

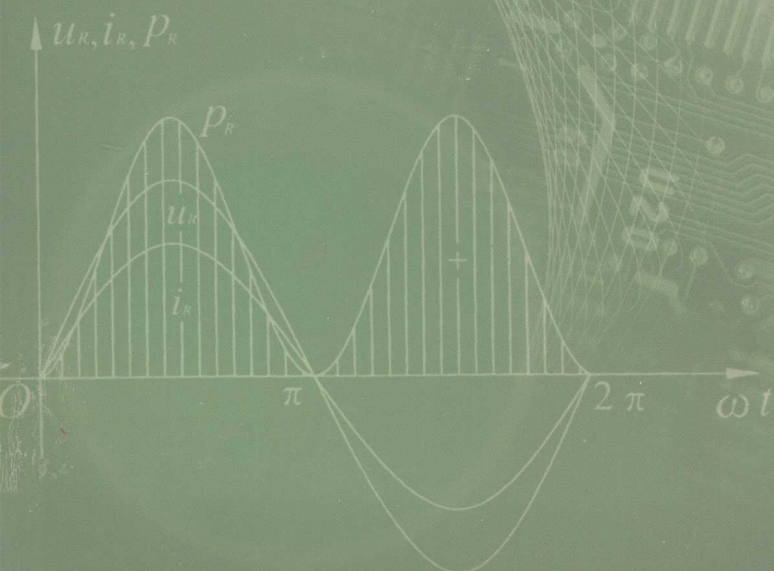
21 面向21世纪全国高职高专电子电工类规划教材

电工基础

DIANGONG JICHU

金仁贵 主 编

李蛇根 严 辉 副主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

面向 21 世纪全国高职高专电子电工类规划教材

电 工 基 础

金仁贵 主编

李蛇根 严 辉 副主编

熊婷婷 参编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是依据教育部高教司《高职高专教育基础课程教学基本要求》和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》的精神指导编写而成。

全书共分为 6 章, 内容包括: 第 1 章电路基本知识, 第 2 章电路的等效变换, 第 3 章电路的基本分析方法, 第 4 章直流电路的动态分析, 第 5 章正弦交流电路, 第 6 章耦合电感和理想变压器, 及实验和部分习题参考答案。

本书可作为高等职业院校电子、计算机、通信、电气自动化及机电类各专业课程的教材, 也可供有关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工基础/金仁贵主编. —北京: 北京大学出版社, 2005.9
(面向 21 世纪全国高职高专电子电工类规划教材)
ISBN 7-301-09520-1

I. 电… II. 金… III. 电工学 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 100060 号

书 名: 电工基础

著作责任者: 金仁贵 主编

责 任 编 辑: 韩玲玲

标 准 书 号: ISBN 7-301-09520-1/TM · 0006

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765126

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn>

电 子 信 箱: xxjs@pup.pku.edu.cn

印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×980 毫米 16 开本 9.25 印张 202 千字

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 16.00 元

前 言

本书是依据教育部高教司《高职高专教育基础课程教学基本要求》和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》的精神,在高职高专 21 世纪规划教材课题组的指导下编写而成。

本课程注重学生的素质教育,注重应用型人才能力的培养,立足于工程技术应用。内容突出主线,突出重点,删繁就简,力求做到既为学习后续课程服务,又直接服务于工程技术应用能力的培养。书中增设了实验内容,为培养学生的动手技能提供了技术平台。

全书共分为 6 章,包括电路基本知识,电路的等效变换,电路的基本分析方法,直流电路的动态分析,正弦交流电路,耦合电感和理想变压器。所有内容均简化了复杂的推导与演算,突出实用性与技能性。

本书由安徽工业经济职业技术学院副教授金仁贵担任主编,编写了第 1、6 章及附录的大部分内容,李蛇根老师担任第一副主编,编写了第 2、3、4、5 章及习题解答,熊婷婷老师参加了部分习题解答的编写,并负责全书的录入,安徽建筑工业学院严辉老师参加了第 1、6 章的编写。

