# 空心变截面杆的等效网络

汪彦军,李松松,迟建卫 (大连海洋大学,辽宁大连 116023)

摘要:设计换能器时一般忽略螺杆的影响,将前、后盖板和压电陶瓷晶堆作为均匀的实心杆件,这种方法有一定的 近似性。将任意空心变截面杆等效为同种形状的实心杆件,并推导出了出几种常见形状空心杆件的等效几何参数及 其网络传输系数,从而可以利用等效网络的方法方便准确地设计超声振动系统。

关键字: 空心杆件; 等效参数; 振动系统

中图分类号: TB565<sup>+</sup>.1 文献标示码: A DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.04.017

文章编号: 1000-3630(2011)-04-0379-03

## Equivalent network of the hollow horn with variable cross-section

WANG Yan-jun, LI Song-song, CHI Jian-wei (Dalian Ocean University, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: The methods of ignoring screw and thinking of front cover, rear cover and piezoelectric as solid bars are somewhat approximate but rather easy for transducer designing. The physical parameters and network transmission coefficients of the equivalent solid horns of any hollow horns with variable cross-section are derived, and so the original design methods could still be used, which facilitate the design of the ultrasonic vibration system. Key word: hollow horn; equivalent parameters; vibration system

#### 0 引言

设计换能器时一般忽略螺杆的影响,将前、后 盖板和压电陶瓷晶堆作为均匀的实心杆件[1,2],这种 方法有一定的近似性。如果考虑螺杆的影响,某些 组件或者其中的一部分就变成了空心杆件,相应的 几何参数也发生了变化。如果能将这些空心组件等 效为实心杆件,就可以利用原来的设计方法<sup>[3,4]</sup>(螺杆 的作用要另外计及<sup>[5]</sup>)。本文将任意空心变截面杆等 效为同种形状的实心杆件,并推导出几种常见形状 空心杆件的等效几何参数及其网络传输系数,以利 于方便、精确设计。

#### 空心变截面杆的等效几何参数 1

一般情况下变截面杆的空心部分为一均匀圆 柱体,本文以指数形的变截面杆为例推导空心杆件 的等效几何参数,如图1所示。

作者简介: 汪彦军(1979-), 男, 河南西平人, 硕士, 研究方向为 招声工程。

通讯作者: 汪彦军, E-mail: wangyj@dlou.edu.cn





图 1 中  $F_1$ 、 $V_1$ 、 $S_1$ 和  $F_2$ 、 $V_2$ 、 $S_2$ 分别为两端面 的力、振速和横截面积, So为空心截面积,则面积 函数S',面积系数N'变为

 $S' = S_1 e^{-2\beta x} - S_0 N' = \sqrt{(S_1 - S_0)/(S_2 - S_0)}$ 其中  $\beta = \ln N/l$ ,  $N = \sqrt{S_1/S_2}$ 。 令 $S'=S'_1e^{-2\beta x}$ ,在x=0、l时,有  $S'_1 = S_1 - S_0$ ,  $S'_1 e^{-2\beta''} = S_2 - S_0$ 

解之得  $\beta' = \ln N'/l$ 

同样也可以推导出其它外部形状的圆柱空心 杆件的相关参数。表1列出了几种经本文推导的常 见空心圆柱变截面杆的相关参数。表中 k、  $S'=S_1-S_0$ 、 $N'=\sqrt{(S_1-S_0)/(S_2-S_0)}$ 分别为波数、等效 面积函数和等效面积系数。

收稿日期: 2010-07-02; 修回日期: 2010-10-13

基金项目: 博士启动项目(20081075)

Table 1	本1 吊光受戦回杆寺双参数 Equivalent parameters of common hollow horns with variable cross-section		
类型	面积函数 S'(x)	等效波数 k'	备注
等截面形	S'	k	
圆锥形	$S_1'(1-\alpha x)^2$	k	$\alpha' = (N'-1)/N'l$

