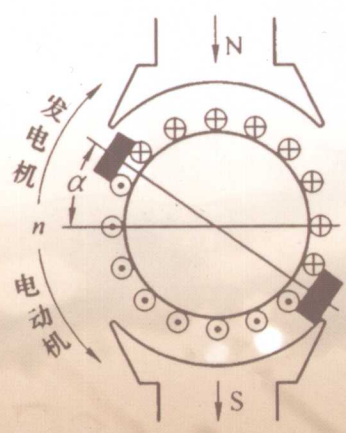



普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

DIANQI
XINXILEI

电机与拖动

■ 孙建忠 刘凤春 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

电机与拖动

主编 孙建忠 刘凤春

参编 刘彦呈 任 齐 曲兵妮

主审 陈希有



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材。本书分上、下两篇，上篇为电机学，简述了电机的基本理论和基本分析方法，共六章，包括电机学基础知识、直流电机、变压器、异步电机和同步电机的基本理论，以及控制电机的原理与应用等；下篇为电力拖动，主要阐述各类电动机电力拖动的基本原理和方法，共五章，包括电力拖动基础知识、直流电动机、异步电动机和同步电动机的电力拖动以及电力拖动系统中电动机的选择等。

本书配套出版有《电机与拖动 MATLAB 仿真和学习指导》和《电机与拖动多媒体教学光盘》。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化等相关专业的教材，也可作为有关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与拖动/孙建忠, 刘凤春主编. —北京: 机械工业出版社, 2007.6
普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材
ISBN 978-7-111-21696-4

I. 电… II. ①孙…②刘… III. ①电机-高等学校-教材②电力传动-高等学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 091655 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 刘丽敏 苏颖杰 版式设计: 张世琴 责任校对: 陈延翔

封面设计: 张 静 责任印制: 杨 曦

三河市国英印务有限公司印刷

2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·18.75 印张·456 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-21696-4

定价: 27.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379727

封面防伪标均为盗版

前 言

《电机与拖动》是原“电机学”、“电力拖动”和“控制电机”等课程的有机结合。全书分上、下两篇。上篇为电机学，包括电机学基础知识、直流电机、变压器、异步电机和同步电机的基本理论，以及控制电机的原理与应用等。下篇为电力拖动，包括电力拖动基础知识和直流电动机、异步电动机与同步电动机的电力拖动，以及电力拖动系统中电动机的选择等。总学时数为60~72学时，章、节前标有“*”的部分为选学内容。

本教材是编者在总结多年从事电机的教学和科研工作基础上编写的，具有以下特点：

首先，根据电机学科的发展趋势，适当地压缩直流电机的内容。讲清直流电机的结构和原理，对直流电机的绕组、电枢反应、换向等问题只做简要介绍，以他励直流电动机为例介绍直流电机的电力拖动，使学生既能全面了解直流电机的特点，又不需花费过多的学时。

其次，适当加重同步发电机的教学内容，以适应电气自动化专业的教学需要。针对目前同步电动机的发展和应用现状，同步电动机电力拖动中着重介绍永磁同步电动机、无刷直流电动机、开关磁阻电动机等现代调速系统。

在讲清电机与拖动基础理论的同时，介绍各类电机的最新成果和动态，体现当代电机技术的最新进展与趋势，力争使学生树立机电一体化的概念，既为后续课程的学习打好基础，又激发学生的学习兴趣。

全书侧重于基本原理和基本概念的阐述，强调基本理论的实际应用。在讲清各种电机的基本结构、基本原理、基本分析方法的基础上，介绍其应用要旨、实际系列等；各章所选例题与习题大量来自工程实际问题，通过学习培养学生解决实际问题的能力。

突出重点，分解难点。将不易理解的知识变为易于接受的方式叙述，如将异步电机在不同运行情况下的参数变化等难点问题在例题中讲解；把交流电机的绕组、磁动势和电动势等内容进行分解，在异步电机理论中简要介绍。

本书是一套立体化教材，除主教材外，还配套出版《电机与拖动 MATLAB 仿真和学习指导》和《电机与拖动多媒体教学光盘》。

本书由大连理工大学孙建忠教授和刘凤春副教授担任主编，第1、4、7、9章由孙建忠编写，第3、5、10章由刘凤春编写，第6、11章由刘彦呈编写，第2、8章由任齐、曲兵妮编写。

本书承蒙大连理工大学陈希有教授主审，他对全书进行了仔细审阅，提出了许多极其宝贵的建议和意见，对此表示衷心感谢。本书在编写中参考了一些国内外有关的著作和文献，在此对这些文献的作者一并表示感谢。