全书由金仁贵老师负责统稿,李蛇根负责校对工作。

本书可作为高等职业院校电子、计算机、通信、电气自动化及机电类各专业课程的教材,也可供有关专业的工程技术人员参考。

由于编写时间较紧,加之编者水平有限,书中难免有错漏之处,敬请广大师生、读者批评指正。

编 者

2005 年 7 月

目 录

第1章 电路基本知识.....	1
1.1 电路、电路模型.....	1
1.2 电路的基本参量.....	2
1.2.1 电流和电压.....	2
1.2.2 参考方向.....	3
1.2.3 电位.....	4
1.2.4 电功率.....	4
1.3 电路的状态和电气设备的额定值.....	6
1.3.1 电路的状态.....	6
1.3.2 电气设备的额定值.....	8
1.4 理想电路元件.....	9
1.4.1 理想电源.....	9
1.4.2 理想电阻元件.....	11
1.4.3 理想电容元件.....	11
1.4.4 理想电感元件.....	12
1.5 基尔霍夫定律.....	13
1.5.1 名词术语.....	13
1.5.2 基尔霍夫电流定律 (KCL)	15
1.5.3 基尔霍夫电压定律 (KVL)	15
1.6 本章小结.....	17
第2章 电路的等效变换.....	22
2.1 网络等效.....	22
2.1.1 等效的定义.....	22
2.1.2 等效的意义.....	23
2.2 电阻网络的等效.....	23
2.2.1 电阻的串联.....	23
2.2.2 分压定理.....	24
2.2.3 电阻的并联.....	24
2.2.4 分流定理.....	25
2.2.5 电阻的混联.....	25

*2.2.6 T型网络与 Π 型网络的等效	26
2.3 实际电源模型的等效	28
2.3.1 实际电源的等效	28
2.3.2 实际电源等效时的注意事项	29
2.4 本章小结	31
第3章 电路的基本分析方法	34
3.1 独立的KCL方程和KVL方程	34
3.1.1 电路的独立性原则	34
3.1.2 $2b$ 方程法	35
3.1.3 独立的KCL方程	35
3.1.4 独立的KVL方程	35
3.2 支路电流法	36
3.2.1 支路电流法	36
3.2.2 网孔电流法	37
3.3 节点电压法	39
3.3.1 节点电压法	39
3.3.2 弥尔曼定理	40
3.4 叠加定理	41
3.4.1 叠加定理	42
3.4.2 齐次定理	42
3.5 戴维南定理	44
3.5.1 戴维南等效	44
3.5.2 戴维南定理	44
3.6 最大功率传输定理	45
3.7 本章小结	47
第4章 直流电路的动态分析	52
4.1 动态元件	52
4.1.1 电容的储能	52
4.1.2 电感的储能	53
4.2 动态电路方程的建立	54
4.2.1 方程的建立	54
4.2.2 换路定则	55
4.2.3 初始值的确定	56
4.3 RC电路的过渡过程	58
4.3.1 零输入响应	58

