

微波技术基础

王子宇 编著

WEIBO JISHU JICHU



北京大学出版社

微波技术基础

王子宇 编著

北京大学出版社
北 京

图书在版编目(CIP)数据

微波技术基础/王子宇编著. —北京:北京大学出版社, 2003. 11
ISBN 7-301-06545-0

I. 微… II. 王… III. 微波技术 IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 086916 号

书 名: 微波技术基础

著作责任者: 王子宇 编著

责任编辑: 王 艳

标准书号: ISBN 7-301-06545-0/TN·0019

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村 北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021

排 版 者: 北京高新特打字服务社 51736661

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 17.875 印张 337 千字

2003 年 11 月第 1 版 2003 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 25.00 元

内 容 简 介

本书主要介绍了电磁波传输系统理论、微波等效电路理论、微波元器件原理、谐振腔理论、微带电路、光纤通信技术等内容。在内容安排和讲解说明方面,本书力求使学生掌握微波工程理论的基本概念和基本分析方法;了解电磁波传输系统、微波元器件及微带电路的工作原理和设计原则,为将来从事通信、雷达、制导等领域的研究和工程设计工作打下基础。

本书可以作为高等院校通信、电子类专业高年级学生的教材或参考书,也可作为从事射频和微波电路设计的工程师的参考书。

前 言

微波技术是一门非常有用的专业技术知识,它的应用领域涉及雷达、通信、信息技术、物理学、天文学、化学、医学、气象学、能源科学、家用电器等方面。因此,掌握一些微波技术的基本知识对于在现代电子技术领域内从事科学研究和工程技术工作的人员是十分有益的。

微波技术的理论基础是经典的电磁场理论,其目标是解决微波工程中的实际问题。微波技术是一门理论与实践密切结合的课程,在研究微波工程问题时,为了避开一些复杂的数学运算和无解析解的问题,常需要根据具体情况和一些基本的物理概念对所研究的问题做简化、等效或近似处理。了解和掌握这些近似处理方法和其中所包含的基本概念是十分重要的。

微波技术是一门需要高度实验技能的专业技术知识。首先,微波技术理论的出发点是麦克斯韦方程组,麦克斯韦方程组本身就是从实验中归纳、总结出来的。其次,大多数微波工程问题都不能通过理论计算得到精确的解析解。因此,通过实验来修正理论分析结果是每一位微波工程技术人员必须具备的基本技能。

本书在内容安排上力求突出基本概念和基本方法的分析及总结,使学生能在较短的学时中掌握微波技术的基本概念,了解解决微波工程实际问题的方法和思路,为将来的工作和学习打下基础。内容具体安排是:第一章简要介绍了微波的基本特性和应用领域;第二章详细讨论了电磁波传输系统理论;第三章涉及长线理论、Smith 圆图、网络参量以及信号流图等;第四章介绍微波系统中的常用元件,主要是线性互易元件和两种重要的线性非互易元件;第五章研究了与微波谐振腔有关的理论和应用问题;第六章讨论了微带线传输系统的理论和特性,介绍了微波小信号晶体管放大器以及微波滤波器的设计理论和方法;第七章简要地介绍了光纤通信技术。由于课时的限制,本书没有涉及微波测量和微波实验的内容。

限于编者的水平,书中错误或不妥之处在所难免,希望读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 简介	(1)
§ 1.1 什么是微波	(1)
1.1.1 微波的波导传输损耗	(2)
1.1.2 微波的大气传输损耗	(3)
§ 1.2 微波的基本特点	(3)
1.2.1 微波的频率高	(3)
1.2.2 微波的波长介于无线电波和光波之间	(5)
1.2.3 微波能穿透等离子体和电离层	(5)
§ 1.3 微波系统与低频电路的差异	(6)
§ 1.4 微波的应用	(6)
1.4.1 雷达	(7)
1.4.2 信息技术领域	(9)
1.4.3 科学研究	(10)
1.4.4 其他领域	(11)
§ 1.5 微波系统的基本分析方法	(11)
第二章 电磁波传输系统理论	(13)
§ 2.1 简介	(13)
§ 2.2 麦克斯韦方程组和边界条件	(14)
2.2.1 分离变量 t	(15)
2.2.2 将复数形式的麦克斯韦方程组化为波动方程	(16)
2.2.3 分离变量 z	(17)
2.2.4 用电磁场矢量的 $E_z(x, y)$ 和 $H_z(x, y)$ 分量表示电磁场矢量 的其他分量	(22)
2.2.5 导电电磁波按其纵向分量的特点分类	(24)
2.2.6 微波传输系统的边界条件	(25)
§ 2.3 矩形金属波导	(27)
2.3.1 用分离变量法求标量波动方程在直角坐标系下的通解	(27)
2.3.2 利用边界条件确定积分常数和特征值 k_c	(28)
2.3.3 矩形波导中的主模—— TE_{10} 模	(33)

