

DIANGONG YU

DIANZI JISHU

# 电工与电子技术

刘耀元 主编

北京工业大学出版社

## 内 容 提 要

本书是根据国家教育部电工学课程指导组拟定的机械类电工、电子技术系列课程教学基本要求和面向21世纪教育教学改革目标,而编写的用于机械类专业的配套教材。在编写过程中遵循“精选内容、模块化结构、有机整合、合理排序、突出应用”的原则,使学生掌握机电类专业必备的电工基础知识、电子基础知识和安全用电常识;熟悉常用的电工、电子应用技术;了解电工、电子技术在机械领域中的新产品、新技术。

### 图书在版编目(CIP)数据

电工与电子技术 / 刘耀元主编. —北京: 北京工业大学出版社, 2006.9

ISBN 7-5639-1686-5

I. 电… II. 刘… III. ①电工技术—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材  
IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 103888 号

## 电工与电子技术

主编 刘耀元

\*

北京工业大学出版社出版发行

邮编: 100022 电话: (010) 67392308

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

\*

2006年9月第1版 2006年9月第1次印刷

787mm×1092mm 16开本 19.75印张 489千字

ISBN 7-5639-1686-5/G·836

定价: 35.00元

# 前 言

本书是根据国家教育部电工学课程指导组拟定的机械类电工、电子技术系列课程教学基本要求和面向 21 世纪教育教学改革目标, 针对以往教材大多没有彻底摆脱学科型教学模式的束缚, 教学内容与企业实际需要相脱节, 课程教学学时较多的问题而编写的。该教材是机械类专业的配套教材。

本课程是机械类专业的一门重要技术基础课, 其任务是使学生掌握机电类专业必备的电工、电子基础知识和安全用电常识; 熟悉常用的电工、电子应用技术; 了解机械领域中相关的电工、电子技术的新进展及新产品。为此, 本书的编写遵循“精选内容、模块化结构、有机整合、合理排序、突出应用”的原则, 力求做到以基础知识为基础, 以专业目标培养为主线, 体现针对性、实用性、先进性、适用性的原则。培养学生理论联系实际的能力和实事求是的科学态度。

本教材参考学时为 96 学时, 其中电工部分 44 学时, 电子技术 52 学时。各学校可根据实际情况适当调整。

本书由刘耀元担任主编, 由邹小莲、罗中华担任副主编。撰稿人具体分工如下: 聂小桃、范琳编写第 1 章、第 16 章, 徐赞编写第 2 章, 邹小莲编写第 3 章、第 6 章、第 9 章第 6 节, 石柳编写第 4 章, 李河水编写第 5 章, 刘耀元编写第 7 章、第 15 章, 彭爱红编写第 8 章、第 9 章第 1 节至第 5 节和第 7 节, 郑清生编写第 10 章, 罗慧勇编写第 11 章, 陈娟娟编写第 12 章, 李莉花编写第 13 章, 施雯编写第 14 章。全书由南昌理工学院刘耀元组织编写、统稿, 罗中华参与了本书的审稿工作。

由于电工与电子技术学科发展迅速, 课程的改革日益深入, 虽然我们精心组织编写, 但是由于时间仓促和编者水平有限, 书中错误和欠妥之处在所难免, 恳请广大读者不吝指教。编者电子信箱地址: LDG1239@sina.com。

编 者  
2006 年 5 月

# 目 录

|                                |      |                                    |      |
|--------------------------------|------|------------------------------------|------|
| 前 言 .....                      | (1)  | 2.4.3 提高功率因数的意义和方法 .....           | (40) |
| 第1章 电路的基本定律与分析方法 .....         | (1)  | 2.5 三相交流电路 .....                   | (42) |
| 1.1 电路及电路模型 .....              | (1)  | 2.5.1 三相电源 .....                   | (42) |
| 1.1.1 电路与电路模型 .....            | (1)  | 2.5.2 负载的星形联结 .....                | (44) |
| 1.1.2 理想电路元件 .....             | (1)  | 2.5.3 负载的三角形联结 .....               | (46) |
| 1.1.3 电源的两种模型 .....            | (2)  | 2.5.4 三相功率 .....                   | (46) |
| 1.2 电路主要物理量及电气设备<br>的额定值 ..... | (4)  | 本章小结 .....                         | (47) |
| 1.2.1 电路主要物理量 .....            | (4)  | 习题二 .....                          | (48) |
| 1.2.2 电气设备的额定值 .....           | (8)  | 第3章 电路的过渡过程 .....                  | (51) |
| 1.2.3 电路的三种工作状态 .....          | (9)  | 3.1 电路的过渡过程及换路定律 .....             | (51) |
| 1.3 基尔霍夫定律 .....               | (11) | 3.1.1 电路的暂态 .....                  | (51) |
| 1.3.1 电流定律 .....               | (11) | 3.1.2 换路定律 .....                   | (51) |
| 1.3.2 电压定律 .....               | (12) | 3.2 RC 电路的过渡过程及三要素法 .....          | (53) |
| 1.4 电路分析方法 .....               | (14) | 3.2.1 分析一阶电路过渡过程的<br>三要素法 .....    | (53) |
| 1.4.1 支路电流法 .....              | (14) | 3.2.2 RC 电路的充电过程 .....             | (55) |
| 1.4.2 叠加原理 .....               | (14) | 3.2.3 RC 电路的放电过程 .....             | (55) |
| 1.4.3 节点电位法 .....              | (16) | 3.2.4 RC 电路的时间常数 .....             | (56) |
| 1.4.4 戴维南定理 .....              | (17) | 3.3 微分电路和积分电路 .....                | (57) |
| 本章小结 .....                     | (19) | 3.3.1 微分电路 .....                   | (57) |
| 习题一 .....                      | (20) | 3.3.2 积分电路 .....                   | (58) |
| 第2章 正弦交流电路 .....               | (23) | 3.4 RL 电路的过渡过程 .....               | (60) |
| 2.1 正弦交流电的基本概念 .....           | (23) | 3.4.1 RL 电路与直流电压的接通 .....          | (60) |
| 2.1.1 正弦交流电的表示方法 .....         | (23) | 3.4.2 RL 电路的短接 .....               | (61) |
| 2.1.2 正弦交流电的相位差、有效值 .....      | (25) | 3.4.3 电感电路突然断开、过电压的<br>产生及防止 ..... | (61) |
| 2.2 正弦交流电的相量表示法 .....          | (26) | 本章小结 .....                         | (63) |
| 2.2.1 复数及其运算 .....             | (27) | 习题三 .....                          | (63) |
| 2.2.2 相量表示法 .....              | (28) | 第4章 电工测量与工厂输配电和<br>安全用电 .....      | (65) |
| 2.2.3 单一参数的正弦交流电路 .....        | (30) | 4.1 仪表准确度与测量误差 .....               | (65) |
| 2.3 RLC 串联电路 .....             | (34) | 4.2 常用电工测量仪表 .....                 | (66) |
| 2.3.1 电压和电流的关系 .....           | (35) | 4.2.1 电工测量仪表的分类 .....              | (66) |
| 2.3.2 功率 .....                 | (36) | 4.2.2 测量仪表的选择 .....                | (66) |
| 2.3.3 串联谐振 .....               | (37) | 4.3 电流、电压和电功率的测量 .....             | (67) |
| 2.4 RLC 并联电路 .....             | (38) | 4.3.1 电流的测量 .....                  | (67) |
| 2.4.1 电压和电流的关系 .....           | (38) |                                    |      |
| 2.4.2 并联谐振 .....               | (39) |                                    |      |

