

超声振动辅助磨削电源谐振频率自动识别研究

何祥磊, 苏宏华, 陈玉荣, 顾佳庆
(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:针对传统超声电源不能自动识别因更换刀具而导致的超声刀柄谐振频率变化的问题, 利用最大电流法与相位控制法相结合的频率检测方法实现了超声电源频率自动识别功能。对制作的样机进行了频率自动识别稳定性和精确性测试, 结果表明: 超声电源测得的超声刀柄谐振频率与阻抗分析仪测得的超声刀柄谐振频率差值变化 <221 Hz, 误差 $<1\%$; 手动模式下, 刀具端面振幅最大点对应的频率与超声电源自动识别的频率相比最大差值为 25 Hz, 误差 $<1.5\%$ 。

关键词: 超声电源; 换能器; 频率自动识别

中图分类号: TP202+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5276(2021)01-0180-04

Research on Automatic Identification of Resonant Frequency of Ultrasonic Vibration Assisted Grinding Power Supply

HE Xianglei, SU Honghua, CHEN Yurong, GU Jiaqing
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to solve the problem that the traditional ultrasonic power supply fails in automatic recognition of the change of resonant frequency of the ultrasonic tool holder caused by changing the tool, this paper elaborates the frequency detection method by combining the maximum current method with the phase control method to achieve the automatic frequency identification function of the ultrasonic power supply. The stability and accuracy of frequency automatic identification were tested based on the prototype. The results show that the difference between the resonant frequency of the ultrasonic tool holder measured by the ultrasonic power supply and measured by the impedance analyzer is less than 221 Hz and the error less than 1%; In the manual mode, the maximum difference between the frequency corresponding to the maximum amplitude of the end face of the tool and the frequency automatically identified by the ultrasonic power supply is 25 Hz, while the error less than 1.5%.

Keywords: ultrasonic power supply; transducer; frequency automatic identification

0 引言

陶瓷、石材、光学玻璃、硬质合金等硬脆材料具备优越的物理、化学和力学性能, 在航空、电子、汽车、冶金、化工和机械加工等工业领域正得到越来越广泛的应用, 并且其应用还在不断向新的领域拓展^[1]。超声振动辅助磨削加工作为硬脆材料加工的有效手段, 其在减小磨削力、提高工件加工表面质量与精度、提高加工效率、减小刀具磨损、延长刀具使用寿命等方面已显露出优势, 并在加工行业内得到广泛的认可与应用^[2-4]。

在超声振动辅助磨削加工中, 因加工对象的特征和材料不同, 使用刀具的材料和形状也会存在差别, 而这些因素的变化都会造成超声刀柄的谐振频率的变化^[5], 因此在加工前, 需要超声电源^[6]能对更换刀具后的超声刀柄的谐振频率进行自动识别, 并输出与之对应的频率, 使超声刀柄在谐振频率点上工作, 以保证超声刀柄加工时的稳定性。

针对上述问题, 本文基于超声刀柄装置, 利用最大电流法和相位控制法相结合的方法对超声电源进行了控制程序设计; 通过制作的样机, 对超声电源进行了频率自动识别稳定性和精确性的测试。

1 超声电源频率自动识别原理和程序设计

1.1 超声电源频率自动识别原理

超声换能器在谐振状态时, 电路呈纯阻性, 输入电压不变时流过换能器的电流、电压同相且电流值最大。由此可见, 通过检测电压、电流相位关系和电流大小, 找到电流最大点对应的频率并使电流、电压相位差在设定的阈值内, 就能实现超声电源谐振频率自动识别的功能。本超声电源运用电流最大法和相位控制法相结合的方式实现谐振频率自动识别功能, 利用最大电流法进行粗略定频, 再利用相位控制法进行精确定频。电流、电压的检测需要对

基金项目: 国家科技重大专项(2017-VII-0015-0111)

第一作者简介: 何祥磊(1992—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向为高效精密加工技术。

