

电子电源技术与应用

第2版

张乃国 编著

DIANZI DIANYUAN JISHU YU YINGYONG



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电子电源技术与应用

第2版

张乃国 编著



机械工业出版社

本书从实际应用出发,前五章简明归纳了电子电源设备中常用的电工技术、电子技术、电源技术、自动控制原理及电磁兼容性五个方面的基础知识,以内容提要、基本概念、扩展应用、计算举例及图表等方式进行阐述,以便于读者阅读。另外,第2版中还增加了第6章典型电子电源产品的原理与应用方面的内容。

本书可供在大中专院校学习过电工学、电子学等课程,现在从事电子电源设备研发、生产、营销及媒体宣传等有关技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电子电源技术与应用/张乃国编著. —2版. —北京:机械工业出版社, 2010.5

ISBN 978-7-111-30527-9

I. ①电… II. ①张… III. ①电源-技术 IV. ①TM91

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第077020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:徐明煜 责任编辑:王欢

责任校对:吴美英 封面设计:陈沛

责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2010年6月第2版·第1次印刷

184mm×260mm·20.25印张·496千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-30527-9

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

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

第 2 版前言

本书第 1 版自 2007 年 5 月出版以来，收到了许多读者的邮件及电话，感谢读者对本人的鼓励。有的学校或企业选用此书作为教材和教学参考书，欢迎这些读者和单位把意见反馈给我（可利用书后所附“读者意见反馈表”），我将尽力提供帮助。本书第 1 版早已售罄，本人留存的几十册也悉数赠送。应出版社的要求决定出版第 2 版，在原书基础上增补第 6 章——典型电子电源产品的原理与应用，以突出本书的实用性，有利于相关读者阅读。为第 6 章提供资料的有江伟石、李建明、耿文良、林金水、范延勇、李波等，他们都是业内著名生产厂商（即文中所用相关产品之生产厂商）的高级技术人员，在这里对他们给予的支持表示衷心的感谢。另外，前 5 章内容也作了部分修改，但基本不变。

谢谢诸位读者。

作者 张乃国

2010 年 5 月于清华大学

E-mail: zhangng@tsinghua.edu.cn

第 1 版前言

本书的读者对象是从事以电子技术构成电源（电力电子）设备研发、生产、营销及媒体宣传等有关的技术人员，在大中专院校学过电子技术或自动控制专业的学生，并已具有一定实践经验的电源技术工作者。我想利用本书前言这个地方给读者写一封短信。

诸位同仁：

我自 1962 年开始在清华大学自动化系电子学教研室从事模拟电子技术、数字电子技术、功率电子技术、电子测量技术及有关电磁兼容和自动控制原理等课程的教学和科研工作已整整 35 年。你们在学校曾经学习过这些课程，可能已经淡忘了，实际上，这些基础知识是很有用的。我想把这些课程中具有实用价值的重点内容整理出来，以内容提要、基本概念、扩展应用、计算举例及图表等方式进行阐述，让你们读起来具有简明实用和重点突出的感觉。这样在你的案头就不用放置上述那么多多种教科书，只有在进一步研究或撰写文章时再查阅有关科技图书就可以了。

本书共五章，从电工技术、电子技术、电源技术、自动控制原理及电磁兼容性五个方面进行归纳整理，尽量减小篇幅，力求简明以便读者携带和查阅。如果你阅读此书能够回顾过去所学知识并引出新的思路，那么编写本书的目的就达到了。

作者在退休后曾在《电源技术应用》及《UPS 应用》两杂志社担任多年主编工作，本书在编写过程中得到上述刊物编辑部的大力支持，特别是得到责任编辑徐红志同志及排版员杨丽霞女士的帮助，为本书的稿件整理及绘图等方面做了大量工作。另外，对本书各章所列参考文献的作者也一并表示衷心的感谢。