由于编者学识有限，书中难免存在失误或不当之处，敬请广大读者不吝批评指教。

编 者

目 录

前言

上篇 电机学

| | | | |
|----------------------------|----|------------------------|----|
| 第 1 章 电机学基础知识 | 3 | 电磁转矩 | 29 |
| 1.1 电机的基本功能与主要类型 | 3 | 2.4.1 直流电机的感应电动势 | 29 |
| 1.2 电机的基本原理 | 4 | 2.4.2 直流电机的电磁转矩 | 30 |
| 1.2.1 磁场的基本概念 | 4 | 2.5 直流电动机的运行分析 | 30 |
| 1.2.2 磁路及其基本定律 | 6 | 2.5.1 直流电动机的基本方程式 | 30 |
| 1.2.3 电磁感应定律 | 9 | 2.5.2 他励(并励)直流电动机的工作特性 | 31 |
| 1.2.4 线圈的电路方程 | 10 | 2.6 直流发电机的运行分析 | 33 |
| 1.2.5 电磁力定律、电磁转矩 | 11 | 2.6.1 直流发电机的基本方程 | 33 |
| 1.2.6 电机的可逆性原理 | 11 | 2.6.2 他励直流发电机的工作特性 | 35 |
| 1.3 电机的制造材料 | 12 | 2.6.3 并励直流发电机的自励过程与外特性 | 36 |
| 1.3.1 概述 | 12 | 思考题与习题 | 38 |
| 1.3.2 铁磁材料的重要特性 | 13 | | |
| 思考题与习题 | 16 | | |
| 第 2 章 直流电机 | 18 | 第 3 章 变压器 | 41 |
| 2.1 直流电机的工作原理 | 18 | 3.1 变压器的基本结构、分类与额定值 | 41 |
| 2.1.1 直流电动机的工作原理 | 18 | 3.1.1 变压器的基本结构 | 41 |
| 2.1.2 直流发电机的工作原理 | 19 | 3.1.2 变压器的分类 | 44 |
| 2.2 直流电机的基本结构和额定值 | 20 | 3.1.3 变压器的额定值 | 44 |
| 2.2.1 直流电机的基本结构 | 20 | 3.2 变压器的工作原理 | 45 |
| 2.2.2 直流电机的电枢绕组 | 21 | 3.2.1 变压器各电磁量的参考方向 | 46 |
| 2.2.3 直流电机的额定值 | 23 | 3.2.2 变压器的空载运行 | 46 |
| 2.2.4 直流电机按励磁方式分类 | 24 | 3.2.3 变压器的负载运行 | 51 |
| 2.3 直流电机的磁场和电枢反应 | 25 | 3.3 变压器的等效电路和相量图 | 52 |
| 2.3.1 直流电机的空载磁场 | 25 | 3.3.1 绕组折算 | 52 |
| 2.3.2 电枢磁动势 | 25 | 3.3.2 T形等效电路 | 54 |
| 2.3.3 电枢反应 | 26 | 3.3.3 近似和简化等效电路 | 54 |
| * 2.3.4 电枢反应对换向的影响及改善换向的措施 | 27 | 3.3.4 变压器负载运行时的相量图 | 55 |
| 2.4 直流电机的感应电动势和 | | 3.4 标么值 | 57 |

| | | | |
|----------------------------|-----------|-----------------------------|-----|
| 3.4.1 标么值的定义 | 57 | 4.3.2 三相绕组的合成磁动势—— 旋转磁动势 | 99 |
| 3.4.2 采用标么值的优点 | 57 | 4.3.3 三相定子绕组建立的磁场 | 102 |
| 3.5 变压器的参数测定 | 59 | 4.4 三相交流绕组的感应电动势 | 103 |
| 3.5.1 变压器的空载试验 | 59 | 4.4.1 集中整距线圈的感应电动势 | 103 |
| 3.5.2 变压器的短路试验 | 61 | 4.4.2 分布绕组的感应电动势 | 104 |
| 3.6 变压器的运行特性 | 64 | 4.4.3 短距绕组的感应电动势 | 104 |
| 3.6.1 变压器的外特性与 电压调整率 | 64 | 4.4.4 相电动势 | 105 |
| 3.6.2 变压器的功率关系与 效率特性 | 65 | 4.5 三相异步电动机的等效电路 | 106 |
| 3.7 三相变压器的联结组 | 68 | 4.5.1 转子磁动势和电动势 | 106 |
| 3.7.1 三相变压器的类型 | 68 | 4.5.2 定、转子绕组的电压方程—— 频率折算 | 107 |
| 3.7.2 三相变压器的联结组 | 68 | 4.5.3 绕组折算 | 108 |
| 3.8 三相变压器的并联运行 | 71 | 4.5.4 异步电动机的等效电路和 相量图 | 109 |
| 3.8.1 理想并联运行的条件 | 71 | 4.5.5 异步电动机的简化等效电路 | 109 |
| 3.8.2 联结组对并联运行的影响 | 72 | 4.5.6 笼型绕组的极数和相数 | 111 |
| 3.8.3 电压比对并联运行的影响 | 72 | 4.6 三相异步电动机的功率和转矩 | 111 |
| 3.8.4 短路阻抗的标么值对并联运行 的影响 | 72 | 4.6.1 三相异步电动机的功率关系 | 111 |
| 3.9 特殊变压器 | 75 | 4.6.2 三相异步电动机的转矩关系 | 112 |
| 3.9.1 自耦变压器 | 75 | 4.6.3 三相异步电动机电磁转矩的 物理表达式 | 114 |
| 3.9.2 三绕组变压器 | 77 | 4.6.4 三相异步电机的转矩— 转差率特性 | 114 |
| 3.9.3 仪用互感器 | 78 | 4.7 三相异步电动机的工作特性和 参数测定 | 118 |
| 思考题与习题 | 80 | 4.7.1 三相异步电动机的工作特性 | 118 |
| 第4章 异步电机 | 83 | 4.7.2 三相异步电动机的主要 性能指标 | 119 |
| 4.1 三相异步电动机的基本结构与 工作原理 | 83 | 4.7.3 三相异步电动机的参数测定 | 119 |
| 4.1.1 三相异步电动机的基本结构 | 83 | 4.8 单相异步电动机 | 122 |
| 4.1.2 异步电动机的基本工作原理 | 86 | 4.8.1 单相异步电动机的工作原理 | 122 |
| 4.1.3 三相异步电动机的额定值和 主要系列 | 89 | 4.8.2 两相绕组的磁动势 | 123 |
| 4.2 三相交流电机的绕组 | 90 | 4.8.3 单相异步电动机的主要类型和 起动方法 | 125 |
| 4.2.1 交流绕组的基本概念 | 90 | 4.9 三相异步发电机 | 127 |
| 4.2.2 三相双层绕组 | 92 | 4.9.1 三相异步发电机的并网运行 | 127 |
| 4.2.3 三相单层绕组 | 93 | 4.9.2 三相异步发电机的单机运行 | 127 |
| 4.3 三相交流绕组的磁动势 | 94 | 思考题与习题 | 128 |
| 4.3.1 单相绕组的磁动势—— 脉振磁动势 | 94 | | |

