宽带匹配网络的理论与设计

〔美〕陈惠开 著
黎安尧等译 顾德仁校

人民邮电出版社

宽带匹配网络的理论与设计

〔美〕陈惠开　著
黎安尧　等译
顾德仁　校

人民邮电出版社

Theory and Design
of Broadband
Matching Networks
by
WAI-KAI CHEN
PERGAMON PRESS 1976

内 容 提 要

散射参数法在网络设计中的应用，是近代在网络理论方面的重大发展之一。本书的目的主要就是介绍利用散射参数设计宽频带匹配网络的理论。全书共五章，包括1．网络理论基础；2．散射矩阵；3．逼近和梯形网络实现；4．宽带匹配理论：无源负载；5．宽带匹配理论：有源负载。虽然本书理论性较强，但作者也注意结合应用，在书中介绍了不少设计例子。每一章最后都有所讨论问题的结论，并附有习题和参考文献。

本书除了可作研究生，高年级大学生网络理论的教学参考书外，也可供有关专业的科研工作者、工程技术人员和大学教师参考。

宽带匹配网络的理论与设计

〔美〕陈惠开　著
黎安尧　等译
顾德仁　校

*

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号
北京印刷一厂印刷
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　　1982年8月第一版
印张：12 16/32 页数：200　　1982年8月北京第一次印刷
字数：327千字　　印数：1—5,400 册

统一书号：15045·总2605-有5255
定价：1.55元

译　者　的　话

如所周知，一个 n 端对网络的特性可以用短路导纳参数、开路阻抗参数或混合参数来描述。应用这些参数，可以求出该网络在一定的终端条件下的全部特性。根据不同的具体课题，通常在某些情况下适宜采用某一种参数，而在另一种情况下，则宜于采用另一种参数。例如，在 j-端对上接电流源，而要求出 i-端对上的开路电压，所有其他端对都开路，显然，采用开路阻抗参数最为方便。如果采用短路导纳参数，结果将复杂得多。在一般负载情况下，应用上述参数所导致的公式可能都较复杂。散射参数则是根据给定的终端条件来定义的，尽管对开路或短路条件下的计算，它的应用并不带来方便，但对给定的终端阻抗，它能给出较简单的结果，而且便于从理论上作出分析。例如，从一个具有预给阻抗的信号源到某一预给负载的功率传输，最好是以散射参数来计算。因此，它最适合于类似滤波器，均衡器，匹配网络，以及平衡网络特别是微波网络之类的计算。

还需指出，有一些网络，它不具有阻抗矩阵或不具有导纳矩阵，或者二者都不存在（理想变压器就是一个例子，它既没有阻抗矩阵，也没有导纳矩阵），而对于任何一个线性、无源、时恒网络来说，散射参数总是存在的。

基于以上原因，散射参数方法日益受到网络理论与设计工作者的重视，它的应用是近十多年来网络理论的一个重大发展。

本书是专门介绍散射参数方法的理论及其在宽频带匹配网络问题中应用的一本新教材，其体裁和风格都是迄今国内外同类教科书中少有的。因此，我们把它推荐给读者。

本书对涉及的问题作了较深入细致的分析，数学处理严谨，叙

述比较简明。虽然理论性较强，但是也注意结合实际应用，还有不少设计实例。每章后面都有大量习题。此书的针对性较强，适宜作研究生、高年级大学生网络理论的教学参考书，也可供有关专业的科研工作者、工程技术人员和大学教师参考。

鉴于有些名词术语目前尚无标准译名，所以编排了中英文对照的内容索引，供参考。姓名一律参照“英语姓名译名手册(修订本)”（辛华编、商务版）定名。由于译者水平有限，译文中陋误之处在所难免，敬请批评指正。

