

# 单极子微波热疗天线在生物组织中产生的 温度分布的调控\*

席晓莉<sup>1</sup> 王丽黎<sup>1</sup> 汪文秉<sup>2</sup>

1(西安理工大学 自动化与信息工程学院,西安 710048)  
2(西安交通大学 电子与信息工程学院,西安 710049)

**摘要** 微波热疗的关键是实现微波能量长时间较均匀加热肿瘤组织。采用连续加热方法,在不改变天线结构及插入位置的条件下,很难实现对治疗区域的长时间均匀加热。我们结合电磁场的时域有限差分(Finite Difference Time Domain,FDTD)和温度场的有限差分方法模拟微波热疗天线在生物组织中产生的温度分布,通过调整天线的加热功率,并采用分时间间隔加热的治疗方法,实现了微波能量对一定区域组织的长时间较均匀加热。

**关键词** 微波热疗 时域有限差分 温度分布

## The Temperature Control for Cancer Thermotherapy Using Interstitial Microwave Antenna

Xi Xiaoli<sup>1</sup> Wang Lili<sup>1</sup> Wang Wenbing<sup>2</sup>

1(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048,China)  
2(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049,China)

**Abstract** The basic objective of microwave hyperthermia is to raise the temperature in the tumor tissue without overheating point for a long time. It's difficult to achieve uniform temperature distribution using the continuous heating without changing the antenna shape and inserting position. In this paper, the interstitial antenna worked in the frequency of 2 450 MHz inserted into an infinite muscle model is studied. The Finite Difference Time Domoin(FDTD) method was used to calculate the electromagnetic field, while the finite difference method (FDM) was used to analyze the temperature distribution in tumor tissue. The simulation results show that the long-time evenly heating can be achieved by using the alternately heating process and the treatment area can be changed by adjusting input power.

**Key words** Microwave thermotherapy Finite Difference Time Domain (FDTD) Temperature distribution

### 1 引言

采用微波能量加热肿瘤组织的微波热疗,不仅可通过热效应直接杀灭肿瘤细胞,而且还可以提高肿瘤细胞对化疗和放疗的敏感性,因而受到了日益广泛的重视<sup>[1,2]</sup>。微波热疗研究重点之一是根据肿瘤组织的结构,设计、选择合适的微波天线及其阵列,以实现微波能量对肿瘤区域的长时间较均匀加热,同时减少对正常组织的热损伤。一般治疗要求微波能量对肿瘤组织的加热需保持高于 43℃ 的温度,并持续 20~40 min,而对正常组织的加热温度应低于

44℃,另外肿瘤组织中的温度不应过高,以避免组织的过热以及由此引起的蒸发现象。由于生物组织结构及电参数的复杂性,热疗天线及其阵列很难在肿瘤组织中产生均匀的电磁场分布,导致组织中强场和弱场区域的温度分布不均匀性随加热时间增加而加剧,无法实现对肿瘤组织的长时间治疗。本文以常用的同轴馈电单极子天线为例,以组织中的温度分布为最终控制目标,采用电磁场的 FDTD 结合热传导方程的有限差分方法,求解天线在肿瘤组织中产生的温度场分布,研究天线输入功率与治疗时间及治疗区域的关系,通过对天线激励功率及时间的调整实现对一定区域肿瘤组织的长时间治疗。

万方数据

\* 陕西省教育厅自然科学基金资助项目(03JK086)

2 肿瘤组织中的温度场的数值计算方法

2.1 计算模型

本文主要对结构简单的单极子天线插入肿瘤组织深部(无限大组织)的情况下天线激励与及治疗区域及时间关系进行讨论,不涉及天线结构、尺寸及插入深度对电磁场分布的影响,计算模型见图 1。微波频率 2 450 MHz,功率为 0~100 W 可调。单极子天线采用耐高温的实芯聚四氟乙烯 SF6-50-3 型射频同轴电缆剥掉 17.5 mm 的外导体形成。电缆的内导体外直径 0.93 mm,外导体内直径 3.0 mm,电缆外直径为 4.50 mm。绝缘材料为聚四氟乙烯( $\epsilon_r = 2.2$ )。肌肉组织的电参数及热参数见表 1。表 1 中 k 为组织的热传导系数(W/m·K);C 为组织的比热(J/kg·K); $\rho$  为组织的密度(kg/m<sup>3</sup>), $\sigma$  为组织的电导率(S/m),包含媒质导电损耗和介质损耗。

