



普通高等教育电气工程与自动化类“十三五”规划教材

电机与拖动


DIANJI YU TUODONG

孙建忠 刘凤春 主编

第3版



免费电子课件

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化类“十三五”规划教材

电机与拖动

第3版

主编 孙建忠 刘凤春
参编 曲兵妮 牟宪民 任 齐
陈 燕 许春雨
主审 陈希有

机械工业出版社

本书为普通高等教育电气工程与自动化类“十三五”规划教材，适合总教学时数为60~72学时的教学选用，章节前标有“*”号的选学内容，可根据实际教学情况取舍。

本书秉承“夯实基础、拓宽视野”的宗旨，既体现电机领域的前沿技术和发展趋势，又强调基本知识和基础理论。删去了电动机串电阻起动等内容，补充了新型电机和矢量控制原理等新技术，激发学生的学习兴趣，培养学生的学习能力和创新思维能力。

本书主要阐述电机的基本理论、基本分析方法以及电力拖动的原理和方法，内容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，控制电机的原理与应用，电力拖动的基本原理和方法，他励直流电动机、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。

本书是《电机与拖动》立体化教材的主教材，与其配套出版的还有《电机与拖动 MATLAB 仿真与学习指导》，以及将要出版的《电机与拖动实验及学习指导》等辅助教材，为方便教师教学，本书提供免费的多媒体教学课件，欢迎选用本书作为教材的教师登录 www.cmpedu.com 下载或发邮件到 llm7785@sina.com 索取。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化和自动化等专业的教材，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. —3版. —北京：机械工业出版社，2016.7

普通高等教育电气工程与自动化类“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-53886-8

I. ①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. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 113619 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：刘丽敏 责任编辑：刘丽敏 王 康 责任校对：佟瑞鑫

封面设计：马精明 责任印制：李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2016 年 8 月第 3 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20.5 印张 · 507 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-53886-8

定价：44.00 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

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

封面防伪标均为盗版

前 言

随着“互联网+”时代的到来，对电机的要求不再是简单地提供动力，而是要实现精密控制和智能控制。传统的电机技术与电力电子技术、控制理论、计算机技术和材料科学等现代科学技术的紧密结合，呈现出结构多样化、机电一体化、智能化等发展趋势。

研究型大学的办学目标是培养创新型人才。树立创新意识、增强创新能力，是培养创新型人才的关键，为此，《电机与拖动》教材必须体现电机领域的前沿技术和发展趋势。同时，掌握扎实的基础知识和基本理论才是实现创新的根本。因此，本书秉承了前两版“夯实基础、拓宽视野”的宗旨，在对基本概念和基本理论的阐述上不吝篇幅，将重点内容讲清、讲透。在深入剖析电机与拖动基础理论的同时，介绍了永磁同步电机、矢量控制变频调速、双馈发电机变速恒频风力发电等新技术，体现电机领域的最新进展与发展趋势，既为后续课程的学习打好基础，又激发学生的学习兴趣和学生的学习能力和创新思维能力。

在教材内容的取舍上，删去了直流电动机和异步电动机串电阻起动等过时的内容，精简直流电机的内容，充实同步电机的内容，将矢量控制原理与变频调速结合起来，力求使教材内容与电气工程学科的发展相适应。

教材吸收了作者多年从事电机及其控制的教学与科研经验，以及主持或参与“电机与拖动”课程教学改革的成果，将启发式教学和探究型教学等先进的教学思想融入到教材中，教材体系符合学生的认知规律，富有启发性；突出重点，分解难点，将难以理解的知识点采用学生易于接受的方式表述，如将异步电机在不同运行情况下的参数变化问题通过算例进行讲解；把交流电机的绕组、磁动势和电动势等内容进行分解，结合三相异步电机和单相异步电动机的理论进行讲解。

本书由大连理工大学孙建忠和刘凤春主编，大连理工大学陈希有主审。具体分工为：第1章、第4章、第7章和第9章由孙建忠编写，第3章、第5章和第10章由刘凤春编写，第2章、第6章、第8章由曲兵妮、陈燕、任齐、许春雨共同编写，第11章由牟宪民编写。

本书出版后，被国内多所高校采用，不少师生通过邮件和电话与作者进行讨论，并对本书内容提出了许多建设性的建议和意见，在此深表谢意。本书承蒙陈希有教授主审，对陈教授的贡献表示衷心感谢。研究生王斌、王冬、王思浩、钟启濂、王晨等同学参加了部分文字和插图的整理工作，在此表示感谢。本书在编写中参考了国内外有关著作和文献，在此对这些文献的作者一并致谢。

