



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电子电气基础课程系列教材

电工电子技术

(第5版)

徐淑华 主编

电子工业出版社版权所有
盗版必究

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材，根据教育部电工电子基础课程教学指导分委员会拟定的电工学课程最新教学基本要求编写。全书分6个模块共18章，包括电路分析基础、模拟电子技术基础、数字电子技术基础、EDA技术、电能转换及应用、控制系统基础，涵盖了电工电子技术的所有内容。

本书内容详略得当，基本概念讲述清楚，分析方法讲解透彻，例题、思考题、练习题配置齐全，难易度适中，部分重、难点内容配有动画或视频，扫描二维码即可观看，方便学生自学和教师施教。每章后的习题分为基础练习（见二维码）和综合练习两大部分，以便更好地服务于线上教学、混合式教学等新型教学模式。

本书有配套的实验教程和学习指导与习题解答，还提供配套的电子课件。

本书可作为高等学校非电类专业的教材，也可供其他工科专业选用或社会读者阅读。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

电工电子技术 / 徐淑华主编. —5版. —北京：电子工业出版社，2023.5

ISBN 978-7-121-45526-1

I. ①电… II. ①徐… 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

中国国家版本馆 CIP 数据核字（2023）第 077580 号

责任编辑：冉 哲

印 刷：

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：22.25 字数：628 千字

版 次：2003 年 7 月第 1 版

2023 年 5 月第 5 版

印 次：2023 年 5 月第 1 次印刷

定 价：69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：ran@phei.com.cn。

前 言

电工电子技术（电工学）课程是高等学校非电类专业一门重要的专业基础课程，担负着使学生获取电路、电子技术及电气控制等领域必要的基本理论、基本知识和基本技能的任务。该课程面对的专业多，学生数量大，课程内容涉及电工电子的各个领域，并有很强的实践性。

电工电子新器件、新技术、新应用层出不穷，教育教学信息化、网络化手段的飞速发展使得教学内容和教材结构也必须不断改革。所以，本书多次进行修订，以期不断提高，日臻完善，适应新工科及越来越深入的教学改革和时代的需要。

本次修订仍保持了模块化的整体结构，并根据电工电子技术的发展，同时适应新工科的需要，适当进行了模块调整。全书内容分为6个模块：第1模块为电路分析基础，第2模块为模拟电子技术基础，第3模块为数字电子技术基础，第4模块为EDA技术，第5模块为电能转换及应用，第6模块为控制系统基础。各模块间既相互独立又相互联系，内容环环相扣，层层深入，教师可以根据专业要求和课程学时的不同选择不同的模块，也可重组模块。每个模块的内容又分为基本内容和加深加宽（*）内容，以适应不同的专业要求。

教材是培养人才、传播知识的主要载体，是教育教学的重要依据。为深入贯彻党的二十大报告中“推进新型工业化”精神，全面提高人才自主培养质量，全力造就创新型工程人才，本次修订深入挖掘课程中的思政教育元素，并将其融入书中，结合电工电子技术的特点，注重体现坚定学生理想信念、厚植专业情怀、培养奋斗精神和提升综合素质等内容。

本次修订以教育部电工电子基础课程教学指导分委员会拟定的电工学课程最新教学基本要求为依据，在第4版的基础上对原有的部分内容进行精简、改写，并补充了新内容。本次修订仍坚持：突出“基础性”，突出基本概念、基本理论、基本原理和基本分析方法。加强“实践性”，注意各部分知识的综合，加强系统的概念，每部分都以由易到难、由简单到复杂的应用实例作为例题，每部分结束时都安排一个综合应用的实例。与主教材配套的实验教程分基础验证、综合设计、创新研究三个层次设置实验内容。体现“先进性”，尽可能将与课程相关的新成果、新技术纳入教材中。

本次修订加强“互联网+”时代最新网络信息与人工智能技术在教材中的应用，为了建立新形态教材，进一步丰富了数字化资源：

第一，为各章节重、难点内容增加教学微视频，扫描二维码即可观看；

第二，将各章后的习题分为基础练习（见二维码）和综合练习两大部分，以便更好地服务于线上教学、混合式教学等新型教学模式。

以本书为主教材的立体化教材还包括：电工电子技术电子课件、电工电子技术实验教程以及电工电子技术学习指导与习题解答。登录华信教育资源网（www.hxedu.com.cn），注册后可以免费下载电子课件。

本书的编写力求文字简明、概念清晰、条理清楚、讲解到位、插图规范，使之易教易学。各章开始处有学习目标，结束处有本章要点（见二维码）与其呼应。各节根据需要配有适量的思考与练习，供学生课后复习巩固。各章还配有关键术语（见二维码）。

本书的编写是在青岛大学电工电子实验教学中心的大力支持下进行的。其中，电路分析基础模块由马艳编写，模拟电子技术基础模块由杨艳编写，数字电子技术基础模块由王贞编写，EDA技术模块由刘丹编写，电能转换及应用模块由王红红编写，控制系统基础模块由王红红、刘丹编写。全书由徐淑华统稿。另外，感谢刘丹、宫淑贞、于双河（大连海事大学）在书中动画、视频制作方

面提供的帮助。

在编写过程中，作者学习和借鉴了大量有关的参考资料，吸取了国内外同类教材和有关文献的精华，在此向所有作者表示深深的感谢。

由于作者水平有限，错误和不当之处在所难免，恳请各位读者批评指正，以帮助本书不断改进和完善。

作者

电子工业出版社版权所有
盗版必究

目 录

第 1 模块 电路分析基础

第 1 章 电路的基本定律与分析方法	1	2.5.1 一阶 RC 电路的脉冲响应	36
1.1 电路的基本概念	1	2.5.2 积分电路	38
1.1.1 电路的组成及作用	1	2.5.3 微分电路	38
1.1.2 电流和电压的参考方向	2	习题 2	39
1.1.3 能量与功率	3	第 3 章 交流电路	41
1.1.4 电源的工作状态	4	3.1 正弦交流电的基本概念	41
1.1.5 理想电路元器件	6	3.1.1 正弦量的三要素	41
1.1.6 电路模型	10	3.1.2 正弦量的相量表示法	43
1.2 电路的基本定律	11	3.2 单一参数的正弦交流电路	45
1.2.1 欧姆定律	11	3.2.1 电阻的正弦交流电路	45
1.2.2 基尔霍夫定律	12	3.2.2 电感的正弦交流电路	46
1.3 电路的分析方法	14	3.2.3 电容的正弦交流电路	47
1.3.1 支路电流法	14	3.3 简单正弦交流电路的分析	49
1.3.2 结点电压法	14	3.3.1 基尔霍夫定律的相量形式	49
1.3.3 电源等效变换法	15	3.3.2 正弦交流电路的阻抗	52
1.3.4 叠加原理	18	3.3.3 正弦交流电路的功率	54
1.3.5 戴维南定理和诺顿定理	19	3.4 电路的频率特性	58
1.3.6 电位的计算	22	3.4.1 滤波电路	58
1.3.7 含受控源电路的分析	22	3.4.2 谐振电路	59
习题 1	25	*3.5 非正弦周期信号的电路	62
第 2 章 电路的暂态分析	27	3.5.1 非正弦周期量的分解	62
2.1 换路定则及初始值的确定	27	3.5.2 非正弦周期量的平均值和有效值	63
2.1.1 换路定则	27	3.5.3 非正弦周期量线性电路的分析	63
2.1.2 初始电压、电流的确定	28	习题 3	64
2.2 RC 电路的暂态过程	28	第 4 章 三相电路	67
2.2.1 RC 电路的零输入响应	29	4.1 三相电源	67
2.2.2 RC 电路的零状态响应	30	4.2 三相电路中负载的连接	69
2.2.3 RC 电路的全响应	31	4.2.1 负载星形连接的三相电路	69
2.3 一阶线性电路暂态分析的三要素法	31	4.2.2 负载三角形连接的三相电路	71
2.4 RL 电路的暂态过程	33	4.3 三相电路的功率	72
2.4.1 RL 电路的零输入响应	34	4.3.1 三相功率的计算	72
2.4.2 RL 电路的零状态响应	35	4.3.2 三相功率的测量	73
2.4.3 RL 电路的全响应	36	*4.4 安全用电技术	74
2.5 一阶 RC 电路的脉冲响应和积分、微分电路	36	4.4.1 安全用电常识	74

4.4.2 防触电的安全技术	75
4.4.3 静电防护和电气防火、防爆常识	75

习题 4	76
------	----

第 2 模块 模拟电子技术基础

第 5 章 常用半导体器件

5.1 PN 结及其单向导电性	77
5.1.1 半导体基础知识	77
5.1.2 PN 结的形成	78
5.1.3 PN 结的单向导电性	78
5.2 半导体二极管	79
5.2.1 二极管的基本结构	79
5.2.2 二极管的伏安特性曲线	80
5.2.3 二极管的主要参数	80
5.2.4 二极管的应用举例	81
5.3 稳压二极管	82
5.4 半导体三极管	83
5.4.1 三极管的基本结构	83
5.4.2 三极管的工作原理	83
5.4.3 三极管的伏安特性曲线	85
5.4.4 三极管的主要参数	86
*5.5 绝缘栅型场效应管	86
5.5.1 基本结构与工作原理	87
5.5.2 特性曲线	87
5.5.3 注意事项	88
5.6 光电器件	89
5.6.1 发光二极管	89
5.6.2 光电二极管	89
5.6.3 光电三极管	89
5.6.4 光电耦合器	89
5.7 集成电路	90
习题 5	90

第 6 章 基本放大电路

6.1 模拟电路概述	92
6.2 基本放大电路的组成及工作原理	92
6.2.1 基本放大电路的组成	93
6.2.2 基本放大电路的工作原理	94
6.2.3 基本放大电路的性能指标	95
6.3 基本放大电路的分析	97
6.3.1 放大电路的直流通路与交流通路	97
6.3.2 基本放大电路的静态分析	98
6.3.3 基本放大电路的动态分析	99
6.4 常用基本放大电路的类型及特点	103

6.4.1 射极输出器(共集放大电路)	103
6.4.2 差动放大电路	104
6.4.3 互补对称功率放大电路	106
6.5 实用放大电路的结构	107
习题 6	107

第 7 章 集成运算放大器及其应用

7.1 集成运算放大器概述	110
7.1.1 集成运算放大器的组成及工作原理	110
7.1.2 集成运算放大器的传输特性	111
7.1.3 集成运算放大器的主要参数	111
7.1.4 理想集成运算放大器及分析依据	112
7.2 放大电路中的负反馈	113
7.2.1 反馈的概念	113
7.2.2 反馈的类型及判断	113
7.2.3 负反馈对放大电路性能的影响	116
7.3 集成运算放大器的线性应用	118
7.3.1 基本运算电路	118
7.3.2 集成运算放大器在信号处理方面的应用	122
7.3.3 RC 正弦振荡器	124
7.4 集成运算放大器的非线性应用	126
7.4.1 电压比较器	126
*7.4.2 信号产生电路	128
7.5 集成运算放大器使用时的注意事项	130
7.6 集成运算放大器的应用举例	131
习题 7	133

第 8 章 半导体直流稳压电源

8.1 整流电路	138
8.1.1 单相半波整流电路	138
8.1.2 单相桥式整流电路	139
8.2 滤波电路	141
8.2.1 电容滤波器	141
8.2.2 其他形式的滤波电路	142
8.3 稳压电路	143
8.3.1 稳压管稳压电路	143
8.3.2 串联型稳压电路	144
8.3.3 集成稳压电路	144

