

有源网络与反馈放大器理论

陈惠开 著

冯世常 等 译

黄香馥 校

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书对有源网络理论基础及其在反馈放大器设计方面的应用,进行了统一、综合而时新的论述。

本书首先介绍了一般 n 口网络和用两个普通物理量时间、能量定义的无源性,以及将时域无源性准则转换成等价的频域无源性条件。然后给出了用不定导纳矩阵描述多端网络外部特性的有效方法,及用更实用的双口参数表示的 n 口网络一般无源性条件的特定形式;并以两章的篇幅研究了单环反馈放大器。最后讨论了各种稳定性准则和使反馈放大器稳定的方法等,并研究了包含多输入、多输出和多反馈环的多环放大器。为使读者正确应用理论解决实际问题,本书还提供了丰富的、具有现实意义的实例。

本书可供有关学科的研究生、高年级大学生,研究人员和工程技术人员学习,参考。

Chen Wai-Kai

ACTIVE NETWORK AND FEEDBACK AMPLIFIER THEORY

Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

有源网络与反馈放大器理论

陈惠开 著

冯世常 等 译

黄香馥 校

责任编辑 张建荣 刘晓融

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

*

1987年6月第一版 开本: 850×1168 1/32

1987年6月第一次印刷 印张: 17 3/8

印数: 精 1—1,400 插页: 精 2

平 1—1,800 字数: 457,000

统一书号: 15031·809

本社书号: 5243·15—7

布脊精装 6.00 元
定价: 平 装 4.90 元

译校者的话

本书原文版本是著名电路理论家陈惠开教授在成都电讯工程学院短期讲学期间赠送给院长顾德仁教授的。由顾德仁教授推荐并组织人员翻译成中文。

本书翻译过程中,我们力求忠实于原著,在保持严谨的前提下兼顾行文流畅。对术语翻译除了按照习惯和规范外,还考虑了合理性。例如,对“sensitivity”这个词,我们译成“敏感度”而不译为“灵敏度”,以别于通常的接收机“灵敏度”。在翻译中,我们还对原书中的少许笔误作了简要注释,供读者阅读时参考。

参加本书翻译的人员有:冯世常副教授(译第一章)、葛祥云讲师(译第二章)、博士研究生朱雄国(译第三章,附录和索引)、程仁杰副教授(译第四章)、王仁明讲师(译第五章)、胡翔骏讲师(译第六章)和李春祥讲师(译第七章)。冯世常副教授对译文初稿作了全面审校和修改。最后由黄香馥教授全面审校修改而定稿。

译文中如有不当之处,欢迎读者批评指正。

译校者

1984年2月22日

中 文 版 序

我对将本书翻译成中文出版的兴趣，产生于我在伊利诺斯大学和俄亥俄大学同来自中国的访问学者，特别是成都电讯工程学院的访问学者的广泛交往。在同他们的交往中我确信，若能尽早采用现代教本，定可大大提高网络理论方面的学习和研究水平。这当然有求于中国居领先地位的学者们的协作和贡献。

网络理论是一个广阔的领域，并且是许多其他学科的支柱。我自己在网络理论方面的兴趣很广泛，包括应用图论、分布放大器、尺度分析、滤波器、宽带匹配理论、有源网络、反馈放大器理论和通信网中的信号流。就我所知，这是我的已译成中文的第三本书。另外的两本书是《宽带匹配网络理论与设计》和《线性网络与系统》。希望这些书将促使同中国学者和研究工作者的接近。

成都电讯工程学院顾德仁教授于1982年在我访问成电期间提出将本书译成中文的计划，并于1983年他在芝加哥回访伊利诺斯大学时谈及此事。我愿借此机会对顾教授坚决致力于科学调查，并对他对中国电工界的领导和贡献表示赞赏。

