

常用电子仪器维修

毛端海 戚堂有 李忠义 编著



机械工业出版社

本书较全面地介绍了指针式万用表、数字万用表、电子电压表、信号发生器、数字频率计、示波器、半导体管图示仪、直流稳压电源等常用电子仪器仪表的基本原理、维修方法及维修示例。为便于广大初学者学习这些仪器仪表的维修技术，在本书前五章简要介绍了电路及电子技术、电气维修基本工艺、电子仪器维护与选用、维修常用基本方法等内容。

本书主要面向初学电子仪器维修的维修人员，同时也可作为部队、厂矿、院校从事电子仪器维修的技术人员的参考书籍。

图书在版编目 (CIP) 数据

常用电子仪器维修/毛端海等编著. —北京：机械工业出版社，
2004.10
ISBN 7-111-15249-2

I. 常... II. 毛... III. 电子仪器—维修 IV. TM930.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 093070 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：曾 红 版式设计：张世琴 责任校对：张晓蓉

封面设计：陈 沛 责任印制：石 冉

北京中兴印刷有限公司印刷 · 新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ · 20.5 印张 · 502 千字

0 001—4 000 册

定价：35.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

前 言

电子测试仪器仪表是工厂、部队、院校和科研院所等必备的设备。一些常用的电子仪器仪表由于使用频繁、工作时间长，难免发生各种故障，而目前电子仪器仪表的维修还没有形成行之有效的服务网络，因而各单位基本上都是采取以自修为主、送修为辅的维修方式。考虑到诸如中小厂矿、基层部队等单位专业维修人员较少、维修技术水平相对较低、资料缺乏的实际情况，本书将电工电子技术基本知识、电气维修工艺、电子仪器维护使用及维修等诸多内容汇集一书，目的就是便于业余电气维修爱好人员从基本知识开始自学电子仪器维修的基本技术。

本书共 13 章，包括电子技术基础知识、电子仪器维修基本工艺、电子仪器维护的基本知识、检查电子仪器故障原因的基本方法、测试仪器的选用方法、指针式万用表的检修、电子电压表的检修、电子示波器的检修、半导体管特性图示仪的检修、数字万用表的检修、信号发生器的检修、直流稳压电源的检修、数字频率计的检修。

本书第 1、2、8、9 章由毛端海编写，第 3~7 章及第 13 章由戚堂有编写，第 10~12 章由李忠义编写，全书由毛端海统稿。本书编写过程中得到了刘光斌教授的大力支持。此外，本书是王汉功教授主编的维修丛书之一，他对该书始终给予了高度关注和支持。在此衷心地感谢两位教授的关心和帮助。

编 者

序

现代战争既是装备与装备、系统与系统之间的激烈对抗，也是装备技术保障能力的较量。武器装备交付部队后，能否真正形成战斗力，除加强部队训练，使指战员熟练掌握武器装备性能，正确使用和灵活运用外，大量工作是靠对武器装备实施维修和管理，使其随时保持良好的技术状态。因此，从这个意义上讲，装备维修是部队战斗力极其重要的组成部分。

二炮的武器装备集光、机、电、液多种高新技术于一体，结构复杂，故障率高，对维修的依赖性大，对维修人员的素质具有特殊的要求。他们应该是思维敏捷、知识面宽、技术精湛的新型维修工程技术人才，不仅要熟悉装备的结构原理，熟练掌握故障的分析判断方法和维修技能，而且要具备现代维修理论和多种学科知识。加强新型维修工程技术人才的培养，既是二炮装备工作加快发展的迫切需要，也是二炮部队战斗力形成与提高的紧迫要求，必须引起各级装备部门的高度重视。

为了加快二炮维修工程技术人才的培养，提高维修人员的理论水平和实际技能，二炮装备部综合计划部委托二炮工程学院王汉功教授主持编写了这套导弹武器装备维修工程丛书。丛书打破了具体型号的界限，按专业技术门类编写为：《修复工程学》、《内燃机维护与修理》、《弹道导弹瞄准光学设备检定与维修》、《常用电子仪器维修》、《液压系统维护与修理》等。丛书既有基础理论，又有针对性较强的专业技术；既有理论分析，又有具体实例，内容基本涵盖了导弹武器的各类技术装备，是一套理论性、实用性较强的维修工程丛书。

该丛书的出版发行，为院校和部队维修工程技术人才的培养提供了一套较好的教材。希望从事装备维修的工程技术人员，要认真学习，不断提高维修理论和维修技术水平，为二炮武器装备现代化建设做出新的更大的贡献。

值此丛书出版发行之际，谨向为丛书编写而付出辛勤劳动的同志们致以衷心的感谢！

张瑞
2000年2月27日

目 录

前言

第 1 章 电子技术基础知识	1
1.1 电路分析基础	1
1.1.1 电路的基本概念及模型	1
1.1.2 电路的基本定律	2
1.1.3 直流电路的基本分析方法	3
1.1.4 电路定理	7
1.1.5 电路中的谐振	10
1.2 基本放大电路	12
1.2.1 基本放大电路的性能指标	12
1.2.2 共发射极基本放大电路	13
1.2.3 共集电极基本放大电路	15
1.2.4 共基极基本放大电路	16
1.3 多级放大电路及其频率特性	16
1.3.1 多级放大电路的耦合方式	16
1.3.2 多级放大电路的电压放大倍数	17
1.3.3 多级放大电路的输入输出电阻	18
1.3.4 多级放大电路的频率特性	19
1.4 负反馈放大电路	19
1.4.1 负反馈的概念及分类	19
1.4.2 负反馈对放大电路性能的影响	21
1.4.3 多级负反馈放大电路	21
1.5 集成运算放大电路	22
1.5.1 运算放大电路的构成及特点	22
1.5.2 运算放大电路的基本接法及性能	23
1.5.3 运算放大电路的典型应用	24
1.6 数字电路基础知识	26
1.6.1 基本逻辑门电路	26
1.6.2 逻辑代数的基本概念	27
1.7 组合逻辑电路分析	29
1.7.1 组合逻辑电路的分析方法	29
1.7.2 组合逻辑电路的一般设计方法	30
1.7.3 编码器	31