4.3.2 零状态响应.....	60
4.4 RL 电路的过渡过程.....	61
4.4.1 零状态响应.....	61
4.4.2 零输入响应.....	62
4.5 本章小结.....	64
第5章 正弦交流电路.....	68
5.1 正弦交流电的基本概念.....	68
5.1.1 直流电与交流电的区别.....	68
5.1.2 正弦量的三要素.....	69
5.2 正弦信号的相量表示法.....	71
5.2.1 正弦信号的表示方法.....	71
5.2.2 相量.....	72
5.2.3 正弦量的相量表示法.....	73
5.2.4 相量图.....	75
5.3 正弦电路中的电阻元件.....	75
5.3.1 电阻元件上电压与电流的关系.....	76
5.3.2 电阻元件的功率.....	76
5.4 正弦电路中的电感元件.....	78
5.4.1 电感元件上电压和电流的关系.....	78
5.4.2 电感元件的功率.....	79
5.5 正弦电路中的电容元件.....	81
5.5.1 电容元件上电压与电流的关系.....	81
5.5.2 电容元件的功率.....	83
5.6 相量形式的基尔霍夫定律.....	85
5.6.1 相量形式的基尔霍夫定律.....	85
5.6.2 相量形式的基尔霍夫电压定律.....	85
5.7 RLC 串联电路.....	88
5.7.1 电压与电流的关系.....	88
5.7.2 电路的性质.....	88
5.8 阻抗的串联与并联.....	91
5.8.1 阻抗的串联.....	92
5.8.2 阻抗的并联.....	92
5.9 电路的谐振.....	95
5.9.1 串联谐振.....	95
5.9.2 并联谐振.....	96

5.9.3 功率因数的提高	96
5.10 对称三相电路	97
5.10.1 三相电源的连接	97
5.10.2 三相对称负载的连接	99
5.11 本章小结	101
第6章 耦合电感和理想变压器	106
6.1 耦合电感元件	106
6.1.1 耦合电感的基本概念	106
6.1.2 耦合电感元件的伏安关系	108
6.2 耦合电感的去耦等效模型	109
6.2.1 耦合电感的串联等效	109
6.2.2 耦合电感的T型等效	111
6.3 理想变压器	113
6.3.1 理想变压器的伏安关系	113
6.3.2 理想变压器元件的阻抗变换性质	114
6.4 交流铁芯线圈	115
6.5 电磁铁	115
6.6 本章小结	116
附录A 实验	119
实验一 电阻器、电容器的识别与检测及万用表的使用	119
实验二 基尔霍夫定律的验证	121
实验三 叠加定理的验证	123
实验四 戴维南定理的验证	124
实验五 日光灯照明电路及功率因数的提高	127
附录B 安全用电常识	130
B.1 触电事故	130
B.2 安全用电措施	131
附录C 部分习题参考答案	133
参考文献	138

第 1 章 电路基本知识

学习提示

本章主要介绍电路的定义、组成、分类，电路中的各种电参量，电路的工作状态，常见的电路元件及其模型，电源的模型。

重点、难点：电流、电压的参考方向及其关联性，电压与电位的关系，基尔霍夫定律。

1.1 电路、电路模型

电气工程包括电力工程、通信工程、工业控制三大系统，而且还在不断地向其他领域渗透。大到各种大型的电气设备，小到各种小型电子产品，都是由不同的电路组成的。

电路是指电荷移动的路径。电路通常由若干电气元件构成，具有一定的功能。电路可以是复杂的系统，也可以是系统的一部分。为了研究方便，我们先从简单电路入手。

1. 电路的组成

电路通常由电源、负载、中间环节等组成。如图 1-1 所示。

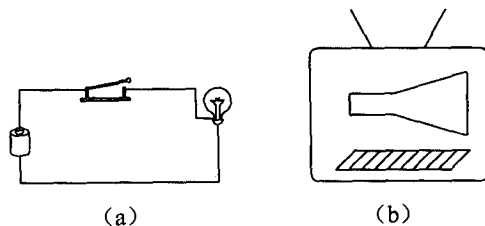


图 1-1 电路的组成

电源：为电路提供所需的电能，或为电路提供所需的信号。

负载：将电能转换成其他形式的能量，或将处理过的信号恢复出来。

中间环节：简单电路可以指导线、开关；复杂电路可以是具体的电路。例如，一台电视机中，交流电源及电视信号可称为电源，显像管以及扬声器可称为负载，其余部分则可认为是中间环节。

2. 电路的分类

电路的种类繁多, 分类方法也很多。通常可认为电路有两种类型: 一类主要以传输、转换电能为目的, 另一类主要以传递、处理信息为目的。前者常见于工厂用电或各种家用电器, 属于强电范畴, 后者常见于计算机、通信系统及各种电子产品, 属于弱电范畴。

3. 电路符号, 电路模型

在研究电路时, 人们常常使用很多电路符号来描述具体电路元件的特征及其参量, 由各种电路符号所组成的电路或电路图称为电路模型。

思 考 题

1. 电路模型和实际电路的区别是什么? 为什么电路理论中讨论的只是电路模型而不是实际电路?
2. 电路符号是自行定义, 还是采用国家标准?

