

# 带工具头超声变幅杆节点定位偏差问题分析

赵明利<sup>1</sup>, 程雪利<sup>2</sup>, 赵波<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学机械与动力工程学院, 河南焦作 454000; 2. 河南机电高等专科学校机械工程系, 河南新乡 453000)

**摘要:** 节点位置是变幅杆设计的关键参数, 该位置通常用来设置法兰盘, 从而实现变幅杆与其他机构的有效连接。传统解析法通常将变幅杆轴线上位移为零的点作为节点, 但在试验中发现, 用解析法确定的节点位置往往存在较大的振动位移。在解析法的基础上对带工具头变幅杆进行设计, 并借助于有限元软件对变幅杆进行分析研究, 研究表明带工具头变幅杆的节点位置存在定位偏差, 轮廓线与轴线上节点位置不重合, 对频率为 35kHz 的变幅杆而言, 其轮廓线上节点向变幅杆小端偏移 1.5mm。试验现象表明, 相对轴线节点, 在轮廓上的节点位置来设置法兰盘可降低系统能量耗散, 提高系统稳定性。

**关键词:** 节点; 变幅杆; 超声; 有限元

中图分类号: TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-03-0253-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.03.016

## Research on the node localization deviation of the ultrasonic amplitude transformer with tool head

ZHAO Ming-li<sup>1</sup>, CHENG Xue-li<sup>2</sup>, ZHAO Bo<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, He'nan, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Henan Mechanical and Electrical Engineering College, Xinxiang 453000, He'nan, China)

**Abstract:** The node position is a key parameter in designing an amplitude transformer. At this position, a ring flange is usually set up to realize the effective connection of the amplitude transformer with other parts. In the traditional analytic method, the zero displacement point of amplitude transformer axis is usually considered as a node. But in experiments, it is found that the node vibrates with a larger displacement. In this paper, the amplitude transformer with tool head is designed based on the analytic method with finite element software. The research shows that the node of the amplitude transformer is deviated to some extent. That is to say, the node on the contour line doesn't coincide with that on the axis. For a 35 kHz amplitude transformer, the node on contour line is deviated by 1.5 mm toward the small end of the amplitude transformer. Experiments show that relative to the axis node, setting the ring flange at the contour node can reduce the energy dissipation and improve the stability of the system.

**Key words:** node; amplitude transformer; ultrasonic; finite element

## 0 引言

超声振动加工系统一般是指由换能器、变幅杆以及加工工具等所组成的系统, 又称声学系统。超声波发生器产生高频电振荡, 通过声学系统中的换能器转换成高频机械振动, 再经变幅杆放大, 满足加工的要求。设计变幅杆时, 由于要考虑变幅杆的安装问题, 往往对变幅杆的节点位置特别关注。运用解析法设计变幅杆时, 通常根据波动理论来确定的节点位置, 将轴线上振动位移为零的点视为节

点。但实际上在该点设置法兰盘往往会产生很大的振动位移, 也就是变幅杆截面的非均匀性会引起节点位置的偏移。本文着重对带工具头变幅杆的节点定位偏差问题进行研究。

## 1 变幅杆材料及类型的选择

设计变幅杆时首先要确定变幅杆所用材料以及变幅杆的类型。变幅杆所用材料必须具备良好的传声性能, 另外要有较好的韧性、硬度、足够高的耐疲劳强度、便于机械加工及降低成本等特点。试验中选用 45 钢调制处理后来制作变幅杆, 材料参数如表 1 所示。

在选择变幅杆类型时要考虑以下几个因素: (1) 结构简单容易加工; (2) 振动能量能够有效传递;

收稿日期: 2012-06-16; 修回日期: 2012-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975080)。

作者简介: 赵明利(1975—), 女, 河南温县人, 博士, 硕士生导师, 研究方向为精密、超精密加工及其表面技术研究。

通讯作者: 赵明利, E-mail: zhaomingli@hpu.edu.cn

表 1 45 钢材料参数  
Table 1 Material parameters of 45 steel

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	声速 $c$ $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	泊松比
45 钢	7800	210	5169	0.28

(3) 具有足够高的放大倍数和工作稳定性; (4) 能够与其它声学元件合理匹配等。本文选用圆锥形结构, 因为圆锥形变幅杆在制造工艺以及工作稳定性方面具有一定优势。

## 2 基于波动理论对变幅杆进行设计的计算

超声波在变截面杆中的传播可看作简谐振动, 由波动理论可得变截面杆纵向振动的波动方程<sup>[1,2]</sup>:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial x} + K^2 \xi = 0 \quad (1)$$

