

◇ 研究报告 ◇

# 入耳式耳机腔体结构的模型与优化

蒋佳为 夏洁 沈勇<sup>†</sup>

(南京大学声学研究所 近代声学教育部重点实验室 南京 210093)

**摘要** 耳机的频响是由单元和腔体结构共同决定的。现有的耳机腔体结构仿真多采用集总参数模型,这类模型在高频段存在缺陷。该文在入耳式耳机的腔体结构仿真中引入基于传输线理论的声学模型,与传统模型相比,考虑损耗的传输线模型可提高入耳式耳机 5 kHz~10 kHz 频响仿真的准确性。在此基础上,优化算法提出改善耳机中高频频响的出声管设计方法。

**关键词** 传输线, 频响仿真, 优化

中图法分类号: O42 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2018)02-0196-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.02.002

## The simulation of frequency response of in-ear headphones

JIANG Jiawei XIA Jie SHEN Yong

(Key Laboratory of Modern Acoustics, MOE, and Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract** The cavity structure of insert earphones will affect the frequency response. The existing earphone structure simulation model is mainly based on the lumped-parameter model. To improve the simulation precision of the lumped-parameter model in high frequency range, the simulation of the cavity structure based on the transmission line model is proposed. The results show that the simulation based on the transmission line model is closer to the measured results than lumped-parameter model ranging from 5 kHz to 10 kHz. Based on the model, the optimization algorithm is proposed to improve the design of the high frequency response of the headphone.

**Key words** Transmission line, Frequency response simulation, Optimization

2017-05-21 收稿; 2017-07-21 定稿

作者简介: 蒋佳为 (1992-), 男, 江苏常熟人, 硕士研究生, 研究方向: 声学。

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: yshen@nju.edu.cn

### 1 引言

近年来，入耳式耳机市场发展迅速，消费者对入耳式耳机音质的要求也越来越高，如何准确仿真入耳式耳机频响成了研究者的一大课题。在对耳机频响仿真时，研究者通常会借鉴扬声器的电力声类比电路理论<sup>[1-3]</sup>。Borwick等<sup>[4]</sup>总结了耳机的结构类比集总参数模型，给出了不同形状小管和腔体的声学仿真方法。后来Slotte<sup>[5]</sup>提出了小管长度小于1/4波长时的修正模型。Huang、Kim、Bai和Tsai等<sup>[6-9]</sup>对于入耳式耳机的研究也都使用了结构类比集总参数模型。

Borwick提出的结构模型和Slotte的改进模型在结构尺寸远小于声波波长时，可以较好地仿真频响。但在高频段，入耳式耳机的结构尺寸已不再远小于声波波长，集总参数模型的仿真误差较大。考虑到入耳式耳机的结构通常为管状，管壁是刚性的，假设管道只有在声传播方向的尺寸不再远小于声波波长，声波在入耳式耳机结构中的传播可以看成是一维平面波，可以利用声传输线理论对入耳式耳机进行结构建模，以提高耳机频响在高频段的仿真准确性。

本文介绍入耳式耳机的仿真方法，分析传输线理论在入耳式耳机腔体结构仿真中的运用，对比传输线模型与集总参数模型的仿真结果。在仿真的基础上，优化算法提出改善耳机中高频频响的出声管设计方法。

### 2 理论分析

本文研究的入耳式耳机采用动铁单元，动铁单元位于耳机前部，单元发出的声波通过由硅胶套包

围的出声管后进入耳道。在用仿真耳测量耳机的频响时，单元与仿真耳之间的结构为入耳式耳机的腔体结构，其横截面图如图1所示。入耳式耳机的频响测量通常选用IEC60318-4型仿真耳，该型号仿真耳测得的是人耳鼓膜处的声压频响。

