

应用电路理论

矩阵和计算机方法

〔英〕P. R. 阿德拜 著

韶能仁 舒贤林 译

科学出版社

1986

内 容 简 介

本书是1980年出版的英国剑桥大学电气与电子工程丛书之一。全书共分九章,内容包括:基本电路理论(第一章),网络的矩阵分析、传递函数分析和状态变量分析(第二、六、七章),非线性直流分析(第三章),节点导纳矩阵法(第四章),双口网络分析(第五章),以及灵敏度分析和容差分析(第八、九章)。

本书填补了基本电路理论和计算机辅助设计之间的空白,内容新颖、概念清晰。全书附有较多的应用实例,在每章末都有小结和习题。书中还给出了五个主要计算机程序,可供读者借鉴和参考。

本书可供高等院校电子和电气工程、物理和计算机等专业的教师、学生和研究生作为教学参考书,也可供这些领域的工程师、设计师和科研工作者参考。

APPLIED CIRCUIT THEORY

Matrix and Computer Methods

Ellis Horwood Limited, 1980

应用电路理论

矩阵和计算机方法

〔英〕P. R. 阿德拜 著

舒贤林 译

张建荣 校

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1986年3月第一版

开本: 850×1168 1/32

1986年3月第一次印刷

印张: 14 1/2

印数: 0001—6,100

字数: 376,000

统一书号: 15031·699

本社书号: 4473·15—7

定价: 4.10 元

目 录

译者的话

序言

第一章 基本电路理论	1
1.1 集总参数电路	1
1.2 基尔霍夫定律	3
1.3 特勒根定理	5
证明 (5) 例 1.1 (6)	
1.4 定常电路	7
1.5 线性电路	7
叠加 (9) 例 1.2 (9)	
1.6 正弦稳态分析	10
例 1.3 (13)	
1.7 非线性电路	15
线性化 (15) 非线性直流分析 (16) 非线性瞬态分析 (16)	
1.8 电路元件	17
非独立源 (17) 阻抗变换器与反变换器 (20) 电源 (21)	
1.9 等效电路	21
罗森 (Rosen) 定理 (22) 星形-三角形变换 (22) 密尔曼 (Millman) 定理 (23) 戴维南-诺顿 (Thévenin-Norton) 定理 (23) 替代定理 (24)	
1.10 小结	24
进修读物 (25) 习题 (25)	
第二章 网络的矩阵分析	30
2.1 网络拓扑	30
图 (30) 树 (31) 割集 (33) 例 2.1 (35) 环集 (37)	

例 2.2 (38) 对偶性 (39)	
2.2 矩阵分析法	40
标准支路 (40) 割集矩阵 (42) 环集矩阵 (45) 关联矩阵 (47) 网孔分析 (50) 例 2.3 (52)	
2.3 有源电路	57
转移阻抗耦合 (58) 互感 (60) 转移导纳耦合 (61) 例 2.4 (62) 普遍化 (64)	
2.4 阻抗变换器与反变换器	65
理想变压器 (67) 负阻抗变换器 (67) 回转器和负阻抗反变换器 (69) 互感 (69)	
2.5 计算机程序设计	70
用 RNODE 程序的直流电路分析 (71) 例 2.5 (73)	
2.6 小结	74
进修读物 (75) 习题 (75) 附录 (78)	
第三章 非线性直流分析	80
3.1 具有一个非线性电阻的电路	80
一维牛顿迭代法 (80) 非线性电阻网络 (81) 二极管偏压问题 (83) 例 3.1 (85) 几何解释 (86) 电路解释 (86)	
3.2 一般非线性电路	89
推广的牛顿迭代法 (89) 用牛顿迭代法进行分析 (90) 例 3.2 (93) 非线性直流节点分析法 (96)	
3.3 计算上的难点	97
标度 (97) 例 3.3 (98) 收敛性 (99) 一般非线性 (101)	
3.4 有源器件模拟	101
双极晶体管 (102) 埃伯斯-莫尔模型参数的确定 (105) MOS 晶体管 (111)	
3.5 计算例题	114
例 3.4 (115) 例 3.5 (117)	
3.6 小结	121
进修读物 (121) 习题 (121)	
第四章 节点导纳矩阵法	126

