



Я. Д. 什尔曼

无线电波导 与 空腔共振器

科学出版社

无綫电波导与空腔共振器

Я. Д. 什尔曼著

王合力譯

科学出版社

1962

Я. Д. ШИРМАН
РАДИОВОЛНОВОДЫ И
ОБЪЕМНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Государственное издательство литературы
по вопросам связи и радио
Москва 1959

內 容 簡 介

本书系统地阐述了各种波导(包括任意形状波导、矩形波导和圆波导)、同轴綫以及共振腔的基本理論,論述了波导和共振腔的激励理論以及波导中的不均匀性問題,并簡述了在慢波系統中、各向异性波导系統中以及带状和稜形波导中电磁波的传播問題。本书可作为高等学校教学参考书,亦可供从事微波工作的科学技术人員参考。

无綫电波导与空腔共振器

Я. Д. 什尔曼 著
王合力 譯

*

科学出版社出版 (北京朝阳門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1962 年 12 月第 一 版

书号: 2655 字数: 302,000

1962 年 12 月第一次印刷

开本: 850×1168 1/32

(京) 0001—3,400

印张: 11 5/8

定价: 1.90 元

序 言

本书是根据作者多年来讲授的无线电理論基础課的講稿整理而成,对原講稿作了較大的扩展和补充。本书前七章中,主要进行系統的理论闡述,以及描写波导和波导共振腔中的物理过程。在进行理論分析之前,照例,先列出叙述性材料,并附有許多插图。

八、九两章叙述波导设备的激励理論及波导中的不均匀性,在編写这二章时,采用了电动力学的分析方法,这种方法着重指出在有源的或者具有不均匀性的波导及傳輸綫中物理过程的共同特点,以便在进行工作状态的定性分析和定量計算时应用这种共同性。

在十、十一、十二諸章中,簡略地叙述一些新問題,也就是有关在慢波系統中、各向异性波导系統中,以及在近年来获得应用的条形和稜形波导中电磁波的传播問題。我們把具有电子束的慢波系統和带有鉄氧体的波导系統作为各向异性波导系統加以討論。由于类似問題目前只見諸于专门文献,因此,即使只对这些問題作簡短的叙述,对許多讀者來說,也是不无裨益。

本书于 1953 年已基本写成,1954 年曾少量出版,1956 年作了重大修改和扩充。作者十分感謝很多同事,他們在这期間审閱了原稿,使本书得以逐漸趋于完善。特別應該感謝技术科学副博士 Л. К. 切尔年也夫(Черняев)以及书稿审閱人技术科学副博士 Б. З. 卡采涅林巴烏姆(Каценеленбаум)和 И. А. 道布罗夫斯基(Домбровский),他們的建議和意見在付印前整理手稿时已加以考虑了。作者还感謝責任編輯、技术科学副博士 М. В. 別尔西柯夫(Персиков),他承担了本书的編輯任务,仔細审閱了手稿,并提出了許多宝貴的意見。应作者請求,他还根据研究工作中获得

的資料,重写了 § 5.6 的后半段及 § 5.8 的末尾部分。最后,作者愿以感激的心情提到已故教授 A. Г. 阿林別尔格 (Аренберг) 对本书編写的关怀。

对本书的意見,請寄通信出版社。

作者

• x •

目 录

序言	xi
第一章 引言	1
§ 1.1 超高频波段的应用范围及其特点	1
§ 1.2 超高频振荡系统的特点	4
§ 1.3 应用超高频双导线型和同轴型馈线的特点	7
§ 1.4 空心金属管形波导作用原理的说明, 它和同轴电 缆的比较	11
§ 1.5 波导结构举例	15
§ 1.6 波导和空腔共振器理论研究的特点	17
第二章 平行平面间的电磁波	19
§ 2.1 问题的提出和基本定义	19
§ 2.2 一维问题的场分量方程	21
§ 2.3 边界条件	23
§ 2.4 三类特解	26
§ 2.5 平行平面间的 TEM 波	27
§ 2.6 平行平面间的 H 型波, 波形, 场分量在横截面内 的分布	30
§ 2.7 H 型波场分量沿传播方向的分布, 临界频率和临 界波长	34
§ 2.8 当 $\omega > \omega_{kp}$ 时平行平面间的波长、波阻抗和 H 型 波场分量表达式	40
§ 2.9 当 $\omega > \omega_{kp}$ 时 H 型波的场结构	42
§ 2.10 H 型波的相速和能量传递速度	50
§ 2.11 H 型非均匀波分解为均匀平面波	53
§ 2.12 平行平面间的 E 型波	59
§ 2.13 根据激励器的已给电流计算场的例子	61
§ 2.14 平面间空间中非谐波振荡的传播和非稳定过程	69
§ 2.15 非理想导电平行板之间的波	75

