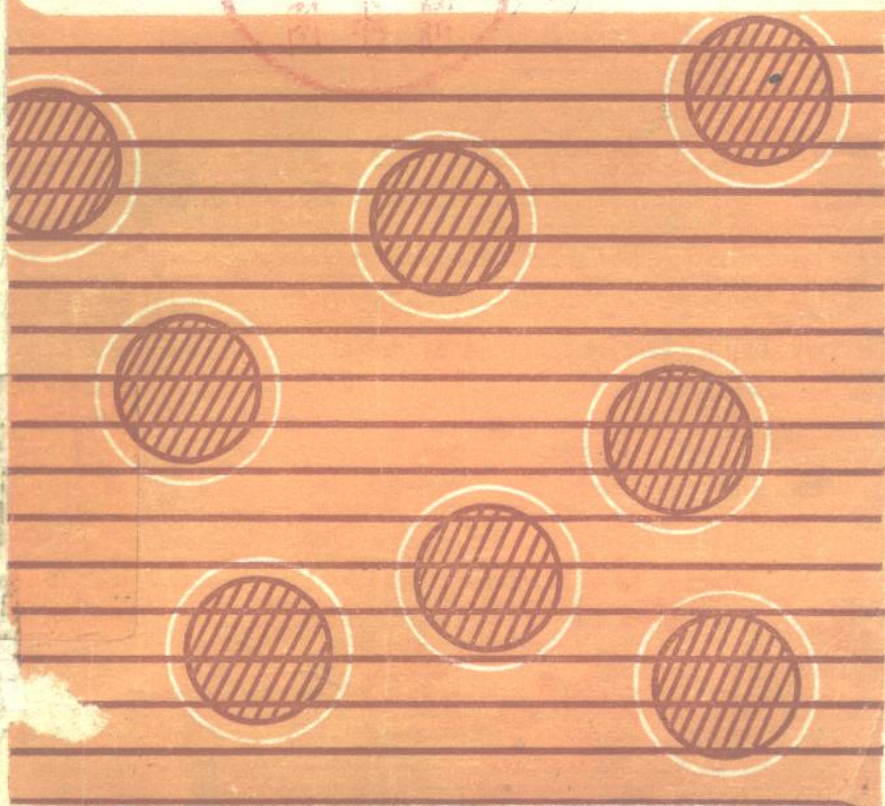


# 微波高频对健康的影响 与生物学效应



姜 槐 叶国钦 主编



人 民 卫 生 出 版 社

# 微波、高频对健康的影响 与生物学效应

主 编

姜 槐 叶国钦

编 者

姜 槐 叶国钦 张召南

孙德鑫 吴本宁 顾菊康

人 民 卫 生 出 版 社

责任编辑 范君媛

**微波、高频对健康的影响与生物学效应**

姜 槐 叶国钦 主编

人民卫生出版社出版  
(北京市崇文区天坛西里10号)

兰州新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米32开本 8 $\frac{1}{2}$ 印张 221千字

1985年6月第1版 1985年6月第1版第1次印刷

印数：00,001—5,000册

统一书号：14048·4889 定价：2.45元

〔科技新书目87—69〕

# 前 言

为了实现四个现代化，先进的电子技术在我国工农业生产、科学技术和国防建设方面的应用日益广泛。因此，微波、高频对人体的危害和对生活环境的影响，目前就成为卫生学方面一个新的问题。六十年代以来，我国对微波、高频的劳动卫生状况进行了一些调查研究，对无线电波的生物学作用也进行了一些实验研究。然而，这些工作远远满足不了生产的需要，与世界上先进水平相比，也尚有待于进一步提高和深入。为了普及无线电波这方面的知识，适应四个现代化的需要，满足广大读者，尤其是从事这一领域的技术、医务、教学、科研工作者的需要，我们编写了这本书。

本书在编写中，为了吸取国内外的先进经验，除了尽量收集国内研究报道的资料外，在生物学作用方面主要汇集了国外近年来的研究成果以及国际专业会议的论文报告，同时还将国外专家同我们进行交流的某些研究材料也补充了进去，以反映当前国际上的研究水平和动态。限于我们的学识水平，本书一定存在许多缺点，望同志们予以批评指正。

