



创建世界高水平大学项目资助教材

沙湘月 伍瑞新 编

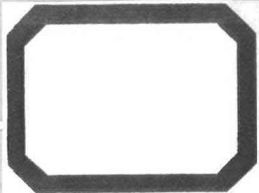
电磁场理论与 微波技术

Theory of Electromagnetic
Fields and Microwave
Techniques

南京大学出版社



创建世界高水平大学项目资助教材



沙湘月 伍瑞新 编

电磁场理论与微波技术

Theory of Electromagnetic
Fields and Microwave
Techniques

南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电磁场理论与微波技术 / 沙湘月, 伍瑞新编. —南京:
南京大学出版社, 2004. 2

ISBN 7-305-04169-6

I. 电... II. ①沙... ②伍... III. ①电磁场—理论
②微波技术 IV. ①O441.4②TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 090012 号

书 名 电磁场理论与微波技术
编 者 沙湘月 伍瑞新
出版发行 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮编 210093
电 话 025-3596923 025-3592317 传真 025-3303347
网 址 <http://press.nju.edu.cn>
电子邮件 nupress1@public1.ptt.js.cn
经 销 全国各地新华书店
印 刷 南京曼迪印刷有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 17.25 字数 300 千
版 次 2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月第 1 次印刷
印 数 1-3000
ISBN 7-305-04169-6/O·293
定 价 31.00 元

* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购
图书销售部门联系调换

前 言

在新的世纪中,电子科学与技术的发展对我国的国民经济建设和国家的安全将显得越来越重要,因而,培养大批既有坚实理论基础又有较强实践能力的高素质人才是当务之急.《电磁场理论与微波技术》正是在这种形势之下开出的适合于理工科大学有关专业的课程,为此,本教材力求做到:既要加强理论基础,又要着重于应用,特别是新技术的应用.

在教材内容上,大致分为三部分:基础理论部分、应用部分和新技术应用部分.通过这三方面的训练,使学生不仅具备扎实的数理基础,而且获得相当的应用方面的知识,从而有可能在未来新兴的科学技术领域内,从事开拓性的工作.

1. 基础理论部分:电磁场理论主要包含在第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 10 章和第 9 章的前几节内,它对 Maxwell 方程组到 Einstein 狭义相对论进行了全面的论述,并对加速运动的点电荷的辐射到时变电荷、电流的推迟势进行了理论分析;而对微波技术有直接应用价值的微波传输线理论,则在第 4 章内进行了论述.通过这些基础理论的学习,可以达到对学生进行比较严格的物理和数学训练的目的.

2. 应用部分:主要包含在第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章和第 9 章,在讲述微波的产生、传输、和辐射的基本内容上,增加了广泛用于航天技术的微带线的篇幅;减少了与矩形波导和矩形谐振腔的处理方法类似的圆波导和圆柱腔的份量;在应用广泛的光纤中,详细地讨论了圆柱边界的数学处理方法;在介绍微波电子管的同时,也介绍微波半导体二极管振荡器;适当分析了一些常用的天线.

3. 新技术应用部分:介绍了用于毫米波的叠片波导(Laminated Waveguide)、工作在多个频段的分形天线(Fractal - Shaped Antennas)、微波近场显

微镜以及微带天线的近场应用等等,这些内容穿插在有关章节中.为了解决电磁场的某些工程应用,往往需要用数值计算方法,在第 11 章中介绍了有限差分法、有限元方法等常用的一些数值计算方法.

本教材中的第 1 章到第 10 章由沙湘月执笔;绪论中的“电磁波吸收材料”部分、第 3.2 节最后“负折射率材料”部分以及第 11 章由伍瑞新完成.

本教材由南京大学吴培亨教授和兰州大学许福永教授审稿,他们提出了许多宝贵的意见,使作者受益匪浅,特此表示衷心感谢.南京大学唐汉副教授和钱鉴教授也提出了不少有益的建议,责任编辑孟庆生同志在成书的过程中给予了热情的帮助,在此一并表示感谢.

鉴于作者水平有限,难免有不妥和疏漏之处,敬请读者批评指正.

编 者

2003 年 11 月于南京大学

目 录

绪 论	1
第 1 章 电磁场理论的数学准备	
1.1 矢量代数	10
1.2 标量场的梯度	11
1.3 矢量场的散度和散度定理	11
1.4 矢量场的旋度和斯托克斯定理	13
1.5 正交曲线坐标系	15
习 题	17
第 2 章 时变电磁场	
2.1 法拉第电磁感应定律	18
2.2 位移电流	19
2.3 麦克斯韦方程组	22
2.4 洛伦兹力	24
2.5 电磁场的边值关系	24
2.6 坡印亭定理与电磁场能量守恒	27
2.7 电磁场的动量	28
习 题	32
第 3 章 电磁波的传播	
3.1 电磁波在介质中的传播	33

3.2	电磁波在介质分界面上的反射和折射	36
3.3	波包、相速和群速	44
3.4	有导体存在时电磁波的传播	46
3.5	电磁波在等离子体中的传播	49
	习 题	52

第4章 微波传输线理论

4.1	传输线方程的解及传输线的特性参数	53
4.2	反射系数、驻波比和输入阻抗	60
4.3	无耗线工作状态分析	64
4.4	有耗线的特性与计算	70
4.5	史密斯圆图	74
4.6	阻抗匹配	80
	习 题	85

第5章 规则金属波导

5.1	矩形波导	87
5.2	其他截面的波导	100
5.3	同轴线	105
5.4	波导的激励方法	112
	习 题	114

第6章 微带线

6.1	微带线的制造工艺	116
6.2	微带线的工作波型和准静态分析法	117
6.3	微带线的特性阻抗和有效介电常数	119
6.4	微带线的衰减	121
6.5	微带线的色散特性	126
6.6	其他形式的几种微带线	130
	习 题	131

第7章 光纤

7.1	光纤的传输特性	132
7.2	光纤器件简介	139

7.3 光纤通信的优越性及其应用	141
第8章 谐振腔与微波振荡器	
8.1 谐振腔的基本性质	143
8.2 金属波导矩形谐振腔	146
8.3 圆柱谐振腔和同轴谐振腔	150
8.4 微带谐振腔	153
8.5 反射速调管振荡器	154
8.6 磁控管振荡器	159
8.7 微波固态源	169
习 题	171
第9章 电磁波的辐射和天线	
9.1 电磁场的矢量势和标量势	172
9.2 推迟势	175
9.3 电偶极子的辐射	179
9.4 天线参数及互易定理	183
9.5 振子天线的辐射	185
9.6 天线阵	189
9.7 八木天线与电视发射天线	195
9.8 喇叭天线、抛物面天线和卡塞格伦天线	198
9.9 微带天线	201
9.10 分形天线	202
9.11 微波近场显微镜简介	204
9.12 微带天线的近场应用	206
习 题	207
第10章 狭义相对论	
10.1 电磁场理论的困惑	209
10.2 爱因斯坦的基本假设与洛仑兹变换	211
10.3 因果律与相互作用的最大传播速度	215
10.4 相对论理论的四维形式	216
10.5 电磁场理论的相对论协变性	225
10.6 电场与磁场的深刻的内在联系	228

10.7 相对论质点动力学·····	230
习 题·····	233

第 11 章 电磁场数值计算方法基础

11.1 有限差分法·····	235
11.2 有限元方法·····	239
11.3 边界元法·····	245
11.4 矩量法·····	248
11.5 电磁场数值计算中的其他方法·····	250

附 录

I 矢量运算的常用公式·····	251
II 张量运算公式·····	254
III δ -函数用解析函数的极限来表示·····	254
IV 常数表·····	255
V 常用导体材料的特性·····	256
VI 常用介质材料的特性·····	256
VII 常用同轴射频电缆特性参数表·····	257
VIII 标准矩形波导主要参数表·····	258
IX 柱函数·····	259
X 静电问题中的镜像法·····	263
XI 能流密度的时间平均值的计算·····	264
参考文献·····	266

绪 论

1. 电磁场理论和电路理论

无线电中的电磁理论体系可分为两大类:电磁场理论和电路理论.电磁场是指在无限大空间中或在一定区域范围内所发生的电磁过程,这时要研究的是电场 E 和磁场 H 随空间位置 x, y, z 和时间 t 的变化,对电磁场问题通常是用电磁场理论即通过麦克斯韦场方程组结合边界条件来求解;对于较复杂的边界值问题,可借助于计算机用数值计算方法来解决.电路通常由电感、电容和电阻等集总参数的无源电路元件以及电源构成,要研究的是电路各节点电压、各支路电流与时间的关系,对电路问题的分析通常用克希霍夫定律为基础的电路理论来求解.