|                              |      |                                  |       |
|------------------------------|------|----------------------------------|-------|
| 4.3.2 电压的测量 .....            | (68) | 6.2.2 转子电路分析 .....               | (100) |
| 4.3.3 电功率的测量 .....           | (68) | 6.3 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性 .....      | (101) |
| 4.4 万用表和兆欧表 .....            | (68) | 6.4 三相异步电动机的使用 .....             | (103) |
| 4.4.1 万用表 .....              | (68) | 6.4.1 三相异步电动机的铭牌和技术数据 .....      | (103) |
| 4.4.2 兆欧表 .....              | (71) | 6.4.2 三相异步电动机的选择 .....           | (105) |
| 4.5 工厂输配电 .....              | (72) | 6.4.3 三相异步电动机的起动 .....           | (105) |
| 4.5.1 工厂供电系统概况 .....         | (72) | 6.4.4 三相异步电动机的调速 .....           | (107) |
| 4.5.2 发电厂和电力系统简介 .....       | (72) | 6.4.5 三相异步电动机的反转与制动 .....        | (109) |
| 4.6 安全用电 .....               | (74) | 6.5 单相异步电动机 .....                | (110) |
| 4.6.1 触电 .....               | (74) | 6.6 常用低压电器与电气符号 .....            | (112) |
| 4.6.2 防止触电的措施 .....          | (75) | 6.7 三相异步电动机的基本控制系统 .....         | (116) |
| 4.6.3 安全用电常识 .....           | (76) | 6.7.1 点动控制 .....                 | (116) |
| 4.6.4 触电急救常识 .....           | (76) | 6.7.2 连续运转控制 .....               | (117) |
| 本章小结 .....                   | (77) | 6.7.3 电动机的正、反转控制线路 .....         | (117) |
| 习题四 .....                    | (77) | 6.7.4 电动机的开关自动控制线路 .....         | (118) |
| <b>第5章 电磁铁和变压器</b> .....     | (78) | 6.7.5 电动机的联锁控制线路 .....           | (120) |
| 5.1 磁路 .....                 | (78) | 本章小结 .....                       | (121) |
| 5.1.1 磁场的基本物理量 .....         | (78) | 习题六 .....                        | (122) |
| 5.1.2 磁性材料的主要性能 .....        | (79) | <b>第7章 可编程序控制器</b> .....         | (125) |
| 5.1.3 磁路的欧姆定律 .....          | (80) | 7.1 概述 .....                     | (125) |
| 5.2 电磁铁及其电磁电器 .....          | (81) | 7.1.1 PLC的由来与发展概况 .....          | (125) |
| 5.2.1 电磁铁 .....              | (81) | 7.1.2 PLC的分类、特点与应用 .....         | (125) |
| 5.2.2 交流接触器 .....            | (82) | 7.2 PLC的基本结构及工作原理 .....          | (127) |
| 5.2.3 电磁阀 .....              | (83) | 7.2.1 PLC的基本结构 .....             | (127) |
| 5.3 交流铁芯线圈电路 .....           | (84) | 7.2.2 PLC的工作原理 .....             | (128) |
| 5.3.1 交流铁芯线圈电路中的电磁关系 .....   | (84) | 7.3 FX0s系列PLC的I/O配置及内部软继电器 ..... | (129) |
| 5.3.2 交流铁芯线圈的功率损耗 .....      | (85) | 7.4 PLC的指令系统与编程语言 .....          | (131) |
| 5.4 变压器的原理和应用 .....          | (86) | 7.5 PLC控制系统的应用举例 .....           | (140) |
| 5.4.1 变压器空载运行 .....          | (86) | 本章小结 .....                       | (143) |
| 5.4.2 变压器负载运行 .....          | (87) | 习题七 .....                        | (144) |
| 5.4.3 变压器的阻抗变换 .....         | (88) | <b>第8章 常用晶体管</b> .....           | (146) |
| 5.4.4 变压器的额定值 .....          | (89) | 8.1 半导体材料的导电特性 .....             | (146) |
| 5.4.5 特殊变压器 .....            | (90) | 8.1.1 本征半导体 .....                | (146) |
| 本章小结 .....                   | (92) | 8.1.2 N型半导体和P型半导体 .....          | (147) |
| 习题五 .....                    | (93) | 8.2 PN结 .....                    | (147) |
| <b>第6章 电动机及其基本控制系统</b> ..... | (94) | 8.3 晶体二极管 .....                  | (149) |
| 6.1 三相异步电动机的基本结构和工作原理 .....  | (94) | 8.4 晶体管 .....                    | (151) |
| 6.1.1 三相异步电动机的构造 .....       | (94) | 8.4.1 晶体管的结构 .....               | (151) |
| 6.1.2 三相异步电动机的工作原理 .....     | (96) | 8.4.2 晶体管的电流放大作用 .....           | (152) |
| 6.2 三相异步电动机的定子电路和转子电路 .....  | (98) | 8.4.3 晶体管的特性曲线 .....             | (152) |
| 6.2.1 定子电路分析 .....           | (99) |                                  |       |