没有黄香馥教授和冯世常副教授的努力和贡献，本书的及早出版是不可能的。据我所知，黄香馥教授已两次采用本书材料于成都电讯工程学院研究生网络理论课，并对材料作了很好的处理。我对所有促使本书中文版成为现实的人们表示感谢，首先并最为感谢翻译者——冯世常副教授、程仁杰副教授、葛祥云讲师、王仁明讲师、胡翔骏讲师、李春祥讲师和博士研究生朱雄国。感谢黄香馥教授精心校阅全部文稿。他们工作细致周到，我深知这种工作何其繁重何等困难。此外，我还要对王兆明讲师(访问学者)在其他许多方面的帮助表示感谢。

陈惠开

1984年1月22日序于
美国伊利诺斯州芝加哥市
伊利诺斯大学
电气工程与计算机科学系

序 言

自从伯德 1945 年出版他的经典教程《网络分析和反馈放大器设计》以来,很少有较为深入地讨论这一题目的书问世。本书的目的是想通过对有源网络的理论基础及其在反馈放大器设计中的应用提供一种深入的、最新的、统一的和全面的处理方法来填补这一空白。贯穿全书的指导思想是想抽取理论的精华,讨论那些具有基本重要性的、使我们能超越新器件和新设计工具出现的论题。尽管本书主要是作为电气工程类专业一年级研究生的网络理论教材而写的,但也适合于作为工业部门的研究工作者和从事实际工作的工程师的参考书。在选材方面,对许多读者可能是初次接触到其中某些论题这一情况颇为注意,因此,列入了一些基本的介绍性材料。所需的基础只是电路和电子学方面的大学基本课程以及处理矩阵的能力。

本书可适当地分成两个部分。第一部分由前三章组成,讨论一般网络分析。第二部分由后四章组成,讨论反馈放大器理论。第一章引入许多用于研究线性有源网络的基本概念。我们由处理一般的 n 口网络开始,并用普遍遇到的物理量时间和能量定义无源性。然后将时域的无源性准则转化为等价的频域无源性条件。第二章给出了用不定导纳矩阵描述多端网络外部特性的有效方法,并阐明如何有效地将其应用于网络函数的计算。此方法的意义在于,不定导纳矩阵通常可用观察法直接由网络写出,而且转移函数可紧凑地表示为不定导纳矩阵元素的一阶和/或二阶余子式之比。在第三章中,我们考虑用更实用的双口参数表示的 n 口网络一般无源性条件的特定形式。我们引入了各种类型的功率增益,敏感度以及与潜在不稳定性相对的绝对稳定性概念。

第四章和第五章致力于研究单环反馈放大器。我们首先由考

考虑建立在理想反馈模型基础上的反馈放大器的传统处理方法和分析几个简单的反馈网络开始讨论。然后我们详细地介绍以回归差和零回归差概念为基础的伯德反馈理论。伯德理论被巧妙而紧凑地用不定导纳矩阵元素的一阶和二阶余子式表达，使之既可应用于简单反馈网络，也可应用于采用传统方法无法进行分析的复杂反馈网络。我们证明了反馈的应用可使放大器的增益对有源器件参数的变化不那么敏感，可控制放大器的传输特性和策动点特性，减小噪声和非线性失真的影响，以及改变网络的稳定性或不稳定性。对许多实际的放大器来说，回归差可用实验方法测量这一事实表明，我们可以将所有寄生效应包含在稳定性研究之中，而稳定性问题可化为奈奎斯特图来研究。

负反馈在放大器中的应用改善了放大器的总性能。然而，由于足够数量的反馈，在某一频率上放大器将趋于振荡因而变为不稳定，这样我们就面临稳定性问题。第六章讨论各种稳定性准则，研究几种使反馈放大器稳定的方法，并给出了奈奎斯特准则，伯德图，根轨迹法和根敏感度。详细阐明了增益和相移之间的关系以及伯德设计理论。最后，在第七章中，我们研究了包含多输入、多输出和多反馈回路的多环反馈放大器。适用于单个受控源的回归差和零回归差概念，在这里被推广为适用于多个受控源的回归差矩阵和零回归差矩阵。同样，标量敏感度函数被推广为敏感度矩阵，并导出了计算多参量敏感度函数的公式。

