

# 非接触供电旋转超声加工系统负载特性研究

朱学明<sup>1</sup> 杨兰旗<sup>1</sup> 刘礼平<sup>2</sup> 李占杰<sup>1</sup> 雍华山<sup>3</sup>

(1 天津职业技术师范大学机械工程学院, 天津 300222)

(2 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300)

(3 天津九鹏汽车装备技术有限公司, 天津 300399)

**文 摘** 在旋转超声波加工过程中负载的变化会引起振幅衰减,进而造成加工精度和加工效率降低。本文针对非接触供电旋转超声加工系统在加工过程中振幅衰减的问题,首先,通过静态加载实验,获得了负载对超声振子电学参数的影响规律;其后,在此基础上进行了超声振子的非接触能量传输系统的加载实验,得到负载对能量传输特性的影响规律。实验结果表明,超声振子的电学参数受负载力大小、负载力方向和被加工材料特性的共同影响而发生改变,超声振子电参数改变引起了非接触供电超声系统输出功率的改变,进而导致了振幅衰减的问题;本文采用了串联谐振下主边串联电容、副边并联电容的电路补偿方式来减小振幅的衰减。本文的研究成果为解决振幅衰减问题提供了实验依据。

**关键词** 超声波加工,非接触能量传输,振幅衰减,电学参数,能量传输特性

中图分类号:TM724

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.03.012

## Research on Load Characteristics of Rotary Ultrasonic Machining System With Contactless Power Supply

ZHU Xueming<sup>1</sup> YANG Lanqi<sup>1</sup> LIU Liping<sup>2</sup> LI Zhanjie<sup>1</sup> YONG Huashan<sup>3</sup>

(1 School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222)

(2 School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300)

(3 Tianjin Jiupeng Automobile Equipment Technology Co. Ltd., Tianjin 300399)

**Abstract** In the process of rotary ultrasonic machining, the change of load will cause amplitude attenuation, which will lead to the decrease of machining accuracy and efficiency. In this paper, in order to solve the problem of amplitude attenuation in the machining process of the rotary ultrasonic machining system with non-contact power supply, the influence of load on the electrical parameters of ultrasonic oscillator is obtained through static loading experiment. On the basis of the static loading experiment, the loading experiment of the non-contact energy transmission system of ultrasonic oscillator is carried out, and the effect of load on energy transmission characteristics is obtained. The results show that the electrical parameters of the ultrasonic oscillator are changed by the combined influence of the load force, the direction of the load force and the characteristics of the machined materials. Change of the electrical parameters of the ultrasonic oscillator leads to the change of the output power of the ultrasonic system with non-contact power supply, which leads to the problem of amplitude attenuation. In this paper, the circuit compensation method of main side series capacitor and secondary side parallel capacitor is adopted to reduce the amplitude attenuation. The research results of this paper provide an experimental basis for solving the problem of amplitude attenuation.

**Key words** Ultrasonic machining, Non-contact energy transmission, Amplitude attenuation, Electrical parameters, Energy transmission characteristics

收稿日期:2022-06-22

基金项目:天津市教委科研计划项目(2022KJ127)

第一作者简介:朱学明,博士,研究方向为超声波加工及装备技术、非接触能量传输技术。E-mail:zhxming85@163.com

## 0 引言

随着科学技术的迅速发展,非金属硬脆材料及各种复合材料层出不穷,这些新型材料在航空航天、国防、军事、医疗设备等领域发挥着重要作用,旋转超声波加工特别适用于这些材料的精密高效加工。超声振动系统是旋转超声波加工技术的核心,超声振动系统主要包括超声信号发生器、超声电能传输部分与超声波振子。传统的接触式超声电能传输装置常采用电刷滑环方式,但存在易产生火花、接触磨损严重、主轴转速有限制等明显缺点,非接触电能传输可解决上述缺点,基于电磁感应原理为超声振子非接触地传输电能,正逐渐取代传统的接触式方式。

在旋转超声加工的实际研究中,通常会出现工具头端部的振幅,在工具头处加负载后出现衰减的现象。而振幅的衰减会造成加工精度和加工效率降低,因此对超声振子的振幅控制研究在超声加工中尤为重要。关于超声加工中造成振幅衰减的原因,已有学者做过不同的相关研究<sup>[1-4]</sup>,一般认为,振幅衰减的主要原因是能量的再分配<sup>[5]</sup>。针对传统接触式能量传输振幅的恒定及控制,很多学者和公司已经对恒振幅控制这方面有了不少的研究<sup>[6-10]</sup>,从最先的采用频率跟踪策略使超声振子保持谐振状态,到现在的基于频率跟踪的电流、电压检测法,来实现对振幅的控制。