作者在编写此书时恰逢七十周岁，谨以此书献给曾经指导过我的老师和支持过我的朋友。

由于作者水平及选材的局限，难免有疏漏之处，恳请广大读者指正。

感谢您花费时间阅读此书，希望您指出书中的错误，作者将及时修正，以免贻误他人。

作者 张乃国

2007 年 1 月于清华大学

E-mail: zhangng@tsinghua.edu.cn

目 录

第2版前言

第1版前言

第1章 电工技术基础知识	1
1.1 直流电路	1
1.1.1 欧姆定律仅适用于线性电路	1
1.1.2 负载消耗的功率与电源内阻消耗的功率	2
1.1.3 注意负载与电源之间的匹配	3
1.1.4 电源的等效变换	4
1.1.5 分析线性电路的响应与激励时采用叠加原理	5
1.1.6 分析有源线性二端网络时采用戴维南定理	6
1.2 单相正弦交流电路	7
1.2.1 正弦交流电的三要素、相位差及有效值	7
1.2.2 运算同频正弦量时采用复数符号法	8
1.2.3 描述同频正弦量之间关系时采用相量图	9
1.2.4 R 、 L 、 C 电路的正弦稳态特性	10
1.2.5 R 、 L 、 C 电路的复数阻抗	11
1.2.6 正弦电路的功率与功率因数	12
1.2.7 提高感性负载功率因数的方法	13
1.3 三相正弦交流电路	14
1.4 非正弦电路的电流与功率	17
1.4.1 非正弦周期电流及其平均值和有效值	17
1.4.2 非正弦周期电流电路的功率与功率因数	20
参考文献	21
第2章 电子技术基础知识	22
2.1 模拟电子技术（负反馈电路）	22
2.1.1 负反馈电路的结构	22
2.1.2 负反馈电路的组态	23
2.2 模拟电子技术（运算电路）	27
2.2.1 基本运算电路	28
2.2.2 对数与指数运算电路	32
2.2.3 模拟乘法器的应用	34
2.3 数字电子技术（组合逻辑电路）	36
2.3.1 门电路与触发器的特性	37
2.3.2 组合逻辑电路要点	45

2.4 数字电子技术(时序逻辑电路)	48
2.4.1 时序逻辑电路要点	48
2.4.2 脉冲信号的整形与产生电路	50
2.4.3 D/A 与 A/D 转换电路	53
参考文献	57
第3章 电源技术基础知识	58
3.1 概述	58
3.1.1 电源技术的分类与应用	58
3.1.2 电源技术的基本内容	59
3.1.3 电源系统的组成	60
3.2 AC/DC 变换技术	61
3.2.1 不可控型整流电路	61
3.2.2 可控型整流电路	65
3.2.3 电容滤波电路	69
3.3 DC/AC、DC/DC、AC/AC 变换技术	71
3.3.1 DC/AC 变换技术	71
3.3.2 DC/DC 变换技术	76
3.3.3 AC/AC 变换技术	79
3.4 直流稳压电路	80
3.4.1 直流稳压电源的种类	80
3.4.2 直流线性稳压电路	81
3.4.3 集成稳压器	83
3.4.4 高频开关电源	85
3.4.5 源侧功率因数校正技术	89
3.5 脉冲频率调制(PFM)型直流稳压电路实例	92
3.5.1 脉冲频率调制型直流稳压电路的特点	92
3.5.2 电路工作原理	93
3.5.3 电路工作过程分析	94
3.5.4 主要器件的参数选择	97
3.6 脉冲宽度调制(PWM)型直流稳压电路实例	98
3.6.1 48V、20A AC/DC 电路工作原理	99
3.6.2 220V、5A AC/DC 电路工作原理	103
3.7 有源功率因数校正电路实例	104
3.7.1 校正输入功率因数的意义	104
3.7.2 电路工作原理	104
3.8 交流稳压电路	108
3.8.1 交流稳压电源的种类	108
3.8.2 交流稳压电源的主要技术指标	110
3.8.3 交流稳压电源主要类型的工作原理	113

