

基于退火遗传算法的四阶带通箱设计

董永政, 周静雷, 沈 勇

(南京大学声学研究所, 近代声学国家重点实验室, 江苏南京 210093)

摘要: 四阶带通式扬声器系统对扬声器单元参数和箱体参数的配合要求较高, 设计复杂。文章中将模拟退火算法和遗传算法相结合, 提出了运用具有全局搜索能力的模拟退火遗传算法(SAGA)来设计四阶带通扬声器系统的方法, 该算法避免了单一遗传算法存在的早熟收敛和搜索效率较低等问题, 提高了算法的收敛速度。文章中考虑了声导管泄漏损耗的影响, 并提出了泄漏损耗的 Q_L 值的实际测定方法。测量结果表明理论曲线与实测曲线相吻合, 说明模拟退火遗传算法能达到设计要求。

关键词: 遗传算法; 模拟退火; 四阶带通; 扬声器系统; Q_L 测定

中图分类号: TN912 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2004)02-0109-04

Design of fourth-order band-pass loudspeaker systems based on simulated annealing genetic algorithm

DONG Yong-zheng, ZHOU Jing-lei, SHEN Yong

(Institute of Acoustics, State Key Laboratory of Modern Acoustics, Nanjing University, Jiangsu Nanjing 210093, China)

Abstract: Coordination of parameters is required in the design of fourth-order band-pass loudspeaker systems, making the design process complicated. In this article, the simulated annealing genetic algorithm (SAGA) which combines simulated annealing and genetic algorithm is used to design fourth-order band-pass loudspeaker systems. SAGA has the ability of overall searching and avoids the premature convergence and low efficiency in the search. The algorithm speeds up convergence. The effect of leakage losses is considered and a method to measure the Q value of leakage losses is proposed. A comparison of measured data and the theoretical curve shows that the SAGA method can meet the design requirements.

Key words: genetic algorithm; simulated annealing; fourth-order band-pass; loudspeaker systems; measurement of Q_L

1 引言

近几年来, 家庭影院迅速普及。在扬声器系统方面, 能够很好地重放超重低音的带通扬声器系统得到了广泛的应用。四阶带通扬声器系统就是一种基本的声学滤波系统, 该系统对扬声器单元参数和箱体参数等的配合要求较高, 故其分析设计比较复杂。1989年 E. R. Geddes 阐述了该系统的无泄漏损耗的声学响应特性^[1], 随后有人在设计中考虑了声导管的泄漏损耗^[2]和响应的对称性^[3]。对于声导管泄漏损耗的 Q_L 值测量, R. H. Small 提出了倒相

箱的 Q_L 的测量方法^[4,5]。对于四阶箱的声导管泄漏损耗的测量方法未见报道。在算法上国内已有人将遗传算法应用于扬声器系统的滤波器设计^[6]。本文提出了四阶带通扬声器系统的声导管泄漏损耗的 Q_L 值测量方法, 采用了一种具有全局搜索功能的模拟退火遗传算法来优化四阶带通扬声器系统设计。

2 理论方法

2.1 算法理论

模拟退火算法是一种基于热力学的退火原理建立的随机搜索算法。该算法使用基于概率的双向随机搜索技术, 采用 Boltzmann 生存机制, 即若基于邻域的一次操作使当前解的质量提高, 则接收此解为新的当前解, 否则以概率 $\exp(-\Delta x/T)$ 接收相对

当前解来说质量较差的解。其中, Δx 为邻域操作前后解的质量差, T 为退火过程的控制参数。模拟退火是一种全局优化算法。该算法的参数不易控制, 搜索时间较长。

遗传算法是一种以达尔文的自然进化论和孟德尔的遗传变异理论为基础的求解优化问题的仿生类算法^[7], 是一种智能化的全局搜索算法。遗传算法包含选择、交叉、变异等三个主要操作算子。该算法初始时随机产生 N 组解, 每一组解叫一个个体, 这多组解的集合叫做一个种群。然后计算每个个体的适应度, 选择操作使适应度大的个体有较大复制概率, 能加快算法的收敛速度, 交叉操作通过对两父代进行基因交换而产生更优的个体, 变异操作则能给群体带来新的基因, 避免陷入局部最优。就是通过这三种算子的操作, 优化群体一代一代地不断进化, 最终收敛于最优状态。