4.1 节点导纳矩阵	127
节点导纳矩阵的填写 (127) 节点电压直接求解 (130) 高斯 矩阵消去法 (131) LU 分解 (133) 网络简化法 (134) 稀 疏矩阵 (135) 例 4.1 (137)	
4.2 导纳参数	139
多端网络 (139) 节点加添 (140) 节点移除 (141) 网络 并联 (144) N 端口网络 (145) 例 4.2 (149)	
4.3 小信号模型	151
晶体管电容模型 (153) 小信号晶体管 π 模型 (155) 运算放 大器模型 (161)	
4.4 计算机程序设计	164
用 ACNLU 程序分析交流电路 (164) 程序输入 (165) 分析 和输出 (166) 操作控制 (167) 例 4.3 (168)	
4.5 小结	171
进修读物 (171) 习题 (171) 附录 (176)	

第五章 双口网络分析..... 182

5.1 双口网络	182
N 端网络 (182) Y 参数(短路导纳参数) (184) Z 参数(开 路阻抗参数) (185) A 参数(传输或链接参数) (185) B 参 数(反向传输参数) (186) H 参数(混合参数) (187) G 参数 (逆混合参数) (188) 参数换算 (188) 具有端接的双口网络 (189) 例 5.1 (193)	
5.2 双口网络的互连	194
并联-并联连接 (195) 串联-串联连接 (195) 串联-并联连 接 (196) 并联-串联连接 (197) 级联连接 (197) 反向级 联连接 (198) 有效性 (199) 端子变换 (200)	
5.3 电路元件的传输参数	203
阻抗元件 (203) 非独立源 (206) 阻抗变换器与反变换器 (206) 串联和并联连接的双口网络 (207)	
5.4 电路分析	208
一般过程 (208) 例 5.2 (209) 例 5.3 (211) 布线算子电	

路描述 (213)	
5.5 计算机程序设计	215
用 2PORT 程序分析线性电路 (215) 程序编排方式 (219)	
例 5.4 (222) 例 5.5 (224)	
5.6 小结	226
进修读物 (226) 习题 (226) 附录 (230)	
第六章 传递函数分析	235
6.1 网络函数	235
拉普拉斯变换 (236) 用拉普拉斯变换分析网络 (237) 线性网络函数 (245) 双口网络函数 (246) 节点导纳矩阵网络函数 (248)	
6.2 S 域分析	251
拓扑法 (252) 例 6.1 (256) 有源网络 (258) 例 6.2 (260) 用计算机作拓扑分析 (262) NAM 求逆法 (266) 例 6.3 (270) 信号流图法 (272) 例 6.4 (278)	
6.3 响应	281
频率响应 (282) 瞬态响应 (283)	
6.4 计算机程序设计	286
用 TOPSEN 程序作传递函数分析 (286) 例 6.5 (292)	
6.5 小结	296
进修读物 (296) 习题 (297) 附录 (300)	
第七章 状态变量分析	309
7.1 状态方程的形成	309
例 7.1 (310) 例 7.2 (313) 线性定常网络 (314) 例 7.3 (319) 过剩元件网络 (321) 例 7.4 (325) 网络函数 (327)	
7.2 状态方程的解	329
利用拉普拉斯变换求解 (330) 例 7.5 (331) 利用特征值求解 (333) 例 7.6 (336) 西尔威斯特(Sylvester)定理 (338) 矩阵的对角线化 (338) 利用矩阵对角线化求解 (342) 例 7.7 (344) 利用数值积分求解 (346)	
7.3 小结	349

进修读物 (350) 习题 (350)

第八章 灵敏度分析..... 353

8.1 灵敏度测量 353

绝对灵敏度 (353) 相对与半相对灵敏度 (355) 定理 (356)
例8.1 (358)

8.2 灵敏度分析法 359

微分法 (359) 差分法 (360) 节点分析 (361) 伴随网络
(364) 例8.2 (365)

8.3 频域灵敏度 367

例8.3 (369)

8.4 传递函数灵敏度 371

分子灵敏度和分母灵敏度 (374) 极点灵敏度和零点灵敏度
(375) 对元件偏差的传递函数灵敏度 (375) 对极点、零点和
系数偏差的传递函数灵敏度 (376) 频域灵敏度 (378) 时域
灵敏度(379) 例8.4 (379)