3.8.4 交流稳压电源的选用方法	117
3.9 净化型交流稳压电源实例	119
3.9.1 净化型交流稳压电源工作原理	119
3.9.2 尖峰干扰模拟器	121
3.10 不间断电源 (UPS)	122
3.10.1 UPS 的分类及主要技术指标	122
3.10.2 UPS 的电路结构	127
3.10.3 各种类型 UPS 的特点	134
3.11 应急电源 (EPS)	143
参考文献	148
第4章 自动控制原理基础知识	149
4.1 自动控制系统	149
4.1.1 自控与自控系统	149
4.1.2 自控系统的类型	152
4.1.3 对自控系统的要求	152
4.2 自动控制系统的数学模型	154
4.2.1 数学模型概述	154
4.2.2 系统微分方程的建立	155
4.2.3 传递函数的要点	157
4.2.4 典型环节及传递函数	160
4.2.5 系统的结构图及传递函数	164
4.3 自动控制系统的分析要点	165
4.3.1 稳态误差的概念	165
4.3.2 稳定性与瞬态质量	167
4.3.3 系统的模拟技术	168
4.3.4 其他控制理论概述	169
4.4 应用举例 (1) ——直流调压系统	170
4.4.1 电路组成	170
4.4.2 反馈控制	171
4.4.3 开环特性	171
4.4.4 闭环特性	172
4.4.5 稳压精度与开环放大倍数	174
4.4.6 微分负反馈	175
4.5 应用举例 (2) ——直流电动机调速系统	175
4.5.1 直流电动机负载的特点	176
4.5.2 直流电动机调速的基本原理	177
4.5.3 调速系统的组成	178
4.5.4 调速系统的动态特性	181
参考文献	183

第5章 电磁兼容技术基础知识	184
5.1 电源系统的干扰与危害	184
5.1.1 概述	184
5.1.2 电源系统的组成	185
5.1.3 计算机供电系统对电磁兼容性的要求	185
5.1.4 干扰的种类及产生机理	187
5.1.5 电源干扰及其危害	190
5.2 常用抗干扰技术	193
5.2.1 滤波技术	193
5.2.2 屏蔽技术	200
5.2.3 隔离技术	204
5.2.4 接地技术	207
5.3 有源谐波调节技术	209
5.3.1 并联型有源谐波调节器	209
5.3.2 串联型有源谐波调节器	210
5.3.3 混合型有源谐波调节器	210
5.4 高频开关电源的干扰及其抑制	212
5.4.1 干扰来源及抑制措施	212
5.4.2 开关电源产生电磁辐射干扰的原因	215
5.4.3 开关电源电磁干扰的抑制方法	218
5.5 交直流电路的干扰及其抑制	221
5.5.1 稳压变压器的双向抗干扰功能	221
5.5.2 净化型交流稳压电源的抗干扰功能	222
5.5.3 通断感性负载时瞬变干扰的抑制	223
5.5.4 通断容性负载时瞬变干扰的抑制	229
5.5.5 晶闸管及其触发电路的抗干扰措施	230
参考文献	235
第6章 典型电子电源产品的原理与应用	236
6.1 高频变换模块型直流通信电源	236
6.1.1 生产厂商及产品名称	236
6.1.2 产品特点	236
6.1.3 工作原理	236
6.1.4 外观及面板构成	238
6.1.5 技术参数	238
6.1.6 应用场合	241
6.2 交流净化型稳压电源	241
6.2.1 生产厂商及产品名称	241
6.2.2 交流净化型稳压电源在实际应用中的问题	241
6.2.3 大功率交流净化型稳压电源与空载电流的自动补偿技术	243

