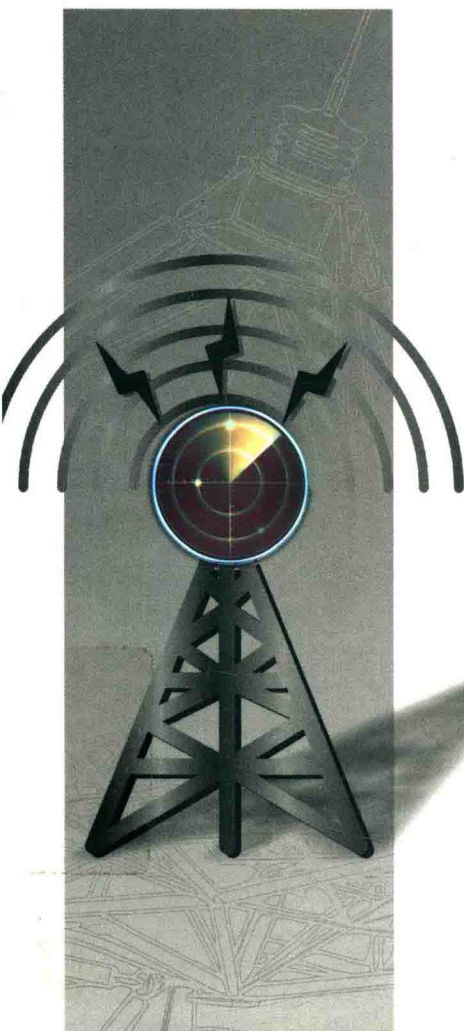


天线的 馈电技术

The Antenna Feeding Technology

张宁 俱新德 任辉 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

天线的馈电技术

张 宁 俱新德 任 辉 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书共4章,具体内容包括:长线的基本概念,巴伦及天线的馈电技术,线型变压器与混合变压器,功分器和定向耦合器。这些内容都是与天线馈电和阻抗匹配紧密相关的基础知识。

本书内容新颖全面,重点突出物理概念、工程性和实用性。

本书适合从事天线设计、生产、维修和使用的广大工程技术人员参考,也可供无线电、移动通信相关人员阅读,还可以作为大专院校电磁场专业和无线通信专业师生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

天线的馈电技术/张宁,俱新德,任辉编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.5

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3892 - 8

I. ①天… II. ①张…②俱…③任 III. ①天线馈源 IV. ①TN820.1.

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 074352 号

策划编辑 戚文艳

责任编辑 许青青

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2016年5月第1版 2016年5月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 14

字 数 327千字

印 数 1~3000册

定 价 30.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3892 - 8/TN

XDUP 4184001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

序

天馈线作为通信系统的重要组成部分，是电磁能量传输与转换的关键设备，在通信系统中具有极其重要的地位。目前，各行业广泛应用了适应不同通信电台的宽带天线、旋转对数周期天线、有源收信天线及车载天线等，为实现远距离通信和“动中通”发挥了重要作用，基本上满足了各种复杂条件下无线电通信的需求。

国内外虽然有涉及天线的图书出版发行，但多数以繁杂的数学公式占据了大量版面，工程性、实用性相对较差，特别是与天线馈电和阻抗匹配密切相关的基础知识，不仅内容少而且不够全面。本书介绍了与天线馈电和阻抗匹配有关的基础知识(如长线的基本概念、巴伦及天线的馈电技术、功分器和定向器、线型变压器及应用等内容)，重点突出物理概念，少用或不用繁琐的数学公式，突出工程性、实用性，收集了大量的实例和许多新内容，不仅填补了业界的空白，还特别促进了实用工程天线的发展。

俱新德教授等同志长期从事天线实用工程研究，具有丰富的实践经验和理论知识。

该书特别适合从事天线设计、生产、维修和使用的工程技术人员参考，也适合从事无线电、移动通信的相关人员阅读，还可以作为军地大专院校电磁场专业和无线通信专业师生的参考资料。



