

射频电磁波生物学效应实验系统的研制

习岗¹, 候建强², 王海彬², 牛中奇², 宋清¹

(1 华南农业大学 理学院, 广东 广州 510642; 2 西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 设计和研制了一套用于研究电磁波非热效应的实验系统. 该系统综合了工程上的 TEM 小室、开阔场地测量屏蔽室和微波暗室的优点, 能产生一个具有极端的宽带特征、分布均匀、易于测量的电磁场区域, 对周围的人或设备无害或无干扰.

关键词: 电磁波; 生物学效应; 实验装置

中图分类号: R318.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2003)04-0092-04

近年来, 由电台、电视台、雷达和移动通信设备产生的频率为 100 kHz ~ 300 MHz 的高频电磁波和频率为 300 MHz 以上的射频电磁波对生物的影响引起人们的极大关注^[1, 2], 因为射频电磁场的频率范围广, 影响区域大, 能危害近场区和远场区的生物体系, 产生了日益严重的电磁污染.

然而, 要研究射频电磁场对生物的影响, 必须首先建立一个能较好地模拟自由空间的电磁场环境, 并能方便地进行电磁计量, 再现同一参数电磁环境, 避免外界环境因素干扰, 精确控制生物样品所在环境温度. 这些苛刻的实验条件使得射频电磁波对生物的影响成为一个研究的难点.

为了进行射频电磁波对生物的影响研究, 有些研究者采用微波暗室, 将辐射天线和受照物体同时置于墙体覆有吸收材料的微波暗室中, 在暗室内产生一个无反射的电磁场区域. 但是, 这类暗室的尺寸较大. 例如, Phillips 等^[3]建造的专用生物学微波暗室的尺寸为 6.7 m × 3.4 m × 2.6 m, 因而造价昂贵, 一般的实验室难以承担. 同时, 对这类暗室中的电磁场很难做到准确剂量. 针对上述缺点, Burkhardt^[4]和 Linz 等^[5]设计了一种工作于基频模式的矩形波导管, 这种波导管能够产生高度均匀的电磁场, 因而在电磁场生物效应方面具有一定的应用价值. 笔者设计和研制出一种射频电磁波生物学效应实验系统, 以为进行射频电磁场生物学效应研究提供一种较理想的设备.

1 系统组成

从电磁场的基本理论和生物学实验的要求结合考虑, 该系统应由功率信号源、信号测量系统、高频

横电磁波传输室(Gigahertz electromagnetic transmission cell, GTEM)、温度控制系统等组成. 系统框图见图 1. 该系统各部分的仪器组成和基本功能是:

(1)信号源: 采用 GX-26 超高频功率信号源, 它可以产生一束频率可调、振幅可调、功率可调的电磁波, 输出频率范围为 275 ~ 950 MHz, 850 ~ 2750 MHz.

(2)信号传输检测系统: 电磁波的入射功率和反射功率用通过式定向功率计测量, 频率用无线测量频率计测量.

(3)GTEM 小室: 用来产生近似程度极高的 TEM 波(横电磁波), 并且在小室的中间部分形成一个不均匀性小于 ±2 dB 的电磁场, 生物样品放在其中接受电磁波照射.

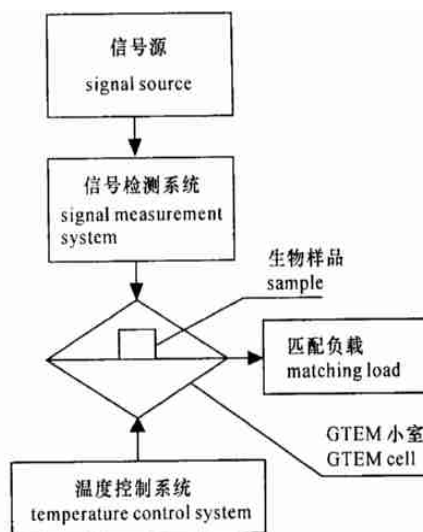


图 1 射频电磁波生物学效应实验系统

Fig. 1 Experimental system for studying the biological effect of radio frequency electromagnetic field