由于编者学识有限，难免存在失误或不当之处，尚祈广大读者不吝批评指教。

编 者

常用符号表

| | | | |
|----------------|---------------------------------|---------------|------------------------------|
| A | 面积；线负荷；散热系数 | f_1 | 异步电动机定子电流频率 |
| a | 直流电枢绕组的并联支路对数 交流绕组的并联支路数 | f_2 | 异步电动机转子电流频率 |
| B | 磁感应强度（磁通密度） | f_s | 三相绕组合成磁动势的 v 次谐波的频率 |
| B_a | 电枢磁场磁通密度 | G | 发电机的文字符号 |
| B_{ad} | 直流电枢磁场磁通密度 | G | 系统转动部分的质量 |
| B_{aq} | 交轴电枢磁场磁通密度 | H | 磁场强度 |
| B_{av} | 气隙中磁通密度的平均值 | H_s | 气隙磁场强度 |
| B_x | 气隙中任意点处的磁通密度 | h | 高度 |
| C | 电容，热容量 | I | 直流电流，交流电流有效值 |
| C_E | 电动势常数 | i | 电流的瞬时值 |
| C_T | 电磁转矩常数 | I_0 | 空载电流 |
| D | 转动部分的回转直径，调速范围 | I_N | 额定电流 |
| D_a | 电枢直径 | I_1 | 变压器一次电流；交流电机定子电流 |
| E | 直流动势或交流电动势的有效值 | I_{1N} | 变压器一次侧的额定电流（线值） |
| e | 电动势的瞬时值 | I_2 | 变压器二次电流；异步电机转子电流 |
| E_0 | 空载电动势，励磁电动势 | I_{2N} | 变压器二次侧的额定电流（线值） |
| E_1 | 变压器一次绕组和电机定子绕组由主磁通感应的电动势有效值（相值） | I_2' | I_2 的折算值 |
| E_2 | 变压器二次绕组和电机转子绕组由主磁通感应的电动势有效值（相值） | I_a | 直流电机的电枢电流 |
| E_2' | E_2 折算到一次侧或定子侧的折算值 | I_f | 直流励磁电流 |
| E_{y1} | 一个线圈的感应电动势 | I_m | 交流励磁电流 |
| E_{q1} | q 个线圈的合成电动势 | I_μ | 磁化电流 |
| E_Φ | 相电动势 | I_S | 短路电流 |
| E_{ad} | 直流电枢反应电动势 | I_{st} | 起动电流 |
| E_{aq} | 交轴电枢反应电动势 | J | 拖动系统的转动惯量 |
| e_r | 换向时的电抗电动势 | j | 转动机构的转速比 |
| e_a | 换向时的电枢反应电动势 | k | 变压器的电压比，比例系数 |
| F | 磁动势，电磁力 | k_i | 异步电动机定子、转子的电流比 |
| F_0 | 励磁磁动势 | k_e | 异步电动机定子、转子的电动势比 |
| F_a | 电枢磁动势 | k_{d1} | 基波分布因数 |
| F_{ad} | 直流电枢磁动势 | $k_{d\nu}$ | ν 次谐波分布因数 |
| F_{aq} | 交轴电枢磁动势 | k_{q1} | 基波节距因数 |
| F_1 | 三相绕组基波合成磁动势的幅值 | k_{qv} | ν 次谐波的节距因数 |
| F_{y1} | 一个整距线圈的基波磁动势幅值 | k_{w1} | 基波绕组因数 |
| F_{q1} | q 个分布整距线圈的基波合成磁动势幅值 | $k_{w\nu}$ | ν 次谐波绕组因数 |
| F_{qv} | q 个线圈的 ν 次谐波磁动势幅值 | k_m | 过载倍数（过载能力） |
| $F_{\Phi 1}$ | 单相绕组的基波磁动势幅值 | L | 自感 |
| $F_{\Phi \nu}$ | 单相绕组 ν 次谐波磁动势幅值 | $L_{1\sigma}$ | 变压器一次绕组的漏磁电感，异步电机定子一相绕组的漏磁电感 |
| f | 频率 | $L_{2\sigma}$ | 变压器二次绕组的漏磁电感，异步电机转子一相绕组的漏磁电感 |
| f_N | 额定频率 | l | 长度 |
| | | M | 电动机的文字符号 |