虽然研究和应用表明遗传算法是一种性能较好的算法, 但其本身却存在以下一些缺陷:

(1) 易出现“早熟收敛”现象。即在进化群体中少数个体的适应度函数值若远大于其它个体, 经过几次迭代之后, 这些个体就占据了整个群体, 进化过程就提前收敛了, 往往达不到最优。(2) 局部寻优能力较差。遗传算法可以以很快的速度搜索到最优解附近, 但进一步达到最优解的速度则很慢。

本文通过将模拟退火算法和遗传算法结合, 用退火算法的 Boltzmann 机制接收交叉和变异后的个体, 这样使父代和子代之间进行竞争, 有利于父代中优良个体的保留, 减轻了遗传算法的选择压力。模拟退火遗传算法在早期有较强的全局搜索能力, 避免了早期收敛问题, 同时群体中的最优解得到保留, 在后期退火算法的温度逐渐下降, 接收劣质解的概率越来越小, 较好的爬山性能加快了后期收敛速度。

2.2 系统的响应函数及适应度函数的确定

四阶带通扬声器系统的结构简图和简化的低频等效声学类比线路如图 1、图 2 所示。其中, E_g 、 R_g 分别为功放的开路电压和内阻; BL 、 R_E 、 S_D 分别为扬声器单元的机电耦合因子、直流电阻和有效辐射面积; R_{AS} 、 C_{AS} 、 M_{AS} 分别为扬声器振动系统的等效声阻、声顺和声质量; R_{AR1} 、 M_{AR1} 分别为振膜的辐射声阻、声抗; M_{AB} 为振膜背面的声质量负载; M_{AP} 为声导管的声质量; M_{AR2} 为声导管前面的辐射声质量; C_{AB1} 为封闭腔体的声顺; C_{AB2} 为开口箱体的声顺; R_{AL} 为声导管泄漏声阻。令 $M_A = M_{AS} + M_{AR1}$

+ M_{AB} ; $R_A = B^2 L^2 / (R_g + R_E) S_D^2 + R_{AS} + R_{AR1}$; $M_{AT} = M_{AP} + M_{AR2}$ 。设 f_s 为扬声器单元的谐振频率, Q_T 为扬声器单元的总品质因数。设定如下参数:

$$\begin{cases} \alpha = C_A / C_{AB2} \\ \beta = C_{AS} / C_{AB1} \\ C_A = C_{AS} / (1 + \beta) \\ T^2_{\#} / \omega_B^2 = C_{AB2} M_{AT} \\ T^2_{\#} / \omega_S^2 = C_{AS} M_A \\ T^2_{\#S} / \omega_{NS}^2 = C_A M_A = T^2_{\#} (1 + \beta) \\ Q_L = \omega_B C_{AB2} R_{AL} \\ Q_{NT} = 1 / (\omega_{NS} C_A R_A) = Q_T (1 + \beta)^{1/2} \end{cases} \quad (1)$$

我们就可以得到归一化声压响应函数:

$$G(s) = \frac{s^2 T^2_{\#S}}{D(s)} \quad (2)$$

其中

$$D(s) = s^4 T^2_{\#} \omega_S^2 s^3 (T^2_{\#} T_{NS} / Q_{NT} + T_B T^2_{NS} / Q_L) + s^2 [(\alpha + 1) T^2_{\#} T_B T_{NS} / Q_L Q_{NT} + T^2_{\#S} s (T_B / Q_L + T_{NS} / Q_{NT}) + 1$$

那么非归一化响应即为:

$$H(s) = E \rho \cdot G(s) / (2 \pi M_A P_{REF}) \quad (3)$$

其中 $E = E_g BL / [(R_g + R_E) S_D]$, ρ 为空气密度, $P_{REF} = 2 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 。

