

文章编号:1006-1355(2015)05-0167-05

# 基于微振动理论单罩杯双自由度耳罩隔声模型

李中付, 丁 猛

( 海军医学研究所, 上海 200433 )

**摘 要:** 把单耳罩结构考虑为单罩杯双自由度模型,揭示耳罩刚度、阻尼、质量、体积、泡沫类吸声材料对耳罩隔声的影响规律。该模型表明,提高罩杯刚度,降低罩杯内吸声材料的刚度,有利于提高耳罩的隔声性能。罩杯阻尼系数越高,系统共振峰越小,低频隔声性能有改善;吸声材料的阻尼系数较小为宜;较大的耳罩质量或体积,可以有效提高耳罩的隔声性能,但较大的质量或体积会导致耳罩舒适性降低。

**关键词:** 振动与波;双自由度;耳罩;隔声

中图分类号:O328;TB18

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2015.05.035

## An Acoustic Model for Single Cup and Double Degree of Freedom Earmuffs Based on Micro Vibration Theory

LI Zhong-fu, DING Men

( Naval Medical Research Institute of PLA, Shanghai 200433, China )

**Abstract :** A single cup earmuff was simplified to a single cup and double degree-of-freedom vibration model. The model reveals the influence of earmuff's stiffness, damping, mass, volume and foam absorption material on the sound insulation performance of the earmuffs. It shows that increasing the cup stiffness and reducing the stiffness of the absorption material in the cup are helpful for improving the sound insulation performance of the earmuffs. Higher damping coefficient of the cup can lead to smaller system resonance peak and better sound insulation performance in the low-frequency range. Smaller damping coefficient of sound absorbing material is better. Larger earmuff's mass or volume can effectively improve the sound insulation performance of the earmuffs, but will reduce earmuff's comfort.

**Key words :** vibration and wave ; double degree of freedom ; earmuffs ; sound insulation

对于耳罩结构与材料、舒适性等对耳罩隔声效果的综合影响,近年来越来越受到重视<sup>[1-5]</sup>。在耳罩设计中,结构与材料的选择对耳罩性能的影响尤为重要,若材料选择不当,不仅会导致耳罩不能有效防护噪声,更有可能在耳罩共振频率附近对噪声产生放大作用,隔声性能大幅下降。防噪声耳罩一般将单层硬质罩杯连接到柔软的耳垫上,即单罩杯结构。一些学者利用单罩杯单自由度(single-cup-single-degree, SCSD)模型对单罩杯结构耳罩进行分析,研究了耳罩结构的声学特性<sup>[5]</sup>。实际上,在SCSD模型中没有考虑耳罩内还有一层泡沫类吸声材料,这层吸声材料是敷着耳罩内表面的,具有一定

的质量、刚度和阻尼,对耳罩隔声具有重要作用。考虑到这块吸声材料,本文把耳罩结构考虑为单罩杯双自由度(single-cup- dual-degrees, SCDD)模型。为简化分析过程,系统运动为微小位移,将头部与耳垫的接触面假定为刚性表面,并忽略空气泄露的影响。

### 1 单罩杯双自由度模型

耳罩内具有泡沫类吸声材料的单罩杯防噪声耳罩的结构可以简化为SCDD模型(图1),其力学模型见图2所示。罩杯(包括耳垫,下同)的质量为 $m_o$ ,刚度为 $k_r$ ,阻尼系数为 $c_r$ 。罩杯的内表面积分别为 $s_o$ ,罩杯的容积为 $v_o$ 。罩杯内的吸声材料的质量为 $m_i$ ,刚度为 $k_i$ ,阻尼系数为 $c_i$ 。罩杯内吸声材料的内表面积为 $s_i$ ,罩杯与罩杯内的吸声材料之间的容积为 $v_i$ ,头部与吸声材料之间的容积为 $v_o$ 。耳罩外部空间声压为 $p_o$ ,罩杯与罩杯内的吸声材料之间的声压为 $p_r$ ,罩杯内的吸声材料与耳部之间的空间声压为 $p_i$ 。各参数见表1所示。

