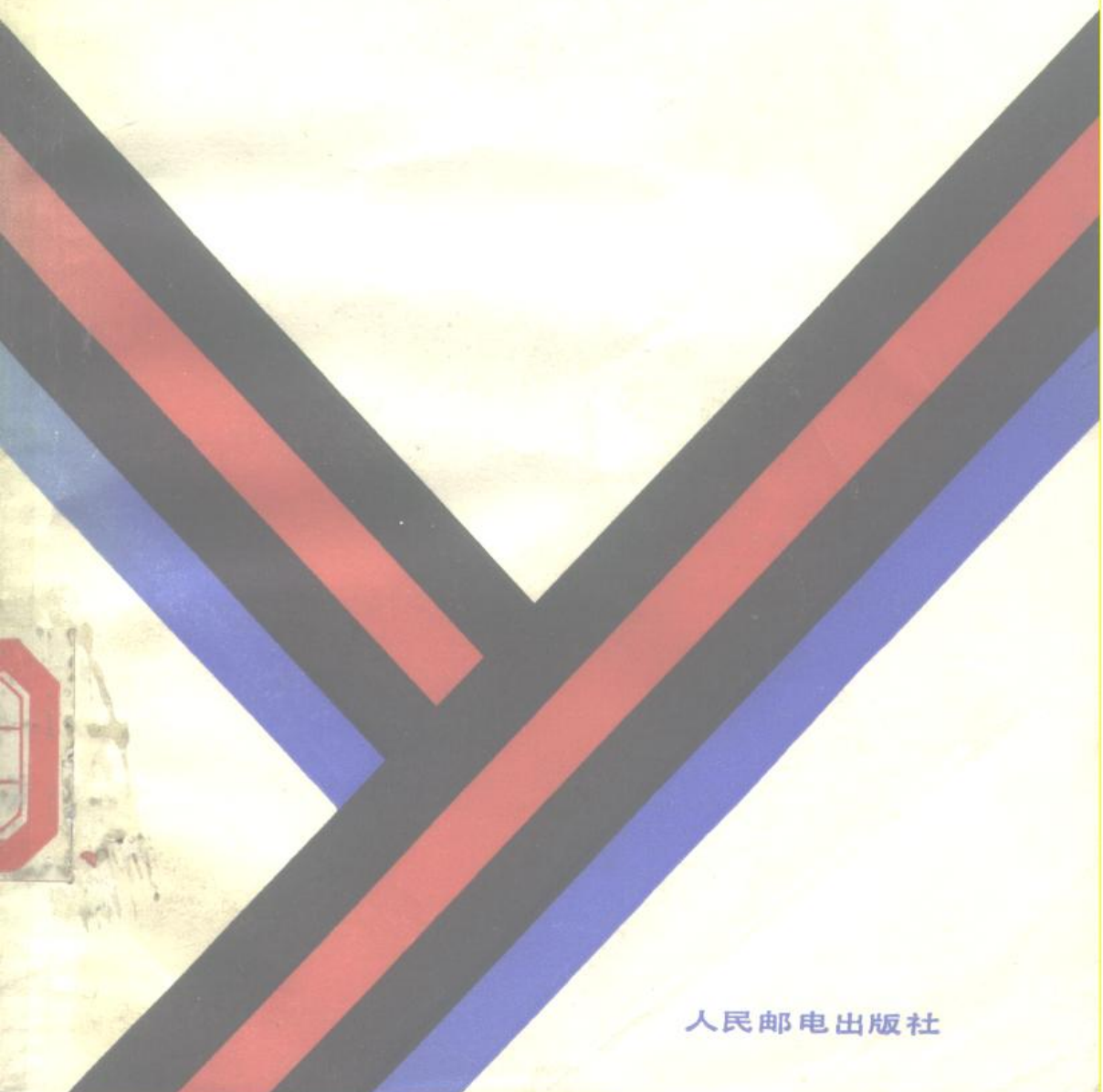


有源网络综合与设计原理

【美】哥宾德·达瑞南尼 著

北京邮电学院网络理论教研室 译

赵辰 吴叔美 校



人民邮电出版社

有源网络综合与设计原理

【美】哥宾德·达瑞南尼 著
北京邮电学院网络理论教研室 译
赵 辰 吴叔美 校

人 民 邮 电 出 版 社

PRINCIPLES OF ACTIVE NETWORK SYNTHESIS AND DESIGN

GOBIND DARYANANI
JOHN WILEY AND SONS

内 容 提 要

本书阐述有源和无源网络综合的基本原理。内容比较符合实际设计需要,叙述简单明瞭。可作为网络综合的基础教材,或电路理论的参考读物。

本书附有两种供机助设计用的计算机程序,适用于采用 ANSI FORTRAN IV 语言的计算机。

本书的主要对象为大学本科水平的学生,可作为研究生第一年课程的教材,也可供开始从事有源滤波器领域的工程技术人员自学之用。

本书是北京邮电学院一系网络理论教研室组织翻译的。

参加翻译工作的有:

王闻影(第一章)、勾学荣(第二章)、危霖(第三章)、许芳谦(第四章)、范秀君(第五章)、赵尔沅(第六章)、陈景明(第七章)、秦秀英(第八章)、柴清源(第九章)、吴如森(第十章)、肖桂珍(第十一章)、黄一成(第十二章)、颜绍书(第十三章)。

参加翻译工作的还有:陈叔远、马相平和黄金满同志。

王德隽副教授和胡筠教授参加过校稿工作。

有源网络综合与设计原理

[美]哥宾德·达瑞南尼著
北京邮电学院网络理论教研室 译

赵辰 吴叔美校

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32 1986年2月第一版

印张: 16 28/32页数: 270 1986年2月第一次印刷

字数: 442 千字 印数: 1—4,000册

统一书号: 15045·总3071—有5426

定价: 4.40元

序