西安电子科技大学教授

原西安海天天线科技股份有限公司首席科学家

2015年12月

前 言

对实际应用的天线,仅得出天线的结构形式及仿真的主要电参数(如增益、电压驻波比、方向图等)是远远不够的,还必须知道用何种传输线(同轴线、双导线、微带线、波导),如何给天线馈电,如何实现阻抗匹配。对于对称天线,如果使用不平衡馈线(如同轴线)馈电,则不仅要知道如何用巴伦完成不平衡-平衡变换,还要根据天线的结构形式和工作频段知道用何种巴伦;如果天线输入阻抗与馈线特性阻抗不匹配,则需要进一步了解选用何种既有阻抗变换功能又有不平衡-平衡变换功能的巴伦。对于阵列天线,不管是线极化,还是圆极化,都必须用功分器和定向耦合器构成馈电网络。对于赋形波束天线阵,还要使用不等功分器。那么了解功分器与定向耦合器的分类及特性,对我们正确设计出馈电网络就显得尤为重要。对 MF、HF 和 VHF 频段的宽带天线,还必须使用线型变压器构成的宽带阻抗变换器、巴伦和定向耦合器,完成不平衡-平衡变换、宽带阻抗匹配及宽带功率合成和分配。可见,天线的馈电技术都与长线、巴伦、功分器、定向耦合器、线型变压器等相关知识密切相关,故作者把“长线的基本概念”作为第 1 章,把“巴伦及天线的馈电技术”作为第 2 章,把“线型变压器与混合变压器”作为第 3 章,把“功分器和定向耦合器”作为第 4 章,构成本书的基本内容,书中涉及的一些关键技术陕西特恩电子科技有限公司的 HF/VHF/UHF 通信天线、圆极化天线、雷达天线等众多产品中得到了广泛的应用和验证。书中列举了大量实例,工程性、实用性较强,图文并茂,线型变压器及应用中大部分内容都是首次与读者见面。

张宁、俱新德、任辉为本书主要作者,裴波、金红军、朱亮参与了部分章节的编写。本书在出版过程中得到了陕西特恩电子科技有限公司总经理马玉新、总工程师孙鑫、副总工程师刘军州、总参网络管理中心专家领导的关怀及大力支持,还得到了韩晓明、刘庆刚、陈大勇、张用宇的鼓励和支持,在打字、排版、绘图等方面得到了宁惠珍、吴佩菁、李峰娟、李景春的大力支持,还得到西安电子科技大学出版社编辑戚文艳、许青青的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,敬请读者批评指正。

编 者

2015 年 10 月

目 录

第 1 章 长线的基本概念	1
1.1 频率与波长的关系	1
1.2 无线电频段的划分和无线技术及其应用	2
1.3 传输线	5
1.3.1 传输线的结构形式及特点	5
1.3.2 长线的基本知识	16
参考文献	28
第 2 章 巴伦及天线的馈电技术	29
2.1 平衡与不平衡的基本概念	29
2.2 同轴电缆向对称天线馈电产生的不平衡现象	29
2.3 扼流型巴伦	30
2.3.1 扼流套型巴伦	30
2.3.2 用线圈和磁环构成的扼流型巴伦	31
2.4 分支导体型巴伦	32
2.4.1 分支导体型巴伦的定义	32
2.4.2 线圈式分支导体型巴伦	34
2.4.3 串联补偿分支导体型巴伦	34
2.5 腔体型巴伦	35
2.6 Marchand 巴伦	36
2.7 U 形管巴伦	37
2.8 裂缝式巴伦	38
2.9 板线式巴伦	39
2.10 宽带同轴巴伦	39
2.11 渐变型巴伦	41
2.12 微带巴伦	43
2.13 其他形式的巴伦	45
2.13.1 混合环	45
2.13.2 曲折线宽带分支线巴伦	45
2.13.3 宽带平面巴伦	46
2.14 天线阵的馈电技术	47
2.14.1 并联馈电	47
2.14.2 串联馈电	48
2.14.3 串并联馈电	50

2.15	基站板状天线的馈电网络及阻抗匹配	51
2.15.1	基本单元输入阻抗为 $75\ \Omega$ 的八元板状天线的馈电网络	51
2.15.2	基本辐射单元输入阻抗为 $50\ \Omega$ 的板状天线的馈电网络	52
2.16	贴片天线的馈电方法	55
2.16.1	线极化贴片天线的馈电方法	56
2.16.2	圆极化贴片天线的馈电方法	67
	参考文献	86
第3章	线型变压器与混合变压器	88
3.1	线型变压器	88
3.1.1	传输线变压器	88
3.1.2	同轴线变压器	106
3.1.3	大功率变压器	120
3.1.4	变压器、传输线变压器和同轴线变压器的设计及制作	125
3.2	混合变压器	139
3.2.1	概述	139
3.2.2	功分器	139
3.2.3	宽带合成器	144
	参考文献	161
第4章	功分器和定向耦合器	162
4.1	功分器	162
4.1.1	T形功分器	162
4.1.2	等功分 Wilkinson 功分器	163
4.1.3	不等功分二路 Wilkinson 功分器	171
4.1.4	多路功分器	176
4.2	定向耦合器	182
4.2.1	定向耦合器的分类及应用	182
4.2.2	定向耦合器参数的定义	183
4.2.3	环形定向耦合器	184
4.2.4	分支线定向耦合器	191
4.2.5	平行耦合线定向耦合器	196
4.3	功分器和定向耦合器在天线中的典型应用	205
4.3.1	功分器在天线阵中的应用	205
4.3.2	定向耦合器在天线中的典型应用	207
4.3.3	由多节功分器和 $3\ \text{dB}\ 90^\circ$ 耦合器构成的超宽带巴伦	211
4.3.4	定向耦合器的其他应用	212
	参考文献	214

