电机是 19 世纪 80 年代发明的，随着技术、材料的发展与进步，电机的性能逐步提高，而且，呈大容量化和小型化两大发展趋势。

电机控制领域的最近发展特点是：功率半导体元件的大量应用及控制技术的快速发展。进入 20 世纪 50 年代后，可控硅与功率晶体管等半导体器件的可靠性有了显著提高，运用功率电力电子器件已能直接进行电能转换和电机控制，运用功率半导体器件进行电能转换及控制的学科被称为功率电子学。今后，功率电子学学科将会得到更大的发展。

表 1.1 例举了目前正在使用的电机的主要类型。回顾电机的发展历史，曾发明、开发了一些具有实用价值的电机，有的至今仍在使用。下面对这些电机作一些简单的介绍。

(1) 单极发电机(homopolar generator) 当导体在方向恒定的磁场内沿某一方向运动时，导体中会产生方向恒定的电动势。把这一电动势用适当的方法引出，则可获得直流输出电压。应用这一原

理,开发出了低电压大电流的直流发电机。电压为 $3\sim 10\text{V}$ 、电流为 $5000\sim 15\,000\text{A}$ 。

(2) 微场扩流放大器 (metadyne) 微场扩流放大器是一种由恒电压的直流电源供电,提供恒电流的直流电能变换用旋转电机,由意大利的 Pestarini 发明(1930 年)。由于该装置能提供恒流的直流电能,对电车等场合使用的电动机的控制特别有效,因此,这一装置曾被用于伦敦的地铁系统。

(3) 交磁放大器 (amplidyne) 交磁放大器的结构与微场扩流放大器很相似,这种电机是一种小功率控制大功率的放大发电机,由美国的 General Electric 公司发明。因功率大而作为控制用电机被广泛应用。

(4) 自励电机放大器 (rototrol) 自励电机放大器是一种具有交磁放大器相同功能的放大发电机,由美国的 Westinghouse 公司发明(1940 年),与交磁放大器一样,作为直流发电机的自动电压控制、直流电动机的速度控制等等的控制用电机被广泛应用。

(5) 磁放大器 (magnetic amplifier) 磁放大器是由饱和电抗器、整流器及交流电源组成的静止型放大器。自 1916 年被用于美国、欧洲间的无线通信系统,后来,因真空管技术快速发展以及交磁放大器等旋转型放大器技术的发展,磁放大器相对变得不怎么引人注目。但进入 19 世纪 30 年代,由于饱和电抗器所用的铁心材料的性能显著提高,以及锗、硅整流管的相继实用化,磁放大器在更大范围内得到了应用。磁放大器的优点是寿命长、可靠性高,在高温等恶劣的环境下仍能保持其良好的性能,现在也仍在应用。

(6) 多相整流子电动机 (polyphase commutator motor) 多相整流子电动机是一种能进行调速控制的电动机,可分为多相串励式整流子电动机和多相并励式整流子电动机,串励式电动机起动转矩大,并励式电动机具有转速不随负载而变且接近恒速运行的良好特性。作为并励式电动机之一的施拉格电动机,可通过移动电刷的位置来实现大范围的调速,因此,在工作机械、风机、纺织及造纸等行业

得到应用。多相整流子电动机与其他旋转电机相比,由于结构复杂而且存在换向问题,制作大容量电动机在技术上有困难,因此被淘汰。

与此相反,单相整流子电动机,因采用单相电源驱动且具有较大转矩,至今仍在小型电动工具和吸尘器、榨汁机、洗衣机等家电产品中得到广泛应用。

(7) 旋转变流机(rotary converter) 旋转变流机是把交流电能转换成直流电能的旋转电机,最大容量可达到数千千瓦,曾取得过较好的应用成果,后来逐渐被水银整流器及半导体整流器构成的变流器所取代。

1.2 电磁力和感应电动势

1.2.1 电流产生的磁场

由电流产生的磁场其磁场方向用右手定则确定。

如图 1.1(a)所示,流过电流为 I 的直导体产生磁场 H ,当电流方向满足右手螺旋定则时磁场方向与螺旋方向一致。图 1.1(b)所示的是流过电流为 I 的螺线管状线圈,按图 1.1(a)所示原理,各匝线圈所产生的磁场互相迭加在线圈内部产生如图示方向所示的磁场。

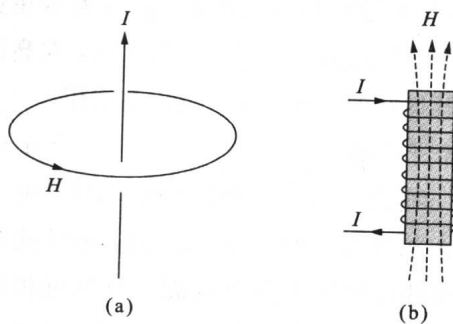
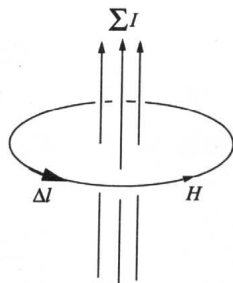


图 1.1 电流产生的磁场

通电导体周围所产生磁场的分析与计算主要依据安培环流定律。

根据安培环流定律,如图 1.2 所示的单位正磁荷沿磁场 H 方向移动 Δl 所作的功为 $H\Delta l$,如沿圆弧轨迹移动一周,则所作的功与所经过的圆环内的电流总和相等,即

$$\sum H\Delta l = \sum I \quad (1.1) \quad \text{图 1.2 安培环流定律原理图}$$



例题 1.1 求电流为 I 的圆筒型线圈内所产生磁场的大小。

【解】 对于图 1.3 所示的圆筒型线圈,设每单位长度的匝数为 N ,如有一单位正磁荷按图示的闭合回路 $abcd$ 沿箭头方向移动,因 bc , da 方向及线圈的外部没有磁场,所以,只需考虑沿 ab 所作的功即可。而且,如把 ab 的长作为单位长度,则

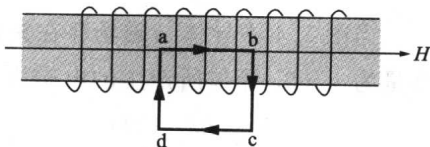


图 1.3 无限长圆筒形线圈

闭框内的电流总和为 $NI(A)$ 。由式(1.1)可得

$$\sum H\Delta l = H = NI \quad (A/m) \quad (1.2)$$

把电流 I 与线圈的匝数 N 的乘积称磁动势,单位为安匝。如设磁场强度为 $H(A/m)$ 、磁通密度为 $B(T)$ (T : 特斯拉),则 $B = \mu H$ 。由此可知,磁通密度为 B 的磁通经过单位长度所需的磁动势为 B/μ 。

1.2.2 电磁力

如图 1.4 所示,在磁通密度为 $B(T)$ 的均匀磁场中,有一条电流为 $i(A)$ 、长度为 $l(m)$ 并与磁场垂直的导体,则该导体在磁场中所产生的电磁力的大小为: