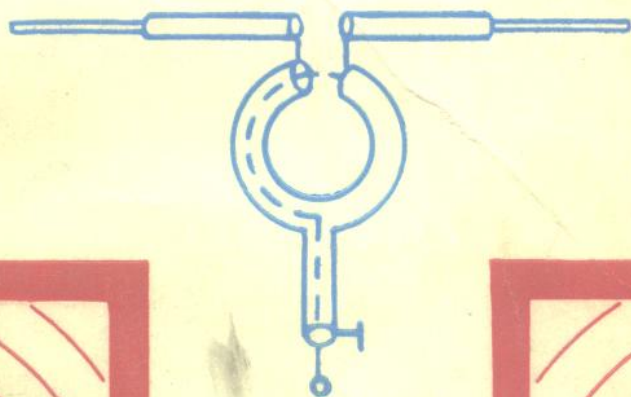




医用微波技术

陈代珠 吴大伟 唐敬贤 编
阳盛宗 刘永清 徐润民

医 用 微 波 技 术

陈代珠 吴大伟 唐敬贤 编
阳盛宗 刘永清 徐润民

國防工業出版社

内 容 简 介

医用微波技术是现代微波电子技术用于医疗卫生领域而正在兴起的一门新技术。

本书结合医疗卫生实际,着重从物理概念上阐述微波技术的基本原理,深入浅出地讨论医用微波技术中的一系列理论与实际问题。内容主要包括:电磁场和电磁波的基本特性;微波的传输和医用微波元件;微波的辐射和医用微波辐射器;微波生物医学效应;微波治癌及其测温技术;微波理疗及其它应用;微波治疗机的工作原理和使用;微波漏能及安全防护。

本书的主要对象是医务工作者,也可供从事卫生防疫、劳动保护和环境保护的工作人员以及大专院校有关专业的师生参考。

2635/65

医 用 微 波 技 术

陈代珠 吴大伟 唐敬贤 编
阳盛宗 刘永清 徐润民

责任编辑 耿新暖

*

国防工业出版社出版

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

*

787×1092 1/32 印张 10 1/8 221千字

1987年11月第一版 1987年11月第一次印刷 印数: 0,001—1,700册

统一书号: 15034·2996 定价: 2.10元

前 言

微波技术是第二次世界大战期间迅速发展起来的一门新兴电子技术,微波作为信息的一种载体已成功地应用于雷达、通信和电视等领域。近年来,随着微波技术的飞跃发展,微波作为一种崭新的能源形式日益崛起,它正在广泛地渗透到国民经济的各个领域,同时又与其它科学技术相结合,不断地孕育和形成着一些新兴的科学技术分支。

虽然,早在本世纪三十年代,国外医务工作者就发现了微波的生物医学效应,随后并将微波用于理疗,但是在医疗卫生中广泛地应用微波技术还是近十多年的事情。目前,微波理疗已基本普及,微波消毒和灭菌已投入使用,微波用于临床诊断也初露头角,特别是利用微波治疗恶性肿瘤不仅效果显著,而且简单易行,逐渐引起了医务工作者和微波技术工作者极大的关注。

另一方面,实践证明,随着大功率微波设备日益广泛的应用,这些设备所漏泄出来的过量微波辐射将污染环境空间,威胁人类的健康。因而从环境保护和卫生防疫的角度,研究微波与人体的相互作用也是意义重大的课题。

研究微波与人体的相互作用,即所谓微波生物医学效应,并将其应用于卫生防疫和临床治疗,就逐渐形成了一门新兴的医用微波技术学科。

七十年代以来,医用微波技术在我国已经有了较大的发展,不仅在微波生物医学效应方面进行了大量的研究,而且

在临床实践中，特别在微波治癌方面作了大量的工作。为了进一步推动我国医用微波技术的临床应用和理论研究，中国电子学会微波专业学会于一九八〇年以来，先后在上海、成都和重庆举办了三期医用微波技术讲习班，受到了广大医疗卫生工作者的普遍欢迎，他们迫切希望早日出版一本系统地讨论医用微波技术的参考书。本书正是为了满足这一要求而编写的。

本书结合医疗卫生的实际，着重从物理概念上阐述微波技术的基本原理，同时根据编者多年的研究成果，深入浅出、通俗易懂地讨论了微波生物学效应和医用微波技术中的一系列有关问题。全书共分十章。第一章介绍电磁场的基本原理和电磁波的基本性质；第二章着重讨论同轴线、波导和几种医用微波元件的特性，并结合临床应用实际分析了阻抗匹配问题；第三章详细讲述了微波的辐射和医用微波辐射器的一般特性，并对国内外一些典型的医用辐射器作了简要的介绍；第四章讨论微波生物学效应，着重分析了微波致热效应；第五章介绍微波治癌方法和临床应用技术；第六章介绍微波场中的测温技术，详细讨论了国内目前在微波治癌中使用的测温方法；第七章简要介绍了微波理疗和微波在医疗卫生中的某些其它应用；第八章讨论微波漏能和漏场的卫生学测定方法；第九章详细介绍了微波治疗机的工作原理、使用和维护；第十章简要讨论了微波辐射对人体的危害、卫生标准和微波治疗中辐射的安全防护方法。

本书第一、二章由唐敬贤同志编写，第三、十章由吴大伟同志编写，第四、五章由陈代珠同志编写，第六、七章由阳盛宗同志编写，第八章由刘永清同志编写，第九章由徐润民同志编写。

本书在编写过程中得到中国电子学会微波专业学会和四川大学有关领导的支持和帮助；中国电子学会天线专业学会副主任委员、成都电讯工程学院谢处方教授和中国医科大学高汝贵副教授、山西肿瘤研究所黄少勇副研究员、河南省肿瘤医院沙永慧主治医师对书稿进行了仔细审阅，并提出了宝贵的意见，编者在此一并致谢。

由于医用微波技术是一门处于蓬勃发展中的新技术，目前国内外均未见有这一领域的专著出版，编者尝试撰写本书，实为抛砖引玉，弥补国内一时之需。编者热忱欢迎广大读者对本书提出批评和建议，以便再版修订时采纳。

编 者

目 录

第一章	电磁场和电磁波	1
§ 1	静电场	1
§ 2	稳恒磁场	10
§ 3	交变电磁场	14
§ 4	均匀媒质中的平面电磁波	19
§ 5	电磁波的反射	28
§ 6	电磁波谱	34
第二章	微波技术基础	37
§ 1	微波的特点	37
§ 2	微波传输线	39
§ 3	微波传输线上波的反射	55
§ 4	微波传输线的阻抗匹配	60
§ 5	几种医用微波元件性能简介	66
第三章	电磁波辐射和医用微波辐射器	72
§ 1	电磁振荡和电磁波	72
§ 2	电偶极子的辐射	75
§ 3	医用微波辐射器	81
第四章	微波生物医学效应	117
§ 1	生物组织的电性参数	120
§ 2	微波致热效应的作用机理	122
§ 3	生物组织的加热特性	123
§ 4	微波在均匀组织中的传播	130
§ 5	微波在平面分层媒质中的传播	135
§ 6	平面波照射球形组织	144

§ 7	微波非热效应	150
第五章	微波治癌技术	157
§ 1	引言	157
§ 2	微波治癌的作用机理	159
§ 3	微波对肿瘤的选择加温	162
§ 4	治癌中对微波频率的选择	164
§ 5	微波治癌中对辐射器的选择	167
§ 6	治癌中的温度监测	168
§ 7	治癌中的加温温度与加温时间	170
§ 8	加温合并放疗或化疗	175
第六章	微波场中的测温技术	178
§ 1	玻璃液体温度计测温技术	179
§ 2	热电偶测温技术	181
§ 3	热敏电阻测温技术	199
§ 4	测温技术的发展方向	202
§ 5	微波治癌中的测温方法	203
第七章	微波理疗及其他应用	206
§ 1	微波理疗技术	206
§ 2	微波在诊断方面的应用	216
§ 3	微波在医疗卫生中的其他应用	222
第八章	生活环境中电磁场的卫生学测定	225
§ 1	漏场和漏能的产生	225
§ 2	射频电磁场的测量	228
§ 3	微波漏能的测量	238
第九章	微波治疗机	249
§ 1	磁控管的工作原理及特性	249
§ 2	微波治疗机的结构与性能	271
§ 3	微波治疗机的使用与维护	277
第十章	微波对人体的影响及安全防护	282

