引用格式: 林基艳,林书玉. 基于梳状扇形孔周期性结构的纵-扭复合模态超声振动系统[J]. 声学技术, 2020, **39**(5): 567-573. [LIN Jiyan, LIN Shuyu. Longitudinal-torsional composite modal ultrasound vibration system with periodic structure of comb sector holes[J]. Technical Acoustics, **39**(5): 567-573.] **DOI**: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.05.008

基于梳状扇形孔周期性结构的纵-扭复合模态 超声振动系统

林基艳^{1,2},林书玉¹ (1. 陕西师范大学物理学与信息技术学院,陕西西安 710119; 2. 榆林学院信息工程学院,陕西榆林 719000)

摘要:纵-扭超声振动系统可以提高加工效率与精度、增加表面强度,因而日益受到青睐,但是现有的纵-扭振动系统 存在扭转分量较小,转化效率低等问题,基于此,论文对基于周期性结构的复合模态超声振动系统进行了研究,通 过有限元仿真对复合模态周期性结构换能器的振动模态、谐振频率等特性进行分析验证。研究结果表明,两维梳状 扇形孔周期和斜槽结构,可以增大纵、扭振振幅,位移旋度和剪切应力以及法向应力等,从而提高纵-扭转化能力。 关键词:纵-扭复合模态;周期性结构;斜槽;谐振频率;有限元仿真 中图分类号:O426.2 文献标识码:A 文章编号:1000-3630(2020)-05-0567-07

Longitudinal-torsional composite modal ultrasound vibration system with periodic structure of comb sector holes

LIN Jiyan^{1,2}, LIN Shuyu¹

School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shaanxi, China;
 School of Information Engineering, Yulin University, Yulin 719000, Shaanxi, China)

Abstract: Longitudinal-torsional ultrasonic vibration system is becoming more and more popular because it can improve machining efficiency and accuracy and increase surface strength. However, the torsional vibration component of the existing longitudinal-torsional vibration system is small and the conversion efficiency is low. Based on this, the composite modal ultrasonic vibration system with periodic structure is proposed in this paper, and its vibration modes, resonant frequency and other characteristics are analyzed and verified by numerical simulation. The results show that the two-dimensional periodic structure of comb sector holes and skewed slots can increase the longitudinal and torsional amplitudes, displacement curl, shear stress and normal stress, and improve the longitudinal-torsional conversion ability. **Key words:** longitudinal-torsional composite mode; periodic structure; skewed slots; resonant frequency; finite element simulation

0 引 言

纵-扭复合模态的超声振动系统因为符合高效 率、高精度、高可靠性的现代科技工业和技术的发 展要求,受到越来越多的重视^[1]。虽然纵-扭复合型 超声加工方式得到了世界的公认,但在其设计、研 究、加工制造等方面没有形成系统的、完善的理论 体系^[2]。针对上述情况,国内外学者对有关问题都 进行了积极的理论研究与实验分析。

螺旋状麻花钻头型变幅杆可以产生纵-扭复合

通讯作者:林书玉, E-mail: sylin@snnu.edu.cn

振动,但由于变幅杆的结构复杂,理论计算及设计 极为繁琐,不利于工程技术中的广泛应用^[3];也有 研究者利用切向极化的压电陶瓷圆环产生扭转振 动,但由于切向极化压电陶瓷元件的极化、加工工 艺复杂以及换能器的纵向与扭转振动很难实现同 频共振等的限制,导致换能器的功率容量、振动性 能受限,不利于大功率的超声应用[4]。日本学者在 超声马达的研制中,提出了一种纵-扭复合振动模 式超声换能器,利用超声变幅杆上的斜槽实现纵-扭复合^[5]; Karafi 等^[6]设计了一种纵-扭磁致伸缩超 声换能器,通过将径向磁场和周向磁场复合而成的 螺旋磁场施加到磁致伸缩变幅杆上,产生径向振动 和扭转振动,但纵-扭效果均不理想;林书玉^[7]对斜 槽式纵-扭复合超声振动系统进行了研究,指出因为 振动传递到斜槽时产生的切向力导致系统产生扭 转振动,并推导出纵-扭振动的机械转换系数,分析