|                                  |       |                             |       |
|----------------------------------|-------|-----------------------------|-------|
| 8.4.4 晶体管的主要参数 .....             | (154) | 10.3.1 集成运算放大器的主要性能指标 ..... | (185) |
| 8.5 绝缘栅场效应管 .....                | (154) | 10.3.2 理想运算放大器 .....        | (186) |
| 8.5.1 N沟道增强型 MOS 管 .....         | (155) | 10.3.3 典型集成运算放大器芯片 .....    | (188) |
| 8.5.2 N沟道耗尽型 MOS 管 .....         | (156) | 10.4 集成运算放大器的线性应用电路 .....   | (189) |
| 8.6 晶闸管 .....                    | (157) | 10.4.1 比例运算电路 .....         | (190) |
| 8.6.1 晶闸管的结构 .....               | (157) | 10.4.2 加法、减法运算电路 .....      | (192) |
| 8.6.2 晶闸管的工作原理 .....             | (157) | 10.4.3 微分、积分运算电路 .....      | (193) |
| 8.6.3 晶闸管的伏安特性 .....             | (158) | 10.4.4 电流、电压转换电路 .....      | (194) |
| 8.6.4 晶闸管的主要参数 .....             | (159) | 10.5 集成运算放大器的非线性应用电路 .....  | (195) |
| 本章小结 .....                       | (159) | 10.5.1 比较器 .....            | (195) |
| 习题八 .....                        | (160) | 10.5.2 方波发生器 .....          | (199) |
| <b>第 9 章 基本放大电路</b> .....        | (161) | 10.6 正弦波振荡电路 .....          | (200) |
| 9.1 放大电路的组成 .....                | (161) | 10.6.1 正弦波振荡器的基本概念 .....    | (201) |
| 9.2 静态分析 .....                   | (162) | 10.6.2 RC 振荡器 .....         | (202) |
| 9.2.1 估算法 .....                  | (163) | 10.7 集成运放应用的一些实际问题 .....    | (204) |
| 9.2.2 图解法 .....                  | (163) | 10.7.1 合理选用集成运放型号 .....     | (204) |
| 9.3 动态分析 .....                   | (165) | 10.7.2 集成运放参数的测试 .....      | (204) |
| 9.3.1 图解法 .....                  | (165) | 10.7.3 调零、防漂移、消振 .....      | (204) |
| 9.3.2 微变等效电路法 .....              | (166) | 10.7.4 集成运放的保护 .....        | (205) |
| 9.4 分压式偏置电路 .....                | (169) | 本章小结 .....                  | (206) |
| 9.5 射极输出器 .....                  | (171) | 习题十 .....                   | (207) |
| 9.6 互补对称功率放大电路 .....             | (172) | <b>第 11 章 直流稳压电路</b> .....  | (210) |
| 9.6.1 对功率放大电路的基本要求 .....         | (172) | 11.1 单相桥式整流电路 .....         | (210) |
| 9.6.2 互补对称功率放大电路 .....           | (173) | 11.1.1 电路的工作原理 .....        | (210) |
| 9.6.3 集成功率放大器 .....              | (174) | 11.1.2 整流电路的主要参数 .....      | (211) |
| 9.7 多级放大电路 .....                 | (175) | 11.2 滤波电路 .....             | (212) |
| 9.7.1 阻容耦合多级放大电路 .....           | (176) | 11.2.1 电容滤波电路 .....         | (212) |
| 9.7.2 直接耦合多级放大电路 .....           | (176) | 11.2.2 电感滤波电路与复式滤波电路 .....  | (214) |
| 9.7.3 变压器耦合多级放大电路 .....          | (176) | 11.3 稳压电路 .....             | (215) |
| 本章小结 .....                       | (177) | 11.3.1 稳压管和稳压电路 .....       | (215) |
| 习题九 .....                        | (177) | 11.3.2 串联直流稳压电路 .....       | (217) |
| <b>第 10 章 集成运算放大电路</b> .....     | (181) | 11.3.3 集成稳压电路 .....         | (217) |
| 10.1 集成运算放大器简介 .....             | (181) | 本章小结 .....                  | (219) |
| 10.1.1 集成运算放大器的特点 .....          | (181) | 习题十一 .....                  | (220) |
| 10.1.2 集成运算放大器的基本组成 .....        | (181) | <b>第 12 章 数字电路基础</b> .....  | (222) |
| 10.2 集成运放输入级——差动放大电路 .....       | (182) | 12.1 数制与码制 .....            | (222) |
| 10.2.1 零点漂移产生原因及其抑制方法 .....      | (182) | 12.1.1 常用计数制 .....          | (222) |
| 10.2.2 差动放大电路的工作原理 .....         | (182) | 12.1.2 数制之间的转换 .....        | (223) |
| 10.2.3 差动放大器的差模放大作用和共模抑制作用 ..... | (183) | 12.1.3 常用码制 .....           | (224) |
| 10.3 集成运算放大器 .....               | (185) | 12.2 逻辑代数基础 .....           | (224) |
|                                  |       | 12.2.1 基本逻辑与复合逻辑 .....      | (224) |