浙江医科大学汪行华、上海市卫生防疫站周美卿、上海市机电一局陈同钧诸同志应邀参加了部分内容的编写，浙江医科大学邵斌杰同志参加了第五章生物学效应的审校工作，在此一并致谢。

**编著者**

1984年7月

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 前言                     |    |
| 概论                     | 1  |
| 第一章 射频电磁场的概述           | 6  |
| 第一节 物理概念和术语            | 6  |
| 一、射频电磁场的物理概念           | 6  |
| 二、射频电磁场的有关术语           | 8  |
| 第二节 辐射源                | 16 |
| 一、振荡源                  | 16 |
| 二、天线                   | 20 |
| 三、传输线                  | 25 |
| 第三节 射频电磁场辐射强度测定        | 29 |
| 一、高频电磁场强度测定            | 29 |
| 二、微波辐射强度测定             | 33 |
| 第二章 射频电磁场的应用和工作场所的场强分布 | 42 |
| 第一节 高频电磁场的应用和工作场所的场强分布 | 42 |
| 一、高频电磁场的应用             | 42 |
| 二、高频电磁场的场强分布           | 45 |
| 第二节 微波技术的应用和工作场所的电磁场分布 | 47 |
| 一、微波技术的应用              | 47 |
| 二、生产场所微波电磁场的分布         | 52 |
| 第三章 射频电磁场对人体健康的影响      | 56 |
| 第一节 急性射频辐射的损害          | 56 |
| 第二节 高频与超高频电磁场的影响       | 58 |
| 第三节 微波辐射的影响            | 63 |
| 一、对神经和内分泌系统的影响         | 70 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 二、对心血管系统的影响·····                   | 73  |
| 三、对眼的影响·····                       | 80  |
| 第四节 无线电波作用的临床分期和可复性问题·····         | 84  |
| 一、临床分期·····                        | 84  |
| 二、可复性问题·····                       | 85  |
| 第五节 无线电波对机体影响的有关因素及联合作用<br>问题····· | 87  |
| 一、辐射条件的影响·····                     | 87  |
| 二、联合作用·····                        | 92  |
| <b>第四章 射频电磁场与生物组织的初级作用</b> ·····   | 97  |
| 第一节 生物组织的介质特性·····                 | 98  |
| 第二节 平板形组织模型·····                   | 103 |
| 第三节 球形组织模型·····                    | 110 |
| 第四节 椭圆形组织模型·····                   | 113 |
| 第五节 实际的组织模型·····                   | 116 |
| <b>第五章 射频电磁场的生物学效应</b> ·····       | 119 |
| 第一节 微波辐射的热作用·····                  | 119 |
| 一、微波能量吸收和热作用·····                  | 120 |
| 二、动物体重和种类的因素·····                  | 124 |
| 三、生物体内热梯度·····                     | 126 |
| 四、重复辐射和微波热效应·····                  | 127 |
| 五、功率密度和其他因素·····                   | 129 |
| 六、热平衡方程式·····                      | 132 |
| 第二节 中枢神经系统的作用·····                 | 136 |
| 一、血脑屏障反应·····                      | 137 |
| 二、酶和离子效应·····                      | 137 |
| 三、脑电图效应·····                       | 139 |
| 四、药物效应·····                        | 140 |
| 五、复苏效应·····                        | 141 |
| 六、行为变化·····                        | 141 |
| 七、神经系统组织结构的变化·····                 | 143 |

