

相控阵超声热疗场共轭直接合成的模式优化研究*

陆明珠 万明习 施 雨

(西安交通大学电信学院生物医学工程系 710049)

(2000 年 5 月 18 日收到 2000 年 8 月 27 日收到修改稿)

对多阵元超声热疗声场进行模式优化研究.在对空间声场提出合理的优化目标函数后,提出了两种优化算法进行全局寻优:一种是遗传算法构造的声场模式控制算法;另一种是特征向量算法.用遗传算法和特征向量算法对声场控制模式控制的仿真研究表明,能达到声场控制模式优化的目标,而遗传算法比特征向量算法具有更多特征优势.

关键词:优化,遗传算法,超声相控阵,热疗

PACC:8760B,0270

1 引 言

近期的多种研究显示“非侵入式外科手术”具有临床应用的广阔前景.这种外科手术方式主要是依靠热进行治疗的,通过热杀伤和消融目标靶组织,它的重要应用领域是癌症热疗(hyperthermia)和消融(ablation).热源的形式有多种多样:有微波、超声、射频电容、电感、激光等,各种热源形式各有其特点,而超声波具有更高程度的能量空间动态控制能力和能量深入深部靶区的特点而作为主要的热疗手段^[1].

超声热外科及其主要的目标是要将超声能量准确地分布在目标靶组织而丝毫不损伤邻近正常组织.多阵元相控阵超声换能器是适合热疗声场分布控制的主要换能器形式,主要有矩形、环形、扇柱形、扇蜗形等阵形^[2-5];而多阵元场共轭直接合成法^[6-8],能达到多焦点的同时聚焦形式.目前已经有研究提出相关优化目标函数作为空间多点聚焦的描述^[8],但要求目标函数的最小(或最大)值问题,实际上是寻求全局最优的问题,这方面的研究却未见报道.文献^[7]只是用试探、修正方法寻找好的目标函数值,这离全局最优相差甚远.本文就是研究多阵元超声热疗声场模式优化问题中的全局寻优算法.

遗传算法(genetic algorithm,GA)^[9],是模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程的计算

模型.它能够在复杂而庞大的搜索空间中寻找最优解或准最优解.本文提出用遗传算法构造声场优化模式控制算法,还根据优化目标形式提出特征向量算法,并用这两种方法进行超声场模式优化控制仿真.

2 超声场共轭直接合成法及声场控制模式

2.1 超声场共轭直接合成法

超声场共轭直接合成^[6,7]是通过声场能量分布形式的设定(如设定符合传热特点的多点聚焦形式)然后通过逆向的方法来求得阵元的驱动信号.这种直接合成法所基于的原始公式是简谐信号在空间的复数声压是由瑞利索莫费尔德积分(Reyleigh-Sommerfeld integral)描述的:

$$P(r) = \frac{i\omega ck}{2\pi} \int_{S'} u(r') \frac{e^{-ik|r-r'|}}{|r-r'|} dS', \quad (1)$$

式中 $i = \sqrt{-1}$, ρ 和 c 分别是介质的密度和声速, $k = \omega/c$ 是波数, S' 是信号源的表面, u 是垂直于声源表面的质点速度, r 和 r' 是观察点和声源点的位置.

如果声源是由 N 个阵元组成,控制点 M 的声压可设定作为已知:

$$P(r_m) = \frac{i\omega ck}{2\pi} \sum_{n=1}^N u_n \int_{S'_n} \frac{e^{-ik|r_m-r'_n|}}{|r_m-r'_n|} dS'_n, \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(批准号 69925101)资助的课题.

$m = 1, 2, \dots, M$.

写成矩阵的形式:

$$H_M u_N = P_M$$

u_N 是阵元的激励(驱动)复数向量. 向量 P_M 是设定的控制点的复数声压 $P_M = [P_M(r_1), P_M(r_2), \dots, P_M(r_m)]$. H_M 是前向传输算子:

$$H_M(m, m) = \frac{i\rho ck}{2\pi} \int_{S'_n} \frac{e^{-ik|r_m - r'_n|}}{|r_m - r'_n|} dS'_n, \quad (3)$$

用最小二乘法估计

$$\hat{u}_N = H_M^+ P_M, \quad (4)$$

H_M^+ 为 H_M 的伪逆.