| | | | |
|----------------------------|-----|----------------------------|-----|
| 第5章 同步电机 | 130 | 5.7.1 同步电动机的运行分析 | 154 |
| 5.1 同步电机的基本结构和额定值 | 130 | 5.7.2 同步电动机的功率和转矩 | 155 |
| 5.1.1 同步电机的基本结构 | 130 | 5.7.3 同步电动机的运行特性 | 156 |
| 5.1.2 同步电机的励磁方式 | 131 | 5.7.4 同步补偿机 | 157 |
| 5.1.3 同步电机的基本类型 | 132 | 5.8 同步发电机的三相突然短路 | 158 |
| 5.1.4 同步电机的额定值 | 133 | 5.8.1 同步发电机突然短路的物理过程 | 158 |
| 5.2 三相同步电机的工作原理 | 133 | 5.8.2 同步发电机的瞬态电抗 | 160 |
| 5.2.1 三相同步电机的基本原理 | 133 | 5.8.3 同步发电机的超瞬态电抗 | 161 |
| 5.2.2 同步电机的空载运行 | 134 | 思考题与习题 | 162 |
| 5.2.3 同步电机的负载运行和电枢反应 | 134 | 第6章 控制电机 | 165 |
| 5.2.4 三相同步电机的运行状态 | 137 | 6.1 伺服电动机 | 165 |
| 5.3 三相同步发电机的稳态分析 | 138 | 6.1.1 交流伺服电动机 | 165 |
| 5.3.1 隐极同步发电机的稳态分析 | 138 | 6.1.2 直流伺服电动机 | 167 |
| 5.3.2 凸极同步发电机的稳态分析 | 140 | 6.2 步进电动机 | 168 |
| 5.4 三相同步发电机的功率和转矩 | 143 | 6.2.1 基本工作原理 | 168 |
| 5.4.1 功率平衡方程 | 143 | 6.2.2 反应式步进电动机 | 170 |
| 5.4.2 电磁功率与功角特性 | 144 | 6.3 测速发电机 | 171 |
| 5.4.3 电磁转矩与矩角特性 | 145 | 6.3.1 直流测速发电机 | 171 |
| 5.5 三相同步发电机的运行特性 | 146 | 6.3.2 交流异步测速发电机 | 172 |
| 5.5.1 外特性 | 146 | 6.4 自整角机 | 173 |
| 5.5.2 调整特性 | 146 | 6.4.1 自整角机的结构 | 174 |
| 5.5.3 效率特性 | 147 | 6.4.2 力矩式自整角机的工作原理 | 174 |
| 5.6 同步发电机与电网的并联运行 | 147 | 6.4.3 控制式自整角机 | 174 |
| 5.6.1 并联运行的条件 | 147 | 6.5 旋转变压器 | 176 |
| 5.6.2 并联运行的方法 | 148 | 6.6 感应同步器 | 177 |
| 5.6.3 有功功率的调节与稳定问题 | 149 | 思考题与习题 | 179 |
| 5.6.4 无功功率的调节与V形曲线 | 152 | 下篇 电力拖动 | |
| 5.7 三相同步电动机与同步补偿机 | 154 | 7.3.1 恒转矩负载 | 190 |
| 第7章 电力拖动基础 | 183 | 7.3.2 恒功率负载 | 191 |
| 7.1 电力拖动系统的组成与分类 | 183 | 7.3.3 通风机、泵类负载 | 191 |
| 7.2 电力拖动系统的运动方程式 | 183 | 7.4 电力拖动系统的稳定运行条件 | 192 |
| 7.2.1 单轴电力拖动系统的运动方程式 | 183 | 7.5 电力拖动系统调速的基本概念 | 193 |
| 7.2.2 多轴电力拖动系统的折算 | 185 | 7.5.1 调速的基本概念 | 193 |
| 7.3 电力拖动系统的负载特性 | 190 | 7.5.2 调速系统的主要性能指标 | 193 |