§ 2.4	圆形金属波导	(37)
2.4.1	用分离变量法求标量微分方程在圆柱坐标系下的通解	(38)
2.4.2	利用边界条件确定积分常数和本征值 k_c	(40)
2.4.3	圆波导中的常用模式	(42)
§ 2.5	同轴线	(45)
§ 2.6	奇偶禁戒规则	(48)
第三章	微波等效电路	(50)
§ 3.1	简介	(50)
§ 3.2	长线理论	(52)
3.2.1	电报方程及其解	(52)
3.2.2	反射系数与输入阻抗	(54)
3.2.3	终端方程	(55)
3.2.4	传输线中的三种状态	(56)
3.2.5	驻波参量	(58)
3.2.6	均匀传输系统与长线的等效	(59)
3.2.7	均匀传输系统等效为长线的具体方法	(61)
§ 3.3	圆图(Smith 圆图)	(62)
3.3.1	阻抗圆图的构成	(62)
3.3.2	阻抗圆图中的特殊点、特殊线	(67)
3.3.3	导纳圆图	(69)
§ 3.4	网络参量	(73)
3.4.1	散射参量 S 的定义	(73)
3.4.2	散射参量 S 的物理意义	(75)
3.4.3	散射矩阵的性质	(75)
§ 3.5	魔 T	(76)
3.5.1	魔 T 的结构和 S 参量	(76)
3.5.2	魔 T 的应用	(81)
§ 3.6	二端口网络	(85)
3.6.1	二端口网络的 S 参量	(85)
3.6.2	二端口网络的 A 参量	(88)
3.6.3	二端口网络 A 参量的求解方法	(92)
3.6.4	二端口网络的特性参量	(99)
§ 3.7	简单不均匀性的近似分析	(100)
3.7.1	不同阻抗的传输线对接	(100)
3.7.2	矩形波导中的谐振窗	(102)

第四章 微波元件	(104)
§ 4.1 简介	(104)
§ 4.2 匹配负载	(104)
§ 4.3 短路器	(106)
4.3.1 接触式短路活塞	(107)
4.3.2 非接触式短路活塞	(108)
§ 4.4 衰减器	(111)
4.4.1 吸收式衰减器	(111)
4.4.2 截止式衰减器	(112)
4.4.3 旋转极化式衰减器	(114)
§ 4.5 移相器	(115)
§ 4.6 匹配与匹配器	(115)
4.6.1 微波源的匹配	(115)
4.6.2 匹配器	(117)
§ 4.7 定向耦合器	(129)
4.7.1 小孔型定向耦合器	(129)
4.7.2 带状线型定向耦合器	(133)
§ 4.8 微波铁氧体元件	(137)
4.8.1 张量磁导率	(138)
4.8.2 铁氧体中电子自旋的进动	(139)
4.8.3 铁氧体中的张量磁导率	(141)
4.8.4 铁氧体的张量磁导率对左、右旋磁场的响应	(144)
4.8.5 微波隔离器	(146)
4.8.6 微波环行器	(147)
4.8.7 YIG 频率调谐	(149)
§ 4.9 功率分配器	(150)
第五章 谐振腔	(154)
§ 5.1 简介	(154)
§ 5.2 矩形谐振腔	(155)
5.2.1 矩形谐振腔中电磁场的解	(155)
5.2.2 矩形谐振腔的模式简并和模式激励	(157)
§ 5.3 圆柱谐振腔	(161)
5.3.1 圆柱谐振腔中电磁场的解	(161)
5.3.2 圆柱谐振腔的模式图及其构成	(163)
5.3.3 圆柱谐振腔模式图的应用	(164)

