

“十二五”
国家重点图书出版规划项目

无线电



ARRL

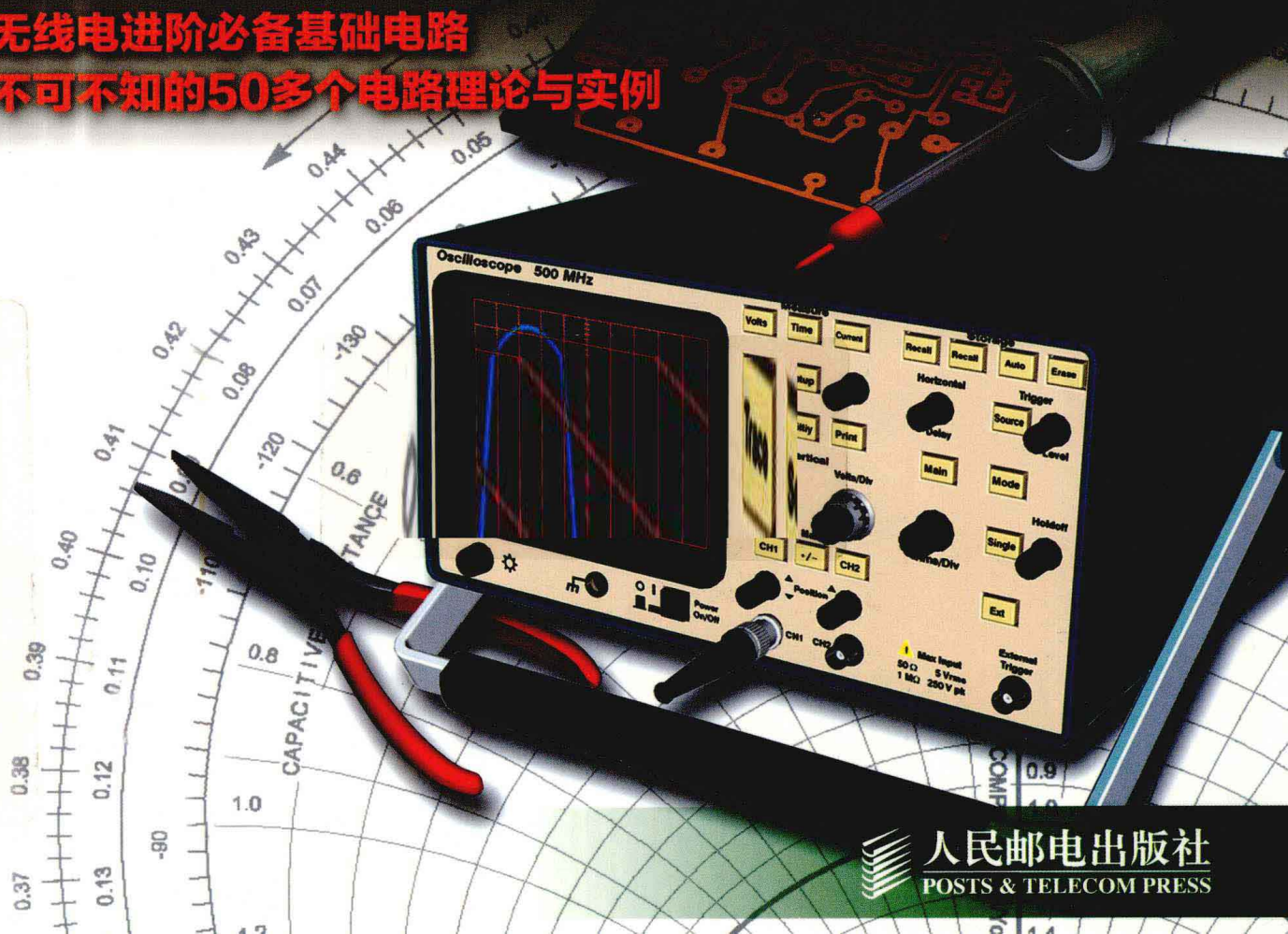
业余无线电丛书

无线电基础电路实作

【美】H.Ward Silver 著
赵辉 (BD6RA) 译

Hand on Radio Experiments

无线电进阶必备基础电路
不可不知的50多个电路理论与实例



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

“十二五”
国家重点图书出版规划项目

⊖ 业余无线电丛书 ⊖

无线电基础电路实作

Hand on Radio Experiments

【美】H.Ward Silver 著
赵辉(BD6RA) 译

人民邮电出版社
北 京

图书在版编目(CIP)数据

无线电基础电路实作 / (美) 西尔弗 (Silver, H. W.)
著; 赵辉译. — 北京: 人民邮电出版社, 2011. 7
(业余无线电丛书)
ISBN 978-7-115-25117-6