|            |                                 |            |
|------------|---------------------------------|------------|
| 第三节        | 射频辐射对心血管系统的作用                   | 144        |
| 一、         | 对血压的影响                          | 144        |
| 二、         | 对心率的影响                          | 147        |
| 三、         | 对心电图的影响                         | 150        |
| 第四节        | 微波辐射对内分泌系统的作用                   | 151        |
| 一、         | 下丘脑-垂体-肾上腺反应                    | 151        |
| 二、         | 下丘脑-垂体-甲状腺反应                    | 158        |
| 三、         | 代谢的反应                           | 160        |
| 第五节        | 微波辐射对血液和免疫功能的影响                 | 162        |
| 第六节        | 微波辐射对胸腔、腹腔内脏和消化道的<br>作用         | 173        |
| 第七节        | 微波辐射对睾丸、女性生殖系统、妊娠<br>胚胎发育和遗传的作用 | 176        |
| 第八节        | 微波辐射对晶体和视网膜的作用                  | 181        |
| 第九节        | 微波听反应                           | 191        |
| 第十节        | 射频电磁辐射生物学作用的机制                  | 196        |
| 一、         | 热作用机制                           | 196        |
| 二、         | 非热效应的机制                         | 199        |
| <b>第六章</b> | <b>射频电磁场的防护</b>                 | <b>205</b> |
| 第一节        | 高频与微波的卫生标准                      | 205        |
| 一、         | 高频及超高频电磁场的卫生标准                  | 206        |
| 二、         | 微波辐射的卫生标准                       | 209        |
| 三、         | 射频电磁场的非职业辐射标准（居民辐射<br>标准）       | 217        |
| 第二节        | 高频电磁场的防护                        | 219        |
| 一、         | 屏蔽与接地                           | 219        |
| 二、         | 生产场所高频设备的屏蔽及效果                  | 229        |
| 第三节        | 微波的防护                           | 235        |
| 一、         | 减弱辐射源的直接辐射                      | 235        |
| 二、         | 屏蔽辐射源和辐射源附近的工作位置                | 239        |
| 三、         | 加大工作位置与辐射源的距离                   | 240        |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第四节 安全技术和医疗预防措施····· | 241 |
| 一、安全技术措施·····        | 241 |
| 二、个人防护措施·····        | 243 |
| 三、医疗预防措施·····        | 244 |
| 参考文献·····            | 246 |

## 概 论

现代的无线电技术，尤其是微波技术的发展很快。从微波发射机的平均辐射功率增长速度来看，1940 年雷达发射机的平均功率仅 10 瓦左右，到六十年代末期已达 1 兆瓦以上。近年来已研制成平均功率高达 10 兆瓦的发射机。并正朝着功率达 100 兆瓦的方向迈进。二次世界大战以后，发射机的功率平均每 10 年增加 10~30 倍。射频电磁能的应用，从军事扩展到工农业、科研，甚至进入家庭生活中（如理疗、微波炉等）。因此，接触辐射的人数和空间辐射强度已逐渐增加。近几年来，微波辐射已被联合国人类环境会议列为“造成公害的主要污染物”之一，无线电波辐射的危害、防护和生物效应问题，已在国内外引起了广泛的重视。

无线电波卫生学是研究如何评价和预防电磁辐射能量对人体有害作用的一门边缘科学。为了深入了解电磁能的危害，必须进行射频电磁能与生物体的相互作用即其生物效应的实验研究。因此，它是一个涉及到多种学科的综合性课题。医务卫生工作者对现代物理和电子学方面的知识通常是很有局限的，然而不论是从事劳动卫生工作者或研究生物学作用的实验工作者，都需要有一个电磁能辐射和如何被组织所吸收的正确概念。并要了解有关影响和辐射场强分布的许多因素。所以，在无线电波卫生学中存在的疑难问题，只有通过多种专业人员，其中包括卫生学、医学、生物物理学、电子工程等专业人员的通力协作，才能得到解决。

研究射频电磁生物学作用的历史，在国际上不算短，但早期仅限于理疗上的应用。本世纪三十年代，由于资本主义工业的大规模发展，发现在超高频设备旁工作的人员有神经衰弱症候群，并见到大功率微波辐射可使动物致死。在第二次世界大战期间，由于核武器的研究，医学界将注意力集中于电离辐射对人体影响的研究，忽视了非电离辐射的危害。无线电波作为职业卫生学因素的系统研究开始于五十年代。1954 年美国由空军航空医学院放射

生物系研究微波生物效应。2~3年后，确定  $10\text{mW}/\text{cm}^2$  为危险的照射量。1957年美国成立了微波生物学效应的三军专门委员会，美国许多大学的医学、生物物理和微波工程等学科的专家担任顾问，他们制定了一个非常庞大的三军协作研究计划，对不同频段微波的生物效应进行了研究。从1957年到1960年，每年由空军主持召开一次关于微波的生物学危害的三军学术会议。当时95%的研究论文所采用的微波辐射强度，都大于  $100\text{mW}/\text{cm}^2$ ，甚至达到  $1\text{W}/\text{cm}^2$ 。他们根据这些实验结果，几乎一致地认为微波生物学作用的问题已基本解决了。因此，在美国和西欧国家，此项研究工作冷落了下来。1960年以后的十年，它处于低潮中，没有什么新的进展。美国除了微波，对其他无线电波波段基本上没有什么研究。

