



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家级精品资源共享课

E

电机学

LECTRIC MACHINERY

第3版

◎ 林明耀 徐德淦 付兴贺 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育 规划教材

国家级精品教材

电机学

第3版

林明耀 徐德淦 付兴贺 编著

王宏华 主审



机械工业出版社

本书是面向电气工程及其自动化专业的一本技术基础课教材，不同于面向专业某个方向的基础课教材。

本书共分总论、动力电机和微特电机三篇共十三章。其特点是突出每种电机的五个基本点（基本功能和用途、基本作用原理、基本结构、基本分析方法、基本特性）；强干削枝，力求内容少而精；例题、习题和思考题占本书篇幅约 20%，并配有电子课件，附有部分习题参考答案，便于自学和引发学习兴趣。内容安排灵活，讲授时可根据具体情况进行次序调整和内容增减。

本书可作为高校电气工程及其自动化专业以及其他强弱电结合的本科专业和大专的教材，亦可供有关技术人员及电类专业硕士生作为参考用书。

欢迎选用本书作为教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册后下载本书电子课件。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/林明耀，徐德淦，付兴贺编著. —3 版. —北京：机械工业出版社，2016. 9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材·国家级精品资源共享课

ISBN 978-7-111-55135-5

I. ①电… II. ①林… ②徐… ③付… III. ①电机学 - 高等学校 - 教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 246418 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：贡克勤 责任编辑：贡克勤 刘丽敏

责任校对：樊钟英 封面设计：张 静

责任印制：李 洋

保定市中画美凯印刷有限公司印刷

2017 年 1 月第 3 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20.5 印张 · 493 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-55135-5

定价：45.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010 - 88379833

读者购书热线：010 - 88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

第3版前言

本书是在2009年出版的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《电机学》(第2版)基础上编写的。本书出版以来,深受广大师生好评。

电机学科是历史悠久、理论相对较为成熟的学科,20世纪80年代前“电机学”一直是强电类专业的一门主课,并往往分成若干门课程进行教学,学时数达三四百之多。随着科技发展,一方面,电机理论日臻完善,同时由于新兴学科丛生,以及电机的部分功能被电子技术所替代,导致电机学在电气工程专业内被日益削弱,以至于有些学校电专业将电机与其他课程合并,甚至干脆将电机学取消。国外有些高校的电气工程系甚至已没有电机学科组。

科技发展的另一方面,随着现代化的进程,电机的应用却越来越广泛,电机的应用达到了无所不在的程度。而今,电气工程技术人员不懂、不会使用电机是不可思议的,必将寸步难行。为解决上述矛盾,我们以电气工程专业教学改革指导思想——加强基础、淡化专业、着重培养学生的自学能力,来改革电机学科的教学,使电机学作为为了电气工程及其自动化专业的一门重要技术基础课,而不同于面向专业的某个方向的专业基础课。

本书着重介绍电机的基本原理和分析方法,具体是抓住每种电机的五个基本点:基本功能和用途、基本作用原理、基本结构、基本分析方法和基本特性。

本书删减各种电机工程应用的分析研究。工程应用问题量大面广,并与相关的其他学科密切相关,放在电机课内学习收效甚微,且有无的放矢之嫌。当学生工作中遇到电机工程应用问题时,可以凭借学到的基本知识,通过自学去解决。

全书分为三篇13章。微特电机独立成篇。微特电机的原理虽然同动力电机,但对它们的要求和分析的着眼点不同,通过该篇的学习,可巩固和拓宽电机理论。

全书例题、习题和思考题共占总篇幅的20%左右,并配有电子课件,附有部分习题参考答案。

我们在选择例题、习题和思考题时,考虑了启发学生学习兴趣、补充知识、提高自学能力、拓宽视野等因素,其难易程度亦有较大差异。应用本书时,带“*”内容任课教师可依据专业要求、学时数多少、学生具体情况等酌情筛选。

本书此次修订是根据各兄弟院校在应用本书的实践中提出的意见和建议而进行的。修订的原则是保持本书的原有特色,总体结构基本不变,重点在吸收新技术和新成果,充实和改进某些内容。在第三篇微特电机中,增加了“永磁无刷直流电动机”和“风力发电机”两章。

此次修订由林明耀、徐德淦、付兴贺主持。具体是:第一篇由徐德淦执笔,第二篇、第三篇第十章、第十一章由林明耀执笔,第三篇其余由付兴贺执笔,全书由林明耀统稿。在本书编写过程中,东南大学电机及其控制学科的研究生李晖和黄仁志帮助整理了部分习题答案,在此表示衷心感谢。

本书由河海大学王宏华教授主审。本书在编写过程中,主审、兄弟院校任课教师,东南大学电机及控制系的同行等提出了许多宝贵和中肯的修改意见,在此谨致以衷心的感谢。

第2版前言

本书自2004年出版以来，深受广大师生好评，本书2008年被评选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

“电机学”是一门历史悠久、理论相对较为成熟的学科，20世纪80年代前它一直是强电类专业的一门主课，并往往分成若干门课程进行教学，学时数达三四百之多。随着科技发展，一方面电机理论研究日臻完善，同时由于新兴学科丛生，以及电机的部分功能被电子技术所替代，导致电机学在电气工程专业内被日益削弱，以至于有些院校电专业将电机与其他课程合并，甚至将电机课干脆取消。国外有些高校的电气工程系甚至已没有电机学科组（类似我们的教研室）。

科技发展的另一方面，随着现代化的进程，电机的应用却越来越广泛，已达到无所不在的程度。而今，电气工程技术人员不懂、不会使用电机是不可思议的，必将寸步难行。为解决上述矛盾，我们以电气工程专业教学改革指导思想——加强基础、淡化专业、着重培养学生的自学能力，来改革电机学科的教学，把电机学作为电气工程及其自动化专业的一门技术基础课，而不同于面向专业的某个方向的专业基础课。

本书着重介绍电机的基本原理和分析方法，具体是抓住每种电机的5个基本：基本功能和用途、基本作用原理、基本结构、基本分析方法和基本特性。

本书删减各种电机工程应用的分析研究。工程应用问题量大面广，并与相关的其他学科密切相关，放在电机课内学习很难收效，且有无的放矢之嫌。当学生工作中遇到电机工程应用问题时，可以凭借学到的基本知识，通过自学去解决问题。

