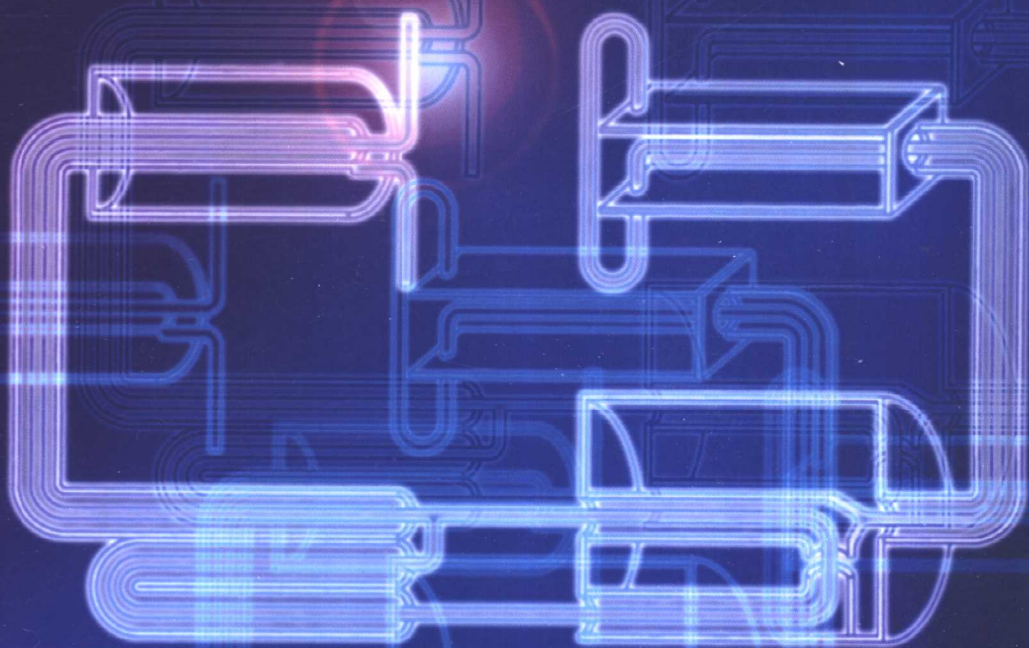


# 实用射频技术

胡树豪 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

# 实用射频技术

胡树豪 著

电子工业出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是作者 50 年以来从事天线、馈线设计与射频测量工作的经验总结。本书在介绍传输线的基本知识与同轴线的实用知识的基础上,重点对平衡器作了深入的论述,并给出了常用平衡器简表,以便选用;介绍了常用线天线的性能参数,以及作者按实验研究方法对常规天线进行开发与研制的思路与物理概念。

本书第 8 章到第 11 章介绍了射频测试原理与仪器、检测与调试。最后一章给出了教学演示和丰富的实验项目。书中对一般不太重视的同轴电缆的检测,作了极其详细的介绍。

本书适于天线与射频工作者阅读,也可作为大专院校有关专业的教材参考书,以及实习指导用。

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

实用射频技术/胡树豪编著. —北京:电子工业出版社, 2004.1

ISBN 7-5053-9444-4

I.实… II.胡… III.射频—电子技术 IV.TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 112511 号

责任编辑:杜振民

印 刷:北京天宇星印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:16 字数:350 千字

印 次:2004 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定 价:30.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

## 序

树豪老友赠我书稿，并给我一次发表意见的机会。我在从事微波天线的研究以前，也搞过一段超短波天线的工作，看了此稿觉得颇有启发。超短波波段主要服务于中、近距离通信、广播和预警雷达。适用的天线类型主要是振子及其阵列。它们的尺寸一般虽不很大，但是横截面的尺寸对性能影响相当大，必须当作立体结构来看。而且其结构和单元间的相互配合有相当大的灵活性。对于这种情况，应用测试样品的方法要比数学分析有效得多。设计者常凭经验拟定样品方案，边测量边调整，以获得满意的方案。因此，参考别人的经验是十分需要的。很多天线教科书对这个波段的介绍都很简略。

除简单的铅垂振子以外，有源振子都有一对激励端，这个波段的馈线经常使用外导体接地的同轴线。既要保证馈线外导体的屏蔽作用，又要保证振子两臂电流同相，馈电端必须接连转换器（本书称为平衡器），馈电端的转换质量对整个天线性能的影响很大。但很多天线教科书对此都不十分重视。

