

文章编号:1004-7220(2009)05-0414-04

基于神经网络的人中耳内边界参数识别

刘迎曦¹, 李 生¹, 孙秀珍^{1,2}

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024; 2. 大连医科大学第二临床附属医院 耳鼻咽喉科, 大连 116025)

摘要: **目的** 建立识别中耳内边界的方法。**方法** 利用 CT 获取耳部结构并建立数值模型; 利用 Matlab 建立神经网络识别程序。**结果** 利用数值模型在鼓膜外侧施加 105 dB 声压, 进行谐波响应分析获取训练样本; 利用训练成熟的网络识别了中耳内边界参数。**结论** 数值识别结果表明, 所建的中耳内边界参数识别方法具有良好的识别精度和较快的收敛速度。

关键词: 神经网络; 中耳; 数值模型; 内边界条件; 参数识别

中图分类号: R318.01 **文献标志码:** A

Internal boundary parameters identification of human middle ear with neural network

LIU Ying-xi¹, LI Sheng¹, SUN Xiu-zhen^{1,2}. (1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. ENT Department, The Second Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116025, China)

Abstract: Objective To study the method of internal boundary parameters identification of middle ear. **Method** The numerical model is created using CT technology. Based on Matlab tools, the neural network for identifying internal boundary is proposed. **Result** The uniform pressure of 105 dB is applied at the outside of the tympanic membrane, and the harmonic analysis is calculated on the model to take the training samples. The internal condition parameters are identified using the good neural network. **Conclusions** The investigation shows that the inverse method reveals a fast convergence and a high degree of accuracy.

Key words: Neural network; middle ear; Numerical modeling; Internal boundary condition; Parameter identification

内耳位于颞骨岩部内,被内外淋巴液充满,结构细微复杂。其卵圆窗被镫骨底板封闭,接受外界声音传递到镫骨底板的振动引起腔内液体的振动,刺激感音细胞产生听觉。近年国内外学者利用有限元方法对于中耳传声机制的研究逐渐广泛^[1-3],但对于内耳对中耳传声机制的作用无明确的研究方法。内耳埋于头骨内,对活体进行观察存在困难。文献[4]中提及了内耳三维重建的研究与意义,但如果

将内耳实体模型加入到中耳数值模型中,则整个计算过程涉及声场、结构及流体的相互耦合作用,计算程序复杂费时;且内耳结构异常复杂微小,普通的螺旋 CT 无法获得重建数据,目前比较成熟的方法为组织切片,但组织切片周期长,风险大,而且样本易被破坏。人工神经网络是在现代神经科学研究的基础上,依据人脑基本功能特征,模仿生物神经系统的功能和结构而发展起来的一种信息处理体系。它依

收稿日期:2009-03-30; 修回日期:2009-05-06

基金项目:国家自然科学基金(10672036,10872043)

作者简介:刘迎曦(1944-),教授,研究方向:生物医学工程。

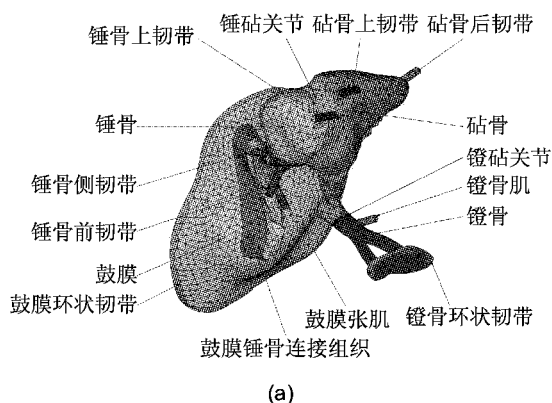
通讯作者:李生,博士生, E-mail: lishengdlut@163.com。

靠过去的经验来学习,具有较强的容错性,对不完全信息和带噪声的信息具有良好的适应性,对非线性关系的模拟更具优越性。目前神经网络已广泛应用于智能识别、自动控制、图像与语言处理等方面^[5-7]。