上述观点，编者曾撰文发表于2002年的电气工程高等教育国际研讨会，受到有关同志的重视和关注，并在机械工业出版社高等教育分社的鼓励和支持下，按上述观点编写了本书。

全书共分三篇11章。微特电机独立成篇。控制电机的原理虽然同动力电机，但对它们的要求和分析的着眼点不同，通过该篇的学习可起到对电机理论的巩固和拓宽作用。

全书例题、习题和思考题共占总篇幅的20%左右，并配有课件光盘。

我们在选择思考题、习题和例题时，考虑了启发学生学习兴趣、补充知识、提高自学能力、拓宽视野等因素。其难易程度亦有较大差异。应用本书时，任课教师可依据专业要求、学时数多少、学生具体情况等酌情筛选。

本书此次修订是根据各兄弟院校在应用本书的实践中提出的意见和建议而进行的。修订的原则是保持本书的原有特色，总体结构基本不变。重点在充实和改进某些内容，并进一步提高课件的质量，以更好地与书相配合，更有利于“教”与“学”。

此次修订由徐德淦、李祖明、林明耀、黄允凯主持。具体是：第一篇由徐德淦执笔，第二篇由李祖明执笔，第三篇除第十章由林明耀撰写外，其余由黄允凯执笔，全书由徐德淦统稿。课件光盘由黄允凯制作。在本书编写过程中，东南大学电机与控制学科的研究生张磊、顾娟、周谷庆、王燕萍、师敬涛、季振亚和王彬彬等录入了书稿的部分章节，在此表示衷心



的感谢。

本书由湖北工业大学周克定、廖家平两位教授主审。主审、兄弟院校任课教师以及南京航空航天大学刘迪吉教授、西华大学何建平教授、江苏科技大学刘维亭教授、南京工业大学王德明教授和张九根教授、南京师范大学王恩荣教授、扬州大学莫岳平教授、上海电器科学研究所季杏法教授、东南大学胡敏强教授和程明教授都对本书提出了许多宝贵的意见和建议，在此对他们表示衷心的感谢。