1.7.4 译码器	32
1.8 时序逻辑电路分析	33
1.8.1 时序逻辑电路的分析方法	33
1.8.2 触发电路	33
1.8.3 寄存器	36
1.8.4 计数器	37
第 2 章 电子仪器维修基本工艺	39
2.1 线束制作工艺	39
2.1.1 概述	39
2.1.2 扎线图和工艺排线表	41
2.1.3 续线法扎线的工艺过程	42
2.1.4 线头处理方法	45
2.1.5 线束的修理	49
2.2 手工烙铁焊接工艺	49
2.2.1 焊接工具	49
2.2.2 焊料、焊剂	53
2.2.3 锡焊应具备的条件	56
2.2.4 焊接前的准备	57
2.2.5 手工锡焊技巧	60
2.2.6 拆焊	65
第 3 章 电子仪器维护的基本知识	67
3.1 概述	67
3.2 电子仪器维护基本措施	68
3.3 电子仪器使用注意事项	72
3.4 电子仪器检修的一般程序	74
3.5 电子仪器修理室的装备条件	75
第 4 章 检查电子仪器故障原因的 基本方法	78
4.1 观察法	78
4.2 测量电压法	79
4.3 测量电阻法	79
4.4 测量电流法	80

4.5	波形观测法	80	8.1.3	电子示波器的基本结构	142
4.6	信号寻迹法	80	8.2	SR-8 型二踪示波器的工作原理	143
4.7	信号注入法	81	8.2.1	示波管的工作原理	143
4.8	旁路法	81	8.2.2	整机框图	146
4.9	分割法	81	8.2.3	Y 轴偏转系统 (垂直放大系统)	146
4.10	替代比较法	81	8.2.4	X 轴偏转系统 (时基轴扫描系统)	157
第 5 章	测试仪器的选用方法	83	8.2.5	其他部分	166
5.1	电压测试仪器的选用方法	83	8.3	SR-8 型二踪示波器的检修	172
5.2	电流测试仪器的选用方法	85	8.3.1	开机烧熔丝	172
5.3	电路元件测试仪器的选用方法	86	8.3.2	低压电源插件	172
5.4	电子器件测试仪器的选用方法	88	8.3.3	显示控制电路及高频高压发生器	173
5.5	信号波形参数测试仪器的选用方法	100	8.3.4	Y 轴放大器	173
5.6	信号发生器的选用方法	102	8.3.5	X 轴放大器	174
5.7	稳压电源的选用方法	103	8.3.6	时基触发器	174
第 6 章	指针式万用表的检修	105	8.3.7	时基发生器	175
6.1	概述	105	8.3.8	Z 轴放大器	175
6.2	万用表的基本原理	106	8.3.9	电子开关	175
6.2.1	直流电流测量原理	106	8.3.10	校准信号	175
6.2.2	直流电压测量原理	109	8.3.11	故障检修实例	175
6.2.3	交流电压测量原理	110	8.3.12	SR-8 型二踪示波器的参考电位	177
6.2.4	电阻测量原理	113	第 9 章	半导体管特性图示仪的检修	179
6.2.5	电平测量原理	116	9.1	概述	179
6.3	万用表的检修程序	119	9.2	图示仪的工作原理	180
6.4	表头的一般整修	120	9.2.1	电路组成	180
6.5	万用表常见故障检修实例	123	9.2.2	阶梯信号发生器	181
6.6	万用表的使用与维护	126	9.2.3	阶梯放大器	194
第 7 章	电子电压表的检修	128	9.2.4	脉冲阶梯形成电路	201
7.1	概述	128	9.2.5	Y 轴、X 轴放大器	203
7.2	电子电压表的基本原理	130	9.2.6	集电极电源	206
7.3	电子电压表的检修程序	132	9.2.7	测试装置控制电路	209
7.4	电子电压表常见故障检修实例	133	9.3	XJ4810 型图示仪的维修	213
7.5	电子电压表的使用与维护	137	9.3.1	低压电源的维修	213
第 8 章	电子示波器的检修	139	9.3.2	高频高压及显示电路的维修	215
8.1	概述	139	9.3.3	阶梯信号电路的维修	216
8.1.1	电子示波器的基本参数	139	9.3.4	Y 轴、X 轴放大器的维修	219
8.1.2	示波器的分类	141	9.3.5	Y 轴和 X 轴作用选择开关的维修	221