6.2.4 大功率交流净化型稳压电源的应用实例	245
6.3 节能型智能照明电源	246
6.3.1 生产厂商及产品名称	246
6.3.2 照明电源的特点	246
6.3.3 节能型照明电源的工作原理	246
6.3.4 ILUEST 智能照明调控装置的节能效果	251
6.3.5 ILUEST 智能照明调控装置的安装方法	251
6.3.6 ILUEST 智能照明调控装置的主要技术参数	252
6.4 大功率并联型 UPS 供电系统	253
6.4.1 生产厂商及产品名称	253
6.4.2 大功率 UPS 工作原理	253
6.4.3 大功率 UPS 并机技术	255
6.4.4 并机系统的可靠性分析	259
6.4.5 提高大功率 UPS 供电系统可靠性的措施	261
6.4.6 大功率 UPS 应用实例	263
6.4.7 科华公司专业加强型三进三出 FR-UK 系列 UPS 主要技术指标	266
6.5 应急电源 (一)	267
6.5.1 生产厂商及产品名称	267
6.5.2 应急电源 (EPS) 概述	267
6.5.3 单相通用型应急电源的原理及应用	269
6.5.4 三相通用型应急电源的原理及应用	272
6.5.5 三相动力专用型应急电源的原理及应用	274
6.6 应急电源 (二)	277
6.6.1 生产厂商及产品名称	277
6.6.2 应急电源的工作原理	277
6.6.3 应急电源的工作方式及切换时间	278
6.6.4 EPS 主机功能要求及电路结构	282
6.6.5 逆变器工作原理	283
6.6.6 电池管理及电池检测模块	285
6.6.7 应急电源的应用	288
6.6.8 应急电源功率的选取	291
6.7 有源电力滤波器	292
6.7.1 生产厂商及产品名称	292
6.7.2 选用有源电力滤波器的优势和意义	292
6.7.3 APF 工作原理	293
6.7.4 APF 节电作用的分析	295
6.7.5 APF 的选用	297
6.7.6 APF 的安装	298
6.7.7 APF 的主要技术指标	299

6.7.8 APF 的应用实例	300
6.7.9 结束语	300
6.8 高速动态消谐型无功补偿器	303
6.8.1 生产厂商及产品名称	303
6.8.2 概述	303
6.8.3 工作原理	303
6.8.4 主要技术特点	304
6.8.5 主要技术指标	307
6.8.6 应用实例	307
参考文献	308

第 1 章 电工技术基础知识

1.1 直流电路

本节提要：电工学是电源技术的知识基础，而直流电路又是电工学的理论基础。欧姆定律、叠加原理、戴维南定理等是解决直流电路问题必须掌握的基本概念。等效变换、负载如何获得最大功率等也是应当熟悉的。

名词解释

电路：电流可在其中流通的由导线连接的元器件组合。电路是电力系统、控制系统、通信系统及计算机系统的主要组成部分，起着电能和电信号的产生、传输、转换、控制、处理和储存等作用。供给电能的设备称为“电源”，用电的设备称为“负载”（电力上称“负荷”）。

直流：方向和量值不随时间变化的电流。例如用蓄电池对白炽灯供电时，电路中的电流就是直流，如图 1-1a 所示。引申之，可指以直流分量为主的电流，例如由整流器输出的电流，如图 1-1b 所示。

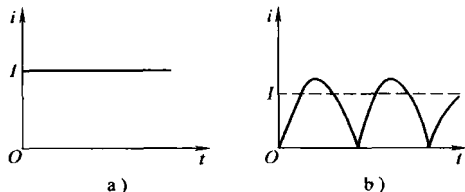


图 1-1 直流

直流电路：指电压和电流不随时间变化的电路，或者说是由非时变独立电源（即直流电源）供电的非时变电路。

1.1.1 欧姆定律仅适用于线性电路

1. 基本概念

在一线性电阻 R 中流动的电流 I ，与此电阻 R 两端的电压 U 成正比，即

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-1)$$

电路如图 1-2 所示。

由式 (1-1) 可知，在 U 、 I 、 R 三个物理量之中，任知其二，便可求出另一个。

式 (1-1) 与图 1-2 表示的欧姆定律系稳态直流电路的情形。

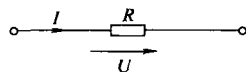


图 1-2 欧姆定律
(U 、 I 关联方向)

