

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.06.013

# 微孔超声振动钻削装置设计

张 建, 张敏良, 岳耀波, 王 辉

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

**摘 要:**针对目前传统钻床钻削微孔存在的局限性,基于超声振动钻削基本理论,课题组设计了一套超声轴向振动钻削装置,用于对微孔进行钻削加工。并基于 ANSYS 软件运用有限元法对超声振动装置的核心微孔部件变幅杆进行动力学特性仿真研究,得到变幅杆的固有频率和振型以及在变幅杆达到共振时的自由端振幅,从而获得变幅杆的振幅放大系数等参数,设计了高振幅放大比变幅杆。该超声振动钻削装置可直接安装在摇臂钻床主轴上进行微孔的钻削加工,并得到高质量的微孔。该设计有效解决了传统钻削的不足。

**关 键 词:**超声振动钻削;微孔;振动装置;变幅杆;有限元分析

中图分类号: TG52 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2017)06-0057-05

## Design of Ultrasonic Axial Vibration Drilling Device for Micropores

ZHANG Jian, ZHANG Minliang, YUE Yaobo, WANG Hui

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Aiming at the defects existing in the traditional drilling machine in drilling micro holes, and based on the principle of vibration drilling, a set of ultrasonic axial vibration drilling device was designed, which could be used for vibration drilling of micro holes. The FEM software ANSYS was used in the simulation of the the horn's dynamic characteristics. The natural frequency and vibration mode of the horn were calculated and achieved the amplitude of the free end of the horn in the resonance state, and the amplitude amplification ratio and the other parameters were obtained. A high amplitude amplification horn was designed. The ultrasonic vibration drilling device could be directly installed in the radial drilling machine spindle for the micro hole drilling process, and the high quality of the micro hole was gotten. This design overcomes the shortcomings of traditional drilling.

**Keywords:** ultrasonic vibration drilling; micropore; vibration device; Horn; FEA (finite element analysis)

随着科技的飞速发展,微孔加工在机械制造、航空航天、汽车、仪器仪表、电子和自动控制等领域的应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。实践表明,随着新型高强度硬脆复合材料的不断涌现,由于普通钻削的局限性和不足(比如高速钻床转速高成本大,低速钻床又达不到高精度钻削要求),带来了切削热难于排出、切削温度高、入钻精度差、钻头磨损较快、钻头寿命短、断屑困难、排屑不畅、出口毛刺大及孔表面质量低等问题<sup>[2]</sup>,普通钻削越来越难以满足对微孔加工精度的要求。为此本课题组设计了一套简单实用的超声振动钻削装置,可以直接安装在机床主轴上,用于对微孔的钻削加工。

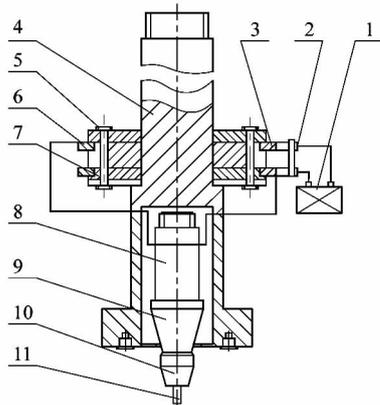
### 1 总体结构设计

超声振动钻削最理想的情况是应用超声机床进行振动钻削加工,但是鉴于这种专用机床研制难度大、成本高,目前国内外还未完全掌握这种技术。为此,作者在原有摇臂钻床基础上增加辅助装置——超声振动钻削装置,来进行振动钻削加工。振动钻削是脉冲式间歇加工,在钻孔过程中,通过超声振动钻削装置使钻头和工件之间产生可控的相对轴向振动,利用振动周期内极短的瞬间进行钻削<sup>[3]</sup>。钻削效果的好坏与振动装置的振幅和频率息息相关,因此振动钻削工艺的关键就是超声振动装置的设计。振动可以施加在刀具上