收稿日期: 2019-07-20; 修回日期: 2019-09-05

基金项目:国家自然科学基金(11674206、11874253、11964040)资助 项目。

作者简介:林基艳(1984一), 女,山东烟台人,博士研究生,研究方向 为功率超声、声子晶体。

了斜槽参数对振动系统的频率的影响。皮钩等¹⁸研究 了斜槽式纵-扭超声振动装置,着重分析斜槽圆环变 幅杆的纵-扭转化原理;唐军等¹⁹研究了一种新型的贴 片式纵-扭复合振动系统,通过调整压电陶瓷与换能 器轴的轴向角度,使系统产生纵-扭复合振动。

目前,很多研究都倾向于采用斜槽结构实现单激励的模式转换型纵-扭换能器,这种方法实现起来较为简单,但斜槽式纵-扭振动系统普遍存在扭转分量较小、转化效率低等缺点^[10]。基于此,本文提出了基于周期性结构的复合模态超声振动系统并对其进行研究,该系统由纵向振动夹心式压电陶瓷换能器、圆锥形变幅杆以及带有梳状扇形孔的斜槽式振动体三部分组成,驱动部分采用纵向振动的夹心式压电换能器,振动输出部分则是采用梳状扇形孔的斜槽式振动体。通过有限元分析软件对设计的结构进行了必要的分析和验证,通过仿真分析表明,该复合模态超声振动系统扭转分量大,转化效率高。

周期性结构纵-扭复合模态超声振 动系统的原理和设计

1.1 模态转换原理

周期性结构纵-扭复合模态超声振动系统是利 用轴向极化的压电陶瓷片产生纵向振动,当纵波传 递到斜槽位置时,由于斜槽的作用,变幅杆的输出 端会产生两种振动:纵向振动以及由剪切分力产生 的扭转振动^[11]。其原理示意图和产生扭转振动部分 的振动体的截面如图1所示。



图 1 带有梳状扇形孔和斜槽的纵扭振动转换体 Fig.1 The longitudinal-torsional vibration converter with comb sector holes and skewed slots

图 1 中斜槽处的力 F 被分为两部分:法向力 F_L 和剪切力 F_r ,二者的关系可表示为^[7]

$$F_L = F \cos \theta \tag{1}$$

$$F_{\gamma} = F \sin \theta \tag{2}$$

式中: θ为斜槽和变幅杆轴线之间的夹角。基于机 械振动理论,法向力使得振动系统产生纵振,剪切 力则使系统产生扭转振动。剪切力在变幅杆前分界 面处的扭矩 *M* 可由式(3)表示^[7]:

$$M = \iint r\tau \mathrm{d}s_d \tag{3}$$

式中: S_d为圆环的截面积,表示为

$$s_{d} = \frac{9\pi \left(R_{1}^{2} - R_{2}^{2}\right) + 9\pi R_{3}^{2} + 2\pi R_{2}^{2} - 2\pi R_{3}^{2}}{9}$$
(4)

式(3)、(4)中: R_1 和 R_2 分别为圆环的外、内半径; R_3 为中心圆的半径; r为变幅杆圆筒内任意处的截面半径; ds_d 为微分元面积; τ 为分界面上单位面积的剪切力,因此,由以上可知,单位面积的剪切力, 了一表示为^们

$$\tau = \frac{F \sin \theta}{\pi \left(R_1^2 - R_2^2\right) + \pi R_3^2 + \frac{2\pi R_2^2}{\Omega} - \frac{2\pi R_3^2}{\Omega}}$$
(5)