| | | | |
|------------|---------------------------------|---------------|-------------------|
| M | 互感 | S | 视在功率 |
| m_1 | 交流电机定子相数 | S_N | 额定视在功率 |
| m_2 | 异步电机转子相数 | s | 转差率 |
| N | 磁极 | s_N | 额定转差率 |
| N | 每相绕组的串联匝数, 电枢导体数 | s_m | 临界转差率 (最大转矩时的转差率) |
| N_1 | 变压器一次绕组匝数 | t | 时间 |
| N_2 | 变压器二次绕组匝数 | T_0 | 空载转矩 |
| N_y | 每个线圈的匝数 | T_1 | 输入转矩 |
| n | 转子转速 | T_2 | 输出转矩 |
| n_N | 额定转速 | T_e | 电磁转矩 |
| n_0 | 空载转速 | T_{em} | 最大 (临界) 电磁转矩 |
| n_1 | 同步转速 | T_N | 额定转矩, 额定输出转矩 |
| n_v | v 次谐波旋转磁场转速 | T_{eN} | 额定电磁转矩 |
| Δn | 转速差 | T_{st} | 起动转矩, 堵转转矩 |
| P | 有功功率 | U | U 相、U 相绕组 |
| P_N | 额定功率, 额定输出功率 | U | 直流电压, 交流电压有效值 |
| P_{1N} | 额定输入功率 | U_N | 额定电压 |
| P_1 | 输入功率 | U_1 | 变压器一次侧相电压, 定子相电压 |
| P_2 | 输出功率 | U_{1N} | 变压器一次侧额定电压 (线值) |
| P_e | 电磁功率 | U_2 | 变压器二次侧电压 (相值) |
| P_{em} | 最大电磁功率 | U_{2N} | 变压器二次侧额定电压 (线值) |
| P_m | 机械功率, 最大功率 | U_0 | 空载电压; 零序电压 |
| P_{Cu} | 铜损耗 | U_S | 短路电压; 异步电机堵转电压 |
| P_{Fe} | 铁损耗 | u | 电压的瞬时值 |
| P_{ad} | 附加 (杂散) 损耗 | V | V 相, V 相绕组, 电压的单位 |
| P_{fw} | 机械损耗 | v | 线速度 |
| P_0 | 空载损耗, 空载功率 | V_R | 电压调整率 |
| P_S | 短路功率, 堵转功率 | W | W 相, W 相绕组 |
| p | 磁极对数 | W | 功; 能 |
| Q | 无功功率, 槽数, 热量 | W_m | 磁场能量 |
| Q_1 | 异步电机定子槽数 | W_e | 电能, 电场能量 |
| Q_2 | 异步电机转子槽数 (或导条数) | X | 电抗 |
| q | 每极每相槽数 | X_a | 电枢反应电抗 |
| R | 电阻 | X_{ad} | 直轴电枢反应电抗 |
| R_1 | 变压器一次侧一相绕组的电阻, 交流电机定子一相绕组的电阻 | X_{aq} | 交轴电枢反应电抗 |
| R_2 | 变压器二次侧一相绕组的电阻, 异步电机转子一相绕组的电阻 | X_s | 同步电抗 |
| R_a | 电枢电阻 | X_d | 直轴同步电抗 |
| R_f | 励磁绕组电阻 | X'_d | 直轴瞬态电抗 |
| R_m | 励磁电阻, 磁阻 | X'_q | 交轴同步电抗 |
| R'_2 | R_2 的折算值 | X''_d | 直轴超瞬态电抗 |
| R_S | 变压器或异步电机的短路电阻 | X_m | 励磁电抗 |
| S | 磁极 | X_S | 短路电抗 |
| | | X_σ | 漏电抗 |
| | | $X_{1\sigma}$ | 变压器一次侧一相绕组的漏电抗 |

| | | | |
|------------------|--------------------------------|-------------|---------------------------------|
| | 异步电机定子一相绕组的漏电抗 | λ | 单位面积的磁导 |
| $X_{2\sigma}$ | 变压器二次侧一相绕组的漏电抗 | μ | 磁导率 |
| | 异步电机转子一相绕组的漏电抗 | μ_0 | 空气磁导率 |
| $X'_{2\sigma}$ | $X_{2\sigma}$ 的折算值 | μ_{Fe} | 铁心磁导率 |
| y | 电枢绕组的合成节距 | η | 效率 |
| y_1 | 电枢绕组的第一节距 | η_N | 额定效率 |
| y_2 | 电枢绕组的第二节距 | η_m | 最大效率 |
| Z | 阻抗 | θ | 角度, 功率角, 温升 |
| Z_m | 励磁阻抗 | θ_N | 额定功率角, 额定温升 |
| Z_s | 短路阻抗 | α | 角度, 相邻两槽间的电角度 |
| Z_1 | 变压器一次绕组的漏阻抗, 交流电机定子一相绕组的漏阻抗 | β | 负载系数, 线圈节距的短距角 |
| Z_2 | 变压器二次绕组的漏阻抗 异步电机转子一相绕组的漏阻抗 | δ | 气隙长度, 静差率 |
| $Z'_{2\sigma}$ | $Z_{2\sigma}$ 的折算值 | v | 谐波次数 |
| Φ | 磁通量 | τ | 极距, 时间常数 |
| Φ_0 | 空载磁通; 同步电机每极的主磁通 | φ | 相角; 功率因数角 |
| Φ_m | 变压器或异步电机的主磁通幅值 | φ_1 | 变压器一次侧功率因数角 交流电机定子一相电路的功率因数角 |
| Φ_σ | 漏磁通 | φ_2 | 变压器二次侧功率因数角 交流电机转子一相电路的功率因数角 |
| Φ_{ad} | 直轴电枢反应磁通 | Ω | 转子的机械角速度 |
| Φ_{aq} | 交轴电枢反应磁通 | Ω_1 | 同步机械角速度 |
| Φ_v | v 次谐波磁通 | ω | 角频率, 电角速度 |
| Λ | 主磁路磁导 | ψ | 磁链, 内功率因数角 |
| Λ_σ | 漏磁路磁导 | ρ | 转动部分的回转半径 |