收稿日期:2017-04-13;修回日期:2017-07-17

第一作者简介:张建(1991),男,湖北襄阳人,硕士研究生,主要研究方向为超声振动钻削。E-mail:15201862998@163.com

也可以施加在工件上,本装置选用刀具振动。超声振动钻削装置由超声发生器、声振系统和工具系统等组成<sup>[4]</sup>,整个装置由刀柄与钻床主轴相互连接,而机床的原本结构保持不变。图1为超声振动钻削装置示意图。超声波发生器将50 Hz的交流电转换成高频电振荡信号,然后通过碳刷传递给集流环,再经集流环上的导线传递给换能器,最后换能器将电振荡信号转换成高频机械振动来为系统提供能量,此机械振动又经变幅杆将振幅放大后有效地传递给工具系统,从而实现钻头的超声振动钻削加工<sup>[5]</sup>。



1—超声波发生器;2—碳刷支架;3—碳刷;4—刀柄;5—螺栓;  
6—集流环;7—集流环支架;8—换能器;9—变幅杆;10—钻夹  
头;11—钻头。

图1 超声振动钻削装置示意图

Figure 1 Diagram of ultrasonic vibration  
drilling device

超声振动钻削从根本上改变了传统钻削的钻削机理,与传统钻削相比具有巨大的优势。钻削过程中刀具与工件瞬切瞬离,在刀具与工件产生颤振之前,刀具就与工件分离,因此振动钻削能控制振动、减少颤振甚至能避免颤振的产生。而且刀具在这极短的切削时间内难以大量集聚热量,所以钻头的升温并不高,钻头寿命显著提高,同时还具有大幅减小切削力、显著提高尺寸精度和加工效率等优点,有效避免了传统钻削的缺陷,得到高质量的微孔。

## 2 超声振动钻削装置关键零部件的设计及选择

### 2.1 超声波发生器

超声波发生器的主要功能是将50 Hz的市电转换成超声频电振荡信号,然后转换成机械振动来为刀具的切削加工提供振动能量。根据末级所使用的器件类型,超声波发生器可分为电子管型、可控硅逆变型、晶体管型和功率模块型4种<sup>[6]</sup>。由于晶体管型超声波发生器开机不必提前预热,价格便宜,耗能低,体积小巧,

因此本设计选择具有频率自动跟踪特性的晶体管型超声波发生器,它能使换能器始终工作在谐振频率状态下,从而始终使振幅保持最大、获得最佳钻削效果。所选超声波发生器的输出功率最大为2 200 W,输出频率为16~24 kHz。工作时,声学系统产生的电压电流取样信号经锁相环比较,高频过滤及噪声去除后再去控制压控振荡器的输出频率,使它与振动系统谐振频率一致;而后,锁相环输出的信号经激励、放大、匹配后反馈给声学系统,使声学系统能以一定频率和振幅振动,其结构原理如图2所示。

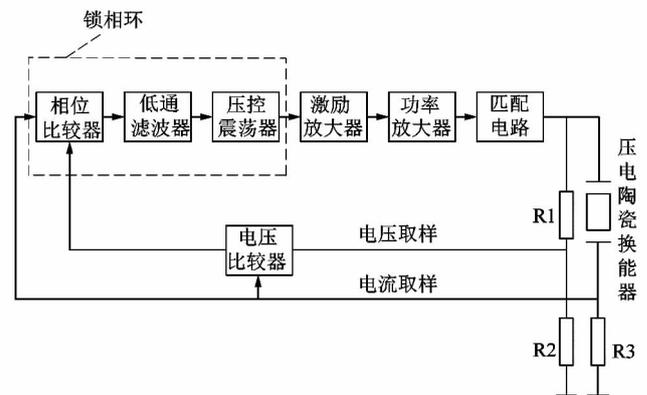


图2 超声波发生器原理框图

Figure 2 Principle diagram of ultrasonic generator

### 2.2 变幅杆

超声波发生器和换能器通常由专业厂家设计制造,使用者可根据实际需要进行选购,因此主要对变幅杆进行设计。通常换能器产生的振幅仅有几微米,而为了达到振动钻削的要求,钻头端部的振幅至少应达到10~100 μm,故在换能器和工具系统之间需要一个振幅放大装置,即超声变幅杆。变幅杆的主要作用是将输出的振幅放大并使超声能量通过换能器有效地传递给工具系统。传统变幅杆形状通常有指数型、圆柱型、阶梯型和圆锥型等<sup>[7]</sup>,形状如图3所示。振幅放大比对变幅杆的性能有很大影响,设计时应重点考虑。指数型和圆锥型变幅杆的输出振幅难以达到加工效率和精度要求;阶梯形变幅杆的振幅放大比虽然满足要求,但它在直径突变处容易应力集中而导致疲劳断裂,因此未被广泛采用。