8.5 线性化直流灵敏度 381

温度灵敏度 (382) 例8.5 (384)

8.6 计算机程序设计 386

采用 RNODE 子程序 2000 的灵敏度 (386) 例 2.5(续) (388)
采用 ACNLU 子程序 6000 的节点电压灵敏度 (389) 例 8.6
(390) 采用 ACNLU 子程序 8000 的电压增益灵敏度 (392)
例 4.3(续) (395)

8.7 小结 395

进修读物 (395) 习题 (396) 附录 (398)

第九章 容差分析..... 401

9.1 元件变化 402

分立元件 (402) 集成电路元件 (405) 高斯分布 (407) 均
匀分布 (408)

9.2 最坏情况分析 409

例 9.1 (410) 大变化灵敏度 (411) 例 9.2 (414)

9.3 矩量法 415

例 9.3 (417) 容差域 (421)	
9.4 随机取样	423
随机数的产生 (424) 相关随机数 (426) 计算机程序 (428)	
例 9.4 (431) 例 9.5 (434)	
9.5 小结	436
进修读物 (437) 习题 (438) 附录 (441)	
名词索引.....	444

第一章 基本电路理论

电路与系统设计是设计工程师的创造性的工作，而不是计算机的创造性工作。可是，正象分析器、数学模型器、模拟器和电网网络优选器那样，在设计过程中计算机几乎是一种必不可少的工具。今天，许多系统的主要部分都是集成电路，它比几年前的分立元件电路复杂上千倍。对于这样大规模的电路，作为设计的最重要阶段的分析，必须是系统的、精确的和经济的。网络理论的应用通过矩阵方法提供了一种适合于数字计算的方法，并且在计算机辅助设计的这个概括性题目下，这种方法也是能够作相当大的改进。

许多读者对下面将要研究的一些网络理论是熟悉的，尤其是本书的开始两章。第一章简要地复习一下基本电路理论，第二章给出电路分析的基本方法。为了使直流、交流、瞬态、灵敏度和容差分析等方法在本书的其余部分得以发展，我们把这些基本方法都表示成矩阵形式。所以，即使熟悉这项工作的人也要重视第二章，因为这使电路分析适应了矩阵和计算机方法。

1.1 集总参数电路

电磁理论告诉我们，每当加速电子时就会产生能量辐射。因此，在任何电流随时间变化的电路中，总有能量的辐射和损失。可是，产生的电磁波波长与电路的实际尺寸相比通常是很大的，所以能量损失可忽略不计。

辐射的能量可以忽略不计的那种电路叫做集总参数电路，把集总的电路元件相互连接起来就可以得到这种电路。

当然，集总参数元件和集总参数电路是实际元件和电路的理想化模型。假定集总参数电路的外形尺寸可忽略不计，因而能够

精确地对它进行分析。若分析的是取决于工作频率的实际电路，那么它的性能是否会象预期的一样就很难说。因此，所分析的电路并非实际的电路，而是以若干假定为条件画成电路图形式的电路模型。在这些假定下，在模拟实际电路的性能时，牺牲一些精度就可以简化电路分析。贯穿本书的最重要假定是：电路为集总参数的，因而遵守基尔霍夫定律。

不是集总参数的那种电路叫做分布参数电路。

通常，具体设计分布参数电路的尺寸以便在它们的工作频率下利用电磁波的特点。例如，电视天线是要接收从别的天线发射来的能量。因此，接收天线的形状和尺寸就要设计成能从某一特定方向有选择地接收所需要的频带。分布参数电路的一个不大明显的例子就是电力系统。相应于 50Hz 频率的波长为 6000km，电力系统的尺寸可以与之比拟，因此可以认为电力系统是分布参数电路。

对于读过电路与电子学初级课程的学生来说最常见的电路元件如电阻器、电容器、电感器、晶体管和电压源应该是熟悉的。我们假定这些元件的集总形式具有零值的实际尺寸，因而它们在一-点上与电路的电压或电流相互作用。每个元件有两个或更多的端点，通过这些点，使它与别的元件连接起来而形成电路。