作者从事天线技术工作已有半个世纪，虽已年过七旬，经历过不少坎坷，还在勤勤恳恳地从事实际工作，并且把他的经验比较系统的整理成这样一本书，连同失败的教训一道奉献给同行，这种精神很值得赞扬。本书是一本有价值的参考书，不是教科书。一个人的经验再多，也不能包罗万象。教科书是整理有关材料，当然会显得丰富、系统。两种书互有短长，不可偏废。但经验的取得当然费时、费力。其中甘苦只有亲身参加技术实践者能够体会。

这里，本人要乘机就下列二问题谈点看法。

第一，理论与实践。

为了认识实际的规律性，一种办法是从某类事物的普遍规律出发，结合当前研究的事物的具体情况，运用思维来得出此具体事物的特定规律性，再到实践中去检验，思维的工具是数学。另一类办法是从实际的问题中提取需要作定量研究的具体问题，用模型来突出这个问题，加以观察，或对实际直接进行观察，从观察的结果中得出结论，这就是实验。观察的工具即是测量技术和仪器。数学分析和实验观察都是构成理论的工具，各有特点。应当根据问题的具体情况选用合适的工具，把二者结合起来，得到有效的办法，而不是把二者对立起来。

数学是自然科学的思维加工方法，它的处理对象起初是从客观事物直接抽象出来的数和图形，以后引伸到复数、矢量等等，再概括很多数学概念而提出线性空间等。因此，它们概括了越来越广泛的事物的共性。数学的处理方法是由客观事物的运动反映到意识中而形成的逻辑。数学符号、方程和使用的数学术语是它的语言。微积分进入物理领域是物理飞跃发展的开始，没有微积分，哪有牛顿力学，哪能预见电磁波？

不同的问题应当选用最有效的不同方法，使用较深的数学解决了较难解决的问题当然有较高的水平。但用了深的数学未必就有高水平。用不深的数学解决难解的问题，水平也

很高。本来可用不深的数学就能解决的问题却要用深的数学方法，其实水平并不高。衡量水平的尺度应是：所得结果在指导实践中所具有的意义大小和精粗，以及所花的代价高低。

有些问题只能用数学方法来计算。一些大型且造价很高的设备，如隐身飞机、孔径宽达 1km 的射电望远镜天线或超远程预警雷达天线，不经精细而准确的计算，在尚无把握之前是不能冒然施工的。

也有些问题是不必用数学方法来求解的，例如本书介绍的一些振子天线，制造一个模型，用边测试、边调整的办法来得到满意的性能，并不需要太多代价。如定要用数学方法来求解，就得耗费多得多的力量，还未必能得到满意的性能。

即使用数学方法去求解，也时常离不开实验工作，为检验数学模型的可行性，必须进行模型实验，用样品模型的测量结果去检验算法的可靠性，数学算式中的一些物理参数都需要用实测的方法来得到。一个科学工作者，一定要把理论工作与实验工作结合起来，不能偏废。

基于以上的认识，本书中虽未大量引用高等数学，仍然处处体现了这是作者很深的理论功底与丰富的实践经验相结合的成果。

第二个问题，引进与自主创新。

在科技的竞赛场上，没有跑道，没有终点线，没有观众和选手的区别。大家都在跑，指挥员、教练也得跑，不跑就得退场。科技文摘和国际会议等都不过是路边的广告牌，不是裁判，只有科技实践才是裁判。在科技和产业前进的路途中，遇到了问题，谁解决得早、解决得好，谁就领先。党的“科教兴国”战略给了我们动力，具体怎样跑，要由所有的工作者去探索和执行。

每一个人、每一项工作的成就，既和国家的整体水平有关，又并不代表国家的整体水平。在科学、技术上，既没有冠军奖杯，也没有王冠上的明珠。诺贝尔奖当然是一项光荣，但它说得很清楚，奖励只是某个人对于某个学科所作的某项贡献。但是，如果一个国家在某个科技学科中，在很多重要方面都接连不断地有新的、重要的成果出现，在这些方面自然就具领先地位了，在这个学科中自然就是一流水平了。因此，每一个人的每一项成果又都是国家整体实力达到一流水平的组成因素。

由此可见，赶超大事，除了加倍努力以外，就得找捷径，就是引进与自主创新并举。

办法一，把邻居的果树枝拉过墙来，在这边结果，见效最快，用力最少。花钱买外国设备、专利，仿制产品，直接应用人家的理论，立杆见影。但过几年，树枝老了，人家那边锯断了，我的院子多了一根朽木。这办法只能急一时之急，不是常办法。