本书是根据过去几年在俄亥俄大学讲授研究生水平的有源网络理论课程时所写的讲稿整理而成。将本书用作一个学期或两个学季的有源网络理论课程的教材并不存在多大困难，例如前四章加上第五章和第六章中的几节对于一个学期的课程来说是很理想的，而全书则适合于两个学季的课程。

本书的一个特点在于它填补了理论和实践间的间隙，用丰富的实例说明如何应用理论解决问题。这些实例都是非常切合实际的问题，而并非理论的理想化解释。每章末都给出了各种类型的习题，其中某些习题是正文中所导出的结果的例行应用，而另一些

习题则需要对正文材料给以显著的延伸。习题共有 239 道。

本书中的许多材料是我过去几年的研究成果。我乐于公开感谢俄亥俄大学通过行业休假规划、俄亥俄大学贝克基金评定委员会以及国家科学基金对该项研究的支持。感谢对本书做出有价值的贡献的许多研究生。特别要感谢我的博士生 H. 埃尔谢瑞夫 (Elsherif) 和 M. 詹米尔 (Jamcel)，他们认真而严格地审读了全书。对 G. E. 史密斯 (Smith) 教授的突然逝世深为悲痛，他曾友好地评阅了本书的手稿并提出了有价值的建议。我还特别地感谢我的妻子肖琳以及我的孩子捷罗姆 (Jerome) 和梅莉莎 (Melissa) 在本书写作过程中所给予的忍耐和谅解。

陈惠开

目 录

译校者的话

中文版序

序言

第一章 网络特性表示	1
1.1 线性和非线性	1
1.2 时不变和时变	7
1.3 无源性和有源性	9
1.4 因果性和非因果性	16
1.5 n 口网络的矩阵表示法	23
1.6 无源性的等价频域条件	29
1.7 无源性和有源性的离散频率概念	39
1.8 小结	62
习题	63
参考文献	70
第二章 不定导纳矩阵	72
2.1 不定导纳矩阵	72
2.2 写出原始不定导纳矩阵的法则	77
2.3 端子缩并与封禁	84
2.4 晶体管各种模型的相互关系	90
2.5 一阶和二阶余子式	101
2.6 网络函数的计算	104
2.7 受约束有源网络的分析	114
2.8 广义诺顿定理	130
2.9 小结	134
习题	135
参考文献	142
第三章 有源双口网络	145

3.1	双口参数	145
3.2	功率增益	148
3.3	敏感度	151
3.4	无源性和有源性	154
3.5	U 函数	160
3.6	潜在不稳定性和绝对稳定性	176
3.7	绝对稳定双口网络的最佳终端	189
3.8	小结	202
	习题	203
	参考文献	211
第四章 反馈放大器理论 I		214
4.1	理想反馈模型	214
4.2	反馈放大器组态	217
4.3	一般反馈理论	255
4.4	网络函数和反馈	273
4.5	小结	281
	习题	282
	参考文献	288
第五章 反馈放大器理论 II		290
5.1	敏感度函数与反馈	290
5.2	回归差与双口函数	300
5.3	相对于两个元素的回归差和零回归差	308
5.4	反馈概念的扩展	310
5.5	网络函数与一般回归差和一般零回归差	315
5.6	相对敏感度函数与反馈	324
5.7	反馈放大器理论的信号流图表述法	329
5.8	回归差的测量	335
5.9	关于回归差不变性的研究	346
5.10	小结	359
	习题	361
	参考文献	366
第六章 反馈放大器的稳定性		368

6.1	单环反馈放大器	369
6.2	劳斯 (Routh) 准则, 赫维茨 (Hurwitz) 准则和列纳德-契帕特 (Liénard-Chipart) 准则	370
6.3	奈奎斯特 (Nyquist) 准则	377
6.4	应用奈奎斯特准则于单环反馈放大器	384
6.5	根轨迹法	391
6.6	根敏感度	410
6.7	伯德 (Bode) 公式	416
6.8	伯德设计理论	429
6.9	小结	439
	习题	441
	参考文献	446
第七章	多环反馈放大器	448
7.1	矩阵信号流图	448
7.2	多环反馈放大器理论	457
7.3	反馈矩阵概念的扩充	488
7.4	多环反馈理论的混合矩阵表示	501
7.5	敏感度矩阵与多参数敏感度	509
7.6	小结	518
	习题	520
	参考文献	526
附录 I	哈密特式	529
附录 II	双口参数转换表	532
附录 III	关于式 (7.224) 的推导	533
	符号索引	535
	名词索引	537