编者

绪论	1
第1章 电子技术基础	2
1.1 电子学基础	2
1.2 电子元器件	2
1.3 电子测量与实验	2
1.4 电子控制系统的组成	2
1.5 电子控制系统的分析方法	2
1.6 电子控制系统的应用	2
第2章 模拟电子技术基础	3
2.1 晶体管放大器	3
2.2 放大器的频率特性	3
2.3 放大器的非线性失真	3
2.4 放大器的级联	3
2.5 放大器的反馈	3
2.6 放大器的稳定性	3
2.7 放大器的功耗	3
2.8 放大器的输出功率	3
2.9 放大器的频率响应	3
2.10 放大器的失真	3
2.11 放大器的非线性失真	3
2.12 放大器的级联	3
2.13 放大器的反馈	3
2.14 放大器的稳定性	3
2.15 放大器的功耗	3
2.16 放大器的输出功率	3
2.17 放大器的失真	3
2.18 放大器的非线性失真	3
2.19 放大器的级联	3
2.20 放大器的反馈	3
2.21 放大器的稳定性	3
2.22 放大器的功耗	3
2.23 放大器的输出功率	3
2.24 放大器的失真	3
2.25 放大器的非线性失真	3
2.26 放大器的级联	3
2.27 放大器的反馈	3
2.28 放大器的稳定性	3
2.29 放大器的功耗	3
2.30 放大器的输出功率	3
2.31 放大器的失真	3
2.32 放大器的非线性失真	3
2.33 放大器的级联	3
2.34 放大器的反馈	3
2.35 放大器的稳定性	3
2.36 放大器的功耗	3
2.37 放大器的输出功率	3
2.38 放大器的失真	3
2.39 放大器的非线性失真	3
2.40 放大器的级联	3
2.41 放大器的反馈	3
2.42 放大器的稳定性	3
2.43 放大器的功耗	3
2.44 放大器的输出功率	3
2.45 放大器的失真	3
2.46 放大器的非线性失真	3
2.47 放大器的级联	3
2.48 放大器的反馈	3
2.49 放大器的稳定性	3
2.50 放大器的功耗	3
2.51 放大器的输出功率	3
2.52 放大器的失真	3
2.53 放大器的非线性失真	3
2.54 放大器的级联	3
2.55 放大器的反馈	3
2.56 放大器的稳定性	3
2.57 放大器的功耗	3
2.58 放大器的输出功率	3
2.59 放大器的失真	3
2.60 放大器的非线性失真	3
2.61 放大器的级联	3
2.62 放大器的反馈	3
2.63 放大器的稳定性	3
2.64 放大器的功耗	3
2.65 放大器的输出功率	3
2.66 放大器的失真	3
2.67 放大器的非线性失真	3
2.68 放大器的级联	3
2.69 放大器的反馈	3
2.70 放大器的稳定性	3
2.71 放大器的功耗	3
2.72 放大器的输出功率	3
2.73 放大器的失真	3
2.74 放大器的非线性失真	3
2.75 放大器的级联	3
2.76 放大器的反馈	3
2.77 放大器的稳定性	3
2.78 放大器的功耗	3
2.79 放大器的输出功率	3
2.80 放大器的失真	3
2.81 放大器的非线性失真	3
2.82 放大器的级联	3
2.83 放大器的反馈	3
2.84 放大器的稳定性	3
2.85 放大器的功耗	3
2.86 放大器的输出功率	3
2.87 放大器的失真	3
2.88 放大器的非线性失真	3
2.89 放大器的级联	3
2.90 放大器的反馈	3
2.91 放大器的稳定性	3
2.92 放大器的功耗	3
2.93 放大器的输出功率	3
2.94 放大器的失真	3
2.95 放大器的非线性失真	3
2.96 放大器的级联	3
2.97 放大器的反馈	3
2.98 放大器的稳定性	3
2.99 放大器的功耗	3
2.100 放大器的输出功率	3
2.101 放大器的失真	3
2.102 放大器的非线性失真	3
2.103 放大器的级联	3
2.104 放大器的反馈	3
2.105 放大器的稳定性	3
2.106 放大器的功耗	3
2.107 放大器的输出功率	3
2.108 放大器的失真	3
2.109 放大器的非线性失真	3
2.110 放大器的级联	3
2.111 放大器的反馈	3
2.112 放大器的稳定性	3
2.113 放大器的功耗	3
2.114 放大器的输出功率	3
2.115 放大器的失真	3
2.116 放大器的非线性失真	3
2.117 放大器的级联	3
2.118 放大器的反馈	3
2.119 放大器的稳定性	3
2.120 放大器的功耗	3
2.121 放大器的输出功率	3
2.122 放大器的失真	3
2.123 放大器的非线性失真	3
2.124 放大器的级联	3
2.125 放大器的反馈	3
2.126 放大器的稳定性	3
2.127 放大器的功耗	3
2.128 放大器的输出功率	3
2.129 放大器的失真	3
2.130 放大器的非线性失真	3
2.131 放大器的级联	3
2.132 放大器的反馈	3
2.133 放大器的稳定性	3
2.134 放大器的功耗	3
2.135 放大器的输出功率	3
2.136 放大器的失真	3
2.137 放大器的非线性失真	3
2.138 放大器的级联	3
2.139 放大器的反馈	3
2.140 放大器的稳定性	3
2.141 放大器的功耗	3
2.142 放大器的输出功率	3
2.143 放大器的失真	3
2.144 放大器的非线性失真	3
2.145 放大器的级联	3
2.146 放大器的反馈	3
2.147 放大器的稳定性	3
2.148 放大器的功耗	3
2.149 放大器的输出功率	3
2.150 放大器的失真	3
2.151 放大器的非线性失真	3
2.152 放大器的级联	3
2.153 放大器的反馈	3
2.154 放大器的稳定性	3
2.155 放大器的功耗	3
2.156 放大器的输出功率	3
2.157 放大器的失真	3
2.158 放大器的非线性失真	3
2.159 放大器的级联	3
2.160 放大器的反馈	3
2.161 放大器的稳定性	3
2.162 放大器的功耗	3
2.163 放大器的输出功率	3
2.164 放大器的失真	3
2.165 放大器的非线性失真	3
2.166 放大器的级联	3
2.167 放大器的反馈	3
2.168 放大器的稳定性	3
2.169 放大器的功耗	3
2.170 放大器的输出功率	3
2.171 放大器的失真	3
2.172 放大器的非线性失真	3
2.173 放大器的级联	3
2.174 放大器的反馈	3
2.175 放大器的稳定性	3
2.176 放大器的功耗	3
2.177 放大器的输出功率	3
2.178 放大器的失真	3
2.179 放大器的非线性失真	3
2.180 放大器的级联	3
2.181 放大器的反馈	3
2.182 放大器的稳定性	3
2.183 放大器的功耗	3
2.184 放大器的输出功率	3
2.185 放大器的失真	3
2.186 放大器的非线性失真	3
2.187 放大器的级联	3
2.188 放大器的反馈	3
2.189 放大器的稳定性	3
2.190 放大器的功耗	3
2.191 放大器的输出功率	3
2.192 放大器的失真	3
2.193 放大器的非线性失真	3
2.194 放大器的级联	3
2.195 放大器的反馈	3
2.196 放大器的稳定性	3
2.197 放大器的功耗	3
2.198 放大器的输出功率	3
2.199 放大器的失真	3
2.200 放大器的非线性失真	3
2.201 放大器的级联	3
2.202 放大器的反馈	3
2.203 放大器的稳定性	3
2.204 放大器的功耗	3
2.205 放大器的输出功率	3
2.206 放大器的失真	3
2.207 放大器的非线性失真	3
2.208 放大器的级联	3
2.209 放大器的反馈	3
2.210 放大器的稳定性	3
2.211 放大器的功耗	3
2.212 放大器的输出功率	3
2.213 放大器的失真	3
2.214 放大器的非线性失真	3
2.215 放大器的级联	3
2.216 放大器的反馈	3
2.217 放大器的稳定性	3
2.218 放大器的功耗	3
2.219 放大器的输出功率	3
2.220 放大器的失真	3
2.221 放大器的非线性失真	3
2.222 放大器的级联	3
2.223 放大器的反馈	3
2.224 放大器的稳定性	3
2.225 放大器的功耗	3
2.226 放大器的输出功率	3
2.227 放大器的失真	3
2.228 放大器的非线性失真	3
2.229 放大器的级联	3
2.230 放大器的反馈	3
2.231 放大器的稳定性	3
2.232 放大器的功耗	3
2.233 放大器的输出功率	3
2.234 放大器的失真	3
2.235 放大器的非线性失真	3
2.236 放大器的级联	3
2.237 放大器的反馈	3
2.238 放大器的稳定性	3
2.239 放大器的功耗	3
2.240 放大器的输出功率	3
2.241 放大器的失真	3
2.242 放大器的非线性失真	3
2.243 放大器的级联	3
2.244 放大器的反馈	3
2.245 放大器的稳定性	3
2.246 放大器的功耗	3
2.247 放大器的输出功率	3
2.248 放大器的失真	3
2.249 放大器的非线性失真	3
2.250 放大器的级联	3
2.251 放大器的反馈	3
2.252 放大器的稳定性	3
2.253 放大器的功耗	3
2.254 放大器的输出功率	3
2.255 放大器的失真	3
2.256 放大器的非线性失真	3
2.257 放大器的级联	3
2.258 放大器的反馈	3
2.259 放大器的稳定性	3
2.260 放大器的功耗	3
2.261 放大器的输出功率	3
2.262 放大器的失真	3
2.263 放大器的非线性失真	3
2.264 放大器的级联	3
2.265 放大器的反馈	3
2.266 放大器的稳定性	3
2.267 放大器的功耗	3
2.268 放大器的输出功率	3
2.269 放大器的失真	3
2.270 放大器的非线性失真	3
2.271 放大器的级联	3
2.272 放大器的反馈	3
2.273 放大器的稳定性	3
2.274 放大器的功耗	3
2.275 放大器的输出功率	3
2.276 放大器的失真	3
2.277 放大器的非线性失真	3
2.278 放大器的级联	3
2.279 放大器的反馈	3
2.280 放大器的稳定性	3
2.281 放大器的功耗	3
2.282 放大器的输出功率	3
2.283 放大器的失真	3
2.284 放大器的非线性失真	3
2.285 放大器的级联	3
2.286 放大器的反馈	3
2.287 放大器的稳定性	3
2.288 放大器的功耗	3
2.289 放大器的输出功率	3
2.290 放大器的失真	3
2.291 放大器的非线性失真	3
2.292 放大器的级联	3
2.293 放大器的反馈	3
2.294 放大器的稳定性	3
2.295 放大器的功耗	3
2.296 放大器的输出功率	3
2.297 放大器的失真	3
2.298 放大器的非线性失真	3
2.299 放大器的级联	3
2.300 放大器的反馈	3
2.301 放大器的稳定性	3
2.302 放大器的功耗	3
2.303 放大器的输出功率	3
2.304 放大器的失真	3
2.305 放大器的非线性失真	3
2.306 放大器的级联	3
2.307 放大器的反馈	3
2.308 放大器的稳定性	3
2.309 放大器的功耗	3
2.310 放大器的输出功率	3
2.311 放大器的失真	3
2.312 放大器的非线性失真	3
2.313 放大器的级联	3
2.314 放大器的反馈	3
2.315 放大器的稳定性	3
2.316 放大器的功耗	3
2.317 放大器的输出功率	3
2.318 放大器的失真	3
2.319 放大器的非线性失真	3
2.320 放大器的级联	3
2.321 放大器的反馈	3
2.322 放大器的稳定性	3
2.323 放大器的功耗	3
2.324 放大器的输出功率	3
2.325 放大器的失真	3
2.326 放大器的非线性失真	3
2.327 放大器的级联	3
2.328 放大器的反馈	3
2.329 放大器的稳定性	3
2.330 放大器的功耗	3
2.331 放大器的输出功率	3
2.332 放大器的失真	3
2.333 放大器的非线性失真	3
2.334 放大器的级联	3
2.335 放大器的反馈	3
2.336 放大器的稳定性	3
2.337 放大器的功耗	3
2.338 放大器的输出功率	3
2.339 放大器的失真	3
2.340 放大器的非线性失真	3
2.341 放大器的级联	3
2.342 放大器的反馈	3
2.343 放大器的稳定性	3
2.344 放大器的功耗	3
2.345 放大器的输出功率	3
2.346 放大器的失真	3
2.347 放大器的非线性失真	3
2.348 放大器的级联	3
2.349 放大器的反馈	3
2.350 放大器的稳定性	3
2.351 放大器的功耗	3
2.352 放大器的输出功率	3
2.353 放大器的失真	3
2.354 放大器的非线性失真	3
2.355 放大器的级联	3
2.356 放大器的反馈	3
2.357 放大器的稳定性	3
2.358 放大器的功耗	3
2.359 放大器的输出功率	3
2.360 放大器的失真	3
2.361 放大器的非线性失真	3
2.362 放大器的级联	3
2.363 放大器的反馈	3
2.364 放大器的稳定性	3
2.365 放大器的功耗	3
2.366 放大器的输出功率	3
2.367 放大器的失真	3
2.368 放大器的非线性失真	3
2.369 放大器的级联	3
2.370 放大器的反馈	3
2.371 放大器的稳定性	3
2.372 放大器的功耗	3
2.373 放大器的输出功率	3
2.374 放大器的失真	3
2.375 放大器的非线性失真	3
2.376 放大器的级联	3
2.377 放大器的反馈	3
2.378 放大器的稳定性	3
2.379 放大器的功耗	3
2.380 放大器的输出功率	3
2.381 放大器的失真	3
2.382 放大器的非线性失真	3
2.383 放大器的级联	3
2.384 放大器的反馈	3
2.385 放大器的稳定性	3
2.386 放大器的功耗	3
2.387 放大器的输出功率	3
2.388 放大器的失真	3
2.389 放大器的非线性失真	3