苏联于1953年在医学科学院工业卫生和职业病研究所内，建立了研究无线电生物效应的实验室。此后军事医学院也开始了这方面的研究工作。他们的研究工作和美国不同，除实验研究外，大量是现场劳动卫生和临床生理指标的流行病学调查。五十年代的重点是研究中长波波段和短波段的高频电磁场劳动卫生学，然后进行微波的研究。他们着重观察长期受各种波段无线电波作用的一些临床现象，与此同时也进行了生物实验研究。他们认为低强度长期辐射（即在致热效应强度以下），对机体有非热效应。苏联基于这种非致热作用的观点，制订了比美国严1000倍的微波辐射卫生标准，同时又制订了其他波段的无线电波卫生标准。但是美国有些学者认为苏联的研究报告缺乏详细的技术资料，可复性差。故双方分歧很大，观点长期对立。

我国于1963年由浙江医科大学开始了高频劳动卫生学的工作以来，上海、北京、天津、江苏等地都进行了不少调查研究。我国微波劳动卫生学的研究工作始于1974年，由四机部组成以浙江医科大学、北京医学院、四机部职工医院等18个单位的微波调研组，经3年的现场调查和实验研究后，从国内实际情况出发，基于存在着小强度长期作用的非热效应，提出了在四机部范围内试行的微波辐射暂行卫生标准。目前，我国微波卫生学和生

物效应的研究工作正在全面地开展起来。

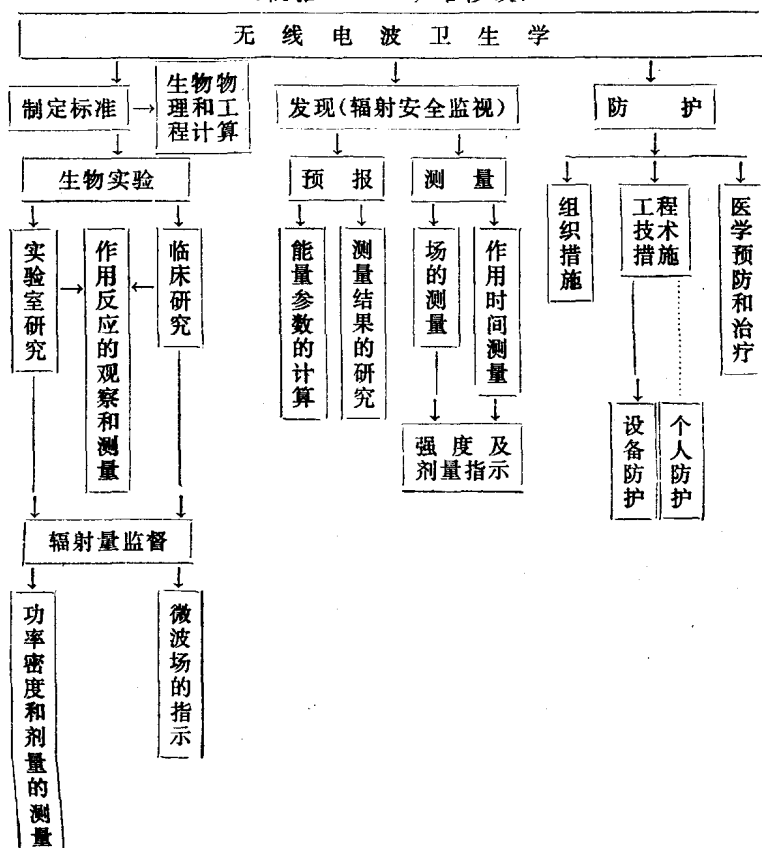
从七十年代以来,尤其是近年来,由于美苏等国在制定安全标准方面的观点对立,以及微波辐射的危害日益增长,微波生物效应的研究热潮又一次高涨。1970年美国总统办公厅的远距离通信政策科设立了电磁波管理谘询委员会,负责对电磁波的安全和危害的问题进行审查和提出意见。该委员会在1971年提出报告,要求加强非电离辐射的生物学危害的研究。此后由卫生教育福利部、环境保护署和国防部等组织这方面的研究工作,美国一些科学家在微波听觉、微波对血脑屏障和动物行为影响等研究方面,先后证明了微波非热效应的存在。目前,微波非热效应的存在已被更多的西方学者所承认。