5.3.4	几种常用的圆柱谐振腔工作模式	(165)
§ 5.4	同轴谐振腔	(170)
§ 5.5	谐振腔的激励与工作模式选择	(171)
§ 5.6	谐振腔的品质因数	(172)
5.6.1	谐振腔的固有品质因数 Q_0	(172)
5.6.2	谐振腔的有载品质因数 Q_L	(174)
§ 5.7	谐振腔的频率微扰理论	(177)
5.7.1	谐振腔的频率微扰公式	(177)
5.7.2	谐振腔频率微扰公式的应用	(180)
第六章	微带电路	(184)
§ 6.1	微带传输系统	(184)
6.1.1	微带传输线的结构和特性	(184)
6.1.2	微带传输线的工作模式——准 TEM 模	(186)
6.1.3	微带传输线的准静态分析法	(188)
6.1.4	微带传输线的损耗	(192)
§ 6.2	微带元件	(193)
6.2.1	微带电容和微带电感	(194)
6.2.2	微带传输线环形电桥及微带传输线耦合器	(198)
§ 6.3	小信号微波晶体管放大器	(201)
6.3.1	微波晶体管	(201)
6.3.2	小信号微波放大器的等效电路	(203)
6.3.3	小信号微波晶体管放大器等效电路的信号流图模型	(204)
6.3.4	微波晶体管放大器的增益和稳定性	(206)
§ 6.4	小信号微波晶体管放大器的设计方法	(214)
6.4.1	双共轭匹配设计法和单向化设计法	(215)
6.4.2	增益恒定设计法	(220)
§ 6.5	微波滤波器	(225)
6.5.1	滤波器的技术参数	(226)
6.5.2	归一化切比雪夫低通原型滤波器的设计	(227)
6.5.3	归一化原型滤波器的反归一化	(230)
6.5.4	微波滤波器的微带电路实现	(236)
第七章	光纤通信技术简介	(246)
§ 7.1	光纤通信简介	(246)
§ 7.2	光纤和光缆	(248)

§ 7.3 传输光纤的种类	(250)
§ 7.4 光纤的传光特性	(252)
7.4.1 光的反射、折射、全反射	(252)
7.4.2 光在光纤中的传播	(253)
7.4.3 光纤的数值孔径	(254)
§ 7.5 光纤的损耗及工作窗口	(256)
7.5.1 光纤损耗的原因和分类	(256)
7.5.2 减小光纤损耗的方法	(258)
§ 7.6 光纤的色散特性	(258)
§ 7.7 光纤的本征值方程和单模工作条件	(260)
7.7.1 光纤中的电磁场解	(260)
7.7.2 光纤中导行光波的截止	(261)
7.7.3 光纤中导行波的特征方程	(262)
7.7.4 光纤的单模传输条件	(266)
7.7.5 弱导光纤的线偏振模	(267)
§ 7.8 光纤通信系统	(268)
参考文献	(273)

第一章 简介

§ 1.1 什么是微波

微波是频率非常高的电磁波,它的频率范围目前尚无统一的明确规定.通常将频率为 300 MHz~30 GHz 的电磁波称作微波,将 30~300 GHz 的电磁波称作毫米波,相应的电磁波频段称作微波、毫米波频段.将频率在 300~3000 GHz 的电磁波称为亚毫米波.亚毫米波既具有一些与微波相同或近似的特点,也具有一些与光波类似的特性.亚毫米波频段的电子系统可以采用微波技术结合光学理论来研究,这种方法就是所谓的准光学理论.一般地,微波在电磁波频谱中所处的位置在甚高频(Very-High Frequency,简称 VHF)和光波(远红外)之间.表 1.1 列出了电磁波频谱的波长分布和各波段名称,其中微波频段又划分为几个波段.表 1.1 中从极低频到亚毫米波段的波长划分和波段命名是由电气和电子工程师学会(The Institute of Electrical and Electronics Engineers,简称 IEEE)规定的.