| | | | |
|----------------------------|-----|---------------------------|-----|
| 思考题与习题 | 194 | 直接转矩控制 | 246 |
| 第 8 章 直流电动机的电力拖动 | 197 | 9.4 三相异步电动机的制动 | 249 |
| 8.1 他励直流电动机的机械特性 | 197 | 9.4.1 回馈制动 | 249 |
| 8.1.1 固有机械特性 | 197 | 9.4.2 反接制动 | 252 |
| 8.1.2 人为机械特性 | 198 | 9.4.3 能耗制动 | 255 |
| 8.2 他励直流电动机的起动和反转 | 200 | 9.4.4 软停车与软制动 | 256 |
| 8.2.1 电枢回路串联电阻起动 | 200 | 9.5 异步电动机的各种运行状态 | 256 |
| 8.2.2 降低电枢电压起动 | 203 | 思考题与习题 | 257 |
| 8.2.3 他励直流电动机的反转 | 203 | 第 10 章 同步电动机的电力拖动 | 259 |
| 8.3 他励直流电动机的调速 | 204 | 10.1 同步电动机的机械特性 | 259 |
| 8.3.1 电枢回路串联电阻调速 | 204 | 10.2 同步电动机的起动 | 260 |
| 8.3.2 降低电枢电压调速 | 204 | 10.2.1 拖动起动法 | 260 |
| 8.3.3 减弱磁通调速 | 205 | 10.2.2 异步起动法 | 261 |
| 8.4 他励直流电动机的制动 | 206 | 10.2.3 变频起动法 | 261 |
| 8.4.1 能耗制动 | 206 | 10.3 同步电动机的调速和制动 | 262 |
| 8.4.2 反接制动 | 208 | 10.3.1 同步电动机的调速 方法概述 | 262 |
| 8.4.3 回馈制动 | 210 | 10.3.2 同步电动机的制动方法 | 262 |
| 8.5 他励直流电机的四象限运行 | 212 | 10.4 永磁同步电动机调速系统 | 263 |
| 思考题与习题 | 213 | 10.4.1 永磁同步电动机的 基本结构 | 263 |
| 第 9 章 异步电动机的电力拖动 | 215 | 10.4.2 永磁同步电动机的 调速原理 | 264 |
| 9.1 三相异步电动机的机械特性 | 215 | 10.4.3 永磁同步电动机的特点 和应用 | 264 |
| 9.1.1 固有机械特性 | 215 | 10.5 无刷直流电动机调速系统 | 265 |
| 9.1.2 人为机械特性 | 218 | 10.5.1 无刷直流电动机的基本组成 | 265 |
| 9.2 三相异步电动机的起动 | 220 | 10.5.2 无刷直流电动机的工作原理 | 266 |
| 9.2.1 笼型异步电动机的起动 | 220 | 10.5.3 无刷直流电动机的特点与 应用 | 267 |
| 9.2.2 高起动转矩的异步电动机 | 226 | 10.6 开关磁阻电动机调速系统 | 268 |
| 9.2.3 绕线转子异步电动机的起动 | 228 | 10.6.1 开关磁阻电动机传动系统 的组成 | 268 |
| 9.3 三相异步电动机的调速 | 233 | 10.6.2 开关磁阻电动机的 工作原理 | 269 |
| 9.3.1 变极调速 | 233 | 10.6.3 开关磁阻电动机传动系统 的特点 | 269 |
| 9.3.2 变频调速 | 237 | 10.6.4 开关磁阻电动机的应用 | 271 |
| 9.3.3 调压调速 | 240 | 思考题与习题 | 271 |
| 9.3.4 绕线转子异步电动机转子 串电阻调速 | 241 | | |
| 9.3.5 绕线转子异步电动机 串级调速 | 243 | | |
| 9.3.6 电磁调速电动机 | 244 | | |
| *9.3.7 异步电动机调速中的矢量控制和 | | | |