1.2 电路的基本参量

电路中的电参量很多, 本节主要讨论电流、电压、电功率等。

1.2.1 电流和电压

1. 电流

带电粒子或电荷在电场力作用下的定向移动形成电流。

度量电流大小的物理量称为电流强度, 是指单位时间内通过某一横截面电荷的电量。即:

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

在国际单位制 (SI) 中, 电流的单位为安[培], 符号为 A。

$$1\text{A} = \frac{1\text{C}}{1\text{s}}$$

实际应用中, 常需要进行单位变换:

$$1\text{kA} = 10^3 \text{A}, \quad 1\text{mA} = 10^{-3} \text{A}, \quad 1\mu\text{A} = 10^{-6} \text{A}$$

2. 电压

在电场中，两点之间的电势差称为电压或电压降。电场的方向是电势降落梯度最大的方向。带电粒子在电场中移动时电场力做功。

电场力把单位正电荷由 a 点移到 b 点所做的功在数值上等于 a 、 b 两点之间的电压。即：

$$U_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1-2)$$

在国际单位制 (SI) 中，电压的单位为伏[特]，符号为 V。

$$1\text{V} = \frac{1\text{J}}{1\text{C}}$$

实际应用中，常需要进行单位变换：

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}, \quad 1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}, \quad 1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$$

1.2.2 参考方向

电流总是有一定方向性的，通常规定正电荷的移动方向为电流的正方向，且一般情况下，对外电路而言，电流总是由电势高处流向电势低处，在电源内部则由低电势处流向高电势处。

电流的方向常用带箭头的直线表示。

电压的方向常用一对正、负号表示其极性，“+”表示高电势，“-”表示低电势。如图 1-2 所示。

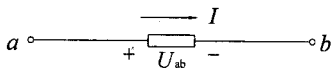


图 1-2 电压和电流的参考方向

在进行电路分析时，往往很难预先知道电路中电压与电流的实际方向，不妨先假设电压与电流的方向作为参考方向，待求解出真实结果后再确定其实际方向。

例 1-1 求图 1-3 中各电参量的实际方向。

解：(a) $I = 2\text{A} > 0$ ，说明实际电流方向由 a 流向 b ；

$U = -5\text{V} < 0$ ，说明实际电压极性 b 高， a 低。

(b) $I = -1\text{A} < 0$ ，说明实际电流方向由 d 流向 c ；

$U = 2\text{V} > 0$ ，说明实际电压极性 c 高， d 低。

实际分析电路时，常常不区分参考方向和实际方向，将标注于电路图中的方向统称为参考方向。

为了方便分析，常选定同一元件的电流参考方向与电压参考方向一致，即电流从“+”端流向“-”端，这样的参考方向称为关联参考方向。如图 1-3 所示。

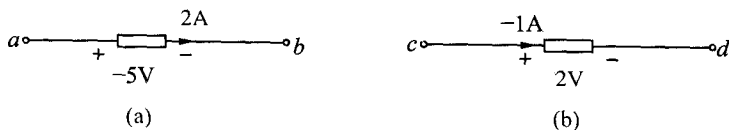


图 1-3 电路图

1.2.3 电位

在电路中任取一点为参考点, 则 a 点到参考点的电压称为 a 点的电位, 记为 V_a 。

工程上常选择大地、设备的外壳作为参考点, 用“ $\perp$ ”表示, 并规定参考点的电位为 0。

a, b 两点之间的电压等于这两点之间的电位差, 即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-3)$$