I. ①无… II. ①西… ②赵… III. ①电子电路
IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第047310号

版权声明

H. Ward Silver(N0AX): HANDS-ON RADIO EXPERIMENTS (ISBN: 0-87259-125-5)
Copyright ©2008 by The American Radio Relay League, Inc.
All rights reserved. No part of this work may be reproduced in any form except by written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by The American Radio Relay League, Inc. and POSTS & TELECOM PRESS.

本书简体中文版由美国业余无线电转播联盟授权人民邮电出版社出版。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制本书的任何部分。

版权所有, 侵权必究。

业余无线电丛书

无线电基础电路实作

-
- ◆ 著 【美】H. Ward Silver
 译 赵 辉 (BD6RA)
 责任编辑 房 桦
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
 邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 中国铁道出版社印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 800×1000 1/16
 印张: 17
 字数: 377 千字 2011 年 7 月第 1 版
 印数: 1—4 000 册 2011 年 7 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2010-2140 号

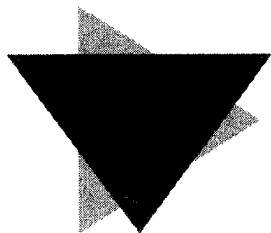
ISBN 978-7-115-25117-6

定价: 55.00 元

读者服务热线: (010)67132837 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号



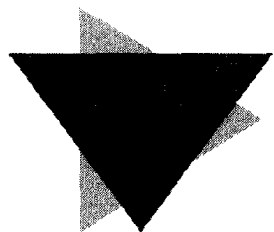
前言

2002 年末，当时的 *QST* 杂志出版人马克·威尔逊 (K1RO) 正在寻找用另外兴趣更为广泛的内容替代笔者每月在 *QST* 杂志的“无线电难题”栏目。我们讨论过一些想法，提出了每月刊出短的电子基础实验。当时也不敢肯定这些实验是否会成为读者喜爱的项目，但是我们最终决定试上几个月，看看反响。我们选定了“无线动手实验” (“Hands-On Radio”) 作为栏目名字，笔者为栏目准备了一个基础实验“共发射极放大器”。5 年过去了，实验热度不减，爱好者们纷纷动起了烙铁，在实验板上插接元器件，学会了怎样让自己的无线电设备工作。对这个栏目的反响令人非常满意，笔者感到高兴的是，一些专家也很关注笔者的编写内容，偶尔指出笔误，提出改进意见。许多读者建议把栏目的内容以书的形式出版，笔者非常感谢读者们热情洋溢的来信和鼓励。业余无线电爱好者一贯热衷奉献自己的技艺，动手实验准则当然与业余无线电活动密不可分。

从无线电早期开始，*QST* 杂志就一直注重技术项目，ARRL《业余无线电手册》在全世界被公认为是权威性参考书。这些作者肩负着教育、鼓励成千上万的业余无线电爱好者和实验者的重任，我就是其中的一员。

多格·德茅 (W1FB)、比尔·奥尔 (W6SAI)，还有许多其他作者的文章，激发了笔者动手制作的兴趣，使笔者最终成为一名电子工程师。在从事写作与教学这个第二职业的同时，笔者为有机会推进业余无线电爱好者引以为荣的传统感到感激和荣幸。

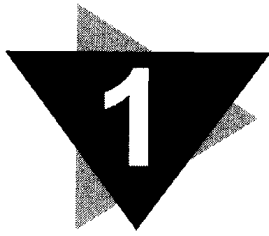
H. Ward Silver (N0AX)



目 录

第 1 章 电路基础	1
实验 28 基尔霍夫定律	2
实验 23 戴维南等效电路	7
实验 31 变压器	12
实验 37 阻尼系数	16
实验 43 磁环	20
第 2 章 半导体基本知识	25
实验 1 共发射极放大器	26
实验 2 发射极跟随放大器	30
实验 6 整流器和稳压二极管	35
实验 9 驱动电路的设计	40
实验 10 晶闸管的应用	45
实验 12 场效应晶体管	50
实验 19 电流源	54
实验 20 差分放大器	59
实验 27 共基极放大器	64
第 3 章 制作单元电路	69
实验 3 基本的运算放大器	70
实验 11 比较器	75
实验 13 衰减器	80
实验 14 光耦合器	86
实验 25 图腾柱输出电路	90
实验 26 固态高频开关	95
实验 32 加减计数器	100
实验 33 显示译码器	105