第 1 章 长线的基本概念

1.1 频率与波长的关系

频率(f)与波长(λ)有如下关系:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

式中: c 为光速, $c=3 \times 10^8$ m/s; 频率的基本单位为 Hz (赫), 波长的单位为米(m)。

当频率很高时, 为了简化数字, 常用千赫、兆赫和千兆赫等单位, 即

1 千赫 = 10^3 Hz, 用 kHz 表示;

1 兆赫 = 10^6 Hz, 用 MHz 表示;

1 千兆赫 = 10^9 Hz, 用 GHz 表示。

千赫、兆赫和千兆赫之间满足: 1 GHz = 1000 MHz, 1 MHz = 1000 kHz。

【例 1.1】 已知 $f=3$ MHz, 求 λ 。

解 由式(1.1)得

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^6} = 100 \text{ m}$$

【例 1.2】 已知 $f=450$ MHz, 求 λ 。

解 由式(1.1)得

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{450 \times 10^6} = 0.667 \text{ m}$$

【例 1.3】 试求 G 网(GSM)的中心波长 λ_0 。

解 根据国际电信联盟的规定, GSM 的工作频段为 870~960 MHz, 则中心工作频率

$$f_0 = \frac{870+960}{2} = 915 \text{ MHz}$$

故

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{915 \times 10^6} = 0.3279 \text{ m}$$

在基站天线的设计中, 波长(λ)常用 mm 表示, 故

$$\lambda(\text{mm}) = \frac{3 \times 10^5}{f(\text{MHz})}$$

【例 1.4】 试求 C 网的中心工作波长。

解 人们习惯把移动通信的一种体制 CDMA(码分多址)称 C 网。CDMA 的工作频段为

低端: $f=824\sim 896\text{ MHz}$, $f_0=860\text{ MHz}$ 。

高端: $f=1850\sim 1990\text{ MHz}$, $f_0=1920\text{ MHz}$ 。

因此, 它们的中心工作波长分别为

$$\text{低端: } \lambda_0 = \frac{3 \times 10^5}{(824+896)/2} = 348.8\text{ mm}$$

$$\text{高端: } \lambda_0 = \frac{3 \times 10^5}{(1850+1990)/2} = 156.25\text{ mm}$$

1.2 无线电频段的划分和无线技术及其应用^[1]

表 1.1 是通用无线电频段和波段的划分; 表 1.2 是通用无线电频段的特点及典型应用; 表 1.3 把 IEEE 雷达频段、国际电信联盟 (ITU) 频段、通用频段及电子对抗频段做了比较; 表 1.4 是业余无线电频段; 表 1.5 是军用无线电频段和无线技术及其应用; 表 1.6 是民用无线技术及应用及频段。

表 1.1 通用无线电频段和波段的划分

波段名称		频率范围	波长范围	波段名称	缩写
超长波		3~30 kHz	$10^5 \sim 10^4\text{ m}$	甚低频	VLF
长波		30~300 kHz	$10^4 \sim 10^3\text{ m}$	低频	LF
中波		300 kHz~3 MHz	$10^3 \sim 10^2\text{ m}$	中频	MF
短波		3~30 MHz	$10^2 \sim 10\text{ m}$	高频	HF
超短波		30~300 MHz	10~1 m	甚高频	VHF
微波	分米波	300 MHz~3 GHz	1 m~10 cm	特高频	UHF
	厘米波	3~30 GHz	10 cm~1 cm	超高频	SHF
	毫米波	30~300 GHz	1 cm~1 mm	极高频	EHF

