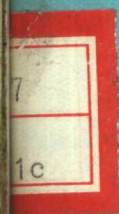


电子工业技术词典

微波技术

国防工业出版社



电子工业技术词典

微波技术

《电子工业技术词典》编辑委员会 编

国防工业出版社

内 容 简 介

《电子工业技术词典》是在一九六四年出版的《无线电工业技术词典》(试用本)的基础上作了较大修改和增补而编写的。本《词典》是一本为广大工农兵和干部提供的深入浅出、简明实用的工具书。它也可供从事某个具体专业的科技人员在了解电子工业整个领域的全貌、扩大知识面时参考。

本《词典》共有三十四章。正文中各词汇后附有英文对照,书末附有英文索引,合订本中还附有汉字笔画索引。在出版合订本之前,将先分册出版。各分册所包括的章节内容和出版先后次序,将视具体情况而定。

本分册是《词典》第二十五章微波技术的内容,它包括:基本概念与理论,波导与谐振腔,微波元器件与网络,微波应用等四节。

电子工业技术词典

微波技术

《电子工业技术词典》编辑委员会 编

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₁₆ 印张 4¹/₄ 85 千字

1976年11月第一版 1976年11月第一次印刷 印数: 00,001—27,000册

统一书号: 17034·29-17 定价: 0.47元

前 言

《电子工业技术词典》是在无产阶级文化大革命伟大胜利的鼓舞下，在学习无产阶级专政理论的热潮中，在电子工业发展的新形势下出版的。它是在一九六四年出版的《无线电工业技术词典》（试用本）的基础上编写的。

原《词典》自发行以来，曾受到广大读者的欢迎，为宣传、普及、推广电子技术知识起了一定的作用。十多年来，在毛主席革命路线的指引下，我国电子工业已有很大的发展，生产规模不断扩大，技术水平迅速提高，技术队伍日益壮大，电子技术的推广应用已引起国民经济各部门的重视，并在社会主义革命和社会主义建设中发挥出作用。目前，电子工业已成为国民经济的一个组成部分，电子工业战线的广大职工正在为实现第四届全国人民代表大会提出的宏伟目标而努力奋斗。为适应这一大好形势，更好地为无产阶级政治服务，为工农兵服务，为社会主义服务，我们对原《词典》进行了一次较大的修改和增补。内容力求反映七十年代电子技术的水平，释文尽量做到简明、通俗。目的是为了向要求对电子工业技术有一般常识的广大工农兵和干部提供一本实用的工具书；同时也可供从事某个具体专业的科技人员在了解电子工业整个领域的全貌和扩大知识面时参考。

本《词典》共分三十四章。其目录如下：

- | | |
|-----------------|-------------|
| 一、电工基础； | 二、基本电子线路； |
| 三、网络分析与综合； | 四、电波传播与天线； |
| 五、信息论； | 六、电阻、电容与电感； |
| 七、厚薄膜电路； | 八、磁性材料与器件； |
| 九、电子陶瓷与压电、铁电晶体； | 十、机电组件； |
| 十一、电线与电缆； | 十二、电子管； |
| 十三、半导体； | 十四、电源； |
| 十五、其它元器件； | 十六、通信； |

十七、广播与电视;

十九、导航;

二十一、电子对抗;

二十三、系统工程;

二十五、微波技术;

二十七、红外技术;

二十九、电声;

三十一、声纳;

三十三、电子测量技术与设备;

十八、雷达;

二十、自动控制与遥控、遥测;

二十二、电子计算机;

二十四、电子技术的其它应用;

二十六、显示技术;

二十八、激光技术;

三十、超声;

三十二、专用工艺设备与净化技术;

三十四、可靠性。

各章互有联系,并尽量避免章节间词汇的重复,故每章只有一定的系统性。

正文前有章节和词汇目录,正文中各词汇后附有英文对照,最后附有汉字笔画索引与英文索引。本《词典》将先分册出版,各分册所包含的章节内容和出版先后次序将视具体情况而定。各分册无汉字笔画索引。

本《词典》的编写工作,自始至终是在毛主席革命路线的指引下,在党的领导下进行的。贯彻了“**独立自主,自力更生**”的伟大方针,坚持了群众路线,实行了工人、干部、科技人员和生产、科研、教学两个三结合,以及理论联系实际的原则。《电子工业技术词典》本身就是广大群众集体智慧的结晶。它的编写过程也反映了无产阶级文化大革命后我国出版战线上的新气象。