(4) 温度控制系统: 用来实时检测和控制 GTEM 小室内的温度, 以排除环境温度变化对实验结果可能产生的影响。

(5) 匹配负载 (由端接式功率计代替): 用来作为端接匹配负载, 并测量透射功率。

在系统中, 生物样品吸收的功率 (其中虽包括小室的损耗功率, 但其值很小可以忽略) 可由通过式功率计所测到的入射功率减去反射功率, 再减去端接式功率计所测的透射功率 (即端接负载吸收的功率) 而得到, 即

$$P_{\text{吸收}} = P_{\text{入射}} - P_{\text{反射}} - P_{\text{负载}}, \quad (1)$$

2 GTEM 小室

在整个系统中, GTEM 小室是关键设备。为了能够形成一个均匀的电磁场空间, 将工程上的 TEM 小室加以改进将其扩展为 GTEM 小室。

TEM 小室的概念是 1974 年 Crawford 首次提出的, 它作为一种电磁测试设备, 主要用于电子仪器的电磁兼容实验。近几十年来, TEM 小室已经发展了一系列产品。TEM 小室实际上是一种同轴线的变型器件, 将同轴线的导体扩展为矩形导体, 内导体变为扁平芯板。当在其终端接以匹配负载, 始端馈入电磁波时, 在小室内就会形成电磁波。TEM 小室具有以下主要优点:

(1) 传输室的长度足够长时, 在室内传输的电磁波是平面波。

(2) 在传输室的有效工作区 (传输室的中央部分, 位于芯板与上下壁间) 内, 电场强度的不均匀性不超过 ± 2 dB。

(3) 传输室内传输的横电磁波阻抗为 377Ω 与远区场在自由空间的波阻抗相同, 较好地模拟了自由空间的电磁环境。

(4) 传输室中的能量受到外围壁板屏蔽, 不会散失, 从而避免了在实验现场产生的电磁污染。同时, 室内场也不会受外界干扰。

但是, TEM 小室也有一些缺点, 如果当电磁波的入射频率达到一定值时, 小室内会出现高次模, 从而使入射频率的上限受到了限制, 即对一定大小尺寸的小室, 存在一个截止频率。由于测试区域空间的大小与截止频率上限成反比, 这就导致了在受照射的生物样品尺寸不能改变的情况下将无法进一步提高照射频率, 测试样品的大小也会受到限制。为了改善 TEM 小室的频率上限, 使之适应生物学实验的需要, 笔者将 TEM 小室加以改进, 制成了如图 2 所示的 GTEM 小室。小室中左端为电磁波馈入端, 右端为匹配负载, 中间为用黄铜制成的箱体部分。

图 2 中两侧箱体实际上并合在一起形成一个整体。小室的内芯板由特殊材料支撑, 小室侧壁开有一个用来取放生物样品的门, 门关闭时可使小室密封。 l 、 b 分别为中间部分的长和宽, l' 和 b' 为中间芯板的长和宽, d 为芯板边缘到长边的距离。

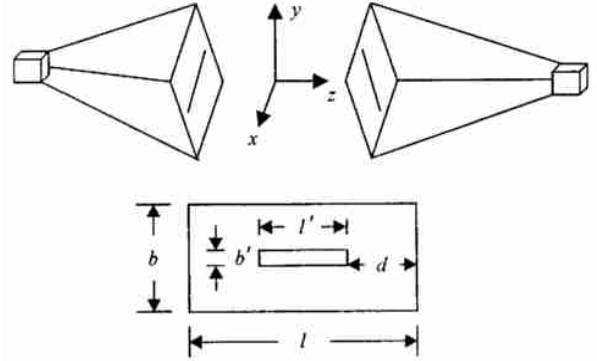


图 2 GTEM 小室示意图

Fig. 2 Diagrammatic structure of GTEM cell

在进行 GTEM 小室的设计时, 先由生物样品的尺寸预计小室内电磁场均匀区的大小, 再根据截止频率的要求和小室的特征阻抗计算小室的整体尺寸。在本 GTEM 小室中, 由于两端逐渐减小并转换成 50Ω 的同轴插座, 其内部均具有 50Ω 的特征阻抗, 从而保证了小室内阻抗处处匹配。由于当小室内放入生物样品时会对小室产生容性负载效应, 导致小室内特征阻抗下降, 作为补偿, 将小室的特征阻抗设计为 52Ω 左右。经计算, 本小室各参数为:

$$l = 250 \text{ mm}, b = 222.479 \text{ mm}, l' = 200 \text{ mm}, b' = 1.5 \text{ mm}$$

