

High Power RF
Passive Device and System

大功率射频 无源器件与系统

居继龙 © 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

大功率射频无源器件与系统

High Power RF Passive Device and System

居继龙 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书根据作者多年来在射频/微波技术领域研究与实践,详细讲述相关的基础知识、基本器件、定向耦合器、滤波器、谐振腔的温度补偿、阻抗变换与匹配、功率分配与合成及发射天线等内容,同时给出许多工程设计实例,涉及的射频结构以同轴传输线、带状线、同轴谐振腔及波导谐振腔为主,频率范围从几十兆赫兹到几千兆赫兹,功率等级从几十瓦到几百千瓦。

本书对从事射频/微波技术领域的人员和工程技术人员具有参考价值,也可供相关院校的师生参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大功率射频无源器件与系统/居继龙著. —北京:电子工业出版社, 2017.9
ISBN 978-7-121-32603-5

I. ①大… II. ①居… III. ①射频系统 IV. ①TH703

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第213114号

责任编辑:富 军

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:720×1000 1/16 印张:15.5 字数:248千字

版 次:2017年9月第1版

印 次:2017年9月第1次印刷

定 价:59.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254456。

前言

电磁波频谱的射频/微波频段 (30kHz ~ 300GHz) 有自身的特点, 它能够以地面波、直射波和天波的方式实现信号的长距离传送, 是地面电视广播、无线通信和卫星传输等领域主要占用的频段。随着这些领域新技术的不断出现, 每个应用项目都需要越来越多的频谱资源, 而总的频谱资源是有限的, 所以如何分配并管理使用好这些有限的频谱资源显得非常重要。射频无源器件, 如传输线、耦合器、滤波器、合成器及天线等, 是无线广播和通信技术中的关键器件, 在 5G 网络和粒子加速器末级电磁能量交换中亦占有重要位置。

Matthaei、Young 及 Jones 在 20 世纪 60 年代出版了一本关于微波滤波器、阻抗匹配网络和耦合结构的专著, 这是一部射频工作者常用的经典参考书籍。书中的基础理论目前仍然适用, 但一些设计方法已经简化和更新。2000 年, Ian Hunter 出版了一本关于微波滤波器的理论与设计一书。书中对设计微波滤波器所牵连的理论和方法进行系统的阐述, 并以设计实例验证理论的正确性。2001 年, Jia-Sheng Hong 和 M. J. Lancaster 出版了一本关于微带滤波器在射频/微波领域的应用一书, 并在 2011 年修订再版。书中讨论了新型微带滤波器的设计技术和小型化方法。其中, 关于网络分析、传输线和滤波器的设计理论不仅适用于微带滤波器的设计, 也适用于其他形式滤波器的设计。

笔者根据多年在射频/微波技术领域研究与实践写作本书。书中涉及的射频结构以同轴传输线、带状线、同轴谐振腔及波导谐振腔为主, 频率从几十兆赫兹 ~ 几千兆赫兹, 功率等级从几十瓦 ~ 几百千瓦。

根据技术指标进行器件选型和设计是一种综合方法, 是以电路理论为基础, 结合传输线理论, 由原型电路经过变换得到所需器件的网络参数, 最后进行射频/微波实现。这是目前大部分有关微波器件书籍中都要介绍的综合理论。本书的特点是利用综合方法取得的设计成果, 在充分理解基础电路、基本器件

的基础上,选择相关网络结构,建立数学模型,利用计算机仿真技术的优势,通过调整参数,实现满足技术指标的射频结构或提出改进和提高的办法。本书实用性强,没有过多的理论推导,更多的是介绍设计、仿真方法,讨论射频结构的实现方案。

根据不同的精度要求,采用不同的近似方法,建立不同的数学模型,从而得到不同的仿真速度。如果要求高精度的结果,那么模型结构复杂,仿真速度慢,但在实际应用时,往往只需要预测一种可能的趋势,可以用简易方法,如用集中参数代替分布参数,即可快速给出结果。也可以在大系统中进行“粗”“细”结合,将简单结构和已知结果的结构用网络参数表示,对于局部关键部位采用精细仿真得到相应子网络的参数矩阵,最后合并网络,得到系统参数。