表 1.1 电磁波频谱的波长分布和各波段名称

波段名称		波 长	频 率
极低频(ELF)		$10^7 \sim 10^6$ m	3 ~ 300 Hz
音频(VF)		$10^6 \sim 10^5$ m	300 Hz ~ 3 kHz
甚低频(VLF)		$10^5 \sim 10^4$ m	3 ~ 30 kHz
低频(LF)		$10^4 \sim 10^3$ m	30 ~ 300 kHz
中频(MF)		$10^3 \sim 10^2$ m	300 kHz ~ 3 MHz
高频(HF)		$10^2 \sim 10$ m	3 ~ 30 MHz
甚高频(VHF)		10 ~ 1 m	30 ~ 300 MHz
微波	分米波(UHF)	1 m ~ 10 cm	300 MHz ~ 3 GHz
	厘米波(SHF)	10 ~ 1 cm	3 ~ 30 GHz
	毫米波(EHF)	1 cm ~ 1 mm	30 ~ 300 GHz
	亚毫米波	1 ~ 0.1 mm	300 GHz ~ 3 THz
红外线	远红外	0.1 mm ~ 10 μ m	3 ~ 30 THz
	中红外	10 ~ 2 μ m	30 ~ 150 THz
	近红外	2 μ m ~ 760 nm	150 ~ 395 THz
可见光		760 ~ 400 nm	395 ~ 750 THz
紫外线		400 ~ 30 nm	750 ~ 10^4 THz
X 射线		30 ~ 0.3 nm	$10^4 \sim 10^6$ THz

微波在电磁波频谱中所处的位置决定了它的许多特点,并使得微波技术具有许多不同于低频电路理论和光学理论的概念及独特分析方法.

根据电磁波频率 f 、波长 λ 与速度 c 的关系： $f\lambda=c=3\times 10^8$ m/s 可知，微波的波长范围在 1 m~0.1 mm 之间。可以采用如下的等式进行微波波长和频率之间的换算：

$$\text{波长(m)} \times \text{频率(MHz)} = \text{波长(mm)} \times \text{频率(GHz)} = 300(10^6 \text{ m/s}).$$

对于微波频段的更细致划分和命名，国内外有多种方法，表 1.2 是在雷达和制导技术领域划分微波频段的方法及其频段代号。

表 1.2 雷达和制导技术领域划分微波频段的方法及其频段代号

频段代号	L	S	C	X	Ku	K	Ka	Q
频率范围/GHz	1~2	2~4	4~8	8~12	12~18	18~26.5	26.5~40	33~50
频段代号	U	V	E	W	F	G	R	
频率范围/GHz	40~60	50~75	60~90	75~110	90~140	140~220	220~325	

为了充分利用微波频谱资源，避免相互干扰，国际上对各微波频段的用途有一些规定。例如，微波炉中磁控管的工作频率为 2.45 GHz；C 波段通信卫星的下行工作频率为 3.700~4.200 GHz，上行工作频率为 5.925~6.425 GHz；Ku 波段通信卫星的下行工作频率为 11.7~12.2 GHz，上行工作频率为 14.0~14.5 GHz；寻呼机的工作频率为 300 MHz 左右；蜂窝移动电话的工作频率为 450 MHz，900 MHz 和 1.8 GHz；40~60 GHz 为保密通信频段；26.5~40 GHz 和 75~110 GHz 为雷达、制导系统频段；等等。

目前，世界各国大都设有专门机构，负责管理电磁波频谱资源。中国的国家无线电管理委员会就是负责分配和管理电磁波频谱资源的政府常设机构。

不同工作频率的微波系统具有不同的技术特性、生产成本和用途。一般说来，微波系统的工作频率越高，其结构尺寸就越小，生产成本也越高；微波通信系统的工作频率越高，其信息容量越大；微波雷达系统的工作频率越高，雷达信号的方向性和系统分辨力就越高。另外，微波的频率越高，其大气传输和传输线传输的损耗就越大。

1.1.1 微波的波导传输损耗

微波能量的传输系统与低频电磁能量的传输系统不同。例如，微波发射天线与真空、大气可以构成微波传输系统，微波传输线也是一种微波传输系统。微波传输线主要包括同轴线、金属波导、介质波导和微带线等。微波传输线的损耗一般都比较大，不适于长距离传输微波能量。例如，对于工作波长为 3 cm（工作频率约为 10 GHz）的矩形金属波导，微波能量沿该波导每传输 1 m 距离，将衰减 0.3~0.44 dB。也就是说，微波能量沿该波导每传输 1 m 距离，微波能量就要损失约 10%。对于工作波长为 3 mm（工作频率约为 100 GHz）的矩形金属波导，微波沿该波导每传输 1 m 距离，将衰减 2.35~3.34 dB。也就是说，微波能量沿该波导每传输 1 m 距离，能量就要损失约 50%。因此，波导传输系统不适于长距离传

输微波信号和微波能量。

1.1.2 微波的大气传输损耗

微波在大气中的传输损耗远远小于其在传输线中的传输损耗. 由于微波大气传输损耗的衰减机理主要是水分子和氧分子对微波能量的共振吸收, 所以微波工作频率或海拔高度不同, 微波传输损耗也不同. 图 1.1 为微波在不同海拔高度的水平传输损耗.