由于我们水平有限,加上时间仓促,虽然作了很大努力,但《词典》中还可能存在不少错误和不妥之处,恳请广大读者及时批评指正。

《电子工业技术词典》编辑委员会

一九七五年十月一日

目 录

一、基本概念与理论

微波	25-1	击穿	25-5
亚毫米波	25-1	波型	25-5
微波光学	25-1	色散	25-6
微波在大气中的传播	25-2	伴流	25-6
行波	25-2	电磁场方程组的矢量亥姆霍兹方程	25-6
反射系数	25-2	广义边界条件	25-7
行波系数	25-2	亥姆霍兹定理	25-7
驻波	25-3	本征值问题	25-7
行驻波	25-3	静电格林函数	25-7
电压驻波比	25-3	格林函数并矢	25-7
匹配	25-3	电象理论	25-8
插入损耗	25-5	保角变换	25-8
馈线系统的衰减	25-5	求矩法	25-8
隔离比	25-5	相控阵天线的微波理论	25-8
隔离度	25-5	电磁模拟律	25-8
传输线带宽	25-5	衍射的几何理论	25-8
传输线功率容量	25-5	耦合波理论	25-9

二、波导与谐振腔

馈线	25-10	螺旋波导	25-12
波导	25-10	介质膜波导	25-12
矩形波导	25-10	弯角波导	25-12
圆波导	25-11	套筒式波导	25-13
弯波导	25-11	细径可弯波导	25-13
波导弯头	25-11	细径软波导	25-13
折波导	25-11	陶瓷波导	25-13
扭波导	25-11	脊波导	25-13
异形波导	25-11	矩形软波导	25-13
环形波导	25-12	互锁型软波导	25-14
波纹波导	25-12	缠绕型软波导	25-14

无缝纹型软波导·····	25-14	周期性结构·····	25-17
焊缝皱纹型软波导·····	25-14	特种截面同轴线·····	25-17
电镀介质波导·····	25-15	带状线及微带·····	25-17
椭圆软波导·····	25-15	谐振腔·····	25-18
皱纹椭圆软波导·····	25-15	回波谐振器·····	25-18
铝椭圆软波导·····	25-15	介质谐振器·····	25-19
螺旋圆波导·····	25-15	同轴线空腔谐振器·····	25-19
介质膜圆波导·····	25-16	开放式谐振腔·····	25-20
H波导·····	25-16	超导腔·····	25-20
栅栏波导·····	25-16	边耦合腔·····	25-21
开波导·····	25-16		

三、微波元器件与网络

微波元(器)件·····	25-22	定向耦合器·····	25-29
密封窗·····	25-22	宽频带定向耦合器·····	25-30
传输线扼流接头·····	25-22	微带和带状线定向耦合器·····	25-30
矩形-圆形波导转换器·····	25-22	定向耦合器的过渡衰减·····	25-30
同轴线-波导转换器·····	25-23	定向耦合器的方向性系数·····	25-30
椭圆-矩形波导变换器·····	25-23	阻抗变换器·····	25-31
旋转关节·····	25-24	$\lambda/4$ 阻抗变换器·····	25-31
微波衰减器·····	25-24	矩形波导阻抗变换器·····	25-31
微带线衰减器·····	25-24	微带线阻抗变换器·····	25-32
波导匹配负载·····	25-25	同轴线阻抗变换器·····	25-32
短路活塞·····	25-25	阶梯阻抗变换器·····	25-33
匹配元件·····	25-25	介质阻抗变换器·····	25-33
矩形波导开关·····	25-26	线性阻抗变换器·····	25-34
铁氧体开关·····	25-26	微波滤波器·····	25-34
T-型接头·····	25-26	平衡-不平衡变换器·····	25-35
双T·····	25-27	宽带滤波器及移相器·····	25-35
魔T·····	25-27	微波交指型结构·····	25-35
折迭双T·····	25-27	一腔多模微波滤波器节·····	25-35
功率分配器·····	25-27	过波型微波滤波器·····	25-36
同轴线功率分配器·····	25-28	微带铁氧体四端环行器·····	25-36
微带线功率分配器·····	25-28	介质片移相器·····	25-36
三分贝隙缝电桥·····	25-28	微波移相器·····	25-36
三分贝定向耦合器·····	25-28	模拟式铁氧体移相器·····	25-37
波型变换器·····	25-28	闭锁式铁氧体数字移相器·····	25-37
波导环行桥·····	25-29	双模互易铁氧体移相器·····	25-38

波导模拟器·····	25-38	二极管波导开关·····	25-42
表面声波器件·····	25-38	微波延时均衡器·····	25-42
微波晶体管功率放大器·····	25-39	群分波器·····	25-43
微波晶体管振荡器·····	25-39	高次模滤除器·····	25-43
上变频器·····	25-39	杂模滤波器·····	25-44
微波低噪声参量放大器·····	25-39	铁氧体隔离器·····	25-44
谐波泵源带线变频器·····	25-39	铁氧体单向器·····	25-44
边导模器件·····	25-40	场移式单向器·····	25-44
耿氏体效应二极管振荡器·····	25-40	法拉第旋转式单向器·····	25-44
多模(微波)网络·····	25-40	铁氧体限幅器·····	25-44
毫米波集成电路·····	25-40	铁氧体反射式开关·····	25-44
微波混频器网络·····	25-40	磁调滤波器·····	25-44
半导体器件的封装网络·····	25-41	微波固体振荡器·····	25-44
环行器网络·····	25-41	体效应振荡器·····	25-44
微波铁氧体环行器·····	25-41	耿氏振荡器·····	25-45
微波铁氧体环流器·····	25-42	腔控振荡器·····	25-45
波导环行器·····	25-42		