1973年10月,由世界卫生组织、美国卫生教育和福利部及波兰卫生和社会福利部委员会联合发起的微波辐射的生物学作用和健康危害的国际会议在华沙召开。这是第一次规模较大的国际性会议,有12个国家的69名科学家参加。这个会议促进了微波研究的国际间合作。为了探讨生物学作用机制的方法一致性,会上接受了由Гордон及Schwan共同提出的将微波强度分为三种: $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 以上(热效应); $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下(非热效应); $1\sim 10\text{mW}/\text{cm}^2$ (微热效应)。此后,微波的研究又有了新的进展。美国、苏联及西欧国家几乎每年都举行有关专业会议进行交流讨论。尤其近几年来,美国有些学者在研究和证实微波非热效应的实验中,应用了一些尖端技术,如应用全息摄影技术研究微波听觉,用电生理方法研究微波对细胞放电的影响,用核磁共振研究微波分子效应。此外,在生物医学工程的研究方面近几年发展较快,其重要的贡献是研究影响微波穿透生物体的种种因素和用热图像-电子计算机处理计算生物体的微波吸收剂量。

全览无线电波生物效应和卫生学文献报道不下数千篇,但是有很多是相似的实验报告,结论分歧却很大。虽然近十年来进展较快,但是在这个领域内目前所提出的问题比能回答的问题还要多。无线电波对生物体的初级效应的研究,及其与无线电波对生物医学研究的联系还不多。细胞和亚细胞水平的效应研究还比较

少，电磁场作用量的标准测量方法和设备在国际上还有待于统一和完善。近年来有人报告，低频调制微波对神经系统的作用有特殊的影响。这种低频调制“频率窗”的存在，正吸引着人们深入地研究和观察。电生理研究也是一个探讨微波生物效应的重要方法。但要在这领域里求得进展，必须解决电极引起的伪差问题。在职业辐射、环境污染和临床研究方面，还需要进行大量的严密的流行病学调查和在各种劳动环境中可能存在的联合作用以及“无线电波作用综合征”的特征和诊断等研究。无线电波卫生学的基本发展方向可以下图表示之。

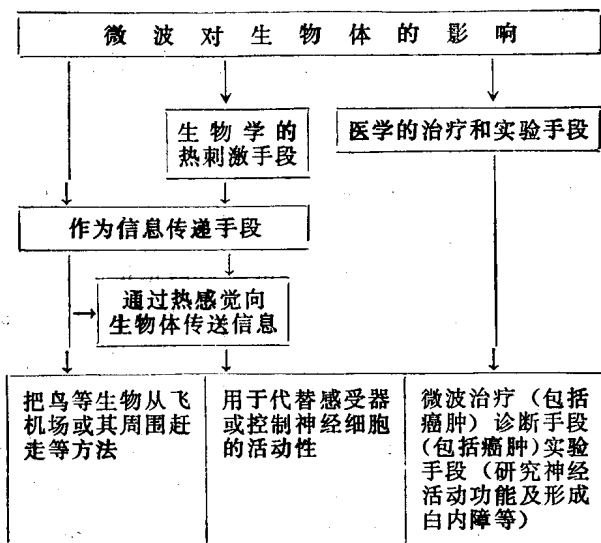
无线电波卫生学的基本发展方向  
(根据 Минин, 略修改)



无线电波和其他很多事物一样具有两重性，一定强度作用下的无线电波可危害人体健康。但在有效的控制下也可以为人类所利用。不同波段的无线电波作为理疗手段已应用了数十年。近年来，微波技术应用于医学研究和治疗方面也有新的进展，并有迹象表明，在微波医学方面正蕴藏着更大的突破。下图是微波技术如何应用于医学生物工程等方面的一些设想。我们希望无线电波生物学为我国四个现代化作出应有的贡献。

### 微波功率在生物上应用的展望

(根据 Минин, 略修改)



