

超声调制电加工振动系统工具优化设计及试验

邵 健 王 芳 邓正泉 朱永伟

(扬州大学机械工程学院,扬州 225127)

文 摘 用有限元方法分析超声调制电加工振动系统,探讨有、无负载时振动工具的动力学特性,通过 ANSYS 分析结果与理论计算值的比较,表明用有限元方法分析超声特性有较高精度;用 ANSYS 参数化方法设计、优化超声振动工具设计,通过振动系统的振动特性测试,验证了振动系统设计的合理性;通过微结构超声复合电解加工试验,证明超声调制电解方式加工难加工材料、异型面的技术优势。

关键词 超声振动系统,变幅杆,动力学分析,优化设计,超声调制电加工

中图分类号: TG66

DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2014.05.009

Optimal Design and Experiments of Ultrasound-Modulated Electric Machining System

SHAO Jian WANG Fang DENG Zhengquan ZHU Yongwei

(College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127)

Abstract Ultrasound-modulated electric machining system is analyzed through the method of dynamic analysis and then the dynamic properties of the vibrating tool with and without the load or not is discussed. Numerical simulation results are compared with the theoretical calculated value, the results show that the higher precision could be obtained while using the method of finite element analysis in the area of ultrasonic specialty. The rationality of the optimization design for this system is verified by using the method of ANSYS parametric optimization design and optimizing the ultrasonic vibration system and the system processing test; the technical advantages of ultrasound-modulated electrolytic machining in difficult-to-process materials and special-shaped surface processing are proved through micro-structure ultrasonic compound electrolytic machining tests.

Key words Ultrasonic vibration system, Amplitude transformer, Dynamic analysis, Optimal design, Ultrasound-modulated electric machining

0 引言

随着科技进步,现代工业产品向高精度、高速度、高温、高压、大功率、小型化方向发展,对产品微型化要求日益迫切。由于传统机械加工过程存在宏观的切削力,因此在加工微小零件,特别是微米、纳米尺度零件时,容易产生变形、发热等问题,精度控制也较为困难,从而影响产品使用性能^[1-3]。超声加工通过工具头在磨料悬浮液中的超声频振动使得磨料高速撞击工件表面的方法去除材料,不用考虑材料的导电性、热物理现象等,在加工硬脆、高精度材料方面具有

非常重要的作用^[4]。超声加工与电火花放电、电化学等加工复合,可以在保持单一加工优势的同时有效解决工具损耗大、加工速度低等问题,能够解决硬脆金属材料、复杂形面的问题,并且超声复合加工与单一超声加工相比,加工效率高,精度好^[5]。因此研究可靠有效的超声加工系统对难加工材料的微精加工具有重要意义。

超声复合电加工系统包括:超声振动装置、电解装置、静压力调节装置、电解参数测量设备等^[6]。本文通过对超声调制电加工系统的动力学分析,应用

收稿日期:2014-02-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51075355, 51375428)

作者简介:邵健,1989年出生,硕士研究生,主要从事超声及复合加工技术研究。E-mail: 852202360@qq.com

通信作者:朱永伟,1966年出生,博士,教授。主要研究方向为特种加工新技术。E-mail: ywzhu@yzu.edu.cn

ANSYS 参数优化设计方法让系统达到最佳工作状态。系统设计时,原则上要求振动系统的各个组成部分谐振处于同一频率,使得工具头振幅达到最优,在此基础上进行微结构超声电解加工试验。