| | | | |
|----------------------|-----|-------------------------|-----|
| 第 11 章 电力拖动系统中电动机的选择 | 273 | 冷却方式 | 278 |
| 11.1 电动机选择的基本原则 | 273 | 11.3 电动机的工作制 | 279 |
| 11.1.1 类型的选择 | 273 | 11.3.1 连续工作制 (S1) | 279 |
| 11.1.2 额定功率的选择 | 274 | 11.3.2 短时工作制 (S2) | 279 |
| 11.1.3 电压等级的选择 | 274 | 11.3.3 断续周期工作制 | 280 |
| 11.1.4 转速的选择 | 274 | 11.4 电动机额定功率的选择 | 281 |
| 11.1.5 外形结构的选择 | 275 | 11.4.1 电动机的允许输出功率 | 281 |
| 11.1.6 安装型式的选择 | 276 | 11.4.2 连续运行电动机额定功率的选择 | 282 |
| 11.1.7 工作制的选择 | 276 | 11.4.3 短时运行电动机额定功率的选择 | 285 |
| 11.1.8 型号的选择 | 276 | 11.4.4 断续周期运行电动机额定功率的选择 | 287 |
| 11.2 电动机的发热与冷却 | 277 | 思考题与习题 | 288 |
| 11.2.1 电动机的发热过程与温升 | 277 | 参考文献 | 289 |
| 11.2.2 电动机的冷却过程与 | | | |

上 篇

电 机 学

第1章 电机学基础知识

电机(包括变压器和旋转电机)是实现能量转换和信号传递的电磁装置,在现代社会中起着极其重要的作用。

电机是电能生产、传输和分配的主要设备,在发电厂,发电机由汽轮机、水轮机、柴油机或其他动力机械带动,这些原动机将燃料燃烧的热能、水的位能、原子核裂变的原子能等转化为机械能输入到发电机,由发电机将机械能转换为电能;发电机发出的电压再通过升压变压器升压后向远距离输送;在各用电区域,又通过不同电压等级的降压变压器将电压降低,供给用户。

在工农业生产和国民经济的各个领域,广泛应用电动机驱动各种生产机械和设备,一个现代化企业需要几百台以至几万台各种不同的电动机;在高级汽车中,为了控制燃料和改善乘车感觉以及显示有关装置状态的需要,要使用40~50台电动机,而未来豪华轿车上的电机可多达80台;家用电器和一些高档消费品,如电唱机、摄录相机、VCD视盘和DVD视盘等都需要配套电机,工业化国家一般家庭中用到35台以上电机。

各种控制电机还被用作控制系统中的执行、检测、放大和解算元件,例如火炮和雷达的自动定位,人造卫星发射和飞行的控制,舰船方向舵的自动操纵,机床加工的自动控制和显示等等。

随着社会的发展和科学技术的进步,特别是近年来超导技术、磁流体发电技术、压电技术、电力电子技术和电子与计算机技术的迅猛发展,为电机技术的发展开辟了更加广阔的前景。

1.1 电机的基本功能与主要类型

按照电机在能量转换和信号传递中所起的作用不同,电机可以分为下列几类:

- 1) 发电机——将机械功率转换为电功率。
- 2) 电动机——将电功率转换为机械功率。
- 3) 变压器、变流器、变频器、移相器——将电能转换为另一种形式。其中,变压器用于改变交流电的电压;变流器用于改变电流的形式,如将交流变为直流;变频器用于改变交流电的频率;移相器用于改变交流电的相位。
- 4) 控制电机——在自动控制系统中起检测、放大、执行和校正作用,作为控制系统的控制元件。

按照电机的结构特点及电源性质分类,电机主要有下列几类:

- 1) 静止电机——变压器。
 - 2) 旋转电机——包括直流电机和交流电机,根据电机转速与同步转速的关系,交流电机又分为同步电机和异步电机。同步转速的概念将在下文详细介绍。
- 直流电机——电源为直流电的电机。



同步电机——交流电机的一种，运行中转速恒为同步转速，电力系统中的发电机主要是同步电机。

异步电机——也是交流电机的一种，运行中电机转速不等于同步转速，异步电机主要用作电动机。

电机的分类方法还有很多，由于电机的种类繁多，性能各异，各种分类方法未必能够涵盖所有的电机。本书采用前述第二种分类体系介绍电机的基本理论和应用。

1.2 电机的基本原理

电机是通过电磁感应原理来实现能量变换的机械，电和磁是构成电机的两大要素，缺一不可。电在电机中主要是以“路”的形式出现，即由电机内的线圈、绕组构成电机的电路。磁在电机中是以“场”的形式存在的。在工程分析计算中，常将磁场简化为磁路来处理。下面简要介绍电机中的一些重要概念。

1.2.1 磁场的基本概念

1. 磁感应强度与磁感线

磁场是由电流产生的。表征磁场强弱的物理量是磁感应强度 (magnetic flux density)，又称磁通密度，简称磁密，它是一个矢量，用 B 表示，在国际单位制中其单位名称为特斯拉，简称为特 (T)。磁场中各点的磁感应强度可以用磁感线的疏密程度来表示。磁感线又称磁力线，应注意它是人为地设想出来、画出来的，并非磁场中真的有这种线存在。