下面分别介绍动铁单元、腔体结构和仿真耳的仿真方法，分析传输线理论在腔体结构仿真中的运用。

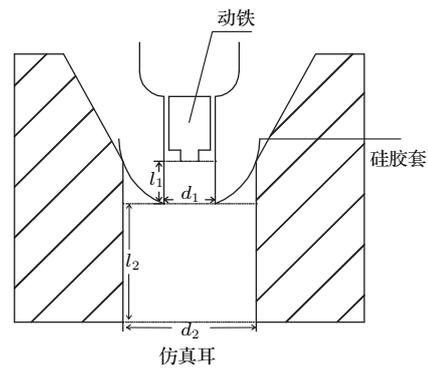


图1 入耳式耳机横截面图

Fig. 1 Cross section of the insert earphone

#### 2.1 动铁单元

入耳式耳机中动铁单元的频响、失真和瞬态决定了耳机的基本声学性能。动铁单元，又称平衡电枢单元。它体积小且灵敏度高，适合用于入耳式耳机，能为耳机提供更好的瞬态响应，对音频的动态表现和瞬间细节表现要好于动圈单元。动铁单元的类比电路见图2。

图2中， $V$ 为动铁单元的输入电压， $R_{dc}$ 为动铁单元的直流阻， $A$ 为电学端到声学端的转换因子， $P_R$ 为动铁单元产生声波的声压， $R_{karm}$ 为动铁单元跟频率相关的声阻。动铁单元的其他声学参数值见表1。

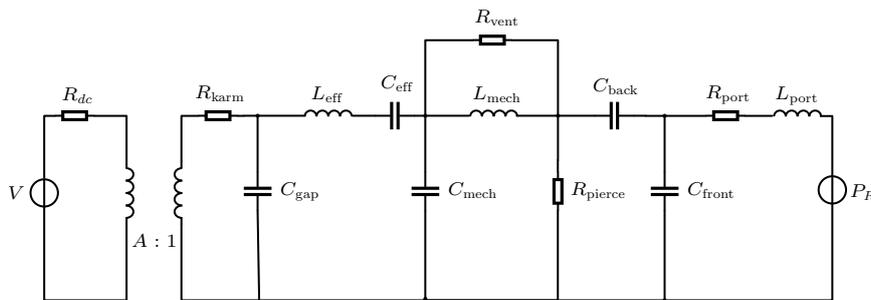


图2 动铁单元类比电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the balanced armature

表1 动铁单元参数表

Table 1 Balanced armature parameters

	声质量/ (kg·m <sup>-4</sup> )	声顺/ (m <sup>5</sup> ·N <sup>-1</sup> )	声阻/ (N·s·m <sup>-5</sup> )
$L_{\text{eff}}$	81200	$C_{\text{back}}$	$7.91 \times 10^{-14}$
$L_{\text{mech}}$	6400	$C_{\text{eff}}$	$9.21 \times 10^{-14}$
$L_{\text{port}}$	9670	$C_{\text{front}}$	$1.73 \times 10^{-14}$
		$C_{\text{gap}}$	$5.85 \times 10^{-14}$
		$C_{\text{mech}}$	$1.16 \times 10^{-14}$
		$R_{\text{piercer}}$	$2.87 \times 10^{10}$
		$R_{\text{port}}$	$1.6 \times 10^8$
		$R_{\text{vent}}$	$6.56 \times 10^9$

2.2 腔体结构

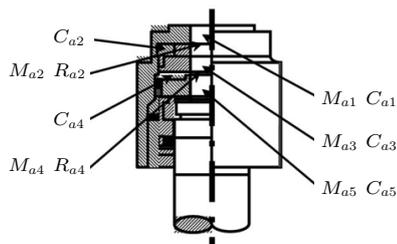
设动铁单元产生的声波声压为  $P_R$ , 体积速度为  $U_R$ ; 仿真耳入口处的声波声压为  $P_L$ , 体积速度为  $U_L$ 。两者之间为二端口传递矩阵  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{F}$  即为动铁入耳式耳机腔体结构的仿真模型,  $Z_{\text{ear}}$  是仿真耳的声阻抗, 如图3所示。

$$\begin{pmatrix} P_R \\ U_R \end{pmatrix} = \mathbf{F} \times \begin{pmatrix} P_L \\ U_L \end{pmatrix}, \quad (1)$$