式中:  $A$  为变截面杆横截面积的函数;  $\xi$  为质点的位移函数;  $K$  为圆波数,  $k = \omega/c$ ;  $c$  为纵波在杆中的传播速度,  $c = \sqrt{E/\rho}$ ;  $\rho$  为细杆材料的密度;  $E$  为材料的杨氏模量。

由式(1)并按照解析法求解<sup>[3-5]</sup>, 可确定变幅杆参数如表 2 所示, 其中变幅杆大端小端的参数要满足工艺要求。

表 2 变幅杆参数  
Table 2 Parameters of amplitude transformer

频率 $f/\text{kHz}$	大端直径 $D/\text{mm}$	小端直径 $d/\text{mm}$	谐振长度 $l/\text{mm}$	位移节点 $x_0/\text{mm}$	放大系数 $M$
35	30	15	77.3	33.4	1.94

## 3 带工具头变幅杆的节点偏移问题研究

基于局部共振理论及实际工作需要来确定工具头的结构参数, 工具头长度为 74mm, 宽度为 25mm, 高为 15mm。用波动理论对变幅杆进行振动分析时, 往往将材料视为一维材料, 将纵振超声波视为平面波, 即假设在变幅杆中同一截面上所有质点作等幅振动。而实际上材料在纵向振动过程中由于泊松比的存在会引起材料的横向振动, 材料不再是单纯的一维纵向振动<sup>[6]</sup>, 变幅杆的节点位置会产生一定的偏移。文中基于波动理论对变幅杆进行设计, 通过 ProE 对初始设计参数建模, 并借助有限元软件对变幅杆的节点偏移问题进行研究。

### 3.1 带工具头变幅杆的有限元模型建立

由解析法得到的变幅杆参数用 ProE 建立三维

模型, 需要说明的是建模参数要与 ANSYS 环境下的参数单位统一, 因此建模时要以“米”为单位, 图 1(a)为 ProE 建立并导入到 ANSYS 环境的 35kHz 的变幅杆三维模型。所建模型导入到 ANSYS 环境下对其进行有限元分析, 首先选用 Solid95 单元类型对所建模型进行网格划分<sup>[7]</sup>, 如图 1(b)所示。

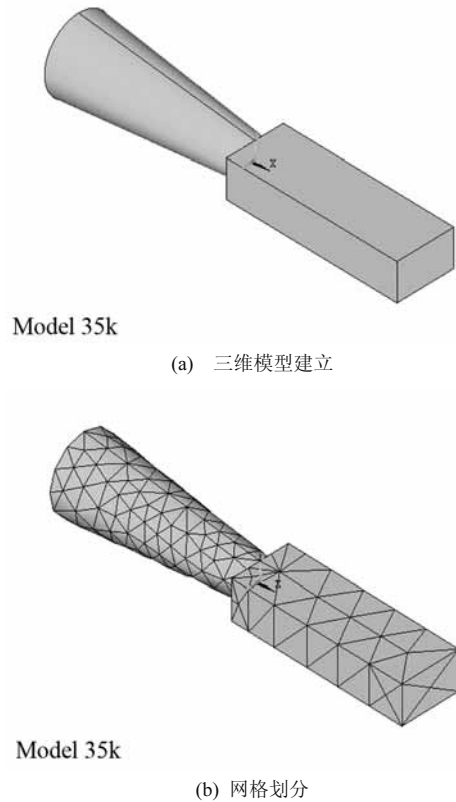


图 1 变幅杆有限元模型  
Fig.1 Finite element model of amplitude transformer

### 3.2 带工具头变幅杆的模态分析

本文利用 ANSYS 有限元软件对变幅杆进行模态分析。

首先在前处理器中按表 1 定义材料的弹性模量、泊松比和密度等参数, 并在前处理器中选定分析类型为模态分析, 在分析选项中将模态扩展数设置为 5, 并设定在系统设计频率的 $\pm 4\text{kHz}$  范围内进行频率扫描, 对于 35kHz 的变幅杆其频率扫描范围为 31~39kHz。在求解器中求解, 可得到 5 阶模态, 见表 3。依次读取每一个模态, 并进入后处理器对

表 3 各阶模态情况  
Table 3 Conditions of the modes

序号	频率/Hz	载荷步	子步	迭代次数
1	33241	1	1	1
2	34388	1	2	2
3	35047	1	3	3
4	37994	1	4	4
5	38515	1	5	5