VIII

§ 1	微波辐射对人体健康的影响.....	283
§ 2	微波辐射的卫生标准.....	301
§ 3	微波的安全防护.....	308

第一章 电磁场和电磁波

微波是一种波长很短的电磁波，而电磁波又是由交变电磁场构成的，因此了解电磁场原理和电磁波的基本性质，是讨论微波生物医学效应和医用微波技术的基础。

§1 静 电 场

我们知道，物质由原子组成，原子由原子核和绕核旋转的电子组成，而原子核又包含着中子和质子。电子带负电荷，质子带正电荷，在通常情况下，原子内正负电荷的数量是相等的，所以不呈现出带电的现象。当两个物体互相摩擦时，一个物体失去了一些电子，因而显现出带正电；另一个物体则得到电子，所以带负电。由于这种摩擦而产生的电，其电荷相对于地球是静止的，所以叫做静电。

§1.1 电场强度

实验表明，两种同性的电荷互相排斥，两种异性的电荷互相吸引。这就是说，电荷之间存在着一种相互作用力。库仑通过大量的实验证明，两个点电荷之间的作用力和它们所带电量的乘积成正比，和它们之间的距离的平方成反比，这就是库仑定律，用公式表示则为

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^2} \quad (1-1)$$

式中 q_1, q_2 ——两个电荷所带的电量（库仑），

r —— 电荷之间的距离 (米);

ϵ —— 电荷所在介质的介电常数 (法拉/米), 真空的介电常数为 $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ 法拉/米;

F —— 电荷间的作用力 (牛顿)。

虽然两个电荷彼此受到相等大小的作用力, 但它们受力的方向是不相同的。如果两个电荷同性 (即都为正电荷或都为负电荷), 则受力的方向沿两电荷的连线上向外, 表示排斥力, 如图 1-1(a) 所示。如果两个电荷异性 (即一个为正电荷一个为负电荷), 则受力的方向沿两电荷的连线上向内, 表示吸引力, 如图 1-1(b) 所示。

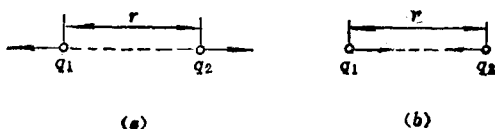


图 1-1

(a) 两个同性电荷之间的作用力;

(b) 两个异性电荷之间的作用力。

众所周知, 一个物体使另一个物体受到力的作用, 总是通过物体间直接接触, 即通过一定的物质来传递。虽然电荷之间相互作用时它们彼此并不接触, 但仍然是通过电荷周围存在的某种物质来传递的。这种物质就是电场。

电场是一种特殊物质。只要有电荷存在, 它的周围就必定有电场存在。而且任何处于电场中的电荷都将受到力的作用。在电场中移动电荷也要做功, 这就是说电场也具有能量。顺便指出, 不仅静止的电荷产生电场, 并且随时间而变化的电荷也将产生电场, 前者叫做静电场, 后者叫做交变电场。

为了区别不同电荷所产生的电场, 以及进一步描述电场

的基本性质，我们引入电场强度这个物理量。

一个单位正电荷在电场中某点所受到的力称为该点的电场强度。因为力是矢量，所以电场强度也是矢量，通常用 E 表示，于是有

$$E = \frac{F}{q} \quad (1-2)$$

式中 q ——正电荷的电量（库仑）；

F ——正电荷 q 在电场中受到的力（牛顿）；

E ——电场强度（伏/米）。

例如，位于均匀介质中的一个电量为 q_1 的点电荷，在离它为 r 的空间某点产生的电场强度，根据库仑定律和式 (1-2) 的定义可求得为

$$E = \frac{q_1}{4\pi\epsilon r^2} r_0 \quad (1-3)$$

式中 r_0 为从点电荷 q_1 到计算电场强度那一点的单位矢量。显然，在以 r 为半径的圆周上，各点的电场强度都相等。若 q_1 为正，电场强度 E 的方向与 r_0 的方向一致，如图 1-2(a) 所示；若 q_1 为负，则 E 的方向与 r_0 相反，如图 1-2(b) 所示。