在本书编排过程中，承作者大力支持，两度寄来原书的勘误表。据此，我们在译文中已一一订正。除一处之外，凡订正之处均未另加注释。在此特向陈惠开教授致以诚挚的谢意！

本书由黎安尧，柳维君（序言，附录，第一章）；刘红（第二章）；刘述章，刘仁厚，范光泉（第三章）；薛金良，邬琳若（第四章）；时振栋，王晦光（第五章）等译。全书译文经黎安尧最后统一加工，并请顾德仁教授校阅。

序　　言

过去二十年间，我们目击固体工艺的飞速发展，和与之相联系的看来是没有尽头的新型器件的产生。为了适应这种形势，与器件无关而带普遍性的新理论不断涌现出来。其最重大的进展之一是将散射技术引入网络理论。本书之目的在于对此理论及其在设计宽带匹配网络和放大器中的应用作统一而详细的介绍。本书主要是作为网络理论的最新教材而写成的，也可供那些想要学习如何将现代网络理论用来设计许多实际电路的企业工程师作为参考书。需要的基础是大学通常的网络基本方法及矩阵复变函数的运算能力。

作者企图于本书中集理论之精华，并提出那些带根本性并且走在新器件、新设计方法前面的课题。全书的指导思想是数学的严密性。因此，所有论断均经严格证明。可以确信，这些证明之中，许多是新的和与众不同的。作者力求将数学推理和物理假定处置平衡，以此促进本书之编著，同时采取讨论和举例说明所含概念与原理的简洁方式来介绍内容，书中还包括别处文献里没有、属于作者个人的一些成果。

浏览一下目录即可完全明了本书的范围。第 1 章引出与线性时恒 n 端对网络有关的许多基本概念，借用通常使用的物理量——时间和能量来定义无源性，并简短回顾 n 端对网络的一般特性，然后将网络的时域无源性条件转化成等效的频域无源性判据，后者可用以求得对网络性能及功用之基本限制。因此，如标题之所指，这章可作为网络的任何后续研究的起点和书中其余部分论述材料之基础。

第 2 章从单端对网络开始，采用传输线理论的概念，相当完备地阐述 n 端对网络的散射矩阵，随后导出散射矩阵的基本特性和它

与诸端对之间功率传输的关系，其结果对论述最后两章包括的宽带匹配理论是不可缺少的。

在探寻对网络或器件性能的基本限制时，性能标准往往过于理想化，物理上不可能实现。为了避免这种困难，第 3 章把逼近问题和逼近函数的讨论放在一起考虑。证明理想的砖墙式低通增益响应可用三种流行的有理函数方案去逼近。这就是：最平坦型（巴特沃思）响应，等波纹型（切比雪夫）响应和椭圆函数型（考尔参数）响应。接着提出相应的梯形网络实现方法。鉴于梯形网络实现是不平衡电路也不含耦合线圈，故从工程角度来说是吸引人的。由于给出了巴特沃思和切比雪夫增益特性梯形网络元件值计算公式的显式，从而使这两种网络的设计简化成简单的算术问题。虽然将注意力集中在低通增益特性，但不要认为它或许会引起什么局限性。通过频率变换的研究就说明了这个问题，因为频率变换允许将低通特性变换成高通、带通或带阻特性。

第 4 章应用前三章导出的结果，详细论述尤拉宽带匹配理论。采用完整地解出例子的方法阐述该理论的每个方面，特别是在完全普遍性的意义之上确立了博德 RC 并联型负载和达林顿C型负载情况下增益带宽的基本限制。第 5 章把尤拉理论推广到有源负载阻抗。阐明，若将散射参数进行适当变换、尤拉理论就可用来设计负阻放大器。鉴于不断研制出象隧道二极管这样的新型单端对有源器件，本章内容特别有意义。许多读者将会发觉，精读这一章会感到喜悦和兴奋。

在选择表达深度时，曾对以下情况给以相当注意，即许多读者是初次遇到这些课题。因此，本书包括了基本的入门知识。譬如，考虑到许多读者不熟悉椭圆函数，所以在专论逼近与梯形网络实现的第 3 章中，辟出整整一节讨论椭圆函数及其在后面的分析中必需的一些基本性质。事实上，关于椭圆响应一节在别的其他任何地方从未叙述得如此之简洁而系统。