办法二，从邻居的树上采种子来，种在自家院内，或采个枝条来嫁接在自家的砧木上，使自家院里也有结果的树。这就要费时、费力，自家还得有砧木，但这树长起来都在自家院里，不过，种子和枝条还是人家的，未必能超过人家。

办法三，从邻居的树上采集花粉，与自家的树杂交，选取优势互补，保留优良的基因，汰除不良的基因，把良种种在自家院里，这就是吸取人家东西的精髓，与自家的东西结合起来，搞出创新的东西，使之比人家的东西更先进。这首先就要求自己也有好东西，而且是更加费事、费力，也只有这样才能超过别人，并保持下去。

本书作者在 50 年中当然也作了不少引进工作，可喜他并未满足于邻家树枝上的果。读者在参考本书的内容之余，又能体察到作者的那一种不服气的心态和敢于创造的精神，并在自己的工作中发扬光大，将是令人十分高兴的。

杨弃疾

2003年5月于清华园

## 作者简介

胡树豪，1952年北京清华大学电机系电讯专业毕业，后分配到当时军委通信部南京电信修配厂工作，1953年在军委通信部研究所见习一年后回国营720厂。1956年提出了利用阵列形状来抑制边瓣的方法并用于某米波雷达天线。1963年首创环式测角器，用于米波雷达自动测高。1964年提出某米波雷达总体设想并为之设计了天馈系统。1966年首创对数激励八木天线，带宽达2:1，用于我国第一条驱逐舰上。同年，首创板线式平衡器，用于高功率八木天线及全波振子对上。1958年错划右派于1979年平反。1980年获南京市劳动模范，江苏省先进工作者，国防工业系统先进个人。1987年“平衡器系列”论文在美国微波杂志《microwave Journal》上发表；1994年在国内发表了“对称线天线的共模阻抗与不平衡电流比”，以上两文在平衡器的研究上属国际领先。1990年评为教授级高工，为中国电子学会会士，天线分会委员。1985年创办并主编《天线技术》论文通讯集（一年一集，已出19集）。1984年后一直致力于普及型矢量网络分析仪的研制，于1993年自主开发成功，推向市场。现工作于南京普纳科技设备有限公司，为推广普及型矢量网络分析仪的应用，提高基层射频测试水平而继续努力。

## 前 言

正如老中医著述临床经验一样，作为一个老天馈工作者，将他一生实践中的经验与教训以写实的方式记下来，不能说是没有一点意义的。这其中虽有不少独到之处，但也不乏照猫画虎之作。反正都是自己实践过的，没有实践过的只是一带而过，甚至只字不提。涉及面虽广但范围有限，井窥之见在所难免。愚者千虑，必有一得，本书原拟取名《一得集》。

天线的书不少，几乎千篇一律由麦氏方程开始，数学符号一大堆，但对一个对称振子的馈电点却很少提及。殊不知，大家就是在折腾这个被忽略了馈电点，它不单影响了天线的输入阻抗，更主要的是它影响天线是否平衡；这在对称线天线与同轴线相连时，是尤其需要认真对待的实际问题。人们希望只要通过计算即可设计天线，而馈电点的结构千差万别，并不是唾手可得的简单计算问题，实际的研制开发工作大都集中在调试上。当然，易算则算，也不要盲目反对计算，尤其是传输线的计算与阻抗圆图的使用，这些都是天馈工作者必须掌握的基本功。

本书着眼于物理概念，研制的思路与方法，试图补充通常技术书上那种只讲理论不讲实践，以及手册上那种只有结果却无思路与方法的不足，为基层的专业人员提供些参考意见，以便对大家有所启发，有所参考；书上提到的每一件事物，作者都力图介绍其优点与缺点及其适用范围。书中举了一些例子，大多是作者根据当时的想法试制的，仅供参考，绝对不是什么“最佳”。假如读者在书上抄个尺寸照作，可能会失望的。但是根据本书介绍的思路与参考大致尺寸，通过自己的试验作出满足常规要求的天馈线应该是可行的。