集成电路技术深刻地影响着语音和数据通信系统的网络设计。集成化使这些网络取消了比较笨重而昂贵的电感、而只需用体积小、成本低的电阻、电容及有源元件就可以实现。此外，有源 RC 网络还具有与它对应的无源网络所没有的优点，如设计的标准化和模块化，可换接性以及易于制造等。这些特点使近代的语音和数据通信系统设计产生了巨大变化。工程师们正日益面临着有源 RC 网络的设计任务和问题。本书的目的在于为承担这些任务提供所需要的知识。

本书阐述问题的方法是从实际设计的考虑而导出有源和无源网络综合的基本原理。就引入诸如性能与成本之间的权衡，工艺上的限制以及计算机辅助等很多设计上的概念来说，有源网络综合是特别好的媒介。对此，本书的阐述力求简单明瞭，使之易为电气工程的大学生所接受，并与工程实际领域紧密联系。

本书适宜于作为网络综合的基本教材或电路的中级教材。前两章介绍有源和无源网络的一些简单的分析工具和基本性质。第3章介绍的滤波器领域包括有源、无源、机电和数字滤波器，并以语音通信系统的一些例子来说明各类基本滤波器的应用。第4章讨论滤波器的近似问题，重点放在标准近似函数的应用上，而不是它们的理论推导。

实际设计中的一个重要标准是所得电路的特性对于因制造容差和环境变化（例如温度、湿度及老化等）而引起的元件值偏差的灵敏度。为保持本书面向实际的方针，在研究电路综合之前，在第5章就讨论灵敏度。这就使得各种综合方法能与这一最重要的质量因数紧密联系起来，并使各种电路实现方法可根据它们的灵敏度进行

比较。

第6章讨论无源RLC网络的综合，重点放在无源滤波器设计常用的结构——双端接载梯形滤波器的综合。这种结构也作为第11章中所叙述的耦合有源滤波器综合的起点。

第7至10章讨论双二次型函数的运算放大器实现，它是用于级联和耦合有源滤波器中的基本组成部件。第8和第9章的内容是单放大器电路的实现，三放大器电路的实现放在第10章讨论。并根据这些电路对无源和有源元件值变动的灵敏度、元件值分布范围、调整的难易程度以及可以实现的滤波器函数类型等进行了比较。第11章简要地介绍了耦合滤波器以及回转器和频变负阻实现的设计。

在第12章中，对运算放大器的非理想特性及其对滤波器性能的影响，较前几章作了更为详细的讨论。最后，第13章叙述了完整的设计过程，着重于计算机辅助、成本最低化和优化设计。这一章的最后一部分简略地介绍制作滤波器的分立元件、厚膜、薄膜和集成电路工艺，这些只着重于设计原理，而不涉及随技术发展将会有所变化的具体细节。