目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 前言 | |
| 常用符号表 | |
| 第 1 章 电机学基础知识 | 1 |
| 1.1 电机的基本功能与主要类型 | 1 |
| 1.2 电机的基本原理 | 2 |
| 1.2.1 磁场的基本概念 | 2 |
| 1.2.2 磁路及其基本定律 | 4 |
| 1.2.3 电磁感应定律 | 7 |
| 1.2.4 线圈的电路方程 | 8 |
| 1.2.5 电磁力定律与电磁转矩 | 8 |
| 1.2.6 电机的可逆性原理 | 9 |
| 1.3 电机的制造材料 | 10 |
| 1.3.1 概述 | 10 |
| 1.3.2 铁磁材料的重要特性 | 11 |
| 1.3.3 永磁材料的特性 | 14 |
| 思考题与习题 | 18 |
| 第 2 章 直流电机 | 20 |
| 2.1 直流电机的工作原理 | 20 |
| 2.1.1 直流电动机的工作原理 | 20 |
| 2.1.2 直流发电机的工作原理 | 21 |
| 2.2 直流电机的基本结构和额定值 | 22 |
| 2.2.1 直流电机的基本结构 | 22 |
| 2.2.2 直流电机的电枢绕组 | 23 |
| 2.2.3 直流电机的额定值 | 25 |
| 2.2.4 直流电机按励磁方式分类 | 26 |
| 2.3 直流电机的磁场和电枢反应 | 27 |
| 2.3.1 直流电机的空载磁场 | 27 |
| 2.3.2 电枢磁动势 | 28 |
| 2.3.3 电枢反应 | 29 |
| *2.3.4 电枢反应对换向的影响及改善换向的措施 | 30 |
| 2.4 直流电机的感应电动势和电磁转矩 | 32 |
| 2.4.1 直流电机的感应电动势 | 32 |
| 2.4.2 直流电机的电磁转矩 | 33 |
| 2.5 直流电动机的运行分析 | 33 |
| 2.5.1 直流电动机的基本方程 | 33 |
| 2.5.2 他励/并励直流电动机的工作特性 | 35 |
| 2.6 直流发电机的运行分析 | 37 |
| 2.6.1 直流发电机的基本方程 | 37 |
| 2.6.2 他励直流发电机的工作特性 | 38 |
| 2.6.3 并励直流发电机的自励过程与外特性 | 39 |
| 思考题与习题 | 41 |
| 第 3 章 变压器 | 44 |
| 3.1 变压器的基本结构、分类与额定值 | 44 |
| 3.1.1 变压器的基本结构 | 44 |
| 3.1.2 变压器的分类 | 48 |
| 3.1.3 变压器的额定值 | 49 |
| 3.2 变压器的工作原理 | 51 |
| 3.2.1 变压器各电磁量的参考方向 | 51 |
| 3.2.2 变压器的空载运行 | 52 |
| 3.2.3 变压器的负载运行 | 57 |
| 3.3 变压器的等效电路和相量图 | 59 |
| 3.3.1 绕组折算 | 60 |
| 3.3.2 T 形等效电路 | 61 |
| 3.3.3 近似和简化等效电路 | 62 |
| 3.3.4 变压器负载运行时的相量图 | 63 |
| 3.4 标幺值 | 64 |
| 3.4.1 标幺值的定义 | 64 |
| 3.4.2 采用标幺值的优点 | 65 |
| 3.5 变压器的参数测定 | 67 |
| 3.5.1 变压器的空载试验 | 67 |
| 3.5.2 变压器的短路试验 | 69 |
| 3.6 变压器的运行特性 | 72 |
| 3.6.1 变压器的外特性与电压调整率 | 72 |
| 3.6.2 变压器的损耗与效率特性 | 73 |
| 3.7 三相变压器及其联结组 | 76 |
| 3.7.1 三相变压器的类型 | 76 |
| 3.7.2 三相变压器的联结组 | 77 |