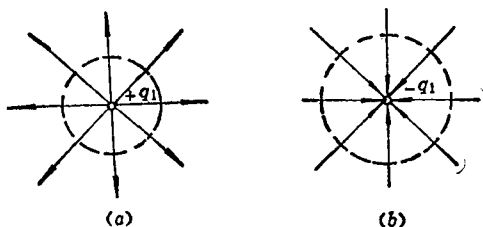


图1-2 点电荷的电场

如果空间有许多带电体，那么某点的电场强度 $\vec{E}$ 则为各带电体分别在该点产生的电场强度 $E_1, E_2, \dots, E_n$ 的矢量

和，即

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_n \quad (1-4)$$

为了形象地描述电场强度在空间的变化情况，可以在电场中作出一系列曲线，使得曲线上每一点的切线方向都和该点的电场强度方向一致，并以曲线的密疏程度来表示电场强度的大、小，这样的曲线叫做电力线。图 1-2 中所表示的实际上就是正负电荷的电力线。两个等值异号和两个等值同号点电荷的电力线分别示于图 1-3 的 (a) 和 (b) 中。

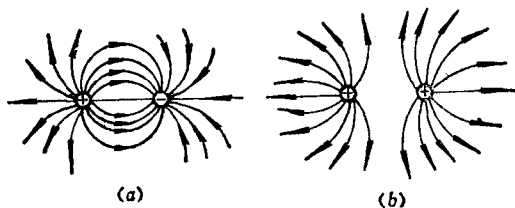


图1-3 两个等值点电荷的电力线

从电场的性质和电力线的定义，我们不难得出以下两点重要结论：

(1) 在静电场中，电力线总是起始于正电荷，终止于负电荷。不过以后将要看到，在交变电场中，电力线也可以是闭合的；

(2) 通过电场中的每一点只能作一根电力线，因而电力线之间是彼此不相交的。

§ 1.2 电 通 量

如上所述，电场强度是描述电场的基本物理量，从式 (1-3) 可知，它和电荷所在的介质有关。此外，还可以引入一个和介质无关的物理量来描述电场，这就是电位移矢量 $\mathbf{D}$ ，

其定义是

$$D = \varepsilon E \quad (1-5)$$

可见，在一般介质里，它的方向与电场强度的方向相同。对于一个点电荷，显然有

$$D = \frac{q}{4\pi r^2} r_0 \quad (1-6)$$

因而它只是电量和位置的函数。

和电力线相象，在电场里也可以作电位移线，同样用它的密、疏来表示电场中电位移矢量的大、小。为此我们在电场中的很小区域内作一个垂直于电位移线的小面元 Δs_0 ，并通过它作 ΔN 条电位移线以使单位面积内所通过的电位移线数等于该处电位移矢量的大小，亦即有

$$\frac{\Delta N}{\Delta s_0} = D \quad (1-7)$$

于是我们把穿过某个面积 S 的电位移线的总数叫做通过这个面的电通量，并用 N 表示。 ΔN 则是穿过小面元 Δs_0 的元通量。因而电位移 D 就是电通量密度。

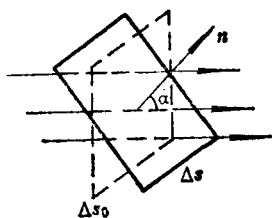


图1-4 电通量

如果小面元 Δs 的法线方向 $\vec{n}$ 与电位移线的方向成 α 的夹角，如图 1-4 所示，则有 $\Delta s_0 = \Delta s \cos \alpha$ ，因而元通量

$$\Delta N = D \Delta s \cos \alpha = D_n \Delta s \quad (1-8)$$

其中 D_n 是 D 在法线 n 上的投影。当面元 Δs 趋于无限小时，式 (1-8) 变为 $dN = D_n ds$ ，因而穿过面积 S 的电通量则等于 dN 在 S 上的积分，即有

$$N = \int_S D_n ds \quad (1-9)$$

我们不难求得一个点电荷 q 产生的电通量。由式 (1-6) 可知, 点电荷的电通量密度矢量具有球对称性, 而且沿半径方向。因此以 q 为中心作一个有任意半径的球面, 则其电通量为

$$N = \frac{q}{4\pi r^2} 4\pi r^2 = q \quad (1-10)$$

可以证明, 对于包围电荷 q 的任何面都将得到式 (1-10) 的结果。这表明, 通过某闭合面的电通量就等于它所包含的电荷量, 这就是高斯定理。用公式表示则为

$$\oint_s D_n ds = q \quad (1-11)$$

式中 $\oint_s$ 表示对闭合面 S 的积分。显然, 对于一个不包含电荷的闭合面, 其电通量为零。也就是说, 进入该闭合面的电位移线数等于穿出它的电位移数。