第 3 模块 数字电子技术基础**第 9 章 门电路与组合逻辑电路** 150

9.1 数字电路概述 150

9.1.1 脉冲信号和数字信号 150

9.1.2 数字电路中常用数制 151

9.2 逻辑代数与逻辑函数 154

9.2.1 逻辑代数 154

9.2.2 逻辑函数及其表示 158

9.2.3 逻辑函数的化简与变换 159

9.3 集成逻辑门电路 161

9.3.1 TTL 与非门电路 162

9.3.2 CMOS 门电路 163

9.3.3 三态输出与非门电路 164

9.3.4 集成逻辑门电路使用中的
几个实际问题 164

9.4 组合逻辑电路的分析与设计 166

9.4.1 组合逻辑电路的分析 166

9.4.2 组合逻辑电路的设计 166

9.5 常用组合逻辑模块 168

9.5.1 加法器 168

9.5.2 编码器 170

9.5.3 译码器 172

9.5.4 数据分配器与数据选择器 175

9.5.5 用中规模组合逻辑模块实现
组合逻辑函数 1769.6 应用举例——交通信号灯故障
检测电路 178

习题 9 180

第 10 章 触发器与时序逻辑电路 183

10.1 双稳态触发器 183

10.1.1 RS 触发器 183

10.1.2 JK 触发器与 D 触发器 186

10.1.3 触发器逻辑功能的转换 188

10.1.4 触发器应用举例 189

10.2 寄存器 190

10.2.1 数码寄存器 191

10.2.2 移位寄存器 191

10.3 计数器 193

10.3.1 异步计数器 194

10.3.2 同步计数器 197

10.4 中规模集成计数器组件及其应用 199

10.4.1 中规模集成计数器组件 199

10.4.2 用集成计数器构成任意
进制计数器 201

10.5 555 定时器及其应用 203

10.5.1 555 定时器 204

10.5.2 555 定时器构成单稳态触发器 205

10.5.3 555 定时器构成多谐振荡器 207

10.5.4 555 定时器构成施密特触发器 209

10.6 应用举例——数字秒表 212

10.7 数字电路的故障诊断与排除 213

10.7.1 常见故障类型的检测和排除 213

10.7.2 信号追踪和波形分析 214

习题 10 215

第 11 章 半导体存储器 219

11.1 只读存储器 (ROM) 219

11.1.1 ROM 的基本结构和工作原理 219

11.1.2 ROM 的分类 221

11.1.3 ROM 的应用 222

11.2 随机存取存储器 (RAM) 224

11.2.1 RAM 的基本结构和工作原理 225

11.2.2 RAM 存储容量的扩展 226

11.3 闪存 227

11.3.1 闪存基本存储单元的结构 228

11.3.2 闪存的基本操作 228

11.3.3 基本闪存阵列 229

习题 11 230

第 12 章 模拟量和数字量的转换 231

12.1 D/A 转换器 231

12.1.1 D/A 转换器的组成和工作原理 231

12.1.2 D/A 转换器的主要技术指标 233

12.2 A/D 转换器 234

12.2.1 逐次逼近型 A/D 转换器的
组成和工作原理 234

12.2.2 A/D 转换器的主要技术指标 236

习题 12 237

第4模块 EDA技术

第13章 电子电路的仿真和可编程

逻辑器件 238

13.1 电子电路的仿真 239

13.1.1 Multisim (EWB) 简介 239

13.1.2 Multisim 10 的应用 245

13.2 可编程逻辑器件 (PLD) 250

13.2.1 PLD 简介 250

13.2.2 PLD 的基本结构与电路表示法 252

13.2.3 可编程只读存储器 (PROM) 简介 253

13.2.4 可编程逻辑阵列 (PLA) 简介 254

13.2.5 可编程阵列逻辑 (PAL) 简介 254

13.2.6 通用阵列逻辑 (GAL) 器件 简介 256

13.2.7 复杂可编程逻辑器件 (CPLD) 简介 257

13.2.8 现场可编程门阵列 (FPGA) 器件简介 259

13.2.9 PLD 编程 260

习题 13 261

第5模块 电能转换及应用

第14章 电磁转换 263

14.1 磁路的基本概念 263

14.1.1 磁路的基本物理量 263

14.1.2 铁磁性材料的磁性能 264

14.1.3 磁路的欧姆定律 265

14.2 铁心线圈电路 266

14.2.1 直流铁心线圈电路 266

14.2.2 交流铁心线圈电路 266

14.3 电磁铁 268

14.3.1 直流电磁铁 268

14.3.2 交流电磁铁 268

14.4 变压器 269

14.4.1 变压器的基本结构 269

14.4.2 变压器的工作原理 270

14.4.3 变压器的主要技术指标和 额定值 272

14.4.4 变压器的同极性端 273

14.4.5 特殊变压器 273

习题 14 275

第15章 机电转换 276

15.1 异步电动机 276

15.1.1 三相异步电动机的基本结构 和工作原理 276

15.1.2 三相异步电动机的电磁转矩 与机械特性 279

15.1.3 三相异步电动机的额定数据 283

15.1.4 三相异步电动机的使用 285

15.1.5 单相异步电动机 287

*15.2 直流电动机 289

15.2.1 直流电动机的构造及工作原理 289

15.2.2 并励/他励电动机的机械特性 290

15.2.3 并励/他励电动机的使用 292

*15.3 控制电机 295

15.3.1 伺服电动机 295

15.3.2 步进电动机 297

15.3.3 永磁式同步电动机 300

习题 15 301

*第16章 电能转换新技术 303

16.1 太阳能光伏发电 303

16.1.1 光伏发电系统的组成 303

16.1.2 光伏发电系统的分类 303

16.2 风力发电 304

16.3 大规模储能技术 305

第6模块 控制系统基础

第17章 继电器接触器控制系统 306

17.1 常用低压控制电器 306

17.1.1 手动电器 306

17.1.2 自动电器 308

17.2 三相鼠笼式异步电动机的基本控制 313

17.2.1 直接启停控制 314

17.2.2 点动控制 315

17.2.3 异地控制 315

17.2.4 正反转控制	315	18.2.4 定时器与计数器指令	330
17.2.5 多台电动机联锁控制	316	18.2.5 功能指令	333
17.3 行程控制	317	18.3 PLC 基本编程	336
17.4 时间控制	318	18.3.1 PLC 基本编程原则	336
17.5 应用举例	320	18.3.2 梯形图编程典型电路	336
习题 17	320	18.4 PLC 应用举例	338
第 18 章 可编程逻辑控制器及其应用	323	18.4.1 PLC 应用系统设计步骤	338
18.1 PLC 的基本结构和工作原理	323	18.4.2 三层电梯 PLC 控制设计	339
18.1.1 PLC 的基本结构	323	*18.5 自动控制系统的基本结构与	
18.1.2 PLC 的工作原理	324	调节原理	341
18.1.3 PLC 的主要性能指标	325	18.5.1 自动控制系统简介	341
18.2 PLC 程序设计基础	326	18.5.2 自动控制系统的基本结构	342
18.2.1 PLC 编程语言与程序结构	326	18.5.3 负反馈控制系统与 PID 控制	343
18.2.2 存储器的数据类型与		习题 18	345
寻址方式	327	参考资料	346
18.2.3 位逻辑指令	329		

第 1 模块 电路分析基础

第 1 章 电路的基本定律与分析方法

引言

电路理论主要研究电路中发生的电磁现象，用电流、电压和功率等物理量来描述其中的过程。本章首先介绍电路及其相关的基本概念，电压、电流的参考方向及应用，电源的工作状态，以及在电路中经常使用的各种理想电路元器件。

因为电路是由电路元器件构成的，因而整个电路所体现的特性既要看元器件的连接方式，又要看每个元器件的特性，这就决定了电路中各支路电流、电压都要受两个基本规律的约束：① 电路元器件性质的约束，也称为电路元器件的伏安关系，如欧姆定律，它仅与元器件性质有关，而与元器件在电路中的连接方式无关；② 电路的拓扑约束，这种约束关系只与电路的连接方式有关，而与元器件的性质无关，基尔霍夫定律是概括这种约束关系的基本定律。

虽然使用欧姆定律和基尔霍夫定律可以计算和分析电路，但当遇到复杂的电路分析时，往往要根据电路的结构特点去寻找简便的分析与计算方法，本章以直流电路为例讨论几种常用的电路分析方法，包括支路电流法、结点电压法、电源的等效变换、叠加原理和等效电源定理。这些方法不仅适用于直流电路，也适用于交流电路。

学习目标

- 理解物理量参考方向的概念。
- 能够正确判断电路元器件的电路性质，即电源和负载。
- 掌握各种理想电路元器件的伏安特性。
- 掌握基尔霍夫定律。
- 能够正确使用支路电流法列写电路方程。
- 能够使用结点电压法的标准形式列写结点电压方程。
- 理解等效的概念，掌握电源等效变换的分析方法。
- 能够正确应用叠加原理分析和计算电路。
- 掌握等效电源定理，在电路分析中能熟练应用该定理。
- 理解电位的概念，掌握电位的计算方法。
- 了解包含受控源电路的分析方法。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路的组成及作用

电路是电流通过的路径，是各种电气设备或元器件按一定方式连接起来组成的总体。不管是简单还是复杂的电路，都可分为三大部分：① 提供电能（或信号）的部分称为电源，如蓄电池、发电机和信号源等；② 吸收或转换电能的部分称为负载，如电动机、照明灯等；③ 连接和控制这两部分的称为中间环节。简单的中间环节可以是一些连接导线，而复杂的中间环节可以是一个庞大的控制系统。

电路的作用可分为两类。一个作用是传输和转换电能。典型的例子是电力传输系统，如图 1.1 所示。

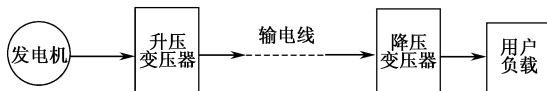


图 1.1 电力传输系统示意图

发电机是电源，是供应电能的设备，它将热能或原子能等转换成电能。变压器和输电线是中间环节，连接电源和负载，它起传输和分配电能的作用。用户负载包括各种取用电能的设备，它们可以把电能转换成光能、机械能、热能等。显然，该系统的作用是实现能量的传输和转换。

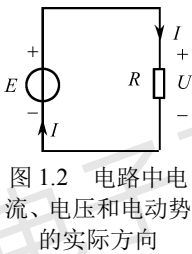
能量在转换和转移过程中保持不变，这是基本的科学观点之一，能量可以从一种形式转换为另一种形式，但是能量既不能被消灭也不会被创造。能量守恒的思想同样适用于电能的传输与转换。例如，一节电池以化学能形式储蓄能力，在电池放电时，转化为电能和热能。

电路的另一个作用是进行信号的传递和处理。例如，电视机的接收天线把载有语音、图像的电磁波接收后转换为相应的电信号，而后通过电路对信号进行传递和处理，分别送到扬声器和显示器中，还原为声音和图像。

无论是电能的传输和转换，还是信号的传递和处理，其中电源或信号源的电压或电流称为激励，激励在电路各部分产生的电压和电流称为响应。所谓电路分析，就是在已知电路的结构和元器件的参数条件下，讨论电路中激励和响应的关系。

当电路中电流的大小和方向不随时间发生变化时，称电路为直流电路；当电路中电流的大小和方向随时间按正弦规律变化时，称电路为正弦交流电路。依照国家标准，直流量用大写字母表示，例如，电压、电流、电动势分别表示为 U 、 I 、 E ；交流量用小写字母表示，例如，电压、电流、电动势分别表示为 u 、 i 、 e 。

1.1.2 电流和电压的参考方向



电流、电压和电动势是电路中的基本物理量。在电路分析中，只有在电路图中标出它们的方向，才能正确列写方程。电路中关于方向的规定有实际方向和参考方向之分。

物理学中规定，电流的实际方向是指正电荷运动的方向；两点间电压的实际方向是从高电位端指向低电位端；电动势的方向是低电位端指向高电位端。实际方向如图 1.2 所示。

但在复杂电路的分析中，某段电路的电流、电压、电动势的实际方向往往很难事先判断出来，有时它们的方向还在不断改变。为了分析电路，需要引入参考方向（假定正方向）。

参考方向是任意假定的。电流、电压、电动势的正方向，可用箭头、“+”和“-”号的方法来表示，也可以给电流、电压、电动势变量名加双下标。如图 1.3 所示。

当参考方向设定以后，即可根据参考方向列写电路的方程，求解电路中未知的电流、电压或电动势，若所得结果为正，则说明该物理量的实际方向与参考方向相同；若所得结果为负，则说明该物理量的实际方向与参考方向相反。注意，若事先没有标出参考方向，则所得结果的正、负无任何意义！所以，在分析电路之前，一定要先确定参考方向。如图 1.4 所示，电流的实际方向为虚线箭头表示的方向，当参考方向为实线箭头表示的方向时，图(a)中， $I > 0$ ；图(b)中， $I < 0$ 。

若取一个元器件或一段电路上的电压、电流的参考方向一致，则称之为关联参考方向，如图 1.3 中电阻上的 U_R 和 I 。当选取关联参考方向时，只需标出一种参考方向即可。若两者不一致，则称为非关联参考方向。

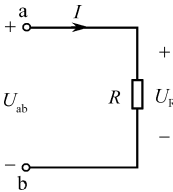


图 1.3 参考方向的表示方法

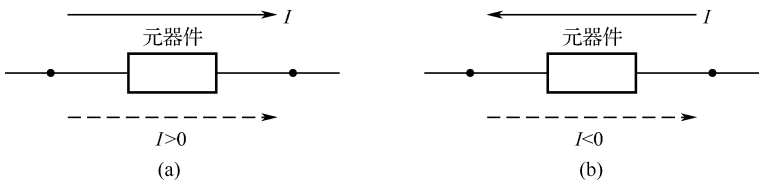


图 1.4 电流的参考方向

在分析和计算电路时，一般都采用关联参考方向。除特别说明外，本书电路图中所标的电流、电压和电动势的方向都是参考方向。

【例 1.1】 已知： $E=2\text{V}$ ， $R=1\Omega$ ，电路如图 1.5 所示，当 U 分别为 3V 和 1V 时，求 I_R 的大小和方向。

解：（1）假设物理量的参考方向如图 1.5 所示。

（2）列出电路的方程： $U_R=U-E$ ，则

$$I_R = \frac{U_R}{R} = \frac{U-E}{R}$$

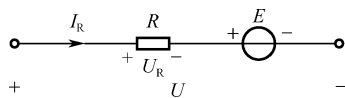


图 1.5 例 1.1 的电路

（3）当 $U=3\text{V}$ 时， $I_R=1\text{A}$ ，实际方向与参考方向一致；当 $U=1\text{V}$ 时， $I_R=-1\text{A}$ ，实际方向与参考方向相反。

1.1.3 能量与功率

电路在工作状态下总伴随着电能与其他形式能量的相互交换。根据能量守恒定律，电源提供的电能等于负载消耗或吸收的电能的总和。

从 t_0 到 t 的时间内，元器件吸收的电能可以用电场力移动电荷所做的功来表示

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$

因为 $i = \frac{dq}{dt}$ ，所以在关联参考方向下，有

$$W = \int_{t_0}^t u i dt \quad (1.1)$$

功率是能量对时间的导数，由式（1.1）可知，元器件吸收的功率可写成

$$p = ui$$

取电压、电流为关联参考方向，当 $p>0$ 时（此时电压、电流的实际方向相同），元器件要吸收功率，具有负载的电路性质；而当 $p<0$ 时（此时电压、电流的实际方向相反），元器件释放电能，即发出功率，具有电源的电路性质。

在国际单位制中，能量的单位为 J（焦耳），功率的单位为 W（瓦特）。若时间用 h（小时），功率用 kW（千瓦）为单位，则电能的单位为 kW·h（千瓦·小时），也称为“度”，这是供电部门度量用电量的常用单位。

用焦耳来命名能量的单位，是为了纪念英国物理学家焦耳（Joule，1818—1889）。焦耳以其在电学和热力学领域的研究成果而著名。他阐明了电流和能量的定量关系：电流通过导体产生的热量跟电流的平方成正比，跟导体的电阻成正比。