四、微波应用

遥感技术·····	25-46	微波加热·····	25-50
微波遥感技术·····	25-46	微波传输太阳能·····	25-50
微波遥感器·····	25-46	微波在化学和化工上的应用·····	25-51
微波辐射计·····	25-46	微波等离子体发生器·····	25-51
微波全息术·····	25-47	微波波谱学·····	25-51
微波全息图·····	25-48	微波气象学·····	25-51
物波·····	25-48	微波天文学·····	25-52
参考波·····	25-48	射电天文学·····	25-52
缩尺因子·····	25-48	微波测位移系统·····	25-52
光学再现·····	25-48	微波厚度仪·····	25-52
单波束微波全息术·····	25-48	微波测温计·····	25-53
双波束微波全息术·····	25-49	微波穿透深度·····	25-53
离轴微波全息术·····	25-49	高频电场种子处理机·····	25-53
数字微波全息术·····	25-49	微波输电·····	25-53
微波计算机·····	25-49	微波生物效应·····	25-53
微波在农业上的应用·····	25-49	微波水份测定仪·····	25-53
微波在医学上的应用·····	25-50	微波加速器·····	25-54

高能加速器·····	25-54	微波理疗机·····	25-55
粒子加速器·····	25-54	微波自动网络分析仪·····	25-55
微波直线加速器·····	25-55	微波综合器·····	25-56
回旋加速器·····	25-55	波导不均匀测试仪·····	25-56

一、基本概念与理论

微波

microwave

微波一般是指波长从1毫米到1米(即频率从300千兆赫到300兆赫)的电磁波。按波段划分,微波波段可以进一步细分为:分米波、厘米波和毫米波。

微波具有以下主要特点:1. 当波长远小于物体(如飞机、船舰、火箭、建筑物等)的尺寸时,微波的特点和几何光学很相似。如雷达就是利用了微波的这个特点;2. 当波长和物体(如实验室中的无线电设备)的尺寸有同一量级时,微波的特点又与声波很相似。最简单的例子如微波号角天线,它与声学中的喇叭相似。

微波在物理学上的特点表现在它与物质的内部运动有着紧密的联系。利用微波可以研究一般顺磁物质的分子和原子核结构。在低温时,物体吸收微波量子可能产生显著效应。这是微波波谱学和量子电子学所依据的基本物理现象。

亚毫米波

submillimeter wave

亚毫米波是指波长从1毫米到0.03毫米(或频率从300千兆赫到10000千兆赫)的电磁波。这是一段介于微波和可见光(红外线)之间的电磁频谱。从广义来说,亚毫米波也归属于微波范围。

多年来,人们是从两个方向来研究亚毫米波这段电磁频谱。一个方向是从微波的一端,不断缩小空腔谐振器的尺寸,或利用磁控管或晶体的高次谐波,从而不断缩短振荡波长(或提高振荡频率);另一个方向是从可见光一端,利用受激发射的方法产生越来越

长的波长,从而接近并达到亚毫米波领域。两者中,后一途径看来更有前途。

亚毫米波有一系列的独特应用,包括:大气现象的测量,亚毫米辐射与等离子体相互作用,半导体及反铁磁体现象的研究,亚毫米波雷达和深空通信,等等。

微波光学

microwave optics

微波光学也称为准光光学,它是联系微波理论和几何光学的一门较新颖的学科。

由于数学上的困难,微波的衍射和传输问题往往很难严格地应用电磁理论来求解。因而,纯粹的几何光学方法早就用来近似地处理若干电磁波问题。一种经改进的更为准确的方法是利用渐近级数展开,它的第一项代表与几何光学相关的场。以后,这类方法得到很大发展,解决了不少衍射问题,包括各向异性媒质中电磁波的传播。

实验方面,在微波技术中研制了许多模拟光学元件的微波元件,诸如抛物面反射镜、介质和金属透镜,以及用于微波的法布里-珀罗干涉仪等等。这类技术亦称准光学技术。

另一方面,微波理论和技术也渗透到光学领域中。从建立电磁波理论那时起,人们早已认识到光波是一种波长很短的电磁波,并且用严格的电磁理论(麦克斯韦方程组)来处理一系列古老光学问题,诸如反射、折射定律,以及许多光学元件的分析与计算。随着微波理论和技术的发展,许多微波的概念和方法(诸如模式、耦合、匹配、传输线理论等)都已用于光学器件、特别是激光器件的研究中。

微波光学是一门正在发展的、微波与光

学互相渗透的边缘学科。

微波在大气中的传播

microwave propagation in atmosphere

微波在大气中的传播特性和气象有密切关系。随着波长的缩短,大气中的水或冰的质点所引起的电磁波散射作用将急剧增加,以至能够在分米波和厘米波波段阻碍通信。雨雪和云层的反射波可以使雷达站阴极射线管上出现明显的发光图形,给雷达观测带来极大的不便,不过,这一现象却可用来向飞行员预报危险。