9.3.6	集电极扫描的维修	223	11.4.1	XD-1 型仪器常见故障检修	268
9.3.7	二簇电子开关	225	11.4.2	XB-18 型仪器常见故障检修	276
第 10 章 数字万用表的检修		226	11.4.3	脉冲信号发生器常见故障检修	279
10.1	数字万用表的基本构成	226	11.5	信号发生器的定量测试方法	284
10.1.1	普通数字万用表的基本构成	226	第 12 章 直流稳压电源的检修		288
10.1.2	单片数字万用表的基本构成	227	12.1	直流稳压电源的组成及工作原理	288
10.1.3	数字/模拟条图双显示数字万用表的基本构成	228	12.1.1	概述	288
10.1.4	智能数字万用表的基本构成	228	12.1.2	直流稳压电源的基本组成	288
10.2	DT890C ₊ 型 3 ¹ / ₂ 位数字万用表的原理	230	12.1.3	稳压原理及其分类	289
10.2.1	DT890C ₊ 型数字万用表的性能特点	230	12.1.4	串联式稳压电源的典型电路	290
10.2.2	DT890C ₊ 型数字万用表的电路原理	230	12.1.5	稳压电源的主要性能指标	291
10.3	数字万用表的调试方法与故障检修	236	12.2	WY-17B 型晶体管稳压电源	292
10.3.1	数字万用表调试概述	236	12.2.1	电路组成	292
10.3.2	数字万用表的调试方法	238	12.2.2	主要技术参数	296
10.3.3	检修数字万用表的方法	243	12.2.3	使用方法和常见故障分析	297
10.4	DT890C ₊ 型数字万用表的调试方法与故障检修	246	12.3	WYJ-6B 型晶体管稳压电源	298
第 11 章 信号发生器的检修		251	12.3.1	电路组成和工作原理	298
11.1	概述	251	12.3.2	电路原理图及几点说明	300
11.2	信号发生器的基本原理	253	12.3.3	主要技术性能、使用注意事项和常见故障分析	303
11.2.1	音频信号发生器	253	12.4	5G14 集成稳压电源	305
11.2.2	高频信号发生器	258	12.4.1	电路组成和工作原理	305
11.2.3	脉冲信号发生器	261	12.4.2	应用举例	306
11.3	信号发生器的检修程序	267	第 13 章 数字频率计的检修		309
11.4	信号发生器常见故障检修实例	268	13.1	概述	309
			13.2	数字频率计的基本原理	310
			13.3	数字频率计的检修程序	315
			13.4	数字频率计常见故障检修实例	316
			参考文献		318

第 1 章 电子技术基础知识

1.1 电路分析基础

1.1.1 电路的基本概念及模型

实际电路是由一些电工设备及电气、电子元器件等按一定的方式组合起来的，电路的主要作用是进行能量转换及信号处理。在进行电路分析时，通常将实际电路用足以反映其电磁性能的理想电路元件的组合来代替，从而构成了与实际电路相对应的电路模型。

在电路分析中用电流 (I)、电荷 (Q)、电压 (U) 或磁通 (Φ) 等物理量来描述其中的过程，其中电流和电压是最主要的物理量。

如果在任何时刻，从具有两个端点的理想元件的某一个端点流入的电流恒等于从另一个端点流出的电流，并且元件两个端点间的电压值也是完全确定的，则这类元件称为集总 (参数) 元件。由集总元件构成的电路称为集总电路 (或具有集总参数的电路)。能够用集总电路来近似实际电路的条件是实际电路的尺寸要远小于电路工作时电磁波的波长，否则就是分布电路 (具有分布参数的电路)。

本书所涉及的电路都属于集总电路。

在电路中，电压和电流的实际方向有时很难立刻作出判断，或者电压和电流的实际方向是在不断改变的，因此在进行电路分析时需指定一个方向作为参考方向。如果参考方向与实际方向一致，则电流 i 和电压 u 为正值 (即 $i > 0$, $u > 0$)，如图 1-1 和图 1-2 所示。

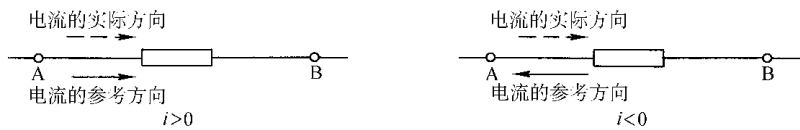


图 1-1 电流参考方向与实际方向的关系



图 1-2 电压参考方向与实际方向的关系

对一段电路或一个元件上电压的参考方向和电流的参考方向可以独立地任意指定。如果指定电流从标以电压正极 “+” 极性的一端流入，并从标以负极 “-” 极性的另一端流出，即电流的参考方向与电压的参考方向一致，则把电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向，如图 1-3 所示。

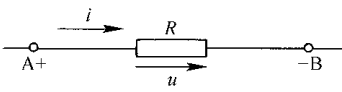


图 1-3 电流和电压的关联参考方向

1.1.2 电路的基本定律

电路的基本定律有三个，即欧姆定律、基尔霍夫电流定律（KCL）和基尔霍夫电压定律（KVL）。

1. 欧姆定律

在电压和电流的关联方向下，欧姆定律可表示为

$$u = Ri \quad (1-1)$$

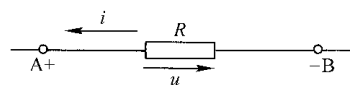


图 1-4 线性电阻元件

式中 R ——元件的电阻。

如果电阻元件电压的参考方向与电流的参考方向相反，如图 1-4 所示，则欧姆定律应写为

$$u = - Ri \quad (1-2)$$

2. 基尔霍夫电流定律（KCL）

首先定义几个名词：

- 1) 支路：电路中能通过同一电流的每个分支叫做支路。
- 2) 节点：三条以上支路的连接点叫做节点。
- 3) 回路：电路中的任一闭合路径称为回路。

以图 1-5 为例：图中共有三条支路， $a1b$ 和 $a2b$ 为含源支路， $a3b$ 为无源支路；图中 a 、 b 为节点；共有 $a2b1a$ 、 $a3b2a$ 和 $a3b1a$ 三个回路。

KCL 是英文 Kirchhoff's Current Law 的缩写，其内容是：在集总电路中，任何时刻，对任一节点，所有支路电流的代数和恒等于零。

通常假定流出节点电流取“+”，流入节点的电流取“-”。对于图 1-5 中节点 a ，有

$$-i_1 - i_2 + i_3 = 0, \text{ 即 } \sum i = 0 \quad (1-3)$$

KCL 也可描述为：在集总电路中，任何时刻，流入任一节点的支路电流必等于流出该节点的支路电流。

KCL 可以推广到包围几个节点的闭合回路，如图 1-6 所示，可以证明，图中 $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ 。