本书内容包含基础知识、基本器件、定向耦合器、滤波器、谐振腔的温度补偿、阻抗变换与匹配、功率分配与合成及发射天线共8章,同时给出许多工程设计实例。

目前,大功率广播电视多频道合成技术在国内得到广泛的应用与发展。笔者希望本书对从事相关领域的研究人员和工程技术人员有参考和帮助作用,也可供射频/微波技术专业的学生学习与参考。

笔者感谢罗一鸣教授在专业方面给予的指导;感谢 TERACOM Components AB 给予的研究与实践机会;感谢中国传媒大学提供的研究与教学平台;感谢北京飞卡科技有限公司提供的部分图片和测试结果;感谢从事微波滤波器和天线理论与设计的研究人员,他们提供了大量有价值的参考文献。

笔者感谢中国传媒大学通信工程系主任逯贵祯教授在百忙之中抽出时间审阅书稿并提出宝贵意见;感谢理工学部部长刘剑波教授、车晴教授及李增瑞教授对本书出版的大力支持。

感谢家人和同事给予的理解、支持和帮助。

谨以此书纪念导师李孝勛教授和任朗教授。

居继龙

2017年7月

目 录

1 第 1 章 基础知识

- 1.1 引言 /2
- 1.2 射频网络与网络参数 /5
 - 1.2.1 射频网络等效 /5
 - 1.2.2 网络参数矩阵 /6
 - 1.2.3 射频网络特性 /9
 - 1.2.4 基本射频网络和网络参数 /11
- 1.3 射频网络级联和网络参数转换 /14
- 1.4 对称射频网络的奇偶模分析方法 /17
- 1.5 功率与热量 /21
- 1.6 传输线 /22
 - 1.6.1 同轴线 /24
 - 1.6.2 矩形波导 /31
- 1.7 谐振腔 /34
 - 1.7.1 同轴腔 /35
 - 1.7.2 矩形腔 /40
 - 1.7.3 圆柱腔 /42
- 1.8 软件设计工具 /44
- 1.9 小结 /45
- 1.10 参考文献 /45

47 第 2 章 基本器件

- 2.1 概述 /48

- 2.2 同轴线 /48
- 2.3 电缆接头 /52
- 2.4 转接器 /54
 - 2.4.1 同轴—同轴转接器 /54
 - 2.4.2 同轴—波导转接器 /55
- 2.5 弯头 /57
- 2.6 连接组件 /58
- 2.7 耦合装置 /59
 - 2.7.1 探针耦合 /60
 - 2.7.2 小环耦合 /61
 - 2.7.3 窗口耦合 /63
 - 2.7.4 组合耦合 /63
- 2.8 接地装置 /64
- 2.9 速调管输出窗口 /65
- 2.10 小结 /67
- 2.11 参考文献 /67

69 第3章 定向耦合器

- 3.1 概述 /70
- 3.2 性能指标和分析方法 /71
- 3.3 波导耦合器 /75
- 3.4 分支线耦合器 /77
- 3.5 同轴线耦合器 /82
- 3.6 平行线耦合器 /85
- 3.7 多节平行线耦合器 /89
- 3.8 耦合器的级联 /94
- 3.9 小结 /96
- 3.10 参考文献 /96

98 第4章 滤波器

- 4.1 滤波器设计的一般理论 /100
 - 4.1.1 谐振腔等效电路 /101
 - 4.1.2 谐振腔等效电路的一般解 /103
 - 4.1.3 耦合电容矩阵 /107
 - 4.1.4 耦合极性 /111
- 4.2 带通滤波器 /113
 - 4.2.1 同轴型带通滤波器 /113
 - 4.2.2 波导腔带通滤波器 /116
 - 4.2.3 扫频带通滤波器 /121
- 4.3 几种宽带滤波器 /124
 - 4.3.1 低通和高通滤波器 /124
 - 4.3.2 带阻滤波器 /126
 - 4.3.3 交指型滤波器 /128
- 4.4 滤波器的调试 /130
- 4.5 小结 /132
- 4.6 参考文献 /133