鉴于以上原因,作者将阶梯型和圆锥型变幅杆组合起来,设计了圆锥阶梯复合变幅杆,可以充分吸取这2种变幅杆的优点。运用解析法对传统变幅杆进行设计,首先建立其动力学微分方程,再由边界条件进行求解。然而由于微分方程的求解计算量较大、设计精度

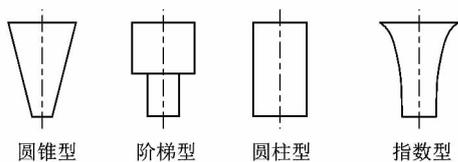


图3 传统形状变幅杆

Figure 3 Traditional shape of horn

不高,而且只能对传统规则形状的变幅杆进行解析求解,而对于截面形状函数较复杂或者有特殊设计要求的变幅杆则无法得出精确的解析解。为此,本课题组首先运用 ANSYS 对变幅杆进行模态分析得出变幅杆在激振频率范围内的固有频率和振型,然后对其进行谐响应分析,得出变幅杆自由端位移和振幅放大比,设计了高振幅放大比的圆锥阶梯新型复合变幅杆,且使其工作在许用应力范围之内,避免应力集中而导致疲劳破坏。课题组设计的变幅杆结构如图 4 所示。 $R_1$  是变幅杆大端半径, $R_2$  是小端半径, $L_2$  是变幅杆圆锥段长度, $L_1$  是大端圆柱段的长度, $L_3$  是小端圆柱段的长度。

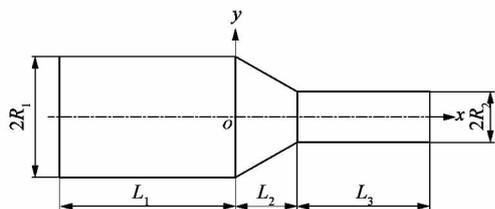


图4 圆锥过渡阶梯型复合变幅杆

Figure 4 Conical transitional step composite horn

圆锥过渡阶梯型复合变幅杆的放大系数  $M_p$  为:

$$M_p = \frac{N \left[ - \left( \sin(kL_1) + \frac{\alpha}{k} \cos(kL_1) \right) \sin(kL_2) + \cos(kL_1) \cos(kL_2) \right]}{|\cos(kL_1)|}$$

式中: $N$  为面积系数, $N = \frac{R_1}{R_2}$ ;  $\alpha = \frac{N-1}{kL_2}$ ;  $k$  为圆波数,

$k = \frac{\omega}{c}$ ,  $\omega$  为圆频率,  $c$  为纵波在变幅杆的速度。

为了得到最大的输出端响应,变幅杆应处于共振状态,变幅杆的固有频率应和激励频率保持相等或相近,因此只需获得与工作频率相近的固有频率即可。

### 2.2.1 变幅杆的模态分析

利用 ANSYS 对变幅杆模型进行仿真得到变幅杆的多阶振型,并获得模型上沿着任意路径的位移分布和应力分布,文中主要分析了变幅杆的谐振频率。变幅杆材料采用 45 钢,弹性模量  $E = 200 \text{ GPa}$ ;质量密度  $\rho = 7\,800 \text{ kg/m}^3$ ;泊松比  $\mu = 0.3$ ,要求变幅杆在 20 kHz

频率下工作,材料属性及结构参数见表 1。首先用 SolidWorks 对变幅杆进行建模,接着将模型导入 ANSYS 中并对模型赋予材料属性,指定弹性模量  $E$  和材料密度  $\rho$ ,变幅杆采用 Solid186 单元与自由网格划分法生成有限元模型,如图 5 所示。