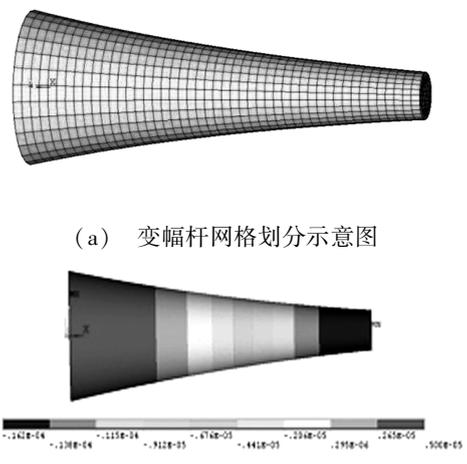
1 超声调制电加工系统的动力学性能分析

系统动力学性能主要包括两个方面:固有振动特性和谐响应特性^[7]。固有振动特性是指在无阻尼自由振动条件下物体的固有频率和振动的应力。谐响应用于分析确定物体在承受随时间按正弦规律变化的轴向载荷时的稳态响应,比如计算出变幅杆的自由端面的振幅、位移节点和最大等效应力来计算放大系数和形状因素等性能参数;峰值响应发生在激振频率和变幅杆的固有频率相近时,此时变幅杆端面出现最大的振幅位移。因此,在谐响应分析之前,应该首先进行模态分析以确定固有频率。

1.1 指数形变幅杆动力学分析

超声变幅杆的种类很多,按照振动类型来分,可分为纵振、扭振、弯振以及复合振动四类^[8],在本文中研究指数形变幅杆,其振动类型为纵振。利用 ANSYS 对指数形变幅杆进行建模并计算,进行模态分析及谐响应分析,以验证理论设计的工作频率及所受的应力应变情况,并计算出放大系数与理论值进行比较。

变幅杆材料为 45# 钢调质,采用三维模型,自下向上方法生成实体,即先定义关键点,然后由点依次生成线、面和体。采用 Solid 95 作为基本的单元类型,是 Solid 45 的高次形式。该单元由 20 个节点定义,每个节点 3 个自由度: x, y, z 方向。

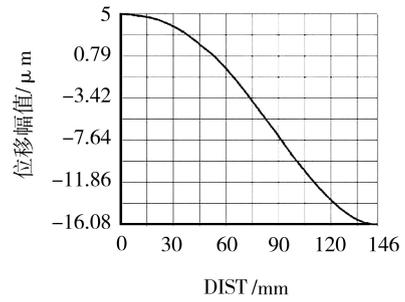


(a) 变幅杆网格划分示意图
(b) 指数形变幅杆振型图
图 1 指数型变幅杆动力学分析

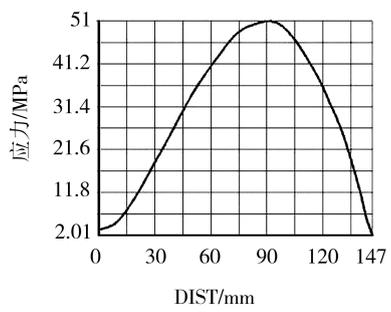
首先对变幅杆建模并进行网格划分,见图 1(a)。在模态分析之前,设置模态提取方法为 Block Lanczos,待提取的模态个数为 7。范围为 10 ~ 30 kHz,模

态分析所得到的指数形变幅杆 1 ~ 7 阶固有频率为 14.265、14.467、14.471、19.685、24.342、24.501、24.510 kHz,从固有频率中取与工作频率 20 kHz 最接近的频率,发现此变幅杆在 19.685 kHz 时发生纵振,此时其各点的位移矢量均沿轴向方向,由此可得指数形变幅杆的实际纵振频率为 19.685 kHz。在谐响应分析中,研究固有振动频率 20 kHz 附近的响应特性。加载时,在变幅杆大端 yz 面内所有的节点上施加 x 方向为 $5 \mu\text{m}$ 的位移。

指数形变幅杆在固有频率为 19.685 kHz 时,变幅杆大端输入振幅为 $5 \mu\text{m}$,小端输出振幅为 $16.2 \mu\text{m}$,振幅放大了 3.24 倍,见图 1(b)。图 2(a)为变幅杆轴向各截面位置与其对应位移幅值的关系曲线,可以看到位移节点位于离大端 56.1 mm 附近。图 2(b)为变幅杆轴向各截面位置与其对应应力值的关系曲线,可以看到最大工作应力位于离大端 87 mm 附近。



(a) 变幅杆截面位置与其对应位移幅值关系



(b) 变幅杆截面位置与其对应应力关系

图 2 变幅杆截面位置与位移、应力曲线图
Fig. 2 Curves graph of section of transformer with displacement and stress