表 1.2 通用无线电频段的特点及典型应用

频段	特点	应用
HF(高频) (3~30 MHz)	利用电离层反射, 建立远距离链路	远洋舰船通信, 电话, 电报, 远距离航空通信, 业余无线电通信, 军用通信
VHF(甚高频) (30~300 MHz)	视距传输, 在频段的低端, 有可能利用电离层进行反射通信	电视, FM 广播, 空中交通管制, 无线电导航, 军用通信
UHF(特高频) (300~3000 MHz)	视距传输	电视广播, 雷达, 移动电话和无线电, 卫星通信, GPS, WLAN ^① , WPAN ^② , 军用通信
SHF(超高频) (3~30 GHz)	在频段高, 大气吸收明显	雷达, 微波线路, 陆地移动通信, 卫星通信, 直接广播卫星 (DBS) 电视
EHF(极高频) (30~300 GHz)	在频段高端, 视距传输易受到大气吸收, 最适合短距离应用	雷达, 安全和军用通信, 卫星线路, 未来 WPAN

注: ① WLAN(Wireless Local Area Network): 无线局域网。

② WPAN(Wireless Personal Area Network): 无线个人局域网。

表 1.3 IEEE 雷达频段、国际电信联盟频段、通用频段和电子对抗频段比较

IEEE 雷达频段		ITU 频段		通用频段		电子对抗频段	
频段	频率范围/GHz	频段	频率范围/GHz	频段	频率范围/GHz	频段	频率范围/GHz
HF	0.003~0.03	HF	0.003~0.03	HF	0.003~0.03	A	0~0.25
VHF	0.03~0.3	VHF	0.03~0.3	VHF	0.03~0.3	B	0.25~0.5
UHF	0.3~1	UHF	0.3~3	UHF	0.3~1	C	0.5~1
L	1~2	SHF	3~30	L	1~2	D	1~2
S	2~4	EHF	30~300	S	2~4	E	2~3
C	4~8			C	4~8	F	3~4
X	8~12			X	8~12.4	G	4~6
Ku	12~18			Ku	12.4~18	H	6~8
K	18~27			K	18~26.5	I	8~10
Ka	27~40			Ka	26.5~40	J	10~20
mm	40~300			Q	40~50	K	20~40
				V	50~75	L	40~60
				W	75~110	M	60~100

表 1.4 业余无线电频段

波段	160 m	80 m	40 m	20 m	15 m	10 m	2 m
频率范围/MHz	1.8~2.0	3.5~4.0	7.0~7.3	14.0~14.35	21.0~21.45	28.0~29.7	144.0~148.0

注:新增加的还有 220~225 MHz, 420~450 MHz, 1215~1300 MHz, 2300~2450 MHz, 3300~3500 MHz, 5650~5925 MHz。

表 1.5 军用无线电频段和无线技术及其应用

无线技术	频段	频率范围	自由空间波长	通信距离	数据速率
PRC-150	HF	2~30 MHz	10~150 m	30 mile	9.6~14.4 kb/s
RT-1523	VHF	30~88 MHz	3.4~10 m	10~100 mile	9.6~14.4 kb/s
PRC-148	VHF~UHF	30~512 MHz	0.5~10 m	12 mile	NA
PRC-117	VHF~UHF	30~512 MHz	0.5~10 m	10~50 mile	NA
PSC-5D	VHF~UHF	30~512 MHz	0.5~10 m	10~50 mile	76.8 kb/s
RT-1720EPLRS	UHF	20~450 MHz	66~71 cm	6~60 mile	486 kb/s
VRC-99	L 频段	1308~1484 MHz 1700~2000 MHz	15~23 cm	150 mile	625 kb/s
SecNet11 Secure WLAN	S 频段	2.412~2.462 GHz	12.5 cm	120 m	1~11 Mb/s
UHF 卫通	UHF	243~318 MHz	0.94~1.23 m	地面到 LEO	NA
Ku 卫通	Ku 频段	上行: 11.2~11.7 GHz 下行: 14~14.5 GHz	2.0~2.7 cm	地面到 GEO	0.5~5 Mb/s
Ka 卫通	Ka 频段	上行: 27.5, 31 GHz 下行: 18.3, 18.8, 19.7, 20.2 GHz	1~1.6 cm	地面到 GEO	上行: 2 Mb/s 下行: 30 Mb/s