【例 1.2】 图 1.6(a)电路中，方框代表电源或负载，电流和电压的参考方向如图所示。通过测量得知： $U_1=20\text{V}$ ， $U_2=20\text{V}$ ， $U_3=-100\text{V}$ ， $U_4=120\text{V}$ ， $I_1=-10\text{A}$ ， $I_2=20\text{A}$ ， $I_3=-10\text{A}$ 。求：

（1）标出各电流、电压的实际方向和极性；

（2）判断哪几个方框是电源，哪几个方框是负载。

解：（1）电流、电压的参考方向与实际方向一致时，其值为正；相反时，其值为负。由此可得各电流、电压的实际方向如图 1.6(b)所示。

（2）元器件上电压、电流的实际方向一致时，为负载；电压、电流的实际方向相反时，为电源。由此可得，方框 1、4 为电源，方框 2、3 为负载。

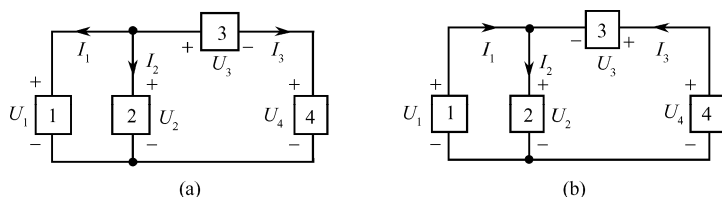


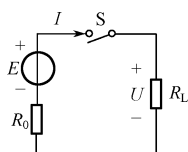
图 1.6 例 1.2 的电路

1.1.4 电源的工作状态

电源在不同的工作条件下，会处于不同的状态，具有不同的特点。下面以直流电路为例，分别讨论电压源的三种工作状态。

1. 有载工作状态

当电源与负载接通后，电路中有电流流动，此时电源发出功率，负载消耗功率，电源的这种状态称为有载状态。如图 1.7 所示， E 为电源电动势， R_0 为电源内阻， R_L 为负载电阻。开关 S 闭合，接通电源和负载，电路中的电流为



$$I = \frac{U}{R_0 + R_L} \quad (1.2)$$

负载两端的电压，即电源端电压为

$$U = E - IR_0 \quad (1.3)$$

图 1.7 电源的有载工作 式 (1.3) 反映了电源端电压 U 和输出电流 I 的关系，称为电源的外特性，其曲线如图 1.8 所示。由此曲线可看出，由于电源内阻的存在，当负载电流增大时，电源端电压下降，因为此时电源内阻上的电压下降增大。这就是为什么在用电高峰期会出现电压不足的原因。但通常电源内阻很小，所以当正常工作时，电流变动引起的电压下降很小。

电源输出的功率为电动势与电流的乘积，电路中消耗的功率为电源内阻与负载消耗功率之和（忽略连接导线产生的功率损耗），两者应平衡，即电路产生的总功率等于电路消耗的总功率：

$$EI = I^2 R_0 + UI$$

即

$$UI = EI - I^2 R_0 \quad (1.4)$$

$$P = P_E - \Delta P$$

式 (1.4) 称为功率平衡公式。

【例 1.3】验证例 1.2 中的功率是平衡的。

解：在图 1.6(a) 中，所有元器件上的 U 、 I 都为关联参考方向。所以电源发出的功率为

$$P_1 = U_1 I_1 = 20 \times (-10) = -200 \text{ W}$$

$$P_4 = U_4 I_3 = 120 \times (-10) = -1200 \text{ W}$$

负载消耗的功率为

$$P_2 = U_2 I_2 = 20 \times 20 = 400 \text{ W}$$

$$P_3 = U_3 I_3 = -100 \times (-10) = 1000 \text{ W}$$

可得

$$P_1 + P_4 = -200 + (-1200) = -1400 \text{ W}$$

$$P_2 + P_3 = 400 + 1000 = 1400 \text{ W}$$

可见，电路中电源发出的功率等于负载消耗的功率，功率是平衡的。

不管是电源还是负载，各种电气设备在工作时，其电压、电流和功率都有一定的限额。这些限额是用来表示它们的正常工作条件和工作能力的，称为电气设备的额定值。额定值是生产厂家为了使产品能在给定的工作条件下正常工作而规定的容许值。额定值一般在电气设备的铭牌上标出，或

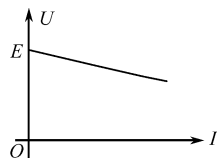


图 1.8 电源的外特性曲线

写在其他说明中。使用时必须考虑这些额定数据。若负载的实际电压、电流值高于额定值,则可能造成损坏或降低使用寿命;若负载的实际电压、电流值低于额定值,则不能正常工作,有时也会造成损坏或降低使用寿命。由于外界因素的影响,允许负载的实际电压、电流值与额定值有一定的误差。例如,由于电源电压的波动,允许负载电压在 $\pm 5\%$ 的范围内变化。

对于负载来说,正常工作时的实际值与额定值非常接近。而对于电源来说,其额定电压是一定的,额定功率只代表它的容量。实际工作时,其输出电流和功率的大小取决于负载的大小,即负载需要多少功率和电流,电源就提供多少。当负载功率小于电源功率时,称电源为轻载工作;当负载功率等于电源功率时,称电源为满载工作;当负载功率大于电源功率时,称电源为超载工作。电源的超载工作是不允许的。

【例 1.4】 额定值为 220V, 60W 的电灯, 试求其电流和灯丝电阻。若每天使用 3 小时, 每月(30 天)用电多少?

解:
$$I = \frac{P}{U} = \frac{60}{220} = 0.273 \text{ A}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.273} = 806 \Omega$$

$$W = Pt = 60 \times (3 \times 30) = 5400 \text{ W} \cdot \text{h} = 5.4 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

【例 1.5】 标称值为 1000Ω , $\frac{1}{2} \text{ W}$ 的电阻, 额定电流为多少? 在使用时电压不得超过多少?

解:
$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{0.5}{1000}} = 0.022 \text{ A}$$

使用时电压不得超过 $U = IR = 0.022 \times 1000 = 22 \text{ V}$ 。

2. 开路

在图 1.7 电路中, 若开关 S 断开, 则电源处于开路状态, 如图 1.9 所示。当电源开路时, 输出电流 I 为零, 负载电阻 R_L 为无穷大, 则开路电压, 即电源的空载电压 U_0 等于电源电动势 E :

$$\begin{aligned} I &= 0 \\ U &= U_0 = E \\ P &= 0 \end{aligned}$$

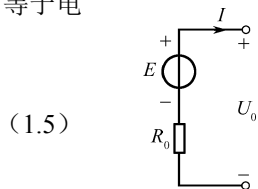


图 1.9 开路

3. 短路

若某一部分电路的两端用电阻可以忽略不计的导线连接起来, 使得该部分电路中的电流全部被导线旁路, 则这部分电路所处的状态称为短路状态, 如图 1.10 所示。因为电路中只有很小的电源内阻, 所以短路电流 I_s 很大。短路时电源所产生的能量全部被电源内阻消耗, 此时超过额定电流若干倍的短路电流可能将供电系统中的设备烧毁或引起火灾。电源短路通常是一种严重的事故, 应尽量预防。通常在电路中接入熔断器等短路保护装置, 以便在发生短路故障时, 能迅速将电源与短路部分断开。但有时由于某种需要, 可以将电路中的某一段短接, 进行某种短路实验。

当电源短路时, 短路线上的电压为零, 电动势全部降在电源内阻上, 即

$$\begin{aligned} U &= 0 \\ I_s &= \frac{E}{R_0} \end{aligned} \quad (1.6)$$

电源内阻消耗的功率为

$$P_s = R_0 I_s^2$$

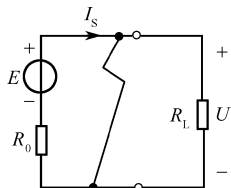


图 1.10 短路

1.1.5 理想电路元器件

元件和器件是组成电路的基本单元,统称为元器件。每种元器件都反映了某种确定的电磁性质。电路元器件通过其端子与外电路相连接,元器件的性质通常用端口处的伏安关系描述。

按照不同的依据,电路元器件可分为二端、三端、四端元器件等,还可以分为有源和无源元器件,也可以分为线性和非线性元器件。

1. 电阻

电阻是表征电路中阻碍电流流动特性的参数,电阻器是表征电路中消耗电能的理想元器件,习惯上也简称为电阻,所以我们所说的电阻既是电路元器件又是表征其量值大小的参数。电路中的电阻如图 1.11 所示。

电阻可以分为线性电阻和非线性电阻,这里我们只讨论线性电阻。线性电阻的阻值 R 是一个常数。在线性电阻中,任意一个瞬间其两端的电压与通过它的电流的关系总是满足欧姆定律,即

$$u = iR \quad (1.7)$$

根据欧姆定律,可以得出线性电阻的伏安特性曲线是一条直线,如图 1.12 所示。

电阻是一种耗能元器件,其能量转换过程是不可逆的。电阻吸收的功率为

$$P = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1.8)$$

电阻上的功率总为正值。在从 t_0 到 t 的时间内,电阻消耗的能量为

$$W = \int_{t_0}^t u i dt \quad (1.9)$$

电阻的单位是 Ω (欧 [姆]),大电阻则常用 $k\Omega$ (千欧) 或 $M\Omega$ (兆欧) 作为单位。

当 n 个电阻串联时,可等效为一个电阻,其等效电阻 R 为

$$R = \sum_{k=1}^n R_k \quad (1.10)$$

当 n 个电阻并联时,可等效为一个电阻,其等效电阻 R 为

$$\frac{1}{R} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \quad (1.11)$$

负载并联时,它们承受相同的电压,其中任一负载的工作状态基本不受其他负载的影响。

并联的电阻越多(负载增大),则总电阻越小,电路中的总电流和总功率就越大,但是每个负载的电流和功率却没有变动。

2. 电感

电感(器)是由储存磁能的物理过程抽象出来的理想电路元器件,即凡是磁场储能的物理过程都可以用电感来表示。线圈是典型的电感元器件。当忽略线圈的电阻时,可以认为它是一个理想的电感元器件。电路中的电感如图 1.13(a)所示。

当电流 i 通过线圈时,线圈中就会有磁通 ϕ ,若线圈匝数为 N ,则磁链为 $\psi = N\phi$ 。

磁链 ψ 与电流 i 的比值称为线圈的电感

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{N\phi}{i} \quad (1.12)$$

式中, L 是表征线圈产生磁通能力的物理量。

若 L 不随电流或磁通的变化而变化,则称为线性电感,如空心线圈,因为空气的导磁率是常

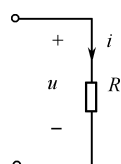


图 1.11 电阻

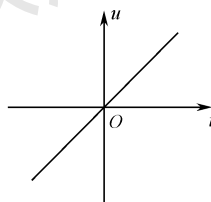


图 1.12 电阻的伏安特性曲线

数, 所以 L 也为常数, i 与 ϕ 的关系为线性。本书中除特别指明外, 讨论的均是线性电感。电感的单位是 H (亨利)。电感的单位亨利是为了纪念约瑟夫·亨利而命名的, 亨利是继富兰克林后第一个进行独创性科学实验的美国人, 他将导线重复绕在铁心上形成线圈, 并在 1830 年发现了电磁感应效应, 比法拉第早一年。

电感反映了电能转换为磁能, 即电流变化建立磁场的物理本质。磁通 ϕ 与电流 i 之间的方向符合右手螺旋法则, 如图 1.13(b) 所示。

当线圈中的电流发生变化时, 它产生的磁通也变化, 根据电磁感应定律, 在线圈两端将有感应电动势 e_L 产生。规定感应电动势的方向与电流的方向一致, 即 ϕ 与 e_L 的方向也符合右手螺旋法则, 则

$$e_L = -\frac{dN\phi}{dt} = -N\frac{d\phi}{dt} \quad (1.13)$$

因为 $Li = N\phi$, 所以

$$e_L = -\frac{dLi}{dt} = -L\frac{di}{dt} \quad (1.14)$$

根据图 1.13 规定的电压方向 (与电流方向一致), 则电感的伏安关系为

$$u = -e = L\frac{di}{dt} \quad (1.15)$$

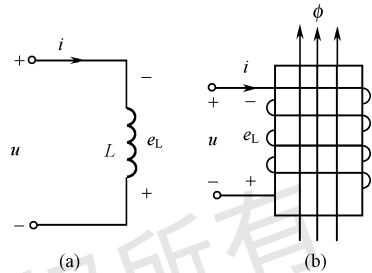


图 1.13 电感和线圈

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u dt = i_0 + \frac{1}{L} \int_0^t u dt \quad (1.16)$$

式中, i_0 为 $t=0$ 时电感中的电流, 称电流的初始值。若 $i_0=0$, 则

$$i = \frac{1}{L} \int_0^t u dt$$

式 (1.14) 说明电感两端的电压与通过它的电流的变化率成正比。只有当电流变化时, 电感两端才有电压。若电感中通过的电流是直流, 因为 $\frac{di}{dt}=0$, 所以电感两端的电压为零。即电感对直流可视短路。

电感是一种储能元器件。当通过电感的电流上升时, 电感将电能变为磁能储存在磁场中; 当通过电感的电流减小时, 电感将储存的磁能变为电能释放给电源。因而, 当通过电感的电流发生变化时, 理想电感只进行电能与磁能的转换, 电感本身不消耗能量。电感在任意时间内的储能可用式 (1.17) 计算:

$$W_L = \int_{-\infty}^t u i dt = \int_0^i L i di = \frac{1}{2} L i^2 \quad (1.17)$$