对天线这个专业有些人是敬而远之的，对一般人来说，天线书简直就是“天书”，给人的感觉是什么天线都是算出来的，数学底子差的人别想吃天线这行饭。的确，很多天线尤其是面天线，都是靠理论计算来确定尺寸的。但是天线（馈线也一样）都有其另一面，那就是参数不多，测试简单。只要有耐心，不要很高的数学功底，也能在实验研究的基础上完成设计任务，甚至发明新的天线。常见的八木天线、喜连川天线都是先有实践后有理论的，而且理论还很难说是完善的。因此，理论分析能力强的人可走理论计算这条路；动手能力强、物理概念清楚的人，走实验研究这条路也是大有可为的。本人强调物理概念与实践，辅以少量电路计算，以期符合基层天馈射频工作者的实际需要。

在这几乎所有天线或器件都有现成软件可算出具体尺寸的年代里，写这本以实践为主线的《实用射频技术》还有没有用呢？我想是有用的。首先，并不是所有的东西都有现成的软件。其次更重要的是，根据软件算出的尺寸做出的东西还需要检验，看看能否达到要求。达不到要求还得进行修改，这种检验修改的过程就是实践。实践必须知道基本原理、物理概念与基本方法，甚至前人的某些经验教训，假如每个人都从头做起，不积累经验，不互相交流与启发，会事倍功半的，甚至可能走弯路。

但愿这本书能对读者有某种参考启发作用。书中错误与不当之处，请指出！以便今后改正。

MAH 1/15



最后，对槐学军、彭晓芳、张月芳在本书的录入与绘图中的辛勤工作，表示感谢！

孙克义、赵汉军对本书进行了校阅，任建军协助了出版工作，尤其是清华大学杨弃疾教授在百忙之中为本书作序，给人以启迪；电子工业出版社杜振民编审对本书初稿作了极其仔细的审阅，并提出了许多宝贵意见，在此一并致谢！

作者 2003年10月于南京

## 本书常用符号表

符号	
A	安培、天线、面积、分析仪
C	电容、4GHz~8GHz 频段(旧作 3.9GHz~6.2GHz)、共模
<i>c</i>	光速( $3 \times 10^8$ m/s)
D	方向性、定向性、距离、直径、口径、差模
dB	分贝, 比值取对数即称贝尔(B), 0.1B 即 dB。增益、损耗、电平等常用 dB 值 dB 值= $10 \log (P_2/P_1)=20 \log (V_2/V_1)$ , 讲功率比与电压比是不同的, 但 dB 值却是惟一的
dBc	以载波电平为 0dB 的电平 dB 值
dBd	以半波振子为 0dB 的增益 dB 值
dB <sub>i</sub>	以点源为 0dB 的增益 dB 值, 又称绝对增益 $G_0$
dBm	以 1 毫瓦为 0dB 的功率电平 dB 值
dB $\mu$	以 1 微伏为 0dB 的电场电平 dB 值
E	电场、误差
F	频率
$f_H$	高端频率
$f_0$	中心频率
$f_L$	低端频率
HF	高频(3~30MHz)
VHF	甚高频(30~300MHz)
UHF	特高频(300MHz~3GHz)
IF	中频
RF	射频
G	增益、地
H	高度、磁场、亨利(电感单位)、mH 毫亨、 $\mu$ H 微亨
Hz	赫芝(周/秒)、kHz(千赫, $10^3$ Hz)、MHz(兆赫, $10^6$ Hz)、GHz(吉赫, $10^9$ Hz)
<i>I</i>	复数的同相分量、电流
$I_A$	天线差模电流
$I_C$	共模电流
$I_d$	差模电流
$I_s$	表面电流
<i>j</i>	虚数符号 $j = \sqrt{-1}$
K	常数、覆盖比( $f_H/f_L$ )