本书是由在俄亥俄大学组织的“线性网络理论”教材发展而成

的。虽然在几年之中素材经自然扩充和更新，与原来面目已迥然不同，但是，给网络理论打基础这个基本目标仍然始终未变。欲使本书适合于作一学期或两个四分之一学年* 的线性网络理论及设计方面的教程并无多大困难。本书同样可作高等的网络综合教材。譬如作为现代网络综合的高等教科书之用，第 2、4、5 几章加上第 3 章的几节就能达到目的。后面几章的某些内容也适宜于作高级研究班的课题。

本书的一大特色是它包括有直接实用价值的结果，此即巴特沃思、切比雪夫和椭圆函数型响应的网络设计曲线与数表。这些数据是极其有用的；第一，可把许多设计步骤简化成算术问题，第二，用以指导研究很有价值。譬如，检验假设往往必须采用特例。这里，数据就在手边。

每章后面都附有各种习题，其中有些是书中导出结论的例行应用，另外一些则须将教材内容作相当大的引伸。共有 271 题。

本书的许多材料是根据作者在过去几年之间的研究所得到的。我很高兴地感谢俄亥俄大学贝克（Baker）奖学基金会对研究的支持。很多朋友和同事审阅了各部分手稿并提出了有益的建议。作者仅对他们表示感谢。他们当中，有伊利诺斯大学教授 M.E.Van Valkenburg，加利福尼亚大学伯克利分校教授 L.O.Chua，圣克拉拉大学教授 S.P.Chan 和普度大学教授 B.J.Leon。还要感谢对改进本书作过贡献的许多毕业生，特别是 S.W.Long 绘制了第 4 章的一部分增益曲线；我的博士研究生 S.Chandra 仔细阅读了全书；Major T.Chaisrakeo 在计算椭圆函数型响应和其他许多方面给我以协助。最后，我要谢谢妻子和孩子的耐心和谅解，仅以本书献给他们。

陈 惠 开

于俄亥俄州阿森斯

---

* two-quarter“两个四分之一学年”，美学制为两个八周——译者。

目　录

第1章 网络理论基础

电气网络是由有限多个**元件**相互连接组成的一种结构，它有一组**端对**，即可在其上测量电压、电流，并且能够将电磁能量传入或传出的**外接端子对**。网络元件是诸如电阻器、电容器、电感线圈、变压器及发生器等实际器件的理想化模型，而且服从诸如电压电流等等物理量的有关定律。端对概念的基本点是假设流进端对一个端子的瞬时电流与流出端对另一个端子的瞬时电流总是相等的。有 n 个这种外接端对的网络称为 ***n* 端对网络**，或简称 ***n* 端对**，如图 1.1 所示。本章将引出有关线性、时恒 n 端对网络的许多基本概念。首先利用常用的物理量**时间**和**能量**来定义**无源性**，并回顾 n 端对网络的一般特性；随后，将时域无源性条件转化为等效的频域无源性判据，后者将被用来判明网络性能及其用途会受到那些基本限制。

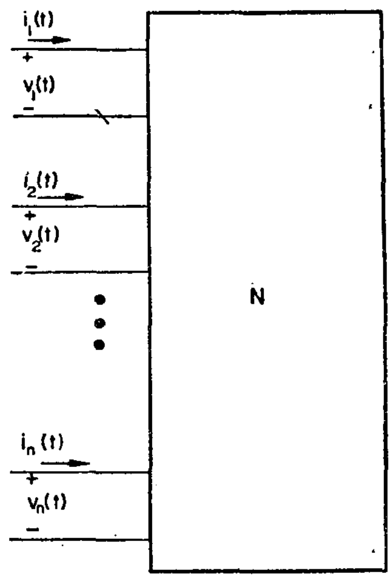

图 1.1 n 端对网络 N 的一般符号表示法

因为本书仅仅涉及线性、集总、时恒的 n 端对网络，所以，除非为了强调以外，“线性”、“集总”、“时恒”等词在讨论中一律省略。前两章的许多论述和所得结果是普遍性的，可以用于一般的线性系统。