换能器两端的电流、电压进行实时采样。本超声电源采用霍尔元件对换能器回路的电流、电压进行采样,测量电路如图 1 所示。

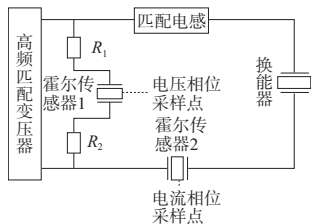


图 1 电流电压采样电路

电流采样和电压采样用的霍尔传感器都是补偿式传感器,霍尔传感器原理如图 2 所示^[7]。原边电流 I_p 会在聚磁环处产生磁场,通过次级线圈电流产生的磁场进行补偿,补偿电流 I_s 会精确反映原边电流 I_p 并使霍尔元件处于检测零磁通的工作状态。

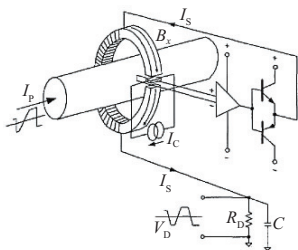


图 2 霍尔传感器原理图

当主回路有电流通过时,导线上产生的磁场会使霍尔元件产生电位差。电位差会驱动功率管使其导通,从而副边线圈会产生一个补偿电流 I_s 。这补偿电流会通过多扎绕组产生的磁场对原来的磁场进行补偿,此磁场与原来磁场正好相反,当两者完全抵消,磁芯内部磁通为 0 时达到磁平衡状态。霍尔元件起指示零磁通作用,此时可以通过 I_s 来测量 I_p 。当 I_p 变化时,平衡破坏,霍尔元件会出现电位差,重复上述过程会重新达到平衡,且失衡到再次平衡所需时间为微秒量级的。因此次级的补偿电流安匝数始终和初级测量电流的安匝数相等,如此即能实时测得换能器的电流信息^[7-10]。

电压采样时,在高频匹配变压器输出侧并联多个电阻,在该回路串联一个霍尔传感器用来采集回路电流信号。该回路呈纯阻性,得到电流信号信息就能得到回路电压信号信息。通过两个霍尔电流传感器即能测得换能器的电流和电压信息。

1.2 超声电源频率自动识别程序设计

程序开发环境为 Keil uVision5,语言为 C 语言。频率自动识别过程:电源启动后,超声电源会对超声刀柄的谐振频率进行搜索。为了提高搜索效率,可以在电源上通过数字键盘设定特定的搜索频率带以减少搜索时间。此时主程序调用全程谐振频率搜索程序,在 20 kHz~25 kHz(范围可根据超声刀柄所处频率带进行调整)以大步长搜寻电流最大点对应的频率,超声电源会将搜索到的电流最大点对应的频率设为超声电源的起始工作频率。执行完此

程序,超声电源的工作频率接近超声刀柄的谐振频率,但是精度低。超声电源还需对超声刀柄进行精确地扫频,通过检测换能系统的电流和电压的相位差来判断超声刀柄是否处于谐振状态。首先采样换能器回路中的电压和电流相位关系信号,若相位差在设定的阈值 θ (可调)之内,则认为超声刀柄处于谐振状态;若大于这个阈值,则通过控制程序小步长调节超声电源的输出频率;当电流相位超前时,则增加超声电源输出频率,当电流相位滞后时,则减小超声电源输出频率。以此使电压和电流的相位差处于设定的阈值之内,达到频率自动识别的目的。程序流程图如图 3 所示。