当 $M < N$, H_M 是满秩时, 则用逆向法求得的驱动向量为

$$\hat{u}_N = H_M^{*T} (H_M \cdot H_M^{*T})^{-1} P_M, \quad (5)$$

H_M^{*T} 是 H_M 的共轭转置. 一旦设定了声场控制点声压 P_M , 由(5)式可逆向求得驱动向量 u_N , 空间任意点的声压可由下式求得:

$$P = H u_N. \quad (6)$$

为使声场能量有效地聚焦在设定点处, 即能量集中在控制点处, 控制点以外的能量尽可能的小, 就要求激励的平均声能

$$I_S = \frac{\rho c}{2N} u_N^{*T} u_N,$$

最大限度地集中于设定点

$$I_{P_M} = \sum_{i=1}^M \frac{P_i^* P_i}{2\rho c},$$

即要求如下的目标函数^[8]:

$$\begin{aligned} J(u_N, P_M) &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N q_n |u_n|^2 - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M v_m |P_m|^2 \\ &= \frac{1}{2} u_N^{*T} Q u_N - \frac{1}{2} P_M^{*T} v P_M, \end{aligned} \quad (7)$$

$Q = \text{diag}[q_1, q_2, \dots, q_N]$, $v = \text{diag}[v_1, v_2, \dots, v_M]$.

在约束条件

$$\hat{u}_N = H_M^{*T} (H_M \cdot H_M^{*T})^{-1} P_M$$

下的最小 J_{\min} 时的 P_M 和 u_N , 其实是要求取合适的 P_M 使 J 最小. 那么如何求取目标函数的最小值, 以往文献甚少论及; 有以不断地试探和修正复数向量 P_M 中各点的幅值和相角获取 J 的小值^[7], 这不是求取全局最优的有效方法. 为此本文随后专门研究求取声场模式控制的全局最优算法研究.

2.2 声场控制模式

为适应不同尺寸的肿瘤或消融的治疗, 可将多

阵元相控阵在聚焦面多点聚焦形式做成如图 1 所示的几种模式. 可按需要选取相应的模式或不同模式的叠加. 一般经优化算法得到相关声场控制模式参数和驱动形式存于控制器中, 根据控制要求, 调用相应结果.

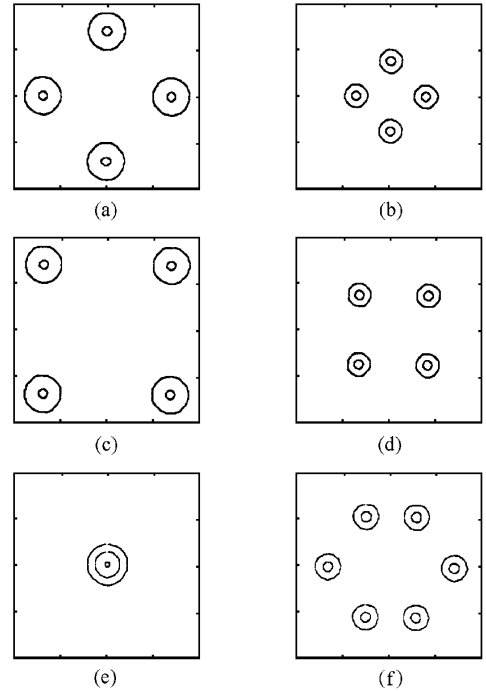


图 1 声场优化模式

3 遗传算法和特征向量算法的超声场模式优化

3.1 特征向量算法优化超声场控制模式

为使能量有效聚焦, 即使能量尽可能集中于设定控制点 P_M , 考虑强度增益 G 为

$$G = \frac{P_M^{*T} P_M}{u_N^{*T} u_N}, \quad (8)$$

以此 G 作为控制声场优化目标函数. 在约束条件 $u_N = H_M^{*T} (H_M \cdot H_M^{*T})^{-1} P_M$ 下(8)式为

$$G = \frac{P_M^{*T} P_M}{P_M^{*T} (H_M \cdot H_M^{*T})^{-1} P_M}. \quad (9)$$

以上(8)和(9)式中的 P_M , u_N , H_M 的含义同 2.1 中所述. 要声场能量有效的聚焦于 P_M 点, 即强度增益 G 取得最大值. 那么取什么样的 P_M 才能使 G 最大? 这是个求全局最优问题. 根据(9)式特点, 可以用特征向量算法求取 G_{\max} 对应的 P_M , 得到全局最优解. 特征向量算法的过程如下:

求取 $H_M H_M^{*\tau}$ 的最大特征值 (H_M 的最大奇异值) 所对应的特征向量, 以此特征向量作为 P_M 取值即可得 G_{\max} , 依此法可得到相当满意的优化声场. 这一方法直接、简洁, 但控制点整体幅值系数可设置, 但各点 (复数分量) 的声场幅值分配关系 (即各控制点的幅值对应比例关系) 不可任意设定, 必须遵循与最大特征值对应的特征向量的匹配关系. 而对单点模式无优势.

3.2 遗传算法优化超声场控制模式

GA 是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机化搜索方法, 具有简单、通用、鲁棒性强及具有隐含并行性, 而适用于分布处理. 现已在组合优化、机器学习、自适应控制等领域应用^[9].

空间声场的优化, 实际是全局寻优问题. 用遗传算法来构造求取全局最优会是行之有效的方法. 我们的问题是设定聚焦面上的控制声强点的幅值 (即设定 P_M 的幅值), 通过改变它们的相角寻求强度增益的最大值. 考虑焦平面声强分布的形状因素, 以以下的强度增益作为构造模式优化遗传算法中的适应度函数

$$Fit_i = G_i = \frac{P_M^{*\tau} P_M - P_M^{*\tau} P_{M'}}{u_N^{*\tau} u_N}, \quad (10)$$

P_M 是模式控制中 M 个控制点 (焦点) 声压所组成的复数向量. M' 是 M 个点, 它的每一点是与模式控制中相应控制点间距相同的邻点. 这样的 M 个控制点相邻点声压所组成的复数向量为 $P_{M'}$.

将 $P_{M'} = H_M u_N$ 和 (5) 式代入 (10) 式得

$$Fit_i = | P_M^{*\tau} (I - (H_M H_M^{*\tau})^{-1} (H_M H_M^{*\tau})^{\tau} \cdot (H_M H_M^{*\tau} \chi H_M H_M^{*\tau})^{-1}) P_M | / [P_M^{*\tau} (H_M H_M^{*\tau})^{-1} P_M], \quad (11)$$

这里我们可以按模式控制对应点设定 P_M 各点的幅值, 改变 P_M 中各点 (复数分量) 的相角, 即 $P_M = [|P_M(1)| \exp(i\theta(1)), |P_M(2)| \exp(i\theta(2)), \dots, |P_M(M)| \exp(i\theta(M))]$ 中的幅值 $|P_M(K)|$ 可设定, 当改变各点相角 $\alpha(K)$ 的组合时, 寻找适应度函数达最大值 Fit_{\max} 时所对应的一组相角值 $\{\theta(1), \theta(2), \dots, \theta(M)\}$.

遗传空间的染色体编码为将各 $\alpha(K)$ 取为串长为 8 的基因片段 (符合数字控制相位的精度), P_M 相角的总串长为 $8 \times M$ 位二进制串作为编码后的个体 (染色体). 经编码后遗传空间规模 $|SN| = 2^{8 \times M}$.

然后经过反复运用选择 (选择算子)、交叉 (交叉算子, 交叉概率 50%)、变异 (变异算子, 变异概率 5%) 的遗传操作完成遗传空间的搜索, 从而找出 Fit_{\max} 所对应的个体 (遗传空间对应的染色体), 把这一个个体译码回去, 即可得到所寻优的 P_M 向量. 用此 P_M 向量, 用逆向公式 (5) 得驱动向量 u_N , 再以此驱动向量驱动整个空间声场 ((6) 式) 即可达到声场模式控制优化结果. 超声场模式控制优化遗传算法程序流程示于图 2.