实验 36	声控发射电路 (VOX)	110
实验 48	射频峰值检波电路	115
实验 49	精密整流器	119
实验 50	电流 - 电压转换器	123
第 4 章	电源电路	128
实验 7	倍压电路	129
实验 8	线性稳压电源	133
实验 15	开关式稳压电源 (一)	138
实验 16	开关式稳压电源 (二)	142
实验 29	电荷泵	146
实验 34	充电器 (一)	151
实验 35	充电器 (二)	156
第 5 章	滤波器	161
实验 4	有源滤波器	162
实验 38	陷波滤波器	168
实验 45	滤波器的设计 (一)	173
实验 46	滤波器的设计 (二)	178
第 6 章	振荡器与缓冲器	182
实验 5	集成电路定时器	183
实验 17	相移振荡器	188
实验 30	多谐振荡器	192
实验 39	高频振荡器 (一)	196
实验 40	高频振荡器 (二)	200
实验 41	高频放大器	205
实验 42	晶体与 C 类放大器	210
第 7 章	传输线与阻抗匹配	215
实验 21	L 型匹配网络	216
实验 22	匹配电缆	221
实验 44	巴伦	226
实验 47	SWR 表	231
实验 52	双匹配电缆 (一)	235
实验 53	双匹配电缆 (二)	239
第 8 章	设计技巧	243
实验 18	频率响应	244
实验 24	热管理	247
实验 51	设计灵敏度	251
附录		255



电路基础

- 基尔霍夫定律
- 戴维南等效电路
- 变压器
- 阻尼系数
- 磁环

实验 28 基尔霍夫定律

谁是基尔霍夫？他的定律为什么这么重要？基尔霍夫定律是电路的基本定律，是学习并懂得电路的基础。在这个实验里，要给大家介绍两个定律并演示如何使用这两个定律。

需要学习的术语

- ◆ 支路——电路中至少有一个电路元件且通过同一电流的路径。
- ◆ 节点——两个或两个以上支路的连接点。
- ◆ 环路——电路中每次只能访问一次节点或一条支路的任何闭合路径。

引言

电路分析（这几个字很吓人）是根据古斯塔夫·基尔霍夫的电压、电流定律得来的，这两个定律是在 1845 年作为欧姆定律研究的延伸提出的。这两个定律也是能量守恒定律的结论。像在任何场合一样，在电子路中，产生的电能一定等于所消耗的能量。

为了理解这两个定律，应该使用正确的术语描述电路。首先，支路是指可以让电流流过的、具有两个端点的电路的路径——导线、电阻、线圈，或者装有任意电路的盒子。两条或以上的支路汇接点称为节点。环路是指电路中的一个完整的路径，电流的起点和终点都在同一个节点，但是从不会第二次访问同一个节点或支路。

基尔霍夫电流定律（KCL）

基尔霍夫的电流定律应用于节点，电流在节点汇集，如图 1 所示。即使像 R3 和 R4 之间的简单连接点也是一个两支路的节点（不要把电路图里的“连接点”和节点搞混淆）。如图 1 所示，一个节点可能有一个以上的连接点。

基尔霍夫的电流定律指出：流出、流入节点的所有电流的代数和为零。这似乎是合理的，因为电子是不会在电路的连接点堆积的！基尔霍夫的电流定律是说明能量守恒或平衡的一种方式，推动电流流过支路进入节点需要的能量一定等于使电流流出该节点所消耗的能量。