1.2 带工具头的变幅杆分析

在超声加工应用中,变幅杆大端要与传振杆连接,末端要连接不同形状的工具,用以对材料或零件进行加工处理。前面讨论的变幅杆的特性都是在其处于空载的形式下表现出来的,即变幅杆处在两端自由状态,而在实际应用中,变幅杆不可能没有负载,因此在设计的过程中,将工具头和变幅杆视为一个整体

进行设计和分析。

在一般情况下,设计变幅杆时可以不考虑其对变幅杆谐振频率的影响,变幅杆前端还要安装工具头,为减少模型大小和范围,加速计算速度、保证计算精度,将变幅杆简化成与换能器和电极工具无连接螺纹的结构。对安装工具头变幅杆进行模态分析,得出变幅杆谐振频率为 17.926 kHz,和未加工具头时相比降低了 1.759 kHz,如图 3(a)所示。图 3(b)为变幅杆应力响应云图,可得出最大响应应力为 51.3 MPa,远小于 480 MPa,完全满足材料要求。

谐响应分析结果显示指数形变幅杆加工具头后在共振频率下的放大系数为 3.94。这表明带工具头变幅杆放大系数比无工具时略有变大。

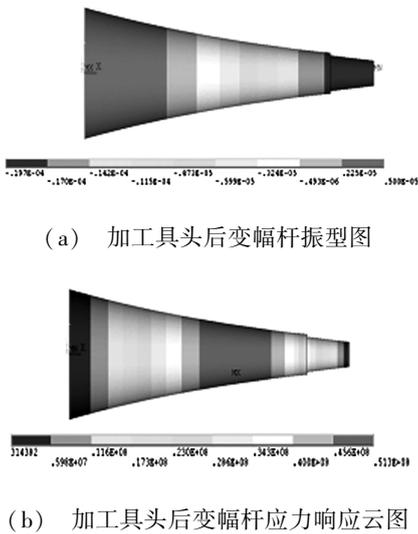


图 3 加工具头变幅杆的振型与应力云图

Fig.3 Vibration mode and stress nephograms of transformer with tools

利用有限元和理论推导方法计算出的变幅杆加工具头后的放大系数及节点位移列于表 1。

表 1 变幅杆的有限元值与理论值比较

Tab.1 Comparison between finite element value and theoretical value of transformer

计算方法	放大系数	节点位移/mm
有限元计算	3.94	60.1
理论计算	3.89	58.4
偏差/%	1.285	2.911

2 超声振动系统的优化设计

变幅杆连接工具头后,固有频率会有一定程度的降低^[9],通过削短变幅杆的方法来提高其固有频率,从而使系统振动频率提高到设计值。可借助有限元方法对变幅杆进行修正设计。

变幅杆设计过程中,只要确定了其母线上的节点和端点坐标,变幅杆母线形状也就确定了,即变幅杆形状与长度唯一确定。由插值的方法形成三次样条

曲线作为轴向截面母线,插值点按顺序在一定范围内随即选取,其他的点构成直线,点坐标初始值都定义为变量,这样可以在优化过程中通过点的变化引起母线的变化,最终达到变幅杆形状的变化^[10]。有限元分析模型如图 4 所示。

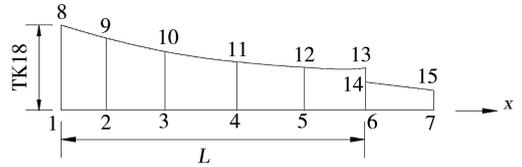


图 4 变幅杆有限元分析模型

Fig.4 Finite element analysis model of transformer

根据分析模型,设定 TK18、TK29、TK310、TK411、TK512、L 为设计变量,固有频率 f 和最大 von-mises 应力为状态变量,以小端面位移与大端面位移之比 s 的倒数为目标函数。

定义优化设计变量 TK18、TK29、TK310、TK411、TK512,在各点理论计算值 ± 1 mm 间变化,L 变化范围为 12 ~ 16 cm,x 变化范围为 0 ~ 25 mm;定义状态变量:系统最大等效应力为 von-mises 变化范围为 0 ~ 480 MPa,freq6 变化范围为 18 ~ 21 kHz;设置目标函数 max_u 为 $1 \times 10^{-4}/s$,在 Convergence Tolerance 文本框中输入 0.01,此允差是为收敛而确定的两次循环间 OBJ,即目标函数可接改变量,与 OBJ 有相同的单位;指定优化方法:选择 First-Order,并在 Maximum Iterations 中输入 30。