因此, 电感储存的磁能只与该时刻电流的大小有关。

多个电感可以串联或并联工作, 当 n 个电感串联时, 可以等效为一个电感, 其值为

$$L = \sum_{k=1}^n L_k \quad (1.18)$$

当 n 个电感并联时, 也可以等效为一个电感, 其值为

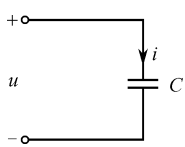
$$\frac{1}{L} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k} \quad (1.19)$$

选用电感时, 既要选择合适的电感值, 又不能使实际工作电流超过其额定电流。当单个电感不能满足要求时, 可把几个电感串联或并联起来使用。

3. 电容

电容 (器) 是由电场储能的物理过程抽象出来的理想元器件, 凡是电场储能的物理过程都可以

用电容来表示。一个电容，当忽略它的电阻和电感时，可以认为它是一个理想的电容元器件。电路中的电容如图 1.14 所示。



当在电容两端加上电压 u 后，电容开始充电，建立电场。设极板上所带的电荷为 q ，则电容的定义为

$$C = \frac{q}{u} \quad (1.20)$$

图 1.14 电容 式中， C 是电容的参数，称为电容（量），它表征电容储存电荷的能力。当电容上的电压 u 和电荷 q 之间的关系为线性时， C 为常数，该电容为线性电容。在国际单位制中，电容的单位是 F（法拉，法），常用 μF （微法）或 pF （皮法）作为单位：

$$1\text{F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{pF}$$

当电容上的电压 u 增大时，极板上的电荷 q 增加，电容充电；当电压 u 减小时，极板上的电荷 q 减小，电容放电。根据电流的定义

$$i = \frac{dq}{dt}$$

得到电容上电压、电流的关系为

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1.21)$$

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = u_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1.22)$$

式中， u_0 是 $t=0$ 时电容上的初始电压。若 $u_0=0$ ，则

$$u = \frac{1}{C} \int_0^t i dt$$

在关联参考方向下，电容的电流与其电压的变化率成正比，当电容两端的电压为直流时，因为 $\frac{du}{dt} = 0$ ，则 $i = 0$ ，即电容对直流电压可视为开路。

电容也是一种储能元器件。当其两端电压上升时，电容充电，将电能储存在电场中；当电压减小时，电容放电，将储存的能量释放给电源。电容通过其两端电压的变化进行能量的转换。电容本身不消耗能量，电容在任意一个瞬间的储能可用式（1.23）计算：

$$W_C = \int_{-\infty}^t u i dt = \int_0^u C u du = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1.23)$$

多个电容可以串联或并联工作，当 n 个电容并联时，可以等效为一个电容，其值为

$$C = \sum_{k=1}^n C_k \quad (1.24)$$

当 n 个电容串联时，可以等效为一个电容，其值为

$$\frac{1}{C} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k} \quad (1.25)$$

各种电容上一般都标有电容的标称值和额定工作电压。额定工作电压也称为耐压值，是电容长期可靠、安全工作的最高电压。一般为电容击穿电压的 $1/2 \sim 2/3$ 。

选择电容时，不但要选择合适的电容值，而且还要选择合适的耐压值。单个电容不能满足要求时，可以把几个电容串联或并联起来使用。

4. 理想电压源

理想电压源两端的电压总保持为某个给定的时间函数，与通过它的电流无关。通过理想电压源的电流，其大小取决于外接电路。若理想电压源的电压恒等于常数，则称为恒压源。理想电压源的

电路符号如图 1.15(a)所示。恒压源也可以用图 1.15(b)所示的电路符号来表示。

理想电压源的电路和伏安特性曲线如图 1.16 所示，即

$$\begin{aligned} U &= E \\ I &= \frac{E}{R_L} \end{aligned} \quad (1.26)$$

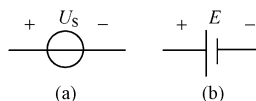


图 1.15 理想电压源和恒压源的电路符号

因为理想电压源的电压与外电路无关，因此与理想电压源并联的电路（或元器件），其两端的电压等于理想电压源的电压。

对于理想电压源，是不允许其短路的，因此在应用电路中通常会加入短路保护，以免电路短路时，造成过大的短路电流而损坏电压源；而闲置时，应将其开路保存。

n 个电压源串联时如图 1.17(a)所示，可以等效为一个电压源，如图 1.17(b)所示，这个等效电压源的电压为

$$U_s = U_{s_1} + U_{s_2} + \cdots + U_{s_n} = \sum_{k=1}^n U_{s_k} \quad (1.27)$$

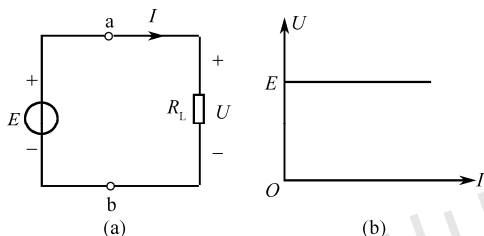


图 1.16 理想电压源的电路和伏安特性曲线

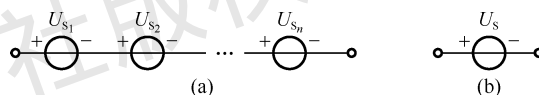


图 1.17 电压源的串联

如果 U_{s_k} 的参考方向与 U_s 的参考方向一致，则式 (1.27) 中的符号应取正号；若不一致则取负号。

只有电压相等并且极性一致的电压源才允许并联，其等效电路为其中任意一个电压源，但这个并联电路向外部提供的电流在各个电压源之间如何分配则无法确定。

5. 理想电流源

理想电流源中的电流保持为某个给定的时间函数，与其两端的电压无关。理想电流源两端电压的大小取决于外接电路。若理想电流源中的电流大小恒等于常数，则称为恒流源。理想电流源的电路符号如图 1.18 所示。

理想电流源的电路和伏安特性曲线如图 1.19 所示。可得

$$\begin{aligned} I &= I_s \\ U &= I_s R_L \end{aligned} \quad (1.28)$$

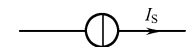


图 1.18 理想电流源的电路符号

因为理想电流源中的电流与外电路无关，所以与理想电流源串联的电路（或元器件），其中的电流等于理想电流源中的电流。

对于理想电流源，不允许其开路运行，否则这与电流源的特性不相符，因此闲置时，应将其短路保存。

n 个电流源并联时如图 1.20(a)所示，可以等效为一个电流源，如图 1.20(b)所示，等效电流源中的电流为

$$I_s = I_{s_1} + I_{s_2} + \cdots + I_{s_n} = \sum_{k=1}^n I_{s_k} \quad (1.29)$$

如果 I_{s_k} 的参考方向与 I_s 一致，则取正值；如果不一致，则取负值。

只有电流相等并且方向一致的电流源才允许串联，其等效电路为其中任意一个电流源，但是这

个串联电路的总电压在各个电流源中如何分配则无法确定。

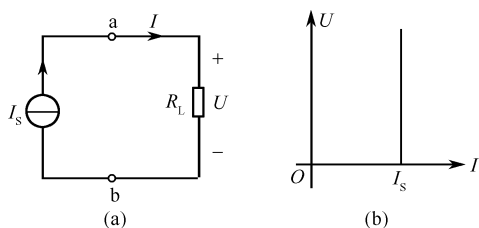


图 1.19 理想电流源的电路和伏安特性曲线

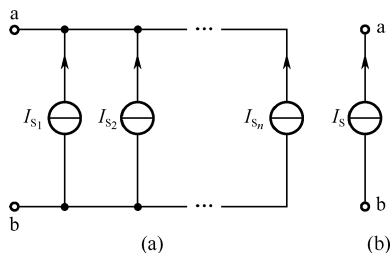


图 1.20 电流源的并联

常见的实际电源（如发电机、蓄电池等）的工作原理比较接近电压源，其电路模型是理想电压源与电阻的串联组合。而光电池一类的元器件，其工作时的特性比较接近电流源，其电路模型是理想电流源与电阻的并联组合。另外，有专门设计的电子电路可作为实际电流源使用。理想电压源与理想电流源常称为“独立”源，“独立”是相对于下面将要介绍的“受控”源而言的。

6. 理想受控源

受控源又称为“非独立”电源，它在电路中能起到电源的作用，但其电压或电流受电路其他部分电压或电流的控制。受控源按照电源的特性可分为受控电压源和受控电流源，也可以根据受控源的控制量不同，分为电流控制受控源和电压控制受控源。综合起来，共有 4 种类型：压控电压源（VCVS）、压控电流源（VCCS）、流控电压源（CCVS）和流控电流源（CCCS）。这 4 种理想受控源的电路模型如图 1.21 所示。

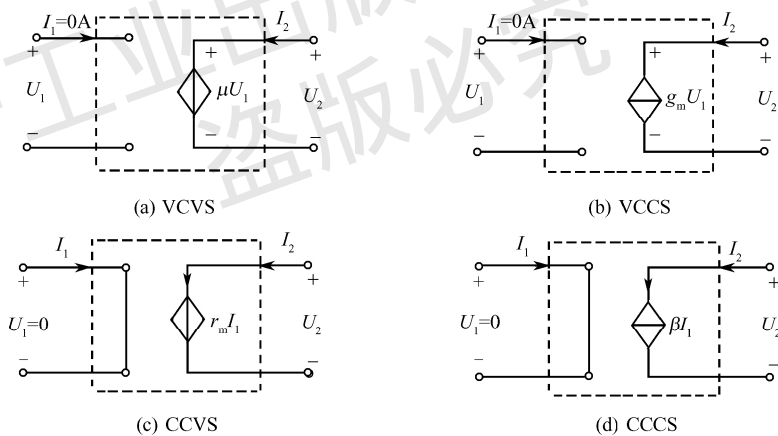


图 1.21 4 种理想受控源的电路模型

图 1.21 中的 μ 、 g_m 、 r_m 、 β 称为控制系数，各种理想受控源的控制关系如下。

$$\text{VCVS: } U_2 = \mu U_1$$

$$\text{VCCS: } I_2 = g_m U_1$$

$$\text{CCVS: } U_2 = r_m I_1$$

$$\text{CCCS: } I_2 = \beta I_1 \quad (1.30)$$

μ 和 β 是量纲为 1 的量， g_m 和 r_m 分别具有电导和电阻的量纲。当这些系数为常数时，被控制量与控制量成正比，这些受控源为线性受控源。

1.1.6 电路模型

实际电路都是由许多元器件构成的，它们的电磁性质较为复杂。例如，白炽灯除了具有消耗电能的性质（电阻性），当电流流过时也会产生磁场，即它也具有电感性。但由于它的电感微小，可

以忽略不计, 所以可将白炽灯看作一个纯电阻。这种为了便于对实际电路进行分析研究, 在一定条件下突出实际元器件的主要电磁性质, 忽略其次要因素的过程, 称为元器件建模。

元器件建模的过程就是用理想元器件或它们的组合模拟实际元器件, 建模时必须考虑工作条件, 并按照不同精确度的要求把给定工作情况下的主要物理现象及功能反映出来。例如, 对一个线圈的建模: 在直流电路下, 可以将其看作一个电阻; 在低频电路中, 可以用电阻和电感的串联电路模拟; 在高频电路中, 还应考虑导体表面的电荷作用, 即电容效应。可见, 在不同的条件下, 同一个实际元器件可能采用不同的模型。

在实际电路中, 对实际元器件建模, 用理想元器件或其组合来近似代替之, 将得到实际电路的电路模型。例如, 一个日光灯电路, 其灯管可以用一个电阻来表示, 而镇流器接入电路时将发生电能转换为磁能和电能转换为热能两种情况, 所以, 可用一个电阻和一个电感的串联来表示, 得出如图 1.22 所示的电路模型。

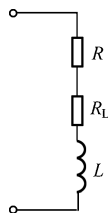


图 1.22 日光灯电路模型

【思考与练习】

1-1-1 在图 1.23 电路中, 通过电容的电流为 i_C , 电容两端的电压为 u_C , 电容的储能是否为零? 为什么?

1-1-2 在图 1.24 电路中, 通过电感的电流为 i_L , 电感两端的电压为 u_L , 电感的储能是否为零? 为什么?

1-1-3 额定值为 220V, 100W 的电灯, 其电流为多大? 电阻为多大?

1-1-4 额定值为 1W, 1000Ω 的电阻, 使用时, 电流和电压不得超过多大数值?

1-1-5 如何根据 U 和 I 的实际方向判断电路中的元器件是电源还是负载? 如何根据 P 的正、负判断电路中的元器件是电源还是负载?

1-1-6 直流发电机的额定值: 40kW, 230V, 174A。何为发电机的空载、轻载、满载、过载运行? 若给发电机接上一个额定功率为 60W 的负载, 此时发电机发出的功率是多少?

1-1-7 在图 1.25 电路中, 求:

(1) 开关闭合前后的电流 I_1 、 I_2 、 I 是否发生变化, 为什么?

(2) 若由于接线不慎, 100W 的电灯被短路, 后果如何? 100W 的电灯的灯丝是否会被烧断?