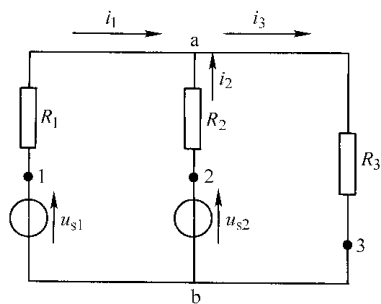


图 1-5 具有两个电源的电路

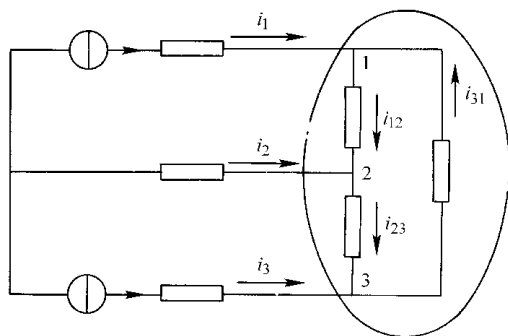


图 1-6 基尔霍夫电流定律的推广

3. 基尔霍夫电压定律（KVL）

KVL 是英文 Kirchhoff's Voltage Law 的缩写，其内容为：在集总电路中，任何时刻，沿

任一回路内所有支路或元件电压的代数和恒等于零，即

$$\sum u = 0 \tag{1-4}$$

应用 KVL 时，首先应指定回路的绕行方向，凡电压的参考方向与回路的绕行方向一致者，在该电压前面取 “+” 号；反之，则在前面取 “-” 号。图 1-7 所示回路的 KVL 可以写为

$$u_{AB} + u_{BC} + u_{CD} + u_{DE} - u_{FE} - u_{AF} = 0$$

或

$$u_{AB} + u_{BC} + u_{CD} + u_{DE} = u_{AF} + u_{FE}$$

基尔霍夫两定律仅与元件的连接有关，而与元件本身无关。不论元件是线性的还是非线性的，时变的还是非时变的，只要是集总电路，则 KCL 和 KVL 总是成立的。

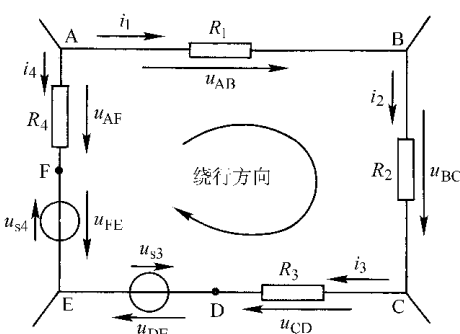


图 1-7 基尔霍夫电压定律

1.1.3 直流电路的基本分析方法

1. 直流电路的简化

由非时变线性无源元件、线性受控源和独立直流电源组成的电路称为直流电路。不太复杂的直流电路往往可以简化成较为简单的、便于进行分析计算的电路形式。简化包括电阻的串并联等效、电阻的Y联结与△联结的等效变换、电源的串并联等效以及电源的等效变换。

电阻的串并联等效是大家已经熟悉的，在此不再重复。

在电路中有时电阻的连接既不是串联也不是并联，如图 1-8a 所示， R_1 、 R_3 与 R_4 为Y联结（星形联结）； R_1 、 R_2 与 R_3 为△联结（三角形联结）。如果可以把 R_1 、 R_2 、 R_3 的三角形联结等效变换为由 R_a 、 R_b 、 R_c 构成的星形联结，如图 1-8b 所示，或者把 R_1 、 R_3 、 R_4 的星形联结等效变换成 R'_a 、 R'_b 、 R'_c 的三角形联结，如图 1-8c 所示，则 a、b 间的等

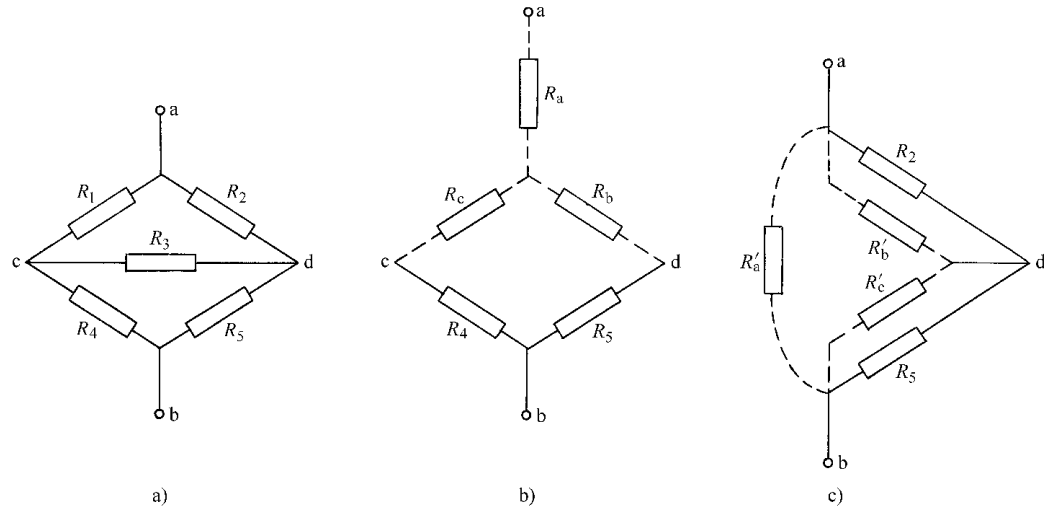


图 1-8 电阻的星形联结和三角形联结
a) 复杂联结 b) 星形联结 c) 三角形联结

效电阻便容易求出。

根据 KCL 定律，可以推导出图 1-9 中电阻星形联结与三角形联结的等效变换公式：

1) 从已知的星形网络的电导确定等效三角形网络的各电导

$$\left. \begin{aligned} G_{12} &= \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2 + G_3} \\ G_{23} &= \frac{G_2 G_3}{G_1 + G_2 + G_3} \\ G_{31} &= \frac{G_3 G_1}{G_1 + G_2 + G_3} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中 G ——电导， $G = 1/R$ 。