电位是相对的, 随参考点的改变而改变。电压是绝对的, 不随参考点的改变而改变。在 SI 制中, 电位的单位与电压相同, 也是伏[特], 符号为 V。

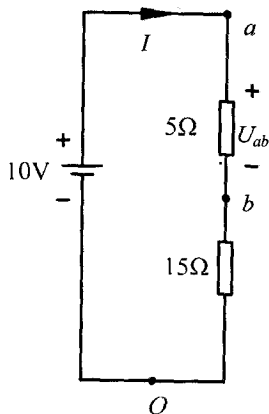


图 1-4 电路图

例 1-2 电路如图 1-4, 若以 O 点为参考点, 求 U_{ab} , V_a , V_b ; 若以 b 点为参考点, 求 U_{ab} , V_a , V_b 。

解: 设电流、电压参考方向如图, 根据欧姆定律, 得

$$I = \frac{10}{5+15} = 0.5(\text{A})$$

$$\text{所以 } U_{ab} = 5I = 5 \times 0.5 = 2.5(\text{V})$$

$$U_{ao} = 10(\text{V}), \quad U_{bo} = 15 \times 0.5 = 7.5(\text{V})$$

若以 O 点为参考点, 则 $V_o = 0(\text{V})$

$$V_a = U_{ao} + V_o = 10 + 0 = 10(\text{V})$$

$$V_b = U_{bo} + V_o = 7.5 + 0 = 7.5(\text{V})$$

若以 b 点为参考点, 则 $V_b = 0(\text{V})$

$$V_a = U_{ab} + V_b = 2.5 + 0 = 2.5(\text{V})$$

1.2.4 电功率

电流通过用电器时, 电流要对用电器做功, 即消耗电源的电能。单位时间内电流所做的功称为电功率, 即

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (1-4)$$

在 SI 制中, 功率的单位是瓦[特], 符号为 W。

$$1\text{W} = \frac{1\text{J}}{1\text{s}}$$

工程上常用的功率单位还有 kW, mW 等。

由于

$$u = \frac{dW}{dq}, \quad i = \frac{dq}{dt}$$

所以

$$p = u \cdot i \quad (1-5)$$

对于电源而言, 通常会向电路提供电能, 也称为释放功率。对于负载而言, 通常会从电路中吸收或消耗电能, 也称为吸收功率。那么如何确定电路元件是吸收电功率, 还是释放电功率呢?

在运用 (1-5) 式进行计算时, 通常应在关联参考方向下进行。若 u 与 i 的参考方向不关联, 则计算时应添加负号。当计算结果 $p > 0$ 时, 表明元件吸收电功率; 当计算结果 $p < 0$ 时, 表明元件释放电功率。

例 1-3 计算图 1-5 中各元件的功率, 说明是吸收功率, 还是释放功率。

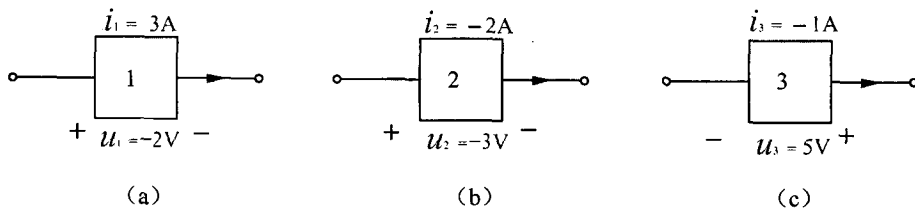


图 1-5 电路图

解: 图中 (a), (b) 的参考方向关联, (c) 的参考方向不关联。

$$p_1 = u_1 \cdot i_1 = (-2) \times 3 = -6(\text{W}) < 0$$

$$p_2 = u_2 \cdot i_2 = (-3) \times (-2) = 6(\text{W}) > 0$$

$$p_3 = -u_3 \cdot i_3 = -5 \times (-1) = 5(\text{W}) > 0$$

元件 (1) 释放功率, 元件 (2), (3) 均吸收功率。

思考题

1. 电路中电位相等的各点, 如果用导线接通, 对电路其他部分有无影响?
2. 电路中导线连接的各点电位是相等的, 如果把导线断开, 对电路其他部分有无影响?
3. 在用电流表或电压表测量电流或电压时, 为何要注意表笔的极性?