(姜 槐 叶国钦)

# 第一章 射频电磁场的概述

## 第一节 物理概念和术语

人们对于无线电波是比较熟悉的。电视、广播、工业用的高频淬火和微波加热、医院里的高频和微波理疗、雷达以及通讯等都涉及无线电波，也就是涉及射频电磁场。然而，究竟什么是射频电磁场，它有些什么特性，这对每个从事高频、微波卫生学和生物学作用的研究工作者来说，都是需要了解的。

### 一、射频电磁场的物理概念

射频电磁场是由交变的电场和磁场所组成。电场和磁场分别用电场强度 $E$ 和磁场强度 $H$ 来描述。电场强度 $E$ 是指电场作用在单位正电荷上的力，以 $V/m$ 为单位，并以单位正电荷上的作用力方向定为电场强度 $E$ 的方向。同样，磁场强度 $H$ 是指磁场作用在单位磁极子上的力，以 $A/m$ 为单位，其方向取决于单位磁偶极子的取向。

电场的变化总是伴随着磁场的产生，反之亦然，磁场的变化也总是要产生电场。这些变化着的电场和磁场就构成电磁波，也就是交变的电场和磁场在空间的传播形成了电磁波。

电磁波的频率 $f$ 与周期 $T$ 互为倒数

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

频率 $f$ 是指每秒中振动的次数。一秒中振动一次称1赫(Hz)。为了实际使用的方便，常采用千赫(KHz)、兆赫(MHz)和千兆赫(GHz)为单位。通常所谓的射频电磁场是指频率在100KHz到300GHz的电磁波。其中100KHz到30MHz称为高频，30到300MHz称为超高频，300MHz到300GHz称为微波(见表1-1)。低于100KHz的是超长波和长波，高于300GHz的

表 1-1 无线电波的波段划分

| 名称       | 高频                |                 |                | 超高频              | 特高频(微波)         |                |                  |
|----------|-------------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|------------------|
|          | 长波                | 中波              | 短波             | 超短波              | 分米波             | 厘米波            | 毫米波              |
| 波长       | 3km~<br>1km       | 1km~<br>100m    | 100m~<br>10m   | 10m~<br>1m       | 1m~<br>10cm     | 10cm~<br>1cm   | 1cm~<br>1mm      |
| 振荡<br>频率 | 100KHz~<br>300KHz | 300KHz~<br>3MHz | 3MHz~<br>30MHz | 30MHz~<br>300MHz | 300MHz~<br>3GHz | 3GHz~<br>30GHz | 30GHz~<br>300GHz |

电磁波是亚毫米波、米波等。就其本质来说,这些电磁波都是相同的。只是由于频率相差很大,量变引起质变,各自表现出不同的特性。

周期 $T$ 是指振动一周所需的时间。在高频和微波中, $T$ 的值很小,习惯上使用不方便,因此常用频率 $f$ 或波长 $\lambda$ 来表示。

波长 $\lambda$ 是指电磁波每变化一周所传播的距离。电磁波的波长 $\lambda$ 和频率 $f$ 之间有下列简单关系:

$$f \cdot \lambda = V \quad (2)$$

$V$ 是电磁波的传播速度。在介质中,电磁波的传播速度取决于介质的介电常数 $\epsilon$ 和导磁率 $\mu$ 。介电常数 $\epsilon$ 通常都写成 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon'$ 。 $\epsilon_0$ 称绝对介电常数(真空的介电常数),是一个物理常数,它的数值等于 $8.85 \text{ PF/m}$ ;  $\epsilon'$ 称相对介电常数,其值等于充以介质的电容器和该电容器放在真空中的电容量之比。同样,导磁率 $\mu$ 也表示成 $\mu = \mu_0 \mu'$ 。 $\mu_0$ 称真空的导磁率,是一个物理常数,它的数值等于 $1.257 \mu\text{H/m}$ ;  $\mu'$ 称相对导磁率,是指介质的导磁性能与真空导磁性能之比。

电磁波在介质中的传播速度是

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon' \mu'}} \quad (3)$$

其中 $c$ 是电磁波在真空中的传播速度,即光速。其值等于 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