第三章	任意形状截面波导的一般理論要素	83
§ 3.1	問題的提出	83
§ 3.2	求特解的方法和电磁場方程特解的唯一性定理	85
§ 3.3	求特解組, 膜振动方程	86
§ 3.4	場的横向和纵向分量, 用纵分量表达横分量的公式	89
§ 3.5	場纵分量的边界条件	94
§ 3.6	横电磁波 (TEM) 的一般特性	96
§ 3.7	横电波(H)和横磁波(E), 計算公式汇集	99
§ 3.8	在零边界条件下膜振动方程本征数的实部特性問題	101
§ 3.9	H 波和 E 波在任意形状截面波导中的传播常数、波阻抗和传播速度	102
第四章	矩形波导	105
§ 4.1	一般概念	105
§ 4.2	直角坐标系膜振动方程特解的确定	105
§ 4.3	E 波和 H 波的場分量表达式	110
§ 4.4	矩形波导中的 H_{01} 波, 計算式, 場結構, H_{01} 波应用的耦合元件	114
§ 4.5	高次 H 型波的場結構, 耦合元件和空腔滤波器	121
§ 4.6	E 型波的場結構	126
§ 4.7	临界波长的計算, 波型图, 工作在基波的优点	128
§ 4.8	基型波波导的工作状态	133
§ 4.9	用基波和高次型波传输功率的計算, 极限功率与容許功率	137
§ 4.10	波导壁中損耗的計算	142
§ 4.11	基波和高次型波的衰减常数	146
§ 4.12	波导尺寸的选择	150
§ 4.13	波导元件結構举例	152
§ 4.14	电压和电流的波阻抗, 功率和电流的波阻抗, 电压	

和功率的波阻抗·····	156
§ 4.15 矩形波导內的极化現象·····	157
§ 4.16 頻率低于临界值时矩形波导內的場·····	160
第五章 圓波导·····	162
§ 5.1 概論·····	162
§ 5.2 极座标系膜振动方程的特解·····	162
§ 5.3 圓波导內場分量表达式和 E 型波的临界波长·····	167
§ 5.4 E 型波的場結構, E 波在旋轉連接中的应用·····	170
§ 5.5 圓波导內 H 型波的場分量表达式和临界波长·····	173
§ 5.6 H 型波的場結構, 圓波导內波的滤除和轉換·····	176
§ 5.7 圓波导內傳輸 H_{11} 波时場的极化現象和稳定性·····	180
§ 5.8 圓波导內的傳輸功率和損耗, 波导尺寸的选择·····	184
§ 5.9 頻率低于临界值时圓波导內的場·····	190
第六章 同軸电纜中的电磁波·····	192
§ 6.1 一般概念·····	192
§ 6.2 同軸电纜中的 TEM 波·····	193
§ 6.3 同軸电纜中的 E 波·····	196
§ 6.4 同軸电纜中的 H 波·····	200
§ 6.5 同軸电纜的波型图·····	202
§ 6.6 同軸电纜的极限功率和容許功率·····	204
§ 6.7 同軸电纜中基波的衰減常数·····	205
§ 6.8 同軸电纜尺寸的选择, 典型結構举例·····	206
第七章 空腔共振器·····	211
§ 7.1 一般概念·····	211
§ 7.2 波导內行波状态和混合状态下的綜合表达式·····	211
§ 7.3 波导中的駐波状态, 作为空腔共振器的共振波导 段·····	216
§ 7.4 无损波导共振器中的能量关系·····	219
§ 7.5 矩形共振腔·····	221
§ 7.6 圓柱形共振腔·····	228