收稿日期:2014-07-05

**作者简介:** 李中付(1956—),男,安徽临泉人,博士,研究员,主要研究方向为噪声、振动防护与控制,听力保护。

E-mail: lzf1956@hotmail.com

表1 单罩杯耳罩基本参数

参数	数值/单位	参数	数值/单位	参数	数值/单位
$k_o$	$5 \times 10^4$ /(N/m)	$c_i$	10/(Ns/m)	$s_o$	$5.9 \times 10^{-3}/\text{m}^2$
$K_i$	$5 \times 10^4$ /(N/m)	$c_t$	10/(Ns/m)	$s_i$	$3.9 \times 10^{-3}/\text{m}^2$
$k_t$	$5 \times 10^4$ /(N/m)	$v_i$	$2.1 \times 10^{-4}/\text{m}^3$	$m_o$	0.11/kg
$c_o$	80/(Ns/m)	$v_t$	$1.4 \times 10^{-4}/\text{m}^3$	$m_i$	0.065/kg

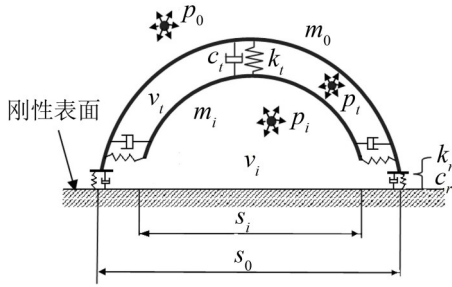


图1 SCDD结构

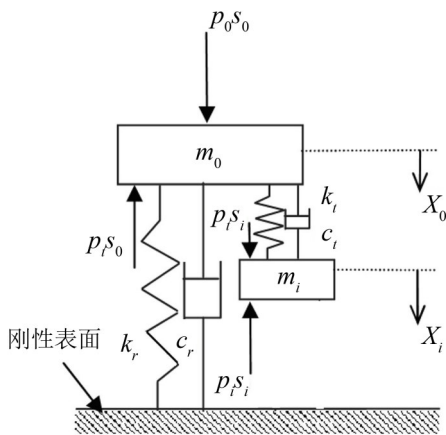


图2 SCDD运动简图

图2为运动简图,因运动为微小位移,根据文献[6]提出的微振动力学系统模型构造微分方程系数矩阵方法,运动方程可直接写出

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (1)$$

式中

$$M = \begin{bmatrix} m_o & 0 \\ 0 & m_i \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} c_r + c_i & -c_i \\ -c_i & c_i \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} k_i + k_t & -k_i \\ -k_i & k_i \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x_o \\ x_i \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} p_o s_o - p_i s_o \\ p_i s_i - p_t s_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(1)可以改写为

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 m_o + j\omega(c_r + c_i) + k_r + k_i & -j\omega c_i - k_i \\ -j\omega c_i - k_i & -\omega^2 m_i + j\omega c_i + k_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_o \\ x_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_o s_o - p_i s_o \\ p_i s_i - p_t s_i \end{Bmatrix} \quad (3)$$

假设系统运动过程绝热,那么未知声压 $p_t$ 和 $p_i$ 便和内空腔的体积变化、位移有关<sup>[7]</sup>,从而可以得到

$$p_t = -\frac{\rho c^2(s_i x_i - s_o x_o)}{v_i}, \quad p_i = -\frac{\rho c^2(-s_i x_i)}{v_i} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\rho c^2 s_i}{v_i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_o \\ x_i \end{Bmatrix} \quad (4)$$

把式(4)代入式(3)得

$$A \begin{Bmatrix} x_o \\ x_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} s_o \\ 0 \end{Bmatrix} P_o \quad (5)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} -\omega^2 m_o + j\omega(c_r + c_i) + k_r + k_i + \frac{\rho c^2 s_o^2}{v_i} - j\omega c_i - k_i - \frac{\rho c^2 s_i s_o}{v_i} & -j\omega c_i - k_i - \frac{\rho c^2 s_i s_o}{v_i} \\ -j\omega c_i - k_i - \frac{\rho c^2 s_i s_o}{v_i} & -\omega^2 m_i + j\omega c_i + k_i + \rho c^2 s_i^2 \left( \frac{1}{v_i} + \frac{1}{v_t} \right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

耳罩的隔声效果由内外声压比值来描述。根据式(4)和式(5),可得单罩杯双自由度(SCDD)模型的耳罩隔声值 $L_{SCDD}$

$$L_{SCDD} = -20 \lg \frac{p_i}{p_o} = -20 \lg \left( \frac{\rho c^2}{v_i} [0 \ s_i] A^{-1} \begin{bmatrix} s_o \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