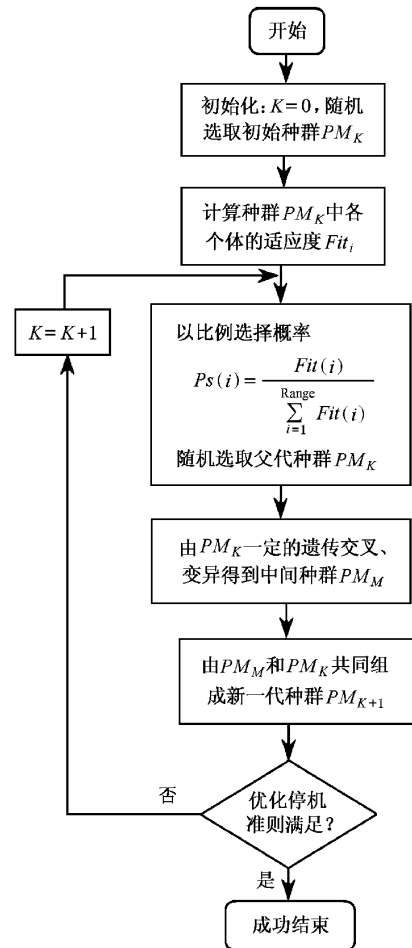


图 2 超声场模式控制遗传算法程序流程

超声场模式控制优化遗传算法与特征向量优化法比较有以下特点: 1) 控制点 (选取的声场控制模式中各点) 声强可任意设定, 而特征向量优化法控制点幅值与特征向量成比例不可设定. 2) 控制点处声强分布较特征向量优化法的更优, 因适应度函数考虑了形状因素. 3) 单点模式同样可以寻取最优, 而特征向量优化法不针对单点模式.

4 声场控制模式的遗传算法和特征向量量法优化仿真

声场控制模式的遗传算法和特征向量法优化适用于不同形状的超声相控阵,如矩形、环形、扇柱形、扇蜗形等阵形.因为矩形阵能产生较均匀的声场,并不像环形阵有二次焦点的情况且可将控制点形式设计成任意形式,而扇蜗形和环形多产生圆环状聚焦,故选择矩形阵列.本课题多阵元相控换能器的结构形式如图3.其外形为圆形直径 $D=82.8\text{ mm}$,阵元数 $N=76$,为矩形,阵元宽度 $\Delta W=4\text{ mm}$.这样的阵元数结构可以产生图1所示各声场控制模式,且旁瓣小.仿真时,多阵元相控换能器驱动功率约为 540 W ,换能器表面声强为 10 W/cm^2 .

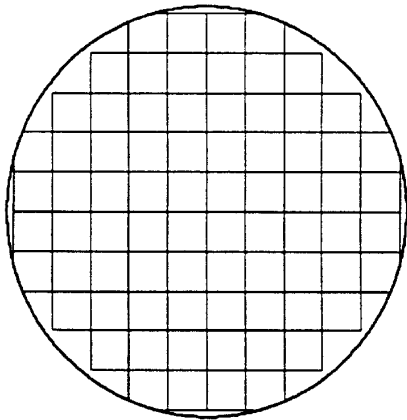


图3 多阵元超声相控换能阵元结构

矩形阵元的声压为^[10]

$$P = \frac{i\rho c \Delta w \Delta h}{\lambda} \sum_{n=1}^N \frac{u_n}{R} e^{-ikR} \operatorname{sinc} \frac{kx'_n \Delta w}{2R} \cdot \operatorname{sinc} \frac{ky'_n \Delta h}{2R},$$

其中 Δw Δh 是阵元的宽度和高度.

$$R = \sqrt{z^2 + (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} \\ = \sqrt{z^2 + x_n^2 + y_n^2}.$$

用遗传算法和特征向量法对图3换能器作声场优化控制模式仿真.仿真时频率 $f=0.6\text{ MHz}$,焦平面设在 $z=100\text{ mm}$ 处.