雨点、冰雹和雪对波长很短的无线电波有很大的吸收作用,它们限制了利用毫米波来进行远距离传播通讯或测位。同时,空气中的氧对波长接近5毫米的无线电波有选择性吸收。

为了广泛利用微波远距离散射传播,应该研究大气折射率随高度的变化、大气偶然不均匀性对微波传播的影响等。

行波

travelling wave; moving wave

当传输线终端所接负载阻抗等于传输线的特性阻抗时,反射系数为零,线上只存在由振荡源向负载方向传播的电磁波,此电磁

波称为行波。对于有耗或无耗线,只要满足上述条件,就能获得行波。但有耗线上行波的振幅随距离的增加而减少,如图(a)所示。无耗线上行波的振幅不随距离而减小,如图(b)所示。

行波的特性为:在任一瞬间,线上的电压和电流是距离 z 的正弦函数,而在线上任一点的电压和电流依时间作正弦变化。故电压与电流不但与空间有关,而且与时间有关。所以它的相位为常数的点是单向移动的,其移动速度就是此行波的相速。

反射系数

reflection coefficient

在传输线上,任一点的电压(或电场强度)的反射波 U^- (或 E^-)对入射波 U^+ (或 E^+)之比,称为该点的电压(或电场强度)的反射系数。用 ρ 表示:

$$\rho = \frac{U^-}{U^+} = \frac{E^-}{E^+}$$

电压反射系数的模 $|\rho|$ 与驻波比 S 、行波系数 K 的关系为:

$$|\rho| = \frac{S - 1}{S + 1}$$

$$|\rho| = \frac{1 - K}{1 + K} \quad K = 1/S$$

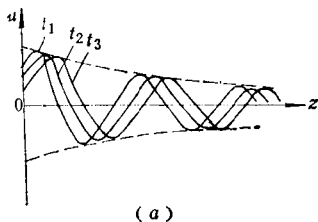
行波系数

travelling wave coefficient

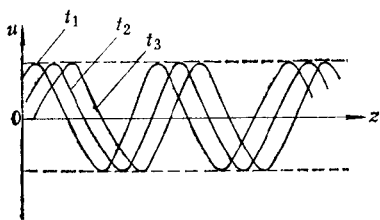
当传输线上反射系数在0~1之间时,线上同时存在行波和驻波,这时线上某些点的电压振幅为最大值 $U_{\max}$,某些点的电压振幅为最小值 $U_{\min}$ 。最小振幅与最大振幅之比称为行波系数 K ,即

$$K = \frac{U_{\min}}{U_{\max}}$$

行波系数 K 愈大,表示线上行波成分愈大,驻波成分愈小。而行波系数的大小取决于负载阻抗与特性阻抗的匹配程度。行波系数 K 和反射系数 ρ 的关系是



(a)



(b)

电压行波沿线的瞬时分布图

(a) 有耗线; (b) 无耗线。

$$|\rho| = \frac{1-K}{1+K}$$

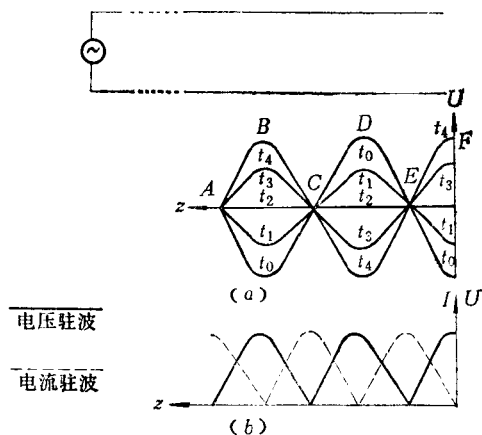
当负载完全匹配时, $K=1$, $\rho=0$ 线上没有驻波成分, 传输线处于行波状态。

驻波

standing wave

驻波是驻立不前的波。产生驻波的条件是: 无耗传输线终端不吸收入射波能量而全部将其反射, 这时反射系数的模为 1 (相当于终端短路或开路或终端接入纯电抗性负载)。

驻波的特点是各点波动的振幅为常数, 其大小随距离作正弦分布, 如图所示。驻波在波动时, 波中各点没有相位移。在线上某些点, 如图(a)中 A、C、E, 入射波和反射波相位相反, 就得到振幅为零的点; 在与上述点相距 $\frac{1}{4}\lambda$ 的各点如 B、D、F, 相位相同, 得到振幅最大的点; 中间各点合成场量的振幅介于最大值和零之间。当传输线上出现纯驻波时, 其电压和电流无论在时间和空间上都有 90° 相位差, 如图(b)所示。