将式(5)代入式(3)积分后,便可得到如下公式:

$$M = \frac{2F\sin\theta \left[\frac{1}{9}R_{1}^{2} - (R_{2} - R_{3})^{3}\right]}{3\left[\frac{7}{9}R_{1}^{2} - (R_{2} - R_{3})^{2}\right]}$$
(6)

根据以上分析可知,因为斜槽的存在,振动体中的振动形式由一维的纵向振动转换为二维纵-扭 复合振动。

1.2 梳状扇形孔周期性结构的设计

扭转振动主要由两种方式来实现:振动模式转 换和切向极化的压电陶瓷晶堆的振动。第二种方法 由于工艺复杂、电击穿、功率容量等问题,很难研 制大功率高性能的振动系统^[12]。因此,本文采用第 一种模式转换的方式。

模式转换常用的方法有开斜槽和开螺旋槽,但 开螺旋槽的方法结构复杂,理论计算及设计极为繁 琐。因此本研究采用了在振动体上开斜槽的方法来 实现纵-扭复合模态的超声振动。其优点是结构简 单,但研究发现,该方法产生的扭转分量较小,转 化效率较低^[13]。为了增大扭转分量,提高转换效率, 本设计采用了梳状扇形孔周期结构振动体。

该梳状扇形孔周期结构可近似等效为弹簧-摆 模型,即每个扇形片可以看作一个具有剪切和弯曲 刚度的弹簧,其中每个扇形片在振动中所起的作用 也不同,有的可以看作剪切弹簧,有的可以看作拉 压弹簧,有的同时起剪切和拉压的作用,扇形片的 剪切变形增加了系统的扭转分量^[14]。整个梳状扇形 孔周期性结构如图2所示。



图 2 梳状扇形孔周期性结构和振型图 Fig.2 The periodic structure and its vibration mode shape of comb sector holes

2 有限元分析

周期性结构纵-扭复合模态超声振动系统由夹 心式换能器、圆锥型变幅杆以及梳状扇形孔周期结 构振动体组成。根据一维纵向振动理论,初始先按 谐振频率为 20 kHz 来设计全波长结构的超声振动 系统,其中夹心式压电陶瓷换能器为半波振子换能 器,圆锥形变幅杆和梳状扇形孔周期结构振动体二 者整体为半波振子。换能器由前盖板、压电陶瓷晶 堆和后盖板三个部分组成,前后盖板的材料均为 铝,密度 *ρ*=2 700 kg·m⁻³,弹性模量 *E*=69 GPa,泊 松比 $\sigma=0.33$, 压电陶瓷晶堆选择 PZT-4, 密度 $\rho=$ 7 500 kg·m⁻³,弹性模量 *E*=64.5 GPa, 泊松比 σ=0.32。 根据以上分析计算,设压电陶瓷厚度为 6 mm,两 片压电陶瓷的半径为 25 mm; 前盖板长度为 35 mm;后盖板长度 82 mm。对圆锥形变幅杆,初 始设置大端的底面半径为 25 mm,顶面半径为 20 mm,长度为 58 mm。梳状扇形孔周期结构振动 体的初始半径设置为 20 mm,长度 71 mm。

图 3 为初始周期性结构纵-扭复合模态超声振动系统 Comsol 模型图和尺寸图,图 4 为振动体的结构尺寸图。



图 3 初始纵-扭复合模态超声振动系统模型、尺寸图 Fig.3 Model and dimension diagram of initial longitudinaltorsional composite modal ultrasonic vibration system



图 4 初始振动体结构尺寸图

2.1 周期性结构参数对振动系统谐振频率的影响 的分析

超声振动系统中的一个重要的参数是谐振频 率,谐振频率会随着振动系统结构的变化而改变, 即梳状扇形孔周期性结构的存在,可以影响系统的 谐振频率。

因此,本文仿真分析了周期性结构参数对振动

系统频率的影响规律,这里的周期性结构包括两种 ——斜槽和梳状扇形孔。斜槽参数主要有斜槽的倾 角θ、长度L、宽度W、深度H和离圆锥段距离S, 离辐射面的距离S₁;梳状扇形孔参数主要有扇形片 的中心角度数φ、半径R₂和内核圆半径R₃。斜槽和 梳状扇形孔参数示意图如图5所示,仿真结果如图 6~13所示。