电磁场理论和电路理论两者是不同的,但又是相辅相成的.电磁场理论是微波理论和技术的基础,它是分析微波问题的主要工具.但是应该指出,电路理论的许多概念和方法在微波技术中仍具有十分重要的意义.例如,在微波中所应用的等效电压、等效电流和阻抗等参数就是电路中相应参数的推广;对有些微波问题,可以用等效电路概念把场的问题转化为电路的问题,因为用电路理论进行求解比较方便,微波网络也就是低频网络在微波条件下的推广.相反,在低频技术中,不但电感、电容的计算需要电磁场理论,而且其信号的辐射和在空间的传播、相邻电路间的耦合等问题也必须应用电磁场理论来解决.因此,不应当把电磁场理论和电路理论割裂开来,片面地认为在微波中只需要电磁场理论而在低频中只需要电路理论.正确的方法是全面地掌握电磁场理论和电路理论,根据实际问题的需要而选用,或将场和路的概念和方法结合起来进行处理.

上述的电磁场理论并没有考虑到物体的运动速度,如果物体处于高速

运动状态,也就是说当物体的运动速度可与光速相比拟时(这在现代科学中早已实现),这时,相对论效应将出现,空间和时间的联系、电荷与电流的联系、波矢量和频率的联系、电场和磁场的联系,质量与能量的联系就显现出来,产生了惊人的实际效果.

2. 电磁波的频谱

表 1 电磁波的频谱

波长	名称	传输媒质	应用	频率
1 μm	紫外光	800 nm 光纤 激光束 2.55 μm	电话 数据 电视	10^{15} Hz
	可见光			10^{14} Hz
	红外线			
1 cm	毫米波	波导	导航 卫星-卫星 微波中继 地球-卫星 雷达	100 GHz
10 cm	超高频(SHF)			10 GHz
1 m	特高频(UHF)	同轴线	UHF电视 移动, 航空 VHF电视和调频 移动无线通讯	1 GHz
10 m	甚高频(VHF)			100 MHz
100 m	高频(HF)			10 MHz
1 km	中频(MF)	双线圈	商用 业余无线通讯 国际民用 广播	1 MHz
10 km	低频(LF)			100 kHz
100 km	甚低频(VLF)			10 kHz
	音频(AF)		航空 海底电缆 航海 越洋无线电话	1 kHz

非匀速运动的电荷将激发时变电磁场,而离开激发源的自由电磁场在空间以电磁波的形式传播,复杂波形的电磁波总可用傅里叶级数(或积分)展开成简谐电磁波的叠加.因而可将电磁波按其频率的高低来分类,如表 1.

微波是电磁波频谱中无线电波的一个分支,它是频率很高的无线电波段.在微波雷达工程中,通常用字母来表示微波中的不同波段,如表 2.

表 2 微波常用波段代号

波段代号	标称波长(cm)	波长范围(cm)	频率范围(GHz)
L	22	15~30	1.0~2.0
S	10	7.5~15	2.0~4.0
C	5	3.75~7.5	4.0~8.0
X	3	2.4~3.75	8.0~12.5
Ku	2	1.67~2.4	12.5~18.0
K	1.25	1.1~1.67	18.0~27.0
Ka	0.8	0.75~1.1	27.0~40.0

注:1MHz=10⁶Hz,1GHz=10⁹Hz,1THz=10¹²Hz.

3. 微波的特性及其应用

工作频率愈来愈高是近代电子技术的一个重要发展方向,从中波、短波到微波,直至激光,而微波又正向毫米波、亚毫米波波段推进.

微波的频率很高,这使得它在应用方面能适合于宽频带技术的需要.因为无线电设备的相对带宽 $\Delta f / f_0$ 的增大受到技术的限制,而载波频率 f_0 的提高就可使设备的绝对频宽 Δf 增大,从而在微波设备上就容易实现信息容量大的宽带信号(如卫星-卫星、微波中继通信等传输的多路电话、电视等)的传送和辐射,这是一方面;另一方面,在低频情况下,通常采用的集中参数元件、双线传输线和 LC 谐振回路等都将不能适用于微波.在微波情况下,将采用波导传输线、谐振腔等和由它们构成的分布参数电路元件.