|                            |       |                             |       |
|----------------------------|-------|-----------------------------|-------|
| 12.2.2 逻辑函数的表示             | (226) | 14.4 计数器                    | (274) |
| 12.2.3 逻辑代数的基本定律           | (227) | 14.4.1 二进制计数器               | (274) |
| 12.3 逻辑函数化简                | (229) | 14.4.2 十进制计数器               | (276) |
| 12.3.1 逻辑函数的代数化简法          | (229) | 14.4.3 $N$ 进制计数器            | (277) |
| 12.3.2 逻辑函数的卡诺图化简法         | (230) | 本章小结                        | (281) |
| 本章小结                       | (233) | 习题十四                        | (281) |
| 习题十二                       | (234) | 第 15 章 脉冲的产生和变换电路           | (284) |
| 第 13 章 门电路和组合逻辑电路          | (236) | 15.1 555 定时电路               | (284) |
| 13.1 分立元件门电路               | (236) | 15.1.1 CC7555 定时器组成         | (284) |
| 13.1.1 与门                  | (236) | 15.1.2 CC7555 定时器的引脚和逻辑功能   | (285) |
| 13.1.2 或门                  | (236) | 15.2 单稳态触发器                 | (286) |
| 13.1.3 非门                  | (237) | 15.2.1 单稳态触发器简介             | (286) |
| 13.2 集成门电路                 | (238) | 15.2.2 用 CC7555 定时器构成单稳态触发器 | (286) |
| 13.2.1 典型 TTL 与非门电路        | (238) | 15.2.3 单稳态触发器的应用举例          | (287) |
| 13.2.2 其他类型 TTL 与非门电路      | (240) | 15.3 多谐振荡器                  | (288) |
| 13.2.3 CMOS 集成逻辑门电路        | (242) | 15.3.1 多谐振荡器简介              | (288) |
| 13.3 组合逻辑电路的分析与设计          | (245) | 15.3.2 用 CC7555 定时器构成多谐振荡器  | (288) |
| 13.3.1 组合逻辑电路的分析           | (245) | 15.3.3 多谐振荡器的应用举例           | (289) |
| 13.3.2 组合逻辑电路的设计           | (247) | 15.4 施密特触发器                 | (290) |
| 13.4 基本组合逻辑部件              | (249) | 15.4.1 施密特触发器简介             | (290) |
| 13.4.1 编码器                 | (249) | 15.4.2 用 CC7555 定时器构成施密特触发器 | (290) |
| 13.4.2 译码器与译码显示电路          | (252) | 15.4.3 施密特触发器的主要作用          | (292) |
| 13.4.3 加法器                 | (255) | 15.4.4 施密特触发器的应用举例          | (293) |
| 13.4.4 数据选择器和数值比较器         | (257) | 本章小结                        | (294) |
| 本章小结                       | (260) | 习题十五                        | (294) |
| 习题十三                       | (260) | 第 16 章 模/数和数/模转换器           | (296) |
| 第 14 章 时序逻辑电路              | (262) | 16.1 概述                     | (296) |
| 14.1 触发器                   | (262) | 16.2 数/模转换器                 | (296) |
| 14.1.1 RS 触发器              | (262) | 16.2.1 T 形网络数/模转换器          | (297) |
| 14.1.2 主从型 JK 触发器          | (265) | 16.2.2 数/模转换器的主要技术指标        | (299) |
| 14.1.3 D 触发器               | (267) | 16.3 模/数转换器                 | (300) |
| 14.1.4 T 触发器和 $T'$ 触发器     | (268) | 16.3.1 逐次逼近型模/数转换器          | (300) |
| 14.2 触发器逻辑功能的转换            | (269) | 16.3.2 模/数转换器的主要技术指标        | (303) |
| 14.2.1 JK 触发器转换成其他逻辑功能的触发器 | (269) | 本章小结                        | (303) |
| 14.2.2 D 触发器转换成其他逻辑功能的触发器  | (270) | 习题十六                        | (304) |
| 14.3 寄存器                   | (270) | 参考文献                        | (305) |
| 14.3.1 数码寄存器               | (271) |                             |       |
| 14.3.2 移位寄存器               | (271) |                             |       |

# 第 1 章 电路的基本定律与分析方法

本章着重讨论电路的基本定律,以及应用基本定律分析一般直流电路的方法。这些研究直流电路的理论和方法,在原则上也适用于其他电路。

## 1.1 电路及电路模型

### 1.1.1 电路与电路模型

电路是由电工设备和电子器件根据功能需要,按照某种特定方式连接而成的输送电流模型。例如,将电池和灯经过开关用导线连接起来,就可构成一个照明电路。如图 1-1(a)所示,电池在电路中为灯提供电能,称为电源;灯将电能转换为光能、热能等非电能,它是取用电能的器件,称为负载;导线和开关起连接和控制作用的,称为中间环节。

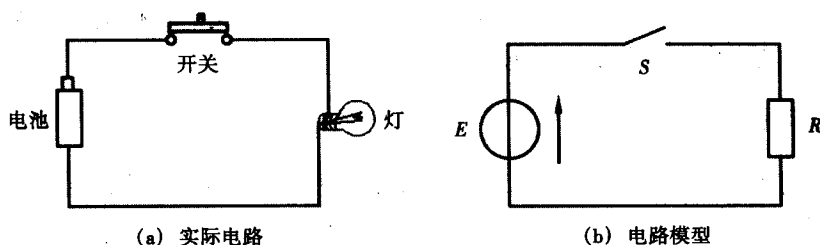


图 1-1 照明电路

构成电路的常用元器件有电阻器、二极管、电容、电感、变压器、电动机、电池等。这些实际元器件的电磁特性往往十分复杂。例如,一个白炽灯的主要电磁特性是电阻特性(即消耗电能),但当电流流过时还会产生磁场,又表现为电感特性。因此,为了分析复杂电路的工作特性,就必须进行科学的抽象与概括,用一些理想电路元器件(或相应组合)来代表实际元器件的主要外部特性。这种模型元件是一种用数学关系描述实际器件的基本物理规律的数学模型,称之为理想元件,简称元件。

这种用理想电路元件来代替实际电路元件的电路称为电路模型,简称电路。电路图则是用规定的元器件图形符号反映电路的结构。例如,照明电路的模型可由图 1-1(b)所示的电路图表示。

### 1.1.2 理想电路元件

理想电路元件在理想电路中是组成电路的基本元件,元件上电压与电流之间的关系又称为元件的伏安特性,它反映了元件的性质。电路元件按能量特性,可分为无源和有源元件;按与外部连接的端子数目,可分为二端、三端、四端元件等;按伏安特性,可分为线性元件与非线性元件。本节将讨论电阻、电感、电容等二端无源元件,有源元件将在 1.1.3 作详细介绍。

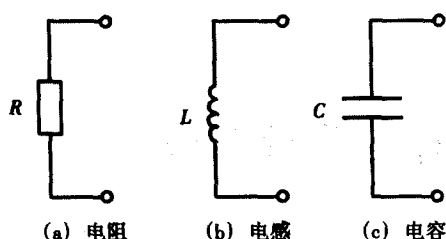


图 1-2 理想元件图形符号

在实际电路中使用着各种电气、电子元器件,如电阻器、电容器、电感器、灯泡、电池、晶体管、变压器等,但是它们在电磁方面却有许多共同的地方。例如,电阻器、灯泡、电炉等,其主要电磁性能是消耗电能,这样可用一个具有两个端钮的理想电阻  $R$  来表示,用以反映消耗电能的特征,其图形符号如图 1-2(a) 所示。类似地,各种实际电感器主要是储存磁能,用一个理想的二端电感元件来反映

储存磁能的特征,理想电感元件的图形符号如图 1-2(b) 所示。各种实际的电容器主要是储存电能,用一个理想的二端电容来反映储存电能的特征,理想电容元件的图形符号如图 1-2(c) 所示。