主要符号表

角标的含义：

“¹” 归算值；瞬态值

“²” 超瞬态值

“*” 标么值

下标的含义：

a 电枢值

ad 附加

av 平均值

c 临界值；控制

e 有效；电动势

em 电磁

f 励磁

i 电流

k 短路

m 励磁

N 额定

0 空载

R 转子；接收机

S 定子；绕组元件总数

s 同步

T 变压器

ν 谐波次数

δ 气隙

σ 漏磁

主要符号

A 面积；A相

a 绕组并联支路对数；复数算子

B B相；磁通密度

b 宽度；磁通密度瞬时值

C C相；绕组每槽并列圈边数

C_T 转矩常数

D 直轴；直径；差动式

E 电动势，对交流表示有效值

E_q q 个线圈合成电动势

E_Q 虚拟电动势

e 电动势瞬时值

F 磁动势；励磁绕组

F_{q1}	q 个线圈的基波合成磁动势
f	频率
H	磁场强度
I	电流；对交流表示有效值
I_p	励磁电流中的无功分量
i	电流瞬时值
J	转动惯量
K_m	过载能力
N	绕组总匝数；每相绕组串联匝数
N_c	每元件匝数；每圈边导体数
n	转速
P	功率
P_{mech}	机械功率
p	极对数；损耗功率
P_{Cu}	铜耗
P_{Fe}	铁耗
P_{mech}	机械损耗
Q	槽数；交轴
Q_e	虚槽数
q	每极每相槽数
r	交流电阻
R	直流电阻
S	视在功率；容量；绕组元件数
s	转差率
T	转矩；时间常数
T_c	换向周期
t	时间；时间常数
T_{as}	三相突然短路非周期分量电流
	衰减时间常数
T''_{as}	超瞬变电流分量衰减时间常数
T'_{as}	瞬变电流分量衰减时间常数
T_{do}	定子开路时励磁绕组电流自由分量
	衰减时间常数
U	电压，对交流为有效值
u	电压瞬时值
Δu	电压变化率



$2\Delta U$	电刷接触电压降
W	功; 能; 绕组
W_m	磁场储能
x	电抗
Y	导纳
y	绕组合成节距
Z	阻抗, $Z = r + jx$; 电枢总导体数
α	角度; 槽与槽间的夹角
β	夹角; 绕组短距角
δ	气隙; 功率角
η	效率
θ	位置角; 失调角
Λ	磁导
μ	磁导率
τ	极距; 时间常数
Φ	磁通量
Φ_m	主磁通; 每极磁通量
φ	功率因数角
Ψ	磁链
ψ	内功率因数角
Ω	机械角速度; 磁阻
ω	角频率; 电气角速度