第一章 网络特性表示

在过去二十年间，我们目睹了随着新器件似乎无止境的激增而固态技术的迅速发展。当前可供使用的诸如晶体管、隧道二极管、齐纳二极管和变容二极管之类的固态器件，在大部分实际网络应用中已经取代了以往的真空管。更有甚者，正在出现的集成电路工艺领域，使这些相对新近的发明面临着被淘汰的威胁。为了充分理解固态器件的网络性质和限制因素，以及为对付尚未出现的新器件的应用，强调超越新器件和新设计工具出现的有源网络理论基础已变得愈来愈重要了。

本章的目的，是介绍许多用于研究线性有源网络的基本概念。我们首先介绍端口意义上的线性概念和时不变概念。然后，我们用普遍遇到的物理量——时间和能量——定义无源性，并证明因果关系是线性和无源性的结果。继之是对 n 口网络在频域中的一般表示法的简要回顾。接着将时域无源准则转化成等价的频域无源条件。最后，我们介绍无源性的离散频率概念。无源性在研究有源网络方面的意义，在于无源性是有源性的正式否定。

1.1 线性和非线性

网络是由有限个互相连接的元件而组成的结构，它有一组可从外部接触的端对，叫做端口，可以测量出在端口上的电压和电流，并且可使电磁能量传入或传出该结构。对端口这个概念来说，至关重要的是，假设进入端口一端的瞬时电流，总是等于离开端口另一端的瞬时电流。具有 n 个这样的可从外部接触的端口的网络叫做 n 口网络，或简称 n 口，如图 1.1 所示。本节，我们简要地回顾线性和非线性概念，并引入端口意义上的线性和非线性概念。

参考图 1.1 的 n 口网络的一般表示法。端口电压 $v_k(t)$ 和端口电流 $i_k(t)$ (其中 $k = 1, 2, \dots, n$) 可方便地用端口电压矢量和端口电流矢量表示, 它们分别为

$$\mathbf{v}(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)]' \quad (1.1a)$$

$$\mathbf{i}(t) = [i_1(t), i_2(t), \dots, i_n(t)]' \quad (1.1b)$$

其中一撇表示矩阵转置。共有 $2n$ 个端口信号, 它们是 n 个端口电压信号 $v_k(t)$ 和 n 个端口电流信号 $i_k(t)$, 且每个端口都同两个信号 $v_k(t)$ 和 $i_k(t)$ 相联系。能由 n 口网络 N 供给的端口矢量 $\mathbf{v}(t)$ 和 $\mathbf{i}(t)$ 构成该 n 口网络的一个允许信号对。从这 $2n$ 个端口信号中, 由对 n 个端口中的每一个端口取一个端口信号而得到的任何 n 个独立函数, 均可视为该 n 口网络的输入或激励, 而其余 n 个信号则视为其输出或响应。例如, 在图 1.1 中我们可以取 $i_1(t), i_2(t), \dots, i_k(t), v_{k+1}(t), \dots, v_n(t)$ 为输入或激励信号。于