2. 注意事项

(1) 使用欧姆定律进行计算时，必须注意电压与电流的参考方向，即式 (1-1) 是在电压与电流为关联方向（见图 1-2）时才成立。否则，若电压与电流方向相反，则在欧姆定律表达式的左边或右边须加上负号。仍以直流电路为例，则为

$$U = -IR \quad (1-2)$$

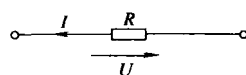


图 1-3 欧姆定律
(U 、 I 非关联方向)

其相应电路如图 1-3 所示。

(2) 欧姆定律仅适用于线性电阻（对于交流电路则指线性阻抗）构成的线性电路，对于非线性电路则需以伏安特性等关系进行描述。

3. 计算举例

【例 1-1】 已知图 1-4a 和 b 所示电路中电阻 R 均为 10Ω ，电流 I 为 $5A$ ， U 与 I 的参考方向如图中所示。试求 $U = ?$

解

(1) 图 1-4a 所示电路中， U 与 I 的参考方向一致，可用式 (1-1) 计算

$$U = IR = 5A \times 10\Omega = 50V$$

U 的得数为正值，说明其实际方向与所设参考方向一致。

(2) 图 1-4b 所示电路中， U 与 I 的参考方向相反，即非关联方向，应采用式 (1-2) 计算

$$U = -IR = -5A \times 10\Omega = -50V$$

U 的得数为负，说明其实际方向与所设参考方向相反。

4. 名词解释

线性电阻、电感、电容：线性电阻是指所流电流 I 与其端电压 U 成正比的电阻，或依其所流电流 I 与端电压 U 的关系而作出的伏安特性为一条过零点的直线，如图 1-5 所示。反之，若此伏安特性为曲线，则为非线性电阻。

同理，若磁通与电流的关系或电压与电荷的关系为过零点的直线时，则分别称为线性电感或线性电容。否则，则为非线性电感或电容。

对于非线性电阻、电感、电容构成的电路，不能用欧姆定律直接进行解析计算。

稳态与暂态：当含有 L 、 C 储能元件的电路由于电路结构、电路参数或电源参数突然变化时，将由一个稳定状态（简称稳态）变化到另一个稳态，其中间过程即为暂态或过渡过程。

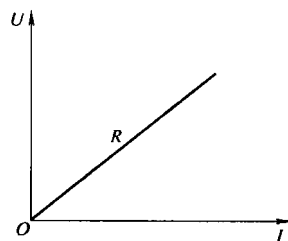


图 1-5 线性电阻的伏安特性

1.1.2 负载消耗的功率与电源内阻消耗的功率

1. 基本概念

设有一段电路如图 1-6 所示，不论其结构如何，也不论其内部有无电源，若其端电压为 U ，通过的电流为 I ，则此电路所消耗的电功率为

$$P = UI \quad (1-3)$$

若图 1-6 所示电路由纯电阻 R 构成，则因 $U = IR$ ，故式 (1-3) 又可表示为

$$P = I^2 R \quad (1-4)$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (1-5)$$

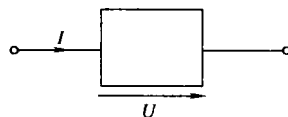


图 1-6 一段电路

2. 注意事项

电功率 $P = UI$ 的含义与 U 、 I 的参考方向有关, 即 $P = UI$ 为电路所吸收的功率, 是在 U 与 I 的方向相同, 即关联方向的条件下, 如图 1-6 所示。此时若 $P > 0$, 电路吸收功率; 若 $P < 0$, 则电路发出功率。反之, 若 U 与 I 的参考方向相反, 仍用 $P = UI$, 则 $P > 0$ 与 $P < 0$ 的含义就与上述相反。

3. 计算举例

【例 1-2】有一个电动势 $E = 12\text{V}$ 、内阻 $R_0 = 1\Omega$ 的电源, 向负载 R 供电, 负载的端电压 $U = 10.5\text{V}$, 如图 1-7 所示。问电源发出的功率 P_E 、负载吸收 (即 R 消耗) 的功率 P 及内阻消耗的功率 P_{R_0} 各是多少?