目 录

第3版前言	
第2版前言	
主要符号表	
第一篇 总论	1
第一节 电机的基本功能与分类	1
第二节 电机的基本作用原理	2
一、磁场、磁感应强度、磁通	2
二、磁场强度、磁导率	4
三、安培环路定律（全电流定律）	4
四、磁路、磁路参数	5
五、磁性材料的 $B-H$ 曲线	6
六、铁心损耗	7
七、磁场储能	8
八、电感	9
九、电磁感应定律	10
十、电磁力、电磁转矩	12
十一、能量守恒原理	12
十二、电机的可逆性原理	13
第三节 电机的基本结构	13
一、定子	13
二、转子	14
三、主要材料	14
第四节 电机的基本分析方法	15
一、电路方程式	15
二、等效电路	16
三、相量图	16
四、旋转磁场	16
五、功率平衡	16
六、对称分量法	17
七、傅里叶级数	17
第五节 电机的基本特性	17
一、外特性	17
二、效率特性	17
三、电机的起动特性	17
四、电机的调节特性	17
思考题	18
习题	18
第二篇 动力电机	22
第一章 直流电机	22
第一节 直流电机的基本功能与用途	22
第二节 直流电机的基本作用原理	23
第三节 直流电机的基本结构	25
一、主磁极与励磁线圈	25
二、电枢铁心	26
三、电枢绕组及绕组术语	26
四、直流电机电枢绕组的特点	27
五、单叠绕组	28
六、单波绕组	29
七、换向器和电刷装置	30
八、换向极	31
九、气隙	31
十、机座和端盖	31
第四节 直流电机的基本分析方法	31
一、气隙磁场	32
二、电刷间的感应电动势 E_a	34
三、直流电机的电磁转矩 T_{em}	35
四、电磁功率 P_{em}	35
五、电压方程式	36
六、功率平衡方程式	37
第五节 直流电机的基本特性	37
一、直流发电机的基本特性	37
二、直流电动机的基本特性	42
三、电动机稳定运行的条件	44
四、直流电动机的起动	45
五、直流电动机的调速	46
六、直流电动机制动的概念	47
七、火花、换向	48



八、铭牌数据	49	二、定子绕组	99
思考题	50	三、转子铁心	102
习 题	51	四、绕线转子绕组	102
第二章 变压器	58	五、笼型绕组	103
第一节 变压器的基本功能与用 途	58	六、气隙	103
第二节 变压器的基本作用原理	58	七、铭牌数据和额定值	103
第三节 变压器的基本结构	61	第四节 基本分析方法	104
第四节 变压器的基本分析方法	62	一、旋转磁场	104
一、变压器的基本方程式	63	二、感应电动机与变压器的比较	114
二、归算	64	三、转子卡住不动时的绕线转子感应 电动机	115
三、变压器的等效电路	65	四、转子转动后的绕线转子感应电动 机	117
四、关于三相变压器	66	五、感应电动机的基本方程式和等效 电路	119
五、变压器的相量图	67	六、笼型感应电动机	120
六、标幺制	67	七、感应电动机等效电路参数的 测定	121
七、变压器参数的测定	68	第五节 基本特性	122
第五节 变压器的基本特性	70	一、功率关系	122
一、电压	71	二、转矩公式	123
二、波形与频率	71	三、感应电动机的工作特性	126
三、相位角	72	四、感应电动机的起动	127
四、变压器的工作特性	74	五、感应电动机的调速	130
第六节 变压器的几种运行方式	75	第六节 单相感应电动机	134
一、并联运行	75	思考题	138
二、三相变压器的不对称运行	76	习 题	142
三、变压器的瞬态过程	79		
第七节 几种特殊结构的变压器	81	第四章 同步电机	155
一、自耦变压器	81	第一节 同步电机的基本功能及 用途	155
二、三绕组变压器	82	第二节 同步电机的基本作用原 理	155
三、互感器	84	第三节 同步电机的基本构造	157
四、整流装置中的变压器	85	一、转子	157
思考题	86	二、定子	159
习 题	87	三、机座	160
第三章 感应电机	98	四、气隙	160
第一节 感应电机的基本功能与用 途	98	五、冷却系统	161
第二节 感应电机的基本作用 原理	98	六、励磁系统	163
第三节 感应电机的基本结构	99	七、铭牌数据	164
一、定子铁心	99	第四节 同步电机的基本分析方 法	164



一、两种旋转磁场	164
二、电枢反应	165
三、隐极同步发电机的分析方法	168
四、凸极同步发电机的分析方法	170
五、铁心饱和的影响	173
六、同步电机稳态参数的测定	175
第五节 同步电机的基本特性	179
一、同步发电机正常运行时的 特性	179
二、同步发电机与电网并联运行	181
三、同步电动机	187
四、同步补偿机	191
第六节 同步电机几种不正常 运行	191
一、同步发电机的不对称运行	191
二、各序阻抗及对应的等效电路	191
三、不对称短路（稳态）举例	194
四、同步电机的突然短路	197
思考题	203
习 题	204
第三篇 微特电机	215
第五章 伺服电动机	218
第一节 直流伺服电动机	218
一、概述	218
二、电枢控制的工作原理	218
三、电枢控制直流伺服电动机的静态 特性	219
四、动态特性简介	219
五、几种低惯量直流伺服电动机	221
六、无刷直流电动机	222
第二节 交流伺服电动机	222
一、概述	222
二、交流伺服电动机的对称分量 分析	224
三、各序的等效电路	224
四、伺服电动机的电压方程和电磁 功率	225
五、伺服电动机获得圆形旋转磁场的 条件	226
六、交流伺服电动机的特性	227
第三节 力矩电动机	228

思考题	229
习 题	229
第六章 步进电动机	231
第一节 概述	231
第二节 基本工作原理	231
第三节 基本构造	232
第四节 基本特性	236
第五节 开关磁阻调速电动机	239
思考题	240
习 题	242
第七章 测速发电机	243
第一节 概述	243
第二节 直流测速发电机	243
第三节 同步测速发电机和脉冲测 速发电机	245
第四节 交流异步测速发电机	245
思考题	247
习 题	247
第八章 旋转变压器	248
第一节 概述	248
第二节 正弦和余弦旋转变压器	248
第三节 旋转变压器的补偿问题	250
第四节 线性旋转变压器	250
第五节 应用举例	251
思考题	252
习 题	253
第九章 自整角机	254
第一节 概述	254
第二节 基本结构	255
第三节 自整角机的指示式运行	255
第四节 差动式自整角机	257
第五节 自整角机的变压器式 运行	258
思考题	259
习 题	260
第十章 永磁无刷直流电动机	261