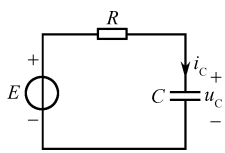


图 1.23 思考与练习 1-1-1

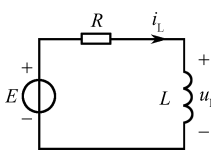


图 1.24 思考与练习 1-1-2

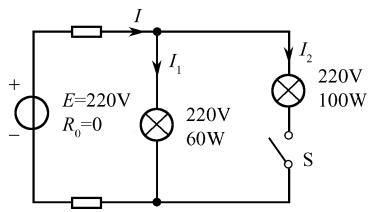


图 1.25 思考与练习 1-1-7

1.2 电路的基本定律

电路分析的基本依据是电路的基本定律, 即欧姆定律和基尔霍夫定律。

1.2.1 欧姆定律

欧姆定律反映了电阻上电压与电流的约束关系。当电阻上的电压和电流采用关联参考方向时, 表示为

$$u = iR \quad (1.31)$$

电阻的单位名称为欧姆, 是为了纪念欧姆, 他通过实验发现了电压、电流和电阻的关系, 即欧姆定律的数学关系, 但这一研究成果经过多年的努力才得到认可。

1.2.2 基尔霍夫定律

基尔霍夫是一位物理学家，他把欧姆在电路理论方法的工作加以推广，发现了两个基本定律。基尔霍夫定律包括电流定律和电压定律，是电路中结点上的电流和回路中的电压所满足的普遍规律。

在讨论基尔霍夫定律之前，首先介绍电路中常用的几个名词。

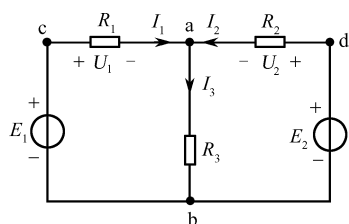


图 1.26 电路中的支路和结点

支路：电路中的一个分支称为一条支路。支路中流过的电流，称为支路电流。

结点：三条或三条以上支路的连接点称为结点。

回路：电路中的任意一个闭合路径称为回路。

网孔：内部不含有其他支路的回路称为网孔。

图 1.26 电路中有三条支路，两个结点（a 和 b），三个回路（abca、abda 和 adbca），两个网孔（abca 和 abda）。

1. 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律（KCL）的具体内容：任意一个瞬间，流入电路中任意一个结点的电流的总和必等于流出该结点的电流的总和。在图 1.26 中，对结点 a 可以写成： $I_1 + I_2 = I_3$ 。

上式可以改写为 $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ 。因此，KCL 还可以这样描述：任意一个瞬间，任意一个结点上电流的代数和恒等于零（如果规定流入结点的电流为正，则流出结点的电流就取负）。公式为

$$\sum I = 0 \quad (1.32)$$

KCL 还可以推广应用于电路中任意假设的封闭面。即在任意一个瞬间，通过任意一个封闭面的电流的代数和恒等于零。如图 1.27 所示虚线中的封闭面有三个结点，可列出三个 KCL 方程。

对结点 a 有 $I_a = I_{ab} - I_{ca}$

对结点 b 有 $I_b = I_{bc} - I_{ab}$

对结点 c 有 $I_c = I_{ca} - I_{bc}$

上列三式相加，便得

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

即满足广义的 KCL。

KCL 是电流连续性的具体体现，是“电荷守恒”的一种反映，因为任意一个结点上的电荷既不会产生又不会消失，也不可能积累。不管电路是线性的还是非线性的，不管电流是直流还是交流，也不管电路中接有何种元器件，KCL 都普遍适用。

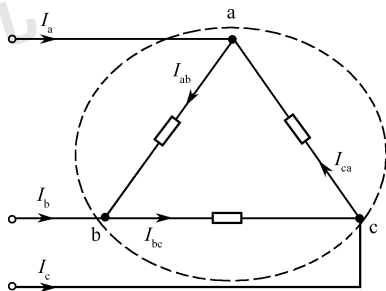


图 1.27 KCL 的推广

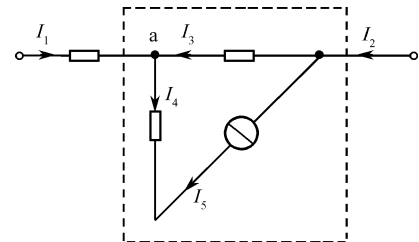


图 1.28 例 1.6 的电路

【例 1.6】图 1.28 电路中，已知： $I_1 = 2\text{A}$ ， $I_3 = -4\text{A}$ 。

求： $I_4 = ?$ ， $I_2 = ?$

解：对结点 a 列出 KCL 方程

$$I_1 + I_3 - I_4 = 0$$

$$I_4 = -2\text{A}$$

对虚线中的封闭面列出 KCL 方程

$$I_1 + I_2 = 0$$

$$I_2 = -I_1 = -2\text{A}$$

2. 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律（KVL）的具体内容：任意一个瞬间，沿任意一个闭合回路绕行一周，各部分电压的代数和恒等于零。公式为

$$\sum U = 0 \quad (1.33)$$

应用式 (1.33) 列写 KVL 方程时, 应首先标出各段电压的参考方向, 选定一个回路绕行方向, 若规定各段电压的参考方向与回路绕行方向一致则取正, 若与回路绕行方向相反则取负。如图 1.29 中所示的回路, 其 KVL 方程为

$$U_1 - U_2 - E_1 + E_2 = 0$$

上式也可以改写为 $U_1 + E_2 = U_2 + E_1$, 因而 KVL 也可以描述为: 任意一个瞬间, 沿任意一个闭合回路绕行一周, 电位降 (电压) 的代数和等于电位升 (电动势) 的代数和。

KVL 还可以推广应用到电路中任意一个不闭合的假想回路, 但要开口处的电压列入方程。如图 1.30 所示的电路, 其 KVL 方程为

$$U + IR_0 = E$$

KVL 体现出在任何电路中, 任意两点之间的电压与计算时所取的路径无关。

综上所述, 基尔霍夫定律只与电路的结构有关, 而与元器件的性质无关, KCL 反映了电路的结构对结点上各支路电流所引起的约束关系, 而 KVL 反映了电路结构对回路中各段电压所引起的约束关系。

【例 1.7】图 1.31 电路中, 已知: $E_1 = 10\text{V}$, $E_2 = 2\text{V}$, $E_3 = 1\text{V}$, $R_1 = R_2 = 1\Omega$, 求 U 。

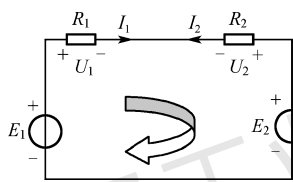


图 1.29 回路

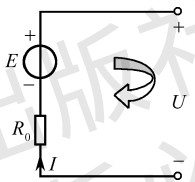


图 1.30 KVL 的推广

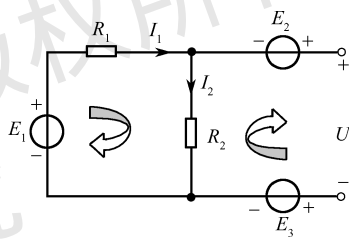


图 1.31 例 1.7 的电路

解: 对左回路列出 KVL 方程

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = E_1$$

因为右回路为开路状态, 所以 $I_1 = I_2$ 。代入数据, 得

$$I_1 = I_2 = 5\text{A}$$

对右回路列出 KVL 方程

$$U - I_2 R_2 = E_2 - E_3$$

代入数据, 得

$$U = 6\text{V}$$

【思考与练习】

1-2-1 求图 1.32 电路中的未知电流。

1-2-2 求图 1.33 电路中的未知电流及电压 U_{ab} 。

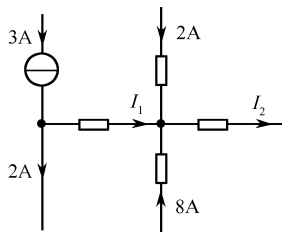


图 1.32 思考与练习 1-2-1

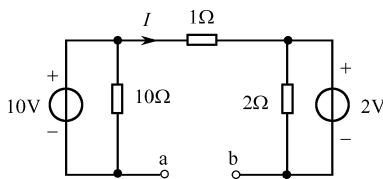


图 1.33 思考与练习 1-2-2



参考方向的应用

1.3 电路的分析方法

电路分析是指通常已知电路的结构和参数,求解电路中的基本物理量。对于简单的电路可以用电阻的串、并联等效,以及串联分压、并联分流公式来分析和计算。但对于一些较为复杂的电路,还应根据电路的结构和特点,归纳出分析和计算的简便方法。下面介绍几种常用的分析方法。

1.3.1 支路电流法

支路电流法以支路电流作为电路中的未知量,利用元器件的伏安关系将元器件电压表示成支路电流的函数,根据 KCL 和 KVL 分别对结点和回路列出关于支路电流的线性方程组,联立求解,得到各支路电流。

如果电路参数已知,且有 n 个结点、 b 条支路,则利用支路电流法分析电路的步骤如下。

① 标出各支路电流参考方向。

② 列出电路中独立的 KCL 方程。

若电路中有 n 个结点,则可以列出 n 个结点的 KCL 方程,但只有 $n-1$ 个方程是独立的,第 n 个结点的 KCL 方程可以从其他 $n-1$ 个方程中推导出来。

例如,在图 1.34 中,对 a 点列出的 KCL 方程为 $I_1 + I_2 - I_3 = 0$

对 b 点列写的 KCL 方程为 $-I_1 - I_2 + I_3 = 0$

显然这两个方程并不是独立的,独立 KCL 方程的个数为 $2-1=1$ 个。

③ 选取独立回路,列出电路中独立的 KVL 方程。

在平面电路中,通常选择网孔作为独立回路列写 KVL 方程,当电路中有 b 条支路时,可以选出 $b-(n-1)$ 个网孔列出回路电压方程。

④ 联立上述方程,且为 b 元一次方程组。求解该方程组,即得各支路电流。

图 1.34 电路中 $n=2$, $b=3$, 各支路电流方向如图所示。据上述步骤,可得:

$$\text{KCL 方程为} \quad I_1 + I_2 = I_3$$

$$\text{KVL 方程为} \quad I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1$$

$$I_3 R_3 + I_2 R_2 = E_2$$

解此方程组,得出 I_1 、 I_2 和 I_3 。根据 I_1 、 I_2 和 I_3 可进一步求出 U_{R1} 、 U_{R2} 和 U_{R3} 等电路中其他的物理量。

【例 1.8】 电路如图 1.35 所示,用支路电流法计算各支路电流。

解: 选定各支路电流的参考方向和回路绕行方向,如图 1.35 所示。

图中有 3 条支路,且恒流源支路的电流为已知,所以,只需列出 2 个独立方程即可求解。先列出结点 a 的 KCL 方程,再列出左网孔的 KVL 方程:

$$I_1 - I_2 + 6 = 0$$

$$2I_1 + 4I_2 = 10$$

联立求解,得

$$I_1 = -7/3\text{A}, \quad I_2 = 11/3\text{A}$$

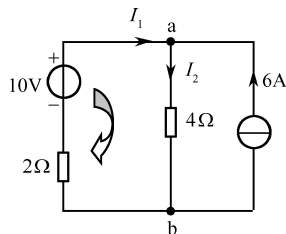


图 1.35 例 1.8 的电路

1.3.2 结点电压法

在电路中任选一个结点作为参考点,令其电位为零,在电路图中用接地符号“ $\perp$ ”标出,其余结点到参考点之间的电压称为结点电压。各结点电压的参考极性均以参考结点为“-”极。如图 1.36 所示,电路中仅有两个结点,结点电压为 U_{ab} ,其参考方向为由 a 指向 b。

结点电压法以结点电压为电路的变量，对独立结点列写 KCL 方程（用结点电压表示相关的支路电流）。

在图 1.36 中，以结点 b 作为参考结点，则结点电压为 U_{ab} 。对独立结点 a 列写 KCL 方程：

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

根据欧姆定律和基尔霍夫电压定律，将支路电流用结点电压表示如下：

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1}, \quad I_2 = \frac{E_2 - U_{ab}}{R_2}, \quad I_3 = I_{S1}$$

将支路电流代入结点 a 的 KCL 方程中，可以得到

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) U_{ab} = \frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + I_{S1}$$

即

$$U_{ab} = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + I_{S1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (1.34)$$

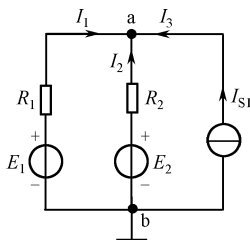


图 1.36 结点电压法

在式 (1.34) 中， $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ 是与结点 a 相连的所有电阻支路的电阻的倒数之和。而 $\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + I_{S1}$ 为与结点 a 相连的电源支路引起的流入结点 a 的电流。

总结上述规律，可以得到仅包含两个结点的电路，其结点电压方程的一般形式为

$$U = \frac{\sum \frac{E}{R} + \sum I_s}{\sum \frac{1}{R}} \quad (1.35)$$



结点电压法的应用

式 (1.35) 称为弥尔曼定理。式中，分母中的 $\sum \frac{1}{R}$ 是与结点 a 相连的所有电阻支路的电阻的倒数之和，分母中的各项总为正值。分子中的各项为与结点 a 相连的电源支路引起的流入结点 a 的电流，可正可负，当电压源电压的方向与结点电压方向一致时为正，相反时为负；当电流源电流流入结点时为正，流出结点时为负。

【例 1.9】图 1.37 中，设 b 为参考结点，写出结点电压的方程。

解：b 为参考结点，电路中的结点电压为 U_{ab} ，即

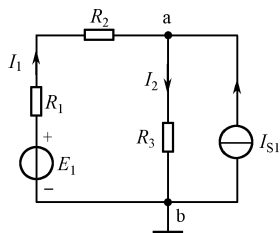


图 1.37 例 1.9 的电路

$$U_{ab} = \frac{\frac{E_1}{R_1 + R_2} + I_{S1}}{\frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

1.3.3 电源等效变换法

1. 电压源与电流源的等效变换

一个实际的电源，其端电压往往随着它的电流变化而发生变化。例如，当电池接上负载以后，其端电压就会降低。这是因为电池内部有电能的消耗，即有电阻存在。所以电源可以采用如图 1.38(a) 所示的电压源电路模型，即用一个电阻与理想电压源的串联组合来表示，称为电压源，电阻 R_0 称为电压源内阻。