需要说明的是: 虽然微波在大气中的传输损耗较小, 但辐射损耗却比较大. 微波的辐射损耗是一个与微波发射天线方向性指标有关的物理量. 设计合理的微波天线可以使微波能量在大气层或太空中长距离传输.

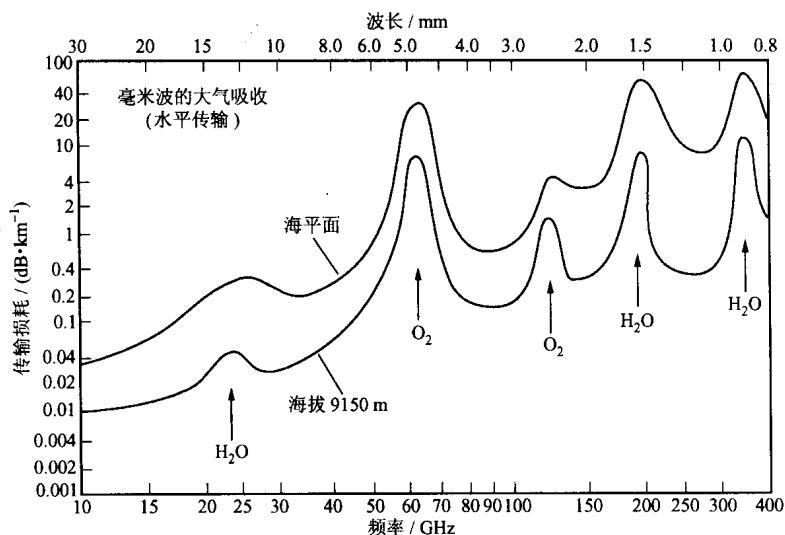


图 1.1 微波在海平面和海拔 9150 m 高度的大气传输损耗

§ 1.2 微波的基本特点

微波的基本特点决定了微波的用途及其分析、研究方法。

1.2.1 微波的频率高

微波的频率高, 则意味着在相对频带宽度一定的条件下, 其可用工作频带宽, 信息容量大. 相对频带宽度的定义是: 微波系统的工作频带宽度 Δf 与中心工作频率 f_0 之比. 一般地说, 微波系统的相对频带宽度越宽, 则所需技术的难度和生产成本就越高. 在相对频带宽度相同的条件下, 微波系统的可用频带很宽(数百兆甚至上千兆赫兹), 这是低频无线电波无法比拟的. 因此, 微波在通信领域内得到了广泛的应用. 光波的频率比微波更高, 所以光通信系统的信息容量就更大.

例如,一路标准数字电话需要 64 kHz 的频率带宽,一路标准模拟电视信号需要 8 MHz 的频率带宽.如果某个微波通信系统的相对频带宽度为 5%,当其中心工作频率为 4.2 GHz 时(C 波段卫星),可以传输约 20 套标准模拟电视信号;当其中中心工作频率为 12 GHz 时(Ku 波段卫星),可以传输约 60 套标准模拟电视信号.

常用的微波通信方式有微波同轴电缆通信、微波中继接力通信、微波卫星通信和微波空间通信等.图 1.2 是大型通信卫星地面站的天线及接收系统.图 1.3 是小型家用通信卫星地面接收系统.