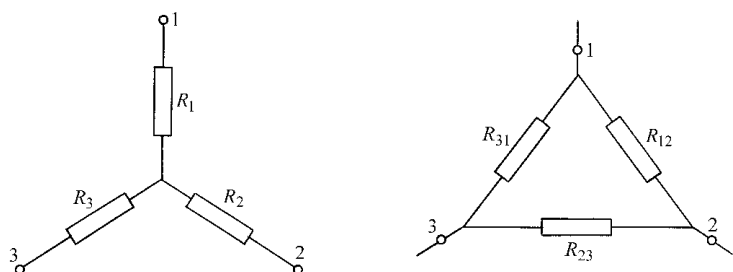


图 1-9 电阻星形联结与三角形联结的等效互换

2) 从已知的三角形网络的电阻确定星形网络的各电阻

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{R_{31} R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_2 &= \frac{R_{12} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_3 &= \frac{R_{23} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

为了便于记忆，可利用下面的一般公式表示：

$$\text{星形 (Y) 电阻} = \frac{\text{三角形 (\Delta) 相邻电阻的乘积}}{\text{三角形 (\Delta) 电阻之和}}$$

$$\text{三角形 (\Delta) 电导} = \frac{\text{星形 (Y) 相邻电导的乘积}}{\text{星形 (Y) 电导之和}}$$

在直流电路分析中，还会出现多个电压源及电流源的情况，有时为了分析计算，就必须对这些电压源或电流源进行合并、变换。

n 个电压源串联时，可以用一个电压源等效替代，这个等效的电压源的电压等于各个电压源电压之和。

n 个电流源并联时，可以用一个电流源等效替代，这个等效的电流源的电流等于各个电流源电流之和。

只有电压相等的电压源才允许并联，只有电流相等的电流源才允许串联。

对于电压源与电流源串联或并联电路的等效变换如图 1-10 所示。

电压源与电阻串联的电路可以等效变换为电流源与电导并联的电路，如图 1-11 所示。

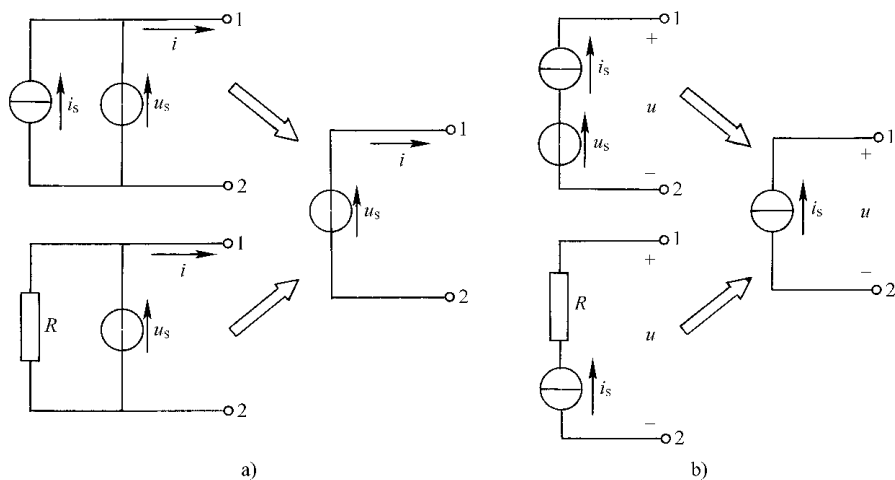


图 1-10 电源与支路的串联和并联
a) 电压源等效变换 b) 电流源等效变换

图中 u_s 、 R 、 i_s 、 G 应满足的关系是

$$G = \frac{1}{R}, i_s = \frac{u_s}{R} \quad (1-7)$$

2. 支路法

利用电路的等效变换及简化进行电路分析计算只适合于不太复杂的电路，对于复杂电路则应充分利用 KCL 和 KVL 两定律，采用电路方程来求解电路变量。支路法、回路法和节点法都是这类方法中常用的方法。

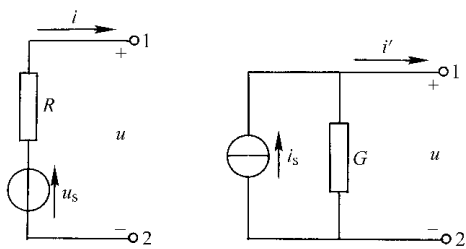


图 1-11 电压源与电流源的等效变换

支路法以支路电流作为电路变量，应用 KCL 和 KVL，列出与支路电流数相等的独立方程，从而解得支路电流。以图 1-12 所示电路为例，取支路电流 i_1 、 i_2 和 i_3 为电路变量，其参考方向如图所示。根据 KCL，有