| | | | |
|------------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 3.8 三相变压器的并联运行 | 81 | 相量图 | 128 |
| 3.8.1 并联运行的理想状态及条件 | 81 | 4.5.5 异步电动机的简化等效电路 | 129 |
| 3.8.2 联结组对并联运行的影响 | 82 | 4.5.6 笼型绕组的磁极数和相数 | 130 |
| 3.8.3 电压比对并联运行的影响 | 83 | 4.6 三相异步电动机的功率和转矩 | 131 |
| 3.8.4 短路阻抗对并联运行的影响 | 83 | 4.6.1 三相异步电动机的功率关系 | 131 |
| 3.9 特殊变压器 | 85 | 4.6.2 三相异步电动机的转矩关系 | 132 |
| 3.9.1 自耦变压器 | 86 | 4.6.3 三相异步电动机电磁转矩的物理 表达式 | 133 |
| 3.9.2 三绕组变压器 | 89 | 4.6.4 三相异步电动机的转矩-转差率 特性 | 133 |
| 3.9.3 仪用互感器 | 90 | 4.7 三相异步电动机的工作特性和参数 测定 | 137 |
| *3.10 节能变压器 | 92 | 4.7.1 三相异步电动机的工作特性 | 137 |
| 3.10.1 非晶合金变压器 | 92 | 4.7.2 三相异步电动机的主要性能 指标 | 138 |
| 3.10.2 卷铁心变压器 | 93 | 4.7.3 三相异步电动机的参数测定 | 139 |
| 3.10.3 超导变压器 | 95 | 4.8 单相异步电动机 | 141 |
| 3.10.4 变压器性能参数比较 | 97 | 4.8.1 单相异步电动机的工作原理 | 142 |
| 思考题与习题 | 97 | 4.8.2 两相绕组的磁动势 | 143 |
| 第4章 异步电机 | 101 | 4.8.3 单相异步电动机的主要类型和 起动方法 | 144 |
| 4.1 三相异步电动机的基本结构与工作 原理 | 101 | *4.9 三相异步发电机 | 146 |
| 4.1.1 三相异步电动机的基本结构 | 101 | 4.9.1 三相异步发电机的单机运行 | 146 |
| 4.1.2 异步电动机的基本工作原理 | 104 | 4.9.2 笼型三相异步发电机的并网 运行 | 146 |
| 4.1.3 三相异步电动机的额定值和主要 系列 | 107 | 4.9.3 双馈异步发电机变速恒频风力 发电系统 | 148 |
| 4.2 三相交流电机的绕组 | 109 | 思考题与习题 | 150 |
| 4.2.1 交流绕组的基本概念 | 109 | 第5章 同步电机 | 152 |
| 4.2.2 三相双层绕组 | 111 | 5.1 同步电机的基本结构和额定值 | 152 |
| 4.2.3 三相单层绕组 | 112 | 5.1.1 同步电机的基本结构 | 152 |
| 4.3 三相交流绕组的磁动势 | 113 | 5.1.2 同步电机的励磁系统 | 155 |
| 4.3.1 单相绕组的磁动势——脉振磁 动势 | 113 | 5.1.3 同步电机的冷却方式 | 157 |
| 4.3.2 三相绕组的合成磁动势——旋转 磁动势 | 118 | 5.1.4 同步电机的基本类型 | 157 |
| 4.3.3 三相定子绕组建立的磁场 | 121 | 5.1.5 同步电机的额定值 | 158 |
| 4.4 三相交流绕组的感应电动势 | 122 | 5.2 三相同步电机的工作原理 | 159 |
| 4.4.1 集中整距线圈的感应电动势 | 122 | 5.2.1 三相同步电机的基本原理 | 159 |
| 4.4.2 分布绕组的感应电动势 | 123 | 5.2.2 同步电机的空载运行 | 159 |
| 4.4.3 短距绕组的感应电动势 | 123 | 5.2.3 同步电机的负载运行和电枢 反应 | 160 |
| 4.4.4 相电动势 | 124 | 5.2.4 三相同步电机的运行状态 | 163 |
| 4.5 三相异步电动机的等效电路 | 125 | 5.3 三相同步发电机的稳态分析 | 164 |
| 4.5.1 转子磁动势和电动势 | 125 | 5.3.1 隐极同步发电机的稳态分析 | 164 |
| 4.5.2 定子、转子绕组的电压方程—— 频率归算 | 126 | | |
| 4.5.3 绕组归算 | 127 | | |
| 4.5.4 异步电动机的等效电路和 | | | |