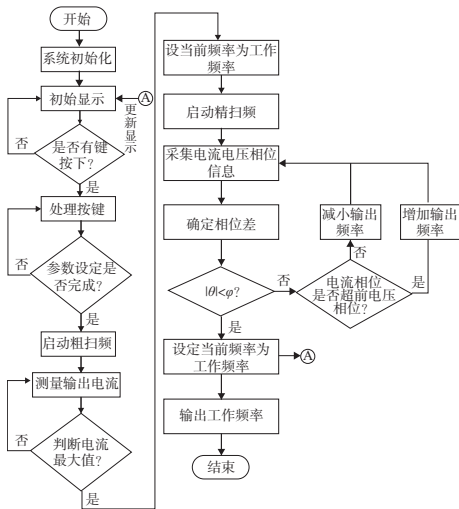


图 3 频率自动识别流程图

2 超声电源频率自动识别测试

为验证超声电源频率自动识别的稳定性和精确性,基于上述方案制作了样机,如图 4 和图 5 所示,分别使用阻抗分析仪和超声电源对超声刀柄谐振频率进行识别测试,试验参数如表 1 所示。



图 4 阻抗分析仪测量超声刀柄谐振频率

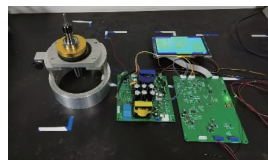


图 5 超声电源测量超声刀柄谐振频率

表 1 试验条件

试验条件	参数
电源输出功率/W	≤200
刀柄型号	BT30 超声刀柄
气隙/mm	0.2
刀具悬长/mm	15、19、23、27、31、35
刀具直径/mm	4、6、8

分别改变刀具的悬长和直径,记录超声电源识别的超声刀柄谐振频率,同时与阻抗分析仪测量的谐振频率进行对比分析。图 6 为改变刀具悬长和直径时阻抗分析仪识别的刀柄谐振频率,图 7 为改变刀具悬长和直径时电源识

别的刀柄谐振频率。

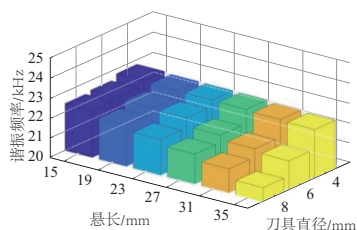


图6 阻抗分析仪识别的谐振频率

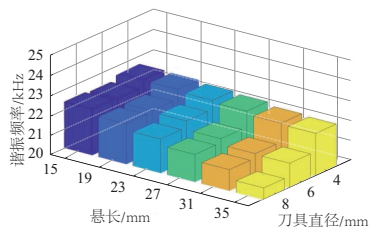


图7 超声电源识别的谐振频率

由图6和图7可知,当刀具直径不变时,超声刀柄的谐振频率随刀具悬长的增大而减小;当刀具悬长不变时,超声刀柄的谐振频率随刀具直径的增大而减小。

2.1 超声电源频率自动识别稳定性分析

对比图6和图7中阻抗分析仪和超声电源在刀具同一直径不同悬长测得的超声刀柄谐振频率得到两者差值曲线如图8所示。

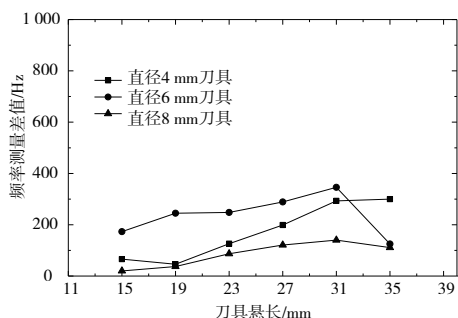


图8 阻抗分析仪和电源识别频率差值图

由图8可知,超声电源测得的超声刀柄谐振频率和阻抗分析仪测得的超声刀柄谐振频率差值变化范围在20 Hz~250 Hz之间,最大变化量为221 Hz,误差<1%。

为进一步验证超声电源频率自动识别的稳定性,消除偶然误差带来的影响,选取直径分别为4 mm、6 mm、8 mm的刀具,取悬长23 mm,用超声电源进行频率自动识别重复试验。测量结果如图9所示。

由图9知,超声刀柄装夹刀具直径和悬长不变时,超声电源自动识别的谐振频率保持稳定。重复5次测量,3组测量数据极差最大为30 Hz,最大标准差为11.9,可见每组数据数值极为接近,充分验证了电源频率自动识别的稳定性。