§1 网络的基本假定

根据网络理论的历史演变，采用一套假定可以很好地描述网络的物理性质。因为这套假定可使网络理论尽可能简化和有效。

参照图 1.1 中表示 n 端对网络 N 的一般符号，图中**端对电压** $v_k(t)$ 和**端对电流** $i_k(t)$ 可以很方便地分别用**端对电压向量**和**端对电流向量**

$$\boldsymbol{v}(t)=[v_1(t), v_2(t), \cdots, v_n(t)]' \tag{1.1a}$$

$$\boldsymbol{i}(t)=[i_1(t), i_2(t), \cdots, i_n(t)]' \tag{1.1b}$$

表示。其中撇号表示矩阵的转置。我们说这两个 n 维向量 $\boldsymbol{v}(t)$ 和 $\boldsymbol{i}(t)$ 构成 n 端对网络 N 的**容许信号对**，写作 $[\boldsymbol{v}(t), \boldsymbol{i}(t)]$。今后，所涉及的 n 端对网络，其 $\boldsymbol{v}(t)$ 和 $\boldsymbol{i}(t)$ 将满足下列限制。

1.1 实时函数假定

实时函数假定可简单地叙述如下：若一个 n 端对网络的激励信号是时间的实函数，则响应信号也必须是时间的实函数。

虽然真实的物理世界中无疑是没有什么非实信号的，但网络理论中处理的信号常常是复变量的函数。记住这点很重要，因为采用复变量信号研究网络是一个方便的技巧。譬如，对阻抗为 $z(s)$ 的单端对网络进行稳态分析，习惯上采用激励电压 $V(j\omega)$，于是按这条假定，如果电压信号的形式为

$$v(t)=\mathrm{Re}V(j\omega)e^{j\omega t}=|V(j\omega)|\cos(\omega t+\theta) \tag{1.2}$$

式中，$V(j\omega)=|V(j\omega)|e^{j\theta}$，Re 表示"…的**实部**"，则响应电流信号也必须是时间的实函数。事实上，根据通常习惯，稳态电流为

$$i(t)=\mathrm{Re}\left[\frac{V(j\omega)}{z(j\omega)}e^{j\omega t}\right]=\left|\frac{V(j\omega)}{z(j\omega)}\right|\cos(\omega t+\theta-\phi) \tag{1.3}$$

式中 $z(j\omega)=|z(j\omega)|e^{j\phi}$。

注意，由于复变量 $s=\sigma+j\omega$ 常常叫**复频率**，所以如果我们只

说频率，就不明确究竟是指 s 还是指 ω。为了强调其区别，人们常称 ω 为**实频率**，它是 s 的**虚部**。容易引起混淆的是 s 的实部，σ 它被称为**虚频率**。这个名称在 1930 年以前就已经普遍采用。另一种习惯是称 ω 为**弧度频率**，称 σ 为**奈培频率**。这样可避免名称形式上的相近。不过，怎样称呼它们倒并不重要，反正这两个频率成分加在一起，就是复频率。对 ω，暂且采用实频率这个术语。当说到实频率轴，就指的是复频率平面的 $j\omega$ 轴。

1.2 时恒性假定

直观地讲，一个给定的激励信号，无论何时加到一 n 端对网络上都产生相同的响应，则该网络是**时恒**的。确切地讲，如果对每个容许信号对$[\boldsymbol{v}_1(t),\boldsymbol{i}_1(t)]$和每个有限的实常数$\tau$，都有一个满足(1.4)式关系的容许信号对 $[\boldsymbol{v}_2(t),\ \boldsymbol{i}_2(t)]$ 存在，则说该 n 端对网络是时恒的。

$$\boldsymbol{v}_1(t)=\boldsymbol{v}_2(t+\tau) \tag{1.4a}$$

$$\boldsymbol{i}_1(t)=\boldsymbol{i}_2(t+\tau) \tag{1.4b}$$

若 n 端对不是时恒的，就叫做**时变**的。换言之，若一个 n 端对，其端子特性与时间原点的选取无关则它是时恒的。所以，如果一个零初始条件的 n 端对网络的参数是常数，那么此网络就是时恒的。然而，逆命题不一定正确。很容易设想一个 n 端对网络，它虽包含有参数随时间而变化的物理元件，但却呈现出时恒的端对特性。图 1.2 所