其他的实际电路部件都可类似地将其表示为应用条件下的模型,这里就不一一列举。但关于理想电路元件这里再强调一下,理想电路元件是具有某种确定的电磁性能的理想元件;理想电阻元件只消耗电能(既不储存电能,也不储存磁能);理想电容元件只储存电能(既不消耗电能,也不储存磁能);理想电感元件只储存磁能(既不消耗电能,也不储存电能)。理想电路元件是一种理想的模型并具有精确的数学定义,实际中并不存在。但是不能说所定义的理想电路元件模型理论脱离实际,是无用的。这犹如实际中并不存在“质点”,但“质点”这种理想模型在物理学科运动学原理分析与研究中举足轻重一样,人们所定义的理想电路元件模型在电路理论问题分析与研究中充当着重要角色。

### 1.1.3 电源的两种模型

电源可以概括为两种模型:一种是电压源模型;另一种是电流源模型。以下分别进行介绍。

#### 1. 电压源

一个电源的端电压如果不随通过的电流而变化,这样的电源被定义为理想电压源或恒压源,用  $E$  或  $U_s$  表示,其图形符号如图 1-3(a) 所示。如果一个电源的内阻远小于负载电阻的大小,则电源内阻压降可忽略不计,于是  $U \approx E$ ,输出电压基本上恒定,可以认为是理想电压源。实际电压源都具有内阻  $R_0$ ,当电流通过内阻时会产生压降,使电源两端的电压随电流而变化。

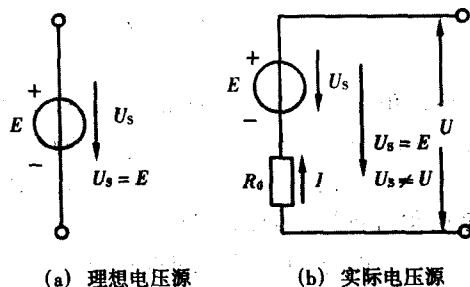


图 1-3 电压源图形符号

为了反映实际电压源的端电压随电流而变化的外特性,可以认为实际电压源是理想电压源  $E$  (或  $U_s$ ) 与  $R_0$  内阻相串联组成的,如图 1-3(b) 所示,这里把实际电压源简称为电压源。

由于理想电压源具有恒压的特性,因此在理想电压源两端并联电阻(或其他元件)时,不会改变它对原来外电路的输出,所以在计算外电路时,除去与理想电源直接并联的电阻(或其他元件)不会影响计算结果。

#### 2. 电流源

一个电源的输出电流不随输出电压的变化而变化,这样的电源被定义为理想电流源或恒流源,用  $I_s$  表示,其图形符号如图 1-4(a) 所示。在实际工作中所使用的一些稳流电源设备,就是

一种高内阻的电源,电源的内阻远大于负载电阻,输入电流  $I_s \approx E/R_0$ ,基本恒定,可以认为是理想电源。实际电流源的性能只是在一定范围内与理想电流源相接近,因为任何电源内部都有损耗,它可以用一个理想电流源  $I_s$  和  $R_0$  内阻相并联组成,如图 1-4(b)所示。并联的内阻,使电源的输出电流  $I$  随负载而变化。在以后的介绍中,实际电流源又简称为电流源。

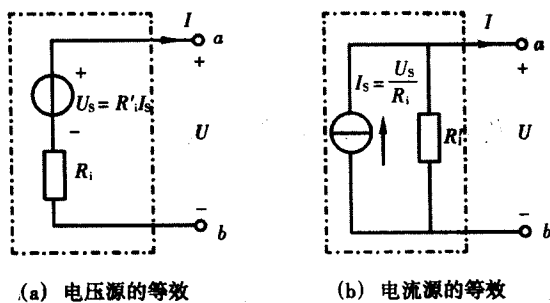
在电子线路中,晶体管的输出特性,在一定条件下,可以近似的用一个理想电流源来表示。

理想电流源具有恒流特性,与理想电流源串联接入电阻(或其他元件),不会改变对原有外电路的输出,所以在计算外电路时,短接与理想电流源直接串联的电阻(或其他元件)不会影响计算结果。

### 3. 电压源和电流源的等效变换

从电压源的外特性和电流源的外特性可知,二者是相同的,因此实际电压源和实际电流源之间可以等效变换。

这里所说的等效变换是指外部等效,就是变换前后,端口处的伏安关系不变。即  $a$ 、 $b$  间端口电压均为  $U$ ,端口处流出或流入的电流  $I$  相同,如图 1-5 所示。



(a) 电压源的等效

(b) 电流源的等效

图 1-5 电压源和电流源的等效变换

电压源输出的电流为

$$I = \frac{U_s - U}{R_i} = \frac{U_s}{R_i} - \frac{U}{R_i}$$

电流源输出的电流为

$$I = I_s - \frac{U}{R'_i}$$

根据等效的要求,上面两个式子中对应项应该相等,即

$$I_s = \frac{U_s}{R_i} \quad R'_i = R_i$$

这就是两种电源模型等效变换的条件。

变换中需要注意:如果  $a$  点是电压源的参考正极性,变换后电流源的电流参考方向应指向  $a$ 。恒压源和恒流源是无法进行等效变换的,因为恒压源的输出电流由负载电流大小决定;而恒流源的端电压由负载大小决定,故二者不能等效。

【例 1-1】试用电源间的等效变换方法求图 1-6(a)中的电压  $U_{ab}$ 。

解:对该电路可先将电流源部分等效为电压源,如图 1-6(b)所示,然后把电压源合并,得到 1-6 图(c)所示的电源。最后可根据分压公式求得电压

$$U_{ab} = \frac{8}{2+8} \times 5V = 4V$$

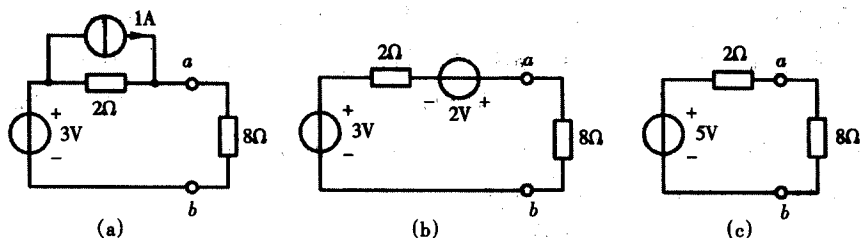


图 1-6

## 思考题

1. 有人说:“理想电压源可看作为内阻为零的电源,理想电流源可看作为内阻为无限大的电源。”你同意这种观点吗?为什么?