134 第5章 谐振腔的温度补偿

- 5.1 谐振腔的温度特性 /135
- 5.2 微扰理论 /138
- 5.3 温度补偿技术 /141
- 5.4 小结 /150
- 5.5 参考文献 /150

151 第6章 阻抗变换与匹配

- 6.1 Smith 圆图 /153
- 6.2 $\lambda/4$ 阶梯阻抗变换器 /156

- 6.3 短阶梯阻抗变换器 /161
- 6.4 交指型阻抗变换器 /166
- 6.5 阻抗调配器 /169
- 6.6 大功率吸收负载 /171
 - 6.6.1 衰减片干负载 /172
 - 6.6.2 终端电阻干负载 /174
 - 6.6.3 陶瓷电阻管干负载 /176
- 6.7 小结 /177
- 6.8 参考文献 /177

178 第7章 功率分配和合成

- 7.1 功率分配 /179
 - 7.1.1 $\lambda/4$ 阶梯变换功率分配器 /180
 - 7.1.2 Wilkinson 功率分配器 /184
 - 7.1.3 分支耦合型功率分配器 /189
 - 7.1.4 耦合线型功率分配器 /190
- 7.2 功率合成器 /191
 - 7.2.1 延时线型多工器 /191
 - 7.2.2 星型多工器 /193
 - 7.2.3 桥式多工器 /196
 - 7.2.4 定向滤波器多工器 /198
 - 7.2.5 多工器的选择 /199
- 7.3 开关切换系统 /202
 - 7.3.1 同轴开关切换 /203
 - 7.3.2 U 形线切换 /204
 - 7.3.3 热切换 /205
- 7.4 小结 /206
- 7.5 参考文献 /207

209 第8章 发射天线

- 8.1 概述 /210
 - 8.1.1 天线的作用 /210
 - 8.1.2 天线的分类 /211
 - 8.1.3 线天线的求解方法 /212
- 8.2 电波传播 /213
 - 8.2.1 电波传播的形式与特点 /213
 - 8.2.2 视线距离和路径损耗 /214
 - 8.2.3 多径传播 /215
- 8.3 线天线的参数 /216
- 8.4 带反射板的半波对称振子天线 /221
 - 8.4.1 天线阵方向图 /221
 - 8.4.2 频率及辐射特性 /223
 - 8.4.3 自阻抗与互阻抗 /227
 - 8.4.4 振子形状和馈电方式 /229
- 8.5 双极化天线 /231
- 8.6 天线系统的设计与安装 /233
- 8.7 小结 /236
- 8.8 参考文献 /236

第1章 基础知识

- 1.1 引言
- 1.2 射频网络与网络参数
- 1.3 射频网络级联和网络参数转换
- 1.4 对称射频网络的奇偶模分析方法
- 1.5 功率与热量
- 1.6 传输线
- 1.7 谐振腔
- 1.8 软件设计工具
- 1.9 小结
- 1.10 参考文献

1.1 引言

电磁波频谱有很宽的频率范围，包含无线电波、微波、红外线、可见光、X 射线等频段。微波（Microwave）通常是指频率为 300MHz ~ 300GHz 的电磁波；射频（Radio Frequency）没有严格的频率范围，广义地说，向外辐射电磁信号的频率为射频，频率一般为 10kHz ~ 几 GHz；微波的低端和射频的高端相互重叠。在射频/微波频段，根据频率或波长的不同可划分为许多小段，并赋予不同的名称，如图 1.1 所示。