通过图 6 可以发现,当其他参数不变时,随着 斜槽倾角 θ 的增大,以纵振为主的谐振频率逐渐减





and comb sector holes





Fig.4 Dimension diagram of initial vibration body structure























小,当 $\theta \ge 70^{\circ}$ 时,随着 θ 的增大,以纵振为主的谐 振频率逐渐增大,而以扭振为主的谐振频率变化趋 势与之相反。从图7可知,当其他参数不变时,以 纵振为主的谐振频率随着斜槽长度 L 的增大先增 大,后减小,然后再增大;而以扭振为主的谐振频 率随着斜槽长度 L 的增大先减小, 然后趋于平稳。 从图 8 可知,纵振和扭振为主的谐振频率皆随着斜 槽宽度 W的增大而增大。从图 9 可以看出, 纵振为 主的谐振频率随着斜槽深度 H 的增大先增大, 后减 小; 而扭振为主的谐振频率随着 H 的增大先变化平 缓,后减小。从图 10 可以看出,纵振为主的谐振 频率随离圆锥段距离 S 的增大而减小; 而扭振为主 的谐振频率随S的增大而逐渐增大。

梳状扇形孔参数对谐振频率的影响如图 11~ 13 所示。从图 11 可以看出,纵振为主的谐振频率 随扇形片中心角度 φ 的增大而减小;而扭振为主的 谐振频率随着 φ 的增大先减小后变化平缓。从图 12 可以看出,纵振为主的谐振频率随着扇形片半径 R, 的增大而增大;而扭振为主的谐振频率随着 R,的增 大先变化平缓后减小。而从图 13 则可以看出,纵振 为主的谐振频率随着内核圆半径 R,的增大而减小; 而扭振为主的谐振频率随着 R,的增大而逐步增大。

通过 Comsol 派生值的表达式计算发现,合理 选择换能器的前后盖板长度、复合变幅杆长度及振 动体参数,可以有效地增大纵、扭振振幅,位移旋 度和剪切应力以及法向应力等,提高纵-扭转化能 力。因此,综合考虑周期性结构对超声振动系统谐 振频率和U,、V,、W,以及位移旋度、剪切应力和法 向应力等性能指标的影响(Ux、Vy、Wz分别代表节 点随时间和位置变化的位移响应,从U_x、V_y可分别 得到 x、y 方向的位移振幅,从W_则可以得到变幅 杆 z 方向即纵振振幅, 位移旋度 x、y 矢量则表示物 体转动时在x、y方向的转动位移,位移旋度越大, 扭转分量越大:垂直于剪切面的单位面积上受到的 内力分量,称为法向应力,相切于剪切面的单位面 积上受到的内力分量称为剪切应力),最终设定了换 能器、复合变幅杆以及复合变幅杆振动体结构的各 部分尺寸,如图 14、15 所示。

斜槽的长度为 30 mm, 宽度为 2.5 mm, 深度为 5 mm, 与圆柱端 y 轴向成 80°(与 z 轴成 10°)。此时

				单位: mm
68.25	56.75	33	66	80
17		25		

图 14 纵-扭复合模态超声振动系统最终模型、尺寸图 Fig.14 Final model and dimension diagram of longitudinaltorsional composite modal ultrasonic vibration system

系统的剪切应力、法向应力、振幅、位移旋度相对 较大,性能最好。



图 15 振动体结构最终尺寸图 Fig.15 Dimension diagram of final vibration body structure

2.2 模态分析

模态分析的目的是确定结构的固有频率和振 型^[15]。为简化模型,忽略预应力螺栓的影响。利用 Comsol 进行模态分析,搜索频率范围为 5~20 kHz, 通过观察模态振型可知,系统在 f=7 896、11 336 Hz 时,振动形式是扭转振动为主的纵扭复合振动; f=12 226、18 750 Hz 时, 振动形式是纵向振动为主 的纵扭复合振动,振型图如图 16 所示。