表 1 材料属性及结构参数

Table 1 Material properties and structural parameter

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 $\mu$
45	7 800	200	5 170	0.3
$R_1 / \text{mm}$	$R_2 / \text{mm}$	$L_1 / \text{mm}$	$L_2 / \text{mm}$	$L_3 / \text{mm}$
30.0	10.0	55.5	30.0	55.5

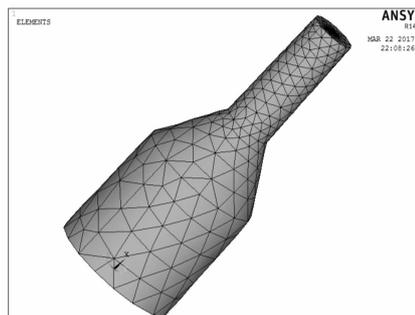


图5 圆锥阶梯复合变幅杆的有限元模型

Figure 5 Finite element model of conical step composite horn

然后施加位移约束,笔者在模型两端面内的所有节点上施加 DOF 为零的位移约束。使用 Block Lanczos 法来提取前 10 阶模态,模态提取的频率范围为 16 ~ 24 kHz,最后进行求解,得到变幅杆的多组固有频率值以及与之相对应的振型,如图 6 ~ 7 所示。求得在 20 kHz 左右的固有频率主要有 16.838, 16.839, 19.151 和 23.793 kHz 等。

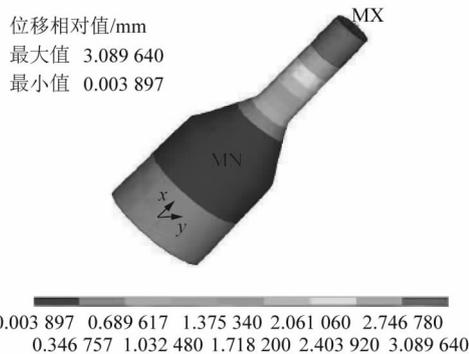


图6 第9阶振型

Figure 6 Ninth order vibration mode

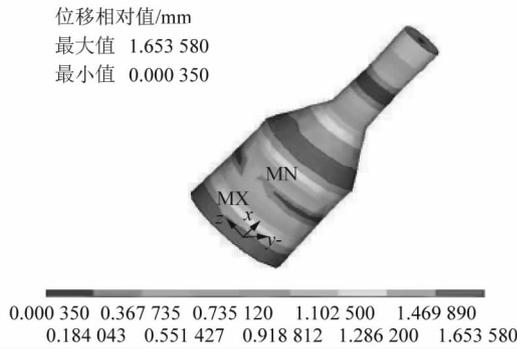


图7 第10阶振型图

Figure 7 Tenth order vibration mode

### 2.2.2 变幅杆的谐响应分析

通过模态分析获得了变幅杆在激励频率范围内的谐振频率,再对变幅杆大端面施加正弦规律变化的轴向载荷进行谐响应分析,获得输出端的振幅从而得出变幅杆的振幅放大比,并可求出变幅杆自由端的周期性位移响应。

谐响应分析中建模与网格划分和模态分析过程一样,作者研究了在固有频率 19 151 Hz 附近的响应特性,取激振位移幅值为 0.01 mm,施加在变幅杆大端法线方向,谐响应分析方法使用 FULL 法,并运用系统矩阵来计算响应。在变幅杆大端面节点上施加轴向 0.01 mm 的位移约束,选取激振频率范围为 19 000 ~ 20 000 Hz。

求解完成后进入后处理模块,通过时间历程后处理器得到变幅杆节点在 19 151 Hz 固有频率下不同截面位置的轴向位移值,见表 2。

表 2 轴向位移值

Table 2 Axial displacement value

测量点	截面位置/mm	位移均值/mm	测量点	截面位置/mm	位移均值/mm
1	0.00	0.010 00	8	80.50	-0.009 45
2	11.10	0.006 32	9	102.15	-0.020 57
3	22.20	0.003 35	10	113.25	-0.022 74
4	33.30	0.002 62	11	124.35	-0.027 00
5	44.40	0.001 36	12	135.45	-0.038 85
6	60.50	-0.002 73	13	141.00	-0.04 230
7	70.50	-0.005 39			