1.3 电路的状态和电气设备的额定值

1.3.1 电路的状态

电路在工作时,按照其提供的电流大小,可分为通路、断路和短路。按照其提供的功率大小,可分为满载、空载和过载。

1. 负载状态

负载是电路中的常用元件,负载状态则是一般的有载工作状态,如图 1-6 所示,此时电路有以下特征:

(1) 电路中电流为

$$I = \frac{U_s}{R_0 + R_L} \quad (1-6)$$

R_0 为电源内阻, R_L 为负载电阻。

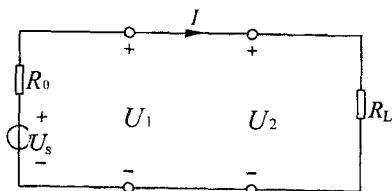


图 1-6 有载工作状态

(2) 电源的端电压为

$$U_1 = U_s - R_0 \cdot I \quad (1-7)$$

电源的端电压总是小于电源的电动势。

(3) 电源输出的功率为

$$\begin{aligned} P_1 &= U_1 \cdot I = (U_s - R_0 \cdot I) \cdot I = U_s \cdot I - R_0 \cdot I^2 \\ P_2 &= U_2 \cdot I = R_L \cdot I^2 \end{aligned} \quad (1-8)$$

电源发出的功率减去内阻消耗的功率等于负载获得的功率。

在电路中,负载电阻 R_L 越小,电路中电流越大。输出的功率也越大,这种情况叫做负载增大。显然,所谓负载大小指的是负载电流或功率的大小,而不是电阻阻值的大小。

2. 断路状态

当电路中开关断开时,称为断路状态,或开路状态,此时又称为空载。空载时,外电路所呈现的电阻可视为无穷大。如图 1-7 所示,此时电路有以下特征:

(1) 电路中电流为零

$$I = 0$$

(2) 电源的端电压等于电源电动势

$$U_1 = U_s - R_0 \cdot I = U_s$$

$$U_2 = R_L \cdot I = 0$$

(3) 电源输出的功率为

$$P_1 = U_1 \cdot I = 0$$

$$P_2 = U_2 \cdot I = 0 \quad (\text{负载吸收的功率为零})$$

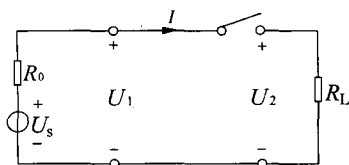


图 1-7 电路图

3. 短路状态

当电源的两个输出端钮由于某种原因(如电源线绝缘损坏,或操作不慎等)相接触时,会造成电源被直接短路的情况。当电源直接短路时,外电路所呈现的电阻可视为零。如图 1-8 所示,此时电路有以下特征:

(1) 电路中电流最大,外电路电流为零

$$I_0 = \frac{U_s}{R_0}, \quad I_L = 0$$

此电流称为短路电流。一般电源的内阻 R_0 都很小,故短路电流 I_0 很大,对电源很不利。

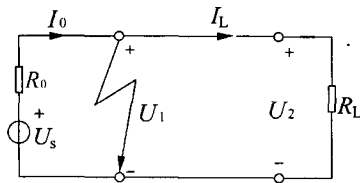


图 1-8 电路图

(2) 电源的端电压与负载的端电压均为零

$$U_1 = U_s - R_0 \cdot I = 0, \quad U_2 = 0$$

(3) 电源对外输出的功率 P_1 和负载所吸收的功率 P_2 均为零。这时电源所发出的功率全部消耗在电源的内阻上

$$P_1 = U_1 \cdot I = 0, \quad P_2 = U_2 \cdot I = 0, \quad P_{U_s} = U_s \cdot I_0 = \frac{U_s^2}{R_0}$$