(a) 电压驻波沿线的瞬时分布;
(b) 传输线终端开路时的驻波图。

行驻波

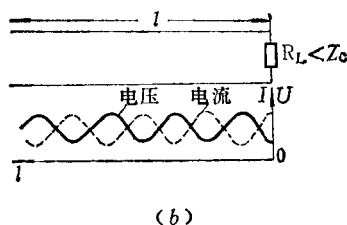
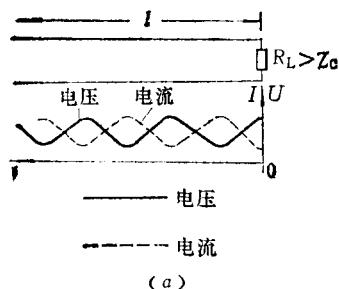
moving standing wave

当传输线终端接有复阻抗负载即 $|\rho| < 1$ 时, 线上将同时存在着行波和驻波, 线上电压或电流为行波与驻波之和, 故称为

行驻波。

由于 $|\rho| < 1$, 反射波振幅小于入射波振幅, 故合成波波腹不为入射波振幅的两倍, 波节不为零。

传输线最一般的工作状态是行驻波状态。电阻性负载所对应的电压和电流沿线分布如图(a)、(b)所示。图中 R_L 为负载电阻, Z_0 为传输线的特性阻抗。



电阻性负载行驻波电压电流沿线分布图

(a) $R_L > Z_0$ 时的情况; (b) $R_L < Z_0$ 时的情况。

电压驻波比

voltage standing wave ratio

传输线上电压最大值 $U_{\max}$ 与最小值 $U_{\min}$ 之比称为电压驻波比, 常用 S 表示。 S 是一个大于或等于 1 的实数。由于 S 易于测量, 通常用它表示匹配程度。当 $S=1$ 时, 为全匹配, 线上只载行波; 当 $\infty > S > 1$ 时, 线上载行驻波; S 愈大, 行波成分愈小, 驻波成分愈大; $S=\infty$ 时, 线上的波为纯驻波。在某些情况下 (如天线和微波器件等), 输入端的驻波比应尽可能地接近于 1, 以便提高传输线效率及减少击穿的危险。

匹配

match

设法在传输线终端附近额外产生一个反

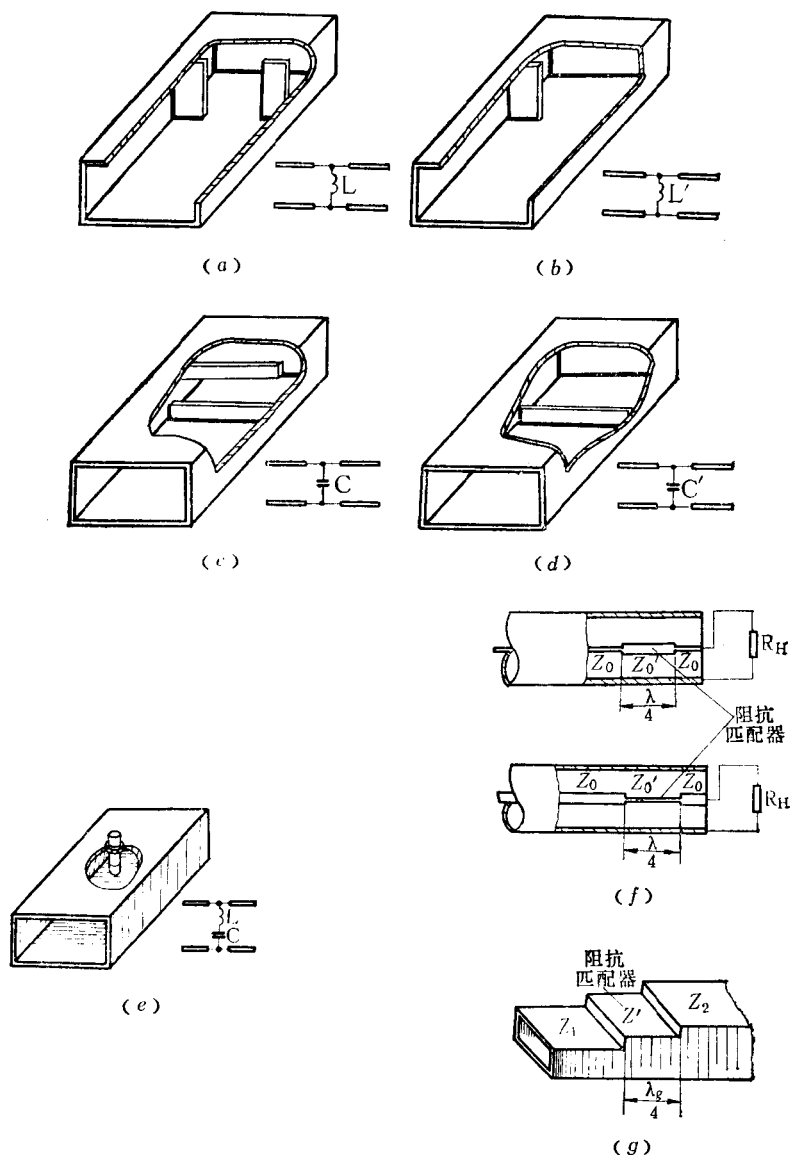
射波,使它恰好和负载所引起的反射波等幅反相彼此抵消,这个过程就叫做匹配。一旦实现完全匹配,传输线即处于行波工作状态。