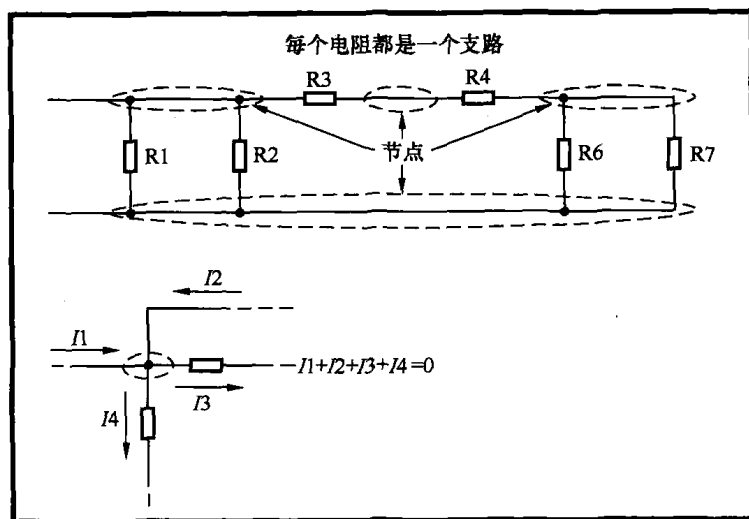


图1 基尔霍夫电流定律要求在节点的电流代数数和等于零。

基尔霍夫的电流定律可以写成：流入电流 = 流出电流，或者输入电流 - 输出电流 = 0，因此，流入、流出节点的电流符号相反。在支路中，任何点的电流都相同——我们无法让电流在支路中改变方向，或者改变电流值。

我们来看个例子。图2是个简单的电路，5个支路中的电流是任意分配的。 I_1 - I_5 被称作支路电流。3个节点分别标注为1、2、3。我们并不知道支路电流的流向，因为不知道 V 是正的，还是负的。指定的方向无关紧要。如果箭头画错了方向，计算出来的支路电流值时就是负的。

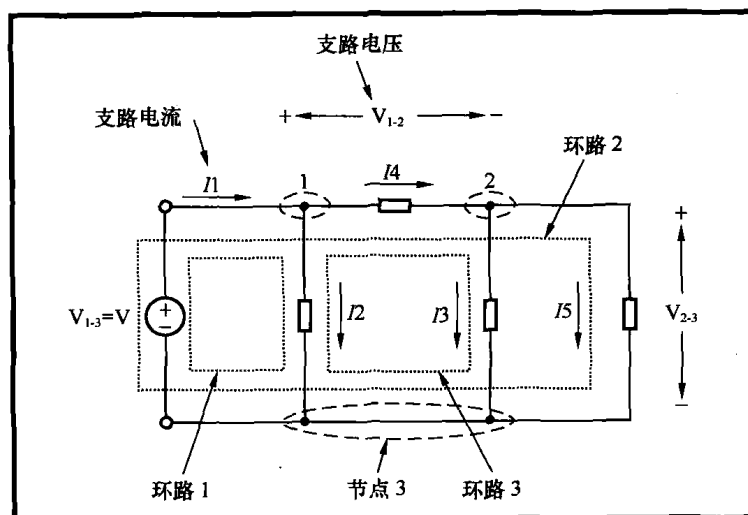


图2 这个电路画出了节点、支路、环路——分析电路的关键。

我们在 3 个节点用基尔霍夫的电流定律。先忽略灰色标出的环路。在节点 1，假设 I_1 是流入， I_2 、 I_4 是流出。在节点 2， I_4 是流入， I_3 、 I_5 是流出。在节点 3， I_2 、 I_3 、 I_5 是流入， I_1 是流出。如果决定流入一个节点的电流是正的，那么：

$$\text{节点 1: } I_1 = I_2 + I_4$$

$$\text{节点 2: } I_4 = I_3 + I_5$$

$$\text{节点 3: } I_2 + I_3 + I_5 = I_1$$

基尔霍夫的电流定律应用于分析电路中并联连接，例如，计算电流是如何在两个不同电阻间分配的，或者确定电流汇接效果。

基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫的电压定律也是能量守恒定律的结论。与基尔霍夫的电流定律不同，基尔霍夫的电压定律应用于环路。该定律指出：在一个闭合环路中，按一定的绕行方向，沿环路一周各支路电压的代数和等于零。在环路中，支路电压是指支路的一端到另一端的电压，例如图 2 中节点 1 和节点 2 之间的电压 $V_{1,2}$ 。举个例子：如果在节点 1 从电源的正端跟随环路 1，经过 I_2 的支路，返回节点 3 的电源负端，支路电压的代数和一定为零。如果跟随环路 2，经过 I_4 、 I_5 的支路，然后返回电源负端，其结果也是一样的。