图4是用特征向量法对声场控制模式图1(a)仿真,在焦平面 $z=100\text{ mm}$ 的声强分布;从图中看到能量集中分布于控制点附近(按模式图1(a));由于幅值对应特征向量,所以两个控制点峰值较大,而另两个峰值很小;此方法在 z 轴(深度)也有良好的

聚焦分布(文中未用图示),当 $z=90\text{ mm}$ 时幅值下降到焦平面时的35%,当 $z=120\text{ mm}$ 时仅为12%.图5是用遗传算法对声场控制模式图1(a)仿真,在焦平面 $z=100\text{ mm}$ 的声强分布.和图4形成对照,图5控制点达相同峰值(按设定),锐度较大些;此遗传算法在 z 轴(深度)也有良好的聚焦分布,从图6和图7可得出此结论,图6是用遗传算法对声场控制模式图1(a)仿真,在 $z=90\text{ mm}$ 的声强分布,当 $z=90\text{ mm}$ 时幅值下降到焦平面时的30%.图7是用遗传算法对声场控制模式图1(a)仿真, $z=120\text{ mm}$ 的声强分布.当 $z=120\text{ mm}$ 时幅值已下降到焦平面时的10%.

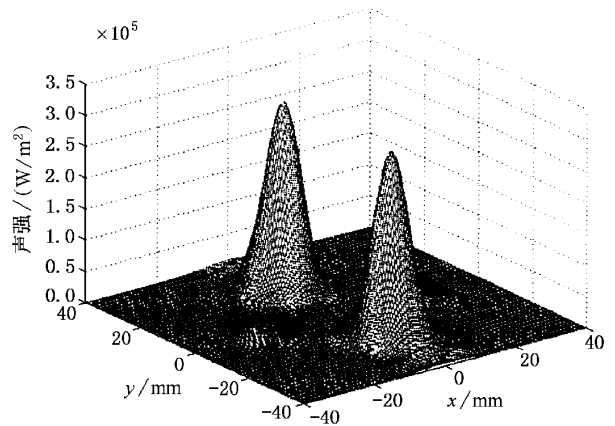


图4 图1(a)模式特征向量法优化, $z=100\text{ mm}$

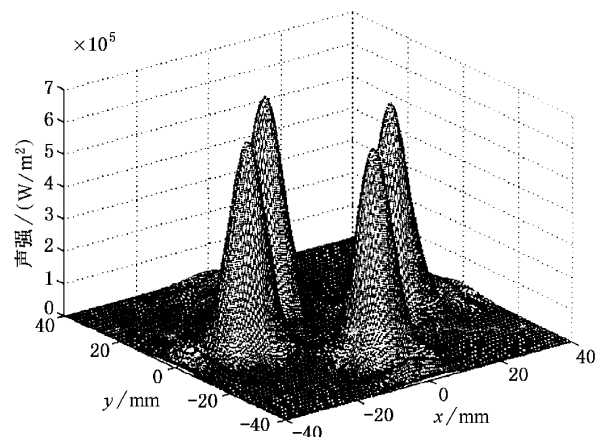


图5 图1(a)模式遗传算法优化, $z=100\text{ mm}$

图8和图9是对声场控制模式图1(c)作的优化仿真.图8是用特征向量法对声场控制模式图1(c)仿真,在焦平面 $z=100\text{ mm}$ 的声强分布.图9是