§ 7.7	同軸共振腔	230
§ 7.8	空腔共振器的品質因數。基本关系式	230
§ 7.9	作为有損耗共振腔中自激振蕩和強迫振蕩工作状态特性的品質因數	234
§ 7.10	波导共振腔的品質因數与波导內衰減常数的关系	236
§ 7.11	非波导共振腔	238
第八章	波导和共振腔激励理論基础	241
§ 8.1	以縫隙中給定外电流和場来激励波导的問題	241
§ 8.2	有源波导解的表示式	243
§ 8.3	本征函数的正交性和携带功率公式。規一化	246
§ 8.4	洛仑茲引理	251
§ 8.5	沿有源波导場分布的微分方程	252
§ 8.6	綫路比拟	256
§ 8.7	具有分布源的无限長綫。关于等效源的概念	259
§ 8.8	具有分布源的无限长和有限长波导	261
§ 8.9	波导激励的某些特殊情况下等效源的計算	262
§ 8.10	按給定源計算場举例	268
§ 8.11	矩形波导內 H_{01} 波激励探針的輸入阻抗	272
§ 8.12	H_{01} 波激励設備的調节特点	279
§ 8.13	波导上共振縫隙的輸入导納	280
§ 8.14	輕載共振腔耦合元件輸入阻抗的計算	282
§ 8.15	有源波导中場縱分量的計算	284
§ 8.16	考虑損耗时有源波导微分方程的应用	285
第九章	波导非均匀性理論概要。替代綫路	287
§ 9.1	非均匀性的一般概念	287
§ 9.2	等效无源四端网络及其参量的实验确定法	289
§ 9.3	等效无源多端网络及其参数的实验确定法	295
§ 9.4	波导膜片	297
§ 9.5	波导內的接收探針	304
§ 9.6	波导內的无功探針	306

§ 9.7	作为波导負載的輻射共振縫隙	307
§ 9.8	波导 T 形接头	309
§ 9.9	双 T 接头	311
§ 9.10	縫隙波导电桥	316
第十章	慢波系統	318
§ 10.1	概論	318
§ 10.2	作为最簡單慢波系統的平面介質波导	318
§ 10.3	梳节形慢波系統	322
§ 10.4	螺旋形慢波系統	324
§ 10.5	用电子注激励慢波系統的微分方程(大減慢情形)	327
第十一章	电磁波在各向异性波导中传播的某些問題	328
§ 11.1	一般評述	328
§ 11.2	均匀电子注中的电子波	328
§ 11.3	具有軸向电子注的慢波系統	330
§ 11.4	磁化鉄氧体中的均匀波	333
§ 11.5	鉄氧体在波导技术中的应用	339
第十二章	带状(条形)和稜形波导簡述	343
§ 12.1	一般評述	343
§ 12.2	带状綫(条形波导)	343
§ 12.3	稜形(H 形和 Π 形)波导	344
本书各章的附录		346
附录 3.1	电磁場方程解的唯一性原理方案的証明	346
附录 3.2	奥斯特罗格拉茨基-高斯和格林公式二維方案的推导	347
附录 8.1	理想导电壁波导本征函数系統正交性的証明	348
附录 9.1	用保角变换法計算膜片等效电容	350
附录 9.2	无限大理想导体屏上半波縫隙外輻射导納的計算和二重性原則	355
参考文献		359

第一章 引言

§ 1.1 超高频波段的应用范围及其特点

在现代无线电技术中,频率高于 1 千兆赫($1\Gamma u = 1000Mu = 10^9u$),即波长短于 30 厘米¹⁾的电磁振荡都属于超高频(свч)波段。分米波波段的短波部分,厘米波和毫米波都是超高频。同时,所有这些波又都包含在更宽的超短波(уwb),即波长短于 10 米的波段内。

超高频技术是无线电技术中比较年轻的一个领域。在伟大的卫国战争时期,由于雷达的迫切需要,超高频技术获得了很大的发展。

众所周知,雷达系利用由伟大俄罗斯学者、无线电发明者 A. C. 波波夫(Попов)所揭示的电磁波的反射或二次辐射现象。我们又知道,如果被照射目标的尺寸大小和波长相近(或者,目标尺寸相当大),则二次辐射是相当有效的。仅仅这一点,即要求雷达站应当工作在从米波开始的超短波波段内。

可以看出,在伟大的卫国战争时期,很多雷达设备从米波变为厘米波。其基本原因是,在天线尺寸有限的情况下,在厘米波段,可以将电磁能集中在极窄的波束中(图 1.1)²⁾。这样就可以将电磁能集中于目标方向,提高方位坐标测量的精确度,改善方位坐标的分辨能力(分辨距离相等,方向位置彼此接近的目标的能力)。由

1) 在决定以厘米为单位的波长和以千兆赫为单位的频率之间关系时,可以利用下列公式:

$$\lambda_{c.u} = \frac{30}{f_{\Gamma u}}.$$

2) 对具有抛物面反射器的天线和某些其它形状天线来说,用弧度表示的方向图宽,若以半功率电平来量测,大约等于波长与天线的直线尺寸之比(图 1.1)。

A diagram showing a lens with focal length f and aperture diameter D . A light ray enters at height y from the optical axis and is focused at a distance x . The angle of the ray is labeled $\psi \approx \frac{\lambda}{D}$.