其振动性能进行分析，发现在 5 个模态中第 1、第 3 个模态为弯曲振动，第 4、5 模态为扭转振动，第 2 模态为纵向振动。对于超声加工而言，感兴趣的是纵向振动，因此在后处理过程中重点分析产生纵向振动的模态情况，图 2(a)是在后处理过程中获得的系统的纵向振动模态情况，与图 1(b)相比，图 2(a)有明显的纵向位移变化，事实上，纵向振动是一个动态的过程，图 2(a)仅是纵向振动时的一个瞬时状态。图 2(b)为变幅杆质点在  $x$  方向的位移云图。模态分析结果表明系统纵振谐振频率为 34.388 kHz，与设计频率 35kHz 比较接近，并且在工具头后端振动位移达到最大值。

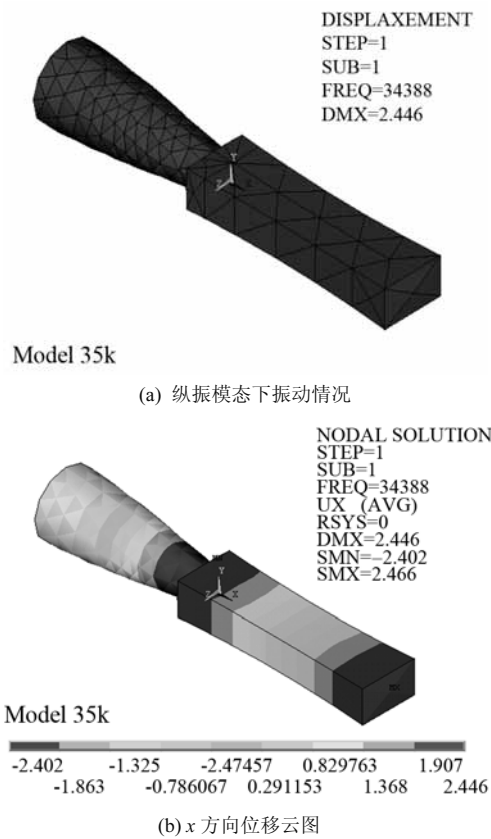


图 2 变幅杆有限元分析  
Fig.2 Finite element analysis of amplitude transformer

### 3.3 带工具头变幅杆的节点偏移研究

在超声加工过程中，超声振动系统不是单独工作，而是通过法兰盘固定安装在机架上，与其它系统配合工作。为了尽可能减小系统阻尼，通常情况下选择系统轴向位移为零处(即节点)来设置法兰盘，因此对于变幅杆而言找出节点位置来设置法兰盘也是设计过程中的重要环节之一，由于系统要靠法兰盘与支撑体牢固相连，如果法兰盘位置选择不当，将会造成法兰盘振动振幅过大，系统发热严重，系统能量大大损耗，并且使系统刚性降低，达不到精密加工要求。本文借助 ANSYS 后处理器的路径

分析功能，分析变幅杆的轴线以及轮廓线上的位移分布，分析结果如图 3、图 4 所示。图 3(a)为位移分布曲线，图 3(b)为所选路径上的位移分布云图。

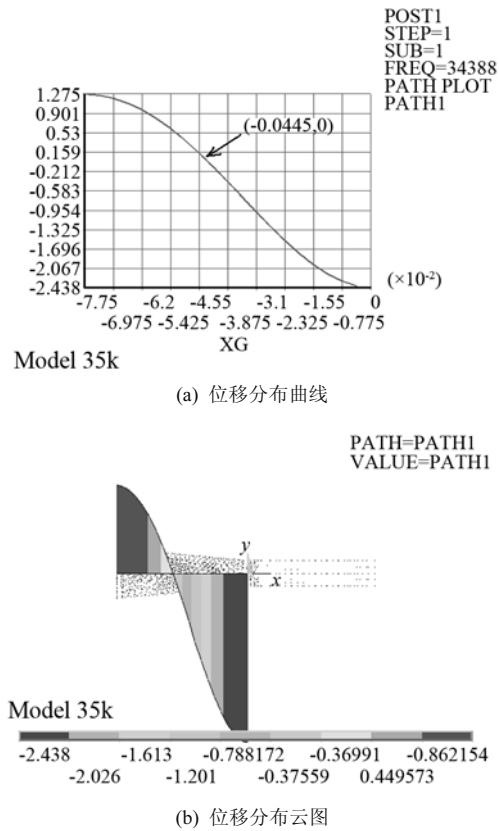
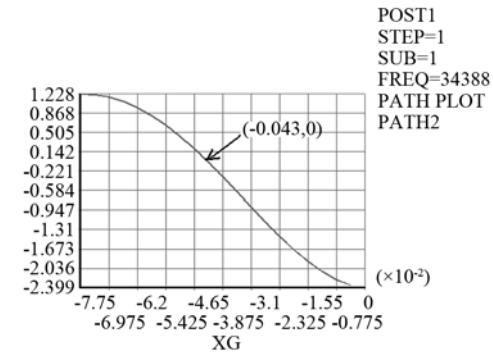