如果不考虑耳罩内一层泡沫类吸声材料,在相同质量的情况下,单罩杯单自由度(SCSD)模型的耳罩隔声值 $L_{SCSD}$

$$L_{SCSD} = -20 \lg \frac{p_i}{p_o} = -\frac{\rho c^2 s_o^2 / (v_i + v_t)}{-(m_o + m_i)\omega + k_r + j\omega c_r + \rho c^2 s_o^2 / (v_i + v_t)} \quad (8)$$

由于式(7)和式(8)均是由耳罩内外声压比值计算的,因此 $L_{SCDD}$ 和 $L_{SCSD}$ 的值越大表明耳罩隔声效果越好。相反,  $20 \lg(p_i/p_o)$  值越小表明耳罩隔声效果越好。

## 2 耳罩结构与材料对隔声性能影响

### 2.1 耳罩内有无泡沫类吸声材料对隔声的影响

耳罩内含泡沫类吸声材料的隔声值计算见式(7),耳罩内没有泡沫类吸声材料的隔声值计算见式(8)。耳罩内有无泡沫类吸声材料对隔声的影响见图3所示。通过图3比较SCDD模型(耳罩内含泡沫类吸声材料)与SCSD模型(耳罩内不含泡沫类吸声材料),可得结论:在低频段内,耳罩内有无泡沫类吸声材料对隔声值影响不大;耳罩内有泡沫类吸声材料时,第二共振峰值对隔声值有较大影响;耳罩内有泡沫类吸声材料时,在高于第二共振峰值频段后,耳罩有较好的隔声值。

在耳罩设计中,耳罩内均有泡沫类吸声材料,主要是消除耳罩内的反射声(回声)。

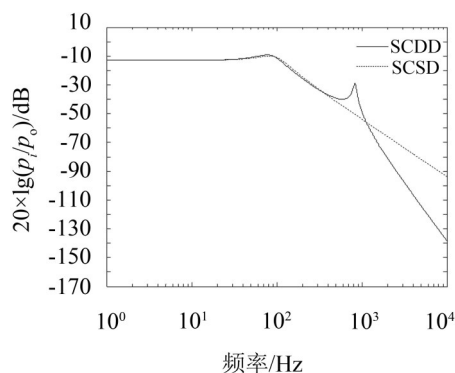


图3 有无吸声材料对隔声的影响

## 2.2 耳罩内泡沫类吸声材料的位置对隔声的影响

当耳罩体积一定时,考察耳罩内泡沫类吸声材料与耳罩内壁之间的间隙大小对耳罩隔声性能的影响。图4为三种  $v_i/v_i$  比值对隔声影响的比较:耳罩内泡沫类吸声材料与耳罩内壁之间的间隙大小可以改变第二共振峰值的大小与位置。间隙越大,第二共振峰值的位置向低频移动,中高频段隔声性能提高;反之,间隙越小,第二共振峰值的位置向中高频移动,中高频段隔声性能降低;尽管耳罩内泡沫类吸声材料与耳罩内壁之间的间隙调节有限,但这一结论,在设计和使用方面都未引起注意,并被忽视。

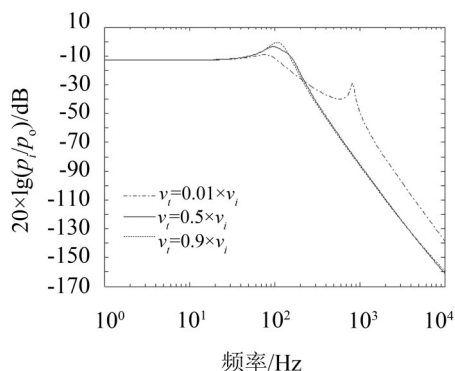
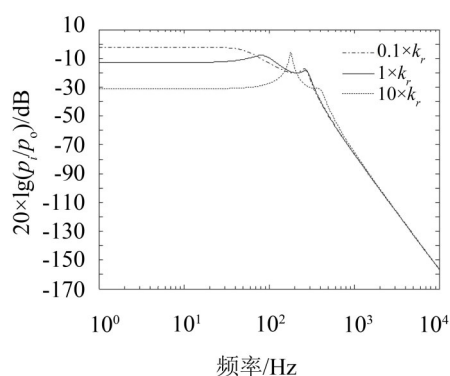
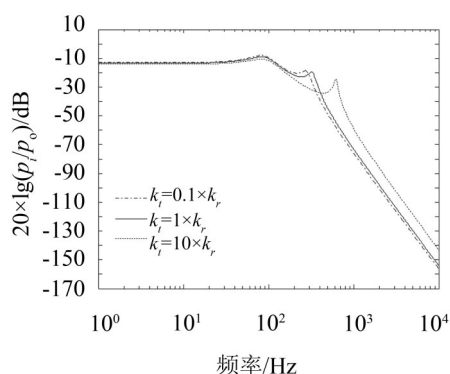