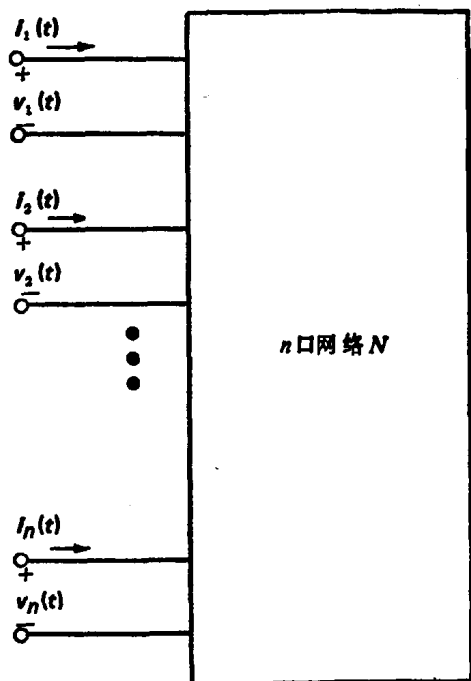


图 1.1 n 口网络的一般表示法

是, $v_1(t), v_2(t) \cdots, v_k(t), i_{k+1}(t), \cdots, i_n(t)$ 就是输出或响应信号。这种输入-输出或激励-响应情况如图 1.2 所示。为便于讨论, 令 $\mathbf{u}(t)$ 为与激励信号相联系的激励矢量, 而 $\mathbf{y}(t)$ 为与响应信号相联系的响应矢量。对于图 1.2 的激励-响应情况, 激励和响应矢量分别为

$$\mathbf{u}(t) = [i_1(t), i_2(t), \cdots, i_k(t), v_{k+1}(t), \cdots, v_n(t)]' \quad (1.2a)$$

$$\mathbf{y}(t) = [v_1(t), v_2(t), \cdots, v_k(t), i_{k+1}(t), \cdots, i_n(t)]' \quad (1.2b)$$

当我们讲 n 端口的零激励时, 我们的意思是, 每个激励信号均为零; 亦即 $\mathbf{u}(t) = \mathbf{0}$ 。另一方面, 非零激励表示 n 个激励信号不全为零; 亦即 $\mathbf{u}(t) \neq \mathbf{0}$ 。

一般说来, 如果叠加原理成立, 则网络是线性的。这就意味着, 由所有同时加上的独立源所构成的响应, 等于由一次加上一个独立源所构成的响应之和。从这种意义上说, 任何由线性网络元

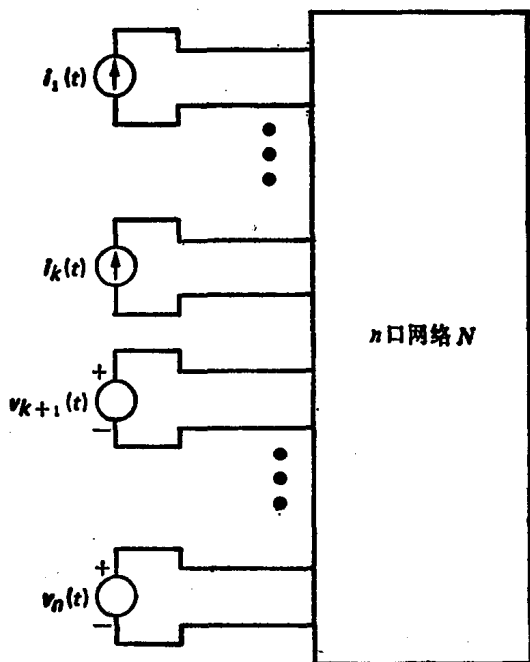


图 1.2 n 口网络的一种特定的输入激励

件(线性电阻器、线性电感器、线性电容器、线性变压器或线性受控源)和独立源组成的网络,都是线性网络。因此,为了用这个定义验证网络的线性性,我们必须对网络的内部结构具有完全的知识。对于一个 n 口网络,它的可从外部接触的部分仅在其 n 个端口处。因为这个缘故,上述的线性定义可能不适合于 n 口网络。为达到我们的目的,除上述定义外,我们再引入端口意义上的线性概念。

定义 1.1: 线性和非线性 如果在一个 n 口网络的 n 个端口处叠加原理成立,则该 n 口网络是在端口意义上线性的或简称线性的。如果一个 n 口网络不是在端口意义上线性的,则该 n 口网络是在端口意义上非线性的或简称非线性的。