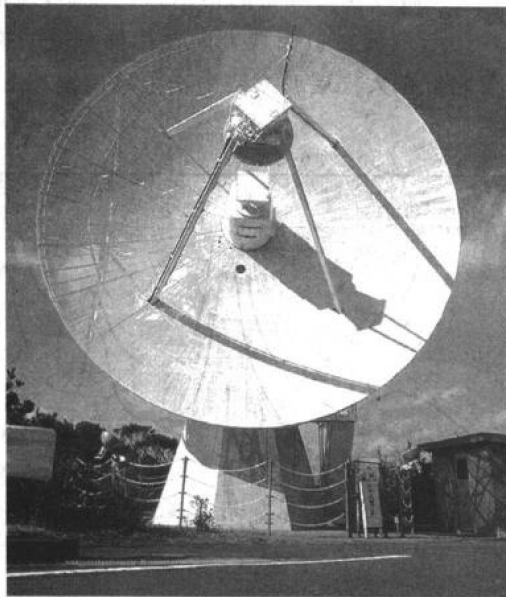


图 1.2 大型通信卫星地面站

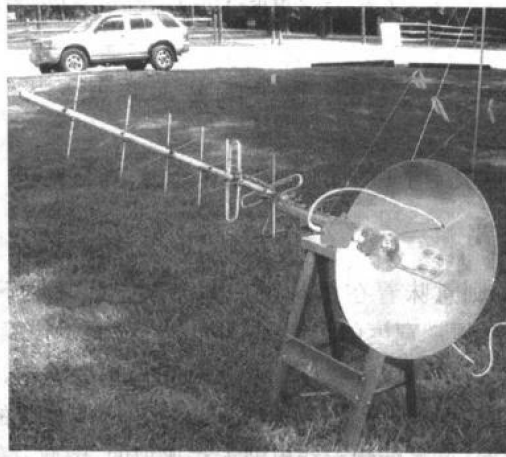


图 1.3 小型家用通信卫星地面站

1.2.2 微波的波长介于无线电波和光波之间

当波遇到障碍物时,如果波长大于障碍物尺寸时,波会发生绕射;如果波长小于障碍物尺寸或与障碍物尺寸相当时,波将会被反射.由于微波的波长范围恰好比自然界中的宏观物体(如山峰、建筑物、舰船、飞机、车辆、导弹等)的尺寸小或相当,所以,当微波照射在这些物体上时将会产生很强的反射.微波应用的一个重要领域——雷达就是根据这个原理工作的.另外,由于微波的波长比尘埃、云雾及空气中的水滴尺度大,所以微波穿过尘埃、云雾和中小雨的能力比光波强.因此,利用微波可以穿过尘埃、云雾及中小雨探测到自然界中的宏观物体.这是低频电磁波和光波都做不到的.引导飞行员在恶劣天气条件下降落的微波导航系统就是利用微波波长的这一特点工作的.

在大多数情况下,总是希望雷达系统和无线电通信系统具有较远的作用距离.要做到这一点的一个重要条件是:系统天线发射出去的电磁波波束应当尽量窄.电磁波波束的宽窄与电磁波波长和天线尺寸之比直接相关.以抛物线天线为例,天线波束角 $\alpha \approx 140^\circ \times \lambda_0 / D$,其中 D 为天线口径, λ_0 为发射电磁波的波长.假定需要得到 5° 的波束角,如果工作波长 λ_0 为 10 m (频率为 30 MHz),则天线的口径必须大于 280 m ;如果工作波长 λ_0 为 3 mm (频率为 100 GHz),则天线的口径仅需 8.4 cm .天线尺度小是微波系统的主要优点之一.例如,C波段(4.2 GHz)的卫星地面站天线口径一般为 $3\sim 5\text{ m}$,而Ku波段(12 GHz)的卫星地面站天线口径只需 1 m 左右就可以了.天线小有利于微波系统的机动和隐蔽,也适合于安装在飞机、导弹和卫星上.

1.2.3 微波能穿透等离子体和电离层

由于微波不仅能穿透尘埃、云、雾(光波不行),又能穿透电离层(低频电磁波不行),因此,微波就成了卫星通信、空间通信和射电天文研究的重要手段.

根据石油起源于古生物遗体的“有机成因学说”,目前,地球上的石油贮藏量约为 1370 亿吨,可供人类再开采 $40\sim 50$ 年.而根据美国康奈尔大学天文学家托马斯·戈尔德教授提出的石油“无机成因学说”,石油起源于 46 亿年前地球诞生时封存在地球深处的甲烷,可以供人类再开采 500 年.

尽管人们对这两种学说仍存在争论,但两种学说都认为石油资源是有限的,所以,开发受控核聚变能源是解决人类对能源“无限”需求的根本途径.受控核聚变的产生条件是高温,检测和控制核反应堆内部的温度是受控核聚变的关键.由于核反应堆中的高温会使气体发生电离,通过对核反应堆中等离子体的诊断,可以探测到核聚变反应堆内部的温度情况,从而实现受控核聚变.目前,研究受控核聚变的一个主要手段就是借助于微波、毫米波的等离子体诊断技术.