微波的振荡周期很短(10^{-9} s~ 10^{-13} s),可与电子器件中电子的渡越时间(10^{-11} s)相比拟,这时在电子由阴极发出到达板极之前就将返回栅极和阴极,从而使栅极信号失去控制作用,以致器件不能正常工作.因此,产生微波振荡与放大的电子器件将必须采用与低频电子器件完全不同的工作原理,从而产生了速调管、磁控管、行波管、返波管、大功率多腔速调管以及微波固态器件等.特别是微波集成电路的迅速发展,使电子工业发生了根本变

革,大大缩小了微波系统和设备的体积,提高了系统和设备的可靠性,降低了设备成本,具有广泛的发展前景.下面介绍的是微波特性及其应用.

(1) 雷达与导航

微波的波长短,比一般物体的尺寸小或可与之相比拟.微波具有与光波相似的特性,它是直线传播的,因此特别适合于无线电定位.雷达就是在第二次世界大战中发展起来,并促使微波技术迅猛发展.雷达为了正确测定目标位置就必须发射窄波束,而天线的波束宽度正比于工作波长和天线口径之比值(λ/D),这比值越小,发射波束就越细,测位精度就越高;雷达为了发现目标就要求有强的目标反射回波,回波的强度也将取决于工作波长与目标尺寸之比,这比值越小,反射回波就越强,探测距离就越远,因而只有采用微波才能满足雷达技术的要求.

雷达根据发射脉冲与接收到的回波脉冲间的时间间隔 Δt 来确定目标的距离:

$$s = \frac{c\Delta t}{2},$$

式中 c 为光速.根据收到回波时雷达天线波束所指向的方位来确定目标的方位角和仰角.如果需要测定目标的速度 v ,则可以从收到的回波多普勒频移 Δf_D 来确定.

为能探测外层空间的目标(如导弹、卫星、宇宙飞船等),必须利用微波能穿透地球高空电离层的特性.

近代雷达技术正向着远距离、高精度、高分辨率、多功能、小型化和开拓新波段等方向发展.为了扩大探测距离,一方面要提高微波管的发射功率和天线的增益,另一方面也是更经济的方法要提高接收机的灵敏度,采用低噪声接收技术和新的接收方法.

导航就是正确地引导目标安全航行,利用导航设备可确定目标位置、航向和航速等,并可显示目标周围的情况.例如,机场的空中交通管制雷达,可显示附近空域中的飞行情况及地面跑道上的车辆、行人等情况,从而能在较恶劣的条件下,全天候指挥飞机安全起飞和着落;舰船上的导航雷达可显示周围海域的情况.可使领航员即使在雾天或夜间也能引导舰船航行或入港,并能在舰船和礁石或其他船只过分靠近时自动报警.

(2) 微波通讯及光纤通讯

微波的频带很宽,它比所有低频无线电波频带的总和还要宽 10000 倍,

因此它的信息容量大,微波设备可用于多路通讯.由于微波频率高,它不受外界工业干扰和天电干扰的影响,又不受季节、昼夜变化的影响,因而性能稳定,通讯质量高;由于微波波长短,可以用合理尺寸制作出高增益、强方向性的天线,这就提供了小功率发射机实现稳定通讯的可能性;由于微波频率很高,它能穿透高空的电离层,利用这一特点可以进行卫星通讯和宇航通讯.当然,就不能利用电离层的反射来实现远距离通讯,只能借助于微波中继通讯或卫星通讯来实现远距离通讯.只要利用太平洋、大西洋和印度洋上空三个同步卫星就能进行全球通讯.

从微波通讯发展到光纤通讯,在相同的传输截面内,使信息传输容量又提高了 10^7 到 10^9 倍,这充分显示了光纤通讯的优越性.

(3) 广播电视

微波在广播电视中的应用,一方面可利用微波中继或卫星通讯进行两地之间电视或广播信号的传送,例如从直播现场向发射台传送等等.