超高频波段的长波一端与米波毗連，米波之后为短波、中波和长波(图 1.2)。超高频波段的短波一端与紅外輻射毗連。

长波和中波	中短波和短波				超短波				原子与分子发光			
	米波	分米波	厘米波	毫米波	红外辐射	可见光	紫外辐射					
1000米	100米	10米	1米	10厘米	1厘米	1毫米	100微米	10微米	1微米	100微米		
	1	10	100	1	10	100	1	10	100			
	兆赫			千兆赫 超高频			兆兆赫					
A.C.波波夫 ($\lambda=200-500$ 米) 1895年	10^6 赫 Г.赫兹 ($\lambda=50-60$ 厘米) 1888年			10^9 赫 П.Н.列别捷夫 ($\lambda=6$ 毫米) 1895年			10^{12} 赫 П.Н.列别捷夫($\lambda=4$ 毫米) 1906年 A.A.格拉果列娃-阿尔卡基也娃 1922年($\lambda=82$ 微米)			10^{15} 赫 M.A.列别茨卡娅 ($\lambda=30$ 微米) 1927年		

图 1.2 电磁振荡频谱中超高频波段的位置

并以其相位和极化的杂乱无章为其特征。无线电振荡是在振荡系统中被激励的,并用专门天线装置发射出去。照例,无线电振荡的特点是波的相位变化有规则,且具有一定的极化。红外辐射和无线电辐射的频率与波长是彼此迭接的。用近代的发热方法,可以观察到波长在 0.5 毫米以内的红外辐射。至于无线电波,则早在 1895 年,著名的俄国物理学家 П. Н. 列别捷夫(Лебедев)利用微型振子的放电,获得了波长 $\lambda = 6$ 毫米的超高频振荡。1906 年,他已获得了波长 $\lambda = 4$ 毫米的电磁振荡。А. А. 格拉果列娃-阿尔卡基也娃(Глаголева-Аркадьева)利用涂油金属屑的火花放电获得了从 50 到 0.082 毫米波段内的强电磁波辐射,实现了 В. К. 阿尔卡基也夫(Аркадьев)的理想。М. А. 列微茨卡娅(Левитская)利用同样方法,得到了波长 $\lambda = 0.03$ 毫米的振荡。根据上述工作结果可知,波长为数十分之几毫米的电磁波可能通过二种途径获得: 1) 微型电振子的辐射; 2) 红外辐射,即被激原子和分子的辐射。这样就证实了红外线和无线电波在本性上的统一性¹⁾。

如上所述,象对红外和光振荡所能作到的一样,在辐射器尺寸很小的情况下,也可以把超高频振荡能量集中于狭窄波束中。同时,红外辐射,特别是光辐射所固有的在大气中的吸收和散射现象,对超高频电磁振荡的传播来说,也同样存在。由于无线电波所走的路程一般都比较远,因此,由于吸收和散射现象,波在大气中的衰减可能十分可观。在分米波段中,这种衰减还比较小,在厘米波段的短波部分就显得严重,而在毫米波段就特别大。因为吸收能量的分子是谐振系统,因此,吸收也具有谐振特性,在频谱的某一段吸收大,在另一段吸收小。

从实际应用的观点来看,厘米波具有特别重要的意义。在厘米波段,可以使天线有强方向作用,而衰减也是适中的。在很多情况下,毫米波可能很重要。后者的特点是大气中的衰减大,但可以

1) 不久以前,借助射电天文学,获得了这种统一性的新证据。观测星际空间无线电辐射的结果说明,存在有在分米波波段($\lambda = 21$ 厘米)的氢原子的不相参辐射谱线。