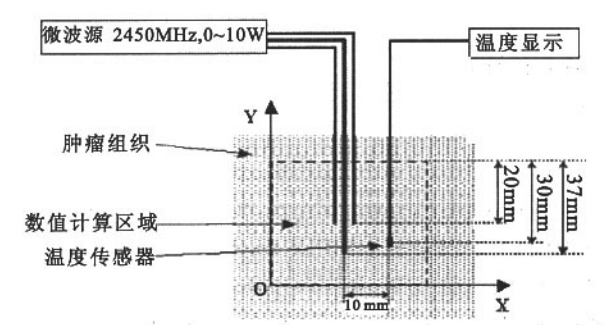


图 1 单极子天线插入肿瘤组织的治疗模型

Fig 1 The treatment model of single antenna inserted into the infinite muscle

表 1 肿瘤组织的热物性参数及在 2 450 MHz 频率下的电参数

Table 1 Electrical parameter and density of the muscle

Parameters	$\rho$ (S/m <sup>3</sup> )	C (J/kg·K)	k (W/m·k)	$\epsilon'_r$	$\sigma$ (S/m)
Value	1040	3500	0.60	52.73	1.88

由于肿瘤的热参数和电参数与肌肉组织相近,本文用肌肉组织的参数代替肿瘤组织的相应参数,其中热参数参考文献[3],在 2 450 MHz 频率下的电参数参考文献[4]。

2.2 温度场的数值计算方法

存在微波源时,肿瘤组织中的温度分布可用热传导方程表示为[5]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \frac{\sigma}{2} |\vec{E}(\vec{r}, t)|^2 \quad (1)$$

其中:T 为组织内的温度分布函数(K)。

采用三维 FDTD 方法求解微波热疗天线在组织中的电场能量分布,为节省计算时间和内存,对具有细微结构的 天线区域采用亚网格技术,吸收边界采用二阶 Mur 边界,三维亚网格 FDTD 实现的内容参考文献[6]。以电场能量分布为源,采用有限差分方法求解组织中的温度分布,采用与电磁场计算相同的网格结构,温度结点位于 Yee 元胞中心,对电磁场计算中的子网格区域,其电场分布及组织参数均采用对应大网格点的值代替,忽略导体的损耗。

针对图 1 的计算模型,由于组织体积和天线插入深度均很大,模型外场强分布很小,可按天线处于无限大均匀媒质的情况考虑,数值模拟取图 1 中虚线所示的立方体区域,体积为 80 mm×80 mm×80 mm,FDTD 和温度场计算的空间步长均为 1 mm,FDTD 的时间步长取 s,亚网格区域的 FDTD 空间网格长度为 1/3 mm,温度场的时间步长为 1 s,得到稳态电场能量分布的 FDTD 计算时间步长取 1 500 步。温度场边界取为第一类边界条件。该程序的具体实现及实验验证参考文献[7]。

3 数值计算结果

加热功率为 1 W 情况下组织中的稳态电场能量(电场强度的模)分布见图 2。由于电场能量主要分布在天线附近的有限区域,图中仅显示了 60 mm×60 mm 区域的电场分布。