电压源的伏安特性（也称为外特性）是指其输出电压 U 和输出电流 I 的关系：

$$U = E - IR_0 \quad (1.36)$$

图 1.38(b) 为电压源的外特性曲线。随着负载电流的增大，电源的端电压在下降。这是因为电流越

大，电压源内阻上的压降也越大。

电源还可以用电流源电路模型来表示。式 (1.36) 还可以写成

$$I = \frac{E}{R_0} - \frac{U}{R_0} = I_s - \frac{U}{R_0}$$

式中， $I_s = \frac{E}{R_0}$ 为理想电流源中的电流， I 是负载电流，而 $\frac{U}{R_0}$ 是引出的另一个支路电流，即通过 R_0 的电流。因此，电流源可看作一个理想电流源 I_s 和电流源内阻 R_0 的并联电路。其电路模型如图 1.39(a) 所示。电流源的伏安特性（外特性）是指其输出电压 U 和输出电流 I 的关系：

$$I = I_s - \frac{U}{R_0} \quad (1.37)$$

图 1.39(b) 为电流源的外特性曲线。负载电流越大，电流源内阻上的电流越小，此时电流源输出的电压越低。

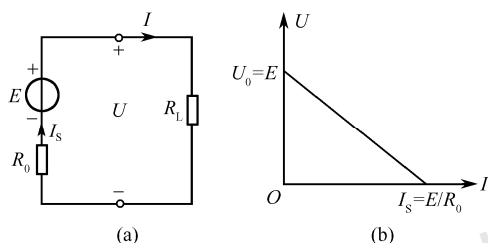


图 1.38 电压源电路模型及其外特性曲线

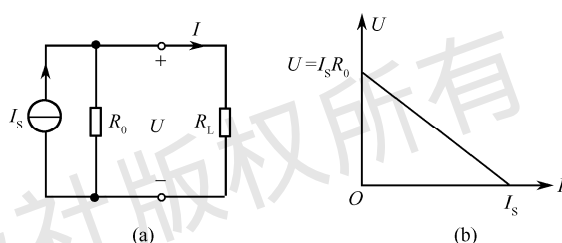


图 1.39 电流源电路模型及其外特性曲线

从以上讨论可知，当电压源与电流源的内阻相同，且电压源的 $E = I_s R_0$ 或电流源的 $I_s = \frac{E}{R_0}$ 时，二者的外特性完全相同。由此，我们得到一个结论：电压源和电流源之间存在着等效变换的关系，即可以将电压源变换成等效电流源或相反，如图 1.40 所示。使用这种等效变换在进行复杂电路的分析、计算时，往往会带来很大的方便。

为了保持变换前后输出端的特性一致，电动势 E 的方向应与恒流源 I_s 的方向一致，也就是说， I_s 的方向是从 E 的“-”指向“+”，如图 1.40 所示。

需要强调的是：

- ① 电压源和电流源的等效关系是只对外电路而言的，对电源内部则不等效。因为变换前后，两种电源内路的电压、电流和功率等都不相同。
- ② 恒压源和恒流源之间不能进行等效变换，因为它们有完全不同的外部特性，故两者之间不存在等效变换的条件。

【例 1.10】一个直流发电机的 $E=230\text{V}$ ， $R_0=1\Omega$ ，当 $R_L=22\Omega$ 时，用电源的两种电路模型分别求解负载上的电压和电流，并计算电源内部损耗的功率和电源内阻上的压降，看它们是否相等。

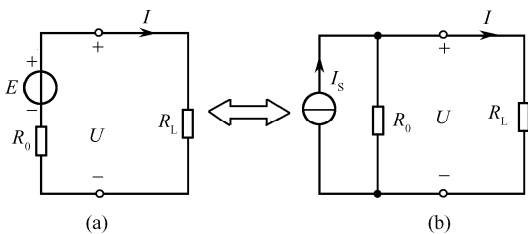


图 1.40 电压源与电流源的等效变换

解：电路如图 1.40 所示。

(1) 计算负载上的电流 I 和电压 U 。

用电压源电路模型，如图 1.40(a) 所示，有

$$I = \frac{E}{R_L + R_0} = \frac{230}{22 + 1} = 10\text{A}$$

$$U = R_L I = 22 \times 10 = 220\text{V}$$

用电流源电路模型，如图 1.40(b) 所示，有

$$I = \frac{R_0}{R_0 + R_L} I_s = \frac{1}{22+1} \times \frac{230}{1} = 10\text{A}$$

$$U = R_L I = 22 \times 10 = 220\text{V}$$

(2) 计算电源内阻上的压降和电源内部损耗的功率。

用电压源电路模型, 如图 1.40(a)所示, 有

$$R_0 I = 1 \times 10 = 10\text{V}$$

$$\Delta P_0 = R_0 I^2 = 1 \times 10^2 = 100\text{W}$$

用电流源电路模型, 如图 1.40(b)所示, 有

$$\frac{U}{R_0} \times R_0 = 220\text{V}$$

$$\Delta P_0 = R_0 \times \left(\frac{U}{R_0} \right)^2 = 48400\text{W} = 48.4\text{kW}$$

由此可见, 电压源和电流源电路模型对外电路是等效的, 对电源内部是不等效的。

2. 用电压源、电流源等效变换的方法分析电路

根据基尔霍夫定律, 串联的恒压源可以合并, 并联的恒流源可以合并, 所以当电路中存在多个电源时, 可通过将电源等效变换、合并的方法简化电路。

使用电源等效变换的方法分析电路时, 应注意所求支路不得参与变换。

【例 1.11】在图 1.41(a)电路中, 已知: $E_1 = 12\text{V}$, $E_2 = 6\text{V}$, $R_1 = 6\Omega$, $R_2 = 3\Omega$, $R_3 = 1\Omega$, 求电流 I 。

解: 先将两个并联的电压源转换为电流源, 如图 1.41(b)所示, 其中:

$$I_{S1} = \frac{E_1}{R_1} = 2\text{A}, \quad I_{S2} = \frac{E_2}{R_2} = 2\text{A}$$

然后, 将两个恒流源合并为一个电流源, 如图 1.41(c)所示, 其中:

$$I_S = 2 + 2 = 4\text{A}, \quad R_0 = R_1 // R_2 = 2\Omega$$

可以从图 1.41(c)中利用分流关系求得 I , 也可以将电流源转换为电压源 [见图 1.41(d)] 计算。可得

$$I = \frac{8}{1+2} = \frac{8}{3}\text{A}$$

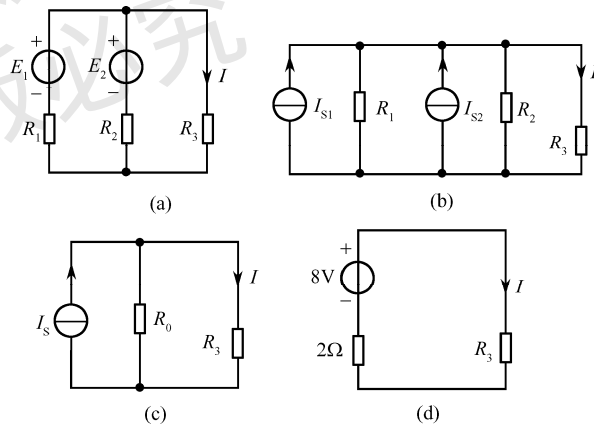


图 1.41 例 1.11 的电路

在使用电源等效变换的方法分析电路时, 还应注意, 与恒压源并联的元器件对外电路相当于开路, 与恒流源串联的元器件对外电路相当于短路, 在计算外电路时可以将其等效 (但计算电源内部各物理量时不能忽略)。

【例 1.12】图 1.42(a)电路中, 求 R_4 支路中的电流 I 。

解: 可以认为, R_4 支路对恒流源 I_S 和恒压源 E 都是外电路。所以, 计算前, 可以将与恒流源串联的 R_1 短路, 与恒压源并联的 R_3 开路, 简化电路后得到图 1.42(b)。在图 1.42(b)中, 利用电压源和电流源的等效变换得到图 1.42(c)和(d), 其中:

$$I_{S1} = \frac{E}{R_2}$$

$$I'_S = I_S + I_{S1}$$

$$I = I'_S \frac{R_2}{R_2 + R_4}$$

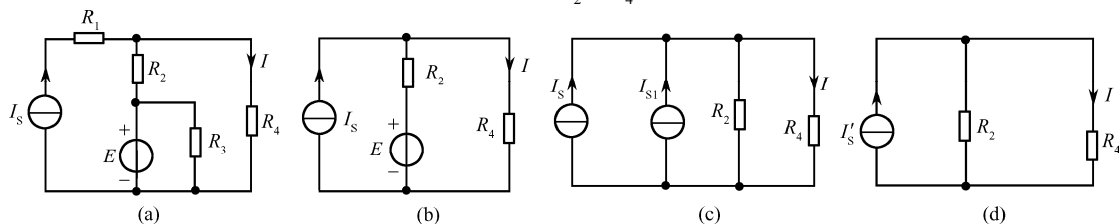


图 1.42 例 1.12 的电路

1.3.4 叠加原理

叠加原理是线性电路的重要性质之一。它指出，在多个电源共同作用的线性电路中，各支路的电流（或电压）是各电源单独作用时在该支路上产生的电流（或电压）的代数和。

在图 1.43(a) 电路中，我们先用支路电流法求得支路电流：

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1$$

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2$$

解得

$$I_1 = \frac{R_2 + R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} \cdot E_1 - \frac{R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} \cdot E_2$$

其中，前一项就是 E_1 单独作用时 [见图 1.43(b)] 在 R_1 支路中产生的电流，即

$$I'_1 = \frac{R_2 + R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} \cdot E_1$$

后一项就是 E_2 单独作用时 [见图 1.43(c)] 在 R_1 支路中产生的电流，即

$$I''_1 = \frac{-R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} \cdot E_2$$

同理，可得

$$I_2 = I'_2 + I''_2, \quad I_3 = I'_3 + I''_3$$

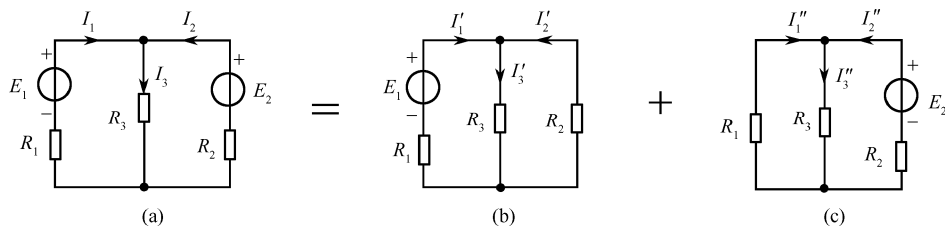


图 1.43 叠加原理

应用叠加原理求解电路的步骤如下。

- ① 在原电路中标出所求量（总量）的参考方向。
- ② 画出各电源单独作用时的电路，并标明各分量的参考方向。
- ③ 分别计算各分量。
- ④ 将各分量叠加，若分量与总量的参考方向一致则取正，否则取负。
- ⑤ 将各分量数值代入，计算结果。

【例 1.13】用叠加原理计算图 1.44(a) 中的电压 U 。设 $I_S = 10\text{A}$ ， $E = 12\text{V}$ ， $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1\Omega$ 。

解：利用叠加原理将图 1.44(a) 分解为图 1.44(b) 和图 1.44(c)，可得

$$U' = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \cdot E = 12 \times \frac{1}{4} = 3\text{V}$$

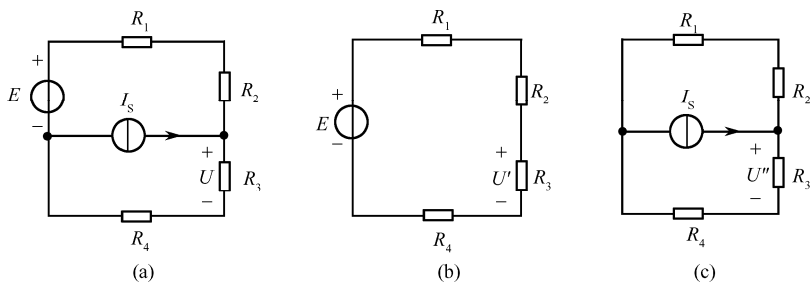


图 1.44 例 1.13 的电路

$$U'' = \frac{I_s}{2} \times R_3 = 1 \times \frac{10}{2} = 5\text{V}$$

$$U = U' + U'' = 3 + 5 = 8\text{V}$$



叠加原理注意事项

应用叠加原理时应注意以下 4 点。

- ① 叠加原理只适用于线性电路，不适用于非线性电路。
- ② 电路中只有一个电源单独作用，就是假设将其余电源作为零值处理，即理想电压源短路，其电动势为零，理想电流源开路，其电流值为零，但电源内阻一定要保留。
- ③ 将各分量叠加时，若分量与总量的参考方向一致则取正，否则取负值。
- ④ 叠加原理只适用于电压、电流的计算，不适用于功率的计算，因为功率和电流之间不是线性关系。

叠加原理作为电路的一种分析方法，在电路中电源个数多、结构复杂时，会显得烦琐费时。但作为处理线性电路的一个普遍适用的规律，叠加原理是很重要的。它有助于对线性电路性质的理解，可以用来推导其他定理，简化处理更复杂的电路。

1.3.5 戴维南定理和诺顿定理

一般来说，凡具有两个接线端的电路，都称为二端网络（注：这里讨论的均为线性的）。若二端网络内部含有独立电源，则称为有源二端网络；若内部不含独立电源，则称为无源二端网络。在通常情况下，一个无源二端网络可以等效为一个电阻。而有源二端网络不仅产生电能，本身还消耗电能，在外特性等效的条件下，即保持输出电压和输出电流关系不变的条件下，有源二端网络产生电能的作用可以用一个总的理想电源来表示，消耗电能的作用可以用一个总的理想电阻来表示，这就是等效电源定理。等效电源定理包括戴维南定理（Thevenin's Theorem）和诺顿定理（Norton's Theorem）。等效电源定理是分析和计算复杂电路的一种有力工具。