解 设图中 U 、 I 参考方向相同, 电路中的电流 I 为

$$I = \frac{E - U}{R_0} = \frac{(12 - 10.5)\text{V}}{1\Omega} = 1.5\text{A}$$

考虑到电源端电压与电流方向相反 (或电动势 E 与电流 I 方向相同), 故电源发出功率

$$P_E = EI = 12\text{V} \times 1.5\text{A} = 18\text{W}$$

图 1-7 例 1-2 用图

而负载端电压 U 与电流 I 为关联方向, 故负载吸收 (即 R 消耗) 的功率

$$P = UI = 10.5\text{V} \times 1.5\text{A} = 15.75\text{W}$$

同理, 电源内阻消耗的功率

$$P_{R_0} = I^2 R_0 = (1.5\text{A})^2 \times 1\Omega = 2.25\text{W}$$

或

$$P_{R_0} = P_E - P = 18\text{W} - 15.75\text{W} = 2.25\text{W}$$

1.1.3 注意负载与电源之间的匹配

1. 基本概念

设由给定电源或信号源 (其电动势为 E_s 、内阻为 R_s) 向负载 R_L 供电的电路, 如图 1-8 所示。当 E_s 及 R_s 不变, 而 R_L 变化时, 电流 I 及 R_L 吸收 (消耗) 的功率 P_L 将随之改变。而当

$$R_L = R_s \quad (1-6)$$

时, 称为负载与电源之间达到了“匹配”, 此时负载获得最大功率

$$P_{L\max} = \frac{E_s^2}{4R_s} \quad (1-7)$$

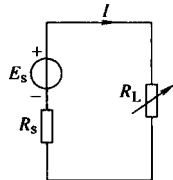


图 1-8 电源向负载 R_L 传输功率

2. 计算举例

【例 1-3】某电源的开路电压为 120V , 短路电流为 2A , 若以此电源向负载电阻 R_L 供电, 问在何条件下 R_L 可获得最大功率 $P_{L\max}$, 其数值等于多少?

解 电源的开路电压等于其电动势, 即 $E = 120\text{V}$ 。而短路电流 $I_s = E/R_s$, 故

$$R_s = \frac{E}{I_s} = \frac{120\text{V}}{2\text{A}} = 60\Omega$$

根据式 (1-6) 及式 (1-7) 可知, 当

$$R_L = R_s = 60\Omega$$

时, 可有

$$P_{L\max} = \frac{E^2}{4R_s} = \frac{(120\text{V})^2}{4 \times 60\Omega} = 60\text{W}$$

即负载可获得的最大功率为 60W。

1.1.4 电源的等效变换

1. 基本概念

电源可以分为电压源与电流源。实际电压源的符号如图 1-9 点划线框内所示, 其中 U_s 为电源的开路电压 (等于其电动势), R_s 为其内阻。实际电流源的符号如图 1-10 点划线框内所示, 其中 I_s 为电流源电流 (等于其短路电流), G_s 为其内电导。

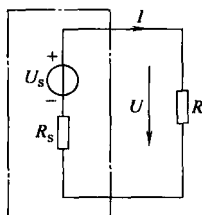


图 1-9 实际电压源电路

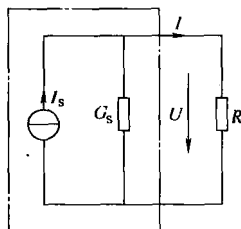


图 1-10 实际电流源电路

比较图 1-9 与图 1-10 所示电路可知, 若对外电路负载 R 而言其 U 、 I 不变, 则此两种电源电路互为等效, 条件为

$$\left. \begin{aligned} I_s &= \frac{U_s}{R_s} \\ G_s &= \frac{1}{R_s} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