本文在文献[2]的基础之上,将中耳数值模型和神经网络识别程序相结合。将内耳对中耳传声的作用简化为质量单元和阻尼弹簧单元,作为中耳的内边界条件施加在镗骨底板外侧;利用中耳数值模型计算神经网络所需的训练样本;将内耳作用下自拟镗骨底板位移测量曲线作为识别内边界参数的基础,利用训练好的神经网络识别相应的参数。通过数值模拟及参数识别,说明本文所提出的研究中耳内边界条件的方法简便可行且精确度高,这对于人中耳传声机制进一步研究有重要的指导意义和应用价值。

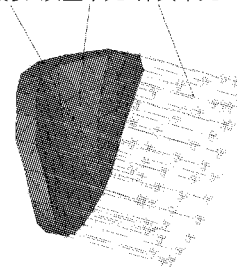
1 数值模型建立

建立正常人耳的数值模型,具体步骤和数值模型校核参阅文献[2]。对活体样本测试镗骨底板位移曲线存在困难,一般对尸体样本进行测试,声音刺激施加在鼓膜上,而且需要将中耳腔打开以方便观测镗骨底板的运动情况,因此,中耳数值模型仅包括鼓膜、听骨链、韧带及肌肉,如图1(a)所示。本文将内耳对中耳的复杂作用简化为质量单元 Mass21、带阻尼的弹簧单元 Combin14,作为中耳数值模型的内边界条件作用于镗骨底板,如图1(b)所示。利用 ANSYS 软件实现中耳数值模拟,在鼓膜外侧施加 105 dB 声压荷载,计算 200 ~ 8 000 Hz 频率段内的谐响应分析;在 200 ~ 1 000 Hz 频率段内,频率间隔为 100 Hz,在 1 ~ 8 kHz 频率段内,频率间隔为 1 kHz;从小到大共计 16 个频率点,同时也作为神经网络输入层的神经元节点。



(a)

镗骨底板 质量单元 弹簧单元



(b)

图1 中耳数值模型 (a) 耳部结构有限元模型; (b) 内边界

Fig.1 Numerical model of middle ear (a) Finite element models of ear components; (b) Internal boundary condition

2 用于内边界参数识别的 BP 神经网络

人工神经网络的智能化特征与能力使其应用领域日益扩大,潜力日趋明显。许多用传统信息处理方法无法解决的问题通过采用人工神经网络后取得了良好的效果。人工神经网络是由人工神经元互联组成的网络,从微观结构和功能上对人脑的抽象和简化,是模拟人类智能的一条重要途径,反映了人脑功能的若干基本特征,如并行信息处理、学习、联想、模式分类、记忆等。目前,已发展了几十种神经网络,其中 BP 神经网络由于其结构简单,具有较强非线性映射能力,是应用最广泛的一类神经网络。

对于如图 2 所示的 BP 神经网络,神经网络的输出为:

$$y_i = f\left(\sum_{j=1}^{N_h} (\mu_{ij} f(\sum_{k=1}^{N_i} \nu_{jk} x_k + \theta_j)) + \lambda_i\right) \quad (1)$$

式中, μ_{ij} 为隐含层与输出层神经元连接权值; ν_{jk} 为输入层与隐含层之间的连接权值; θ_j 和 λ_i 分别为隐含层和输出层神经元的阈值; f 为传递函数; x_k 为输入层的输入; N_i, N_h 分别为输入层和隐含层神经元的个数。定义的目标函数为:

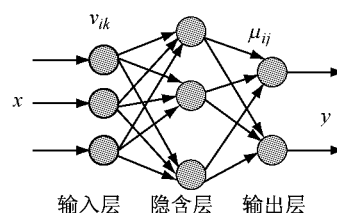


图2 神经网络模型

Fig.2 Neural network model

$$E(w) = \sum_{p=1}^P \left(\sum_{i=1}^{N_o} (y_i^p - o_i^p) \right)^2 \quad (2)$$