电路中有两个或两个以上端子连接起来的点叫做节点。连接于电路两节点间的两端元件叫做支路。

图 1.1(a) 所示电路具有编号为 0, 1, 2 和 3 的四个节点，以及用箭头表示电流方向而标以 $i_1, i_2, \dots, i_6$ 的六个支路。

支路电压是支路两端点间的电压，支路电流是通过支路的电流。

电压的极性用图 1.1(b) 和 1.1(c) 加以说明，按照惯例，支路电压与支路电流方向相反。因为靠选电流方向和靠正负号惯例都可以选定极性，极性的表示或者用箭头，或者用正号与负号，两者同时使用是多余的。在具有正弦电源或其他与时间有关的电源的电路中，极性表示正变化的方向。

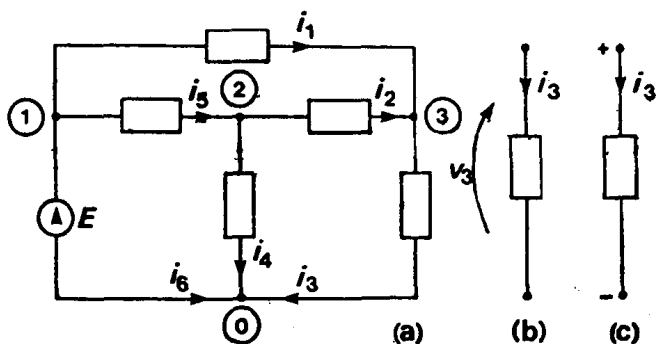


图 1.1 (a) 桥 T 型电路; (b), (c) 支路正负号惯例

并非所有的教科书都用同样的惯例来表示电压极性，常用类似图 1.1(b)那样的箭头指示电压降。本书所用的惯例保证得到所测实际电路的电压和电流具有象电路图上那样相同的方向。此惯例的另一个结果是，支路电压与支路电流的乘积代表输送给支路元件的功率。

1.2 基尔霍夫定律

基尔霍夫电流定律(KCL)和电压定律(KVL)是决定电路电压和电流的两个基本定律。在集总参数电路的假设下，它们可由麦克斯韦方程求得。

基尔霍夫电流定律指出，在任一时刻，进入一个集总参数电路元件的电流总和等于零。

基尔霍夫电压定律指出，在集总参数电路中，在任一时刻，环绕一个闭合路径的电压总和等于零。

把一个节点看成是一个电路元件就可以引出基尔霍夫电流定律，所以进入电路节点的电流总和为零。此外，还可以把一个电路分成两半，每一半都看成是具有端子数比通常要大得多的简单元件。进入被分开的半个电路的电流总和为零。应用于一个电路元件、一个电路节点和一个被分开电路的基尔霍夫电流定律可用图