为什么会有能量守恒？以离开电源负端的一个电子为例（该电源给电子提供所需的能量）。如果该电子选择跟随支路电流 I_2 ，那么，所有的能量在电子返回电源之前就被电阻消耗了。这个电子也可能跟随环路 2，在电阻中消耗所有的能量。在这两种情况中，电源分出的能量必须足够使电子“回家”。如果电子没有消耗掉所有的能量，那么返回到“家”的电子就会有剩余的能量，使电源存储的能量增加。基尔霍夫电压定律描述了能量是如何在能量源和消耗源之间达到平衡的。

对于基尔霍夫电流定律，必须正确对待极性。按照习惯，能量消耗源（例如电阻）两端的电压被假设为电流方向的正极）——电阻两端的电压按照电流方向是从正到负。通过能量源（例如电源）的电压按照电流方向是负的。对于基尔霍夫电压定律，如果不知道电压的极性，是允许推测的。如果错了，那么计算出来的电压值就是负的。

我们来看另一个例子。如图 2 所示，在环路 1、环路 2、环路 3 中运用基尔霍夫电压定律，方程式如下：

$$\text{环路 1: } I_2 \times R_2 - V = 0 \text{ 或者 } I_2 \times R_2 = V$$

$$\text{环路 2: } I_4 \times R_4 + I_5 \times R_5 - V = 0 \text{ 或者 } I_4 \times R_4 + I_5 \times R_5 = V$$

我们可以把能量源移到等号的另一端，把它们当做正的量，这样会方便一些。

$$\text{环路 3: } I_4 \times R_4 + I_3 \times R_3 - I_2 \times R_2 = 0$$

注意，在环路 3 里没有能量（电压）源。此外，由于 I_2 的指定方向， R_2 两端的电压是从负到正。大家看看，在电路中还有可能找到 3 个以上的环路吗？

在分析电压电路（或者查找电压电路故障）时要用到基尔霍夫电压定律。例如，分析共发射极放大电路的集电极时，使能量源和消耗源平衡的基尔霍夫电压定律等式是 $V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} + I_E R_E$ 。

把定律扩展到交流电路

把电阻换成阻抗，基尔霍夫电流定律、基尔霍夫电压定律仍能运用，这也包括了电阻和电抗。阻抗通常随频率变化，所以电路电压与电流等式也与频率有关。

例如，如果把电阻和电容并联，基尔霍夫电流定律将表明，在直流时，所有的电流流过电阻，随着频率的增加，电流会渐渐转移到电容。在电阻与电感串联时，基尔霍夫电压定律将表明，在直流时，电阻两端电压最大，随着频率的增加，电压将会渐渐变低。

练习基尔霍夫定律

现在，就在实际的电路中试验基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。这个电路的解可在无线电实验的网页上找到：www.arrl.org/tis/info/HTML/Hands-On-Radio。

- 使用如图 3 所示的电路，把串联电阻与并联电阻组成的混联电路看作一个等效电阻 R_{EQ} ，取代虚线框内的电路。

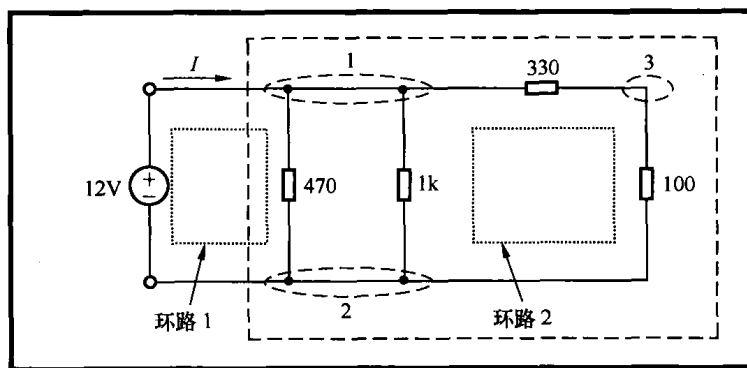


图 3 搭建一个实验电路来理解基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

- 解 $I = V/R_{EQ} = 12V/R_{EQ}$ 。
- 在 470Ω 和 $1k\Omega$ 电阻两端都有 12V 电压，这几个电阻流过哪些电流？
- 有哪些电流流过 330Ω 和 100Ω 电阻的串联组合？
- 在实验板上搭建一个电阻电路（不要接电源），测量从节点 1 到节点 2 的电阻值，看