第一节 概述.....	261	习 题	288
第二节 基本结构和工作原理	261		
一、基本结构.....	261	第十二章 直线电动机简介	289
二、工作原理.....	264	一、直线感应电动机.....	289
第三节 基本特性	267	二、直线步进电动机.....	291
一、基本方程.....	267	三、微动直线电动机.....	292
二、运行特性.....	269	四、超声波电动机.....	293
第四节 基本控制方法	269	思考题	293
一、有位置传感器控制.....	270	习 题	295
二、无位置传感器控制.....	272		
小结	277		
思考题	278		
习题	278		
第十一章 单相交流串励电动机	279	第十三章 风力发电机	297
第一节 概述.....	279	第一节 概述.....	297
第二节 基本结构和工作原理	279	第二节 直驱式永磁风力发电机	298
一、基本结构.....	279	一、简介.....	298
二、工作原理.....	280	二、直驱式永磁风力发电机的基本结构和	
第三节 单相串励电动机的工作		工作原理.....	298
特性.....	281	三、直驱式永磁风力发电机的结构	
一、磁通	282	类型.....	299
二、感应电动势	282	四、直驱式永磁风力发电机的运行	
三、电压平衡方程及相量图	283	特性.....	301
四、电磁转矩	284	第三节 双馈式异步风力发电机	304
五、工作特性	284	一、简介	304
第四节 单相串励电动机的调速	286	二、双馈式异步风力发电机的基本结构和	
一、改变电源电压调速	286	工作原理	304
二、改变励磁磁通调速	287	三、双馈式异步风力发电机的基本方程、	
三、串电阻调速	287	等效电路、相量图	305
第五节 单相串励电动机产生的干扰		四、双馈式异步风力发电机的运行	
及其抑制措施	287	控制	308
一、噪声及其抑制措施	287	思考题	308
二、无线电干扰的抑制	288	习题	308
思考题	288		
		部分习题参考答案	309
		参考文献	314

从本章开始将集中讲述零件的表达方法。其中重点讲解型面、齿顶圆及齿根圆的画法，对中滑动轴承盖上，工字钢的尺寸标注和重量的计算式中， I 为惯性矩， L 为轴长， ρ 为半径， θ 为转速， η 为效率， G 为重力常数， F 为轴向推力， D 为轴颈直径， d 为轴颈直径， r 为轴颈半径， μ 为摩擦系数， ω 为角速度， τ 为寿命， σ 为许用应力， σ_{b} 为许用弯曲应力， σ_{t} 为许用剪切应力， σ_{c} 为许用压应力， σ_{r} 为许用拉应力， σ_{f} 为许用疲劳强度， σ_{m} 为许用接触应力， σ_{p} 为许用压强， σ_{v} 为许用剪切强度， σ_{c} 为许用弯曲强度， σ_{t} 为许用剪切强度， σ_{c} 为许用压强度， σ_{r} 为许用拉强度， σ_{f} 为许用疲劳强度， σ_{m} 为许用接触强度， σ_{p} 为许用压强。

第一篇

总论

第一节 电机的基本功能与分类

任何机器都是能量转换装置，电机是以磁场为媒介进行机械能和电能相互转换的电磁装置。其中除变压器外，均为机、电能量的转换，涉及的机械能主要是旋转机械功率。把机械能转换为电能的称发电机，其逆运行为电动机。变压器的功能是将某个电压的交流电能转换成同频率但不同电压的交流电能，它是静止不动的，故应称为器，不称机。只因为它的工作原理和分析方法与旋转电机密切关联，故无例外地将它列入电机范畴。

电机分类方法众多，常用的方法是：按电能的性质分为直流、交流电机；按同步转速 $n_s = 60f/p$ （单位为 r/min ）分类，它是取决于电频率 f （单位为 Hz ）和电机磁极对数 p 的一个常数。凡是电机转速等于 n_s 的称同步电机，不等于 n_s 的称异步电机或感应电机，没有固定 n_s 的为直流电机。

同步发电机是当前人类获取电能最重要的装置，无论火电厂、核电厂、水电站，它们只是获得初始能量的方法不同，由热能、核能、水的势能转换为机械能，最后都是通过同步发电机将机械能转换为电能。电动机是当今获取机械能最方便、灵活、可靠的装置，尤以异步电机最为常见。无论工业、商业、交通运输、办公民用，处处可见各种各样、大小不一、功能不同的电动机。电能传输宜用高电压（ $220 \sim 500\text{kV}$ ，甚至更高），用电端电压较低（ 380V ， 220V ）。为此，电力系统中必须把交流电压进行升降变换，绝大部分由变压器来完成。

从电机的容量、体积来看，其间差异极为悬殊。交流同步发电机的容量最大可达上千 MW（ 1000MW 的汽轮发电机，其转子直径达 1.25m ，轴长近 10m ）。容量为 700MW 的长江三峡电站水轮发电机，转子直径近 20m 之巨，相应的配套变压器的容量为 $360\text{MV} \cdot \text{A}$ 、 $840\text{MV} \cdot \text{A}$ ，



它们的重量竟达数千吨。反之，有些控制用微电机，外径不到10mm，转子轴直径不到1mm，其重量以克来计算，最小的微型电动机转子直径仅为100μm，可以在人体的血管中移动工作。不同电机的转速亦有极大差异，从一分钟数转到一分钟几十万转。

可见，电机的种类繁多，性能各异。本书只择其基本型、常见型、有代表性的电机分述于后。

第二节 电机的基本作用原理

电机是通过电磁感应原理来实现能量转换的，因此，电和磁是构成电机的两大要素。

电在电机中主要是以路的形式出现，即由导体、线圈、绕组构成电机的电路。可以是直流电路，也可以是单相、两相或对称三相交流电路。这些电路的理论和分析方法未超出先修课“电路”的内容，这里就不再重复了。但有一点值得一提的是，电机是旋转机械，必然有固定不动的部分（称它为定子）、能旋转的转动部分（称为转子），二者之间必须有空气隙才能正常工作。因此，定子上的电路属于普通的静止电路，转子上的电路是和转子一起旋转的旋转电路。外界的静止电路如何与转子电路连通，是电机电路的一个特殊问题，它可通过滑动接触示意图如图0-1所示。其中图0-1a称为集电环与电刷结构，由石墨-碳导电材料制成的固定电刷与静止的外电路相连接，转子上的导体与由导电材料制成的环状集电环随转轴旋转，受有适当压力的电刷 b_1 始终通过滑动接触与集电环 r_1 （导体1）联通。同理， b_2 与 r_2 （导体2）联通。此种结构只解决旋转电路（导体）与静止电路（电刷）的电气连接问题。图0-1b为换向片与电刷结构，由图可见，导电材料制成的瓦状换向片与导体随转轴一起旋转，固定的电刷 b_1 在半周中与换向片A（导体1）联通，在另外半周内改为与换向片B（导体2）联通。此类结构除了解决旋转和静止电路的联通外，还起着改换连接关系的作用，称为换向。上述结构中，前者常见于交流电机，后者主要用在直流电机中。