| | | | |
|----------------------|-----|-------------------------|-----|
| 5.3.2 凸极同步发电机的稳态分析 | 167 | 7.1 电力拖动系统的组成与分类 | 213 |
| 5.4 三相同步发电机的功率和转矩 | 172 | 7.2 电力拖动系统的运动方程式 | 213 |
| 5.4.1 功率平衡方程 | 172 | 7.2.1 单轴电力拖动系统的运动方程式 | 213 |
| 5.4.2 电磁功率与功角特性 | 172 | 7.2.2 多轴电力拖动系统的折算 | 215 |
| 5.4.3 电磁转矩与矩角特性 | 174 | 7.3 电力拖动系统的负载特性 | 220 |
| 5.5 三相同步发电机的运行特性 | 175 | 7.3.1 恒转矩负载 | 220 |
| 5.5.1 外特性 | 175 | 7.3.2 恒功率负载 | 221 |
| 5.5.2 调整特性 | 176 | 7.3.3 通风机与泵类负载 | 221 |
| 5.5.3 效率特性 | 176 | 7.4 电力拖动系统的稳定运行条件 | 221 |
| 5.6 同步发电机与电网的并联运行 | 177 | 7.5 电力拖动系统的调速 | 222 |
| 5.6.1 并联运行的条件 | 177 | 7.5.1 调速的基本概念 | 222 |
| 5.6.2 并联运行的方法 | 178 | 7.5.2 调速系统的主要性能指标 | 223 |
| 5.6.3 有功功率的调节与稳定问题 | 179 | 思考题与习题 | 224 |
| 5.6.4 无功功率的调节与V形曲线 | 182 | 第8章 他励直流电动机的电力拖动 | 227 |
| 5.7 三相同步电动机与同步补偿机 | 184 | 8.1 他励直流电动机的机械特性 | 227 |
| 5.7.1 同步电动机的运行分析 | 184 | 8.1.1 固有机械特性 | 227 |
| 5.7.2 同步电动机的功率和转矩 | 186 | 8.1.2 人为机械特性 | 228 |
| 5.7.3 同步电动机的运行特性 | 187 | 8.2 他励直流电动机的起动和反转 | 229 |
| 5.7.4 同步补偿机 | 188 | 8.2.1 电枢回路串联电阻起动 | 230 |
| *5.8 同步发电机的三相突然短路 | 189 | 8.2.2 降低电枢电压起动 | 231 |
| 5.8.1 同步发电机突然短路的物理过程 | 189 | 8.2.3 他励直流电动机的反转 | 231 |
| 5.8.2 同步发电机的瞬态电抗 | 191 | 8.3 他励直流电动机的调速 | 231 |
| 5.8.3 同步发电机的超瞬态电抗 | 192 | 8.3.1 电枢回路串联电阻调速 | 232 |
| 思考题与习题 | 193 | 8.3.2 降低电枢电压调速 | 232 |
| 第6章 控制电机 | 196 | 8.3.3 减弱磁通调速 | 233 |
| 6.1 伺服电动机 | 196 | 8.3.4 调速方式与负载类型的配合 | 234 |
| 6.1.1 交流伺服电动机 | 196 | 8.4 他励直流电动机的制动 | 236 |
| 6.1.2 直流伺服电动机 | 198 | 8.4.1 能耗制动 | 237 |
| 6.2 步进电动机 | 199 | 8.4.2 反接制动 | 238 |
| 6.2.1 基本工作原理 | 200 | 8.4.3 回馈制动 | 241 |
| 6.2.2 反应式步进电动机 | 201 | 8.5 他励直流电动机的四象限运行 | 242 |
| 6.3 测速发电机 | 203 | 思考题与习题 | 243 |
| 6.3.1 直流测速发电机 | 203 | 第9章 异步电动机的电力拖动 | 245 |
| 6.3.2 交流异步测速发电机 | 204 | 9.1 三相异步电动机的机械特性 | 245 |
| 6.4 自整角机 | 205 | 9.1.1 固有机械特性 | 245 |
| 6.4.1 自整角机的结构 | 205 | 9.1.2 人为机械特性 | 248 |
| 6.4.2 力矩式自整角机 | 206 | 9.2 三相异步电动机的起动 | 250 |
| 6.4.3 控制式自整角机 | 206 | 9.2.1 笼型异步电动机的起动 | 250 |
| 6.5 旋转变压器 | 208 | 9.2.2 高起动转矩的异步电动机 | 255 |
| 6.6 感应同步器 | 209 | 9.2.3 绕线转子异步电动机的起动 | 258 |
| 思考题与习题 | 211 | 9.3 三相异步电动机的调速 | 260 |
| 第7章 电力拖动基础 | 213 | 9.3.1 变极调速 | 260 |

| | | | |
|--------------------------------------|------------|---------------------------------------|------------|
| 9.3.2 变频调速 | 262 | 11.1 电动机选择的基本原则 | 298 |
| 9.3.3 调压调速 | 267 | 11.1.1 类型的选择 | 298 |
| 9.3.4 绕线转子异步电动机转子串电阻 调速 | 268 | 11.1.2 额定功率的选择 | 299 |
| 9.3.5 绕线转子异步电动机串级调速 .. | 270 | 11.1.3 电压等级的选择 | 300 |
| 9.3.6 电磁调速电动机 | 271 | 11.1.4 转速的选择 | 300 |
| 9.4 三相异步电动机的制动 | 273 | 11.1.5 结构型式的选择 | 301 |
| 9.4.1 回馈制动 | 273 | 11.1.6 安装型式的选择 | 302 |
| 9.4.2 反接制动 | 275 | 11.1.7 工作制的选择 | 302 |
| 9.4.3 能耗制动 | 279 | 11.1.8 型号的选择 | 302 |
| 9.4.4 软停车与软制动 | 280 | 11.2 电动机的发热与冷却 | 303 |
| 9.5 异步电动机的各种运行状态 | 280 | 11.2.1 电动机的发热过程与温升 | 303 |
| 思考题与习题 | 281 | 11.2.2 电动机的冷却过程与冷却 方式 | 304 |
| 第10章 同步电动机的电力拖动 | 283 | 11.3 电动机的工作制 | 305 |
| 10.1 同步电动机的机械特性及稳定 运行 | 283 | 11.3.1 连续工作制 (S1) | 305 |
| 10.1.1 同步电动机的机械特性 | 283 | 11.3.2 短时工作制 (S2) | 305 |
| 10.1.2 同步电动机的稳定运行 | 284 | 11.3.3 断续周期工作制 (S3) | 306 |
| 10.2 同步电动机的起动 | 284 | 11.4 电动机额定功率的选择 | 307 |
| 10.2.1 拖动起动法 | 285 | 11.4.1 电动机的允许输出功率 | 307 |
| 10.2.2 异步起动法 | 285 | 11.4.2 拖动连续运行负载电动机额定 功率的选择 | 308 |
| 10.2.3 变频起动法 | 285 | 11.4.3 拖动短时运行负载电动机额定 功率的选择 | 311 |
| 10.3 同步电动机的调速和制动 | 286 | 11.4.4 拖动断续周期运行负载电动机 额定功率的选择 | 313 |
| 10.3.1 同步电动机的调速方法概述 | 286 | 11.5 电动机的经济运行 | 314 |
| 10.3.2 同步电动机的制动方法 | 287 | 11.5.1 电动机的经济运行管理 | 314 |
| 10.4 特种同步电动机调速系统 | 288 | 11.5.2 电动机经济运行的基本参数 | 314 |
| 10.4.1 永磁同步电动机调速系统 | 288 | 11.5.3 电动机的经济运行措施 | 316 |
| 10.4.2 无刷直流电动机调速系统 | 290 | 思考题与习题 | 316 |
| 10.4.3 开关磁阻电动机调速系统 | 293 | 参考文献 | 318 |
| 思考题与习题 | 296 | | |
| 第11章 电力拖动系统中电动机的 选择 | 298 | | |