用 MATLAB 软件编程将数据绘制成图得到变幅杆轴向位移分布曲线,如图 8 所示。

从图 8 可以发现变幅杆的位移沿着轴向先减小再逐渐增大,在自由端面处位移达到最大值,输出端与输入端轴向位移比值约为 4.23,由此可得圆锥阶梯型复合变幅杆的振幅放大比为 4.23。实际振幅放大比要

比计算值略小,因为计算中没有考虑阻尼对振幅造成的误差影响。

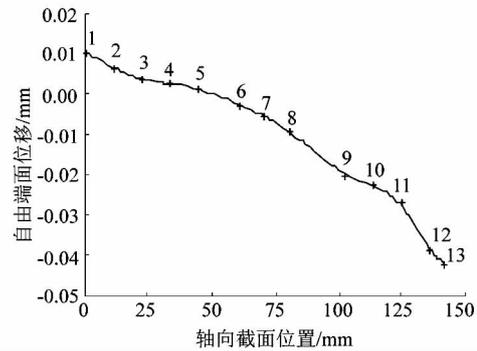


图8 位移分布曲线

Figure 8 Displacement distribution curve

### 2.3 换能器的选用

换能器的主要作用是将超声频电振荡信号转换成机械振动<sup>[8]</sup>,经变幅杆将振幅放大后传递给刀具进行超声振动钻削。超声换能器的研究目前已取得很大进展,国内外都有很多专门的研制企业,可根据装置设计的要求进行选购或订购。依据能量转换方式和材料的差异,换能器分为 2 种:磁致伸缩换能器和压电换能器<sup>[9]</sup>。当压电晶体上施加交变电场后会产生交变形变,由于压电材料的逆压电效应,压电材料就会产生机械振动从而实现将电能转换成机械能。压电换能器具有机电转换效率高、冷却容易、性能较稳定、材料成本低以及与超声加工系统易于匹配等优点,尤其适合大振幅振动加工。通过比较,本装置采用压电陶瓷换能器。它的振动频率为 20 kHz,最大输入功率为 2 000 W,连续工作时间 30 ~ 60 min,主要由压电陶瓷晶片、前后盖板、预紧螺栓、电极片与绝缘管组成。常见的压电换能器如图 9 所示。



图9 常见的压电换能器

Figure 9 Several common piezoelectric transducers

### 3 工具系统

工具系统主要由钻头及钻夹头两部分组成<sup>[10]</sup>,工作时可根据需要选择相应型号的钻头和钻夹头。工具系统与变幅杆的连接决定了钻削效果的好坏,设计时一般应满足以下基本要求:

- 1) 工具系统与声学系统应保持共振;

- 2) 钻头的安装拆卸应该方便牢固;
- 3) 钻头没有疲劳断裂情况下应尽量使其振幅最大;
- 4) 接口传递超声能量效率高并且长时间钻削发热少。

为了避免对变幅杆造成损坏,从而增加额外成本,因此本装置设计中工具系统不与变幅杆直接相连,而是采用锁紧螺母将二者连接起来。连接时,将钻头放入钻头卡盘中,然后用锁紧螺母拧紧卡盘防止钻头松动,该方法具有较高的定心精度。

#### 4 结语

课题组基于超声振动钻削理论研制了一套结构简单经济实用的超声振动钻削装置,该装置直接安装在机床主轴上就可对微孔进行钻削加工,而机床其它结构保持不变。本文所研究的装置使用简便,不仅能满足对微孔的加工要求,而且还降低了加工成本,在微孔加工中具有广阔的应用前景。此外作者应用 ANSYS 对超声振动装置核心部件的变幅杆进行了模态和谐响应分析,得到变幅杆的谐振频率、自由端面的振幅、振型和放大系数等参数,设计出具有大振幅比的新型超声变幅杆。运用 ANSYS 有限元软件可以直观地观察