使天綫获得很高的方向性。

长期以来认为,超短波,特别是超高频无线电波不适于用来作远距离通讯。因为按其性质来说,这些波和光波相近,不能绕过大的(和波长 λ 比较)障碍物,因之,实际上只能在视距范围内传播。现在,利用定向发射和接收,采取从一个无线电站向另一站顺序转发的办法,克服了这个困难。这种发送叫作无线电中继,利用它可以在中间站功率很小的情况下,实现高质量的多路无线电电话、电报通信,以及交换电视节目。除了无线电中继通信以外,还开辟了利用从对流层不均匀体的反射,以及利用人造地球卫星上特制的转发器的远景。现代无线电中继线可以实现一个方向进行1200路以下的电话通信。

这么多路数通信的同时传送需要占有很宽的频谱。大家知道,为了消除畸变,载频必须远远大于被传送频谱的宽度。否则,各个频谱分量的传送条件将是不同的,这个在长波波段内不能实现的要求,在分米波和厘米波内极易满足。这样,超高频波段的优点,除了可以聚集电磁辐射以外,还在于可以沿每个无线电通路无畸变地发送极宽的频谱。在雷达中,利用这一优点,可以发射频谱很宽的极短无线电脉冲,以便分别接收从相距很近的目标反射回来的信号,即获得良好的距离分辨力。

按照所使用的设备特点来说,超高频波段是属于无线电技术的波段。同在较低频率时一样,这里广泛应用振荡系统,电子发生器,电磁能传输线等。但是,要从高频变到超高频,问题不只局限于所有这些设备参数的简单数量变化。在大多数情况下,这些设备要起根本性的质的变化,这也就需要对超高频无线电技术专门加以研究。

§ 1.2 超高频振荡系统的特点

在图 1.3a 中绘出由集中元件电容 C 和电感 L 组成的单振荡回路。如果把回路中所有元件的几何尺寸减小某个 n 倍,则其固有频率也增大同样倍数。但是,如果减小回路尺寸大小,则接入

該迴路的电路寄生参量的作用将显著增长,同时,在迴路电容器中,在无电击穿危险的情况下,可能儲存的能量,亦将减小。因此,为了向超高频过渡,采用类似方法以提高迴路固有频率是不适宜的。

可以不减小振荡系统的尺寸而提高振荡迴路的固有频率。为此,可以把电感 L 减小到只有一圈的电感量,而不必改变迴路电容 C (图 1.36)。要继续提高迴路的固有频率,可以增大电容器平板間距离,减小平板面积,从而减小电容量(图 1.36)。

柱形振荡器(图 1.37, θ)是振荡迴路(图 1.36)的变形。在图 1.37 中,繪出了細柱形振荡器,其横截面尺寸远比振荡器长度为小。在图 1.37 中,繪出了粗柱形振荡器,其纵横尺寸彼此相当。最初,用火花放电法,利用类似的振荡器以产生有衰落的电磁振荡。由于振荡器(图 1.37, θ)是开放的振荡系统(具有外场的振荡系统),因此,当振荡时,振荡器辐射能量,因而其品质因数低,故目前只有用它作为天綫设备的元件。

形似共振式双导綫段的振荡迴路(图 1.38)是辐射损耗較低的振荡系统之一例。这种迴路可以看作是图 1.36 所示振荡迴路的变态。綫間距离較波长愈小,这里的辐射损耗也愈小。这种系统有时用于分米波段,而由于辐射损耗和热损耗較大,一般很少适用于厘米波段。

在同軸型共振綫段中(图 1.39),由于电磁場系集中在封閉的容积中,其辐射损耗极小。这里只有因电流流过金属导綫表面而产生的热损耗,且因外导綫表面較双导綫段表面大,故热损耗也較小。故同軸綫段是具有高品质因数的振荡系统,广泛应用于分米波与厘米波之交界处。