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动机，工业化国家一般家庭中会用到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，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，以及机床加工的自动控制和显示等。

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，使电机技术的发展拥有了更加广阔的前景。

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——将一种形式的电能转换为另一种形式的电能。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，运行中电机转速不为同步转速，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. 磁感应强度与磁力线

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，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力线的疏密程度来表示。应注意磁力线是人为地设想出来、画出来的，并非磁场中真的存在。

图 1-1 为长直导线和螺线管载流时的磁力线分布图。

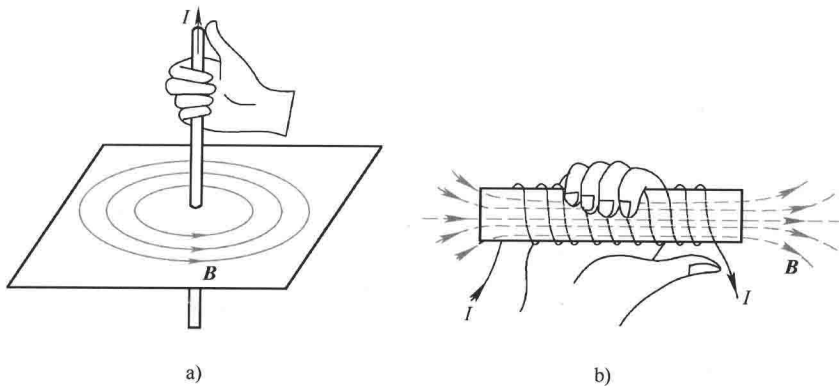


图 1-1 载流长直导线和螺线管的磁力线

由图可知，磁力线具有以下特性：

- 1) 磁力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) 磁力线总是闭合的，既无起点，也无终点。
- 3) 磁场中的磁力线不会相交，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 的通量称为磁通量（Magnetic Flux），简称磁通，用 Φ

表示, 定义为

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (1-1)$$

也就是说, 磁感应强度 \mathbf{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 \mathbf{B} 线与截面 A 的法线重合, 如图 1-2 所示, 则

$$\Phi = B \cdot A \quad (1-2)$$

在国际单位制中, 磁通的单位名称为韦伯 (Wb)。

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

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

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 \mathbf{H} 表示, 在国际单位制中, 磁场强度的单位名称为安/米 (A/m)。在各向同性介质中, 它与磁感应强度 \mathbf{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, 单位是亨/米 (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 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。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。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。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。

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 $10^3 \sim 10^4$ 。所以磁力线不是仅集中在铁磁材料中, 而是在各个方向分布的, 有相当一部分磁力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 ——磁场中某处的磁感应强度;

H ——磁场中某处的磁场强度

磁场的总储能 W_m 是磁能密度的体积分, 即

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

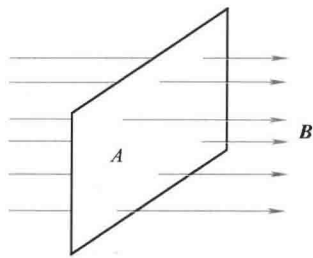


图 1-2 磁感应强度与磁通的关系

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、转子之间存在着气隙,一般气隙中的磁感应强度约为0.4~0.8T,铁心中的磁感应强度约为1.0~1.8T。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气隙中,虽然气隙的体积远小于定子、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,从而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。