变幅杆相关参数的变化规律,为变幅杆的设计提供了一种行之有效的方法。

#### 参考文献:

- [1] 曹凤国. 超声加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 姜鹏飞, 潘祥生, 张德远. 实用化振动切削技术: 超声振动钻削小深孔工艺及装备[J]. 新技术新工艺, 2007(3): 70-71.
- [3] 王陈向, 孙丽华, 马玉平, 等. 超声轴向振动钻削机构的设计与研究[J]. 制造技术与机床, 2010(6): 46-49.
- [4] 刘传绍, 郑建新, 赵波, 等. 超声振动钻削声学系统的设计研究[J]. 电加工与模具, 2003(2): 44-47.
- [5] 李宏, 郑东旭, 孙铁波, 等. 振动钻削在医用缝合针带线孔加工上的应用研究[J]. 机床与液压, 2012, 40(4): 22-23.
- [6] 肖子英. 超声振动钻削系统设计及其试验研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010: 19-20.
- [7] RAMKUMAR J, MALHOTRA S K, KRISHNAMURTHY R. Effect of workpiece vibration on drilling of GFRP laminates[J]. Journal of materials processing technology, 2004, 152(3): 329-332.
- [8] 杜少婷. 微细孔超声振动加工系统关键技术及试验研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 19-20.
- [9] 韩旭, 吴伏家. 振幅可调式深孔振动钻削装置的设计与应用[J]. 机械管理开发, 2007(3): 54-55.
- [10] 王闯. 微细孔旋转超声振动钻削机床主轴系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013: 16-17.

(上接第 56 页)

通过对比可以得出, 步进电机在低速运行 0 到 30 s 时间段里, 优化前后系统测速模块检测的的脉冲数量一样, 电机低速运行比较平稳。在 33 s 到 45 s 时间段里, 提高电机运行转速, 可以看出优化后的控制系统运行的稳定性明显好于优化前, 对应的测速模块检测的脉冲数出现不同, 优化后的调速时间比优化前缩短了, 提升了有效的运行时间, 达到测试目的。研究表明增量式 PID 优化算法在步进电机的调速和失步特性研究中有一定的作用。

#### 4 结语

通过对步进电机的特性、工作原理进行分析, 设计一个闭环控制的步进电机调速控制系统。通过单片机定时器对步进电机驱动脉冲进行调控处理, 同时加入增量式 PID 算法对步进电机的输出特性进行优化, 通过性能测试, 系统运行效果良好, 达到测试目的, 具有一定的实用价值。

为了设计方便, 整个调速系统并没有过多考虑步进电机失步原因分析, 所以今后还要对步进电机优化控制理论方面多做研究, 从而可以有效避免步进电机

失步发生。

#### 参考文献:

- [1] 王娟. 步进电机智能控制系统的设计[J]. 机电工程技术, 2013, 24(6): 15-17.
- [2] 孟庆涛. 基于 Keil 的永磁减速步进电机控制系统的设计及实现[D]. 苏州: 苏州大学, 2015: 6-8.
- [3] 陈爱国, 黄文玲, 杨红红. 步进电机升降速曲线的研究[J]. 机电产品开发与创新, 2003(2): 47-49.
- [4] 顾瑞娟, 王宇, 张善从. 基于 FPGA 的步进电机驱动控制系统设计[J]. 计算机工程与设计, 2011, 33(1): 11-15.
- [5] 李凯峻. 超声波无损探伤的控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2008(8): 159-161.
- [6] 严平峰, 凌志浩, 蒋炜. 步进电机的控制与检测系统的设计与实现[J]. 自动化仪表, 2014, 35(4): 38-42.
- [7] 李建林, 宣占国, 黄雄. 基于线阵 CCD 的光电测角系统的设计与实现[J]. 新型工业化, 2014, 4(4): 28-31.
- [8] 刘宝志. 步进电机精确控制方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2010: 7-15.
- [9] 刘亚东, 李从心, 王小新, 等. 步进电机速度的精确控制[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(10): 1517-1520.
- [10] 龚金成, 湛建飞, 赵丹, 等. 步进电机远程控制方案的设计及实现[J]. 机电工程, 2016, 33(11): 1398-1402.