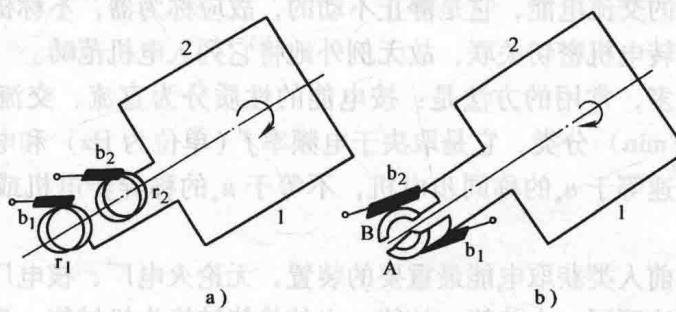


图0-1 滑动接触示意图

a) 集电环与电刷结构 b) 换向片与电刷结构

磁在电机中是以场的形式存在的，一般工程分析计算时，为了方便，常将磁场简化为磁路来处理。与电路相比，无论是磁路还是磁场，同学们相对接触较少，比较生疏。因此，有必要在先修课的基础上，对它们作一简要回顾并给予适当的延伸。

一、磁场、磁感应强度、磁通

运动电荷（电流）的周围空间存在着一种特殊形态的物质，人们称之为磁场。磁场可由位于该空间的载流导体所受到的一种力——洛伦兹力来确定它的存在及了解它的性质。具



体说来，上述洛伦兹力 dF 可表示为

$$dF = IdlB \quad (0-1)$$

式中， I 为载流导体中的电流 (A)； dl 为导体微小单元长度 (m)； dF 为该微小导体单元上受到的洛伦兹力 (N)，亦称为电磁力； B 为导体单元 dl 所在空间的磁场性质的一个基本物理量，称为磁感应强度，它是一个矢量，单位为 T (特斯拉)。式 (0-1) 的约束条件是 F 、 l 、 B 三者互相垂直，并且 F 有确定的方向。

在给定的磁场中，某一点的磁感应强度 B 的大小和方向都是确定的。若设想用假想的曲线来表示磁场的分布，则应规定曲线上的每一点的切线方向就是该点磁感应强度 B 的方向。这样的曲线叫做磁感应线或磁力线。要注意，磁力线是人为地设想出来用以描述磁场的，并非磁场中真的有这种线存在。

图 0-2 中示出了长导线、环形导线和螺线管载流时的磁感应线的图形，可见磁感应线具有以下特性：

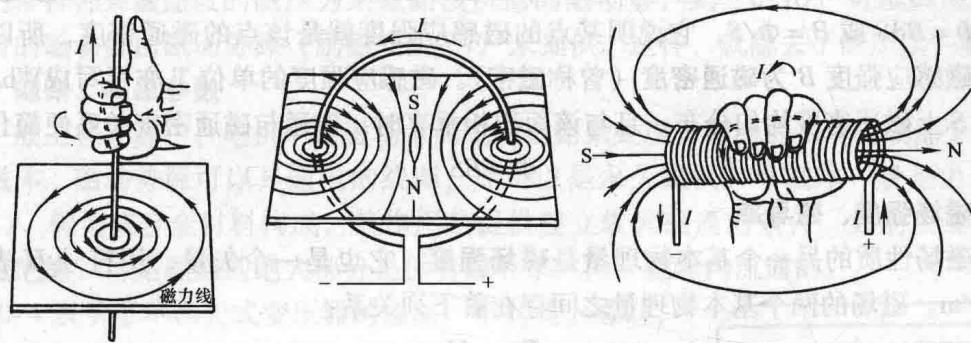


图 0-2 载流长导线、环形导线和螺线管载流时的磁感应线

- 1) 磁感应线的回转方向和导体中电流的方向之间的关系遵守右手螺旋法则。
- 2) 磁感应线不会相交，因为磁场中每点的磁感应强度的方向是唯一的。
- 3) 磁感应线都是围绕电流的闭合曲线，没有起点，也没有终点。

为了使磁感应线不但能表示磁场的方向，而且能描述磁场各点的强弱，人们以磁感应线的疏密程度来表示该点处的磁感应强度 B 的大小。对磁感应线的多少规定如下：通过磁场中某点处垂直于 B 矢量的单位面积上的磁感应线的多少定义为该点 B 的数值，故亦称它为磁感应线密度。因此，磁场强的地方， B 大，磁感应线密；磁场弱的地方， B 小，磁感应线稀。

对均匀磁场来说，磁场中的磁感应线相互平行，各点的 B 相等；对非均匀磁场来说，各条磁感应线相互不平行，各处的 B 大小不相等。

工程上常把通过磁场中某一面积的磁感线数称为通过该面积的磁通量，简称磁通，用符号 Φ 表示，单位为 Wb (韦伯)。

根据上述磁感应强度和磁通的定义，由图 0-3 可见，在均匀磁场中，穿过面积 S 的磁通为

$$\Phi = BS\cos\theta \quad (0-2)$$

式中， θ 为面积 S (m^2) 的法线 n 与磁感应强度 B 之间的夹角。

由式 (0-2) 可见，当磁感应线与 S 平面正交时 ($\theta = 0^\circ$)，通过平面 S 的磁通量为最大；当两者平行时 ($\theta = 90^\circ$)，通过平面 S 的磁通量为零。



通过任意曲面的磁通量为

$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S B \cos\theta dS \quad (0-3)$$