当高频电磁波馈入 GTEM 小室时, 一个均匀的行波会在室内建成, 小室内的电磁场分布如图 3 所示, 电力线为垂直于芯板的直线 (用实线表示), 磁力线为围绕芯板的闭合线 (用虚线表示)。

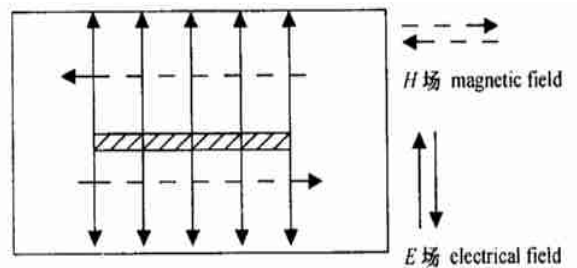


图 3 GTEM 小室内的电磁场分布

Fig. 3 Distribution of electromagnetic field in GTEM cell

在图 3 中, 小室内芯板与上顶板和下顶板之间中心位置的电场强度 E 为

$$E = \frac{U}{h}, \quad (2)$$

其中, U 为小室的输入电压, 芯板与上顶板和下顶板之间的距离均为 h 。

如果测得了输入小室的功率, 小室内相应的电场强度为

$$E = \frac{\sqrt{P_n R_c}}{h} = \frac{\sqrt{(P_{\text{入射}} - P_{\text{反射}}) Z_0}}{h}, \quad (3)$$

其中, P_n 为输入小室的净功率, R_c 为小室复特征阻抗的实部. 在本小室中 Z_0 为 50Ω , h 为 0.11124 m .

由电磁波理论可知, 电磁波功率流密度 S (最大值) 的一般表达式为

$$S = E \times \vec{H}, \quad (4)$$

在 GTEM 小室内传播的为 TEM 波, 因而功率流密度可表示为

$$S = \frac{E^2}{\eta_0}, \quad (5)$$

其中, $\eta_0 = 377 \Omega$.

在实测中, 若将端接式功率计所测的透射功率近似视为 GTEM 小室内的环境功率, 则由 (3) 式和 (5) 式可计算出透射功率与 GTEM 小室内的环境功率密度的关系如表 1 所示.

表 1 透射功率与 GTEM 小室内的环境功率密度的关系

Tab. 1 The relationship between transmission power and environment power density

透射功率 transmission power / W	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
环境功率密度 environment power density / (mW · cm ⁻²)	1.07	2.14	3.21	4.28	5.35	6.43	7.50	8.57	9.65	10.72

由于 GTEM 小室实际上是同轴线的变形, 在其中传导的 TEM 波频率受频率上限的限制, 若超过频率上限, 便会出现高次模. 所以, TEM 小室的工作频率必须低于矩形波导的一阶模 (TE₁₀) 的截止频率 f_c . 本小室的截止频率为

$$f_c = \frac{75}{l} \sqrt{1 + \frac{4b}{\pi b^2 \ln[8l/(\pi d)]}} = 750 \text{ MHz}. \quad (6)$$

其中, 各参数的含义见图 2.

对 GTEM 小室内电场的分布情况, 采用时域有限差分法 (finite different time domain, FDTD) 对其内部的场分布的理论分析表明, 在小室的横截面上, 电场强度随 y 的增大而减小, 越靠近芯板电场的均匀性越好.

在本系统中, 工作区域拟在 $x = 85 \sim 200 \text{ mm}$, $y = 72 \sim 8 \text{ mm}$, $z = 247 \sim 282 \text{ mm}$, 因为在此区域内无论横向场还是纵向场的最大不均匀性都小于 $\pm 2 \text{ dB}$.

3 温度控制系统

电磁波照射总会在生物组织内产生热量 (因为生物组织为有耗媒质), 引起生物组织温度或多或少的变化, 从而有可能产生生物学热效应, 使生物学非热效应被淹没, 所以, 在研究电磁波的非热效应时, 除了严格控制照射功率外还应仔细控制照射样品的环境温度, 以排除温度变化带来的影响. 本照射系统的温度控制系统结构如图 4 所示.