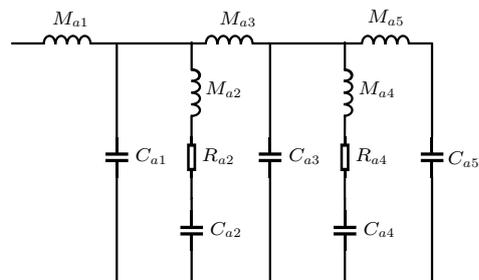
$\mathbf{F}$  对应腔体结构可以看成是两截圆柱管道的级联。第一截圆柱管道为入耳式耳机的出水管, 第二截圆柱管为出水管到仿真耳之间的腔体。  $l_1$  为出水管长度,  $d_1$  为出水管直径,  $S_1$  为出水管截面积;  $l_2$  为出水管到仿真耳之间腔体的长度,  $d_2$  为腔体直径,  $S_2$  为腔体截面积。利用有损耗的传输线模型计算  $\mathbf{F}^{[10]}$ ,

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \mathbf{F}_1 \times \mathbf{F}_2 \\ &= \begin{pmatrix} \cosh(\gamma_1 l_1) & W_1 \sinh(\gamma_1 l_1) \\ \sinh(\gamma_1 l_1)/W_1 & \cosh(\gamma_1 l_1) \end{pmatrix} \\ &\quad \times \begin{pmatrix} \cosh(\gamma_2 l_2) & W_2 \sinh(\gamma_2 l_2) \\ \sinh(\gamma_2 l_2)/W_2 & \cosh(\gamma_2 l_2) \end{pmatrix}, \quad (2) \end{aligned}$$

其中:



(a) 结构图



(b) 声学类比电路图

图4 IEC60318-4型仿真耳

Fig. 4 IEC60318-4 type ear simulator

$$W_1 = R_1[(1 + 0.369r_{v1}^{-1}) - j0.369r_{v1}^{-1}],$$

$$\gamma_1 = k[1.0459r_{v1}^{-1} + j(1 + 1.045r_{v1}^{-1})], \quad (3)$$

$$r_{v1} = \sqrt{\frac{\rho\omega S_1}{\eta\pi}}, \quad R_1 = \frac{\rho c}{S_1},$$

其中,  $\rho$  是空气密度,  $c$  是空气中的声速, 波数  $k = \omega/c$ , 角频率  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  是频率,  $\eta$  是空气的切变粘滞系数。

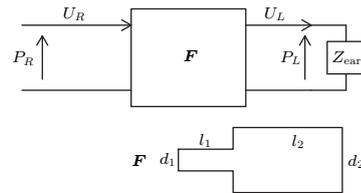


图3 二端口传输线模型

Fig. 3 Transmission line model in a two-port network

2.3 仿真耳

在耳机的实验测量中, 用真的人耳测量是很难实现的。因而耳机在测试时多使用耦合腔和仿真耳, 目的是模拟实际使用场合。仿真耳具有和人耳相同的声阻抗, 通过仿真耳内置的传声器, 实验者可以测得鼓膜处频响。仿真耳的结构图和声学类比电路见图4, 参数见表2<sup>[11]</sup>。

表2 IEC60318-4型仿真耳参数表

Table 2 IEC60318-4 type ear simulator parameters

	声质量/ (kg·m <sup>-4</sup> )	声顺/ (m <sup>5</sup> ·N <sup>-1</sup> )	声阻/ (N·s·m <sup>-5</sup> )
$M_{a1}$	82.9	$C_{a1}$	$0.943 \times 10^{-12}$
$M_{a2}$	9400	$C_{a2}$	$1.9 \times 10^{-12}$
$M_{a3}$	130.3	$C_{a3}$	$1.479 \times 10^{-12}$
$M_{a4}$	983.8	$C_{a4}$	$2.1 \times 10^{-12}$
$M_{a5}$	133.4	$C_{a5}$	$1.517 \times 10^{-12}$