空气的相对介电常数和导磁率可以认为等于1。因此空气中

频率和波长的关系可简写成

$$\lambda = 300/f \quad (4)$$

这里,  $\lambda$  是以m为单位;  $f$  是以MHz为单位。

对相对导磁率 $\mu'$ 来说, 由于生物体都是非铁磁物质, 因此可把 $\mu'$ 看成等于1。极少数生物体中也有顺磁或铁磁现象存在。

介质中另一个影响电磁波的参数是“导电率 $\sigma$ ”, 它是介质电阻率的倒数, 表征了介质的导电能力。如果介质是理想介质(理想介质是指绝缘体), 那末它的 $\sigma = 0$ ; 如果不是理想的绝缘体, 那末介质的电导率 $\sigma$ 不等于零, 介质中电磁波波长 $\lambda_m$ 和自由空间(真空)中波长 $\lambda_0$ 的关系是:

$$\lambda_0 = \lambda_m \left[ \frac{\mu}{2} \sqrt{\epsilon'^2 + \left( \frac{4\pi\sigma}{\omega} \right)^2} + \epsilon' \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

其中 $\omega$ 是电磁波的角频率, 等于 $2\pi f$ 。同时, 电导率 $\sigma$ 也限制了电磁波对介质的穿透能力。在电导率 $\sigma$ 不等于零时, 电磁波只能穿透有限深度 $\delta$ 。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (6)$$

从上述中可知, 电磁波的一些参数——波长、速度、穿透深度等, 随着介质的改变要发生改变。而这些变化正是研究电磁波对生物体的作用的基础。

## 二、射频电磁场的有关术语

### (一) 平面电磁波

当电磁波远离辐射源, 并在各向同性、均匀、无限介质中传播时, 可把它理想地看成是平面电磁波, 也就是通常所指的辐射场。对平面电磁波来说, 电场 $E$ 和磁场 $H$ 是同相的, 同时和传播方向是相互垂直的。它们之间满足右手定则。如图 1-1 所示。

平面电磁波中 $E$ 和 $H$ 的幅值是由介质的特性阻抗(也称波阻抗)所制约的。特性阻抗就是指电场 $E$ 的幅值与磁场 $H$ 的幅值之比, 它在数值上等于介质的导磁率和介电常数之比的平方根,

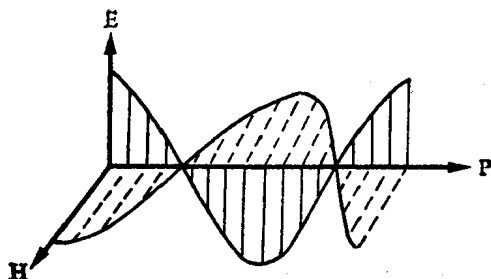


图 1-1 平面电磁波

即：

$$Z = \frac{|E|}{|H|} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (7)$$

对空气介质来说，它的特性阻抗  $Z$  是

$$Z = \frac{|E|}{|H|} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi(\Omega) = 377(\Omega) \quad (8)$$

## (二) 功率流密度 $P_d$

功率流密度  $P_d$  是指与传播方向相垂直的单位面积所流过的辐射能。它的值等于电场强度  $E$  和磁场强度  $H$  的矢量积。平面电磁波的  $E$  和  $H$  是相垂直的，因此矢量积就等于  $E$  和  $H$  的乘积。

$$P_d = E \cdot H = E \cdot \frac{E}{377} = \frac{E^2}{377} \text{ V} \cdot \text{A/m}^2 \quad (9)$$

由此可见，在给定的介质中，通过对功率流密度的测量就可求得场强，反之亦然。功率流密度的单位  $\text{W/m}^2$ ，习惯上一般使用  $\text{mW/cm}^2$  或  $\mu\text{W/cm}^2$  作单位。

## (三) 储能密度

储能密度是指在电磁场的单位体积中的储存能量。电场  $E$  中的储能密度  $W_E = \frac{1}{2}\epsilon E^2$ ，磁场  $H$  中的储能密度  $W_H = \frac{1}{2}\mu H^2$ 。电磁场的总储能密度  $W = W_E + W_H$ 。在平面电磁波中  $W_E = W_H$ ，也就是电场的储能等于磁场的储能。

在平面电磁波中，电磁场的储能密度  $W$  和功率流密度  $P_d$  间的关系是