看你计算的 R_{EQ} 值是否正确。

- 按图接上 12V 电源，测量电源电流 I 。与你的计算值比较。
- 测量流进、流出 3 个节点的所有电流，证实基尔霍夫电流定律。电流可以直接用电流表测量，也可以通过测量电阻两端电压，利用欧姆定律，间接测得电流。
- 测量两个环路的所有电压，证实基尔霍夫电压定律。不要忘记，测量电压时，应在环路中相同的绕行方向上测量。
- 改变电阻的值实验，然后计算、测量。识别剩余的两个环路，用基尔霍夫电压定律进行实验。用二极管代替 330Ω 。

采购清单

- 1/4W 的 100Ω 、 330Ω 、 470Ω 、 $1k\Omega$ 共 4 个电阻。

推荐阅读

ARRL《业余无线电手册》第 4 章有关串联与并联电阻部分。这个部分涵盖了基尔霍夫定律，也含有串联电阻、并联电阻组成的等式。

里克 (KB1HUE) 提供了以下网站，供学习参考：www.inform.umd.edu/EdRes/Topic/Chemistry/ChemConference/Software/ElectroSim/index.html。如果有 Macintosh (或者 Mac 模拟软件)，会很有趣。

实验 23 戴维南等效电路

在电子市场，买不到戴维南等效电路，但是，戴维南等效电路存在于两个端点——概念相当简单，可用于很多场合，是电子设计人员工具中的一个组成部分。

需要学习的术语

- ◆ 二元性——两个相反量的对称性，例如：电压与电流、电阻与电容，这就可以用这两种术语分别描述电路了。
- ◆ 等效电路——与原电路表现相同的电路。

引言

在实验 27 中，你已经通过测量共基极放大电路的输出阻抗接触过戴维南等效电路（所有上述实验都可在 www.arrl.org/tis/info/HTML/Hands-On-Radio 看到）。放大电路的输出就像一个完美的与测得的电阻串联的信号源。

有两种提供电能的方式：电压或电流方式。理想的能量源是这样的：在提供能量的同时还能保持额定的电压和额定的电流。例如，如图 1 所示的理想电压源，可通过连接的电阻满足欧姆定律（ $I = V/R$ ），无论电阻是 $1\text{M}\Omega$ 还是 $1\mu\Omega$ 。

理想源是个很灵活的东西。它实际上并不存在，只要求逼近理想源。如果需要制作一个运放组成的滤波器，那么，电压源（供电电源）只需要提供几毫安就能够接近理想源，满足需求。如果需要制造电网，那么就需要火力或水力发电站的发电机作为电能源才行。

实际的电压源只能提供有限的电力并提供恒压或恒流。如果用灯泡使用电池的电流，如图 1 电路所示，输出电压就会下降，这是由电池的内阻抗或电源阻抗造成的。我们可以把电池等效为与内阻（ R_S ）串联的理想电压源（ V_S ）。随着输出电流流过内阻，电池两端的电压 V_L 就会下降：

$$I = V_S / (R_S + R_L) \quad \text{式 [1]}$$

$$\begin{aligned} V_L &= V_S - IR_S = V_S - V_S R_S / (R_S + R_L) \\ &= V_S [1 - R_S / (R_S + R_L)] \end{aligned} \quad \text{式 [2]}$$

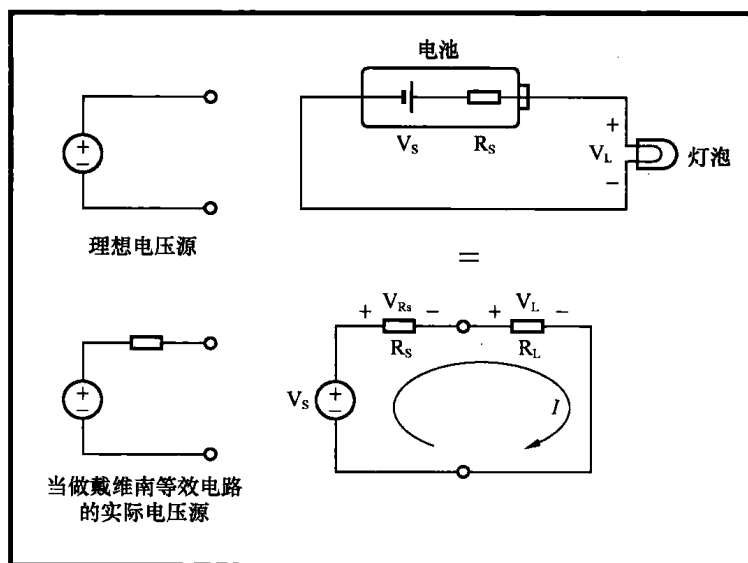


图 1 用理想电压源和电阻串联构成戴维南等效电路。

式 1 表明，对于实际的电压源来说，随着 R_L 的增加，输出电压会下降，相反， R_L 减小，电压会上升。如果 R_L 是无限的（没有负载），输出电压或端电压将与理想电源电压一样，因为没有电流流过内阻。如果 R_L 为零（短路），那么电流限制为 V_s/R_s 。