对带工具头的变幅杆进行上述优化计算后,即可得到优化设计结果为带工具头的变幅杆在谐振频率为 19.621 kHz 时,应力为 62.7 MPa,谐振长度为 121.35 mm,端面最大位移为 32.7 μm 。

3 超声调制电加工系统性能检测

3.1 超声调制电加工系统原理示意图

超声辅助电加工系统包括超声加工单元、电解加工单元、电涡流传感器、斩波电路、双通道数字存储示波器、PC 机、激光微位移传感器、工作台进给运动单元等,系统连接示意图如图 5 所示。

超声加工单元包括超声发生器、换能器、超声振动辐射头、工具电极等;电加工单元包括工具电极、工件和工作液组成。电涡流传感器将电流转化成电压信号由数字示波器显示、测量与存储,最后通过数字示波器显示电压与电流的变化情况,同时电信号能够由串行口输入计算机分析处理。激光微位移传感器对电极的振动位置进行检测,再将信号传送到斩波电路,通过斩波电路的处理、转换,实现复合加工中电源与电极振动的同步,恒压力调节装置能够保持工件与

电极间的静压力恒定,随着加工深度增加,磁悬浮工作台向上进给。

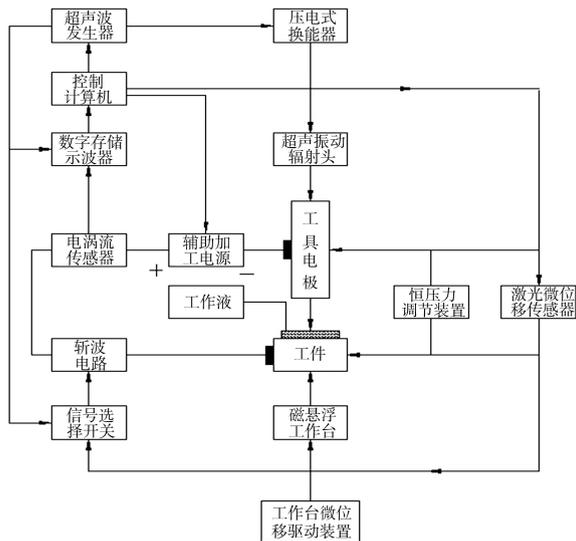


图5 超声辅助电加工试验系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of ultrasonic compound electro-discharged machining system

3.2 振动系统端面振幅测量

优化前后振动系统端面振幅通过以下试验进行验证。振动检测装置有:超声波加工机,指数形变幅杆,激光微位移传感器,PC机等。结果显示如图6所示。

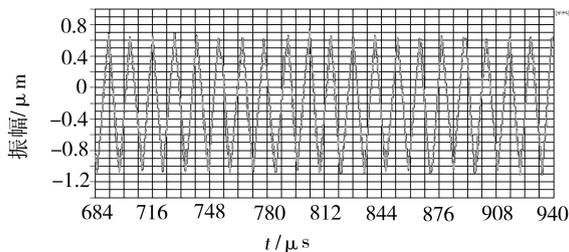


图6 优化后振动系统振幅试验

Fig.6 Amplitude test of optimized system

首先进行优化前振动系统振幅的试验,依次打开PC机、激光微位移传感、超声波加工机,激光微位移测得端面振幅结果为 $0.8\ \mu\text{m}$,优化后振动系统振幅的试验步骤与前面一样,测得端面振幅结果为 $8\ \mu\text{m}$,很显然,优化后的振动系统振幅更大,以下关于不同参数的加工试验都是在优化后的振动系统上进行的。