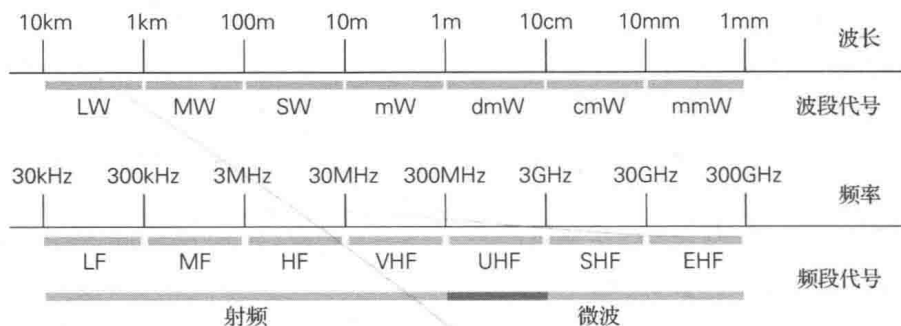


图 1.1 射频/微波频谱的划分

频段的划分和命名不是唯一的，根据频率的使用属性常常有一些特殊的名称。比如，广播电视（Broadcasting）频段，一般指频率为 300kHz ~ 1.5GHz；手机通信频段有 CDMA800/2000、GSM900/1800、DCS、UMTS 等，频率范围为 800 ~ 2500MHz。

射频无源器件在射频应用领域扮演着重要角色，从人们的日常生活，如手机通信、电视广播、工业运转，到航空、军事、卫星等领域都在应用这些器件。可以说，有射频信号的链路上就有射频耦合器、滤波器、分配/

合成器及天馈线等射频无源器件。射频耦合器可从主信号通路上提取部分信号，起到对信号的分支、分配或检测作用；射频滤波器用来区分有用和有用信号；射频分配/合成器可将一路信号分配为多路信号或将多路信号合成为一路信号；天馈线系统可将射频信号以无线电方式发送出去或接收回来。图 1.2 和图 1.3 分别给出了这些器件在广播电视与手机通信领域中的应用。

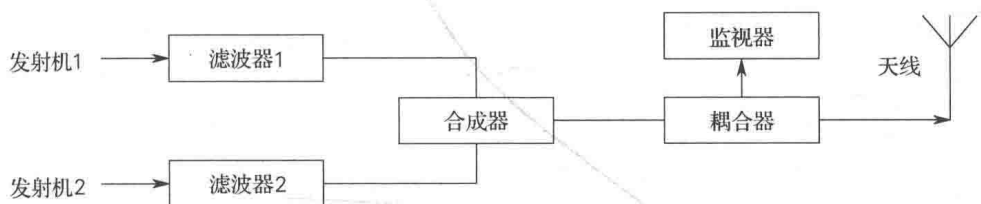


图 1.2 电视发射机射频输出

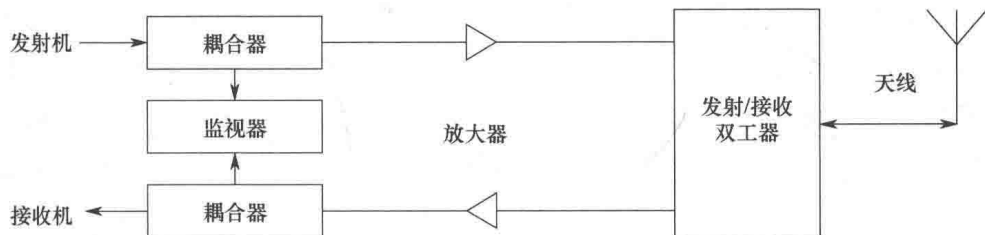


图 1.3 通信基站射频前端

图 1.2 中，两部发射机经过各自的带通滤波器滤除通带外无用信号以后，由合成器合并成一路信号，送到发射天线。对于大功率分米波（UHF）电视发射系统来说，总体要求是频道之间隔离度大、插入损耗小、反射特性（驻波比）好、温度稳定性高、场强分布均匀。滤波器的衰减特性（或称为选择性）与腔体的数量有关。腔体数量越多，滤波器的带外衰减越好，但滤波器的插入损耗与腔体数量成反比，即腔体的数量越多，插入损耗越大。在合成器的输出处加上一个弱定向耦合器，耦合度一般大于 30dB，耦合出一

小部分信号用于检测正向或反向信号的大小,以监控传输系统的性能。电视发射天线一般架设在城市中部几十米~几百米高的电视发射塔顶部,是由很多辐射单元组成的天线阵。中、短波广播天线占地面积较大,一般建立在城市的外围。

一部模拟电视发射机的最大同步功率可以达到 30kW,数字电视发射机的最大平均功率也可达 20kW,省级调频台的广播发射机功率通常为 10kW。当多个频道(多路发射机)合成在一起用同一副天线播出时,总的输出功率会很高,有超过 100kW 的调频发射台,传输线上的峰值电压也会很强。中、短波发射机的功率更高,能达到 500kW。