2.2 超声电源频率自动识别精确性分析

上述实验中阻抗分析仪测得的谐振频率和电源测得的

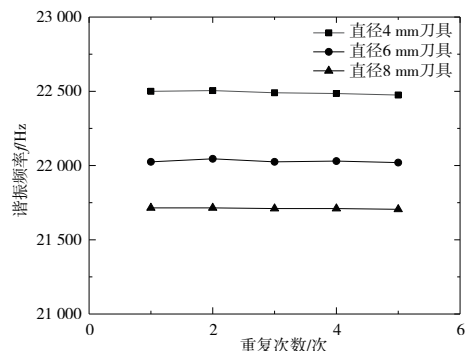


图9 超声电源重复测量结果

谐振频率存在差别,为验证电源自动识别超声刀柄谐振频率的准确性,搭建如图10所示的振幅测试平台。电源设为手动模式,分别选取直径4 mm、6 mm、8 mm的刀具,悬长为23 mm进行验证。用电涡流传感器测得超声刀柄在不同激励频率下刀具端面振幅结果如图11、图12和图13所示。

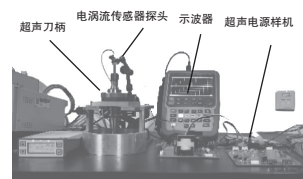


图10 振幅测试平台

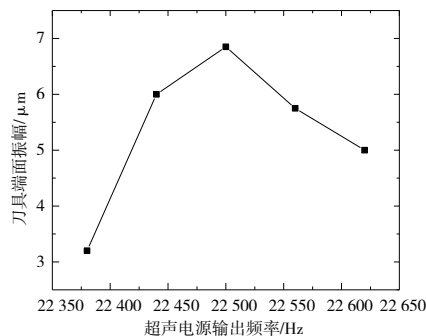


图11 直径4 mm 刀具端面振幅与频率关系

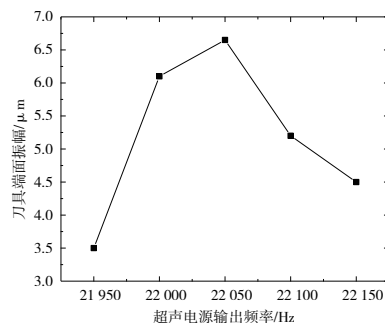


图12 直径6 mm 刀具端面振幅与频率关系

当刀具端面振幅越大时,电源输出的频率越接近刀柄的谐振频率,振幅最大点对应的频率为超声刀柄谐振频率,直径为4 mm、6 mm、8 mm的刀具端面振幅最大点对应的超声电源输出频率分别为22500 Hz、

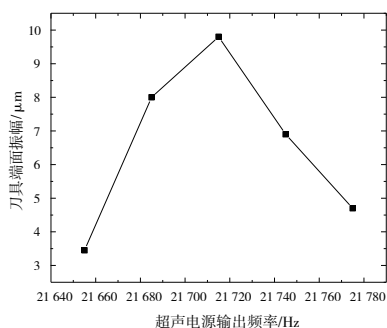


图 13 直径 8 mm 刀具端面振幅与频率关系

22 050 Hz、21 715 Hz,在同样悬长和直径下超声电源自动识别超声刀柄的谐振频率分别为 22 475 Hz、22 030 Hz、21 710 Hz。

由试验结果知,刀具端面振幅最大点对应频率和超声电源自动识别的谐振频率最大相差为 25 Hz,同电源输出频率相比,误差 $<1.5\%$,说明电源自动识别的谐振频率为超声刀柄的谐振频率。验证了电源的频率自动识别的精确性。

3 结语

本文基于最大电流法和相位控制法相结合的频率自动识别方法,研制了具有自动识别超声刀柄谐振频率功能的超声电源。结合超声刀柄,进行了超声电源频率自动识别测试,结果表明:

1)当刀具直径不变时,超声刀柄的谐振频率随刀具悬长的增大而减小;当刀具悬长不变时,超声刀柄的谐振频率随刀具直径的增大而减小。

2)超声电源测得的超声刀柄谐振频率与阻抗分析仪测得的频率差值最大变化值为 221 Hz,误差 $<1\%$;重复测量时,电源测量数据极差最大为 30 Hz,验证了超声电源频率自动识别的稳定性。

3)通过刀具端面振幅验证试验,刀具端面振幅最大点对应的频率和超声电源自动识别的谐振频率相差最大 25 Hz,误差 $<1.5\%$,验证了超声电源频率自动识别的精确性。

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] KUMAR S, WU C S, PADHY G K, et al. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 26: 295-322.
- [3] 刘艳, 郑景珍, 陈阿娣, 等. C/SiC 复合材料超声振动加工切削力单因素试验研究 [J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(6): 35-37, 99.
- [4] BREHL D E, DOW T A. Review of vibration-assisted machining [J]. Precision Engineering, 2008, 32(3): 153-172.
- [5] 齐海群, 谢涛, 袁江波. 安装端面对换能器谐振性能的影响 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2008(11): 10-12.
- [6] 王建明. 功率超声技术的现状与展望 [J]. 声学技术, 1997(1): 47-49.
- [7] 刘永富. 磁平衡电流传感器场路联合仿真方法及瞬态效应研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [8] 王昱皓, 钟贻兵, 时圣利. 高可靠霍尔电流传感器的研究和应用 [J]. 新型工业化, 2015, 5(11): 8-12.
- [9] 鲁光辉. 霍尔电流传感器的性能及应用 [J]. 四川文理学院学报(自然科学版), 2007, 17(2): 40-42.
- [10] 赖俊驹, 彭浩, 胡金磊, 等. 基于闭环霍尔效应的电流传感器设计 [J]. 新型工业化, 2018, 8(9): 1-5.

收稿日期:2019-12-02

(上接第 155 页)

3 结语

本文以实际飞行测试为基础,采集信号后,通过构造 Hankel 矩阵,对航向、侧向、垂向共 6 个传感器 18 个通道的测试数据进行 SVD 反变换,获取去噪后的信号,随后利用时频分析方法,分析了外部载荷(特别是高马赫和跨音速区)环境变化与组合动力装置模式转换之间的关联特性,并重点研究涡轮动力源 II 传动轴的振动幅值变化。

通过本次实验得出结论:该型双动力源齿轮箱在动力源 I 和 II 的单独工作模式以及模式转换时性能可靠,为改进产品质量提供了技术支撑,为进一步研究多动力源的组合动力装置如何避免共振现象实现平稳转换工作模式提供了有力的数据与分析支持。

参考文献:

- [1] BAO X X, LI C L, XIONG C B. Noise elimination algorithm for modal analysis [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(4): 041901.
- [2] MARTIN P, ROTHBERG S. Introducing speckle noise maps for laser vibrometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009,

47(3/4): 431-442.

- [3] ZHAO X Z, YE B Y. Separation of single frequency component using singular value decomposition [J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2019, 38(1): 191-217.
- [4] RONG H X, GAO Y B, GUAN L W, et al. GAM-based mooring alignment for SINS based on an improved CEEMD denoising method [J]. Sensors, 2019, 19(16): 3564.
- [5] 程发斌, 汤宝平, 钟佑明. 基于最优 Morlet 小波和 SVD 的滤波降噪方法及故障诊断的应用 [J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 91-94, 128.
- [6] 赵学智, 叶邦彦. SVD 和小波变换的信号处理效果相似性及其机理分析 [J]. 电子学报, 2008, 36(8): 1582-1589.
- [7] 吴浩浩, 罗志增. 基于构造 Hankel 矩阵的 SVD 陷波方法 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27(12): 4514-4516.
- [8] 张波, 李健君. 基于 Hankel 矩阵与奇异值分解(SVD)的滤波方法以及在飞机颤振试验数据预处理中的应用 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(2): 162-166.

收稿日期:2020-10-19