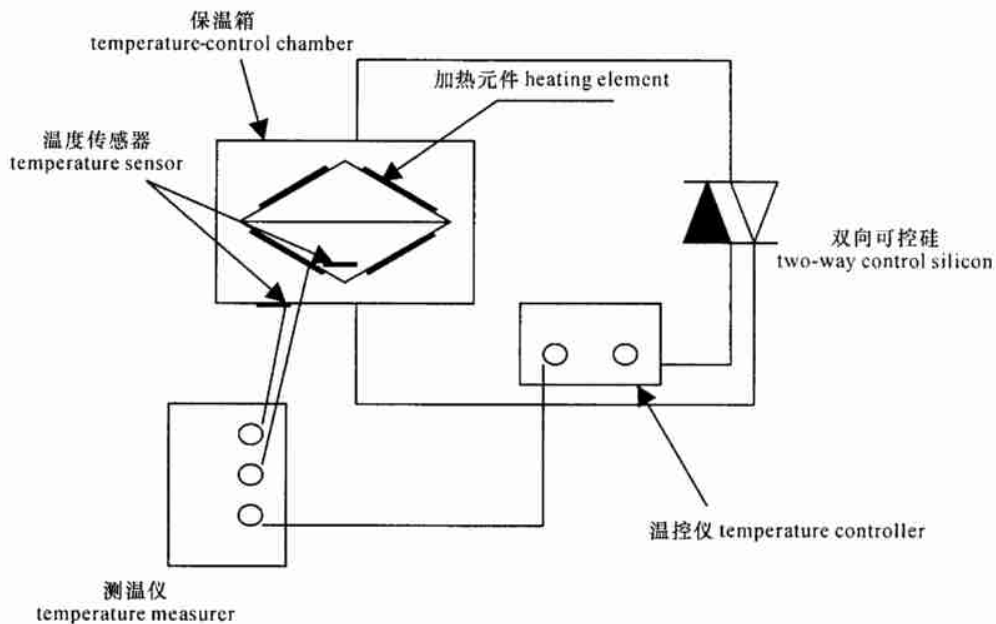


图 4 温度控制系统示意图
Fig. 4 Temperature control system

温度控制系统由 3 部分组成:

(1) 温度传感器: 采用灵敏度较高的 PN 结温度

传感器 2CW22, 为了不影响 GTEM 小室内的场分布, 传感器的轴向应与小室内的电场方向垂直.

(2)控温箱:采用本质骨架外贴泡沫塑料板构成,以便有良好的与外界隔热的性能。

(3)控温部分:采用数字式控温仪,由输出的脉冲电流驱动双向可控硅以改变可控硅的导通角。

(4)加热部分:采用外有云母绝缘片的加热元件贴附在保温箱内壁的金属板上。

该系统的控温灵敏度 $\leq 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4 结语

射频电磁波生物学效应实验系统综合了工程上的TEM小室(electromagnetic transmission cell)、开阔场地测量屏蔽室和微波暗室的优点,其内部的反射和共振小,能最有效地利用空间,具有极端的宽带特征,对周围的人或设备无害或无干扰,并且价格较为低廉。

参考文献:

- [1] 陈国璋,陈惠晓.生物电磁学的研究热点—非热效应[J].物理,1998,27(3):151—155.
- [2] REPACHOLI M H. Low-level exposure to radio frequency electromagnetic fields: health effects and research needs[J]. Bioelectromagnetics, 1998, 19(1): 1—19.
- [3] OSEPCCHUKO J M. Biological effects of electromagnetic radiation[M]. New York: IEEE press, 1984, 205—210.
- [4] BURKHARD M, POKOVIC K, GNOSG M, et al. Numerical and experimental dosimetry of Petri dish exposure setups[J]. Bioelectromagnetics 1996, 17(4): 483—493.
- [5] LINZ K W, WESTPHALEN G, STRECKERT J, et al. Membrane potential and currents of isolated heart muscle cells exposed to pulsed radio frequency fields[J]. Bioelectromagnetics 1999, 20(8): 497—511.

Development of A System for Studying the Biological Effect of Radio Frequency Electromagnetic Field

XI Gang¹, HOU Jian-qiang², WANG Hai-bin², NIU Zhong-qi², SONG Qing¹

(1 College of Sciences, South China Agric. Univ., Guangzhou 510642, China;

2 College of Electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: A system for studying the biological effect of radio frequency electromagnetic field was designed and made. The system combined the advantages of TEM cell in engineering and microwave anechoic chamber. It can form an area in which electromagnetic wave having large frequency range is well-distributed and the intensity of electromagnetic wave easily measured. Electromagnetic wave in the system has no undesirable effect on the environment. It is an ideal device to study the biological effect of radio frequency electromagnetic field.

Key words: electromagnetic field; biological effect; device

【责任编辑 李晓卉】