本书附有两个计算机程序（附录D），供机助设计用。MAG程序用于计算函数的幅度、相位和时延；对于给定的一组滤波器技术要求，可用CHEB程序求出切比雪夫近似函数。这些程序是按ANSIFORTRAN IV编写的，它适用于大多数计算机。作者可以提供程序卡片的复制件，也可应用如第4章内的方程式和近似函数表而不用计算机程序。

虽然本书主要考虑适用于大学生水平，但无疑也可供研究生第一年的课程和开始从事有源滤波器领域的工程技术人员之用。主要的先修课是电路基础。本书是作为一学期课程而编写的。如有必要，可略去第6、11和12章中某些章节，而无损于连贯性。但至少，第1至第5章，第7至第10章必须包括在课程中。如用于研究生课程，每章末的参考文献可以作为补充资料。

本书取材于作者在贝尔实验室网络分析和综合部门从事六年工

· 2 ·

作的成果。从有源滤波器出现以来，这个部门就进行了深入的研究。现在印行的本书，是作者在南方大学教授大学生课程时所编写的教材，在那里我是由贝尔实验室主办的教学计划的访问教授，同时此书也是贝尔公司在职教学计划的一部分，为贝尔实验室工程技术人员开设的一学期课程所编写的教材。

戈宾德·达瑞南尼

目 录

第一章 网络分析	(1)
1.1 RLC无源电路	(1)
1.2 含有有源元件的RLC电路	(6)
1.2.1 受控电流源	(7)
1.2.2 受控电压源	(10)
1.3 运算放大器电路的简化分析	(14)
1.4 结束语	(18)
参考文献	(19)
习题	(20)
第二章 网络函数及其可实现性	(30)
2.1 网络函数	(30)
2.2 一般网络函数的性质	(33)
2.3 策动点函数的性质	(37)
2.3.1 无源RLC网络策动点函数	(37)
2.3.2 无源RC网络策动点函数	(39)
2.3.3 无源LC网络策动点函数	(42)
2.4 转移函数的性质	(45)
2.5 网络函数的幅度及相位曲线	(45)
2.6 双二次型函数	(57)
2.7 幅度和相位的计算机程序	(60)
2.8 结束语	(62)
参考文献	(63)
习题	(63)
第三章 滤波器概念导论	(74)

3.1 滤波器的分类	(74)
3.1.1 低通滤波器	(74)
3.1.2 高通滤波器	(76)
3.1.3 带通滤波器	(78)
3.1.4 带阻滤波器	(82)
3.1.5 增益均衡器	(85)
3.1.6 时延均衡器	(86)
3.2 无源、有源和其他滤波器	(89)
3.3 结束语	(93)
参考文献	(93)
习题	(94)
第四章 近似问题	(98)
4.1 波特图近似法	(98)
4.2 勃特沃兹近似	(101)
4.3 切比雪夫近似	(109)
4.4 椭圆近似	(117)
4.5 贝塞尔近似	(120)
4.6 时延均衡器	(126)
4.7 频率变换	(130)
4.7.1 高通滤波器	(130)
4.7.2 带通滤波器	(133)
4.7.3 带阻滤波器	(137)
4.8 切比雪夫近似的计算机程序	(140)
4.9 结束语	(142)
参考文献	(142)
习题	(143)
第五章 灵敏度	(152)
5.1 ω 和 Q 的灵敏度	(152)
5.2 多元件的偏差	(156)

6.3	增益灵敏度	(163)
5.4	影响增益灵敏度的诸因素	(166)
5.4.1	近似函数的影响	(166)
5.4.2	电路的选择	(172)
5.4.3	元件类型的选择	(173)
5.5	机助计算	(182)
5.6	结束语	(183)
	参考文献	(184)
	习题	(184)
第六章	无源网络综合	(191)
6.1	用直观法综合	(191)
6.2	策动点函数的综合	(194)
6.2.1	用部分分式展开的综合法	(195)
6.2.2	用连分式展开的综合法	(200)
6.3	无源网络的低灵敏度	(204)
6.4	转移函数的综合	(207)
6.4.1	单端接载的梯形网络	(207)
6.4.2	零点移动法	(211)
6.4.3	双端接载的梯形网络	(222)
6.5	结束语	(236)
	参考文献	(237)
	习题	(237)
第七章	有源滤波器综合基础	(247)
7.1	近似函数的因式分解形式	(247)
7.2	级联法	(248)
7.3	实数极点和实数零点	(251)
7.4	双二次型电路结构	(253)
7.4.1	负反馈网络结构	(254)
7.4.2	正反馈网络结构	(255)