定义误差函数为方差:

$$e(x) = \sum_i |20 \lg(H(j \omega_i, x)) - F(j \omega_i)|^2 \quad (4)$$

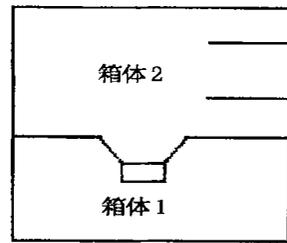


图 1 四阶带通扬声器系统结构简图

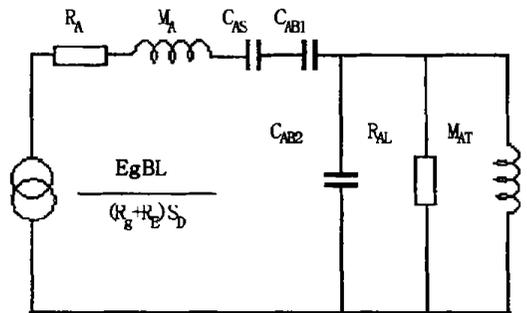


图 2 四阶带通扬声器系统的简化低频等效声学类比线路图

其中 i 是离散点, $F(s)$ 为目标响应, x 为给定的一组参数值。

在适应度函数选择上, 我们采用了归一化的随进化代数变化的策略。即 $f(x) = 1/(1 + e(x) \cdot k)$, k 为参数, 随着进化代数的增大而增大。这样 k 的增大扩大了进化后期各个体之间的适应度的相对差值, 有利于选择适应度大的个体。

2.3 运算过程

整个的模拟退火遗传算法过程如下:

- (1) 初始化控制参数: 设置群体规模 N ; 交叉概率 P_C ; 变异概率 P_M ; 退火初始温度 T_0 , 温度冷却参数 α 。
- (2) 在变量设定范围内随机产生初始种群。
- (3) 对现有群体进行如下操作: ① 计算群体中每个个体的适应度 $f(x_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$; ② 按照赌轮机制实施选择操作, 适应度大的个体的被选择概率大; ③ 随机选出两个个体 x_i 和 x_j 作为父代, 按照概率 P_C 进行交叉操作, 产生两个新的个体 x'_i 和 x'_j , 计算其适应度 $f(x'_i)$ 和 $f(x'_j)$, 若 $f(x'_i) > \max\{f(x_i), f(x_j)\}$, 则接收新解, 否则以概率 $\min\{1, \exp((f(x'_i) - f(x_i))/T_k)\}$ 接收新解。对 x'_j 进行同样操作; ④ 对交叉后的个体以概率 P_M 进行变异操作, 按 ③ 中的方法接收变异后的新解。
- (4) 如果满足收敛条件, 则退出进化过程, 否则令 $T_{K+1} = \alpha T_K$, 重复步骤 (3)。

2.4 泄漏损耗 Q_L 的测定

四阶带通扬声器系统典型的电阻抗曲线如图 3 所示。阻抗曲线上的两个峰的频率值分别为 f_L 和 f_H , 两峰之间谷点的频率为 f_M 。一般情况下, 音箱的共振频率 $f_B \approx f_M$ 。

改变 Q_L , 通过数值模拟可以知道, Q_L 的大小影响峰和谷的高度, 对峰谷对应的频率 f_L 、 f_H 和 f_M 几乎没有影响。

我们先写出不考虑泄漏损耗 (Q_L 影响很小, 可忽略) 时的阻抗表达式:

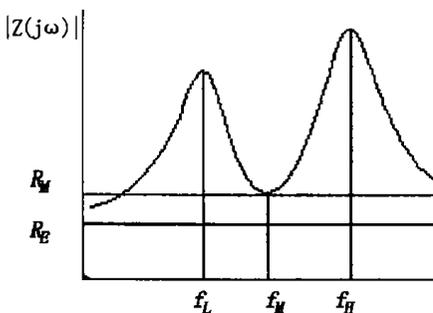


图 3 四阶带通扬声器系统典型的电阻抗曲线

$$Z(j\omega) = R_E + R_{ES} [j(\omega T_{NS}/Q_{NMS})(1 - \omega^2 T_B^2)] / \{ \omega^4 T_B^2 T_{NS}^2 - \omega^2 [(\alpha + 1) T_B^2 + T_{NS}^2] + 1 + j(\omega T_{NS}/Q_{NMS})(1 - \omega^2 T_B^2) \} \quad (5)$$

