

# 宽带匹配网络的 理论与设计

(增订本)

〔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

(增订本)

〔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带匹配网络的理论。全书共六章,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; 6. 相容阻抗理论。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

(增订本)

(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

广益印刷厂印刷

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 1982年8月第一版

印张: 15 4/32 页数: 242 1988年4月第二版

字数: 399千字 印数: 5 401—7 400册

ISBN 7-115-03628-4/TN073

定 价: 3.75元

## 第一版 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，译文中错误之处在所难免，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，王小峰（第二章）；刘述章，刘仁厚，范光泉（第三章）；薛良金，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。

## 增订本说明

陈惠开教授所著《Theory and Design of Broadband Matching Networks》一书出版以来，受到中、外有关学科学者的重视与好评。我们现将陈教授增写的第六章“Theory of compatible impedances”译出，与原书译本合并、再版以飨读者。

在本书再版时，对初版中的印刷错误和使用时发现个别译文不妥之处作了勘正。

新增的第六章由王小峰译，黎安尧校，顾德仁教授审阅。

译 者

## 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. Chairakeo 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”，美语译为两个学期——译者。

# 目 录

<b>第 1 章 网络理论基础</b> .....	1
§ 1 网络的基本假定 .....	2
1.1 实时函数假定 .....	2
1.2 时恒性假定 .....	3
1.3 线性假定 .....	4
1.4 无源性假定 .....	5
1.5 因果关系假定 .....	7
1.6 互易性假定 .....	8
§ 2 $n$ 端对网络的矩阵特征 .....	9
2.1 阻抗矩阵 .....	10
2.2 导纳矩阵 .....	11
2.3 混合矩阵 .....	11
2.4 不定导纳矩阵 .....	13
§ 3 功率增益 .....	17
§ 4 埃尔米特型 .....	19
§ 5 正实矩阵 .....	23
§ 6 无源性的频域条件 .....	32
§ 7 结论 .....	37
习题 .....	38
参考文献 .....	40
<b>第 2 章 散射矩阵</b> .....	41
§ 1 传输线理论的扼要回顾 .....	42
§ 2 单端对网络的散射参数 .....	43
2.1 与基相关的反射系数 .....	44

2.2	与基无关的反射系数 .....	46
2.3	$z(s)$ 的准埃尔米特部分的因式分解 .....	48
2.4	与基无关的反射系数的另一种表示法 .....	53
2.5	归一化反射系数和无源性 .....	54
§ 3	$n$ 端对网络的散射矩阵 .....	57
3.1	与基相关的散射矩阵 .....	60
3.2	与基无关的散射矩阵 .....	64
3.3	散射矩阵和增广 $n$ 端对网络 .....	67
3.4	与基无关的散射矩阵的另一种表示法 .....	69
3.5	归一化散射参数的物理解释 .....	70
3.6	归一化散射矩阵和无源性 .....	76
3.7	无耗两端对网络的归一化散射参数 .....	78
§ 4	有界实散射矩阵 .....	79
§ 5	多端对网络的相互连接 .....	85
§ 6	结论 .....	93
	习题 .....	94
	参考文献 .....	100
<b>第3章</b>	<b>逼近与梯形网络实现 .....</b>	<b>101</b>
§ 1	巴特沃思响应 .....	102
1.1	巴特沃思函数的极点 .....	104
1.2	巴特沃思多项式的系数 .....	106
1.3	巴特沃思网络 .....	108
1.4	巴特沃思 $LC$ 梯形网络 .....	110
§ 2	切比雪夫响应 .....	116
2.1	切比雪夫多项式 .....	117
2.2	等波纹特性 .....	119
2.3	切比雪夫函数的极点 .....	122
2.4	多项式 $p(y)$ 的系数 .....	125
2.5	切比雪夫网络 .....	126
2.6	切比雪夫 $LC$ 梯形网络 .....	128
§ 3	椭圆函数 .....	133

3.1 雅可比椭圆函数 .....	134
3.2 雅可比虚变换 .....	135
3.3 椭圆函数的周期 .....	136
3.3.1 实周期 .....	138
3.3.2 虚周期 .....	139
3.4 雅可比椭圆函数的极点和零点 .....	140
3.5 加法定理和复宗量 .....	142
§ 4 椭圆函数型响应 .....	145
4.1 特征函数 $F_n(\omega)$ .....	146
4.2 通带和阻带的等波纹特性 .....	153
A. 通带中的最大值与最小值 .....	155
B. 阻带中的最大值与最小值 .....	156
C. 过渡带 .....	157
4.3 椭圆函数型响应的极点与零点 .....	162
4.4 椭圆函数型网络 .....	168
§ 5 频率变换 .....	174
5.1 高通变换 .....	175
5.2 带通变换 .....	177
5.3 带阻变换 .....	180
§ 6 结论 .....	182
习题 .....	183
参考文献 .....	191
<b>第4章 宽带匹配理论：无源负载</b> .....	<b>194</b>
§ 1 博德-范诺-尤拉宽带匹配问题 .....	195
§ 2 尤拉宽带匹配理论：初步研究 .....	196
§ 3 对 $\rho(s)$ 的基本约束条件 .....	198
§ 4 博德并联 $RC$ 型负载 .....	200
4.1 巴特沃思变换器功率增益特性 .....	201
4.2 切比雪夫变换器功率增益特性 .....	211
4.3 椭圆函数型变换器的功率增益特性 .....	222
4.4 均衡器的后端阻抗 .....	231