图4 吸声材料的位置对隔声的影响

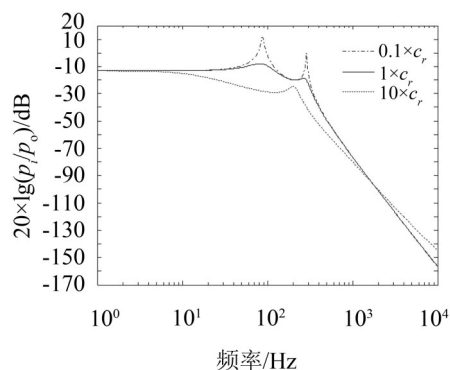
## 2.3 耳罩刚度对隔声的影响

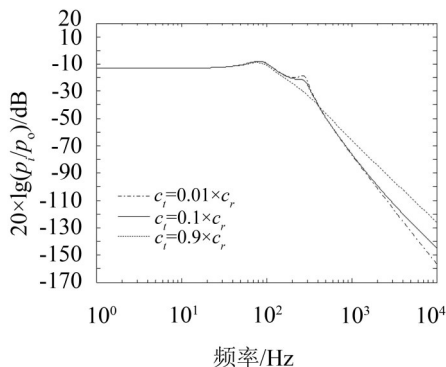
耳罩刚度包括罩杯刚度和罩杯内吸声材料刚度二方面。图5对罩杯刚性进行分析,可以看出,随着罩杯刚度  $k_r$  的增加,耳罩的隔声性能在一些低频段发生了变化,而在高频段基本不变。图6对耳罩内吸声材料的刚性进行分析,随着吸声材料的刚性  $k_i$  的增加,耳罩的高频隔声性能显著下降,导致耳罩的第二共振峰向高频偏移。因此可以认为,在设计耳罩时要尽可能地降低罩杯内吸声材料的刚性。

图5 罩杯刚度  $k_r$  对隔声的影响图6 吸声材料刚度  $k_i$  对隔声的影响

## 2.4 耳罩阻尼对隔声的影响

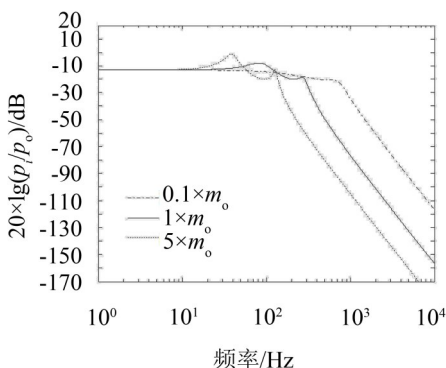
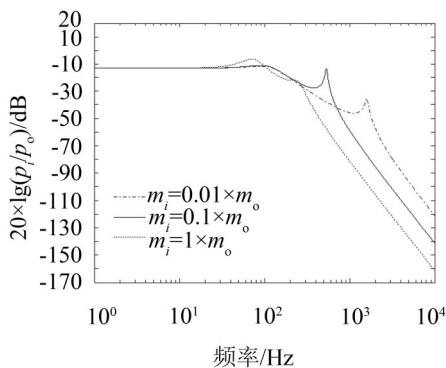
耳罩阻尼包括罩杯阻尼和罩杯内吸声材料阻尼二方面。通过图7可以看出罩杯的阻尼系数  $c_r$  对耳罩隔声的影响:阻尼系数  $c_r$  的增加影响整个系统的共振峰,阻尼系数越高,系统共振峰越小,低频隔声性能有改善。因此,在设计耳罩时,要调整耳罩共振频率附近的隔声性能,可以采用改变罩杯阻尼系数措施。图8为耳罩内吸声材料的阻尼系数  $c_i$  对隔声的影响,材料的阻尼系数  $c_i$  主要影响耳罩在共振频率附近及共振频率以上的隔声性能,较高的阻尼系数可以降低系统的共振峰,但是将对高频的隔声性带来负面作用。因此,吸声材料的阻尼系数较小为宜。