图 1.3 是通信基站射频前端。双路合成器(Diplexer)包含发射通道(Tx)滤波器和接收通道(Rx)滤波器及分配/合成器。全球移动通信系统(GSM)采用时分多址(TDMA)技术,发射和接收同时进行,要求系统的动态范围大于 100dB。发射机通路上功率放大器产生的带外互调产物和谐波分量必须滤除,使发射信号泄漏到接收频带内的信号电平满足要求,因此对发射机滤波器在接收频带内的衰减有很高的要求。另外,为了得到大的信号输出电平,保证功率放大器有最大的线性动态范围,发射机滤波器的插入损耗要尽量小。同样地,对接收机滤波器来说,它对发射机的信号衰减也要足够大,自身的插入损耗要尽量小,以提高系统的灵敏度。通信系统的功率等级为几十瓦~上百瓦。通信天线具有收、发双工功能。

无论是广播还是通信,都要用到大功率无源器件及其系统。设计这些器件和系统需要具备电路、网络、电磁场及微波技术等专业知识,还要了解材料、结构及加工工艺等辅助知识,同时具有使用计算机、结构设计与电磁仿真软件等基本技能。

本书用到的专业基础知识包含射频网络与网络参数、射频网络级联与网络参数转换、射频网络的奇偶模分析方法、功率与热量、传输线与谐振腔等。对于涉及的特殊知识,如第 5 章谐振腔温度补偿用到的微扰理论,第 8 章发射天线中有关线天线理论与电波传播知识,将在相应章节中介绍。

本书常用缩写字母的含义见表 1.1。

表 1.1 本书常用缩写字母的含义

f_0	中心频率/谐振频率	P	Power/Port, 功率/端口
f_c	中心频率/截止频率	F	Flange/Female, 法兰/阴头
λ_c	截止波长	G	Gain, 增益
c_0	光速	δ	趋肤深度
S	Source, 源	L	Load, 负载
D	Directivity, 方向性	C	Coupling, 耦合度
CH	Channel, 频道	A, a	Transfer Parameter, 转移参数
RL	Rigid Line, 硬同轴线	S, s	Scatter Parameter, 散射参数
FM	Frequency Modulation, 调频	UHF	Ultra High Frequency, 分米波频段
RWG	Rectangular Waveguide, 矩形波导	GUI	Graphic User Interface, 图形用户界面
CWG	Cylindrical Waveguide, 圆柱形波导	VNA	Vector Network Analyzer, 矢量网络分析仪
BPF	Band Pass Filter, 带通滤波器	VSWR	Voltage Standing Wave Ratio, 电压驻波比
MP	Multiplexer, 多工器	EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power, 等效全向辐射功率
WPD	Wilkinson Power Divider, 功率分配器		

1.2 射频网络与网络参数

1.2.1 射频网络等效

严格求解电磁场问题，特别是对于结构复杂的射频无源器件来说是一件很困难的事，工程上一般采用网络等效这一近似而有效的方法，特别是当射频器件具有封闭结构（相对于天线辐射的开放结构而言）时，它的端口参数是可以精确测量的，可为分析由这些器件搭建的系统性能提供很好的基础。另外，为了知道某一种射频结构的特性，如在同轴或波导传输线内放置一个金属螺钉，可通过测量端口网络参数，去除理论上特定解的传输线影响，就可以知道该结构本身（如金属螺钉）的射频特性了。积累一些具有

特定射频结构的子网络参数，由它们构成的网络系统可以根据网络特性求得。

大功率射频无源器件和系统是由传输线（包含同轴线、带状线、波导）、转接器、滤波器、耦合器、功率分配/合成器、吸收负载、天线等器件组成的，为了便于理论分析，一般将各个器件用一个单端口（如负载）或双端口（如转接器）或多端口（如耦合器）网络来等效，如图 1.4 所示。