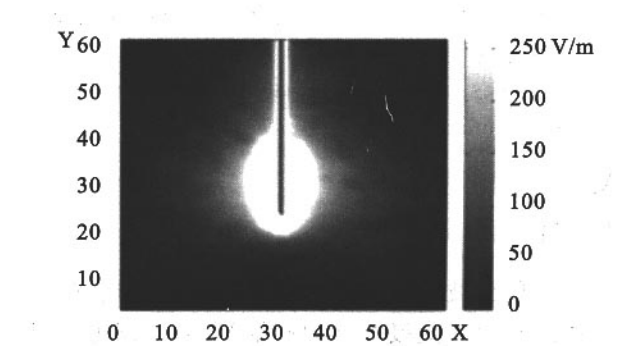


图 2 在 1 W 的微波功率辐射下肌肉组织中电场模拟分布的数值计算结果

Fig 2 Simulation result of electric field magnitude with 1W input power

分别采用 10 W 和 20 W 的输入功率对组织进行连续加热,组织内的温度分布随时间变化的模拟结果见图 3。

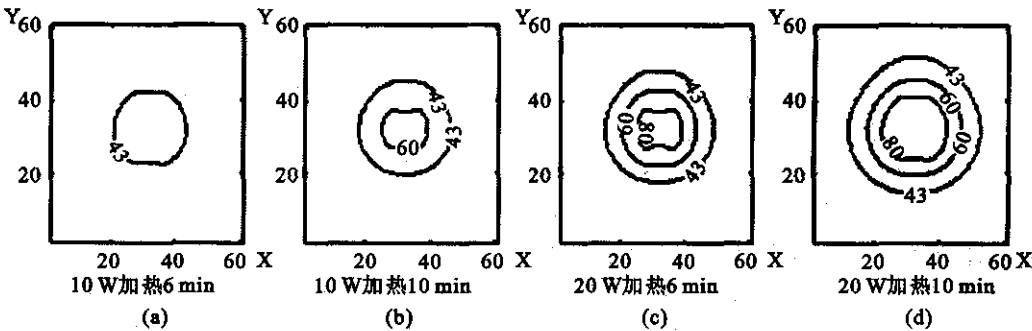


图 3 采用恒定功率连续加热时,组织内的温度分布随时间变化的模拟结果  
(a)10 W 加热 6 min;(b)10 W 加热 10 min;(c)20 W 加热 6 min;(d)20 W 加热 10 min  
Fig 3 Temperature distribution in the muscle for the different time using the continuous heating

采用 20 W 的功率先加热 3 min,然后用 10 W 的功率每加热 0.5 min,停 0.5 min,如此循环加热,得到组织内温度分布随时间变化的模拟结果见图 4。

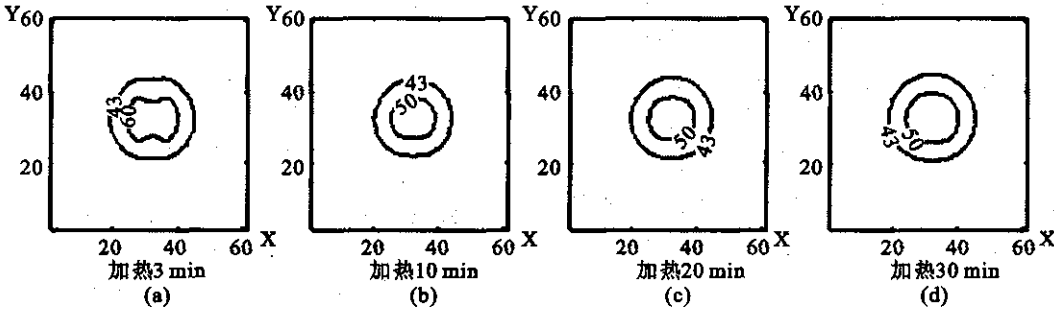


图 4 20 W 的功率加热 3 min,后用 10 W 的功率每加热 0.5 min 停 0.5 min 得到的组织中的温度分布  
(a)加热 3 min;(b)加热 10 min;(c)加热 20 min;(d)加热 30 min

Fig 4 Temperature distribution in the different time when heating as follows: durative heated with 20 W input power for 3 min firstly, then alternate between heating and pause as 10 W input power with 0.5 min period

采用 30 W 的功率先加热 3 min,然后采用 20 W 的功率每加热 0.5 min,停 0.5 min,如此循环加热,得到组织内温度分布随时间变化的模拟结果见图 5。