续表

符号	
L	长度、电感、(1~2)GHz 频段、损耗
M	模式、互耦、兆( $10^6$ )
m	米
N, n	个数、整数、圈数、次第数、元数
O	坐标原点、开路
P	功率、 $10^{-12}$ 、空间某一点
Q	复数的正交分量、优值 $Q = f_0 / BW$
R	电阻、场地(距离)、半径
S	(2~4)GHz 频段(10 公分波段)、短路、西门子(导纳单位)
s	秒
T	传输系数、三通
t	时间
U	(300~1000)MHz 频段(分米波)
V	伏特、电压、(30~300)MHz 频段(米波)
W	宽度、重量、瓦
X	电抗分量、坐标轴、未知数
Y	导纳、坐标轴
Z	阻抗
$Z_A$	天线差模阻抗
$Z_b$	双线并绕时, 双线的特性阻抗
$Z_c$	共模阻抗、特性阻抗(一般不为 $50\Omega$ )
$Z_d$	差模阻抗
$Z_i$	内阻
$Z_{in}$	输入阻抗、视入阻抗
$Z_L$	负载阻抗、扼流圈的共模抑制阻抗
$Z_0$	特性阻抗(一般指 $50\Omega$ )
$Z_P$	并联阻抗、平行线的特性阻抗
$Z_S$	串联阻抗、天线对电缆外皮的共模阻抗
$Z_T$	用作阻抗变换时的特性阻抗
$\alpha$	角度泛称、衰减常数
$\beta$	角度泛称、相移常数 $\beta = 2\pi / \lambda = 360^\circ / \lambda$
$\gamma$	传输系数 $\gamma = \alpha + j\beta$
$\Gamma$	反射系数 $\Gamma =  \Gamma  \angle \Phi$
$\Gamma_\Sigma$	$\Gamma_\Sigma = \Sigma \Gamma$ 系统中各个反射的矢量和
$\Delta$	增量、步长

续表

符号	
$\delta$	增量、仰角
$\varepsilon$	误差、介电常数
$\varepsilon_e$	等效介电常数
$\varepsilon_r$	相对介电常数
$\eta$	效率(如 $G=\eta D$ )
$\theta$	角度泛称、天顶角、 $\theta_{-3dB} = \theta_{P/2}$ = 两半功率点间的角宽度、波束宽度
$\lambda$	波长
$\lambda_0$	自由空间波长
$\lambda_g$	波导内波长或介质内波长
$\mu$	导磁率、微(百万分之一)、 $10^{-6}$
$\pi$	圆周率、 $180^\circ$
$\rho$	驻波比、矢径
$\tau$	周期、群时延 [ $\tau = -d\phi/d\omega = -d\phi/360^\circ df$ (MHz) ( $\mu s$ ) = $-2.778d\phi/df$ (MHz) (ns)]
$\phi$	波束宽度
$\varphi$	相位角( $\varphi = \omega t$ )
$\Phi$	方位角
$\psi$	照射张角
$\omega$	角频率 $\omega = 2\pi f$
$\Omega$	欧姆(电阻单位)

# 目 录

<b>第 1 章 传输线的基本知识</b> .....	(1)
1.1 传输线基本公式 .....	(1)
1.2 史密斯圆图 .....	(5)
1.3 $\lambda/4$ 线的应用 .....	(8)
1.4 杂项 .....	(11)
<b>第 2 章 同轴线实用知识</b> .....	(15)
2.1 同轴线缆 .....	(15)
2.2 同轴器件 .....	(17)
2.3 同轴线内导体的金属支撑——直流感地式避雷器的设计 .....	(20)
2.4 同轴电缆的谐振现象与同轴电缆的误差模型 .....	(25)
2.5 阻抗匹配 .....	(27)
2.6 宽带转动交连中的几个问题 .....	(30)
<b>第 3 章 天线的基本参数</b> .....	(32)
3.1 辐射的基本知识 .....	(32)
3.2 天线方向图 .....	(34)
3.3 天线的方向性与增益 .....	(36)
3.3 天线的有效面积 .....	(37)
3.5 天线的极化 .....	(39)
3.6 系统对天线的要求 .....	(39)
<b>第 4 章 平衡概说</b> .....	(42)
4.1 天馈系统平衡的四项表征 .....	(42)
4.2 对称线天线的共模阻抗 .....	(44)
4.3 半波振子与同轴线直接相连的后果 .....	(45)
4.4 对称线天线的平衡馈电 .....	(47)
4.4.1 利用天线本身结构的对称性 .....	(47)
4.4.2 采用四端口器件 .....	(48)
4.4.3 采用平衡器 .....	(48)
4.5 几点讨论 .....	(50)
4.6 不平衡的度量 .....	(51)
4.6.1 天线系统的不平衡电流比 .....	(51)
4.6.2 平衡器的电压不对称度 .....	(51)
4.6.3 平衡器的共模抑制比 .....	(52)
<b>第 5 章 平衡器</b> .....	(54)
5.1 扼流式平衡器 .....	(54)