注: 1 mile(英里)=1.609 km。

表 1.6 民用无线技术和应用及频段

无线技术	频段	频率	自由空间波长	通信距离	数据速率
TACS ^①		NTACS; Rx: 860~870 MHz Tx: 915~925 MHz ETACS Rx: 916~949 MHz Tx: 871~904 MHz	32~35 cm	100~10 000 m	NA
VHF TV	VHF	44~216 MHz	1.4~7 m	1.609 km	NA
UHF TV	UHF	470~806 MHz	37~64 cm		NA
802.11a	C 频段	4 GHz	6 cm	10~25 m	54 Mb/s
802.11b WiFi	S 频段	2.4 GHz	12.5 cm	<50 m	11 Mb/s
802.11g		2.4 GHz	12.5 cm	<50 m	54 Mb/s
802.11n		2.4 GHz	12.5 cm	10~100 m	540 Mb/s
802.15.1 Bluetooth		2.4 GHz	12.5 cm	<10 m	720 Kb/s
802.15.4 ZigBee	ISM 频段	868 MHz 915 MHz 2.4 GHz	6 cm 33 cm 35 cm	<50 m	100 Kb/s
(4G)802.16 WiMax OFDM FDD/TDD	S 频段 C 频段	2.5~2.69 GHz 2.7~2.9 GHz 3.4~3.6 GHz 5.725~5.86 GHz	5~12 cm	1000~5000 m	70 Mb/s
(4G)Broadway HIPERLAN/2 HIPERSPOTOFDM	C 频段 W 频段	5 GHz 59~65 GHz	0.5 cm 6 cm	10~100 m	100s Mb/s 1~5 Gb/s
	L 频段	1.616~1.628 GHz	18 cm	地面到 LEO ^②	2.4 kb/s
C 频段卫通	C 频段	上行: 5.925~6.425 GHz 下行: 3.7~4.2 GHz	4.7~8.1 cm	地面到 GEO ^③	64 kb/s~ 1.5 Mb/s
Ku 频段卫通	Ku 频段	上行: 11.2~11.7 GHz 下行: 14~14.5 GHz	2~2.7 cm	地面到 GEO	0.5~5 Mb/s
Ka 频段卫通	Ka 频段	上行: 27.5, 31 GHz 下行: 18.3, 18.8, 19.7, 20.2 GHz	1~1.6 cm	地面到 GEO	上行: 2 Mb/s 下行: 30 Mb/s

注: ① TACS(Total Access Communication System): 总接入通信系统。

② LEO(Low Earth Orbit): 低地球轨道。

③ GEO(Geostationary Earth Orbit): 地球静止轨道。

1.3 传输线

1.3.1 传输线的结构形式及特点

传输线的主要用途是以最小的损耗将高频能量从发射机传到天线的输入端，或由天线传到接收机。图 1.1 是典型的传输线结构。常用的传输线有平行双导线、同轴线、微带传输线以及波导。

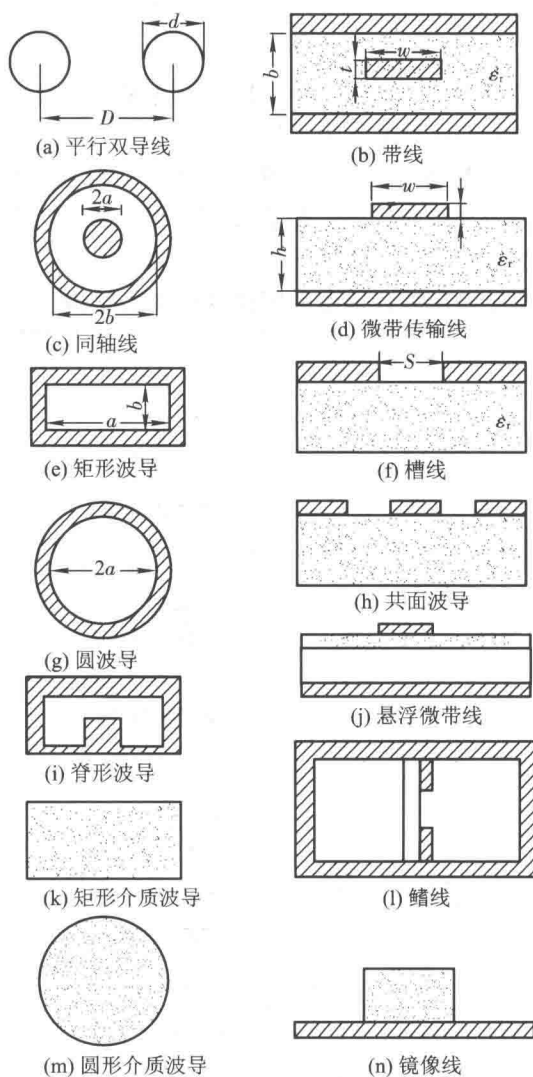


图 1.1 典型传输线结构

1. 平行双导线^[2]