1. 戴维南定理

对一个复杂的电路，有时只需要计算其中某条支路中的电流（或电压），如图 1.45 中的 I 。此时，可将这条支路划出，其余部分就是一个有源二端网络，如图 1.45(a)虚线框中的部分，有源二端网络对外电路（如 R_L ）来说，相当于一个电源。因此，这个有源二端网络可以简化为一个等效电源，如图 1.45(b)所示。经等效变换后，外电路 R_L 上的电压和电流并不改变。

戴维南定理指出，对外电路来说，任意一个线性有源二端网络都可以用一个等效的电压源来替代。

如图 1.46(a)所示的有源二端网络，其戴维南等效电路如图 1.46(b)所示；其中电压源的电动势 E 为有源二端网络的两个端子 a、b 间的开路电压 U_{oc} ，即将外接负载 R_L 断开后 a、b 两端之间的

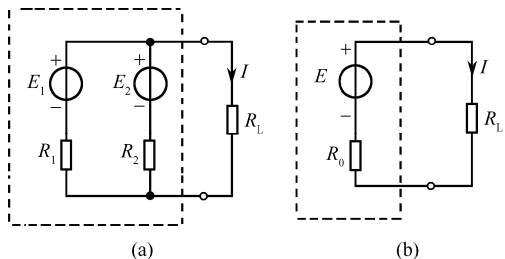


图 1.45 有源二端网络的等效变换

电压,如图 1.46(c)所示; R_0 为该有源二端网络中所有独立电源不起作用(去源)时,从 a、b 两端看进去的等效内阻,如图 1.46(d)所示。

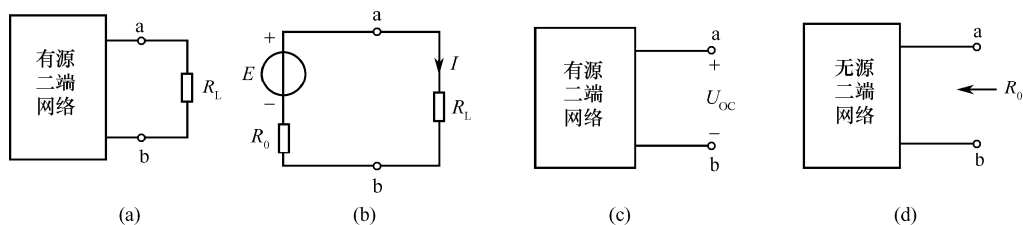


图 1.46 戴维南定理

使用戴维南定理分析电路的步骤如下。

① 确定待求量的参考方向,根据该参考方向确定二端网络的 a 与 b。断开待求支路,得到一个有源二端网络。

② 求有源二端网络的开路电压(注意开路电压的方向) U_{OC} 。

③ 求有源二端网络的去源等效内阻。

④ 画出有源二端网络的戴维南等效电路,电动势的极性根据 U_{OC} 的极性确定。

⑤ 将断开的待求支路接在 a、b 两端计算待求量。

【例 1.14】求如图 1.47(a)所示的有源二端网络的戴维南等效电路。

解:图 1.47(a)电路可等效为图 1.47(b)电路,得

$$U_S = U_{OC} = 2 + 3 \times 2 = 8V$$

将图 1.47(a)中的电源置零,可以得到 $R_0 = 2\Omega$ 。

因此图 1.47(a)电路的戴维南等效电路如图 1.48 所示。

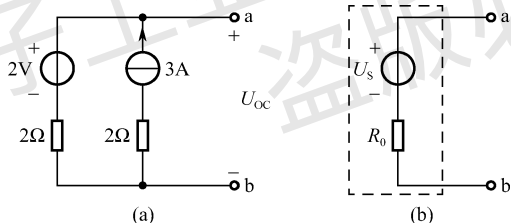


图 1.47 例 1.14 的电路

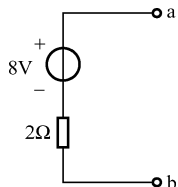


图 1.48 例 1.14 的解

【例 1.15】用戴维南定理计算图 1.49(a)中的电流 I 。

解:图 1.49(a)电路可化为图 1.49(b)等效电路。等效电路的电动势可用图 1.49(c)求得

$$E = U_{ab} = 12 \times \frac{1}{2} - 12 \times \frac{5}{10+5} = 6 - 4 = 2V$$

等效电路的内阻可用图 1.49(d)求得

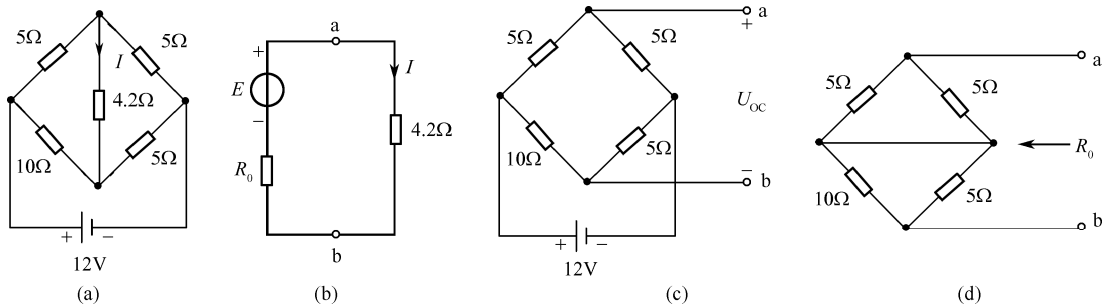


图 1.49 例 1.15 的电路

$$R_0 = \frac{5 \times 5}{5 + 5} + \frac{10 \times 5}{10 + 5} = 5.8 \Omega$$



戴维南定理应用

最后，由等效电路求得

$$I = \frac{2}{5.8 + 4.2} = 0.2 \text{ A}$$

2. 戴维南等效内阻的求解

求解某些简单二端网络的等效内阻时，可以直接用电阻的串、并联方法，如图 1.49(d)所示。但是，有些二端网络不适合使用简单的串、并联的方法，这时我们可以使用以下两种方法计算戴维南等效内阻。

① 开路、短路法。分别求有源二端网络的开路电压 U_{OC} 和短路电流 I_S ，如图 1.50 所示。戴维南等效内阻为 $R_0 = \frac{U_{OC}}{I_S}$ 。

② 外加电源法。将有源二端网络内部的独立电源置零，得到相应的无源二端网络，如图 1.51 所示，在无源二端网络的端口 a、b 处外加电压源 U_S ，求解流入该二端网络的电流 I 。戴维南等效电阻为

$$R_0 = \frac{U_S}{I}$$

当二端网络中包含受控源时，一般采用外加电源法求解戴维南等效内阻 R_0 。

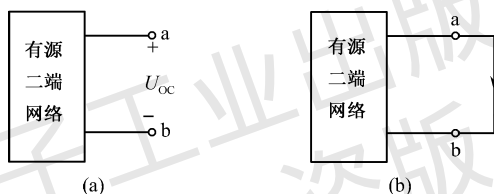


图 1.50 开路、短路法

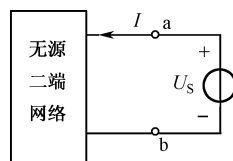


图 1.51 外加电源法

3. 诺顿定理

据 1.3.3 节所述，电压源可以等效为电流源。因此，有源二端网络的戴维南等效电路可以等效为恒流源 I_S 与内电阻 R_0 并联的电流源，这就是有源二端网络的诺顿等效电路。

诺顿定理指出，对外电路而言，任意一个线性有源二端网络都可以用一个等效的电流源来替代，如图 1.52(a)和(b)所示。

其等效电路中电流源的电流 I_S 为有源二端网络的短路电流， R_0 为该有源二端网络中所有独立电源置零时，从 a、b 两端看进去的等效内阻，如图 1.52(c)和(d)所示。如图 1.52(b)所示的等效电流源称为有源二端网络的诺顿等效电路。

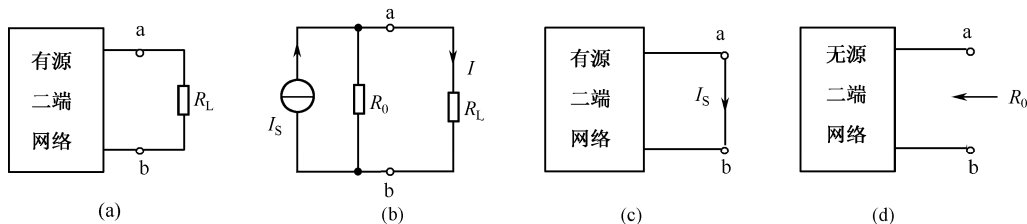


图 1.52 诺顿定理

戴维南等效电路和诺顿等效电路符合电压源和电流源的等效变换，这两种等效电路共有 U_0 、 R_0 和 I_S 三个参数，其关系为 $U_0 = R_0 I_S$ ，故确定其中的任意两个就可求得第三个。戴维南等效电路

和诺顿等效电路统称为一端口的等效电源。

1.3.6 电位的计算

电位是电路分析中的重要概念。在电子技术中，常应用电位的概念来分析问题。例如，电路中的二极管，只有当它的阳极电位高于阴极电位时才能导通。应用电位的概念，还可以简化电路图的画法。

电路中各点的电位是相对于零电位参考点而言的，电路中某个点的电位是该点到零电位参考点之间的电压。物理学中常规定大地为零电位参考点，在电工技术中则常常根据需要确定参考点。例如，电子电路中，通常以与机壳连接的公共导线为参考点。参考点通常用符号“ $\perp$ ”来表示。

只有参考点选定后，才能确定各点的电位。参考点不同，各点的电位也不同。

图 1.53 电路中，若选 a 点为参考点，则各点电位如下：

$$V_a = 0, V_b = U_{ba} = -60\text{V}, V_c = U_{ca} = 80\text{V}, V_d = U_{da} = 30\text{V}$$

若选 b 点为参考点，则各点电位如下：

$$V_a = U_{ab} = 60\text{V}, V_b = 0, V_c = U_{cb} = 140\text{V}, V_d = U_{db} = 90\text{V}$$

由此可见，各点电位的高低是相对的，而两点间的电压却是绝对的。无论取哪个点作为参考点，其任意两点间的电压是不变的，即

$$U_{ab} = V_a - V_b = 60\text{V}, U_{ca} = V_c - V_a = 80\text{V}, U_{da} = V_d - V_a = 30\text{V}$$

$$U_{cb} = V_c - V_b = 140\text{V}, U_{db} = V_d - V_b = 90\text{V}$$

在电路中，电源的一端通常都是接“地”的，为了绘图简便和图面清晰，习惯上不画出电源而在电源的非接地端注以其电位的数值，这就是用电位表示的电路。例如，可以用图 1.54(c)表示图 1.54(a)，用图 1.54(d)表示图 1.54(b)。

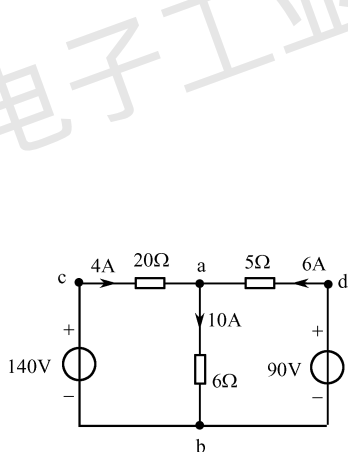


图 1.53 电位的计算

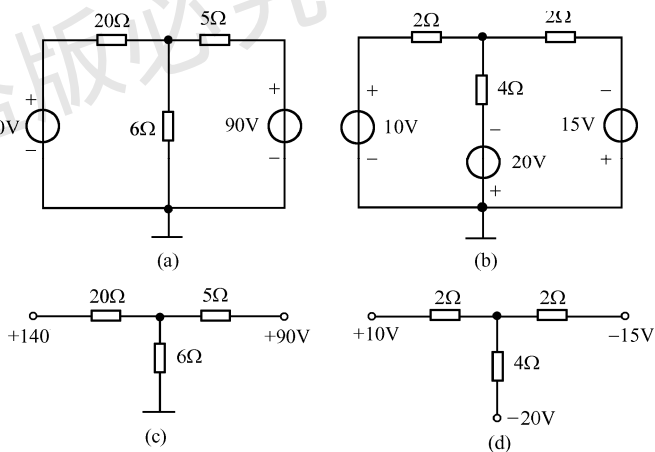


图 1.54 用电位表示的电路

1.3.7 含受控源电路的分析

1. 含受控源电路的分析

对含受控源的线性电路，也可以用前面几节介绍的电路分析方法进行分析和计算，但考虑到受控源的输出要受到另一支路电压或电流的控制，因此在分析含受控源的线性电路时，不能像独立电源一样处理受控源。下面我们通过几个例题说明含受控源电路的分析。