§ 1.3 微波系统与低频电路的差异

由于微波波长较短,微波的传输系统、微波元器件以及它们的工作原理和分析方法,都与直流、低频电路系统、低频元器件以及它们的工作原理和分析方法截然不同,见表 1.3. 首先,在分析低频电路时,可以认为有关物理量在传输系统中是均匀分布的,因此只需考虑各物理量随时间的变化,而不考虑其空间分布. 对于微波系统,必须同时考虑各物理量随时间的变化以及其空间分布. 如图 1.4 所示,观察尺度与电磁波波长的相对关系决定了观察者所看到的物理现象的性质. 所以,如果观察尺度相同,则对于低频电磁波信号,观察者看到的是物理量的振动,对于高频电磁波信号,观察者看到的是物理量的波动.

表 1.3

	低频电磁波系统	微波系统
物理量	电压、电流、电阻、电容、电感	功率、驻波比、模式、特性阻抗
传输系统	各种形式的双导体系统	真空、大气、金属波导、同轴线、微带传输线、介质波导等
电路形式	分立元件电路、集成电路	微带厚膜集成电路、薄膜集成电路

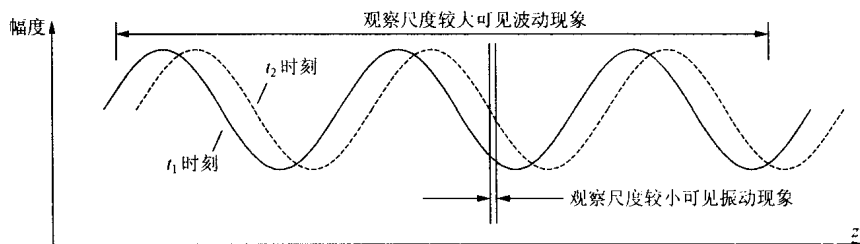


图 1.4 观察尺度与电磁波波长的相对关系决定物理现象的性质

例如,电磁波的频率若为 50 Hz,其波长即为 6000 km;电磁波的频率若为 100 GHz,其波长就只有 3 mm. 如果电路的尺度为几十毫米,则在频率较高时,就必须考虑电磁场的空间分布.

由于微波的特点,微波电路不但采用了与低频电路不同的传输系统,而且在分析微波电路时也必须引入与低频电路不同的物理量.

§ 1.4 微波的应用

微波及微波技术的早期应用和发展是与第二次世界大战对雷达的需求分不开的. 在第二次世界大战中及其战后的相当长时期内,微波产品的主要应用领域是在军事中. 近几十年来,由于国际形势的变化以及微波产品价格的下降,微波

产品在民用领域也得到了广泛的应用.微波的实际应用领域和潜在的应用领域是相当广泛的,这里只能就几个主要方面做些简单介绍.

1.4.1 雷达

雷达是微波技术的传统应用领域.雷达、青霉素和原子弹被称为“二战”期间的三大科学发明.1931年至1935年,英国皇家无线电研究所的科学家首先发明了雷达,当时雷达的作用距离仅为80 km.雷达在第二次世界大战中投入实用,并在许多重要战役中起到了决定性的作用,其中包括著名的不列颠空战和中途岛海战.在不列颠空战中,是雷达引导处于劣势的英国空军顶住了德国空军的进攻.1940年,德国准备实施“海狮”作战计划,为了夺取英吉利海峡的制空权,德国第一次投入了2400架作战飞机,英国第一次投入了700架战斗机迎战.从1940年8月至1941年5月,德国共损失了1500架飞机,英国共损失了915架飞机.其中的主要原因是德国人没有雷达,也不知道雷达的工作原理.由于德国空军没能取得在英吉利海峡的制空权,德国被迫放弃了入侵英国本土的渡海作战.

由于雷达在第二次世界大战中的重要作用,第二次世界大战之后,世界各国都很重视发展雷达技术.现代雷达的种类很多,性能也日益提高,其应用领域也从军事领域向民用领域扩展.在军事领域里,有远程警戒雷达(见图1.5),其作用距离可达 10^4 km以上;有现代相控阵雷达(见图1.6),它利用计算机控制其天线阵列,可以同时探测、跟踪几个甚至几十个目标;还有导弹制导雷达(见图1.7);弹头近爆引信雷达;等等.在民用领域中,有气象雷达(见图1.8)、导航雷达、汽车防撞雷达、警戒防盗雷达、遥感探测雷达、多普勒测速雷达(见图1.9)等.



图 1.5 预警飞机上的远程警戒雷达