实现匹配的方法有:

1. 反射波吸收法:利用铁氧体隔离器等将不匹配负载所产生的反射波全部或很大部分都吸收掉,而使信号源到隔离器之间基本上处于行波状态。

2. 电抗补偿法:在传输线中,适当加入匹配元件如纯电抗的膜片、销钉等,如图所示,使它所产生的反射波与原线中从负载所反射的波等幅反相,彼此抵消,从而达到匹配。此法的优点是匹配装置不损耗能量,传输效率高。

3. 采用各种形式的阻抗变换器如图所示。



几种常用的匹配元件形式

(a) 对称电感膜片; (b) 不对称电感膜片; (c) 对称电容膜片; (d) 不对称电容膜片; (e) 调抗销钉及其等效电路; (f) 同轴线 $\lambda/4$ 阻抗匹配器; (g) 波导 $\lambda/4$ 阻抗匹配器。

插入损耗

insertion loss

微波元件或器件未接入线路前, 负载吸收的功率与插入该元件或器件后负载吸收的功率之比称为插入损耗, 常以分贝表示。

插入损耗是由该元件或器件对电磁波的吸收和反射所致。

馈线系统的衰减

attenuation of the feed line system

发射机输出的功率 P_{sc} 与馈线终端 (天线、等效负载等) 所获得的功率 P_l 之比称为馈线系统的衰减 A , 常以分贝表示, 即

$$A = 10 \lg \frac{P_{sc}}{P_l} \text{ (分贝)}$$

引起衰减的原因有匹配不完全, 传输线的导电性不高所引的反射、辐射和热损耗。

隔离比

isolation

对一些微波元件 (如双 T 接头、正交波导定向耦合器、铁氧体环流器等), 通常将某一端的输入功率 P_{sr} 与隔离端 (即理想情况下没有输出的一端) 的输出功率 P_s 之比称为隔离比 R , 并用分贝表示, 即

$$R = 10 \lg \frac{P_{sr}}{P_s} \text{ (分贝)}$$

隔离度

isolation

即“隔离比”。

传输线带宽

bandwidth of transmission line

在某一频率范围内, 对传输线所要求的技术指标均能达到, 则称此频率范围为该传输线的带宽。

传输线功率容量

power carrying capacity of transmission line

传输线功率容量就是传输线所能承受的额定功率。

击穿

breakdown

击穿 (俗称打火) 现象指传输系统 (包括铁氧体及微波器件) 中, 通过高功率电平时所产生的火花放电现象。击穿现象一旦发生, 电磁波大部分或全部被反射回去, 将使整个系统无法工作。

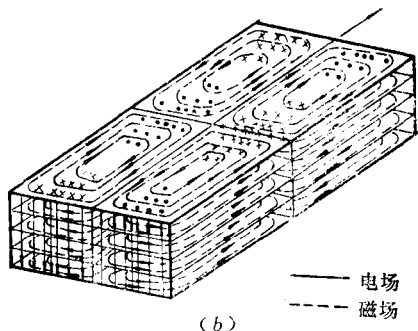
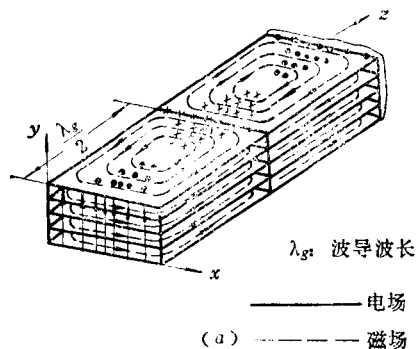
在传输系统中, 导致发生击穿时的高功率电平称为该系统的击穿功率或临界功率。

不同形式的传输线, 传播不同的波型具有不同的极限功率。临界功率的大小与馈线的尺寸、填充的介质、气压、湿度、波型、匹配形式与程度以及尖峰、毛刺、空隙等不连续性因素有关。

波型

wave mode

波型就是传输线横截面和纵截面内电磁场的结构图形, 即电磁波的分布情况, 图 (a) 和图 (b) 示出 H_{10} 、 H_{20} 两种波型的电磁场分



H_{10} 波和 H_{20} 波的电磁场分布
(a) H_{10} 波的分布; (b) H_{20} 波的分布。

布。一般说来,不同的波型有不同的场结构,每一种传输线具有与其相对应的一个基模。各种波型有一定的截止波长 (λ_c),根据截止波长可绘出各种波型的截止波长分布图。截止波长最长的波型称基模,其它称为高次模。

波型是设计微波元件的依据和基础,其结构尺寸的决定首先要知道传输线内电磁场的结构分布。馈线中能量的激励、耦合等装置以及电磁波的传输特性都和波型有密切的关系。

色散

dispersion

在超高频技术中,色散通常是指无线电波的相速随振荡频率的变化而变化这一现象。波导中波的传播相速为

$$v_{\phi} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$$

式中 C ——光速;

f_c ——截止频率;

f ——工作频率;