其中: $Q_{NMS} = 1/(\omega_{NS} C A R_{AS}) = Q_{MS}(1 + \beta)^{1/2}$ (6)
 Q_{MS} 是扬声器单元的力阻抗在谐振频率处的品质因数, R_{ES} 是 R_{AS} 的等效电阻抗。

当 $Z(s)$ 的相位为零时出现极值, 显然, 当 $\omega = 1/T_B$ 时 $Z(j\omega)$ 有极小值。 f_L 和 f_H 为 $Z(j\omega)$ 取极大值时对应的频率。计算可得:

$$\begin{cases} h = f_B/f_{NS} \\ f_{NS} = (f_L \cdot f_H)/f_B \\ \alpha = (f_H + f_B)(f_H - f_B)(f_B + f_L)(f_B - f_L)/(f_L^2 f_H^2) \end{cases} \quad (7)$$

考虑有泄漏损耗时, 系统的电阻抗为:

$$Z(j\omega) = R_E + \frac{R_{ES} Z_R}{R_{ES} + Z_R} \quad (8)$$

其中:

$$Z_R = R_{EL} (\alpha T_B Q_L) [-\omega^2 T_B/Q_L + j\omega(1 - \omega^2 T_B^2)] / \{ \omega^4 T_B^2 T_{NS}^2 - \omega^2 [(\alpha + 1) T_B^2 + T_{NS}^2] + 1 + j(\omega T_B/Q_L)(1 - \omega^2 T_B^2) \}$$

R_{EL} 为 R_{AL} 的等效电阻抗值。当系统的电阻抗出现极小值时对应的频率 $f_M \approx f_B$, 相位为零, Z_R 表现为电阻特性, 即为 R_{EL} , 则 $Z(j\omega_B) = Z(j\omega_M) = R_E + R_{ES} R_{EL} / (R_{ES} + R_{EL}) = R_M$, 由式 (1)、式 (5) ~ (8) 式计算可得:

$$Q_L = \frac{h}{\alpha} \left(\frac{1}{Q_{NES}(R_M/R_E - 1)} - \frac{1}{Q_{NMS}} \right) \quad (9)$$

其中: $Q_{NES} = Q_{ES}(1 + \beta)^{1/2}$ (10)

Q_{ES} 是扬声器单元的电阻抗在谐振频率处的品质因数。只要测得 Q_{ES} 和 β , 就可知 Q_{NES} , Q_L 即可求出。

3 设计实例与实验测试

以输入的声压响应曲线为目标响应, 选取一只扬声器单元, 参数可测得, 声导管的直径 D_P 已知, 应用模拟退火遗传算法来优化其它参数 (Q_L 值设定为 7), 得到了一组参数值, 主要参数如下:

扬声器单元参数: $f_S = 28.7 \text{ Hz}$, $Q_{TS} = 0.37$, $Q_{ES} = 0.45$, $Q_{MS} = 2.28$, $V_{AS} = 129 \text{ l}$;

音箱参数: $V_{AB1} = 32 \text{ l}$, $V_{AB2} = 28 \text{ l}$;