每一个器件的内部通常是由不同结构的传输线、腔体、耦合装置、介质支撑、调节螺钉或集中参数的电感、电容等组成的，分析时，可以根据特定的规则将其分解为多个等效子网络。

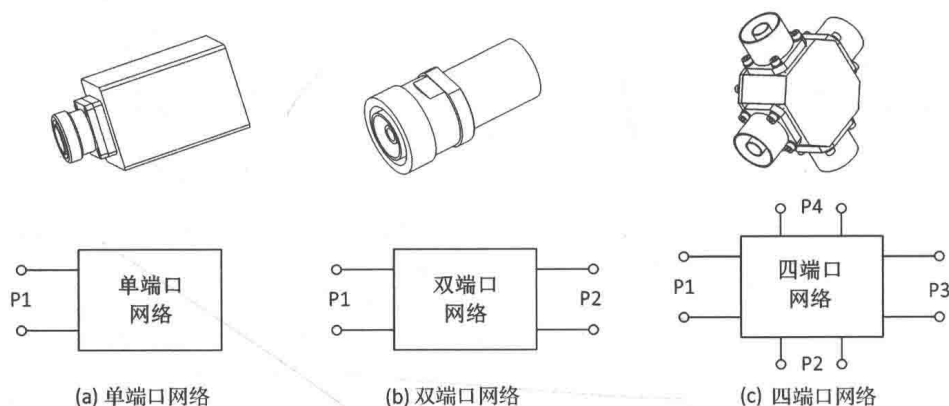


图 1.4 射频器件与射频网络的等效

1.2.2 网络参数矩阵

在射频器件网络等效中，双端口网络是最基本的。描述一个等效网络的性能通常采用网络参数矩阵。常用的网络参数矩阵有阻抗矩阵 $[Z]$ 、导纳矩阵 $[Y]$ 、转移矩阵 $[A]$ 、散射矩阵 $[S]$ 及传输矩阵 $[T]$ 等。其中， $[A]$ 矩阵或称 A 参数在分析由多个网络级联时比较方便， $[S]$ 矩阵或称 S 参数是可以利用矢量网络分析仪（Vector Network Analyzer, VNA）测量的，所以下面将重点讨论这两个参数矩阵。在表述参数、矩阵时，一般用小写字母表示归一化值。

一个双端口网络及端口参数如图 1.5 所示。

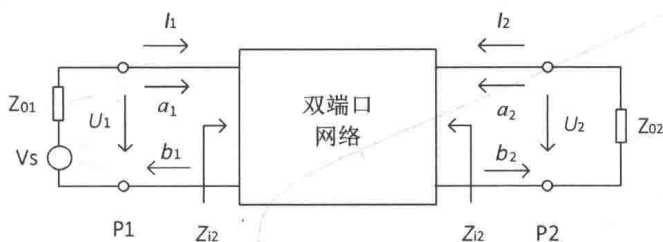


图 1.5 用端口电压 U 和电流 I 或用端口入射波 a 和反射波 b 定义的双端口网络

图 1.5 中，用端口电压和电流来描述网络属性，这在低频集中参数的电路中普遍采用。电压和电流可以用相关仪表测量，但在射频结构或等效电路中，用电压和电流就不是很方便了，取而代之的是端口入射波和反射波。这种方法针对的是同一个网络，在端口处的总功率（由电压、电流表示）等于入射功率（由入射波表示）减去反射功率（由反射波表示），从而建立参数之间的相互联系^[1,2]。

当用端口电压和电流描述如图 1.5 所示的端口网络时，有矩阵方程

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

式 (1.1) 中定义

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

其元素定义表达式为

$$A_{11} = \frac{U_1}{U_2} \Big|_{I_2=0} \quad A_{12} = \frac{U_1}{-I_2} \Big|_{U_2=0} \quad A_{21} = \frac{I_1}{U_2} \Big|_{I_2=0} \quad A_{22} = \frac{I_1}{-I_2} \Big|_{U_2=0} \quad (1.3)$$

A_{11} 表示端口 P2 开路时的转移电压， A_{12} 表示端口 P2 短路时的转移电阻， A_{21} 表示端口 P2 开路时的转移电纳， A_{22} 表示端口 P2 短路时的转移电流。

有的书中将 A 矩阵称为 ABCD 矩阵，为了编程方便，本书使用 A 矩阵。