图 16 纵-扭复合模态超声振动系统振型图 Fig.16 Diagrams of vibration mode shape of the longitudinaltorsional composite modal ultrasonic vibration system

本文将复合变幅杆圆柱端设计为梳状扇形孔 周期性结构,根据前面的分析可知,该结构可以有 效的增大扭转分量。为了更加形象地看到效果,本 文将无周期性结构和有周期结构的系统进行仿真 对比(其它参数均相同),二者的模型如图 17 所示。



图 17 超声振动系统变幅杆圆柱端有或无梳状扇形孔 周期结构的模型对比图

Fig.17 Comparison of the model of ultrasonic vibration system with or without the periodic structure of comb sector holes at the cylindrical end of horn

选取剪切应力、法向应力、振幅、位移旋度作 为评价指标进行对比。对比的效果如表 1、2 所示, 数值越大,系统的性能越好。因为振型较多,因此 这里只选取部分振型进行研究。

从表 1、2 可以看出,周期性结构的各项性能 指标均优于非周期性结构。

表 1 有无周期结构的系统扭转振动的指标对比表 Table 1 Comparison of the indicators of torsional vibration for the system with or without periodic structures

振动 形式	结构	频率/Hz	<i>U_x</i> 振幅/ mm	V _y 振幅/ mm
一阶扭	非周期	8 073	9.93×10 ⁻⁵	-1.85×10 ⁻⁴
振为主	周期	7 896	-1.79×10 ⁻⁴	5.96×10 ⁻⁴
二阶扭	非周期	11 437	2.59×10 ⁻⁵	-6.56×10 ⁻⁵
振为主	周期	11 336	1.76×10 ⁻⁴	1.40×10 ⁻⁴
振动 形式	结构	位移旋度 <i>x</i> 分量/ (rad·s ⁻¹)	位移旋度 <i>y</i> 分量/ (rad·s ⁻¹)	剪切应力/ (N·m ²)
一阶扭	非周期	6.75×10 ⁻⁶	2.82×10 ⁻⁶	$\frac{1.40{\times}10^7}{4.68{\times}10^7}$
振为主	周期	-6.21×10 ⁻⁵	-3.98×10 ⁻⁶	
二阶扭	非周期	2.93×10 ⁻⁶	6.69×10 ⁻⁷	3.66×10 ⁶
振为主	周期	-2.32×10 ⁻⁵	1.46×10 ⁻⁵	7.07×10 ⁶

表 2 非周期结构和周期性结构纵振指标对比表 Table 2 Comparison of the indicators of longitudinal vibration for the system with or without periodic structures

振动 形式	结构	频率/Hz	<i>W_z</i> 振幅/ (mm)	法向应力/ (N·m²)
一阶纵	非周期	12 511	-1.92×10 ⁻²	5.90×10^{3}
振为主	周期	12 226	-3.03×10 ⁻²	7.32×10^{3}
二阶纵	非周期	18 636	5.47×10 ⁻³	-3.73×10^{3}
振为主	周期	18 750	7.78×10 ⁻³	-4.32×10^{3}

3 结论

基于斜槽的纵-扭复合模态超声振动存在扭转 分量小、转换效率低等问题,针对此问题,本文设 计了基于周期性结构的纵-扭复合超声振动系统,通 过在复合变幅杆上设置梳状扇形孔和斜槽,得到扭 转分量大的纵-扭复合超声振动系统,并使用有限元 分析方法对系统的振动模态、结构和影响系统性能 的参数进行了分析研究。梳状周期性和斜槽的设计 可为其它纵-扭复合振动超声系统提供参考,具有一 定的指导意义。

参考文献

[1] 房善想,赵慧玲,张勤俭.超声加工技术的应用现状及其发展趋势
 [J].机械工程学报,2017,53(19):22-32.
 FANG Shanxiang, ZHAO Huiling, ZHANG Qinjian. Application

status and development trend of ultrasonic machining technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, **53**(19): 22-32.