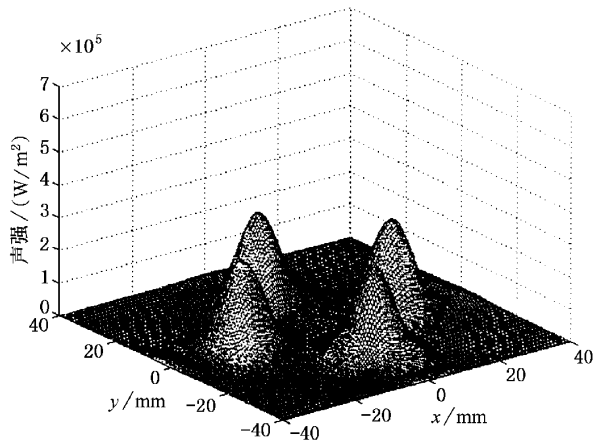


图 6 图 1(a)模式遗传算法优化, $z = 90$ mm

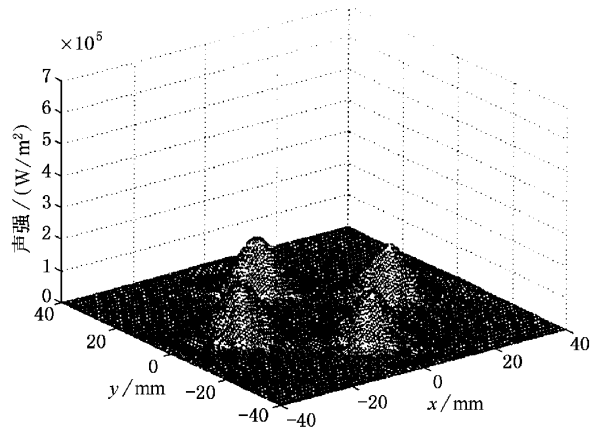


图 7 图 1(a)模式遗传算法优化, $z = 120$ mm

用遗传算法对声场控制模式图 1(c)仿真,在焦平面 $z = 100$ mm 的声强分布.在此模式下,两种算法都得到理想的声强分布,遗传算法的波形更好、锐度较大些.

图 10 和图 11 是对声场控制模式图 1(f)作的优化仿真.图 10 是用特征向量法对声场控制模式图 1(f)仿真,在焦平面 $z = 100$ mm 的声强分布.图 11 是用遗传算法对声场控制模式图 1(f)仿真,在焦平面 $z = 100$ mm 的声强分布.从图中看到能量集中分布于控制点附近,但特征向量法由于幅值对应特征向量,同上述仿真情况类似,图 10 中控制点中两个峰值较大,而另四个则很小,以至于图中显示不出.图 11 控制点达相同峰值(按设定),波形好、锐度较大.这一声场控制模式的仿真再一次显示出遗传算法的特征优势.

以上仿真中,两种算法寻优过程在 Pentium II PC 机上仅需数分钟.仿真结果表明:两种方法都有好的模式优化(控制点)能量聚集特点,而遗传算法

在控制点幅度设置和分布锐度方面优于特征向量法.