ϵ_r ——相对介电常数。

它与振荡频率有关,都属于色散波。

在同轴线中,设 d 、 D 分别为同轴线内外导体直径,当 $D + d < \frac{2}{\pi} \lambda$ 时,线中传输 TEM 波,其截止频率为零,相速 v_{ϕ} 恒等于光速,与振荡频率无关,叫做无色散波。若取 $D + d > \frac{2}{\pi} \lambda$,线中能传输高次型波如

H_{111} , E_{011} , H_{011} 等,其相速 $v_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$

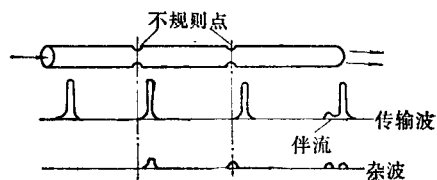
与振荡频率有关,因此为色散波。为了传输单一的 TEM 波,应取 $D + d < \frac{2}{\pi} \lambda$ 。

伴流

side flow

伴流是微波窄脉冲通过一系列的波导不

规则点时所发生的波型变换和再变换现象。



伴流的波形图

当微波脉冲通过第一个不规则点时,波的一部分功率变为其它波型,即产生杂波。因为传输脉冲和杂波的群速不同,所以它们到达第二个不规则点的时间也不同。因此,通过第二个不规则点后,杂波的一部分功率又变回到原来的传输波型,但在时间上则和原来的波型有了差别。这个跟随在原来脉冲之后的“矮”脉冲就称为伴流。

在波导传输问题中,伴流的不利作用是会引起干扰。

电磁场方程组的矢量亥姆霍兹方程

vector Helmholtz equation of the electromagnetic field

对于均匀、无耗、各向同性的线性媒质,从电磁场方程组(麦克斯韦方程组)可以导出下列形式的方程

$$\nabla^2 \vec{E} + \kappa^2 \vec{E} = 0$$

$$\kappa^2 = \omega \mu \epsilon$$

这个齐次方程就称为亥姆霍兹方程,它适用于正弦交变电磁场。式中 $\vec{E}$ 是电场强度的复矢量。对于磁场强度的复矢量,也有同样形式的亥姆霍兹方程。

将齐次波动方程 $\nabla^2 \vec{E} - \mu \epsilon \partial^2 \vec{E} / \partial t^2 = 0$ 中的 $\partial^2 / \partial t^2$ 代以 $(j\omega)^2$, 就直接得到上列形式的亥姆霍兹方程。

亥姆霍兹方程不限于写成电场和磁场强度表示式,还可以导出矢量位和赫芝矢量的亥姆霍兹方程。

亥姆霍兹方程在电磁场理论,特别是在导波理论中,有着重要的意义。从这个方程

出发求解电磁场问题, 要比直接从麦克斯韦场方程组求解简单得多。

广义边界条件

generalized boundary condition

在微波电磁场理论中, 电磁场方程组总是和边界条件同时提出的; 场方程组规定了物理问题的一般性, 而边界条件则规定了物理问题的特殊性。场方程组加上边界条件构成了“边值问题”。

不同媒质分界面上的边界条件为: 分界面两边的切向电场和法向磁感应连续、切向磁场强度之差等于面传导电流密度、法向电位差之差等于面电荷密度。

理想导体表面上(由于场在理想导体内部为零)的边界条件为: 切向电场和法向磁感应为零, 切向磁场强度等于面传导电流密度、法向电位差等于面电荷密度。

对于非理想导体表面, 边界条件可以近似地表示为

$$\vec{E}_s = \eta_s \vec{i}_n \times \vec{H}_s$$

$$\eta_s = R_s + jX_s, \quad R_s = X_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_1}{\sigma_1}}$$

式中, 符号右下角 s 和 n 分别代表切向和法向; R_s , X_s 和 η_s 分别为表面电阻、表面电抗和表面阻抗; μ_1 和 σ_1 分别为导体的导磁系数和导电系数。

亥姆霍兹定理

Helmholtz's theorem

任一电磁场可表示成一个位函数的梯度与一个矢量位函数的旋度之和, 这就是亥姆霍兹定理, 亦可说成任一电磁场具有纵向分量及横向分量。

本征值问题

eigen-value problem

在微波理论中, 经常遇到亥姆霍兹一类数学方程的求解问题。在给定的边界条件下, 方程中的截止波数 χ 只能取某些确定的值, 而不能取这些确定值以外的其它值。这些确

定的 χ 值称为“本征值”; 对应于每一本征值, 可以求出适合亥姆霍兹方程并满足边界条件的函数即“本征函数”, 它代表了相应的波型或简正波的场。

数学上, 上述亥姆霍兹方程加上边界条件的求解问题称为“本征值问题”。

以波导问题为例, 在一定条件下(如波导电导率很高, 没有隙缝等), 本征值是“离散的”, 它们代表有限数目的传输波型和无穷多个消失场。如果波导壁的电导率不高, 或在“开波导”中, 则不仅存在有限数目的离散谱, 还包含有一个本征值的“连续谱”。