图 1-1 为长直导线和螺线管载流时的磁感线分布图，由图可知，磁感线具有以下特性：

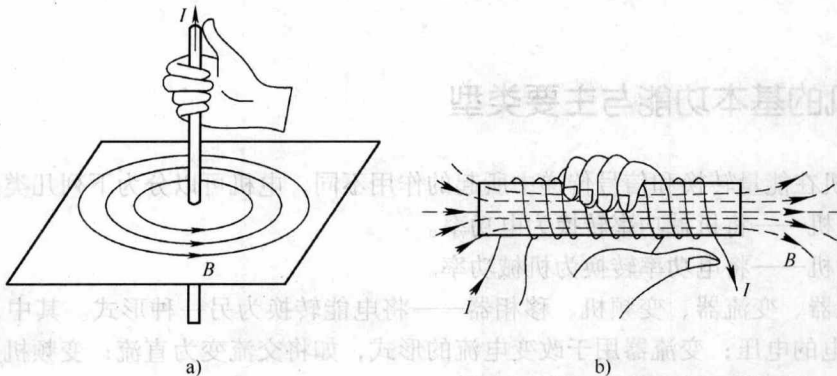


图 1-1 载流长直导线和螺线管的磁感线

a) 载流长直导线 b) 螺线管

- 1) 磁感线的回转方向和电流方向之间的关系遵守右手螺旋法则。
- 2) 磁感线总是闭合的，既无起点，也无终点。
- 3) 磁场中的磁感线不会相交，因为磁场中每一点的磁感应强度的方向都是确定的、唯一的。

2. 磁通量与磁通连续性定理

穿过某一截面 A 的磁感应强度 B 的通过量称为磁通量 (magnetic flux), 简称磁通, 用 Φ 表示, 定义为

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} dA \quad (1-1)$$

也就是说, 磁感应强度 B 在某截面 A 上的面积分, 就是通过该截面的磁通。在均匀磁场中, 如果 B 线与截面 A 的法线重合, 如图 1-2 所示, 则

$$\Phi = BA \quad (1-2)$$

在国际单位制中, 磁通的单位名称为韦伯 (Wb)。

由于磁感线是闭合的, 因此对任意封闭曲面来说, 进入该封闭曲面的磁感线一定等于穿出该封闭曲面的磁感线。如规定磁感线从曲面穿出为正, 穿入为负, 则通过任意封闭曲面的磁通量总和必等于零, 即

$$\Phi = \oint_A \mathbf{B} dA = 0 \quad (1-3)$$

这就是磁通的连续性原理。磁通的连续性是一个重要的概念。

3. 磁场强度与磁导率

在磁场计算中, 还有一个重要的物理量叫磁场强度 (magnetic intensity), 它也是一个矢量, 用符号 H 表示, 在各向同性介质中, 它与磁感应强度 B 之间有下列关系:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1-4)$$

式中 μ ——磁导率, 表征磁场中介质的导磁能力, 单位为 H/m。

磁导率的大小随介质的性质而异。我们熟知的真空磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。在电机中应用的介质, 一般按其磁性能分为铁磁物质和非铁磁物质。后者如空气、铜、铝和绝缘材料等, 它们的磁导率与真空磁导率相差无几, 一律当作 μ_0 处理; 前者如铁、钢、钴、镍等, 它们的磁导率是真空磁导率的几百倍甚至上万倍, 并且与磁场强弱有关, 不是一个常数。

众所周知, 导体和非导体的电导率之比, 其数量级高达 10^{16} 。所以一般电流是沿着导体流通的, 而称非导体为电绝缘体, 电主要以电路的形式出现。铁磁材料与非铁磁材料的磁导率之比, 其数量级仅为 $10^3 \sim 10^4$ 。所以磁感线不是仅集中在铁磁材料中, 而是在各个方向分布的, 有相当一部分磁感线经非铁磁材料闭合。因此, 磁是以场的形态存在的。

4. 磁场储能

磁场能够储存能量, 这些能量是在磁场建立过程中由其他能源的能量转换而来的。电机就是借助磁场储能来实现机电能量转换的。

磁场中的体能量密度 w_m 为

$$w_m = \frac{1}{2} BH \quad (1-5)$$

式中, B 和 H 分别为磁场中某处的磁感应强度和磁场强度。磁场的总储能 W_m 是磁能密度的

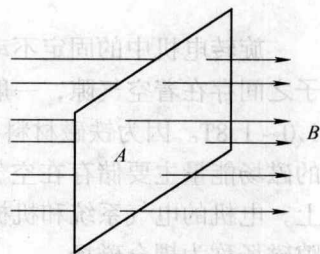


图 1-2 磁感应强度与磁通的关系

体积分, 即

$$W_m = \int_V w_m dV \quad (1-6)$$

对于磁导率为常数的线性介质, 式 (1-5) 可写成

$$w_m = \frac{1}{2} BH = \frac{B^2}{2\mu} \quad (1-7)$$

旋转电机中的固定不动部分(定子)和旋转部分(转子)均系铁磁材料构成, 在定、转子之间存在着空气隙, 一般气隙中的磁感应强度约为 $0.4 \sim 0.8T$, 铁心中的磁感应强度约为 $1.0 \sim 1.8T$ 。因为铁磁材料的磁导率是空气磁导率的数千倍, 由式 (1-7) 可知, 旋转电机的磁场能量主要储存在空气隙中, 虽然气隙的体积远小于定、转子磁性材料的体积。实际上, 电机的电气系统和机械系统是通过气隙磁场联系起来、实现机电能量转换的, 所以把气隙磁场称为耦合磁场。