换句话说,如果 $\mathbf{y}_a(t)$ 和 $\mathbf{y}_b(t)$ 分别为一个 n 口网络对于激励 $\mathbf{u}_a(t)$ 和 $\mathbf{u}_b(t)$ 的响应,则当且仅当对于实标量 α 和 β 的任何选择,矢量 $\mathbf{y}(t) = \alpha\mathbf{y}_a(t) + \beta\mathbf{y}_b(t)$ 代表对于激励 $\mathbf{u}(t) = \alpha\mathbf{u}_a(t) + \beta\mathbf{u}_b(t)$ 的响应时,该 n 口网络才是在端口意义上线性的。

图 1.3 的网络在通常意义上是线性的。让我们由这个网络形成一个单口网络,如图 1.4 所示。其端口电压和端口电流由下列

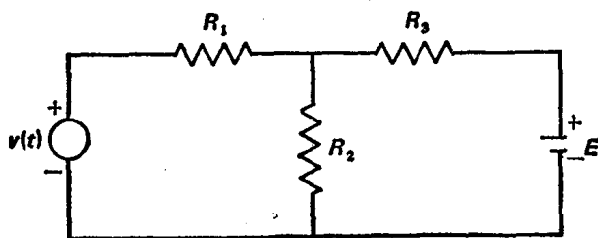


图 1.3 在通常意义上的线性网络

方程描写:

$$v(t) = \left(R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \right) i(t) + \frac{E R_2}{R_2 + R_3} \quad (1.3)$$

假定我们取 $i(t)$ 为激励并令 $i_a(t) = i_b(t) = 1A$ 为两个激励。为简单计,设 $\alpha = \beta = 1$ 。于是,与激励 $i_a(t)$, $i_b(t)$ 和 $i_a(t) + i_b(t)$ 相对应的响应 $v_a(t)$, $v_b(t)$ 和 $v_{a+b}(t)$ 由下列方程确定:

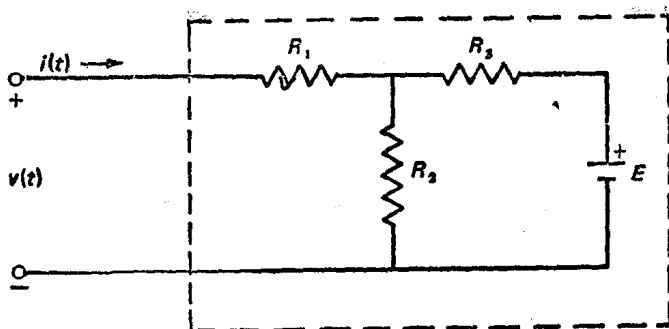


图 1.4 一个非线性单口网络,其中 $E \neq 0$

$$v_a(t) = v_b(t) = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + \frac{E R_2}{R_2 + R_3} \quad (1.4a)$$

$$v_{a+b}(t) = 2R_1 + \frac{2R_2 R_3}{R_2 + R_3} + \frac{E R_2}{R_2 + R_3} \quad (1.4b)$$

因 $v_{a+b}(t) \neq v_a(t) + v_b(t)$, 故该单口网络是在端口意义上非线性的。假定我们从图 1.3 的网络形成一个双口而不是一个单口网络,所构成的双口网络如图 1.5 所示;其端口电压和端口电流可用下式表示:

$$\begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + R_2 & R_2 \\ R_2 & R_2 + R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

容易证明,该双口网络是在端口意义上线性的。因此,一个在端口意义上非线性的网络不必包含任何非线性网络元件,并且往往可以通过在新形成的端口取出内部源而使之变成在端口意义上线性

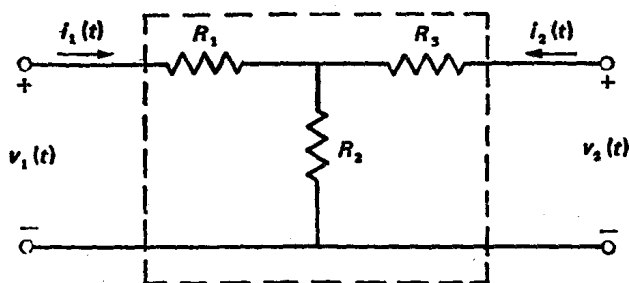


图 1.5 一个线性双口网络

的。

作为另外一个例子,考虑图 1.6 中的单口网络,图中的电容器最初已被充以电压 $v_c(0+) = V_0$ 。该单口网络的端子关系由下式给出:

$$v(t) = Ri(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i(x) dx + V_0 \quad (1.6)$$