5.1.1	$\lambda/4$ 扼流套式平衡器 .....	(54)
5.1.2	电缆绕圈扼流式平衡器 .....	(56)
5.1.3	双线并绕式平衡器 .....	(57)
5.2	对称式平衡器 .....	(62)
5.2.1	双线对称式平衡器 .....	(62)
5.2.2	单线对称式平衡器 .....	(65)
5.2.3	三线对称式平衡器 .....	(70)
5.3	反相式平衡器 .....	(70)
5.3.1	$\lambda/2$ U 形环 .....	(70)
5.3.2	反接(倒相)式平衡器 .....	(73)
5.4	磁耦合式平衡器 .....	(74)
5.5	平衡器系列与常用平衡器 .....	(75)
5.5.1	平衡器的演变与派生 .....	(75)
5.5.2	双线平衡器与板线平衡器的比较 .....	(77)
5.5.3	两种易于混淆的平衡器 .....	(79)
5.5.4	常用平衡器简表 .....	(79)
<b>第 6 章</b>	<b>单元线天线</b> .....	(81)
6.1	单极子及其演变 .....	(81)
6.2	对称振子 .....	(82)
6.3	八木天线 .....	(85)
6.4	等比结构天线及其复合型 .....	(91)
6.5	圆极化天线 .....	(93)
6.6	廉价抛物面天线及其振子馈源 .....	(94)
6.7	缝天线 .....	(97)
6.8	单元天线的小型化 .....	(99)
6.8.1	线圈式天线 .....	(99)
6.8.2	高介电常数天线 .....	(100)
6.8.3	中波天线小型化——屋顶天线 .....	(100)
<b>第 7 章</b>	<b>阵列天线</b> .....	(104)
7.1	概述 .....	(104)
7.2	阵列的方向图 .....	(106)
7.3	阵列天线的增益 .....	(109)
7.4	阵列的馈电 .....	(113)
7.4.1	并馈 .....	(113)
7.4.2	端馈 .....	(115)
7.4.3	中馈 .....	(123)
7.5	关于垂直覆盖的几个问题 .....	(123)
7.6	阵列天线的实例 .....	(126)

<b>第 8 章</b>	<b>测试原理与仪器</b>	(132)
8.1	驻波比测量	(132)
8.2	反射电桥	(134)
8.3	射频指示设备	(137)
8.4	矢量网络分析仪	(141)
8.5	各种附件	(144)
8.6	窄带频域转换的实践	(146)
8.7	对取样变频的理解	(148)
8.8	DDS 的频率分量	(151)
8.9	其他	(153)
<b>第 9 章</b>	<b>传输线测试</b>	(157)
9.1	驻波比测量	(157)
9.2	阻抗测量	(160)
9.3	插损测量	(161)
9.4	同轴电缆的检测	(166)
9.4.1	装配质量检测	(166)
9.4.2	常规电性能检测	(166)
9.4.3	专项检测	(169)
9.5	多对双绞线电缆的测试	(175)
9.6	PNA362X 用于测波导系统	(177)
9.6.1	测波导器件的插损与相移	(178)
9.6.2	用同轴反射电桥测波导器件(或系统)的反射特性	(178)
9.6.3	采用定向耦合器测试波导器件(或系统)的反射特性	(181)
9.6.4	采用魔 T 测试波导器件(或系统)的反射特性	(182)
<b>第 10 章</b>	<b>线天线测试</b>	(183)
10.1	方向图的测试	(183)
10.1.1	相位方向图的测试	(183)
10.1.2	测远场幅度方向图的考虑	(183)
10.1.3	几点思考与发现	(186)
10.1.4	喜连川天线的垂直方向图	(187)
10.2	线天线增益的测试	(189)
10.2.1	两天线法	(189)
10.2.2	三天线法	(190)
10.2.3	比较法	(190)
10.3	天线阵面幅相分布的检查	(195)
10.4	天线阻抗测试	(197)
<b>第 11 章</b>	<b>其他测试项目</b>	(199)
11.1	是电感还是电容?	(199)