1.2.2 磁路及其基本定律

一般说来, 磁场在空间的分布是很复杂的, 不过, 由于铁磁材料的磁导率很大, 能使电机中绝大部分磁通集中在一定的路径中, 因此, 可以将“场”问题化简为“集中参数”的问题, 即采用所谓磁路的方法来分析。

图 1-3 为两种电机中常见的磁路。由于铁磁材料的导磁性比空气好得多, 所以大部分磁通经铁心闭合, 这部分磁通称为主磁通, 用 Φ 表示。小部分磁通经由空气等非铁磁材料闭合, 这部分磁通称为漏磁通, 用 Φ_σ 表示。如同把电流流过的路径称为电路一样, 也可以把磁通通过的路径称为磁路。

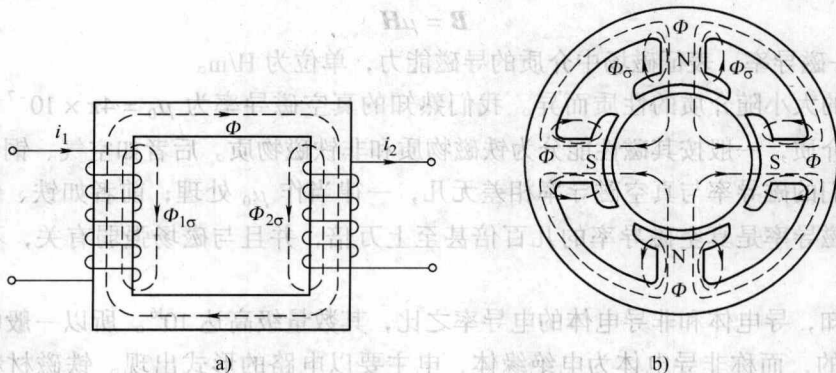


图 1-3 典型磁路

a) 变压器磁路 b) 直流电机磁路

下面介绍磁路中有关的基本定律和基本概念。

1. 安培环路定律 (全电流定律)

在磁场中, 磁场强度矢量沿任一闭合路径的线积分, 等于该闭合路径所包围的电流的代数和, 即

$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum i \quad (1-8)$$

这就是安培环路定律, 它是电机和变压器磁路计算的基础。 $\sum i$ 是磁路所包围的全电流, 当

电流的方向与闭合线上磁场强度的方向满足右螺旋定则时，电流取正值，否则取负值。例如在图 1-4 中， i_1 、 i_2 取正值； i_3 取负值。

2. 磁路的欧姆定律

如图 1-5 所示的无分支磁路，铁心的截面积为 A ，磁路的平均长度为 l ，材料的磁导率为 μ 。铁心上绕有 N 匝线圈，通以电流 i 。如果忽略漏磁通，沿整个磁路的磁通量是相等的，于是根据安培环路定律有

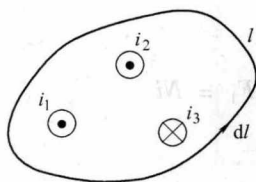


图 1-4 安培环路定律

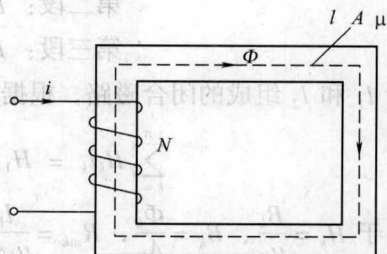


图 1-5 无分支磁路

$$\oint_L \mathbf{H} dl = Hl = Ni$$

由于 $H = \frac{B}{\mu}$ 、 $B = \frac{\Phi}{A}$ ，故 $\frac{\Phi l}{\mu A} = Ni$ ，所以

$$\Phi = Ni \frac{\mu A}{l} = \frac{F}{R_m} \quad (1-9)$$

式中 F ——作用在铁心磁路上的安匝数，称为磁路的磁动势，单位为 A， $F = Ni$ ；

R_m ——磁路的磁阻，单位为 A/Wb， $R_m = \frac{l}{\mu A}$ 。

式 (1-9) 表明，磁路中通过的磁通量等于作用在磁路上磁动势除以磁路的磁阻。此关系与电路中的欧姆定律在形式上十分相似，因此式 (1-9) 也称为磁路的欧姆定律。