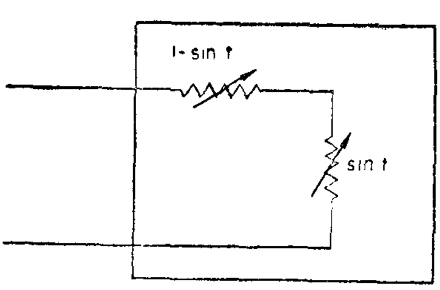

图 1.2 包含时变物理元件，却呈现时恒端对性能的单端对网络

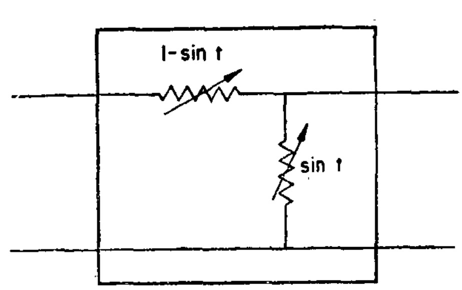

图 1.3 一个时变两端对网络

示单端对网络是由两个时变电阻串联组成，输入阻抗为一欧姆。按上述定义，应认为这个单端对是时恒的。然而，假设用此单端对构成图 1.3 所示的两端对网络。则这个新的两端对网络就变成时变的了。一般说来，一个 n 端对网络，若其初始储能影响端对特性，则从端对特性观点看，就应认为是时变的。

1.3 线性假定

一般说来，线性 n 端对网络是指响应与激励成正比例的 n 端对网络。更确切地说，如果一个 n 端对是线性的，那么，它对于一切容许信号对

$$[\boldsymbol{v}_1(t),\boldsymbol{i}_1(t)]\text{和}[\boldsymbol{v}_2(t),\boldsymbol{i}_2(t)] \tag{1.5a}$$

及所有有界实常数 c_1, c_2，都使得

$$[c_1\boldsymbol{v}_1(t)+c_2\boldsymbol{v}_2(t),c_1\boldsymbol{i}_1(t)+c_2\boldsymbol{i}_2(t)] \tag{1.5b}$$

也是一容许信号对。换言之，线性 n 端对遵从迭加原理，而且它的容许信号对构成一个线性空间。通常，一个 n 端对网络如果不是线性的，那就叫它做**非线性**的。但是必须记住，几乎所有的非线性分析方法，就其适用范围而论，都包括线性情况。因此，必须注意确保“非线性”这个术语解释得当。

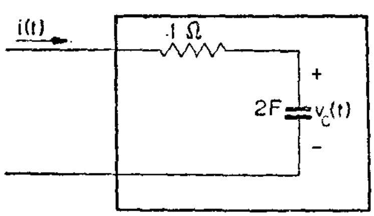

图 1.4　一非线性网络，其中电容器初始充电到 $V_0 \neq 0$

考察图 1.4 的单端对网络，其中电容器具有初始电压 $v_C(0+)=V_0$。容易证实，只要 $V_0 \neq 0$，该单端对 N 就是非线性的。为了说明迭加原理本质上与线性概念密切相关，当时刻 $t=0$ 时，我们在图 1.4 的端对上加一电压源（它由两个相同电池串联组成，每个电池的电压为 V_0 伏特），容易算出，端对电流为

$$i(t)=V_0e^{-0.5t} \tag{1.6}$$

现在假设，每次都单独用两个电池当中的一个电池，则所得电流为