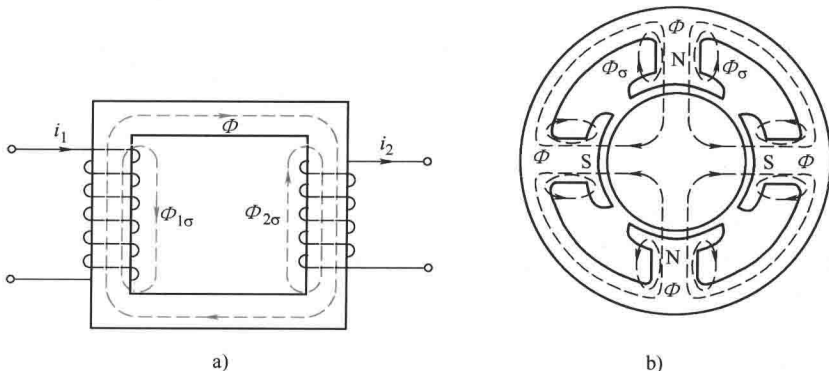


图1-3 典型磁路

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

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

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

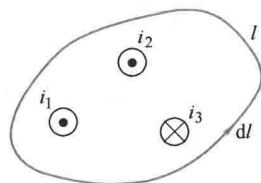


图1-4 安培环路定律

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

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Hl = Ni$$

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

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

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

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

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 $\sum \Phi = 0$, 与电路中的基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$ 相似, 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 的汇合处做一个封闭面, 有

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

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、相同截面积, 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

第一段: $F_{m1} = Ni$, Φ_1 , μ_1 , A_1 , l_1

第二段: $F_{m2} = 0$, Φ_2 , μ_2 , A_2 , l_2

第三段: $F_{m3} = 0$, Φ_3 , μ_3 , A_3 , l_3

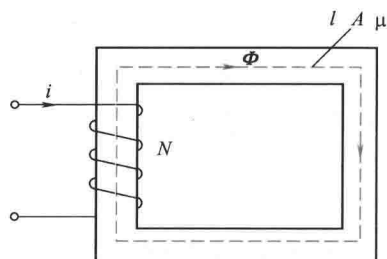


图 1-5 无分支磁路

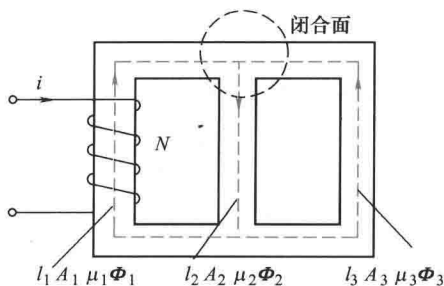


图 1-6 有分支磁路

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

$$F_{12} = Ni = H_1 l_1 + H_2 l_2 = R_{m1} \Phi_1 + R_{m2} \Phi_2 \quad (1-10)$$

同理, 对于沿 l_1 和 l_3 组成的闭合磁路, 有

$$F_{13} = Ni = H_1 l_1 - H_3 l_3 = R_{m1} \Phi_1 - R_{m3} \Phi_3 \quad (1-11)$$

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

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

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, 铁心的叠压系数 (叠片的净厚度与包含绝缘的总厚度之比) 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 $l_1 = 0.08 \text{ m}$, $l_2 = 0.1 \text{ m}$, $l_3 = 0.037 \text{ m}$, $l_4 = 0.037 \text{ m}$, $l_5 = 0.1 \text{ m}$, 气隙长度 $\delta = 0.006 \text{ m}$, 已知铁心的磁导率为空气磁导率的 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。

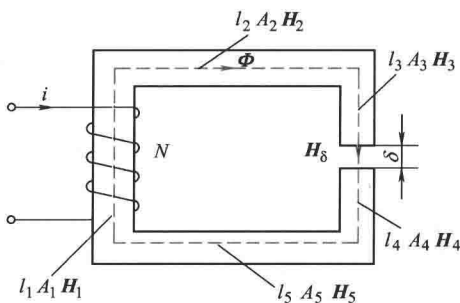


图 1-7 例 1-1 磁路图

解: 铁心的净面积为

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

铁心中的平均磁通密度为

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

铁心部分的磁场强度为

$$H = \frac{B}{\mu_{Fe}} = \frac{1.33}{1900 \times 4 \times \pi \times 10^{-7}} \text{ A/m} = 560 \text{ A/m}$$

铁心部分的磁压降为

$$\sum_{k=1}^5 H_k l_k = H \sum_{k=1}^5 l_k = 560 \times (0.08 + 0.1 + 0.037 + 0.037 + 0.1) \text{ A} = 198 \text{ A}$$

不考虑边缘效应, 则气隙面积与铁心的截面积相等, 由于磁通具有连续性, 故气隙中磁场强度为

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{\Phi}{\mu_0 A} = \frac{1 \times 10^{-3}}{4 \times \pi \times 10^{-7} \times 0.8 \times 10^{-3}} \text{ A/m} = 9.947 \times 10^5 \text{ A/m}$$

气隙磁压降为