声导管参数: 管长 $L_P = 100 \text{ mm}$, 管直径 $D_P =$

104 mm。

利用得到的参数值制作了一只四阶带通箱, 实验测得的声压响应曲线和电阻抗曲线如图 4、图 5 中实线所示, 虚线为理论曲线。

由图 4 可见, 声压频率响应曲线的理论值与实际测量值在 200Hz 以下的低频段是一致的。

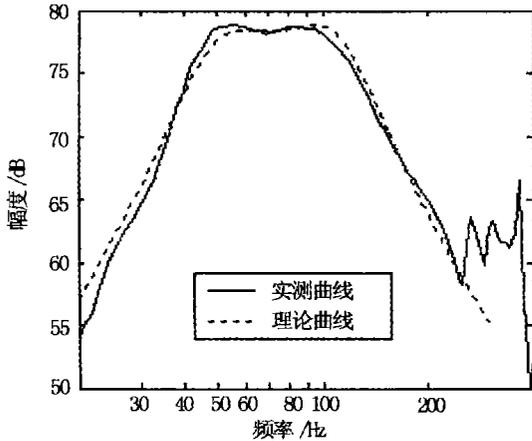


图 4 声压响应曲线

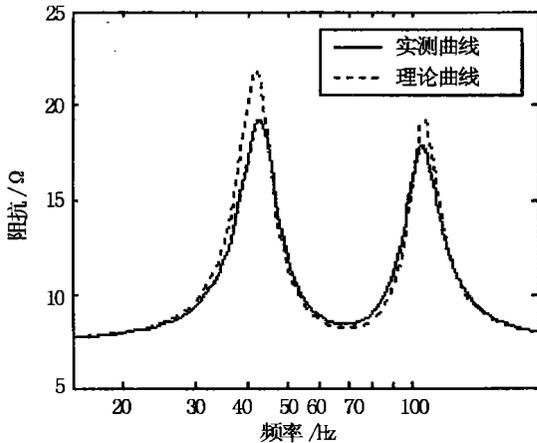


图 5 电阻抗曲线

由图 5 中的实测曲线我们可以得到:

$f_L = 41 \text{ Hz}$, $f_H = 104 \text{ Hz}$, $f_M = 65 \text{ Hz}$, $R_M = 8.7 \Omega$;

根据式(7)计算可得: $h = 0.99$, $\alpha = 0.92$, 再由式(6)和式(10)求出 $Q_{NES} = 1.0$, $Q_{NMS} = 5.1$, 然后把 h 、 α 、 Q_{NES} 和 Q_{NMS} 的值代入式(9)即可求得 Q_L 的值为 6.2。虽然声导管泄漏损耗的 Q_L 值大小难以精确控制, 但可以通过增加泄漏损耗, 使 Q_L 向取较小值的方向变化, 通过测量发现, Q_L 的变化对 f_L 、

f_H 和 f_M 基本上没有影响, 只对 R_M 和阻抗的峰值有影响。图 5 中的理论曲线与实测曲线的差别也说明了这一点, 图中理论曲线与实测曲线的 f_L 、 f_H 和 f_M 是一致的, 极值大小的差别是由于 Q_L 的设定值与实际值不同造成的。而由图 4 的声压频率响应曲线我们可以看到, Q_L 的微小差别对声压响应的影响不大。

以上实测曲线是在南京大学声学所消声室测得。使用仪器如下: B&K 2012 音频分析仪、B&K 2706A 功率放大器、B&K 4191 传声器和 B&K 2669 前置放大器。

4 结 论

本文将模拟退火遗传算法应用于四阶带通扬声器系统设计中, 考虑了泄漏损耗的影响, 同时提出了在实际测量中泄漏损耗 Q_L 值的测定方法。实验测量的结果说明, 理论曲线与实测数据相吻合, 说明模拟退火遗传算法应用于四阶带通扬声器系统设计中是可行的, 能很好地达到设计要求。

参 考 文 献

- [1] Geddes E R. An introduction to band-pass loudspeaker systems [J]. J. Audio Eng. Soc., 1989, 37(5): 308-342.
- [2] D' Appolito, Joseph A. Designing symmetric response band-pass loudspeakers [A]. Proceeding of the 91st Convention of the Audio Engineering Society [C]. New York, 1991. Preprint 3205.
- [3] Grzegorz P Matusiak, Andrzej B Dobrucki. Fourth-order symmetrical band-pass loudspeaker systems [J]. J. Audio Eng. Soc., 2002, 50(1/2): 4-18.
- [4] Small R H. Vented-Box loudspeaker systems (Part II): Large-signal analysis [J]. J. Audio Eng. Soc., 1973, 21(6): 438-444.
- [5] Small R H. Vented-box loudspeaker systems Part IV: Appendices [J]. J. Audio Eng. Soc., 1973, 21(8): 635-639.
- [6] 屠晶石, 沈勇. 遗传算法在两分频扬声器系统设计中的应用[J]. 声学技术, 2001, 20(3): 117-119.
- [7] 陈国良, 王熙法. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 邮电出版社, 1996. 1-3.