4 微结构超声辅助电解加工实验

4.1 工具电极制作

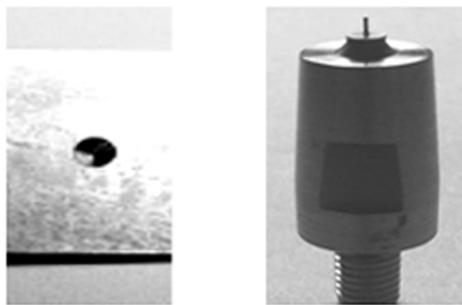
总体来说加工简单微细轴时,只需用微细线切割加工出反拷母电极,然后利用微孔形母电极“套形”加工即可^[11]。母电极材料采用紫铜,然后利用专用夹具固定好待加工工具电极,将紫铜母电极夹在数控电火花成形机z向主轴上,采用放电套料加工的方法加工出工具电极。

齿轮轴加工是采用已加工好的内齿轮套料即可,内齿轮是基于电火花线切割加工机床和 ESPRIT 软件进行加工的。

利用微细电加工技术组合制作的微细电极表面粗糙度可达到 $Ra\ 0.20\ \mu\text{m}$,尺寸精度可达到 $\pm 1\ \mu\text{m}$ 。选择微细组合电加工的电参数值愈小,制作电极表面粗糙度值愈小,尺寸精度愈高,但电极制作效率会显著降低。

微细电极需要足够的强度、良好的刚度和耐磨性,超声调制电加工电极还需要良好的导电性和耐热、耐化学腐蚀性能。

使用 CHARMILLES ROBOFORM 35 精密数控电火花成形机床加工出图7(a)所示的微孔母电极,再用电火花“反拷+平动”成形方法可以加工出相应截面形状、不同尺寸工具轴电极,微细轴工具头如图7(b)所示,微细电极端面直径为 $\Phi 0.75\ \text{mm}$ 。

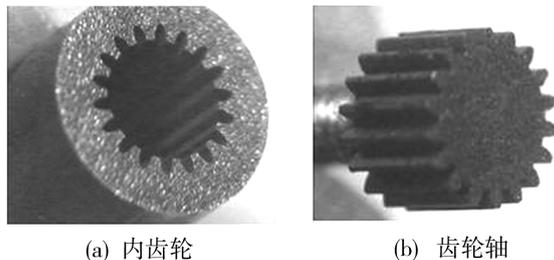


(a) 微细轴母电极 (b) 微细轴工具头

图7 微细轴类加工图

Fig.7 Processing figure of micro-axes

采用电火花线切割加工内齿轮阴极工具头(基于 AGIE CHALLENGE 2F 机床和 ESPRIT 软件),采用 $\Phi 0.1\ \text{mm}$ 铜丝做电极丝。加工前,用专用夹具安装好阴极工具头毛坯,确定起切点位置。加工好的微齿轮工具头端面如图8(a)所示,微齿轮模数 $m=0.2\ \text{mm}$,齿数 $z=18$ 。用已加工微内齿轮作为电极进行电火花放电套料加工,加工的微齿轮轴工具电极见图8。



(a) 内齿轮 (b) 齿轮轴

图8 内齿轮、齿轮轴阴极显微照片

Fig.8 Micrographs of internal gear cathode and gear shaft cathode

4.2 超声辅助电解加工试验

图9为超声调制电加工试验系统,关断电源即可进行单一超声加工。加工区域如图中箭头所示。工具电极为 $\Phi 0.75\ \text{mm}$ 微细轴,试件材料为黄铜。加工

参数为:电解脉冲电压频率 5 kHz,占空比为 4:6,电压幅值小于 6 V;采用碳化硼(B4C—W10)微粉磨粒;工具头与工件间接触压力 0.60 N;加工时间 2 min。



图9 超声辅助电加工试验系统

Fig.9 Ultrasonic compound electro-discharged machining system

图 10 为在铜合金表面在不同幅值电压下,由超声辅助电解加工形成的圆坑。

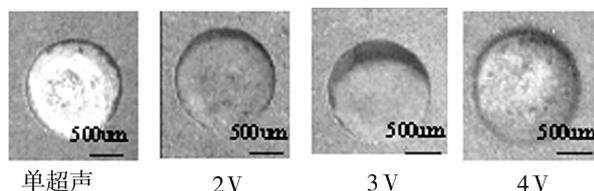


图 10 铜合金表面加工的圆坑

Fig.10 Processed round pits on surface of brass

将加工件置于体视测量显微镜下进行观察,测量深度。可以看出随着电压增加,加工深度增加,圆孔尺寸略有增大,电压幅值 3 V 时,形状精度最好,电压幅值 4 V 时,有轻微电解杂散腐蚀作用。