节点 0 $i_1 + i_2 - i_3 = 0$

节点 1 $-i_1 - i_2 + i_3 = 0$

比较两式，显然只有一个方程是独立的，选取回路绕行方向，如图所示，根据 KVL，有

回路 1 $R_1 i_1 - R_2 i_2 = u_{s1} - u_{s2}$

回路 2 $R_2 i_2 + R_3 i_3 = u_{s2}$

回路 3 $R_1 i_1 + R_3 i_3 = u_{s1}$

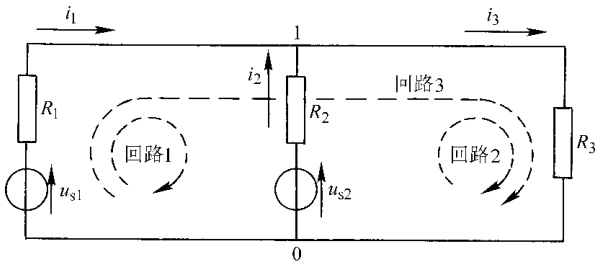


图 1-12 支路（电流）法

上面三个方程中，任何一个方程可由另外两个方程导出，即只有两个方程是独立的。因此可任选两个方程和一个节点方程构成方程组，解方程组可得 i_1 、 i_2 和 i_3 的唯一解。

独立方程数目的确定原则：

- 1) 对于 n 个节点的电路，其独立节点方程数等于 $(n - 1)$ 。

2) 对于 n 个节点, b 条支路的电路, 其独立回路方程数等于 $[b - (n - 1)]$ 。

3. 回路法

回路法以回路电流作为电路的变量, 根据 KVL 列出独立方程组, 然后求解电路变量。下面以图 1-13 所示电路为例说明回路法的基本步骤。

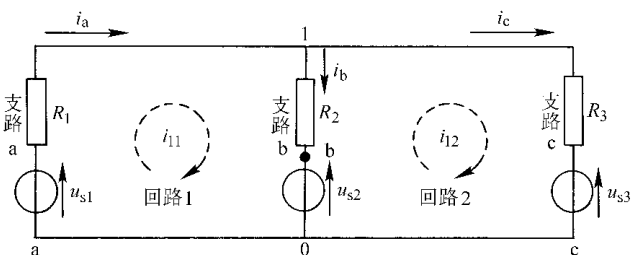


图 1-13 回路电流法

1) 选取独立的回路。图示电路含有三个回路, 其中明显的

回路是图中已标出的回路 1 和回路 2, 隐含的回路是由 u_{s1} 、 R_1 、 R_3 、 u_{s2} 四个电路元件构成的。当以回路电流为变量时, 只有两个回路是独立的, 通常为方便起见, 均取电路网孔作为独立回路 (平面电路中的网孔均是独立回路)。

2) 选定各回路电流的绕行方向。通常取顺时针方向有利于下一步列写回路电流方程。

3) 列出各回路电流方程。列写方法与一般单回路电路相同, 但要注意两个方面: 一是电路中电压源的极性; 二是两个回路共用电阻上的电压, 不可遗漏了相邻回路电流在其上引起的电压, 并注意方向。回路电流方程的形式有两种, 一种是把所有电压源列于等式右边; 另一种则将电压源也看作一般电路元件, 等式右边取 “0”, 要注意的是同一电压源在这两种形式中的符号是相反的。

$$\text{回路 1} \quad (R_1 + R_2) i_{11} - R_2 i_{12} = u_{s1} - u_{s2}$$

$$\text{回路 2} \quad (R_2 + R_3) i_{12} - R_2 i_{11} = u_{s2} - u_{s3}$$

或者

$$\text{回路 1} \quad (R_1 + R_2) i_{11} - R_2 i_{12} + u_{s2} - u_{s1} = 0$$

$$\text{回路 2} \quad (R_2 + R_3) i_{12} - R_2 i_{11} + u_{s3} - u_{s2} = 0$$

4) 求解方程组, 求出各回路电流。

5) 指定各支路中电流的参考方向, 由各回路电流可求得各支路电流。

4. 节点法

节点法一般以节点电压为电路的独立变量, 应用 KCL 列出与节点电压数相等的独立方程, 从而解得节点电压和支路电流。分析电路时, 任意选择某节点为参考节点, 其他节点与参考节点间的电压便是节点电压。节点电压的参考极性以参考节点处为 “-” 极性。以图 1-14 所示电路为例。

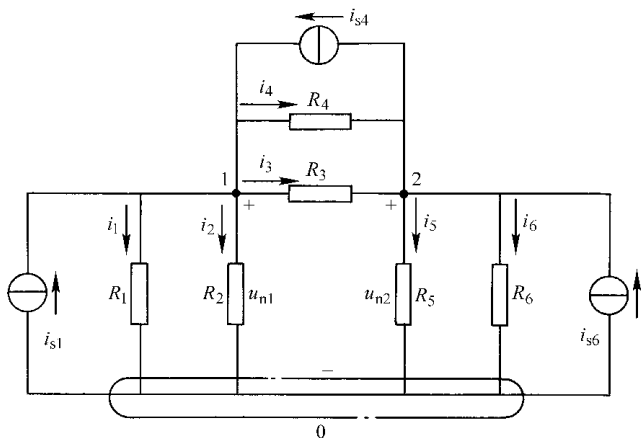


图 1-14 节点法

从图 1-14 中不难看出

$$\begin{aligned}
 i_1 &= G_1 u_{n1} & i_2 &= G_2 u_{n1} \\
 i_3 &= G_3 (u_{n1} - u_{n2}) & i_4 &= G_4 (u_{n1} - u_{n2}) \\
 i_5 &= G_5 u_{n2} & i_6 &= G_6 u_{n2}
 \end{aligned}$$