赤岩玉打ケかん

指数形  $S'_1 e^{-2\beta' x} \sqrt{k^2 - {\beta'}^2}$   $\beta' = \ln N'/l$ 悬链线形  $S'_2 \operatorname{ch}^2 \gamma'(l-x) \sqrt{k^2 - {\gamma'}^2}$   $\gamma' = \operatorname{ch}^{-1} N'/l$ 余弦形  $S'_1 \cos^2 \gamma'(l-x) \sqrt{k^2 - {\gamma'}^2}$   $\gamma' = \cos^{-1} (1/N')/l$ 

### 2 常见空心杆件的网络传输系数

任意形状的单级变杆件都可以等效为一个机 械四端网络,如图2所示。



$$a_{11} = N' \cos k' l - \frac{\gamma'}{k'} \sqrt{1 + N'} \sin k' l$$

$$a_{12} = j \frac{z_2}{k} \left( \gamma' \sqrt{1 + N'} \cos k' l + k' N' \sin k' l \right)$$

$$a_{21} = j \frac{1}{z_2} \frac{k}{k'} \frac{\sin K' l}{N'}, \quad a_{22} = \frac{\cos k' l}{N'}$$

$$\Re \overline{K} \overline{K}:$$

$$a_{11} = \frac{\cos k' l}{N'}$$

$$a_{12} = j \frac{z_1}{k} \left( k' \frac{\sin k' l}{N'} + \alpha' \sqrt{N'^2 - 1} \cos k' l / N' \right)$$

$$a_{21} = j \frac{1}{z_2} \frac{k \sin k' l}{k' N'} \quad a_{22} = \frac{\cos k' l}{N'} - \frac{\alpha' \sqrt{N'^2 - 1} \cos k' l}{k' N'}$$

### 3 螺孔对变幅杆谐振频率的影响

如图 3 所示的复合变幅杆,几何尺寸见图中, 材料声速为 5150 m/s,密度为 7800 kg/m<sup>3</sup>。螺孔直



径为10mm时谐振频率随螺孔深度的变化曲线如图 4(a),螺孔深度为10mm时谐振频率随螺孔直径的 变化曲线如图 4(b)。

由图 4 可以看出,在计及螺孔时变幅杆的谐振频率比实心时的 26.122 kHz 要高一些,而且随着螺孔深度或直径的增大而增加,这与实际测量结果是一致的。

#### 4 结语

本文给出了不同形状空心杆件的传输矩阵,设 计变幅杆时按组成类型顺序调用,方便了设计;而 且在设计换能器时,利用空心杆件的传输矩阵可以 计入螺杆的影响,更接近实际情况。

#### 参考文献

[1] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004, 91-111.

LIN Shuyu. The principle and design of ultrasonic transducer[M]. Bejing: Science Press, 2004, 91-111.

- [2] 林书玉. 夹心式纵\_扭复合模式压电超声换能器的共振频率[J].应用 声学, 1996, 15(5): 27-31.
   LIN Shuyu. Resonance frequencies of the sandwiched longitudinal-torsional composite piezoelectric ultrasonic transducer[J]. Applied Acoustics, 1996, 15(5): 27-31.
- [3] 贺西平,程存第. 纵振形超声变幅杆的等效四端网络[]]. 陕西师范 大学学报(自然科学版), 1994, 22(1): 87-88.
   HE Xiping, CHENG Cundi. Equivalent four-terminal networks of the longitudinal ultrasonic horns[J]. Journal of Shaanxi Norma University(Natural Science Edition), 1994, 22(1): 87-88.
- [4] 林仲茂. 超声变幅杆的原理和设计[M]. 北京: 科学出版社, 1987, 53-163.
- LIN Zhongmao. The principle and design of ultrasonic horn[M]. Bejing: Science Press, 1987: 53-163.
- [5] 王琪山. 螺栓紧固型纵振换能器设计考虑[]]. 应用声学, 1998, 17(4): 27-32.
  - WANG Qishan. Designe analysis of bolt-clamped longitudinal vibration transducer[J]. Applied acoustics, 1998, **17**(4): 27-32.