7.5	求元件值的系数配比法	(259)
7.6	调整增益常数	(263)
7.7	阻抗定标	(268)
7.8	频率定标	(269)
7.9	结束语	(270)
	参考文献	(271)
	习题	(271)
第八章	正反馈双二次型电路	(280)
8.1	用于正反馈网络结构中的无源RC电路	(280)
8.2	萨伦和凯的低通电路	(282)
8.3	采用RC→CR变换的高通电路	(298)
8.4	萨伦和凯的带通电路	(302)
8.5	实现复数零点的双T形网络	(305)
8.6	结束语	(307)
	参考文献	(308)
	习题	(308)
第九章	负反馈双二次型电路	(316)
9.1	用于负反馈网络结构中的无源RC电路	(316)
9.2	带通电路	(318)
9.3	零点的形成	(327)
9.4	在负反馈网络结构中应用正反馈	(332)
9.5	弗伦德双二次型电路	(341)
9.6	负反馈和正反馈电路灵敏度的比较	(349)
9.7	结束语	(353)
	参考文献	(353)
	习题	(354)
第十章	三放大器的双二次型电路	(362)
10.1	基本低通和带通电路	(362)
10.2	一般双二次型函数的实现	(369)

10.2.1 加法型四放大器双二次型电路.....	(369)
10.2.2 前馈式三放大器双二次型电路.....	(374)
10.3 灵敏度.....	(376)
10.4 三放大器和单放大器双二次型电路灵敏度的比较	(379)
10.5 调整.....	(381)
10.6 特殊应用.....	(384)
10.7 结束语.....	(386)
参考文献.....	(386)
习题.....	(387)
第十一章 以无源梯形结构为基础的有源网络.....	(395)
11.1 无源梯形结构.....	(395)
11.2 用回转器替代电感器.....	(399)
11.3 采用频变负阻 (FDNR) 的元件变换.....	(403)
11.4 采用组块代换的耦合结构.....	(408)
11.5 结束语.....	(415)
参考文献.....	(416)
习题.....	(416)
第十二章 实际运算放大器对有源滤波器的影响.....	(424)
12.1 反馈理论和稳定性的回顾.....	(424)
12.2 运算放大器的频率特性和补偿法.....	(429)
12.3 运算放大器频率特性对滤波器性能的影响.....	(435)
12.3.1 极点移动和预畸.....	(435)
12.3.2 增益的统计偏差.....	(446)
12.4 运算放大器的其他特性.....	(451)
12.4.1 动态范围.....	(451)
12.4.2 转换速率限制.....	(452)
12.4.3 失调电压.....	(453)
12.4.4 输入偏置和输入失调电流.....	(455)

12.4.5 共模信号.....	(456)
12.4.6 噪声.....	(459)
12.5 结束语.....	(460)
参考文献.....	(460)
习题.....	(461)
第十三章 有源滤波器的优化设计和制作.....	(469)
13.1 标称设计过程的回顾.....	(469)
13.2 实际滤波器的设计.....	(472)
13.2.1 有余量设计.....	(475)
13.2.2 元件的选择.....	(480)
13.3 几种工艺.....	(491)
13.3.1 集成电路运算放大器.....	(491)
13.3.2 分立元件电路.....	(492)
13.3.3 厚膜电路.....	(492)
13.3.4 薄膜电路.....	(493)
13.4 结束语.....	(493)
参考文献.....	(494)
附录A 部分分式展开.....	(497)
附录B 二端口网络特性的表述.....	(500)
附录C 随机变量的均值和标准偏差.....	(503)
附录D 计算机程序.....	(510)
部分习题答案.....	(518)
索引.....	(524)