这种短路现象, 会使电源内部迅速产生很大的热量, 导致电源的温度迅速上升, 有可能烧毁电源及其他设备, 甚至引起火灾。电源的短路通常是一种严重的事故, 应尽量避免。实际应用中通常在电源的输出端安装熔断器, 以保护电源不致损坏。

1.3.2 电气设备的额定值

在实际电路中, 所有电气设备和元器件在工作时都有一定的使用限额, 这种限额称为额定值。额定值是制造商综合考虑产品的性能, 使用的可靠性、经济性, 以及使用寿命等因素而制定的, 它是使用者使用电气设备和元器件的依据。例如, 灯泡上标注的 220V/100W 就是指额定电压和额定功率。该灯泡在 220V 电压下才能正常工作, 这时消耗的功率是 100W。如果使用值超过额定值较多, 会导致电气设备和元器件损伤, 影响寿命, 甚至会烧毁; 如果使用值低于额定值较多, 则不能正常工作, 有时也会造成设备损坏。

额定值用带下标“N”的字母表示, 如 U_N , I_N 或 P_N 。

当电气设备的实际电流、电压或功率等于或超过额定值时, 电气设备的工作状态称为过载状态, 严重的过载现象会导致短路。

当电气设备的实际电流、电压或功率比额定值小很多时, 电气设备工作在欠载状态, 过度欠载相当于空载。

例 1-4 某直流电源的额定功率是 20W, 额定电压为 5V, 内阻为 0.1Ω , 负载电阻可以调节, 如图 1-9。试求:

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

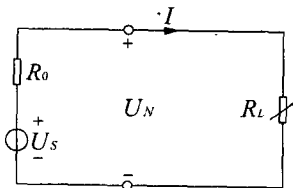


图 1-9 电路图

解: 额定电流: $I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{20}{5} = 4(\text{A})$

负载电阻: $R_L = \frac{U_N}{I_N} = \frac{5}{4} = 1.25(\Omega)$

满载电压: $U_s = (R_0 + R_L) \times I = (0.1 + 1.25) \times 4 = 5.4(\text{V})$

$$\text{短路电流: } I_0 = \frac{U_s}{R_0} = \frac{5.4}{0.1} = 54(\text{A})$$

$$\text{短路电流是额定电流的: } \frac{I_0}{I_N} = \frac{54}{4} = 13.5 \text{ (倍)}$$

若电源不采取措施, 发生短路后, 电源将会烧毁。

思考题

1. 什么是电路的开路状态, 短路状态, 空载、满载、过载状态?
2. 电气设备的额定值的含义是什么?
3. 一个正在工作的负载, 如果因为某种事故而使其与电源相接的两条导线发生短路, 试问会产生什么后果? 如果保护电源的熔断器被烧断, 电源和负载会被烧毁吗?

1.4 理想电路元件

理想电路元件又称为线性电路元件, 是指描述元件的电器参数不随外界因素(如温度、压力、电流、电压等)的变化而变化, 是一种抽象的模型。

1.4.1 理想电源

理想电源具备以下的特征:

- (1) 具有无穷的能量。
- (2) 电源内部没有任何损耗。
- (3) 其表征的参数不随外界因素的变化而改变。

1. 理想电压源

理想电压源的模型及外特性曲线如图 1-10 所示。

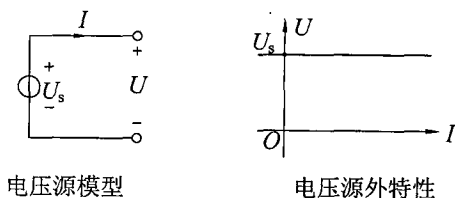


图 1-10