平行双导线也叫明线。由于两根导线相对于地的阻抗相等，确保了两根导线上电流大小相等，流向相反，因而作为平衡馈线使用。平行双导线导体的直径 d 通常比导体之间的间距小，有时候也把一根与地面平行的单线作为平行双导线使用。这种明线传输线具有结

构简单和价格低廉的优点。线与线和线与地面之间的间距都远小于波长。

在相对低的频率，经常使用低成本绞绕双导线作为传输线。例如，绕制传输线变压器就经常使用绞绕双导线作为传输线。在短波频段，为了承受更大的功率，经常使用四线和六线式架空明线。由于四线和六线式架空明线在天线端和发射端都变成平行双导线，所以四线和六线式架空明线实质上也是平行双导线。尽管它们终端的接法不同，但都是对称的，对地都是平衡的。

以空气为介质的平行双导线的特性阻抗 Z_0 与导线直径 d 和两个导线中心的间距 D 有如下关系：

$$Z_0 = 276 \lg \frac{2D}{d} \text{ 或 } Z_0 = 120 \ln \left[\frac{D}{d} + \sqrt{\frac{D}{d} - 1} \right] \approx 120 \ln \frac{2D}{d} \quad (1.2)$$

平行双导线的特性阻抗一般为 $250 \sim 700 \Omega$ ，常用的有 600Ω 、 450Ω 和 250Ω 。在米波和分米波段，也经常使用平行双导线作为传输线。

表 1.7 是各种位于空间和靠近地面的明线传输线的结构及特性阻抗的表达式；表 1.8 是各种封闭单根线和平衡双导线传输线的结构及特性阻抗的表达式；表 1.9 是其他明线传输线的结构及特性阻抗的表达式。

表 1.7 各种位于空间和靠近地面的明线传输线的结构及特性阻抗的表达式

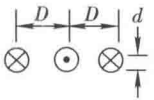
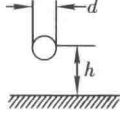
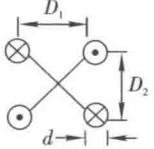
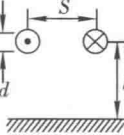
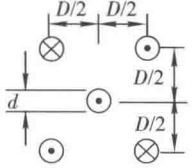
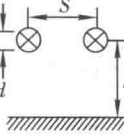
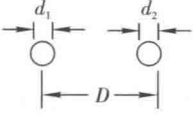
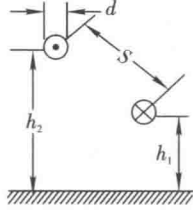
线位于空间	特性阻抗	线接近地面	特性阻抗
	$Z_0 = \frac{207}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \left(1.59 \frac{D}{d} \right)$		$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \frac{4h}{d}$
	$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \frac{2D_2}{d \sqrt{1 + \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2}}$		$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \frac{4h}{d \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{S} \right)^2}}$
	$Z_0 = \frac{173}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \left(1.14 \frac{D}{d} \right)$		$Z_0 = \frac{69}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \left[\frac{4h}{d} \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{S} \right)^2} \right]$
	$Z_0 = 59.95 \ln \left(X + \sqrt{X^2 - 1} \right)$ $X = \frac{1}{2} \left[\frac{4D^2}{d_1 d_2} - \frac{d_1}{d_2} - \frac{d_2}{d_1} \right]$		$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \frac{2S}{d \sqrt{1 + \frac{S^2}{4h_1 h_2}}}$

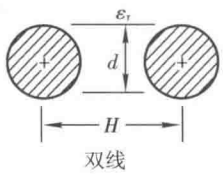
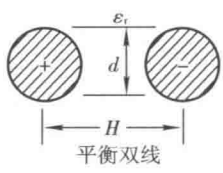
表 1.8 各种封闭单根线和平衡双导线传输线的结构及特性阻抗的表达式