选用微内齿轮工具阴极 ($m = 0.20 \text{ mm}, z = 18$),加工参数:超声功率 60 W;电解电压幅值 2、3、4、5 V;采用 B4C—W10 混粉;电解液为 2% NaNO_3 水溶液;静压力 2.0 N;加工材料是硬质合金(YBD151);加工时间 3 min。采用不同电压进行超声复合同步电解微齿轮的显微照片如图 11 所示。

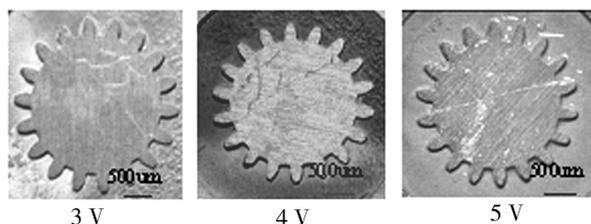


图 11 超声复合同步电加工的微齿轮

Fig.11 Ultrasonic compound-synchronized processing of micro-gears

由图 11 可见,超声复合同步电加工的齿数 18,模数 0.20 mm 的微齿轮成形精度很好,随电压幅值增加,加工效率提高(微齿轮厚度增加),但当电压

达到 5 V 时,齿轮边缘有电解杂散作用。

当电压 4 V 时,同步超声电解加工微齿轮的电流信号有电解与火花放电作用,原因是电解液质量分数低,导电性差,且加工极间产生超声空化气泡及电解作用氢气泡,电导率进一步降低,局部工作液被击穿而产生微火花放电作用。

5 结论

(1) 进行超声调制电加工振动系统的动力学分析,得出的数值分析结果与理论值相比较,结果表明应用有限元分析方法可以获得较高的精度;

(2) 用 ANSYS 参数化优化方法设计、优化超声振动系统,取得了显著效果;通过系统加工测试,验证超声振动系统工作稳定,表明优化设计正确、合理;

(3) 对不同材料、形状的微结构,用不同加工方式及不同电参数进行超声复合电加工试验,试验结果证明超声调制电加工对难加工材料、异型面加工在精度与效率方面具有技术优势。

参考文献

- [1] 李德胜,王东红,孙金玮,等. MEMS 技术及其应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002
- [2] 苑伟政,马炳和. 微机械与微细加工技术[M]. 西安:西北工业大学出版社,2000
- [3] 曹凤国,蒋亨顺,张勤俭. 电化学加工技术[M]. 北京:北京科学技术出版社,2007
- [4] 贾宝贤,边文凤,赵万生,等. 微细孔超声加工关键技术[J]. 机械工程学报,2007,43(11):212-216
- [5] 朱永伟,王占和,范仲俊,等. 微细超声复合电加工技术与应用[J]. 机械工程学报,2010,46(3):179-186
- [6] 朱永伟,王占和,李红英,等. 电解复合超声频振动微细加工机理与试验研究[J]. 中国机械工程,2008,19(15):1786-1792
- [7] 赵莉,王时英,轧刚. 超声加工中变幅杆的动力学分析[J]. 电加工与模具,2005(2):34-38
- [8] Wu Liqun. The influence of horn shape size change on the performance of ultrasonic longitudinal vibration[J]. Machinery Design and Manufacture,2010(4):212-213
- [9] 张云电,兰红玉,陈强. 指数型超声变幅杆有限元分析与试验[J]. 机电工程,2009,26(9):90-93
- [10] Liu Xiangcheng, Cai Xiaojun, Fu Shuigen. The parameterized design and analysis of ultrasonic scope-varied conveyer based on integrated CAD/CAE[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011,39(5):76-78
- [11] 张天鹏,云乃彰,陈建宁. 微细轴放电反拷成形方式的比较研究[J]. 电加工与磨具,2006(4):29-31

(编辑 李洪泉)