

# 一种适用于声化学的新型复合超声变幅杆

梁召峰<sup>1,2,3</sup>, 周光平<sup>1</sup>, 莫喜平<sup>2</sup>, 张亦慧<sup>1</sup>

(1. 深圳职业技术学院电子工程系, 深圳 518055; 2. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

**摘要:** 提出一种新型复合超声变幅杆, 该变幅杆总长为一个波长, 由五段组成, 其中三段为等截面圆柱杆, 两段为变截面圆柱杆。给出了该类复合变幅杆的设计方法, 并计算了两个实例。结果表明, 和普通使用的半波长复合变幅杆相比, 该类复合变幅杆具有在不减少甚至增大辐射面积的情况下放大振幅的特点, 这对提高整个超声系统的辐射声功率和辐射效率具有积极意义。此类复合变幅杆特别适合在声化学等超声液体处理领域使用。

**关键词:** 复合超声变幅杆; 声化学; 传输矩阵法; 形状函数

中图分类号: O644.3 TB552

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-03-0318-03

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.03.026

## A new type of compound ultrasonic horns used in sonochemistry

LIANG Zhao-feng<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Guang-ping<sup>1</sup>, MO Xi-ping<sup>2</sup>, ZHANG Yi-hui<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China; 2. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** A new type of compound ultrasonic horns, which has one wavelength length, is put forward. This type of compound horns consists of five elements, including three constant cross-sectional cylinders and two varied cross-sectional cylinders. The design method of this type of compound horns is given, and two compound ultrasonic horns are calculated. The results show that this type of compound horns has the advantage over the common half wavelength compound horns in amplifying amplitude without reducing the output surface of horn, and even amplifying amplitude and the output surface together. This advantage is vital to the improvement of the radiation power and the transfer efficiency of the acoustic energy of the ultrasonic system. This type of compound horns is especially fit for ultrasonic liquid processing such as sonochemistry.

**Key words:** compound ultrasonic horn; sonochemistry; transfer-matrix method; shape function

## 1 引言

声化学是探索利用超声来加速化学反应, 提高化学产率的一门新兴的交叉学科<sup>[1]</sup>。超声能被应用到聚合物溶液中以加速或改变化学反应的过程, 利用超声空化所产生的机械力可以使化学反应偏离原来的反应路径从而产生新的物质, 这些物质仅靠单纯的热、光诱导反应无法得到<sup>[2]</sup>。迄今, 国内外已有大量的、已证实有效的声化学实例, 涉及化学工业、绿色化学、制药工业、食品工业、纳米材料、生物柴油、污水处理等领域<sup>[3]</sup>。声化学的研究离不开声化学反应器, 声化学反应器是指有超声波引入并在其作用下进行化学反应的容器或系统, 它是实现声化学反应的场所。目前已采用的声化学反应器有液哨式、清洗槽式、变幅杆式、杯式、平行板式、

管型等各种类型<sup>[4]</sup>。变幅杆式反应器是把发射超声波的探头直接浸入反应液中, 探头利用变幅杆使能量集中, 由于该类设备结构简单, 且能得到较高的声强而被广泛用于声化学的实验研究中<sup>[5-6]</sup>。但通常使用的变幅杆以减小输出端面的面积来得到高的输出振幅, 致使在实际应用中仅有很小的面积辐射超声波。在大功率状态下, 声波在反应液中传播时会出现空化现象, 由于变幅杆输出振幅在其端面最大, 易在输出端面附近产生大量的空化气泡而形成声屏障, 严重阻碍振动系统输出功率的进一步增大。同时, 大量的空化气泡导致变幅杆的辐射阻抗下降, 从而影响其辐射功率和辐射效率。为了提高变幅杆的辐射声功率, 可以采用增大变幅杆辐射面积的方法<sup>[7]</sup>。可见, 对于声化学等超声液体处理领域, 变幅杆的设计要兼顾振幅增益和辐射面积两个要素。鉴于此, 本文提出了一种适用于声化学的新型复合超声变幅杆, 该类复合变幅杆由五段单一变幅杆组成, 可同时放大振幅和辐射面积, 或者在不减小辐射面积的情况下放大振幅。