11.2	陶瓷谐振腔的测试方法 .....	(203)
11.3	双面覆铜板介电常数的测试 .....	(207)
11.4	群时延的测量 .....	(210)
<b>第 12 章</b>	<b>教学演示与实验 .....</b>	<b>(212)</b>
12.1	教学演示 .....	(212)
12.2	实验项目 .....	(214)
12.2.1	射频连接电缆的常规测试 .....	(214)
12.2.2	射频连接电缆的专项测试 .....	(216)
12.2.3	仪器的幅相精度验证 .....	(219)
12.2.4	用 $\lambda/4$ 法分离误差 .....	(221)
12.2.5	耦合系数的实验或演示 .....	(221)
12.2.6	测电抗做滤波器实验 .....	(222)
12.2.7	阻抗匹配实验或演示 .....	(223)
12.2.8	单极子的阻抗测试 .....	(224)
12.2.9	方向图测试 .....	(224)
12.2.10	近场测试 .....	(226)
<b>附录 A</b>	<b>赘语 .....</b>	<b>(227)</b>
	思路问题 .....	(227)
	失败、教训与不足 .....	(230)
	不太容易承认或接受的问题 .....	(231)
	知与行浅谈 .....	(233)
<b>附录 B</b>	<b>常用 50<math>\Omega</math>同轴电缆衰减常数与频率的关系曲线 .....</b>	<b>(235)</b>
<b>附录 C</b>	<b>常用 50<math>\Omega</math>同轴电缆承受功率与频率的关系曲线 .....</b>	<b>(236)</b>
<b>附录 D</b>	<b>反射不确定度-40dB 时测试正常示值范围 .....</b>	<b>(237)</b>
<b>附录 E</b>	<b>本书缩略语 .....</b>	<b>(238)</b>
	<b>参考文献 .....</b>	<b>(239)</b>



# 第 1 章 传输线的基本知识

传输射频信号的线缆泛称传输线，常用的有两种：双线与同轴线。频率更高则会用到微带线与波导，虽然结构不同，用途各异，但其基本传输特性都由传输线公式所表征。

有条件的话，不妨先让我们作一个实验[1]，在一台能测射频阻抗的仪器上测一段同轴线的输入阻抗。我们会发现，在某个频率上同轴线末端开路时其输入阻抗却呈现短路，而末端短路时入端反而呈现开路。通过这个实验可以得到几个结论或想法：首先，这个现象按低频常规电路经验看是想不通的，因此一段线或一个网络必须在使用频率上用射频仪器进行测试才能反映其真实情况。其二，出现这种现象时，同轴线的长度为测试频率下的 $\lambda/4$  或其奇数倍；因此传输线的特性通常是与长度的波长数有关(让我们习惯用波长数来描述传输线长度，而不是绝对长度，这样作就更通用更广泛一些)。最后，这种现象必须通过传输线公式来计算(或阻抗圆图来查出)，熟悉传输线公式或圆图是射频、天馈线工作者的基本功。

传输线公式是由著名的电报方程导出的，在这里不作推导而直接引用其公式。对于一般工程技术人员，应该要求会利用公式或圆图。

这里主要讲无耗传输线，有耗的用得较少，就不多提了。

天线的性能与传输线(也称馈线)有关，另外，不少天线的匹配过程是在传输线上完成，可以说天线是离不开传输线的。先熟悉传输线再熟悉天线是合理的，而电路的东西比较具体。即使是天线，作者也尽量将其看成是个射频器件来处理，这种作法符合一般基层工作者的实际水平。

## 1.1 传输线基本公式

### 1. 电报方程

对于一段均匀传输线，在有关书上可查到，等效电路如图 1-1 所示。根据线的微分参数可列出经典的电报方程，解出的结果为：

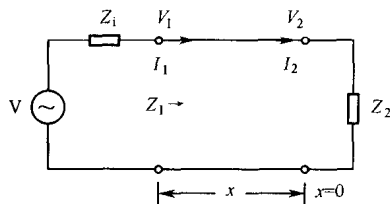


图 1-1 等效电路

$$V_1 = \frac{1}{2} (V_2 + I_2 Z_0) e^{\gamma x} + \frac{1}{2} (V_2 - I_2 Z_0) e^{-\gamma x} \quad (1.1)$$

$$I_1 = \frac{1}{2 Z_0} (V_2 + I_2 Z_0) e^{\gamma x} - \frac{1}{2 Z_0} (V_2 - I_2 Z_0) e^{-\gamma x} \quad (1.2)$$

式中， $x$  是传输线上距离的坐标，它由负载端起算，即负载端的  $x$  为 0。

$\gamma$  为传输线的传输系数， $\gamma = \alpha + j\beta$ ， $\alpha$  为衰减常数， $\beta$  为相移常数。无耗时  $\gamma = j\beta$ 。一般情况下常用无耗线来进行分析，这样公式简单一些，也明确一些，或者说理想化一些。而这样作实际上是可行的，真要计算衰减时，再把衰减常数加上。