单根线	特性阻抗	平衡双线	特性阻抗
	$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \left[\lg \frac{4D}{\pi d} - \frac{0.0367 \left(\frac{d}{D}\right)^4}{1 - 0.0355 \left(\frac{d}{D}\right)^4} \right]$		$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \frac{4D}{\pi d} \tanh \frac{\pi S}{2D}$
	$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \frac{\sqrt{2}D}{d}$		$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \frac{2D}{\pi d}$
	$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \frac{4D}{\pi d} \tanh \frac{\pi h}{D}$		$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \frac{2D}{\pi d \sqrt{A}}$ $A = \csc^2 \left(\frac{\pi S}{d} \right) + \operatorname{csch}^2 \left(\frac{2\pi h}{d} \right)$
	$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg 1.08 \frac{D}{d}$		$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\lg \frac{4D}{\pi d} \tanh \frac{\pi S}{2D} - \sum_{n=1}^{\infty} \lg \frac{1 + U_n^2}{1 - V_n^2} \right)$ $U_n = \frac{\sin \frac{\pi S}{2D}}{\cosh \frac{n\pi w}{2D}}, V_n = \frac{\sinh \frac{\pi S}{2D}}{\sinh \frac{n\pi w}{2D}}$

表 1.9 其他明线传输线的结构及特性阻抗的表达式

结 构	$Z_0 \sqrt{\epsilon_r} / \Omega$
 地面上的单线	$60 \ln \left\{ 1 + \frac{2h}{d} + 2 \left[\frac{h}{d} \left(1 + \frac{h}{d} \right) \right]^{1/2} \right\}$
 在接地基板上的单线	$60 [P(P+Q)]^{1/2}$ 其中, $P = \ln \left[1 + \frac{1}{2x} (1 + \sqrt{1+4x}) \right]$, $Q = \sum_{n=1}^{\infty} (-D)^{n-1} \ln \left(1 + \frac{2}{n+x} \right)$, $D = \frac{\epsilon_{r1} - \epsilon_r}{\epsilon_{r1} + \epsilon_r}$, $x = \frac{d}{4h}$
 槽线	$60 \ln \left(\frac{4b}{\pi d} \tanh \frac{\pi H}{b} \right), d \ll h, d \ll b$

续表

结 构	$Z_0\sqrt{\epsilon_r}/\Omega$
 <p style="text-align: center;">双线</p>	$120\ln(x + \sqrt{x^2 - 1}), x = H/d$
 <p style="text-align: center;">平衡双线</p>	$120\ln(2H/d)$

明线的功率容量为

$$P = \frac{E_0^2 d^2 \sqrt{\epsilon_r}}{240} \operatorname{arccosh} \frac{D}{d} \quad (1.3)$$

式中： E_0 为在介质中所允许的最大电场。

2. 同轴线^[3]

同轴线是最常用的传输线，由于外导体接地，内外导体相对于地不对称，因而同轴线为不平衡馈线。同轴线与平行双导线不同，电磁场完全集中在同轴线内外导体之间。

1) 特性阻抗 Z_0

同轴线的特性阻抗 Z_0 取决于线的电特性，其表达式为

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1.4)$$

式中： R 为单位长度上的导体电阻(单位为 Ω)； L 为单位长度上的电感(单位为 H)； G 为单位长度上的介质电导(单位为 S)； C 为单位长度上的电容(单位为 F)； ω 为角频率。

对无耗线，由于 $R=G=0$ ，所以：

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.5)$$

式(1.5)表示 Z_0 为实数，与频率无关，仅与线的几何尺寸、介质的介电常数有关。

【例 1.5】 已知 50Ω 同轴线单位长度上的电容 $C=90 \text{ pF}$ ，求 1 m 长同轴线的电感。

解 由式(1.5)得

$$L = Z_0^2 C = 50^2 \times 90 \times 10^{-12} = 225 \text{ nH/m}$$

同轴线的特性阻抗 Z_0 与内导体的外直径 $2a$ 、外导体的内直径 $2b$ 及内外导体之间填充相对介电常数为 ϵ_r 的介质有如下关系：

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \frac{b}{a} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \quad (1.6)$$

对于多芯内导线，其特性阻抗 Z_0 应该表示为

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a \cdot K_s}\right) \quad (1.7)$$

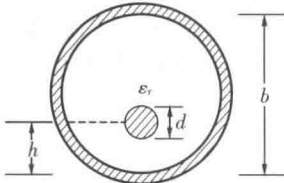
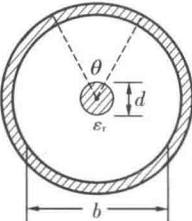
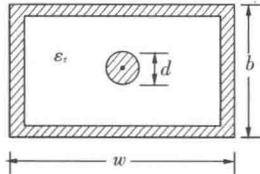
对于 7 芯内导线， $K_s=0.939$ ；对于 19 芯内导线， $K_s=0.97$ ；对于实心导线， $K_s=1$ 。常用同轴线的特性阻抗为 50 Ω 、75 Ω 和 95 Ω 。微波和无线通信使用 50 Ω 同轴线；电视和录像使用 75 Ω 同轴线；数据传输多用 95 Ω 同轴线。表 1.10 为射频同轴线的重要电参数。