第一章 网 络 分 析

为研究有源和无源网络的设计过程。首先，要有良好的分析方法。尽管有好几种不同的分析网络的方法^{*}，但本书则应用节点分析法。这种分析法既简单又通用，并且很适合于分析有源和无源滤波电路。虽然读者已经熟悉节点分析法的原理和应用，但本章仍要作简要的复习。运算放大器、电阻和电容是构成大多数有源滤波器的元件对含有这些元件的电路要作详细地分析。下面所选的例子不仅为了复习节点分析法，而且还要引出一些综合法的基本原理。本章末尾还提到用于分析网络的计算机辅助分析法。

1.1 RLC 无 源 电 路

这一节，我们以包含有电阻、电容和一个独立电流源的电路作为例子来复习无源网络 s 域的节点分析法。

例1.1 求图1.1(a)所示电路（叫做桥 T 形网络）的 s 域函数 $V_3(s)/I_1(s)$

解：

首先，把每个元件表示为 s 域的导纳，如图1.1(b)所示。 $V_1(s)$ 、 $V_2(s)$ 和 $V_3(s)$ 分别表示这一电路中节点1、2和3的对地电位。

对节点1、2和3应用克希荷夫电流定律，得到节点方程式如下^{**}。

$$\text{节点 1: } \frac{1}{R_1}(V_1 - V_2) + sC_1(V_1 - V_3) = I_1$$

^{*}分析网络的另外一些方法[4]是网孔分析法、不定矩阵法、信号流图法和状态空间法。

^{**}今后用 I 和 V 代表 $I(s)$ 和 $V(s)$ 。

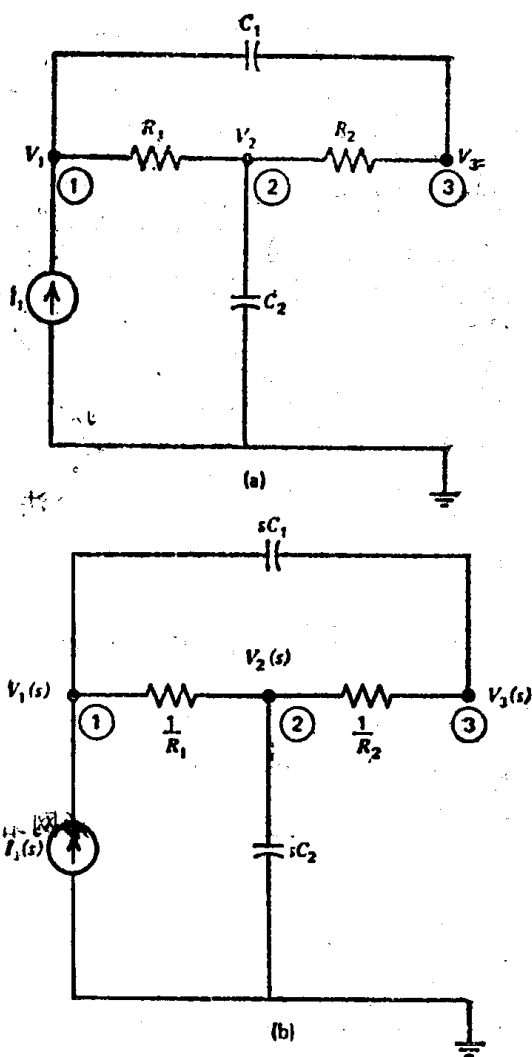


图 1.1 (a)例1.4的电路, (b)用 S 域导纳表示的电路。

$$\text{或} \left(\frac{1}{R_1} + sC_1 \right) V_1 - \frac{1}{R_1} V_2 - sC_1 V_3 = I_1 \quad (1.1)$$

$$\text{节点 2: } \frac{1}{R_1} (V_2 - V_1) + \frac{1}{R_2} (V_2 - V_3) + sC_2 V_2 = 0$$

$$\text{或 } -\frac{1}{R_1}V_1 + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + sC_2\right)V_2 - \frac{1}{R_2}V_3 = 0 \quad (1.2)$$

$$\text{节点 3: } \frac{1}{R_2}(V_3 - V_2) + sC_1(V_3 - V_1) = 0$$

$$\text{或 } -sC_1V_1 - \frac{1}{R_2}V_2 + \left(\frac{1}{R_2} + sC_1\right)V_3 = 0 \quad (1.3)$$

以上各式的矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} + sC_1 & -\frac{1}{R_1} & -sC_1 \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + sC_2 & -\frac{1}{R_2} \\ -sC_1 & -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + sC_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