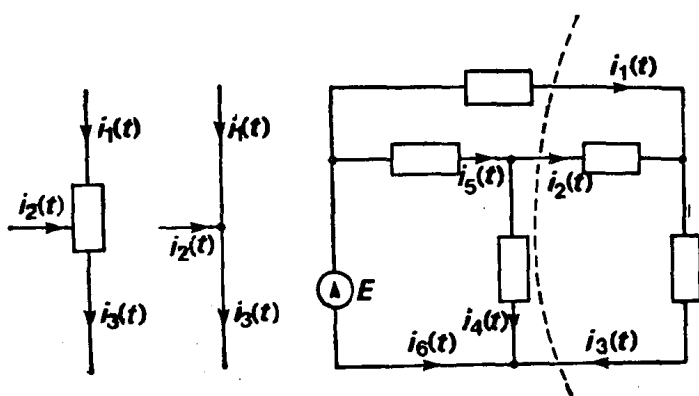


图 1.2 基尔霍夫电流定律

1.2 加以说明。在每种情况下基尔霍夫电流定律表明

$$i_1(t) + i_2(t) - i_3(t) = 0.$$

在图 1.2 中表示为一条虚线的电路分割，以后我们将把它明确地定义为割。

在每个节点上应用基尔霍夫电流定律可得出图 1.2 中电路的节点方程为

$$-i_1 - i_5 - i_6 = 0$$

$$i_5 - i_2 - i_4 = 0$$

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

$$i_3 + i_4 + i_6 = 0.$$

环绕闭合路径或通常所称的回路，应用基尔霍夫电压定律可求得电路的回路方程。利用三个明显的回路和外回路，我们得到

$$E - v_5 - v_4 = 0$$

$$-v_1 + v_2 + v_5 = 0$$

$$v_4 - v_2 - v_3 = 0$$

$$E - v_1 - v_3 = 0.$$

对于该电路中的更复杂的回路，可以得出另外三个方程。

上面这两组方程是线性的；它们表示电路中电流和电压的线性约束关系，这种关系仅仅是由于电路连接造成的。除假定元件

为集总参数的之外,对它们本身并没加以研究. 可以看出,不但节点方程组,而且回路方程组都是线性相关的,因为任何一个方程都能够表示成其余三个方程的线性组合.

1.3 特勒根定理

特勒根定理应用于遵守基尔霍夫定律的任何网络; 它主要是这样一种论点, 即在集总参数网络中能量是守恒的. 现在让我们来研究支路电流为 $i_1, i_2, \dots, i_n$ 和相应支路电压为 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 的 n 支路网络.

特勒根定理指出,在任一时刻, 总和 $\sum_{k=1}^n v_k i_k$ 等于零.

我们已经注意到, 支路电压和支路电流的乘积给出输送到支路的功率. 所以, 由含有电源的一个支路供给电路的总功率, 必须被余下的支路吸收, 这样能量是守恒的.

证明

研究网络中连接在节点①和节点⑤间的支路. 在电路中引入一个参考点, 如图 1.3 所示, 我们可以确定相对于该点的节点电压 e_r 和 e_s .

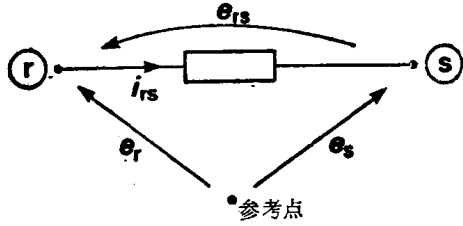


图 1.3 特勒根定理

于是

$$e_{rs} = e_r - e_s,$$

同时, 供给支路的功率为

$$e_{rs} i_{rs} = e_r i_{rs} - e_s i_{rs}.$$

因此对网络中的全部支路来说，供给支路的总功率将以总和的形式给出

$$\sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n e_{rs} i_{rs} = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n (e_r i_{rs} - e_s i_{rs}).$$

这可重写为

$$\sum_{r=1}^n e_r \sum_{s=1}^n i_{rs} - \sum_{s=1}^n e_s \sum_{r=1}^n i_{rs}.$$

$\sum_{s=1}^n i_{rs}$ 项可以判明是进入节点①的全部电流的总和，根据基尔霍

夫电流定律它等于零。同样 $\sum_{r=1}^n i_{rs}$ 项可以判明为离开节点⑤的全部电流的总和，因此也是零。所以供给网络各支路的功率总数等于零。

上述证明唯一所作的假设是：电路是集总参数的，而且遵守基尔霍夫定律。这并不涉及具体的元件值或类型，只要支路电流遵守基尔霍夫电流定律和支路电压遵守基尔霍夫电压定律。实际值可以是任意的。

例 1.1

在桥式电路(图 1.4)中，令支路电压和电流取任意值，验证一下特勒根定理。

给定遵守基尔霍夫定律的任意支路电压和电流，我们得出

$i_1 = 2$	$v_1 = -12$	$i_1 v_1 = -24$
$i_2 = 1$	$v_2 = 2$	$i_2 v_2 = 2$
$i_3 = 1$	$v_3 = 13$	$i_3 v_3 = 13$
$i_4 = 3$	$v_4 = 1$	$i_4 v_4 = 3$
$i_5 = 4$	$v_5 = -11$	$i_5 v_5 = -44$
$i_6 = 5$	$v_6 = 10$	$i_6 v_6 = 50$
$\sum_{k=1}^6 i_k v_k = 0$		