在图 1.39, u , κ 中示出由振荡迴路(图 1.36)向空心电磁系统过渡的情况。这种系统具有更高的质量因数,适于在厘米波波段中工作。

大家知道,为了提高迴路(图 1.36)的固有频率,可以减小其电感。为此目的,可以将电感綫圈平行連接(图 1.39)。当增多綫圈

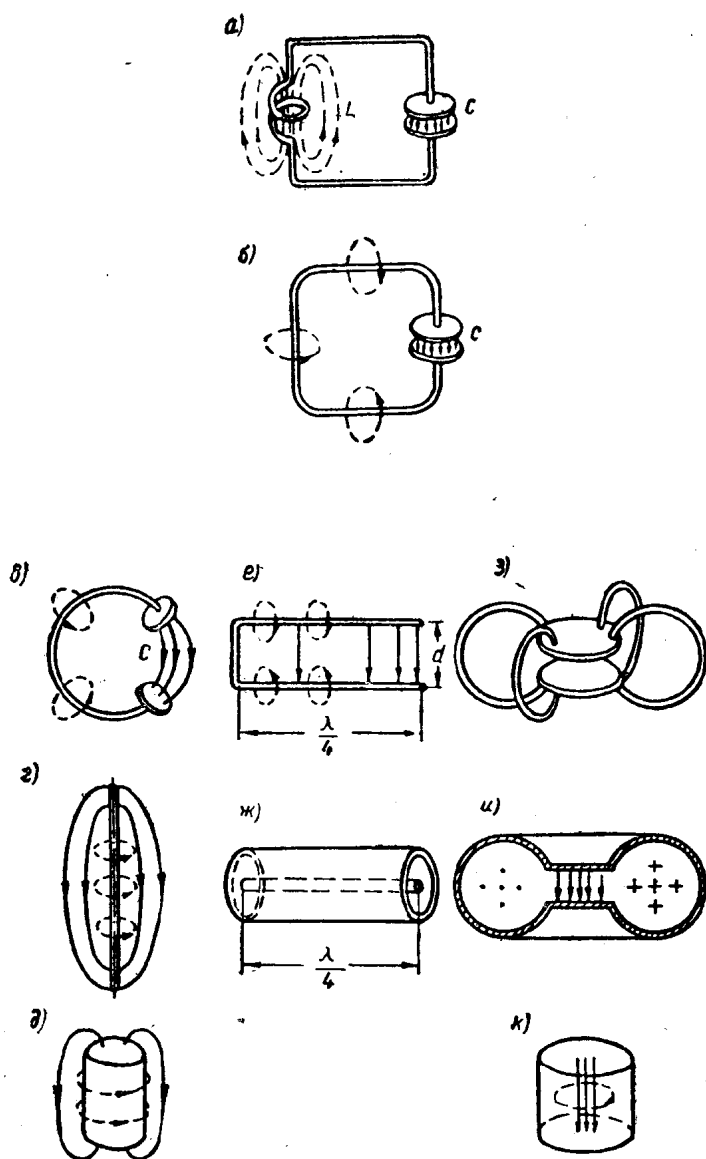


图 1.3 从具有集中常数的振荡回路向电磁共振器的过渡

数目,则可过渡为环形空心电磁共振器(图 1.3u)。这里的电磁场被关在封闭的金属面内,因此,在这种共振器中不存在辐射损耗。由于其分布电流的表面远比同轴型共振器的内导线表面大,故其热损耗也较小。采用将线匝引入于共振器的方法,不难实现和空心共振系统的耦合。这种环形共振器是苏联学者 M. C. 晶曼(Нейман)于 1938 年首先提出的。

将环形共振器变形,可以做成其它形状的空心振荡系统,例如,空心柱形共振器(图 1.3v)。后者和柱形共振器(图 1.3d)不同,是具有内场的共振器,或者是空心电磁共振器¹⁾。空心电磁共振器具有极高的质量因数,约有数百到数十万。目前,在超高频无线电子技术中,和其它形状的振荡系统比较,这种共振器起着最重要的作用。

如同具有外电磁场的共振器(图 1.3b)一样,空心电磁共振器也是具有集中参量振荡系统(图 1.3a)的质的变形,这种变形是由于向超高频波段过渡而产生的。

§ 1.3 应用超高频双导线型和同轴型馈线的特点

当过渡到超高频波段时,在被称为馈线的电磁能传输线中,同样可以观察到重大的变化。双导线和同轴线顺利地用在较低频率,而在许多情况下*,不能利用,必须采用空心金属管(波导管)来传送电磁能。

大家知道,沿线传送高频能量,一般来说,是一项较传送工业频率或直流电能量更为复杂的任务。这是因为,当线长和波长 λ 不相上下时,分布在线上的电抗参量将大大地影响到所有高频系统的工作状态。因此,对一般长线所提出的基本要求之一是要求它的参量的均匀性。双导线式和同轴型馈线首先可以满足这个要求。

1) 空心电磁共振器可以简称为空腔共振器。

* 指在超高频波段——译者。