### 3 实验验证

#### 3.1 实验测量

为了验证不同理论的仿真结果,在消声室中用B&K 4157仿真耳和Soundcheck测试软件对入耳式耳机进行频响测量。实验测量示意图如图5所示。测量得到的耳机频响是鼓膜处的频响,耳机的低频频响受声泄漏的影响较大,在测量时应注意控制声泄漏[4]。

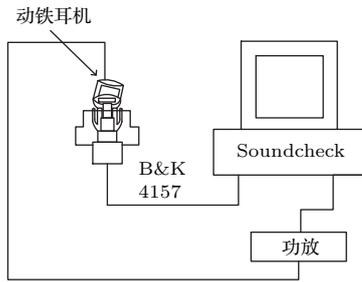


图5 耳机与仿真耳测量

Fig. 5 Measurement for the insert earphone and ear simulator

#### 3.2 频响仿真

动铁入耳式耳机的频响测试结果和仿真结果如图6所示。红色点划线为集总参数模型的频响仿真结果,黑色虚线为传输线模型的频响仿真结果,蓝色实线为频响的实际测量值。从仿真结果可以看到,在4 kHz以下,集总参数模型和传输线模型的仿真结果几乎是一致的。在5 kHz~10 kHz 频率范围,传输线模型的仿真结果与集总参数模型有明显区别,频响峰谷出现的频率点和声压级仿真结果优于集总参数模型。

计算5 kHz~10 kHz之间,二种模型仿真结果与测量结果相对误差的均值。 $f_{sim_i}$ 为第*i*个5 kHz~10 kHz之间的频响仿真值, $f_{test_i}$ 为第*i*个5 kHz~10 kHz之间的频响测量值, $\eta$ 为相对误差的均值,

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{f_{sim_i} - f_{test_i}}{f_{test_i}} \right|. \quad (4)$$

计算得到集总参数模型 $\eta_1 = 6.10\%$ ,传输线模型 $\eta_2 = 2.14\%$ 。其中,5.8 kHz高频频响谷值处,集总参数模型的仿真相对误差为3.72%,传输线模型的仿真相对误差为1.59%;8.5 kHz高频频响峰值处,

集总参数模型的仿真相对误差为9.85%,传输线模型的仿真相对误差为2.94%。

综上所述,在高频段传输线模型的仿真结果要优于集总参数模型。考虑到入耳式耳机的前腔结构主要影响耳机的高频频响,因此在5 kHz~10 kHz 频率范围,对于入耳式耳机的频响仿真,建议使用传输线模型,以得到更准确的仿真结果。

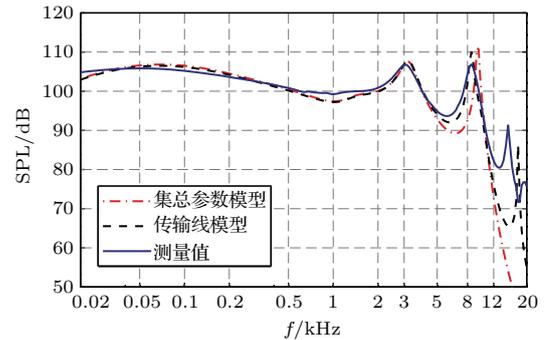


图6 动铁入耳式耳机频响仿真

Fig. 6 Frequency response curve of balanced armature insert earphones

### 4 优化设计

利用传输线模型频响仿真更准确的特点,对动铁耳机的出水管的长度 $l_1$ 和直径 $d_1$ 进行设计优化,以期使动铁入耳式耳机中高频频响更平滑。结合实际情况,长度 $l_1$ 和直径 $d_1$ 的范围为

$$\begin{cases} 1.8 \times 10^{-3} \leq l_1 \leq 7.6 \times 10^{-3}, \\ 1.8 \times 10^{-3} \leq d_1 \leq 7.6 \times 10^{-3}. \end{cases} \quad (5)$$