收稿日期: 2008-09-08; 修回日期: 2008-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10574094)

作者简介: 梁召峰(1979-), 男, 博士生, 研究方向为功率超声。

通讯作者: 周光平, E-mail: zhougp@oa.szpt.net

## 2 复合超声变幅杆的结构

本文提出的新型复合超声变幅杆基本结构如图 1 所示。其中 I 为输入端，V 为输出端。I、III、V 三部分均为等截面圆柱杆，其截面直径分别为  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ ，长度分别为  $l_1$ 、 $l_3$ 、 $l_5$ 。II、IV 两部分为变截面圆柱杆，其形状函数可取为圆锥型、指数型、悬链线型、高斯型、余弦型等，两部分的长度分别为  $l_2$ 、 $l_4$ 。和普通半波长复合变幅杆不同，为了达到在不减小输出面积的情况下放大振幅的目的，并且避免应力过度集中，该复合变幅杆的总长为一个波长。为满足一维条件，变幅杆各部分的横向尺寸均小于 1/4 波长。

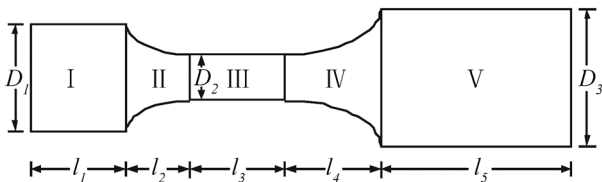


图 1 新型复合超声变幅杆的结构  
Fig.1 Schematic diagram of new-type compound ultrasonic horn

## 3 设计方法

对于具有不同形状函数的单一变幅杆以及各种复合变幅杆的设计，已有成熟的理论。现有的设计方法包括波动方程法、等效电路法、机械阻抗相等法、传输矩阵法等<sup>[8]</sup>。对于复合变幅杆，一般采用传输矩阵法设计最为简便。传递矩阵法的基本思想是把复杂的线性弹性系统，分成若干单元，各单元之间的特性用矩阵表示，再把这些矩阵相乘，求出表示整个系统特性的矩阵，最后利用边界条件，得到系统振动特性。

对复合变幅杆，某一形状函数的单一变幅杆即为一个单元，设第  $i$  级单一变幅杆可表示为一等效四端网络：

$$\begin{bmatrix} F_{i+1} \\ v_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^i & \alpha_{12}^i \\ \alpha_{21}^i & \alpha_{22}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_i \\ v_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中  $F_i$ 、 $v_i$  及  $F_{i+1}$ 、 $v_{i+1}$  分别为作用在第  $i$  级变幅杆输入端及输出端的力和振动速度， $\alpha_{11}^i$ 、 $\alpha_{12}^i$ 、 $\alpha_{21}^i$ 、 $\alpha_{22}^i$  为第  $i$  级变幅杆的等效四端网络各参量。

若复合变幅杆共有  $n$  级，由于各级之间截面上的力和速度连续，按其组合的顺序，将各网络矩阵相乘后，可简化为一个四端网络：

$$\begin{bmatrix} F_{n+1} \\ v_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ v_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

这里  $F_1$ 、 $v_1$  及  $F_{n+1}$ 、 $v_{n+1}$  分别为作用在整个复合变幅杆输入端及输出端的力和振动速度。当复合变幅杆边界自由时，即  $F_1 = F_{n+1} = 0$ ，令式(2)中的  $\alpha_{12} = 0$ ，即可得复合变幅杆的频率方程。此外，由式(2)还可求出复合变幅杆的放大系数为  $M = |v_{n+1}/v_1| = |\alpha_{22}|$ 。

文献[9-10]给出了等截面杆、直圆锥杆、指数型杆、悬链线型杆、余弦型杆等常见形状函数圆截面单一变幅杆的等效四端网络各参量，在设计时可将各形状函数变幅杆的传输矩阵编制成子程序，再按组成类型顺序调用，即可方便地求出复合变幅杆的频率方程和放大系数等关系式，利用频率方程即可设计复合变幅杆。