戴维南

根据维基百科 (www.wikipedia.com): “莱昂·夏尔·戴维南 (1857 ~ 1926 年) 是法国电报工程师，他把欧姆定律延伸到分析复杂的电气电路。”戴维南的主要遗产是简单的，但是有力地声明：对于由任何电压源、电阻组成的电路，这个电路的两个端子的表现能够完全地被一个包含单一的理想电压源与一个电阻串联的电路代替，这个理想电压源叫做戴维南电压 (V_{TH})，这个电阻叫做戴维南电阻 (R_{TH})，这就是戴维南定理。电源与电阻一起组成了如图 1 所示的戴维南等效电路。

这个想法非常厉害。如果有一个原始电路，这个电路内部无论多复杂，你只能看见外部的两个端子，那么，你无法说出这个电路是个完整的电路还是该电路的戴维南等效电路。你知道的只有这两个外部端子的表现。戴维南定理也可用于交流信号和交流电路，使用交流信号源和阻抗。总而言之，只要所有的电源和元器件对于电压和电流呈线性，这个定理就是正确的。

等效电路

在设计与分析电路时，可以很容易地用简化的、有同样作用的电路来替代电路中的某一

部分，这就是等效电路。例如：在分析放大电路时，需要了解输入端要连接的电路的特性。因为不想涉及信号源的整个电路，所以就用戴维南等效电路来替换信号源。在实验 27 里，测得的输出阻抗就是戴维南电阻。

等效电路不一定非要戴维南等效电路。如果可以用一个由串联电阻组成的不同的电路来替代由并联电阻组成的电路，那么新的电路就是原始电路的串联等效电路（用相反的方法，还有并联等效电路）。仅是在直流有相同响应的电路是直流等效电路。所有的“等效电路”意味着可以用来替换一个电路，但不影响其外部表现。

测量戴维南等效电路

我们通过确定 V_{TH} 和 R_{TH} 来计算戴维南等效电路。电池是很好的电压源，但仍有一些内阻。如何计算内阻？我们可以用测量输出阻抗同样的方法。图 2 所示为两个步骤和如何通过测量确定 V_{TH} 和 R_{TH} 。

- 取一节 1.5V AAA 电池或 9V 电池。切勿使用较大的电池，因为电池可以提供的过大电流足以造成烫伤或者把电池烧毁。
- 负载电阻是 $100\Omega/1W$ 的电阻。电阻可以购买，或者用几个小瓦数的电阻组成。用表测出确切的值。不一定非要 100Ω ， $25 \sim 100\Omega$ 都可以。不要用灯泡，因为灯丝电阻会随着温度上升，阻值发生很大的变化。
- 不接负载。测量电池开路电压。因为 R_{TH} 没有电流流过，所以电压同 V_{TH} 。
- 把电压表接到电阻的引脚上，用钳子或镊子把电阻引脚直接接在电池的电极上，不要使用夹子或其他连接头。不要用手指握电阻器或电阻引脚，因为可能会很烫。
- 电压将跌落至 V_L 。新电池的电压不会跌落太多。通过降低 R_L 可以加大电池电压跌落，注意要有足够的耗散功率（ $P = V^2/R$ ）。
- 用图 2 所示的方程确定 R_{TH} 。先祝贺一下：你刚刚测试了电池的戴维南等效电路。无论电池里有什么——更多的电池、化学药品，或者有趴在轮子上的小仓鼠——都能够被一个理想电压源 V_{TH} 和电阻 R_{TH} 取代。
- 用相同类型的新电池、旧电池分别实验，观察它们的戴维南等效电路是如何因为电压幅度而变化的。再试用其他类型的电池。一定要注意避免负载电阻过热。