所以应用 KCL 可以得到下列方程：

$$\text{节点 1} \quad G_1 u_{n1} + G_2 u_{n1} + G_3 (u_{n1} - u_{n2}) + G_4 (u_{n1} - u_{n2}) = i_{s1} + i_{s4}$$

$$\text{节点 2} \quad -G_3 (u_{n1} - u_{n2}) - G_4 (u_{n1} - u_{n2}) + G_5 u_{n2} + G_6 u_{n2} = -i_{s4} + i_{s6}$$

解节点方程组，可得到各节点电压，进而求出各支路电流。

1.1.4 电路定理

对于复杂电路，无论是进行简化，还是解方程组都是非常繁琐的。有时，我们只要求解某一支路的电流或功率，并不需要分析所有支路，在这种情况下，应用前面所讲述的简化及分析方法未免太浪费时间，而下面的几个电路定理能帮助我们快速简化电路。

1. 叠加定理

叠加定理是线性电路的一个重要定理，其定义为：在线性电路中，任一支路电流（或支路电压）都是电路中各个独立电源（电压源或电流源）单独作用时在该支路产生的电流（或电压）的叠加（如图 1-15 所示）。

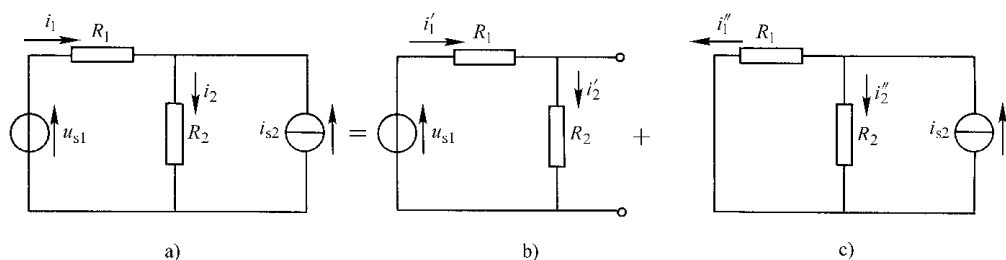


图 1-15 叠加定理

a) 多电源电路 b) 只考虑 u_{s1} 的作用 c) 只考虑 i_{s2} 的作用

根据叠加定理，可以把图 1-15a 看作是图 b 和图 c 的叠加。在图 b 中只考虑 u_{s1} 的作用， i_{s2} 不作用；而图 c 中只考虑 i_{s2} 的作用， u_{s1} 不作用。这样，在图 b 中

$$i'_1 = i'_2 = \frac{u_{s1}}{R_1 + R_2}$$

而在图 c 中

$$i''_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i_{s2}$$

$$i''_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i_{s2}$$

所以

$$i_1 = i'_1 + i''_1$$

$$i_2 = i'_2 + i''_2$$

应用叠加定理应注意：

- 1) 叠加定理仅适用于线性电路，非线性电路不适用。
- 2) 叠加时，电路的连接以及电路的所有电阻和非独立电源（如受控源）都不能变动。
- 3) 当考虑一个电源起作用时，其他所有电源应置零，即用短路代替电压源，用开路代替电流源。

4) 叠加时，要注意电流和电压的参考方向。

5) 功率不是电流和电压的一次函数，不能用叠加定理来计算。

2. 替代定理

给定任意一个线性电阻电路，其中第 k 条支路的电压 u_k 和电流 i_k 已知，那么这条支路就可以用一个电压等于 u_k 的独立电压源，或者用一个电流等于 i_k 的独立电流源来替代，替代后电路中全部电压和电流均将保持原值。

3. 戴维南定理

任何含源二端网络（图 1-16 所示虚线部分）对外电路来说都可以用一个电压源和电阻的串联组合来等效置换，此电压源的电压等于二端网络的端口开路电压，而电阻等于二端网络全部独立电源置零后端口的输入电阻，如图 1-17 所示。

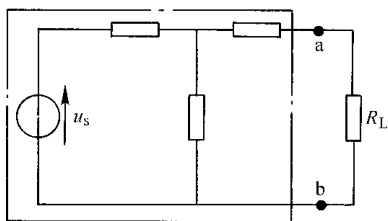


图 1-16 二端网络

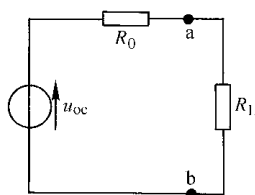


图 1-17 戴维南等效电路

下面举例说明此定理的应用方法。

例 在图 1-18a 中，求流过 R 的电流。

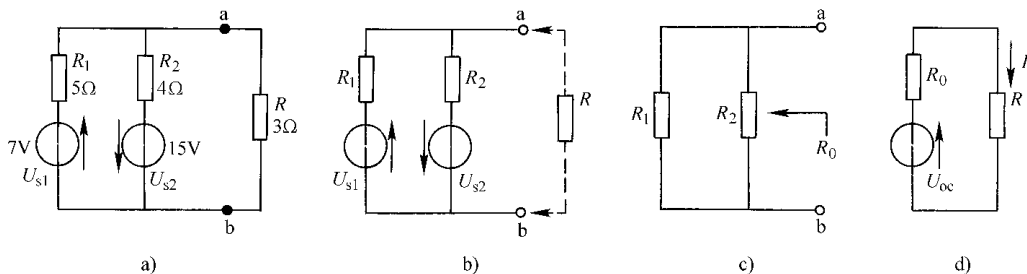


图 1-18 戴维南定理的应用

a) 电路 b) 开路电压计算电路 c) 输入电阻计算电路 d) 戴维南等效电路

解 1) 断开含 R 的支路，如图 1-18b 所示。

2) 计算开路电压 U_{oc} （即 U_{ab} ）。

因为

$$I' = \frac{U_{s1} + U_{s2}}{R_1 + R_2} = \frac{7 + 15}{5 + 4} \text{A} = \frac{22}{9} \text{A}$$