静电格林函数

static Green's function

这里的格林函数是指静电的格林函数, 即一单位点电荷所产生的电位函数, 如单位电荷所在的空间是自由空间, 则此位间的格林函数就是场点至此点电荷的距离的倒数乘以 $1/4\pi$; 如点电荷所在的空间是一闭合或半闭合空间, 则此空间的边界上的感应电荷所产生的电位应叠加在与上面提到的距离成反比的一项上, 以得出所求的格林函数。这两项之和一般又可写成无穷级数或反常积分的形式, 以便于计算。在近代微带及带线参数的计算中, 格林函数是很重要的一个辅助函数。

格林函数并矢

Green's function dyadic

格林函数并矢 $\vec{G}$ 是下面的并矢偏微分方程的完备解

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \vec{G}(x, x') - h^2 \vec{G}(x, x') \\ = \vec{I} \delta(x - x') \end{aligned}$$

其中 $\nabla \times$ 代表旋度的运算, h 是波数即 $2\pi/\lambda$, λ 为工作波长, $\vec{I}$ 为一单位并矢, $\vec{G}(x, x')$ 就是所求的格林函数并矢, 其作用是给出任意矢量电流分布所产生的电场

$$\vec{E}(x) = j\omega\mu_0 \int_V \vec{J}(x') \cdot \vec{G}(x, x') d^3x'$$

其中, μ_0 为电流密度分布矢量 $\mathbf{j}$ 所在的全空间 V 的导磁系数。

电象理论

theory of image

在求解电磁场问题时,经常需要借助于电象理论。因为点电荷在导电平面前的象是对称的负电荷,由此即可作出电偶极子的象,从而作出磁偶极子的象,这样就能求解诸如波导及谐振腔这类微波元件的激发问题。一般说来,复杂的微波结构中出现的多象构成一个无穷的序列,故处理这个无穷序列的点源所产生的场时要进行无穷级数的运算及运用复变函数中的留数定理。

在静电问题中,电象理论是求静电格林函数的主要方法之一。

保角变换

conformal mapping

某些解析函数能将任一单连通区域变为复平面的上半平面,这样的变换是保角的。利用这个变换可以把二维的静电及静磁问题的复杂边界变换成直线边界,从而把问题简化。在电动力学范围则保角变换在简化边界形状的同时,又使电磁场所在空间的媒质变为位置的函数,有时亦可使问题简化。

求矩法

method of moment

这是一个用来计算电磁场问题的方法,例如天线中的电流分布是一个在积分号内出现的待求函数,故是一个积分方程的解。利用求矩法可以用一个逐点匹配的函数集来逼近这个电流积分方程,从而代替这个积分方程。这样,利用求矩法即可把电磁场的值与产生这个场的电流联系起来。求矩法已用来求解波导中的不连续性问题以及相控阵天线中的辐射场与馈电波导系统中的导波场间的联系的问题。这个方法的实质是将一个积分方程的解化为一组线性方程的解,故利用矩阵反演法即可求出数值解。

相控阵天线的微波理论

microwave theory of phased-array antenna

相控阵天线使现代雷达的功能大大提高(如发现和跟踪多目标),因为这种天线的主瓣可以在几微秒的时间内由一个方向转到另一个方向,而且可以在此期间内使主瓣变宽或变窄。相控阵天线是由三个主要部分组成:天线阵面,相移器及馈电系统。对于大的天线,天线阵面是作为无限大的阵面来处理。相移器现有两种形式:铁氧体相移器及半导体二极管相移器。馈电系统是用来对和差场辐射图形提供预期的阵面上的场分布,多采取四端口功率分配器的形式。相控阵天线的辐射场分布及馈电波导中反射系数的计算与现有的波导中不连续性问题的计算相似,故波导理论的已有成果可以直接用于相控阵天线问题。

电磁模拟律

electromagnetic scaling law

在某一个频率上做成的微波结构可以用到另一个频率上去,例如波导中的基片集成电路的尺寸已定,则可将尺寸乘以一个 l_0 的因子即可将此新结构用到 $l_0^{-1}f_0$ 的新频率上去, f_0 是原来的工作频率,这个定律叫做电磁模拟定律。运用这一定律便能在较低的频率上进行某一微波结构的试验,这对于研制高频(如毫米波及亚毫米波)器件有着重要意义。如果问题涉及到有限导电率 σ , 则模拟实验中所用的导电率应为 $l_0\sigma$ 。

衍射的几何理论

geometrical theory of diffraction

微波中许多衍射问题很难应用严格的电磁理论(麦克斯韦方程组)来求解。纯粹的几何光学方法虽然简单,但不适用于处理衍射问题。所谓“衍射的几何理论”乃是几何光学的发展,可以用它来处理衍射问题。

在这个理论中,除了几何光学中的普通