2. 求图 1-7 中的电压  $U_{ab}$ 。

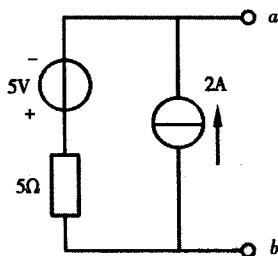


图 1-7

## 1.2 电路主要物理量及电气设备的额定值

### 1.2.1 电路主要物理量

在电路问题分析中,人们主要关注的电路物理量有电流、电压、电位、电动势、电功率、电能等。下面就这些重要物理量的有关基本概念作介绍。

#### 1. 电流( $I$ )

电荷的定向移动形成了电流。一段金属导体内含有大量的带负电荷的自由电子,通常情况下,这些自由电子在其内部作无规则的热运动,并不形成电流;若在该段金属导体两端接上电源,那么带负电荷的自由电子就要逆电场方向运动,于是在该段金属导体中便形成电流。在其他场合,如电解溶液中的带电离子作规则定向运动也会形成传导电流。

电流,虽然看不见,但可通过电流的各种效应(如磁效应、热效应)来感知它的客观存在。把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流,用  $i$  表示,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

式中, $i$  为单位时间内通过导体横截面的电荷量,若  $\frac{dq}{dt}$  为常数,即是直流电流,常用大写字母  $I$  表示。电流的单位是 A(安培,简称安)。

电流不仅有大小,而且还有方向。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向,但

在电路分析中,有时某段电流的实际方向难以判断,有时电流的实际方向还在不断改变。为了解决这一问题,可任意选定一方向作参考,称为参考方向(或正方向),在电路图中用箭头表示,也可用字母带双下标表示,如  $I_{ab}$  表示参考方向从  $a$  指向  $b$ ,如图 1-8 所示。并规定:当电流的参考方向与实际方向一致时,电流取正值;当电流的参考方向与实际方向不一致即相反时,电流取负值。这样,在电路计算时,只要选定了参考方向,并算出电流值,就可根据其值的正负号来判断其实际方向了。



图 1-8 电流参考方向与实际方向的关系

## 2. 电压( $U$ )

两点之间的电位差即是两点间的电压。从电场力做功概念定义,电压就是将单位正电荷从电路中一点移至另一点电场力做功的大小。有数学表达式为

$$U_{ab} = \frac{dw}{dq} = V_a - V_b \quad (1-2)$$

式中, $dw$  表示电场力把微小电荷量从一点移动另一点所做的功; $dq$  为微小电荷量, $V_a$ 、 $V_b$  分别表示  $a$ 、 $b$  点的电位, $U_{ab}$  则表示  $a$ 、 $b$  点间的电位之差。电压总是与电路中两点相联系的。电压的单位是 V(伏特,简称伏)。有的也用 kV(千伏)、mV(毫伏)、 $\mu$ V(微伏)作单位。

电路中电压的实际方向规定为从高电位指向低电位。但在复杂的电路里,电压的实际方向是不易判别的或在交流电路里,两点间电压的实际方向是分时间段交替改变的,这给实际电路问题的分析计算带来不便,所以也需要对点标两点间电压设出参考方向。在电路图中,常标以“+”、“-”号表示电压的正、负极性或参考方向。在图 1-9 中, $a$  点标以“+”,极性为正,称为高电位; $b$  点标以“-”,极性为负,称为低电位。也有的用带有双下标的字母表示,如电压  $U_{ab}$ ,表示该电压的参考方向为从  $a$  点指向  $b$  点。这种选定也具有任意性,并不能确定真实的物理过程。一旦选定了电压参考方向后,若  $U > 0$ ,则表示电压的真实极性与选定的参考方向一致,反之则相反。与电流类似,两点间电压数值的正与负,在设定参考方向的前提下才有意义。本书的后续内容中电路图上所标出的电流(或电压)的方向都是参考方向。

电路中电流的正方向和电压的正方向在选定时都有任意性,二者彼此独立。但是,为了分析电路方便,常把元件上的电流与电压的正方向取为一致,称为关联参考方向,如图 1-10 所示,电流从元件标以“+”的端点流入,从“-”端流出。通常约定,除电源元件外,所有元件上的电流和电压都采用关联参考方向。

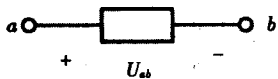


图 1-9 电压的正方向

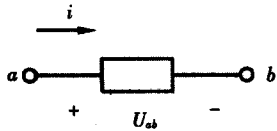


图 1-10 关联的电流、电压参考方向

## 3. 电位( $V$ )

在物理学中,将单位正电荷自某一点  $a$  沿任意路径移动到参考点(物理学中习惯选无穷

远处作参考点)时电场力做功的大小称为  $a$  点的电位,记为  $V_a$ 。所以为了求出各点的电位,必须选定电路中的某一点作为参考点,并规定参考点的电位为零。则电路中的任一点与参考点之间的电压(即电位差)就是该点的电位。

电力系统中,常选大地为参考点;在电子线路中,则常选机壳电路的公共线为参考点。线路图中都用图形符号“ $\perp$ ”表示,简称接“地”。图 1-12 所示电路,是利用电位的概念,简化图 1-11 所画出的电路图,在电子线路中,常使用这种习惯画法。

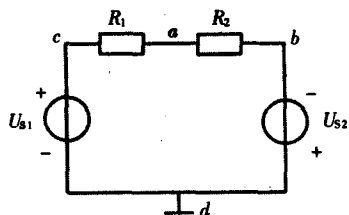


图 1-11 双电源电路

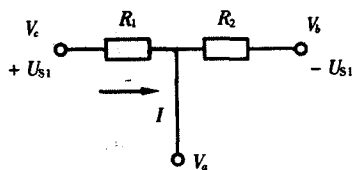


图 1-12 图 1-11 的习惯画法

#### 4. 电动势( $E$ )

在闭合电路中,要维持连续不断的电流,必须要有电源。在电源内部有一种局外力(非静电力),在它的作用下将正电荷由低电位处移向高电位处。电池中的局外力是由电解液和金属极板间的化学作用产生的,由于局外力而使电源两端具有的电位差叫电动势,并规定电动势的实际方向是由低电位端指向高电位端。这里把电位高的一端称为正极,电位低的一端称为负极,则规定电动势的实际方向在电源内部是从负极到正极,如图 1-13(a)所示。因此,在电动势的方向上电位是逐点升高的。电动势在数值上等于局外力把正电荷从负极板搬运到正极板所做的功  $W_{ba}$  与被搬运的电荷  $Q$  的比值,用  $E$  表示,即

$$E = \frac{W_{ba}}{Q} \quad (1-3)$$

电动势的单位也用 V 表示。如果局外力把 1C(库)电量从  $b$  点搬运到  $a$  点所做的功是 1J(焦),则  $b$  与  $a$  两点间的电动势就等于 1V。