【例 1.16】 请用支路电流法计算图 1.55 电路中的电流 I_1 。

解：根据支路电流法，列写电路的 KCL、KVL 方程如下：

$$\text{KCL: } I_1 = I_2 + 0.5U_1$$

$$\text{KVL: } 30 = 6I_1 + 4I_2$$

补充受控源的控制量与支路电流的关系方程如下：

$$U_1 = 6I_1$$

联立以上方程求解，可以得到 $I_1 = -15\text{A}$ 。

用支路电流法分析含受控源的电路时，通常先将受控源看作独立电源列写电路的方程，然后补充受控源的控制量与电路未知变量（支路电流）之间的关系方程，联立求解。

【例 1.17】用戴维南定理求解图 1.56 电路中的电流 I 。

解：首先将待求支路去掉，得到一个含受控源的有源二端网络，如图 1.57(a)所示。

(1) 求有源二端网络的开路电压 U_{OC} 。

对图 1.57(a)电路列写 KVL 方程，可得 $2I'_1 + 2I'_1 + 8I'_1 = 12\text{V}$

因此 $I'_1 = 1\text{A}$ 。所以，开路电压 $U_{OC} = 2I'_1 + 8I'_1 = 10\text{V}$ 。

(2) 求有源二端网络的等效内阻 R_0 。

根据开路、短路法可知，戴维南等效内阻 $R_0 = \frac{U_{OC}}{I_S}$ 。将图 1.57(a)中的有源二端网络在端口 a、

b 处短路，电路如图 1.57(b)所示，求出短路电流 I_S 的大小。

由 KVL 得 $12 - 2I''_1 = 0$ ，可得 $I''_1 = 6\text{A}$

$$I_S = I''_1 + \frac{8I''_1}{2} = 30\text{A}$$

$$R_0 = \frac{U_{OC}}{I_S} = \frac{10}{30} = \frac{1}{3}\Omega$$

(3) 原电路的戴维南等效电路如图 1.57(c)所示，则待求电流为

$$I = \frac{U_{OC}}{R_0 + 1} = \frac{10}{4/3} = 7.5\text{A}$$

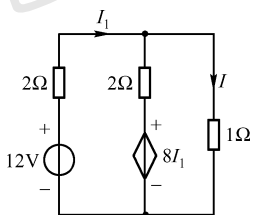


图 1.56 例 1.17 的电路

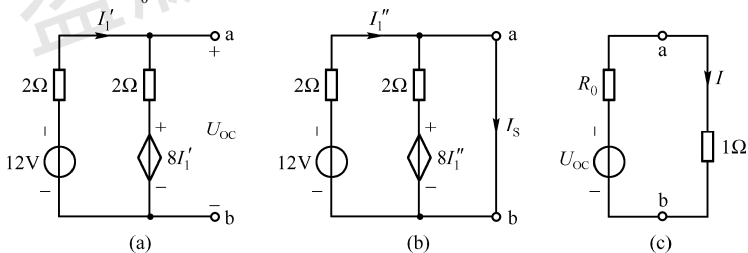


图 1.57 例 1.17 的解电路

使用戴维南定理求解含受控源的线性电路时，应注意戴维南等效内阻可以使用开路、短路法或者外加电源法求解。

使用叠加原理分析包含受控源的线性电路时，应注意以下两点：① 受控源一般不单独作用，要保留在各自的分电路中；② 当受控源的控制量的大小和方向发生变化时，其受控量的大小和方向也应随之改变。

2. 受控源在电子电路中的应用

在电子线路中经常会遇到由晶体管、场效应管、运算放大器等器件构成的电路，这些电子器件本身并不是电源，但在电路中却起到了类似于电源的作用。它们的输出电压（或电流）不是恒定值，而是受电路中某支路电压或电流的控制，因此在电路分析中，经常将它们等效为受控源。

例如，图 1.58(a)电路中，选择合适的电路参数使晶体管工作在放大区，此时它的输出电流 I_C 将受到输入电流 I_B 的控制，即 $I_C \approx \beta I_B$ ，而可以近似认为其与电压的大小无关。在满足一定条件时，

晶体管的 B、E 之间的电压近似为常数，改变基极电阻 R_B 的大小，即改变了基极电流 I_B 的大小，集电极电流 I_C 随之改变。该电路可以用图 1.58(b) 电路等效，其中，晶体管的输出端就是一个电流控制的电流源 (CCCS)。

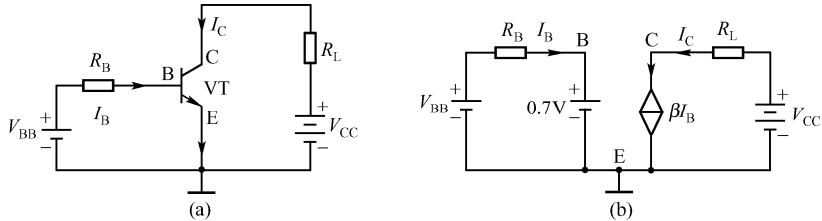


图 1.58 流控电流源电路

【思考与练习】

1-3-1 电路如图 1.59 所示，已知 $E = 100\text{V}$ ， $R_0 = 1\Omega$ 。求：(1) 计算负载电阻 R_L 为 1Ω 、 10Ω 和 100Ω 时的 U 与 I 各为多少。(2) 若内阻为零，再进行上述计算。

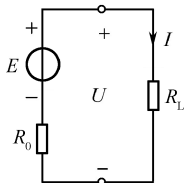


图 1.59 思考与练习 1-3-1

1-3-2 电路如图 1.60 所示，已知 $I_s = 100\text{A}$ ， $R_0 = 1000\Omega$ 。求：(1) 计算负载电阻 R_L 为 1Ω 、 10Ω 和 100Ω 时的 U 与 I 各为多少。(2) 若内阻为零，再进行上述计算。

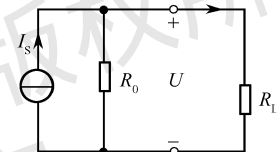


图 1.60 思考与练习 1-3-2

1-3-3 应用戴维南定理将图 1.61 电路化为等效电压源电路。

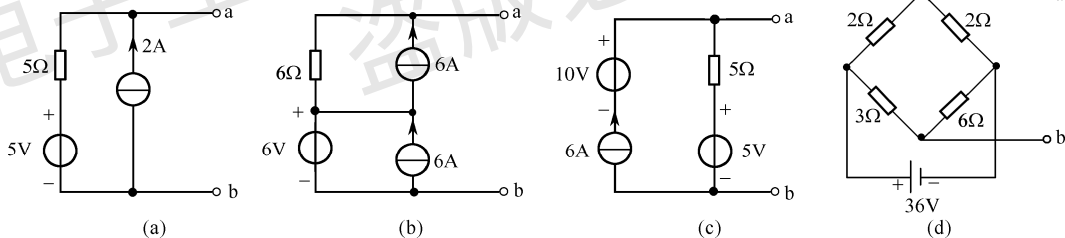


图 1.61 思考与练习 1-3-3

1-3-4 一个有源二端网络可以等效为一个含有内阻的电压源，能否等效为一个含有内阻的电流源？若可以，它们是什么关系？

1-3-5 用电位表示的电路如图 1.62 所示。求：(1) 参考点在什么位置？(2) 将其还原为习惯画法的电路。

1-3-6 计算图 1.63 电路中 b 点的电位。

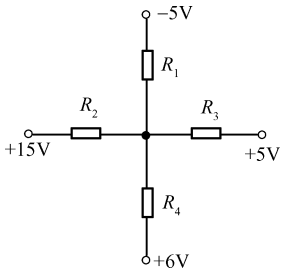


图 1.62 思考与练习 1-3-5

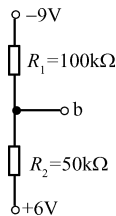


图 1.63 思考与练习 1-3-6



本章要点



关键词语



习题 1 的基础练习

习题 1

1-1 已知蓄电池充电电路如图 1.64 所示, 电动势 $E = 20\text{V}$, 设 $R = 2\Omega$, 当端电压 $U = 12\text{V}$ 时, 求电路中的充电电流 I 及各元件的功率, 并验证功率平衡的关系。

1-2 求图 1.65 电路中电流源两端的电压及通过电压源的电流。

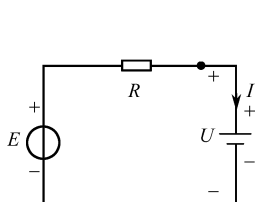


图 1.64 习题 1-1

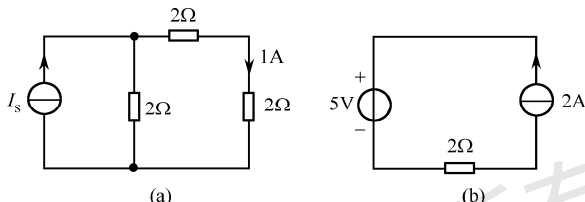


图 1.65 习题 1-2

1-3 有一个直流电源, 其额定功率 $P_N = 200\text{W}$, 额定电压 $U_N = 50\text{V}$, 内阻 $R_0 = 0.5\Omega$, 负载电阻 R_L 可调。求: (1) 额定工作状态下的电流及负载电阻; (2) 开路电压 U_{OC} ; (3) 短路电流 I_S 。

1-4 电路如图 1.66 所示, 求恒流源的电压、恒压源的电流及各自的功率。

1-5 电路如图 1.67 所示, 流过 8V 电压源的电流是 0A , 计算 R_x 、 I_x 和 U_x 。

1-6 试求图 1.68 电路中的 I 及 U_{ab} 。

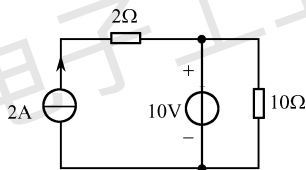


图 1.66 习题 1-4

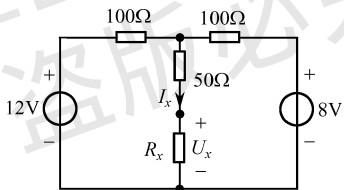


图 1.67 习题 1-5

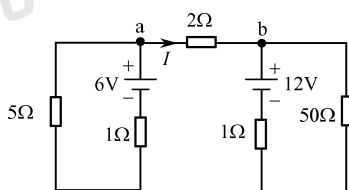


图 1.68 习题 1-6

1-7 用电压源和电流源的等效变换法求图 1.69 电路中的 I 。

1-8 用支路电流法求图 1.70 电路中的各支路电流。

1-9 电路如图 1.71 所示, 用结点电压法求电路中的结点电压 U_{ab} 。

1-10 用叠加原理计算图 1.72 电路中的 I_3 。

1-11 用戴维南定理计算图 1.73 电路中的 I 。

1-12 用戴维南定理计算图 1.74 电路中 R_1 上的电流 I 。

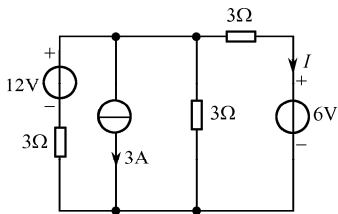


图 1.69 习题 1-7

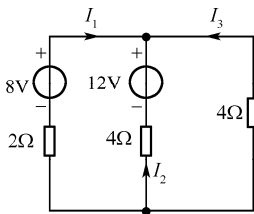


图 1.70 习题 1-8

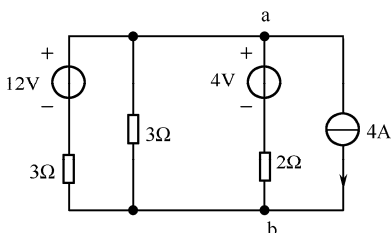


图 1.71 习题 1-9

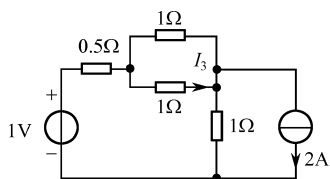


图 1.72 习题 1-10

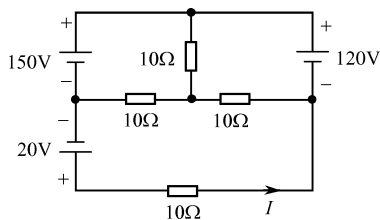


图 1.73 习题 1-11

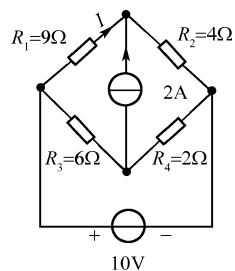
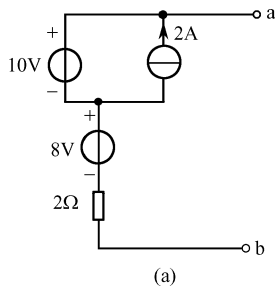
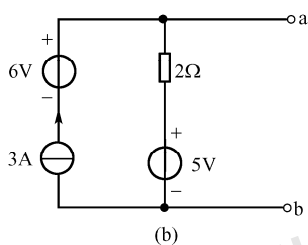


图 1.74 习题 1-12

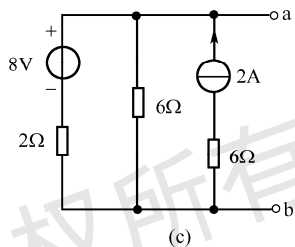
1-13 分别画出图 1.75 电路的戴维南和诺顿等效电路。



(a)



(b)



(c)

图 1.75 习题 1-13

1-14 分别用支路电流法、叠加原理、戴维南定理计算图 1.76 电路中的电流 I 。

1-15 在图 1.77 电路中，求开关断开和闭合两种状态下 a 点的电位。

1-16 求图 1.78 电路中 a 点的电位。

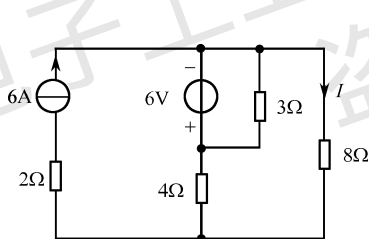


图 1.76 习题 1-14

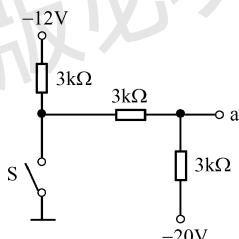


图 1.77 习题 1-15

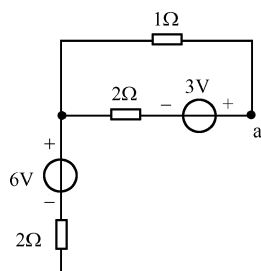


图 1.78 习题 1-16

1-17 试画出图 1.79 电路的戴维南等效电路。

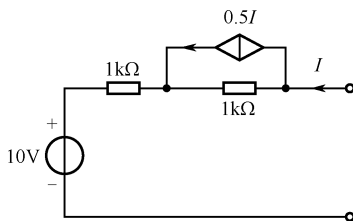


图 1.79 习题 1-17