2. 扩展应用

除电源外, 图 1-9、图 1-10 及式 (1-8) 对信号源 (如传感器输出) 亦适用。

3. 注意事项

(1) U_s 与 I_s 的方向关系为: 电压源电压方向应使其流出的电流与等效变换为电流源的电流方向一致, 或电流源的电流方向应与其等效变换为电压源流出的电流方向一致。

(2) 理想电压源的特性是电压恒定, 电流可为任意值 (由外电路决定); 理想电流源的特性是电流恒定, 电压可为任意值 (由外电路决定)。

4. 计算举例

【例 1-4】图 1-11 表示某有源二端网络 (方框内部分) 对负载 R_L 供电的电路。通过测量得知, 当负载电流 I 为 10A 时, 端电压 U 为 220V; 负载端开路时, 空载电压 $U_{oc} = 225\text{V}$ 。试给出此有源二端网络的等效电压源电路和等效电流源电路。

解

(1) 等效电压源电路如图 1-12a 所示。因空载时 $U_s = U_{oc} = 225\text{V}$, 有负载时 $U = U_s - IR_s = 225\text{V} - 10\text{A} \times R_s = 220\text{V}$, 故 $R_s = 0.5\Omega$ 。

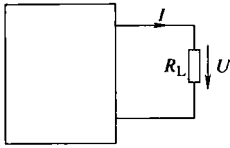


图 1-11 例 1-4 用图

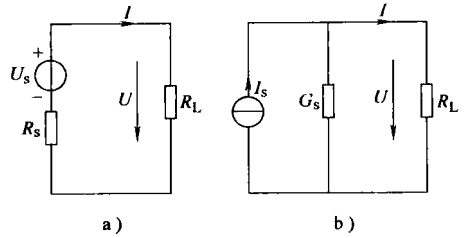


图 1-12 例 1-4 解用图

(2) 等效电流源电路如图 1-12b 所示。图中

$$I_s = \frac{U_s}{R_s} = \frac{225\text{V}}{0.5\Omega} = 450\text{A}$$

$$G_s = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{0.5\Omega} = 2\text{S (西门子)}$$

1.1.5 分析线性电路的响应与激励时采用叠加原理

1. 基本概念

线性电路中，在各激励（电压源或电流源）共同作用下，任一支路的响应（支路的电流或电压）等于各激励单独作用该支路时所得响应的代数和。

2. 扩展应用

叠加原理是对线性电路普遍适用的原理，不论是直流或交流、稳态或动态电路，只要是线性的，皆可用叠加原理进行分析。

3. 注意事项

(1) 上述“各激励单独作用时”是指仅有一个激励作用，其余激励不作用，即要“除源”：对理想电压源要将电源去掉后短路，对理想电流源要将其开路。

(2) 叠加原理仅适用于线性电路中分析具有线性函数的响应与激励的关系，如计算电压、电流响应，但不能计算功率，因为功率与电压或电流激励不构成线性函数关系。

4. 计算举例

【例 1-5】求图 1-13a 所示电路中 $U_o = ?$ 已知 $I_s = 3\text{A}$ ， $U_s = 9\text{V}$ ， $R_1 = R_2 = 3\Omega$ ， $R_3 = R_4 = 6\Omega$ 。

解 根据叠加原理，可将图 1-13a 所示电路分解成图 1-13b 与图 1-13c 两个电路，并且有 $U_o = U'_o + U''_o$ 的关系。

由图 1-13b 可知

$$U'_o = I_s \frac{R_1}{R_1 + (R_2 + R_3 // R_4)} (R_3 // R_4) = 3\text{A} \times \frac{3\Omega}{3\Omega + \left(3\Omega + \frac{6\Omega \times 6\Omega}{6\Omega + 6\Omega}\right)} \times \frac{6\Omega \times 6\Omega}{6\Omega + 6\Omega} = 3\text{V}$$