式中, $E(w)$ 为目标函数; w 为神经网络的广义权值, 它包括隐含层与输出层神经元连接权值和输入层与隐含层之间的连接权值以及神经网络的阈值; N_o 为输出层神经元的个数; y_i^p 和 o_i^p 分别表示神经网络的实际输出和期望输出; P 是训练样本的数目。

本文利用 Matlab 编制了用于内边界参数识别的单层 BP 神经网络程序, 由于镮骨位移曲线有 16 个频率点, 故网络输入层的神经元为 16 个。根据 Kolmogorov 定理, 可知网络中间层取 33 个, 输出元素为质量、弹簧刚度及弹簧阻尼, 因此, 输出层神经元有 3 个。网络神经元传递函数采用 S 型正切函数 tansig, 网络所用训练函数为 traingdx, 该函数以梯度下降法进行学习, 并且学习效率是自适应的。网络设定训练最大次数为 1 000, 训练目标为 1×10^{-10} 。

3 训练样本

因为内耳对镮骨底板的影响有限, 所以内边界参数值的选择不能使镮骨底板位移曲线变化过大, 从而失去其生理意义。本文从小到大分别选择了 3 个内边界参数, 然后将这 3 个参数随机搭配, 以此体现训练样本选择的全面性。内边界参数质量单元质量常数和弹簧单元刚度、阻尼系数如表 1 所示。建立了用于内边界参数识别的 BP 神经网络。采用图 1 所示的中耳数值模型建立了 11 组训练样本, 其中样本 1~10 用作神经网络训练, 样本 11 未参与训练作为测试样本, 以验证神经网络识别方法的有效性。

表 1 神经网络训练样本

Tab.1 The training samples of neural network

样本	刚度系数/($N \cdot m^{-1}$)	阻尼系数/($Nmm \cdot s^{-1}$)	m/mg
1	3	4	1.1
2	8	2	0.5
3	5	8	0.7
4	10	5	0.3
5	1	3	0.8
6	6	7	0.2
7	11	1	0.6
8	4	10	0.9
9	7	6	0.1
10	9	11	1.0
11	2	9	0.4

内边界条件对镮骨位移影响的曲线如图 3 所示。

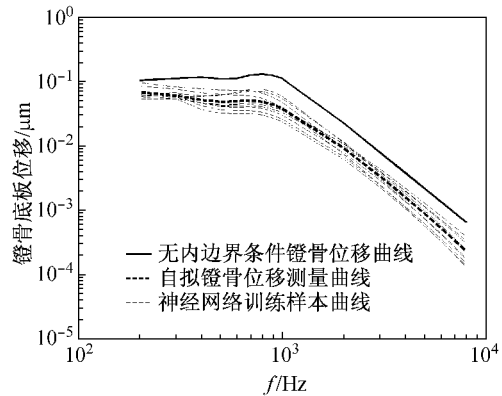


图 3 内边界条件对镮骨位移的影响

Fig.3 Effects of internal boundary condition on stapes footplate displacements

4 结果与讨论

将样本代入编制的神经网络程序, 训练目标函数变化曲线如图 4 所示, 迭代 340 次后, 样本目标值达到设定要求, 目标函数设定收敛值为 1×10^{-10} , 实际网络训练收敛值为 8.615×10^{-11} 。当神经网络训练达到要求的目标函数之后, 训练结束, 而训练好的神经网络权值保存在已有的神经网络之中。用训练好的神经网络对样本 11 进行测试, 以检验算法的有效性。样本 11 的内边界识别参数分别为: 刚度系数 $2.02 N/m$, 阻尼系数 $8.99 N \cdot mm/s$, 质量为 $0.402 mg$; 样本 11 的内边界设定参数分别为: 刚度系数 $2 N/m$, 阻尼系数 $9 N \cdot mm/s$, 质量为 $0.4 mg$ 。通过比较样本 11 内边界识别参数和设定参数可知, 所建神经网络程序具有足够的精确性, 可以用来识别自拟镮骨底板位移测量曲线的内边界参数。利用训练好的神经网络识别自拟测量曲线内边界参数的结果为: 刚度系数 $5 N/m$, 阻尼系数 $0.497 N \cdot mm/s$, 质量为 $0.42 mg$ 。将神经网络的识别结果代入中耳数值模型, 计算镮骨底板位移振动曲线并和自拟测量曲线相比较, 如图 5 所示。由图可知, 利用神经网络识别的内边界参数基本反映了自拟测量的内耳对镮骨底板的影响, 在内边界参数的作用下, 可以将中耳数值模型用于声音在中耳结构中传递的相关研究。