图 2 中的图形画出了确定 V_{TH} 和 R_{TH} 的过程。当没有从电源取电流时，开路电压和戴维南电压相等。如果把输出端短路，电流被 R_{TH} 限制至 I_{SC} 。 V_{OC} 和 I_{SC} 之间直线的斜率的负倒数等于 V_{TH} 。一般不建议使用短路，因为可能会损坏被测试电路。使用具有安全电流的中间点，从这一点到开路点之间直线的斜率，确定 R_{TH} 。

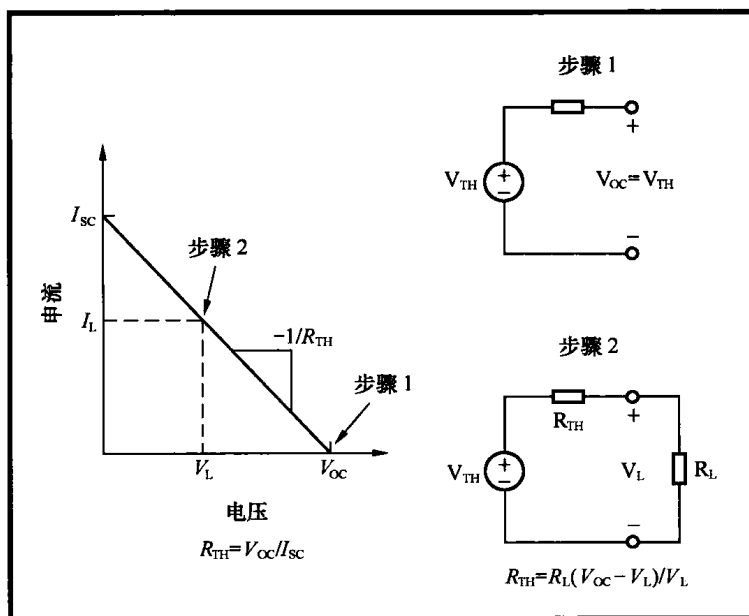


图 2 戴维南等效电路值可以通过对电压、电流的简单测量来确定。

诺顿等效电路

还有另外一种方法，使用理想电流源和并联电阻，形成等效电路，这就是诺顿等效电路，见图 3。无论端子接什么负载，理想电流源都能提供一个固定量的电流。感到惊讶的是，在诺顿等效电路和戴维南等效电路里， R_{TH} 值是相同的。

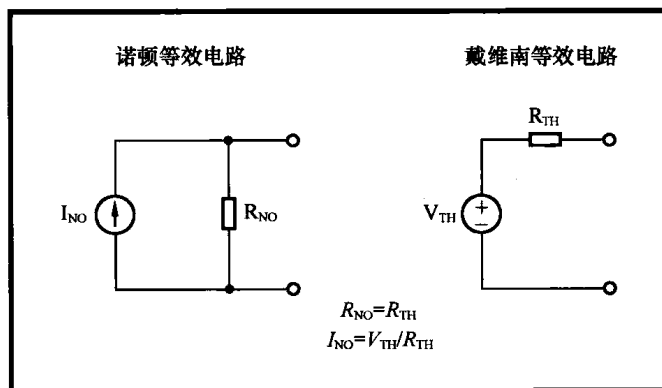


图 3 诺顿等效电路和戴维南等效电路在输出端的表现是一样的，可以直接相互替换。

如果短路戴维南电路， $I_{sc} = V_{TH}/R_{TH}$ 。如果输出是开路，两个端的电压是 $I_{sc} \times R_{TH} = V_{oc} = V_{TH}$ 。通过用值为 I_{sc} 的电流源代替戴维南电压源建立诺顿等效电路，其两端接 R_{TH} 。在输出端可以得到同样的电流、电压图形。

二元性的挑战

戴维南电路和诺顿电路是电子二元性的窗口。在这里，电的行为用电流和电压来定义。其他二元性的量包括电阻和电容、阻抗和导纳、串联和并联、节点与网孔（见实验 28）。使用一个参数或另一个参数只是是否方便的问题，对于电能和电功率来说，其答案往往是一样的。

采购清单

- AAA 电池或 9V 电池
- 1W/100 Ω 电阻

推荐阅读

ARRL《业余无线电手册》第 4 章讨论了戴维南等效电路和诺顿等效电路。在 www.allaboutcircuits.com/vol_1/chpt_10/7.html 有更为广泛的讨论。该网页也有其他电子电路领域的链接。