(4) 微波遥感和微波全息照相

因为各种物质都会不同程度地辐射微波,因此,在人造卫星上利用微波遥感技术通过接收和处理目标的微波辐射信号可确定目标的特性,如可测定大气、海洋、土壤的成份和温度的分布等.由于微波的传播不受昼夜和天气的限制,故它优于红外和可见光遥感.

微波全息照相是利用微波能够穿透不透光的非金属介质的特性对物体进行照相的技术,保安人员可利用微波全息照相发现隐藏的手枪,利用从卫星上对地球作全天候微波全息照相,可及时掌握火山及冰川的活动情况、农作物的生长和病虫害情况.美国阿波罗宇宙飞船还拍摄了月球表面浮土下的地层情况,金星探测器拍摄了由不透光大气包围着的金星表面照片.

(5) 微波加热

微波加热是利用含水介质在微波场中由于高频极化产生的热损耗而使介质加热的.由于微波能透入介质内部,且介质含水越多其损耗越大,所以微波加热具有速度快、加热均匀和具有选择性加热等优点,且也容易实现自动控制.

为了防止对雷达和通讯等产生干扰,微波加热应使用规定的波段,我国和世界大多数国家规定的工业、科学与医疗专用频率为:915 MHz, 2450 MHz, 5800 MHz和 22125 MHz.目前我国主要用 915 MHz 和 2450 MHz.

微波加热已用于纸张、木材、皮革、粮食、食品和茶叶等的加热干燥和食品、血浆和冷藏器官的解冻以及家庭中利用微波炉来烹煮食物。

(6) 微波医疗

微波能够深入物质内部与物质产生相互作用,含水物质对微波具有较强的吸收作用.用微波照射人体患病组织,可利用其热效应、非热效应和微波组织凝固效应,从而可以治疗以下疾病:纤维织炎、急性冠周炎、前列腺炎、前列腺增生症、关节炎、神经痛、风湿症、肠梗阻和疝疝等;利用微波来照射癌肿,由于癌肿是非正常组织,其升温较正常组织要高 $5^{\circ}\text{C}\sim 7^{\circ}\text{C}$,调节微波功率以控制适当温度,可杀死癌细胞而不破坏正常组织,当然也需要控制适当的照射时间,就可以达到热疗治癌的目的。

(7) 微波灭菌

利用微波照射可杀灭粮食、食品、药品和木材中的细菌和蛀虫,可杀死蚊子、苍蝇的卵、蛹等,这种方法具有无污染的优点。

(8) 微波电子直线加速器

利用功率管来激发加速器的加速腔体,可把微波能量转换为电子的动能,从而把电子加速到极高的能量.例如目前在世界上,能量最高的电子直线加速器是美国斯坦福电子直线加速器中心的 3 km 长、 250 GeV ($G=1\text{ kM}$)的直线加速器,它用了245个微波大功率多腔速调管,每个管子输出 25 MW 微波脉冲功率。

(9) 射电天文学

由于微波频率很高,它能穿透高空的电离层.这为天文观察增加了一个窗口,使射电天文学的研究成为可能。

如采用大功率发射机、大口径天线、低噪声接收器件和信号累积技术等,就能收到从水星、火星和太阳反射的雷达回波.另外,也可直接接收来自天体的微波辐射,从而可以发现新天体,研究天体的结构和星际物质的组成,进而可研究生命的起源。

(10) 无线电气象学

雨、雪、云、雾和冰雹等会反射微波,所以利用气象雷达可以观测周围区域的天气情况.确定空域中与气象有关的各种物理参数。

(11) 核磁共振

核磁共振(简称 NMR)是指具有自旋的原子核(例如质子 ^1H)在外加恒定磁场 H 的作用下产生能级分裂,能级分裂的能量差为

$$\Delta \mathcal{E} = \gamma \frac{h}{2\pi} H,$$

式中 γ 为旋磁比, h 为 Planck 常数. 当外面加入频率为 ω 的高频或微波电磁场时, 如果满足电磁场的能量与 $\Delta \mathcal{E}$ 相等时, 即

$$\frac{h}{2\pi} \omega = \Delta \mathcal{E} = \gamma \frac{h}{2\pi} H$$

时, 就产生共振吸收, 也就是说, 当

$$\omega = \gamma H$$

时, 就产生核磁共振. 在核磁共振技术中, 常采用固定电磁波的频率, 而用扫描磁场来满足共振条件, 产生共振吸收峰.