图7 罩杯阻尼  $c_r$  对隔声的影响

图8 罩杯内吸声材料阻尼 $c_i$ 对隔声的影响

## 2.5 耳罩质量大小对隔声的影响

耳罩质量包括罩杯质量和罩杯内吸声材料质量两个方面。图9为罩杯质量大小对隔声的影响,图10为罩杯内吸声材料质量大小对隔声的影响。通过图9和图10可以看出,罩杯质量和罩杯内吸声材料质量对隔声的影响特点基本上是一致的:主要影响耳罩共振频率及共振频率以上的隔声性能,较大的质量不仅可以改变系统的共振峰向低频移动,而且可以提高高频的隔声性能。但较大的质量意味着重量加大,导致人员佩戴耳罩的舒适性降低。

图9 罩杯质量 $m_o$ 对隔声的影响图10 罩杯内吸声材料质量 $m_i$ 对隔声的影响

## 2.6 罩杯体积对隔声的影响

图11对耳罩体积(图中 $v_o=v_i+v_r=0.000\ 35\text{ m}^3$ )对耳罩共振频率及隔声性能影响进行了分析,较大的体积可以改变系统的共振峰向低频移动,共振峰降

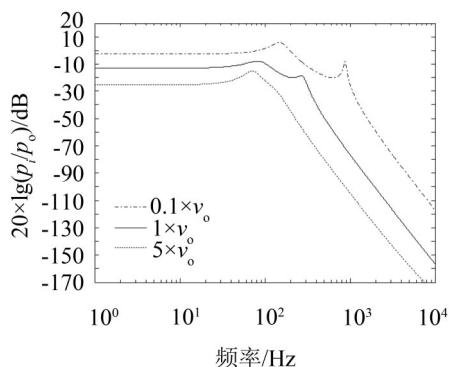


图11 罩杯体积对隔声的影响

低,可以有效提高耳罩的隔声性能。但较大的体积会导致人员佩戴耳罩的舒适性降低。

## 3 理论与实验比较

为了验证理论,对某一耳罩进行隔声效果实验测试。实验方案根据国家标准[8](主观方法)制定。该标准是通过受试人员佩戴耳罩的隔声效果来评价耳罩的隔声值。实验测试信号符合参考文献[8]要求的1/3倍频程滤波器滤波的粉红噪声组成。测试中心频率为125 Hz、250 Hz、500 Hz、1 000 Hz、2 000 Hz、4 000 Hz、8 000 Hz。不戴眼镜、耳环的受试人员16人参加实验,他们听力均正常,且经过严格专业培训。测试同一型号五个耳罩。受试者正确佩戴耳罩,充分地了解实验的情况、步骤和实验的目的。测试环境接近扩散声场,符合国家标准[8]的要求。在每个中心频率下,对每位受试者测试其裸耳和佩戴护听器时的听阈,二者之差是受试者佩戴耳罩的隔声值,取受试者测试的隔声值的均值即为耳罩的隔声值。测试结果见图12中data曲线。

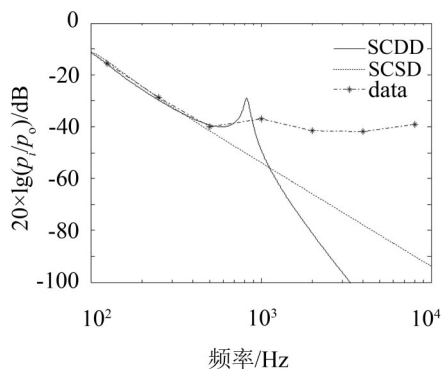


图12 理论与实验数据比较

图12为二种模型(SCDD与SCSD)与实验数据比较,可见:在低于500 Hz范围内,二种模型(SCDD与SCSD)与实验数据比较吻合;在500 Hz至1 000 Hz范围内,模型SCDD与SCSD精度稍高;在大于1 000 Hz范围内,二种模型(SCDD与SCSD)与实验数据,误差均很大,主要原因:



(1) 二种模型均假定头部与耳垫的接触面为刚性表面,并忽略空气泄露的影响,而且该二种模型均是集中参数,即离散系统。实际上,头部与耳垫的接触面为非刚性表面,接触面之间存在空气泄漏,而且耳罩的各个部件是连续系统,这种差异对大于1 000 Hz范围的隔声影响很大;