必须指出，虽然磁阻和电阻的计算公式相似，但磁阻的计算比电阻困难得多。一般导电材料的电导率是一个已知常数，知道导体的长度和截面积就可以求出电阻。但是铁磁材料的磁导率却是随磁感应强度 B 的变化而变化的，仅知道几何尺寸和材料的品种是算不出磁阻的。

3. 磁路的基尔霍夫第一定律

磁通的连续性定律告诉我们，穿出（或进入）任意闭合面的总磁通量恒等于零，即 $\sum \Phi = 0$ ，比拟于电路中的基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$ ，该定律亦称为磁路的基尔霍夫第一定律。

以图 1-6 所示的有分支磁路为例，在 Φ_1 、 Φ_2 和 Φ_3 的汇合处作一个封闭面，有

$$\sum \Phi = \Phi_2 - \Phi_1 - \Phi_3 = 0$$

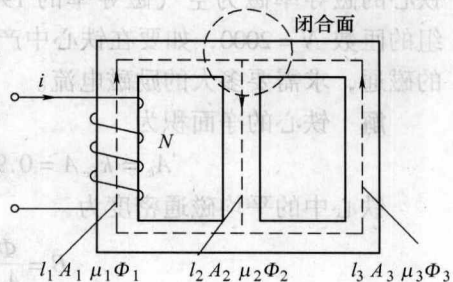


图 1-6 有分支磁路

4. 磁路的基尔霍夫第二定律

在电机和变压器的磁路中,磁路通常不是同一种材料构成的,可以将磁路按材料及截面不同分成若干个磁路段,每一段为同一材料、相同界面面积,且磁路内磁通密度处处相等。仍以图 1-6 所示的有分支磁路为例,磁路分为三段,各段的磁动势、磁通、磁导率、截面积和平均长度分别为

$$\text{第一段: } F_1 = Ni, \Phi_1, \mu_1, A_1, l_1$$

$$\text{第二段: } F_2 = 0, \Phi_2, \mu_2, A_2, l_2$$

$$\text{第三段: } F_3 = 0, \Phi_3, \mu_3, A_3, l_3$$

沿 l_1 和 l_2 组成的闭合磁路,根据安培环路定律有

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 = \sum i = F_1 = Ni$$

由于 $H_k = \frac{B_k}{\mu_k}$ 、 $B_k = \frac{\Phi_k}{A_k}$ 、 $R_{mk} = \frac{l_k}{\mu_k A_k}$, 所以

$$F_1 = Ni = H_1 l_1 + H_2 l_2 = R_{m1} \Phi_1 + R_{m2} \Phi_2 \quad (1-10)$$

同理,对于沿 l_1 和 l_3 组成的闭合磁路,有

$$F_1 = Ni = H_1 l_1 - H_3 l_3 = R_{m1} \Phi_1 - R_{m3} \Phi_3 \quad (1-11)$$

在磁路计算中,常把 $H_k l_k$ 称为某段磁路的磁压降, $\sum H_k l_k$ 称为闭合磁路的总磁压降。根据式 (1-10) 和式 (1-11) 可得出:在磁路中,沿任何闭合磁路的磁动势的代数和等于磁压降的代数和,即

$$\sum F_k = \sum H_k l_k = \sum \Phi_k R_{mk} \quad (1-12)$$

这就是磁路的基尔霍夫第二定律,是安培环路定律在磁路中的体现,与电路的基尔霍夫第二定律在形式上相同。

【例 1-1】 图 1-7 所示的磁路由电工钢片叠压而成,铁心的叠压因数(钢片的净长与包含绝缘的总长之比)为 $k_{Fe} = 0.94$,各段铁心的截面积相同,均为 $A = 0.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$,各段铁心的长度分别为 $l_1 = 0.08 \text{ m}$, $l_2 = 0.1 \text{ m}$, $l_3 = 0.037 \text{ m}$, $l_4 = 0.1 \text{ m}$, $l_5 = 0.08 \text{ m}$,气隙长度 $\delta = 0.006 \text{ m}$,已知铁心的磁导率磁为空气磁导率的 1900 倍,励磁绕组的匝数 $N = 2000$,如要在铁心中产生 $1 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ 的磁通,求需要多大的励磁电流。

解 铁心的净面积为

$$A_k = k_{Fe} A = 0.94 \times 0.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 0.752 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

铁心中的平均磁通密度为

$$B = \frac{\Phi}{A_k} = \frac{1 \times 10^{-3}}{0.752 \times 10^{-3}} \text{ T} = 1.33 \text{ T}$$

铁心部分的磁场强度为

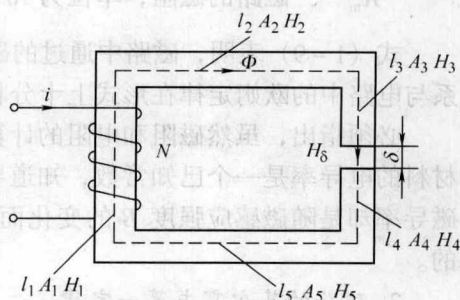


图 1-7 例 1-1 磁路图