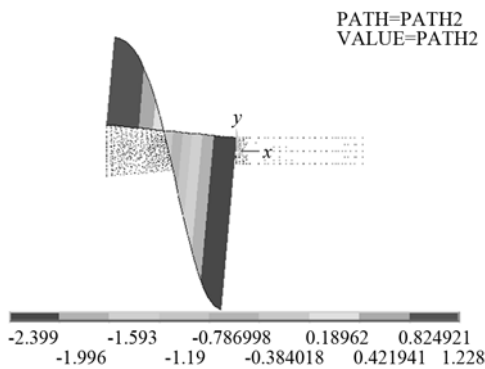
图 3 沿轴线位移分布图  
Fig.3 Displacement distribution in axial direction

图 3 为轴线上质点的位移分布情况，图 4 为沿轮廓线上质点的位移分布情况，其中图 4(a)中横坐标为  $x$  坐标，该方向与轴线方向一致。对比图 3、图 4 可以看出，轮廓线的位移分布与轴线上的位移分布存在一定偏差。图 3 显示轴线上节点位置在  $(-0.0445, 0)$ ，距小端 44.5mm，变幅杆的放大倍数为 1.91；而图 4 表明轮廓线上节点位置在  $(-0.043, 0)$ ，距小端 43 mm 处，轮廓线与轴线上节点位置不重合，轮廓线上节点向变幅杆小端偏移 1.5mm。在声学领域，传统的解析法通常将轴线上位移为零的点作为节点，从上面的分析可知，轴线上的节点位置所对应轮廓的质点在轴向仍然具有一定的振动位移。

在试验中发现，依据轴线上的节点位置来设置法兰盘，在工作过程中法兰盘振动强烈，系统发热可达到 70~80℃，甚至会出现“滴水雾化”现象，严重影响换能器的正常工作，并且使系统能量急剧耗散，无法达到设计要求。而依据轮廓线的位移分布情况，将轮廓上位移为零的点作为法兰盘厚度方向的中心位置，相对于按轴线上的节点位置来设置法兰盘更具合理性。



(a) 位移分布曲线



(b) 位移分布云图

图 4 外轮廓线上的位移分布图

Fig.4 Displacement distribution on contour line

## 4 结 论

传统的解析法求解变幅杆节点时,往往假定材料是一维材料,超声波在变幅杆中传播时为平面波,忽略了变幅杆纵向弹性变形是由泊松比引起的横向振动,并且解析法将轴线上振动位移为零的点作为节点,并依此来设置法兰盘。事实上轴线上的节点位置所对应轮廓的质点在轴向仍具有较大的振动位移,轮廓线与轴线上节点位置不重合。通过

对节点定位偏差问题进行探析,发现依据轴线位移分布确定的节点距变幅杆小端的距离大于依据轮廓线位移确定的节点距小端的距离,即轮廓线上的节点位置向变幅杆小端产生了一定程度的偏移。该研究为变幅杆的设计提供了新的思路,并为变幅杆的制造提供参考。

致谢:本文试验研究得到精密制造技术与工程河南省高校重点开放实验室的大力支持,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 张云电. 超声加工及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1995: 64-97.  
ZHANG Yundian. Ultrasonic machining and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 64-97.
- [2] 贾杨, 沈建中. 阶梯形变幅杆的频率特性分析[J]. 声学技术, 2006, 25(2): 154-159.  
JIA Yang, SHEN Jianzhong. Frequency response of stepped ultrasonic horn[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(2): 154-159.
- [3] 马大猷. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2004, 164-178.  
MA Dayou. Acoustic manual[M]. Beijing: Science Press, 2004: 164-178.
- [4] 曹凤国. 超声加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 70-80.  
CAO Fengguo. Ultrasonic machining technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 70-80.
- [5] 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 reaview of ultrasonic solid horn design [J]. Technical Acoustics, 2006, 25(1): 82-86.
- [6] 阳培, 赵波. 用于功率超声磨削声学系统的阶梯型变幅杆节点位置研究[J]. 机械传动, 2010, 34(10): 54-57.  
YANG Pei, ZHAO Bo. Research on the node position of stepped horn Using in power ultrasonic grinding system[J]. Mechanical Transmission, 2010, 34(10): 54-57.
- [7] 王毅, 吴立言, 韩冰. ANSYS 的两种有限元单元应用研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(6): 954-957.  
WANG Yi, WU Liyan, HAN Bing. Research of two type finite element mesh application in ANSYS[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(6): 954-957.