根据方程 (1.4) 容易证实,该单口网络是在端口意义上非线性的。实际上,在一个 n 口网络中存在任何独立源,或在储能元件上存在任何非零的初始条件,都将使该 n 口网络变成在端口意义上非线性的。另一方面,一个由初始条件为零的线性网络元件组成的,不含任何独立源的 n 口网络,总是在端口意义上线性的。例如,在图 1.4 和 1.6 的单口网络中,如果独立源 E 和初始电压 V_0 被置于零,

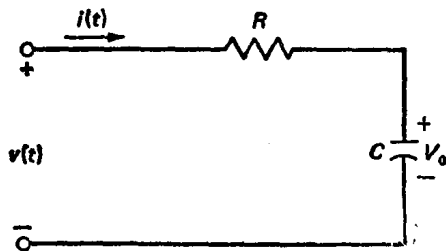


图 1.6 具有非零初始电容器电压的非线性单口网络

则所构成的单口网络就变成在端口意义上线性的。

由上面所讨论的例子显然可见,一个在端口意义上非线性的 n 口网络不必包含任何非线性元件,而非线性元件的存在并不必然意味着该 n 口网络是在端口意义上非线性的。图 1.7 是由两个互相串联的非线性电阻器组成的一个单口网络。其非线性电阻器的特性方程如下:

$$v_a(t) = i_a(t) - i_a^2(t) \quad (1.7a)$$

$$v_b(t) = i_b^2(t) \quad (1.7b)$$

其端口电压和端口电流之间的关系为

$$v(t) = i(t) \quad (1.8)$$

这表明该单口网络等价于 1Ω 的电阻器,因而在端口意义上是线

性的。假定由此单口网络出发借助于跨接在其中一个电阻器上的两条线而形成 一个双口网络,如图 1.8 所示,则所构成的双口网络就变成在端口意义上非线性的。

我们要强调一个网络的线性和一个 n 口网络在端口意义上的线性之间的差别。在本书其余部分我们主要涉及在端口意义上的线性。为简单计,在端口意义上这个词正如在定义 1.1 中所述通常可以省略,而仅在强调时才使用它。

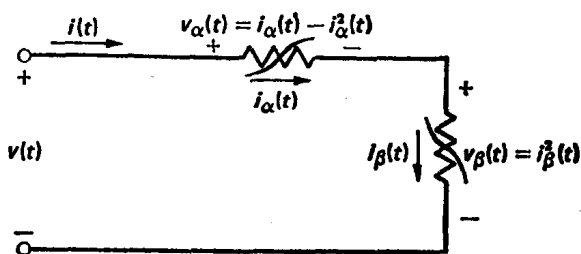


图 1.7 由两个非线性电阻器组成的线性单口网络

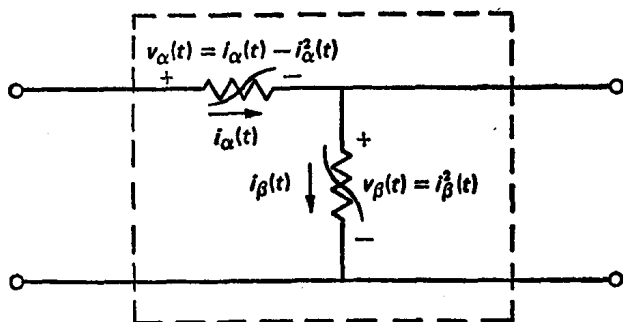


图 1.8 一个非线性双口网络

1.2 时不变和时变

如果网络不包含时变元件,则称该网络为时不变的,否则称为时变网络。正如在前一节中讨论过的那样,如果主要关心网络的端口特性,则上述定义可能不适合于 n 口网络。由于这个缘故,我