应用克莱姆法则，得出 V_3/I_1 为

$$\frac{V_3}{I_1} = \frac{\begin{vmatrix} \frac{1}{R_1} + sC_1 & -\frac{1}{R_1} & 1 \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + sC_2 & 0 \\ -sC_1 & -\frac{1}{R_2} & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \frac{1}{R_1} + sC_1 & -\frac{1}{R_1} & -sC_1 \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + sC_2 & -\frac{1}{R_2} \\ -sC_1 & -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + sC_1 \end{vmatrix}} \quad (1.5)$$

$$\frac{1}{R_1 R_2} + sC_1 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + sC_2 \right) - \frac{1}{R_2^2}$$

$$\left\{ \left(\frac{1}{R_1} + sC_1 \right) \left[\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2} + sC_2 \right) \left(\frac{1}{R_2} + sC_1 \right) - \frac{1}{R_2^2} \right] \right.$$

$$\left. - \frac{1}{R_1} \left(\frac{sC_1}{R_2} + \frac{1}{R_1 R_2} + \frac{sC_1}{R_1} \right) \right.$$

$$\left. - sC_1 \left(\frac{1}{R_1 R_2} + \frac{sC_1}{R_1} + \frac{sC_1}{R_2} + s^2 C_1 C_2 \right) \right\}$$

(1.6)

上式可简化为

$$\frac{V_s}{I_1} = \frac{s^2 + s \left(\frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + s \left(\frac{1}{R_1 R_2 C_1} \right)}$$

(1.7)

短评

1. 因为节点分析法用的是克希荷夫电流定律，所以如果独立源是电流源，那就最方便了。然而大多数电路是由电压源激励的，在列出含有电压源电路的节点方程时要应用诺顿定理。该定理说明，与阻抗 Z 串联的电压源 V 可以用一个与阻抗 Z 并联的电流源 $(I = \frac{V}{Z})$ 来代替。图1.2表示了这一等效关系。一般说来， Z 应

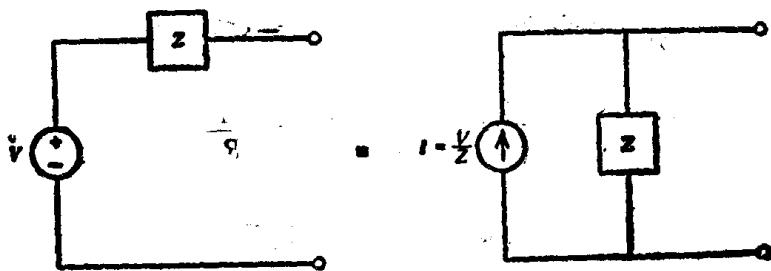


图 1.2 有串联阻抗电压源的诺顿等效电路

是电压源的内阻抗。

2. 式(1.5)分母的节点行列式, 是以对角线对称的。因此在第 i 行和第 i 列的项(就是 $(i \cdot i)$ 项)等于 $(i \cdot i)$ 项。这是 RLC 网络节点(或网孔)行列式所特有的性质*。

3. 假定要求一个网络实现下列函数:

$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{s^2 + cs + d}{ns^2 + as} \quad (1.8)$$

其中系数 c 、 d 、 n 和 a 是正数, 因为这个函数和式(1.7)的形式相同, 所以用图1.1(a)的电路来实现它是可能的。在式(1.7)和(1.8)中使 s 的幂次相同的各项系数相等, 就可以得到所求电路的元件值。

$$n = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1.9)$$

$$a = \frac{1}{R_1 R_2 C_1} \quad (1.10)$$

$$c = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \frac{1}{C_2} = \frac{n}{C_2} \quad (1.11)$$

$$d = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} = \frac{a}{C_2} \quad (1.12)$$

由式(1.11)和(1.12)可看出给定的系数必须满足下列关系

$$\frac{n}{c} = \frac{a}{d} \quad (1.13)$$

而电容器 C_2 由下式给出

$$C_2 = \frac{n}{c} = \frac{a}{d}$$

满足式(1.9)的电阻的一种选择是:

$$R_1 = \frac{2}{n} \quad R_2 = \frac{2}{n}$$

* 所有互易网络都具有这种性质[4]