(2) 实验数据是主观方法测出,该方法测出的是耳罩对人耳真实的隔声效果,反映人耳内耳基底膜声压与耳罩外声压的差异。而二个模型数据反映的是耳罩内与外声压的差异,实验数据有骨导等因素的影响,而二个模型均没有考虑骨导的作用。

## 4 结 语

通过以上分析,耳罩结构与材料对隔声性能的影响,可以总结为:耳罩内要有泡沫类吸声材料,不足是存在第二共振峰值,但主要优点是峰值频段后有较好的隔声值,可以消除耳罩内的反射声,大大提高耳罩舒适性。在设计耳罩时,提高罩杯刚度,降低罩杯内吸声材料的刚度,有利于提高耳罩的隔声性能。罩杯阻尼系数越高,系统共振峰越小,低频隔声性能有改善;吸声材料的阻尼系数较小为宜;较大的耳罩质量或体积,可以有效提高耳罩的隔声性能,但较大的质量或体积会导致耳罩舒适性降低。耳罩内泡沫类吸声材料与耳罩内壁之间的间隙大小可以改变第二共振峰值的大小与位置。尽管耳罩内泡沫类吸声材料与耳罩内壁之间的间隙调节有限,但这一结论,在以往设计和使用方面都未引起注意,并被忽

视。尽管上述结论是在本文的假定基础上取得的,但对单罩杯耳罩的结构设计与选材具有重要的理论指导意义。实验数据表明,在小于1 000 Hz范围内,提出的SCDD模型比SCSD精度稍高,主要是考虑了耳罩内有一层泡沫类吸声材料。

### 参考文献:

- [1] Paulo Henrique T Z, Samir N Y Gerges. Effects of cup, cushion, band force, and foam lining on the attenuation of an earmuff[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2006, 36(2): 165-170.
- [2] 李中付. 护听器技术参数及其舒适性主观评价双极量表[J]. *噪声与振动控制*, 2013, 33(5): 193-198.
- [3] Samir N Y Gerges. Earmuff comfort[J]. *Applied Acoustics*, 2012, 73(10): 1003-1012.
- [4] 李中付, 丁猛, 赵偲宇. 一种基于结构-声耦合的双重护听器隔声计算模型[J]. *噪声与振动控制*, 2013, 33(s1): 337-340.
- [5] Yu Du, Kenji Homma. Performance of a dual-cup-dual-cushion earmuff design[J]. *Noise Control Eng*, 2009, 57(5): 459-475.
- [6] 李中付, 华宏星, 石银明, 等. 微振动力学系统模型构造微分方程系数矩阵方法[J]. *振动与冲击*, 2001, 20(1): 48-51.
- [7] L E Kinsler, A R Frey, A B Coppens et al. Fundamentals of Acoustics[M]. New York: Wiley, 2000. 163-175.
- [8] GB/T 75841-2004, 声学护听器第1部分: 声衰减测量的主观方法[S].

(上接第149页)

### 参考文献:

- [1] Donoho D. L. De-noising by soft-thresholding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41(3): 613-627.
- [2] 肖方煜, 汤伟, 傅娜. 自寻优阈值小波去噪方法[J]. *信号处理*, 2012, 28(6): 577-586.
- [3] 曲巍巍, 高峰. 基于噪声方差估计的小波阈值降噪研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 45(2): 28-33.
- [4] 王新, 林家骏. 小波分析中频带能量泄漏及对策研究[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2005, 24(5): 734-736.
- [5] 张君, 韩璞, 董泽, 等. 基于小波变换的振动信号分析中能量泄漏的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(10): 238-243.
- [6] Peng Z K, Jackson M R, Rongong J A, et al. On the energy leakage of discrete wavelet transform[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(2): 330-343.
- [7] 王新, 朱高中. 一种新型小波阈值法在信号消噪中的应用研究[J]. *高电压技术*, 2008, 34(2): 342-345.
- [8] 代海波, 单锐, 王换鹏, 等. 基于改进阈值函数的小波去噪算法研究[J]. *噪声与振动控制*, 2012, 32(6): 189-193.
- [9] 王宏强, 尚春阳, 高瑞鹏, 等. 基于小波系数变换的小波阈值去噪算法改进[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(10): 165-168.
- [10] 苏成志, 陈洪印, 孟凡一, 等. 新阈值二进小波去噪算法在齿轮信号中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(18): 206-209.
- [11] 邓禹, 熊静琪, 孙锐, 等. 利用相关原理优化小波阈值去噪[J]. *噪声与振动控制*, 2009, 29(1): 61-64.