所以 $U_{oc} = U_{ab} = R_2 I' - U_{s2} = \left(4 \times \frac{22}{9} - 15\right) \text{V} = -\frac{47}{9} \text{V} \approx -5.2 \text{V}$

3) 求独立电源置零后端口输入电阻, 如图 1-18c 所示。

$$R_0 = R_1 // R_2 = \frac{5 \times 4}{5 + 4} \Omega = \frac{20}{9} \Omega \approx 2.2 \Omega$$

4) 图 1-18a 的戴维南等效电路如图 1-18d 所示, 则流过 R 的电流 I 为

$$I = \frac{U_{oc}}{R_0 + R} = -\frac{5.2}{2.2 + 3} \text{A} = -1 \text{A}$$

4. 诺顿定理

一个含独立电源、线性电阻和受控源的二端网络, 对外电路来说, 可以用一个电流源和电阻的并联组合来等效置换, 电流源的电流等于该二端的短路电流, 而电阻等于该二端网络的全部独立电源置零后的端口输入电阻。

举例如下:

例 求图 1-19a 电路的诺顿等效电路。

解 1) 求 a、b 端的短路电流, 如图 1-19b 所示。 I_{sc} 包括两部分, 一是由 U_{s1} 、 U_{s2} 产生的电流, 另一部分是电流源 I_{s3} 在 a、b 短路线上引起的电流。

$$\begin{aligned} I_{sc} &= I_{s3} + \frac{U_{s1}}{R_1 + R_2 // R_3} \frac{R_2}{R_2 + R_3} + \frac{U_{s2}}{R_2 + R_1 // R_3} \frac{R_1}{R_1 + R_3} \\ &= \left(2 + \frac{15}{20 + 20 // 3} \times \frac{2}{3} + \frac{5}{20 + 20 // 3} \times \frac{2}{3} \right) \text{A} = 2.5 \text{A} \end{aligned}$$

2) 求 a、b 端的等效输入电阻, 如图 1-19c 所示, 计算方法与戴维南定理的求法一样。

$$R_0 = \left(10 + \frac{20 \times 20}{20 + 20} \right) \Omega = 20 \Omega$$

3) 画出诺顿等效电路, 如图 1-19d 所示。

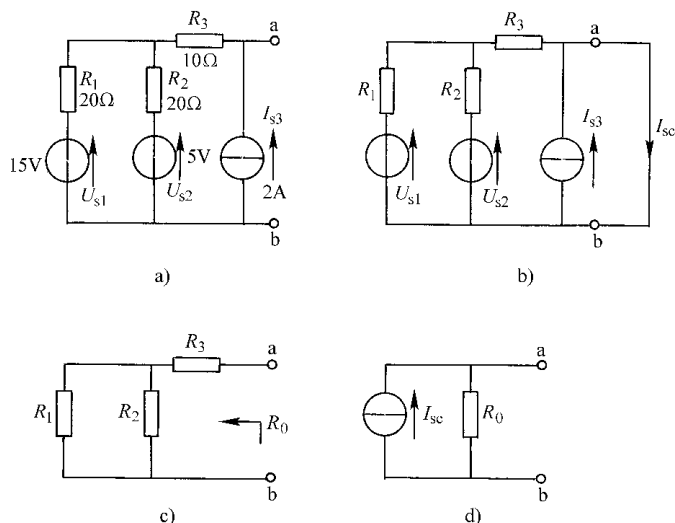


图 1-19 诺顿定理的应用

a) 电路 b) 短路电流计算电路 c) 输入电阻计算电路 d) 诺顿等效电路

1.1.5 电路中的谐振

1. 串联谐振电路

图 1-20 是 R 、 L 、 C 串联谐振电路的基本结构形式。 $u(t)$ 为正弦激励信号， $i(t)$ 为激励信号作用下回路产生的正弦电流信号。由于电路仅由线性元件组成，故 $i(t)$ 与 $u(t)$ 的频率相同。

电路的总阻抗 Z 是电阻 R 、电感的感抗 ωL 和电容的容抗 $1/(\omega C)$ 的矢量和，具有大小和方向。其大小为

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (1-8)$$

当 ω 为特定频率 ω_0 时，应满足

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (1-9)$$

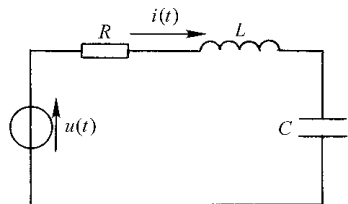


图 1-20 串联谐振电路

则总阻抗 Z 为纯阻性， $Z = R$ ，此时称电路处于谐振状态，则有

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{或} \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1-10)$$

ω_0 和 f_0 分别称为谐振角频率和谐振频率。

串联电路发生谐振时，其阻抗 Z 最小，且为纯电阻 R ，因而此时电路中的电流最大，并且和电压的相位相同。

将式 (1-8) 作一些变换：

$$\begin{aligned} |Z| &= \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \\ &= \sqrt{R^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} \omega_0 L - \frac{\omega_0}{\omega} \frac{1}{\omega_0 C}\right)^2} \\ &= \sqrt{R^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} \omega_0 L - \frac{\omega_0}{\omega} \omega_0 L\right)^2} \\ &= \sqrt{R^2 + (\omega_0 L)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} \\ &= R \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_0 L}{R}\right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} \\ &= R \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} \\ &= R \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)^2} \end{aligned} \quad (1-11)$$

其中

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R\omega_0 C} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1-12)$$

Q 称为串联谐振电路的品质因素。请访问：www.ertongbook.com