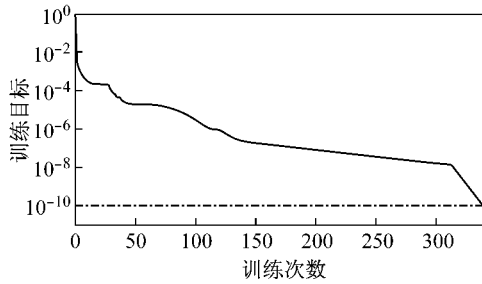


图4 目标函数收敛过程

Fig.4 The convergence progress of goal function

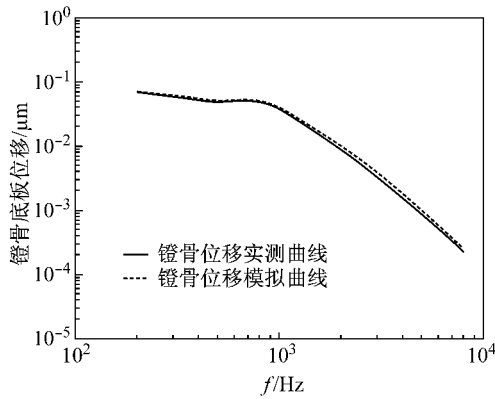


图5 镫骨位移曲线计算值和实测值比较

Fig.5 Comparison of the simulated displacements curves at the stapes footplate with the measured data

5 结论

内耳对中耳声音传导的影响通过镫骨底板作用。鉴于内耳作用直接测量存在困难,本文将内耳

复杂结构对中耳镫骨底板的作用简化为质量、弹簧刚度和弹簧阻尼 3 个参数,作为中耳数值模型的内边界条件施加于镫骨底板外侧;将中耳数值模型和神经网络识别程序相结合,通过中耳数值模型获取神经网络训练所需的样本,利用训练成熟的神经网络来识别自拟内耳对镫骨影响测量曲线所对应的内边界条件的 3 个参数,通过比较内耳对镫骨底板自拟测量曲线和识别参数作用下模拟曲线,说明本文所提出的方法在识别内耳复杂结构对中耳传声机制的影响是可行的,为研究完备中耳传声机制提供一种操作简单、结果可靠的研究方法。

参考文献:

- [1] Gan RZ, Feng B, Sun Q. Three-dimensional finite element modeling of human ear for sound transmission [J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2004, 32: 847-859.
- [2] 刘迎曦, 李生, 孙秀珍. 人耳传声数值模拟[J]. *力学学报*, 2008, 40: 107-113.
- [3] Liu YX, Li S, Sun XZ. Numerical analysis of ossicular chain lesion of human ear [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2009, 25: 241-247.
- [4] 刘波, 高秀来. 耳蜗三维重建的研究及意义[J]. *解剖科学进展*, 2005, 11(1): 65-69.
- [5] 李守巨, 张军, 刘迎曦, 等. 基于改进神经网络的建筑结构损伤识别方法研究[J]. *华中科技大学学报(城市学院版)*, 2008, 25: 95-98.
- [6] 王家军. 基于自回归小波神经网络的感应电动机滑模反推控制[J]. *自动化学报*, 2009, 35: 1-8.
- [7] 张赞超, 夏顺仁, 段会龙. 基于细胞神经网络的尿沉渣图像分割[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2009, 42: 2139-2144.