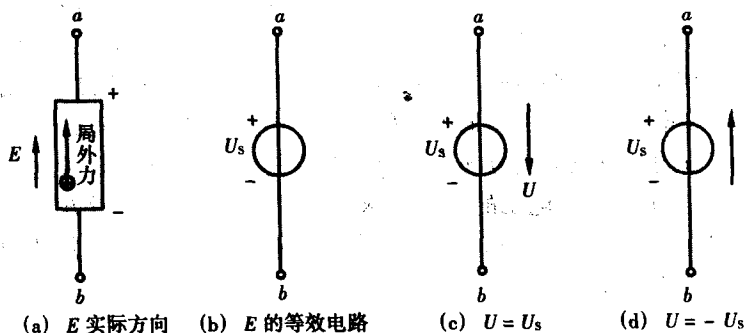


图 1-13 电动势(恒压源)的图形符号及不同电压参考方向

由于电动势  $E$  两端的电压值为恒定值,且不论电流的大小和方向如何,其电位差总是不变,故用恒压源  $U_s$  的电路模型代替电动势  $E$ ,如图 1-13(b)所示。在分析电路时,电路中电压参考方向不同时,其值不同。当选取的电压参考方向与恒压源的极性一致时,  $U = U_s$ ,如图 1-13(c)所示;相反时,  $U = -U_s$ ,如图 1-13(d)所示。且与电路中的电流无关。

5. 电功率( $P$ )

电路中单位时间内消耗的电能称为电功率,电功率的大小等于电流与电压的乘积,即  $P = UI$ 。

判断某一元件是电源还是负载的方法是:当电流与电压的实际方向一致时,表示该电路元件是负载,消耗电能;当电流与电压的实际方向相反时,表示该电路元件是电源,向负载提供电能。

在闭合电路中恒压源产生的电功率为

$$P_{U_S} = \frac{U_S I t}{t} = U_S I \quad (1-4)$$

负载取用的电功率为

$$P_{R_L} = \frac{U I t}{t} = UI \quad (1-5)$$

电源内部损耗的电功率为

$$\Delta P = \frac{U_i I t}{t} = U_i I \quad (1-6)$$

这三者间的关系为

$$P_{U_S} = P_{R_L} + \Delta P \quad (1-7)$$

式(1-7)称为电路的功率平衡方程式。功率的单位是 W(瓦),电能的单位是 J(焦),因这些单位有时太小,所以功率的单位常用 kW(千瓦),电能的单位常用 kW·h(千瓦时)。1kW·h 俗称 1 度电。

【例 1-2】如图 1-14 所示,已知恒压源  $U_S = 24V$ ,电源输出电压  $U = 22V$ ,电流  $I = 5A$ ,求  $P_{U_S}$ 、 $P_{R_L}$ 、 $\Delta P$  和  $U_i$ 。

解:  $P_{U_S} = U_S I = 24 \times 5W = 120W$

$P_{R_L} = UI = 22 \times 5W = 110W$

$\Delta P = U_i I = (24 - 22) \times 5W = 10W$

$U_i = U_S - U = (24 - 22)V = 2V$

6. 电能( $W$ )

在电流通过电路的同时,电路中发生了能量的转换。在电源内,外力不断地克服电场力对正电荷做功,正电荷在电源内获得了能量,把非电能转换成电能。在外电路中,正电荷在电场力作用下,不断地流过负载,正电荷在外电路中放出能量,把电能转换成为其他形态的能。由此可见,在电路中,电荷只是一种转换和传输能量的媒介物,电荷本身并不产生或消耗任何能量。通常所说的用电,就是指取用电荷所携带的能量。

从非电能转换来的电能等于恒压源电动势和被移动的电荷  $Q$  的乘积,即

$$W_{U_S} = U_S Q = U_S I t \quad (1-8)$$

此电能可分为两部分:其一是外电路取用的电能(即电源输出的电能)  $W$ ,其二是因电源内部正电荷受局部外力作用在移动过程中存在阻力,即电源内部将消耗电能  $W_i$ 。

外电路取用的电能等于电源输出端的电压  $U$  与受电场力作用而移动的电荷  $Q$  的乘积,即

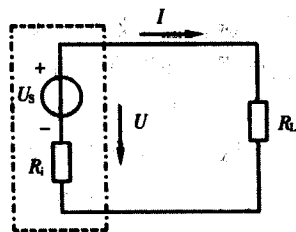


图 1-14

$$W = UQ = UIt \quad (1-9)$$

电荷在电源内部移动时,把一部分电能转换成热能,这是无法利用的能量损耗。根据能量守恒定律得

$$W_i = W_{U_S} - W = (U_S - U)It \quad (1-10)$$

式(1-10)中称为电源内部电压降,用  $U_i$  表示,于是可得电路的能量平衡方程为

$$U_S It = UIt + U_i It \quad (1-11)$$

等式两边除以  $It$ , 则得

$$U_S = U + U_i \quad (1-12)$$

式(1-12)称为电路的电压平衡方程。其含义是:恒压源两端的电压等于电源输出端电压与电源内部电压降之和。

### 1.2.2 电气设备的额定值

下面先讨论电流的热效应。电流通过电气设备,就能把电能转换为其他形式的能,有的转变了热能,从而使电气设备的温度升高,这种现象称为热效应。电流的热效应在生产和生活中有很多应用,如白炽灯、电炉和其他电热元器件等。

但电流的热效应也有其有害的一面。由于连接导线以及发电机、电动机、变压器等非电热性电气设备的导电部分都具有一定的电阻,因此在工作时,只要有电流流过,就会有一部分电能转变成热能。而这部分热能通常是不能加以利用的。通常把这一部分损失的热能称为铜损。由于铜损的存在,降低了电气设备的效率,并使设备的温度升高。

电气设备工作时最高允许温度都有一定的数值。如果电气设备工作时温度上升过高,超过了最高允许温度,绝缘材料就会很快变脆损坏,使用寿命就会缩短。温度再升高,绝缘材料就开始碳化甚至燃烧起来,使电气设备损坏,造成严重事故。裸导线的最高允许温度根据导线的机械强度随温度的升高而降低的程度来决定。

为了使电气设备在工作中的温度不超过最高工作温度,对通过它的最高容许电流就必须有一个限制。通常把这个限定电流值称为电气设备的额定电流,用  $I_N$  表示。因此,额定电流是电气设备长时间连续工作的最大容许电流。使电气设备长时间连续工作的电流,不应超过它的额定电流,否则电气设备将因发热而缩短寿命,甚至被烧毁。