## 4 设计实例

设变幅杆工作频率为 20kHz，材料为 45<sup>#</sup>钢，II、IV 两部分取直圆锥杆，利用传输矩阵法分别设计了两个复合变幅杆，具体尺寸见表 1，表中各尺寸单位均为 mm。 $N$ 、 $M$  分别为面积放大系数和振幅放大系数。由表 1 可见，1<sup>#</sup>复合变幅杆在输出面积没有减小的情况下，振幅放大了 6.3 倍；2<sup>#</sup>复合变幅杆在输出面积增大 2.25 倍的情况下，振幅放大了 4.5 倍。图 2 给出了这两个复合变幅杆归一化的位移与应力分布曲线。图 3 是按表 1 中设计尺寸加工的变幅杆实物图，采用文献[11]的方法测得 1<sup>#</sup>复合变幅杆的共振频率为 20.14Hz，放大系数为 5.7；2<sup>#</sup>复合变幅杆的共振频率为 20.23Hz，放大系数为 4.2。可见，实测结果和理论计算结果符合较好。

作为比较，计算了两个含圆锥形过渡段的等长圆柱阶梯形半波长复合变幅杆，见表 2。表 2 中工作频率、材料、 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $l_1$ 、 $l_3$  分别与表 1 中相同。由表 2 可见，普通使用的半波长复合变幅杆，都是以减小变幅杆的输出面积为代价来达到放大振幅的目的。对照表 1 和表 2 可知，本文提出的新型复合变幅杆与传统的半波长复合变幅杆相比有着明显的优势，能在不减小甚至增大辐射面积的情况

表 1 新型复合变幅杆的两个设计实例  
Table 1 Two design examples of new-type compound horn

	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$N$	$M$
1 <sup>#</sup>	60	20	60	30	40	30	40	113	1.0	6.3
2 <sup>#</sup>	40	15	60	30	70	30	40	112	2.25	4.5

表 2 普通半波长复合变幅杆的两个设计实例  
Table 2 Two design examples of common half wavelength compound horn

	$D_1$	$D_2$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$N$	$M$
1 <sup>#</sup>	60	20	30	93	30	0.11	4.6
2 <sup>#</sup>	40	15	30	89	30	0.14	4.1

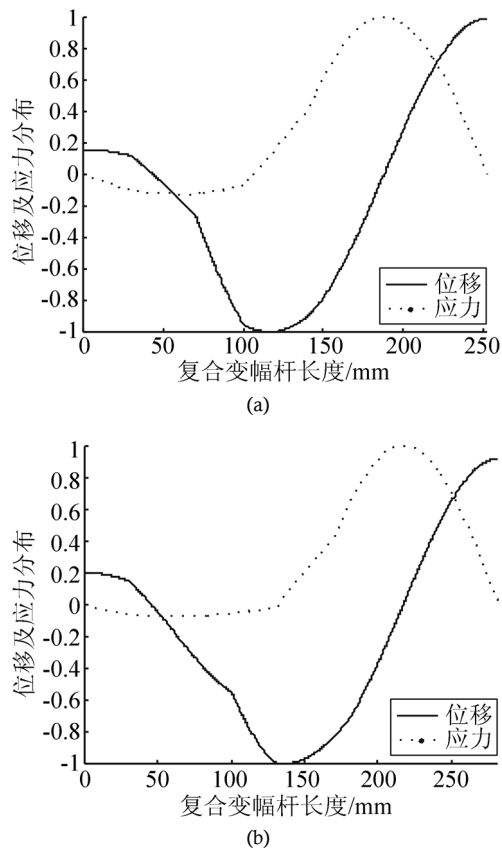


图2 1<sup>#</sup>(a)和2<sup>#</sup>(b)复合变幅杆归一化的位移与应力分布曲线  
Fig.2 Normalized displacement and stress curves of 1<sup>#</sup>(a) and 2<sup>#</sup>(b) compound horns