优化目标设定为1000 Hz、1250 Hz、1600 Hz、2000 Hz、2500 Hz、3150 Hz、4000 Hz、5000 Hz、6300 Hz、8000 Hz、10000 Hz、12500 Hz处的频响声压级方差最小。 $f_{sim}$ 为频响仿真数列, $f_{sim_i}$ 为第*i*个1000 Hz~12500 Hz之间的频响测量值, $\mu$ 为频响仿真数列的均值,

$$\min Var(f_{sim}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_{sim_i} - \mu)^2. \quad (6)$$

最终优化结果长度 $l_1 = 7.6 \times 10^{-3}$ ,直径 $d_1 = 2.1 \times 10^{-3}$ ,此时这些频点处的方差最小。优化前方差 $Var_1 = 20.6$ ,优化后方差 $Var_2 = 16.5$ 。

图7为动铁入耳式耳机的频响优化结果。优化后结果与优化前结果在中高频处有明显差异,1000 Hz~12500 Hz处频响的峰谷有明显改善,耳机

中高频频响变得平滑。优化后结果的低频量级也有一定的提升。

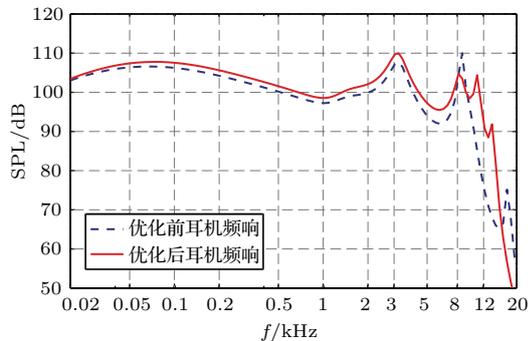


图7 动铁入耳式耳机频响优化

Fig. 7 Optimization of balanced armature insert earphones

## 5 结论

本文提出基于声传输线理论的结构仿真模型,把这种模型应用于一款动铁入耳式耳机的结构仿真中,并将声传输线模型的仿真结果与之前研究者常用的集总参数模型的仿真结果作对比。结果表明声传输线模型的仿真结果在5 kHz~10 kHz 频率范围更接近实测结果。在仿真基础上,优化算法提出改善耳机频响的出声管设计方法。使用优化后的出声管尺寸,耳机的中高频频响较优化前变平滑。

## 参考文献

- [1] Beranek L L. Acoustics[M]. New York: American Institute of Physics, 1993.
- [2] Thiele A N. Loudspeaker in vented boxes: Part I[J]. J. Audio Eng. Soc., 1971, 19(5): 382-392.
- [3] Thiele A N. Loudspeaker in vented boxes: Part II[J]. J. Audio Eng. Soc., 1971, 19(5): 471-483.
- [4] Borwick J. Loudspeaker and headphone handbook[M]. London: Butterworths, 1988.
- [5] Slotte B. Acoustics simulation in mobile phone audio design[D]. Finland: Helsinki University of Technology, 1999.
- [6] Huang C H, Pawar S J, Hong Z J, et al. Insert earphone modeling and measurement by IEC-60711 coupler[J]. Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control IEEE Transactions on, 2011, 58(2): 461-469.
- [7] Kim N, Allen J B. Two-port network analysis and modeling of a balanced armature receiver[J]. Hearing Research, 2013, 301(1): 156-167.
- [8] Bai M R, Kuo Y C. Acoustical design of a bluetooth earphone using simulated annealing optimization[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2010, 58(7): 583-589.
- [9] Tsai Y T, Shiah Y C, Huang J H. Effects of porous materials in an insert earphone on its frequency response-experiments and simulations[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2012, 59(11): 2537-2547.
- [10] Dan M R. Horn modelling with conical and cylindrical transmission-line elements[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 1993, 41(6): 471-484.
- [11] Jönsson S, Liu B, Nielsen L B, et al. Simulation of couplers[G/OL]. [2017-04-15]. <http://www.aes.org/technical/documentDownloads.cfm?docID=177>.