加在电气设备上的电压,对电气设备的电流有着重要影响。因此,电气设备工作时对电压也有一定的限额,这个电压的限额称为电气设备的额定电压,用  $U_N$  表示。

在直流电路中,额定电压和额定电流的乘积就是用电设备的额定功率,用  $P_N$  表示,即  $P_N = I_N U_N$ 。

额定电流、额定电压和额定功率通常称为额定值。电气设备和电路元件的额定值常常标在铭牌上或打印在外壳上。

电气设备或元件的额定值不一定等于实际使用值,对于白炽灯、电炉之类的用电设备,只要在额定电压下使用,其电流和功率都将达到额定值。但是对于另一类电气设备,如电动机、变压器等,即使是在额定电压下工作,其电流和功率也可能达不到额定值,但还是存在着电流和功率超过额定值(称为过载)的可能性。这在使用时是应该注意的。

## 1.2.3 电路的三种工作状态

## 1. 有载工作状态

图 1-15 所示电路中,开关 S 闭合,电路便处于有载工作状态。此时电路有下列特征:

① 电路中的电流为

$$I = \frac{U_s}{R_i + R_L} \quad (1-13)$$

② 电源的端电压为

$$U_1 = U_s - R_i I \quad (1-14)$$

电源的端电压总是小于电源的恒压源。这是因为电源的恒定电压  $U_s$  减去内阻电压降  $R_i$  后,才是电源的输出电压  $U_1$ 。

若忽略线路上的压降,则负载两端的电压  $U_2$  等于电源的端电压  $U_1$ ,即

$$U_2 = U_1$$

③ 电源的输出功率为

$$P_1 = U_1 I = (U_s - R_i I) I = U_s I - R_i I^2 \quad (1-15)$$

式(1-15)表明,电源的恒压源发出的功率  $U_s I$  减去电源内阻上的消耗功率  $R_i I^2$ ,才是供给负载的功率,显然,负载所吸取的功率为

$$P_2 = U_2 I = U_1 I = P_1 \quad (1-16)$$

【例 1-3】图 1-15 所示的电路可供测量电源的恒定电压  $U_s$  和内阻  $R_i$  使用。若开关 S 断开,将直流电压表接到  $U_1$  两端,测得电压值为 6V;若开关 S 闭合,该电压表的读数为 5.8V。试求当负载电阻  $R_L = 10\Omega$  时,电源的恒压源  $U_s$  和内阻  $R_i$ 。

解: 设电压  $U_2$ 、 $U_1$ 、电流  $I$  的参考方向,如图 1-15 所示。

当开关 S 断开时,因为  $I = 0$ ,所以

$$U_1 = U_s - R_i I = U_s = 6V$$

当开关 S 闭合时,电路中的电流为

$$I = \frac{U_2}{R_L} = \frac{5.8}{10} A = 0.58 A$$

$$R_i = \frac{U_s - U_2}{I} = \frac{6 - 5.8}{0.58} \Omega = 0.345 \Omega$$

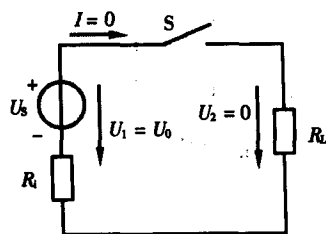


图 1-16 电路的空载状态

## 2. 空载运行状态

空载运行状态又称断路或开路状态,是电路的一个极端运行状态,当开关 S 断开或连线断开,电源和负载未构成闭合电路时,就会发生这种状态,如图 1-16 所示。这时外电路所呈现的电阻对电源来说是无穷大,此时:

① 电路中的电流为零,即  $I = 0$ 。

② 电源的端电压等于电源的恒定电压,即

$$U_0 = U_s - R_i I = U_s \quad (1-17)$$

③ 电源的输出功率  $P_1$  和负载所吸收的功率  $P_2$  均为零,即

$$P_1 = P_2 = 0 \quad (1-18)$$

### 3. 短路状态

当电源的两输出端由于某种原因(如电源线绝缘损坏,操作不慎等)相接触时,会造成电源被直接短路的情况,如图 1-17 所示,它是电路的另一个极端运行状态。

当电源短路时,外电路所呈现出的电阻可视为零,故电路具有下列特征:

① 电源中的电流为

$$I = I_s = \frac{U_s}{R_i} \quad (1-19)$$

此电流称为短路电流。在一般供电系统中,因电源的内阻  $R_i$  很小,故短路电流  $I_s$  很大。

② 因负载被短路,故电源端电压与负载电压均为零,即

$$U_1 = 0, U_2 = 0$$

也就是说电源的恒定电压与电源的内阻电压相等,方向相反,因而无输出电压。

③ 电源向负载输出的功率为

$$P_1 = 0$$

负载吸收的功率为

$$P_2 = 0$$

这时电源发出的功率将全部消耗在内阻上。这将导致电源的温度急剧上升,有可能烧毁电源或由于电流过大造成设备损坏,甚至引起火灾。为了防止此现象的发生,可在电路中接入熔断器等短路保护电器。

【例 1-4】某直流电源的额定功率  $P_N = 200\text{W}$ ,额定电压  $U_N = 50\text{V}$ ,内阻  $R_i = 0.5\Omega$ ,负载电阻  $R_L$  可以调节,如图 1-18 所示,试求:

- ① 额定状态下的电流及负载电阻;
- ② 空载状态下的电压;
- ③ 短路状态下的电流。

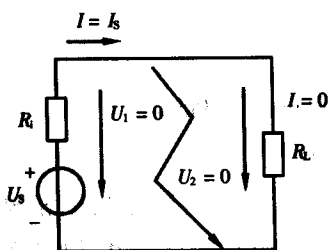


图 1-17 电路的短路状态

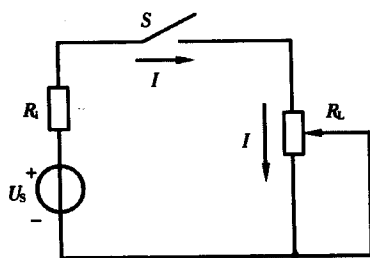


图 1-18 例 1-4 的电路图

解:① 额定电流  $I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{200}{50}\text{A} = 4\text{A}$

负载电阻  $R_L = \frac{U_N}{I_N} = \frac{50}{4}\Omega = 12.5\Omega$