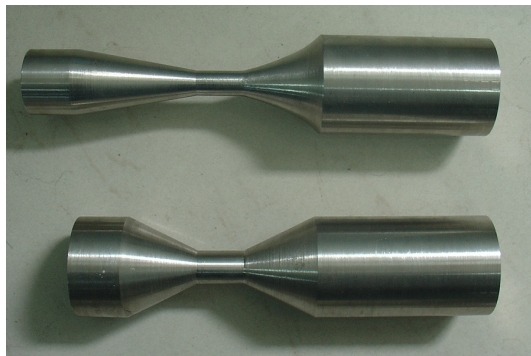


图3 两个新型复合变幅杆实物图  
Fig.3 True image of two new-type compound horns

下放大振幅,能有效提高整个超声系统的辐射声功率,特别适合于在声化学等液体处理领域使用。

## 5 结 论

本文提出了一种新型复合超声变幅杆,总长为一个波长,该复合变幅杆由5段组成,其中前面部分起到放大振幅的作用,后面部分起到放大面积的

作用。和普通使用的半波长复合变幅杆相比,该新型变幅杆能在不减小输出面积,甚至增大输出面积的情况下放大输出振幅,从而有效提高整个超声系统的辐射声功率。该新型复合变幅杆特别适合于在声化学等超声液体处理领域使用。

## 参 考 文 献

- [1] Suslick K S. Sonochemistry[J]. Science, 1990, 247(4949): 1439-1445.
- [2] Hickenboth C R, Moore J S, White S R, etc. Biasing reaction pathways with mechanical force[J]. Nature, 446(22), 2007, 423-427.
- [3] 应崇福. 我国的声化学应尽快大力开展实用化工作[J]. 应用声学, 2005, 24(5): 265-268.  
YING Congfu. Turn the suitable laboratory achievements in sonochemistry to practical use[J]. Applied Acoustics, 2005, 24(5): 265-268.
- [4] Mason T J, Lorimer J P. Applied Sonochemistry: The Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2002, 267-293.
- [5] 许晓东, 吕效平, 张跃, 等. 超声催化水解法制邻氯苯甲醛的影响因素[J]. 化学工程, 2004, 32(5): 69-73.  
XU Xiaodong, LV Xiaoping, ZHANG Yue, et al. Analysis of factors effecting preparation of O-chlorobenzaldehyde by hydrolysis with ultrasound[J]. Chemical Engineering, 2004, 32(5): 69-73.
- [6] 高蓉, 陈练洪, 李稳宏, 等. 超声法提取化香树果序中黄酮类化合物工业[J]. 化学工程, 2007, 35(8): 65-73  
GAO Rong, CHEN Lianhong, LI Wenhong, et al. Study on ultrasonic extraction process of flavonoids from infructescence of platycarya strobilacea sieb et zucc[J]. Chemical Engineering, 2007, 35(8): 65-73.
- [7] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004, 91-97.  
LIN Shuyu. Theory and design of ultrasonic transducer[M]. Beijing: Science Press, 2004, 91-97.
- [8] 贺西平, 高洁. 超声变幅杆设计方法研究[J]. 声学技术, 2006, 25(1): 82-86.  
HE Xiping, GAO Jie. A review of ultrasonic solid horn design[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(1): 82-86.
- [9] 贺西平, 程存弟. 纵振型超声变幅杆的等效四端网络[J]. 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 Normal University(Natural Science Edition), 1994, 22(1): 87-88.
- [10] 梁召峰, 林书玉. 余弦形过渡段阶梯形变幅杆研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2003, 31(4): 32-35.  
LIANG Zhaofeng, LIN Shuyu. Stepped type ultrasonic horn with transitional section of cosine type[J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition), 2003, 31(4): 32-35.
- [11] 林书玉. 一种测量功率超声振动系统振速比的简单方法[J]. 应用声学, 2000, 19(4): 31-34.  
LIN Shuyu. A new method of the measurement of velocity ratio of high power ultrasonic vibrating system[J]. Applied Acoustics, 2000, 19(4): 31-34.