§ 1.3 电位和电位差

由于电荷在电场中要受到力的作用, 因此把一个电荷移到电场中就要做功。于是我们把单位正电荷从无穷远移到电场中某一点 A , 外力 F 所做的功叫做电场在该点的电位。由于这里的外力 F 是与电场力大小相等、方向相反的, 而单位正电荷所受的电场力又是等于电场强度 E 的, 所以电场中某点 A 的电位 v 为

$$v = - \int_{\infty}^A E dl \cos \alpha \quad (1-12)$$

式中 α 为移动单位正电荷所走路径 dl 的方向与该点电场强度矢量 E 之间的夹角。显然, 电位表示了电场中某点位能的大小。由于在无穷远处电荷不受电场力的作用, 因而其电位为零。电场中不同的点一般有不同的电位, 而那些电位相同

的点所构成的面叫做等位面。电场中任意两点之间的电位差则叫做该两点之间的电压。设 A 点的电位为 v_A , B 点的电位为 v_B , 且 $v_A < v_B$, 则 AB 两点间的电压为

$$v_{AB} = v_B - v_A = - \int_A^B E dl \cos \alpha \quad (1-13)$$

电压的单位是伏特。假设 1 库仑电量的电荷从电场中一点移到另一点所做的功为 1 焦耳, 则这两点之间的电压就等于 1 伏特。

当 AB 两点相距极近时, 则其电位差为

$$v_B - v_A = dv = -E dl \cos \alpha$$

若用 E_l 表示电场强度 $\vec{E}$ 在 dl 方向的分量, 即有

$$E_l = E \cos \alpha$$

则由上式可得

$$E_l = - \frac{dv}{dl} \quad (1-14)$$

这表明, 电场强度在某一方向的分量等于电位在该方向的减小率, 或者说等于电位在该方向的负梯度。

§ 1.4 静电场中的导体和导体的电容

众所周知, 金属导体中具有带负电的自由电子和电量与之相等的带正电的结晶点阵 (格子)。在外电场 $\vec{E}$ 的作用下, 导体中的自由电子就要相对于结晶点阵作定向运动, 从而产生一个与外电场方向相反的电场 $\vec{E}'$ 。当它的大小等于外电场 E 时, 导体中自由电子的移动就停止了。这就是导体在外电场中的静电平衡。

显然静电平衡时, 导体内部任何一点的电场均为零, 电荷都分布在导体的表面上。而且又无电荷移动, 所以外电场

在导体表面的切向分量 E_t 必定为零。这就是说外电场终止在导体表面上并且处处垂直于导体表面。由式 (1-14) 可知, 在这种情况下, 导体表面任何两点之间不存在电位差, 因而导体表面是一个等位面。

利用导体在静电平衡时其内部电场为零的特性, 可以将物体放在金属壳体中, 以免其受外界静电场的影响, 这就是所谓静电屏蔽。应该指出, 若被屏蔽的物体是带电的, 则应将金属壳体接地才能达到静电屏蔽的目的。

为了求得导体的表面电荷与电场强度的关系, 我们在导体与介质的边界上作一个无限小的立方体, 如图



图1-5 导体表面的电场

1-5 所示, 并对此应用高斯定理。由于导体内电场为零, 因而通过导体内部一侧底面的电通量为零。同时又因为与导体表面相切的电场分量也为零, 所以通过立方体各侧面的电通量也等于零。于是通过小立方体的总电通量就等于通过介质一侧底面 Δs 的电通量 $D_n \Delta s$ 。根据高斯定理, 它应该等于小立方体所包围的电荷 q , 即有

$$D_n \Delta s = \epsilon E_n \Delta s = q = \rho_s \Delta s$$

或

$$D_n = \epsilon E_n = \rho_s \quad (1-15)$$

式中 E_n ——电场强度垂直于导体表面的分量;

ρ_s ——电荷的面密度 (库仑/米²)。

由式 (1-15) 可知, 对于一个导体, 当它上面的电荷增加若干倍时, 相应的电场强度也增加了若干倍, 因而由无穷远将单位正电荷移至导体所做的功即电位也增加同样多倍。