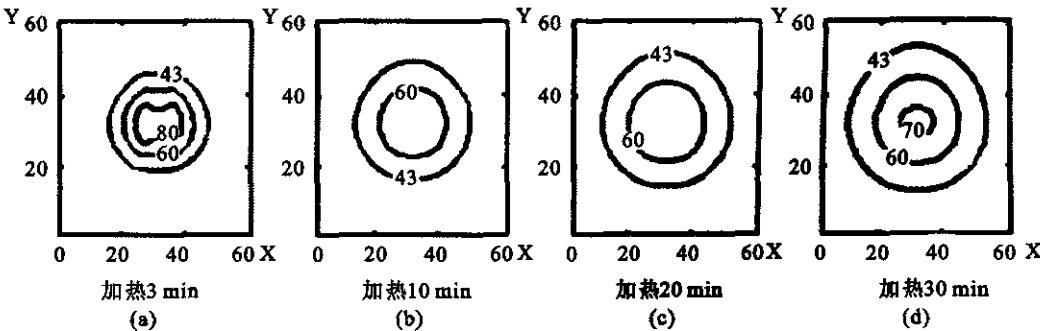


图 5 30 W 的功率加热 3 min,后用 20 W 的功率每加热 0.5 min 停 0.5 min 得到的组织中的温度分布

Fig 5 Temperature distribution in the different time when heating as follows: durative heated with 30 W input power for 3 min firstly, then alternate between heating and pause as 20 W input power with 0.5 min period

从图 5 的数据看出,无论以多大的功率对组织进行连续加热,有效加热区域均随治疗时间的增加而

增大,随着治疗时间的增加,场强较强区域组织的温度很快达到过热,无法实现对一定范围肿瘤组织的长时间较均匀加热。采用间歇加热的方法,可实现天线对一定范围肿瘤组织的长时间较均匀加热。比较图4和图5可知,对同一治疗模型,当加热功率较小时,有效治疗范围小,但治疗区域内温度更均匀,当加热功率增加时,有效治疗范围增大,同时治疗区域内的温差加大。如图4,间歇加热功率10 W时,治疗直径约为20 mm,治疗区域温度变化范围为43℃~50℃。当间歇加热功率为20 W时,治疗直径可达40 mm,但治疗区域中心的治疗温度达80℃。

## 4 结 论

实现天线对给定区域的长时间较均匀加热是微波热疗的最终目标。由于天线结构及生物组织电参数的复杂性,很难得到在一定区域内均匀的电磁场分布。加热时强场区温度升高速度快,而弱场区温度升高速度慢,因此长时间连续加热必然导致组织内温度的不均匀。采用间歇加热的方法,加热时温度不均匀性加强,当加热暂停时,组织内的温度分布会因热传导效应而得到均匀,可实现长时间较均匀加热。加热功率可根据治疗范围及治疗中组织所能承受的最高温度来确定,一般治疗范围大时,所需加热功率增大,治疗区域内的温差也会加剧。实际治疗中需根据具体要求选择治疗功率及加热时间。当治疗区域过大时,单天线则无法完成在无过热区域的条件下

对整个肿瘤组织的有效加热。此时需要采用多天线组成的阵列进行治疗,治疗中不仅需要对单个天线的间歇加热功率进行控制,还需要考虑多天线的分时治疗。我们将对多天线治疗的温度控制作进一步的研究。

## 参 考 文 献

- 1 Wust P, Hildebrandt B, Sreenivasa G, *et al.* Hyperthermia in combined treatment of cancer. *The Lancet Oncology*, 2002;3 : 487
- 2 Jan Vrba, Miroslav Lapes, Ladislav Oppl. Technical aspects of microwave thermotherapy. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*. 1999;48 : 305
- 3 Wang JQ, Fujiwara Q. FDTD Computation of temperature rise in the human head for portable telephones. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1999;47 : 1528
- 4 Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Phys Med Biol*, 1996;41 : 2271
- 5 Stavroulakis P. Biological effects of electromagnetic fields. New York: Springer, 2003; 261-264
- 6 Xi XL, Wang WB. Modeling of interstitial applicators used for microwave hyperthermia of bone cancer based on subgridding FDTD method, The 6th International Symposium on Antennas. Beijing: Propagation and EM Theory, 2003; 645-648
- 7 Xi XL, Wang WB. Thermal analysis of microwave hyperthermic antennas in biological tissues. *Journal of Microwaves*, 2005; 21 (1) : 66 [席晓莉, 汪文秉. 微波热疗天线在生物组织中温度分布的模拟. *微波学报*, 2005; 21(1) : 66]

(收稿: 2004-07-05 修回: 2004-12-08)

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>