当人体组织产生病变时, 产生共振吸收峰的磁场数值就有所改变, 也就是峰位就不同, 根据所得图谱可以鉴定各种有机化合物(或人体组织病变), 再根据每个共振峰下的面积, 可以了解各种化学基团的相对数量等等.

核磁共振具有高分辨率的共振谱, 在分析有机物质的化学结构及临床医学中都有广泛的应用.

(12) 电磁波吸收材料

所谓电磁波吸收材料是指具有吸收入射电磁波能量的各种材料. 它可用于军事方面的隐身技术以及改善对特殊要求环境的电磁污染. 从材料性质上讲有介电材料和磁性材料两类. 它们分别利用材料的电损耗和磁损耗将入射电磁波的能量转换为热能或其他形式的能量. 通常电磁波吸收材料的折射率的虚部有一个较大数值, 它标志了材料对电磁波的损耗程度. 从机理上讲, 材料对电磁波的吸收机制主要是吸收材料中的电偶极子和磁偶极子跟随外场的变化而运动, 从而引起电磁能量的损耗或将部分电磁能量存储在材料内部. 为了实现对入射电磁波的有效吸收, 一方面我们需要让电磁波的能量能够尽可能多的进入到吸收材料中, 另一方面需要材料能够将尽可能多的电磁能量转换成其他形式的能量. 要实现上述目的需要对材料和材料的结构进行设计和优化.

电磁波吸收材料在形式上有多种类型, 常见的有 Salisbury 屏, Dallenbach 涂层, 渐变介质吸收体和电路模拟吸收体等等. 在实际使用中也可以

将上述类型的材料混合使用以达到最佳的使用效果。衡量电磁波吸收材料的主要指标有：材料的吸收率（或反射率），频带宽度，以及材料的重量和厚度。理想的吸收材料应具有吸收强、频带宽、重量轻和厚度薄的特点。然而现有的材料还难以达到上述要求，而且有些要求还是相互矛盾的。例如，增加吸收材料的厚度可以在某种程度上提高材料的吸收率，但它却增加了材料的重量，同时较大的厚度可能限制材料的使用范围。因此，究竟采用何种类型的吸收材料，确定何种指标应按实际使用情况而定。

4. 微波辐射的防护

在微波广泛应用的同时，应该注意对微波辐射的防护。因为任何一个辐射源向空间辐射电磁波，除接收对象外，必然对其他区域造成干扰或污染。微波辐射对人体有害，其影响的效果随波长的增加而减小，而这种伤害主要是由于微波对人体的热效应和非热生物效应所引起的。微波的热效应是指微波加热引起人体组织升温而产生的生理损伤，其中以眼睛和睾丸部位最为敏感：人眼组织富含水分，而血液流通量少，所以，易吸收微波辐射导致温度升高。若辐照强度超过 80 mW/cm^2 时，就会伤害人眼晶状体。当其强度达到 100 mW/cm^2 时，可以导致“微波白内障”。然而，职业性的低强度微波慢性作用可加速晶状体衰老，还可能引起视网膜改变。很多微波作业人员，还有眼疲劳或眼痛等症状；睾丸由于血液循环不良，它对电磁辐射也十分敏感。较高强度的微波辐照时，可能抑止精子的生长，从而影响生育。微波的非热生物效应是指除热效应外对人体的其他生理损伤，主要是对神经和心血管系统的影响，对于微波的非热生物效应的影响和机理至今还在继续研究。为了确保人体安全，对大功率微波设备的操作人员应采用适当的防护措施，如用铜丝或铝丝等细的金属丝与柞蚕丝混合织成的防护服、围裙等可降低辐射功率密度 20 dB 以上。还有防护眼镜、防护头盔和面罩能有效地保护眼睛或整个头部。

5. 电磁辐射人体的安全阈值

在 20 世纪 50 年代，以美国为代表的西方科学界，只承认微波辐射对人体有热效应，他们所制定的卫生标准，完全是以致热作用和热交换条件为依据。然而，以前苏联为代表的东欧科学界，最早意识到微波辐射对人体的影响除单纯加热作用以外，还有微波辐射的非热效应，并根据非热效应制定了