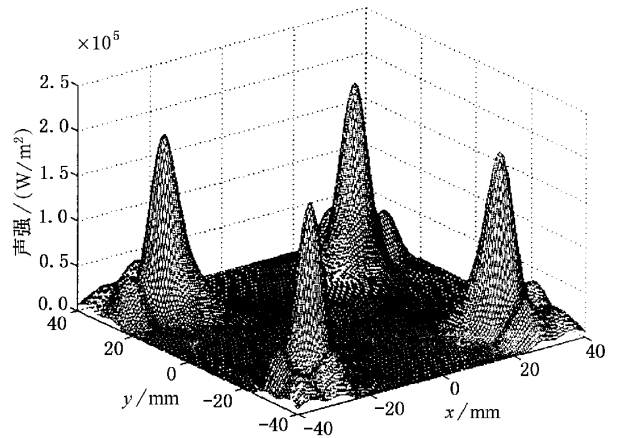


图 8 图 1(c)模式特征向量算法优化, $z = 100$ mm

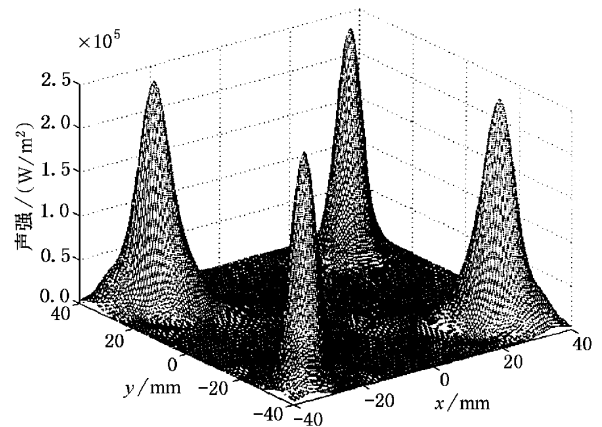


图 9 图 1(c)模式遗传算法优化, $z = 100$ mm

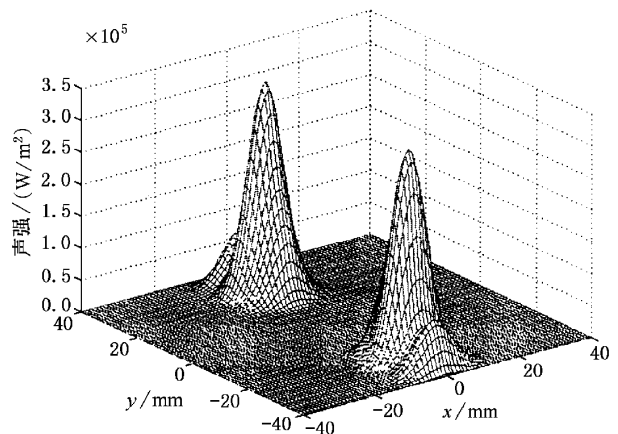


图 10 图 1(f)模式特征向量算法优化, $z = 100$ mm

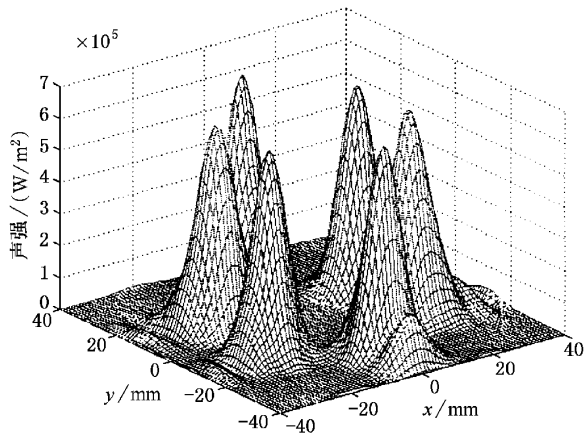


图 11 图 1(f)模式遗传算法优化, $z = 100$ mm

5 结 论

遗传算法和特征向量法是场共轭直接合成声场优化模式控制中求取全局最优的实用算法. 本文的研究解决了优化场的关键问题.

特征向量法直接、简洁;而遗传算法则具有简单、通用、鲁棒性强、优化性能更好的特点.

在各种算法的构造过程中,十分重要的方面是目标函数的合理设置. 本文遗传算法构造中就构造了合理的目标函数.

本文仿真是设定在均匀组织中进行的,遗传算法的构造可以拓宽应用到非均匀组织的声场优化中.

- [1] Chris J. Diederich, Kullervo Hynynen, *Med. & Biol.* **25** (1999) 871.
- [2] Xiaobing Fan, Eduardo G. Moros *et al.*, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* **46** (1999) 830.
- [3] Shin-ichiro Umemura, Charles, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* **39** (1992) 32.
- [4] Emad S. Ebbini, Shin-ichiro Umemura, Mohammed Ibbini, Charles A. Cain, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* **35** (1988) 561.
- [5] Douglas R. Daum, Kullervo Hynynen, *Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* **46** (1999) 1254.
- [6] Mohammed S. Ibbini, Charles A. Cain, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* **36** (1989) 3.
- [7] Enadd S. Ebbini, Charles A. Cain, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* **36** (1989) 541.
- [8] Hong Wang, Emad Ebbini, Charles A. Cain, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* **38** (1991) 521.
- [9] Guo-liang Chen *et al.*, *Genetic Algorithm and Its Application* (Peoples Post and Communication Publish Co., 1996) [in Chinese] [陈国良等, 遗传算法及其应用(人民邮电出版社, 1996)].
- [10] Kenneth B. Ocheltree, Leon A. Frizzell, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* **36** (1989) 242.

STUDY ON THE OPTIMAL FIELD PATTERN CONTROL TO THE FIELD CONJUGATE DIRECT SYNTHESIS OF PHASED-ARRAY ULTRASOUND HYPERTHERMIA*

LU MING-ZHU WAN MING-XI SHI YU

(*Department of Biomedical Engineering and Instrumentation, School of Electronics and Information Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(Received 18 May 2000; revised manuscript received 27 August 2000)

ABSTRACT

This paper mainly deals with problems of optimal field pattern control to the field conjugate direct synthesis of phased-array ultrasound hyperthermia. First, the rational optimal objective function for acoustic field pattern is put forward. Then, two optimal algorithms for global optimization are proposed. One is the genetic algorithm for constructing acoustic field pattern control and the other is the eigenvector algorithm for the same purpose. The simulation is performed with these two algorithms, genetic algorithm and eigenvector algorithm. Eventually, the objective of optimal field pattern control is achieved successfully. The genetic algorithm has better characteristics as compared with the eigenvector algorithm.

Keywords : optimization, genetic algorithm, ultrasound phased array, hyperthermia

PACC : 8760B, 0270

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69925101).