- [2] LIN S Y. Sandwiched piezoelectric ultrasonic transducers of longitudinal-torsional compound vibrational modes[J]. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2002, 44(6): 1189-1197.
- [3] 皮钧. 圆环斜槽传振杆的纵扭振动转换[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 242-248.
 PI Jun. Conversion of longitudinal torsional vibration of vibration

transmission rod with circular ring and inclined groove[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5): 242-248.

[4] 林书玉. 大振幅纵-扭复合振动模式超声变幅杆[J]. 压电与声光, 2002, 24(1): 81-83.

LIN Shuyu. Ultrasonic horn with large amplitude longitudinal torsional vibration mode[J]. Piezoelectric and Acousto Optic, 2002, **24**(1): 81-83.

- [5] 上羽贞行,富川一郎. 超声马达理论与应用[M]. 杨志刚,郑学论,译. 上海:上海科学技术出版社, 1992.
- [6] KARAFI M R, HOJJAT Y, SASSANI F. A new hybrid longitudinal-torsional magnetostrictive ultrasonic transducer[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(6): 065013.
- [7] 林书玉. 斜槽式纵-扭复合模式压电超声换能器的研究[J]. 声学学 报, 1999, 24(1): 59-65.

LIN Shuyu. Research on inclined slot longitudinal torsional composite mode piezoelectric ultrasonic transducer[J]. Acta Acustica, 1999, **24**(1): 59-65.

[8] 皮钧, 徐西鹏. 纵扭共振超声铣削研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1163-1169.

PI Jun, XU Xipeng. Research on longitudinal torsional resonance ultrasonic milling[J]. China Mechanical Engineering, 2009, **20**(10): 1163-1169.

- [9] 唐军,赵波. 一种新型纵扭复合超声振动系统的研究[J]. 机械科学 与技术, 2015, 34(5): 742-747. TANG Jun, ZHAO Bo. Research on a new longitudinal torsional composite ultrasonic vibration system[J]. Mechanical Science and Technology, 2015, 34(5): 742-747.
- [10] 袁松梅,唐志祥,吴奇,等. 纵扭超声换能器设计及其性能测试研 究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 139-148. YUAN Songmei, TANG Zhixiang, WU Qi, et al. Design and performance test of longitudinal torsional ultrasonic transducer[J].

Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1): 139-148.

[11] 曹睿. 纵扭复合超声振动系统研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2014.

CAO Rui. Research on longitudinal torsional composite ultrasonic vibration system[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2014.

[12] 唐军,赵波,张烨,等. 纵扭模态叠加型超声振子的设计研究[J]. 机械设计与制造, 2017(2): 87-90.
TANG Jun, ZHAO Bo, ZHANG Ye, et al. Design of ultrasonic oscillator with longitudinal torsional mode superposition[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2017(2): 87-90.

 [13] 刘建慧,姚斌. 纵-扭复合模式压电超声换能器设计分析[J]. 机械 设计与研究, 2016, 32(4): 175-182.
 LIU Jianhui, YAO bin. Design and analysis of longitudinal torsional composite mode piezoelectric ultrasonic transducer[J]. Mechanical Design and Research, 2016, **32**(4): 175-182.

[14] 王艳锋. 共振单元声子晶体的带隙特性及设计[D]. 北京: 北京交 通大学, 2015.

WANG Yanfeng. Band gap characteristics and design of resonant unit phononic crystals[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.

[15] 唐军. 纵-扭同频复合超声振动变幅杆设计[J]. 陕西师范大学学报, 2013, 41(6): 33-37.

TANG Jun. Design of longitudinal torsional composite ultrasonic vibration horn[J]. Journal of Shaanxi Normal University, 2013, 41(6): 33-37.