§ 5	对 $\rho(s)$ 的基本约束条件的必要性的证明	233
§ 6	对 $\rho(s)$ 的基本约束条件的充分性的证明	237
§ 7	均衡器的设计程序	240
§ 8	达林顿 C-型负载	246
8.1	巴特沃思变换功率增益特性	246
8.2	切比雪夫变换器功率增益特性	252
8.3	椭圆函数型变换器功率增益特性	258
8.4	均衡器的后端阻抗	261
§ 9	常数变换器功率增益	262
§ 10	结论	274
	习题	275
	参考文献	280
<b>第 5 章</b>	<b>宽带匹配理论, 有源负载</b>	<b>282</b>
§ 1	特殊类型的有源阻抗	283
§ 2	负阻放大器的一般结构	285
§ 3	非互易放大器	287
3.1	$N_+$ 的设计考虑	289
3.2	$N_+$ 的设计考虑	291
3.3	$N_+$ 的设计考虑	292
3.4	举例	293
3.4.1	隧道二极管放大器: 最平坦型变换器功率增益	303
3.4.2	隧道二极管放大器: 等波纹型变换器功率增益	311
3.5	推广和稳定性	319
§ 4	传输功率放大器	321
4.1	隧道二极管与负载并联	322
4.1.1	变换器功率增益: $R_1 > R$	323
4.1.2	变换器功率增益: $R_1 < R$	330
4.2	隧道二极管与发生器并联	332
4.2.1	变换器功率增益: $R_1 > R$	333
4.2.2	变换器功率增益: $R_1 < R$	334
4.3	稳定性	335

4.4 敏感度 .....	336
4.4.1 隧道二极管与负载并联 .....	336
4.4.2 隧道二极管与发生器并联 .....	339
§ 5 互易放大器 .....	339
5.1 一般的增益带宽极限 .....	340
5.2 级联连接 .....	342
§ 6 有源阻抗在一个以上的放大器 .....	348
6.1 非互易放大器 .....	350
6.2 互易放大器 .....	353
§ 7 结论 .....	356
习题 .....	357
参考文献 .....	368
<b>第 6 章 相容阻抗理论</b>	
§ 1 相容阻抗问题 .....	370
§ 2 达林顿理论 .....	371
2.1 $z_{11}$ 、 $z_{11}$ 和 $y_{11}$ 为电抗函数 .....	372
2.2 $z_{12}$ 的有理化 .....	373
2.3 留数条件 .....	376
2.4 串联实现 .....	378
§ 3 级联综合 .....	385
3.1 主定理 .....	386
3.2 非互易网络实现 .....	394
3.2.1 E 型节 (type-E section) .....	395
3.2.2 退化的 E 型节, A 型节、B 型节、C 型节及布鲁勒节 .....	399
3.2.3 理查德节 .....	405
3.3 互易实现 .....	408
3.4 主定理的证明 .....	416
3.4.1 正实函数 $W_1(s)$ .....	415
3.4.2 $W_1(s)$ 的方次 .....	418
§ 4 相容阻抗理论 .....	421
4.1 互易无耗两端对网络 N 的实现 .....	431

4.2 特殊的相容阻抗.....	437
4.3 相容性定理的证明.....	439
§ 5 结论.....	444
习题.....	445
参考文献.....	452
附录.....	454
附录A 巴特沃思响应.....	454
附录B 切比雪夫响应.....	454
附录C 椭圆函数型响应.....	457
内容索引.....	463

# 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；

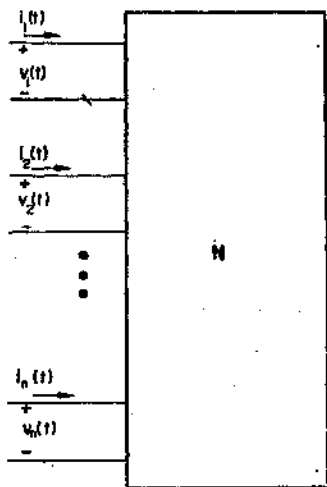


图 1.1  $n$  端对网络  $N$  的一般符号表示法

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。

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  $v_s(t)$  和端对电流  $i_s(t)$  可以很方便地分别用端对电压向量和端对电流向量

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

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

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

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

式中,  $V(j\omega) = |V(j\omega)| e^{j\theta}$ ,  $\operatorname{Re}$  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

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

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