由图 1-13c 可知

$$U''_o = - \left[\frac{U_s}{R_4 + (R_1 + R_2) // R_3} \right] R_4 + U_s = - \left[\frac{9\text{V}}{6\Omega + (3\Omega + 3\Omega) // 6\Omega} \right] \times 6\Omega + 9\text{V} = 3\text{V}$$

所以

$$U_o = U'_o + U''_o = 3\text{V} + 3\text{V} = 6\text{V}$$

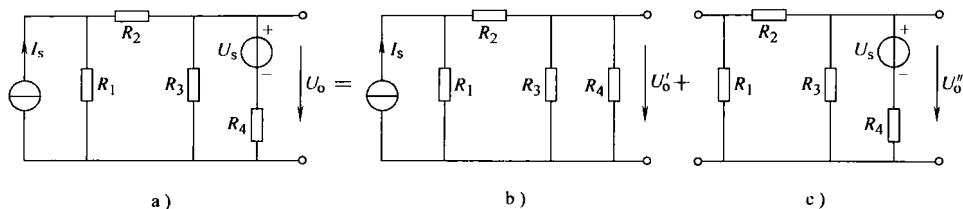
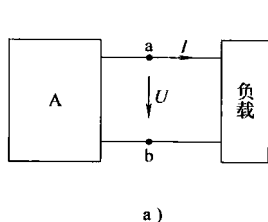


图 1-13 例 1-5 用图

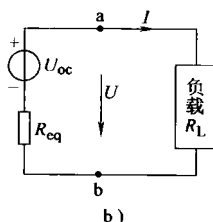
1.1.6 分析有源线性二端网络时采用戴维南定理

1. 基本概念

图 1-14a 表示有源线性二端（或称一端口）网络（以直流网络为例），可用一端电压为 U_{oc} 的理想电压源与一个等效内阻为 R_{eq} 的串联支路来等效替代，如图 1-14b 所示。其中 U_{oc} 为二端网络 A 的开路电压（见图 1-15）， R_{eq} 为网络 A 除源后的入端内阻，即将二端网络 A 内的所有独立电压源短路、独立电流源开路后所得无源二端网络 P 的等效电阻（见图 1-16）。以上关系被称为戴维南定理。



a)



b)

图 1-14 戴维南定理

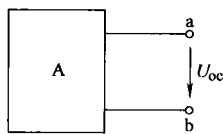


图 1-15 开路电压

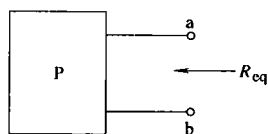


图 1-16 入端内阻

根据戴维南定理可知，图 1-14a 所示电路中负载（设为电阻 R_L ）的电流 I 可由图 1-14b 简便求得

$$I = \frac{U_{oc}}{R_{eq} + R_L} \quad (1-9)$$

当仅求解复杂电路中某一支路的电流、电压时，利用戴维南定理非常方便。

2. 扩展应用

图 1-14a 所示电路中的负载不限于线性电阻，也可为非线性、定常或时变的其他元件或二端网络。

3. 计算举例

【例 1-6】 图 1-17a 表示晶体管放大器的输出电路，其中 $E_C = 16V$ 、 $U_{CE} = 8V$ 、 $R_C = 4k\Omega$ 、 $R_L = 4k\Omega$ 。根据晶体管放大器的工作原理，当电流 I_C 变化时，电压 U_{CE} 也相应变化。试求出这时的 I_C 值。

解 图 1-17a 中晶体管 VT 为非线性

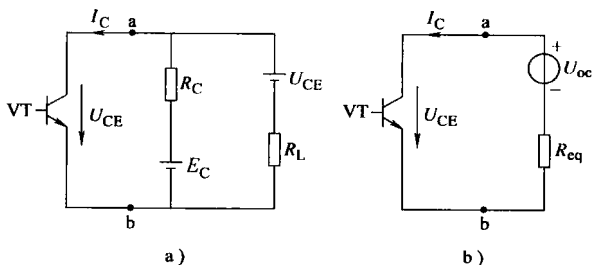


图 1-17 例 1-6 用图