表 1.10 射频同轴线的重要电参数

电缆类型		阻抗/ Ω	传播速率(%)	相对介质常数
50 Ω	实心聚乙烯	50	65.9	2.30
	泡沫聚乙烯	50	83.0	1.45
	泡沫聚乙烯	50	84.0	1.42
	泡沫聚乙烯	50	85.0	1.38
	泡沫聚乙烯	50	86.0	1.35
	泡沫聚乙烯	50	87.0	1.32
	泡沫聚乙烯	50	88.0	1.29
	实心聚四氟乙烯	50	69.5	2.07
	绝缘带聚四氟乙烯	50	71.0	1.98
	低密度聚四氟乙烯	50	76.0	1.73
低密度聚四氟乙烯	50	80.0	1.56	
75 Ω	实心聚乙烯	75	65.9	2.30
	泡沫聚乙烯	75	83.0	1.45
	泡沫聚乙烯	75	84.0	1.42
	泡沫聚乙烯	75	85.0	1.38
	泡沫聚乙烯	75	86.0	1.35
	泡沫聚乙烯	75	87.0	1.32
	泡沫聚乙烯	75	88.0	1.29
	实心聚四氟乙烯	75	69.5	2.07
	低密度聚四氟乙烯	75	76.0	1.73
	低密度聚四氟乙烯	75	80.0	1.56
MISC	实心聚乙烯	95	65.9	2.30
	泡沫聚乙烯	95	85.0	1.38
	气隙聚乙烯	95	85.0	1.38
	实心聚四氟乙烯	95	69.5	2.07
	气隙聚乙烯	125	85.0	1.38
	气隙聚乙烯	185	85.0	1.38

表 1.11 所示为变形同轴线的结构及特性阻抗 Z_0 的表达式。

表 1.11 变形同轴线的结构及特性阻抗 Z_0 的表达式

结 构	$z_0 \sqrt{\epsilon_r} / \Omega$	精 度
 <p>偏心同轴线</p>	$60 \ln [X + (X^2 - 1)^{\frac{1}{2}}]$ $X = \frac{d}{2b} + \frac{2h}{d} \left(1 - \frac{h}{b}\right)$	精确
	$60 C_F \ln \left(\frac{b}{d}\right)$ $C_F = \left[1 + \left(0.046 - \frac{0.005b}{d}\right) \theta^2\right] \theta$	0.5% $\theta \leq 0.75\pi$ $2.3 \leq \frac{b}{d} \leq 3.5$
 <p>矩形同轴线</p>	$60 \ln \left(\frac{1.0787b}{d}\right) + A$ $A = \left[10 - 2.1 \left(\frac{d}{b}\right)^3\right] B$ $B = \tanh \left[2.2 \left(\frac{w}{b} - 1.0\right)\right]$	0.5% $\frac{d}{b} \leq 0.65$

2) 速度系数 v_f

众所周知，电波在同轴线中的传播速度 v 比光速 c 慢，通常把 v/c 之比定义为速度系数 v_f ：

$$v_f = \frac{v}{c} \tag{1.8}$$

同轴线中的速度系数 v_f 几乎完全取决于同轴线中所填充介质的相对介电常数 ϵ_r ，它们之间有如下关系：

$$v_f = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \tag{1.9}$$

对实心聚乙烯电缆，由于 $\epsilon_r = 2.3$ ，所以 $v_f = \frac{1}{\sqrt{2.3}} = 0.66$ ；对聚乙烯泡沫电缆，因为 $\epsilon_r = 1.42$ ，所以 $v_f = 0.84$ 。即使对于空气介质同轴线，传播速度也不等光速，而是 $v_f \approx 0.95$ 。对实心聚四氟乙烯电缆，因为 $\epsilon_r = 2.07$ ，所以 $v_f = \frac{1}{\sqrt{2.07}} = 0.70$ 。由式(1.9)不难求出，聚四氟乙烯电缆中波的传播速度 $v = 207 \times 10^6 \text{ m/s}$ 。