式中, dS 为曲面上的单元面积, 其面积分即为通过该曲面的磁通量。

由于磁感应线是闭合的, 无始端也无终端, 因此, 对任意封闭曲面来说, 进入该闭合曲面的假设为正的磁感应线, 它一定等于假设为负的穿出该闭合曲面的磁感应线, 即通过任意封闭曲面的磁通量总和必等于零, 用公式表示为

$$\oint_S B \cos\theta dS = 0 \quad (0-4)$$

这个结论叫做磁场的高斯定理, 也称为磁通连续性定理。

由式 (0-3) 可见, 如果取面积单元 dS 垂直于该点处 (即 $\cos\theta = 1$) 的磁感应强度 B , 于是有 $d\Phi = BdS$ 或 $B = \Phi/S$, 它说明某点的磁感应强度就是该点的磁通密度, 所以在工程中常常称磁感应强度 B 为磁通密度 (曾称磁密)。磁感应强度的单位 T 亦可写成 Wb/m^2 。若某一面积 S 上磁通密度均匀分布, 且与该面积相垂直时, 磁通与磁通密度关系便简化为

$$\Phi = BS \quad (0-5)$$

二、磁场强度、磁导率

表征磁场性质的另一个基本物理量是磁场强度, 它也是一个矢量, 用符号 H 表示, 其单位为 A/m 。磁场的两个基本物理量之间存在着下列关系:

$$B = \mu H \quad (0-6)$$

式中, μ 称为磁导率, 由磁场该点处的介质性质所决定, 其单位是 H/m (亨/米)。

磁导率的数值随介质的性质而异, 变化范围很大。我们熟知的真空导磁率 μ_0 为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$ 。在电机中应用的介质, 一般按其导磁性能分为铁磁物质和非铁磁物质。后者如空气、铜、铝和各种绝缘材料等, 它们的磁导率可认为等于真空磁导率; 前者如铁、镍及其合金, 其磁导率大于真空磁导率达数千甚至上万倍。通常以 μ_r 表示某物质的磁导率 μ 与真空磁导率 μ_0 的比值 (倍数), 称为相对磁导率, 即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (0-7)$$

众所周知, 导电体与非导电体的电导率之比, 其数量级可达 10^{16} 之巨。所以一般电流是沿着导电体流通, 电流主要以由导电体构成的电路的形式出现。导磁体与非导磁体亦即铁磁物质与非铁磁物质的磁导率之比, 其数量级仅为 $10^3 \sim 10^5$ 。所以磁感应线 (磁通) 不只顺着导磁体, 且同时向周围的非导磁体散播流通。因此, 除超导体外, 不存在磁绝缘的概念, 亦不存在磁绝缘体物质。实际上, 磁是以场的形态存在的。

三、安培环路定律 (全电流定律)

安培环流定律, 亦称为全电流定律反映了由电流激励磁场的关系, 式 (0-8) 即该关系的数学表达式

$$\oint_l H dl = \sum_{k=1}^n I_k \quad (0-8)$$

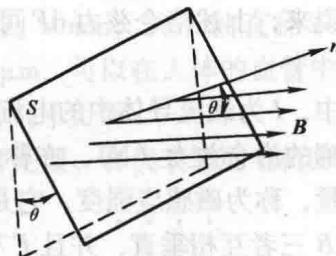


图 0-3 磁感应强度
n—平面 S 的法线



它说明在磁场中，磁场强度矢量 H 沿任一闭合路径的线积分等于穿过该闭合路径的限定面积中流过电流的代数和。积分回路的绕行方向和产生该磁场的电流方向符合右手螺旋定则，参看图 0-2。

人们定义磁场强度沿一条路径 l 的线积分为该路径上的磁压（亦称为磁位差），以符号 U_M 表示，其单位为 A，即有

$$U_M = \int H dl \quad (0-9)$$

由于磁场是由电流所激励，故式 (0-8) 中回路所匝链的电流称为磁动势。通常以符号 F 表示，显然其单位和磁压相同，也为 A。这样，说明电流和它所产生的磁场之间关系的安培环路定律，就可以定义为：沿着磁场中任一闭合回路，其 i 段的总磁压等于总磁动势，为

$$\sum U_{Mi} = \sum I_k \quad (0-10)$$

这与在闭合电路中，总的电压降等于总的电动势相似。

我们常常称某磁路段的磁压为某磁路段所需的磁动势，式 (0-10) 可理解为闭合磁路各段所需的磁动势由磁动势源（励磁安匝 ΣI ）来提供。这样，就隐去了磁压这一名称。

四、磁路、磁路参数

在一般工程计算中，电机中的磁场常简化为磁路来处理。磁路的基本组成部分为磁动势源和导磁体。磁动势源可以是通电的线圈，亦可以是永久磁铁。导磁体一般是由电工钢片（硅钢片）、铸钢或合金材料构成，其作用是提供建立较大磁通的条件。如前所述，虽然没有什么磁绝缘，可是磁通的绝大部分是循着磁导率大的导磁体内流通的。

图 0-4 表示了单相壳式变压器的磁路，中间柱上通过电流的线圈为磁动势源，为简单起见，设变压器二次线圈开路，所以图中未予画出。由电工钢片叠成的铁心为导磁体，可以认为磁通完全在导磁体中通过。由式 (0-10) 可知，对磁路中任何一段，例如，截面积为 S_{cl} ，长度为 l_{cl} 的中间心柱 AB，可认为磁通在截面 S_{cl} 为均匀分布，其磁通密度为 B_{cl} ，则该段磁路的磁通和所需的磁动势（磁压）为

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{cl} &= B_{cl} S_{cl} \\ U_{cl} &= H_{cl} l_{cl} \end{aligned} \right\} \quad (0-11)$$

与电路中的电流和电压降的关系相似，定义

$$\Omega_{cl} = \frac{U_{cl}}{\Phi_{cl}} \quad (0-12)$$

为该心柱段的磁阻，单位为 A/Wb，式 (0-12) 指出了一个磁路段上磁通与磁压间的关系，称为磁路的欧姆定律。

设 μ 为该段磁路导磁体的磁导率，则根据式 (0-6)、式 (0-11)、式 (0-12)，写出磁阻的广义表示式为

$$\Omega = \frac{l}{\mu S} \quad (0-13)$$

可见磁阻的表示式与导体电阻表示式相似。同样，称磁阻的倒数为磁导，用符号 A 表示。

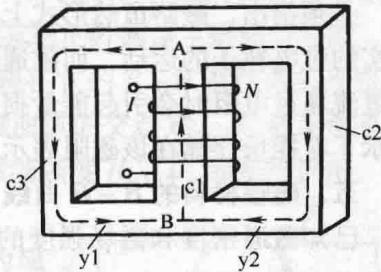


图 0-4 单相壳式变压器的磁路

AB 为中心柱 c1、c2、c3
为两侧心柱；y1、y2 为磁轭