应当检查支路电压和电流这两组数,可见它们满足基尔霍夫定律,同时应当试用另一组数来验证特勒根定理的有效性。

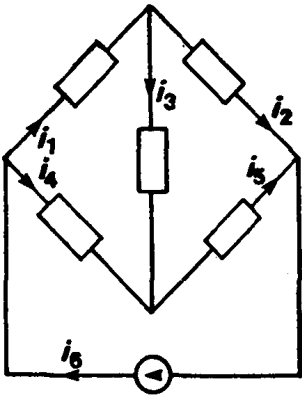


图 1.4 桥式电路

1.4 定 常 电 路

在任一瞬时,基尔霍夫定律和特勒根定理应用于任何集总参数电路。在大多数电路中,通常元件的数值是固定的,仅仅在一个长时期内由于温度变化和老化元件值才改变。

若函数 f 与时间无关,则一个具有激励电压或电流 x 与输出电压或电流 y 而以特性曲线 $y = f(x)$ 表示的电路是定常的。

应当注意,函数 f 取决于象电阻和电容之类的电路元件值,正是这些值,对时间来说必须保持不变。当然,可预期电路变量 x 和 y 随时间改变。我们假定本书研究的所有电路都是定常的。

1.5 线 性 电 路

具有激励电压或电流 x 以及输出电压或电流 y 的电路,只要 y 正比于 x ,也就是只要 $y = f(x)$ 且 $ky = f(kx)$,那么电路是线

性的。

电路的所有元件都包含在这个线性的解释中，因为它们就是电路的组成部分。电阻器、电容器和电感器在制造厂规定的工作范围内，一般接近于线性。但通常由于内部发热、电压击穿和磁芯饱和之类的效应，所有实际的元件都是非线性的，这些效应改变着元件值，还取决于施加的电压。

正象我们将要看到的，线性的假设大大简化了电路分析。即使电路只能达到近似线性，采取这种假设仍然是重要的。虽然近似与假定线性有关，那些只用于线性电路的分析方法，却可以帮助了解电路性能。为了精确起见，通常把非线性分析用一个计算机程序来实现，但这种分析的缺点是使人不易理解。

线性的假设具有几个重要结果。如果我们考虑激励 x 的变化为 Δx ，那么在 y 方面就引起一个相应的变化 Δy 。在线性电路中，这些是成比例的，因此

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x}{x} = k$$

并且

$$\Delta y = f(\Delta x). \quad (1.1)$$

所以，由恒定电源的变动而产生的电路电压和电流的变化，是不以电路本身的标称值为转移的。此外，还因为

$$1 + \frac{\Delta y}{y} = 1 + \frac{\Delta x}{x} = 1 + k,$$
$$(y + \Delta y) = f(x + \Delta x), \quad (1.2)$$

可见电源变动的的影响是叠加在标称值上的。

如果认为变量 Δx 和 Δy 与标称值 x 和 y 相比是很小的，那么只对变化部分所作的分析叫做小信号分析。它与用来确定标称值的大信号分析分别进行。通常，大信号分析意味着含有非线性分析，然而，正如前面已见到的，在线性电路中大信号和小信号具有成比例的结果。

叠加

叠加原理指出,一个线性电路由 n 个电源 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 激励,当这些电源各个单独施加时,给出输出 $y_1, y_2, \dots, y_n$,当这些电源集中一起施加时,该电路将给出输出 $\sum_{k=1}^n y_k$.

令电源不互相影响,于是方程(1.1)和(1.2)的性质就可以通过叠加而推广到具有多于一个电源的线性电路.

这个原理的应用意味着,一个完整的分析包含着对电路中每个电源的单独分析.所有其余的独立电压源短路,同时所有其余的独立电流源开路,但任何非独立源,例如晶体管 g_m ,必须保持工作.

例 1.2

确定图 1.5 所示电路中电阻器 R_2 的两端点之间的电压.

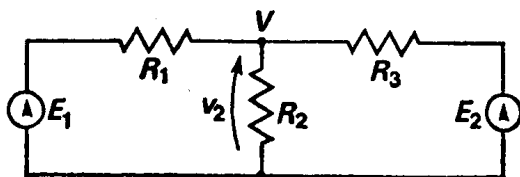


图 1.5 叠加的例子

在 E_2 短路的情况下,

$$\begin{aligned} v_2 &= E_1 \left(\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \right) / \left(R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \right) \\ &= \frac{R_2 R_3 E_1}{(R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3)}. \end{aligned}$$

在 E_1 短路的情况下,

$$v_2 = \frac{E_2 R_1 R_2}{(R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3)},$$