非接触式超声振动系统是非接触式电能传输系统和超声振动系统的集成,旋转超声加工的非接触能量传输装置是一个松耦合变压器,通过松耦合变压器的一次侧原边线圈与二次侧副边线圈的电磁感应耦合关系,实现电能的非接触传输,由于原边线圈与副边线圈之间存在间隙,因而存在较大的漏感,进而产生大量的无功功率,从而限制了非接触能量传输系统的功率传输能力和效率。对此,一般可通过电路补偿来提高传输能力和效率,关于非接触能量传输系统的电路补偿,国内外学者已经做了大量的研究。孙培星等<sup>[11]</sup>研究了非接触电能传输装置的结构特性和补偿方式对系统传输功率及效率的影响。申昊等<sup>[12]</sup>通过对系统的电路补偿网络进行研究和设计,来提高非接触电能传输的效率,并对系统的输出振幅进行了实验测量,发现补偿后的振幅得到大幅提升,且能够显著地减小无功消耗。张建国<sup>[13]</sup>研究了非接触能量传输的补偿优化,得出通过不同的补偿网络都使非接触能量传输系统的传输效率和振幅得到了改善;并针对超声振子在不同切削力下会呈现不同的谐振频率和阻抗特性,采用模糊神经自校正控制方法,建立了超声加工系统的频率跟踪控制,实现了超声振幅的稳定性。IMAOKA Jun 等<sup>[14-15]</sup>针

对用于超声波主轴驱动的不对称旋转变压器,设计了两种具有串并联初级补偿的组合谐振电路,用于将相同的电压从输入侧传输到输出侧,通过控制输出以实现超声振子的恒压或恒功率驱动。另外,采用基于频率跟踪的方法,使工作频率与谐振频率保持一致,以减小振幅的衰减,提高系统的传输性能。刘幅巾等<sup>[16]</sup>提出PI-PLL频率跟踪控制和动态补偿调谐相结合的频率复合控制方法,实现对频率控制。刘媛媛等<sup>[17]</sup>提出模糊控制的方法来实现谐振频率的自适应跟踪,并设计出了频率跟踪的模糊自适应控制器,实现了逆变驱动电路频率和谐振频率的跟踪、调节,从而达到对振幅的控制。如果控制方法能够使超声振子机械运动对应的谐振电流几乎恒定,则可实现更精确的幅度控制。有学者采用精密反馈控制电路调节超声波功率的输出电压,受控信号是超声振子的输入电流,使超声振子的输入电流保持恒定,这种控制方法可近似实现超声振子的等幅<sup>[18-19]</sup>。

目前对非接触能量传输系统电路补偿的研究大多是为了提高系统的传输能力和传输效率,但针对负载改变引起的非接触供电系统振幅衰减的研究较少。本文首先进行了静态加载实验,即没有连接非接触供电装置,直接用阻抗分析仪测量不同负载下超声振子的电学参数,得到负载对超声振子电学特性的影响规律。其后,在静态加载实验的基础上,连接补偿后的非接触电磁耦合器,给予相同的负载变化,利用功率计测量非接触电磁耦合器两侧的功率,得到负载对非接触供电系统能量传输特性的影响规律,并在谐振频率跟踪状态下,研究SP- $\omega_s$ 补偿对振幅的影响,为非接触供电系统振幅控制提供实验依据。

## 1 实验

### 1.1 未连接非接触供电装置条件下超声振子的静态加载实验

#### 1.1.1 压电超声波振子等效电路

如图1为压电超声波振子等效电路图,超声加工过程中负载对超声波振子电学特性的影响可以用负载阻抗表示,包括 $L_L$ 、 $C_L$ 和 $R_L$ 。 $C_0$ 为静态电容,它是在远低于超声振子谐振频率的频率(<1 kHz)上测出

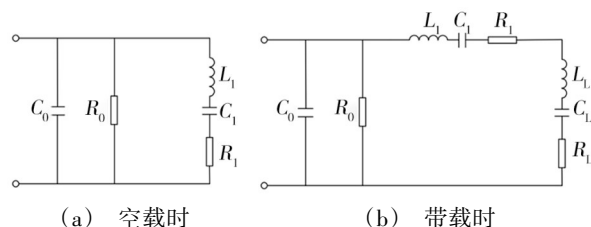


图1 压电超声振子串联等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of piezoelectric ultrasonic vibrator in series

的超声振子电容是一个真实电学量,其电容值与频率无关,与其制作材料有关,但是大小也会受环境影响微弱变化。 $R_0$ 表示压电陶瓷振子的介电损耗阻抗,电阻值通常非常大,一般不予考虑。 $L_1$ 、 $C_1$ 、 $R_1$ 分别为压电振子的动态电感、动态电容、动态电阻,分别反映了惯性质量、刚度和机械阻,并不是真正的电学量,可由 $L_1$ - $C_1$ - $R_1$ 串联谐振电路构成。电感 $L_L$ 、电容 $C_L$ 、电阻 $R_L$ 表示超声加工过程中的机械负载对超声振子等效电路的影响。

各参数表达式为:

$$L_M = L_1 + L_L C_M = \frac{C_1 C_L}{C_1 + C_L} R_M = R_1 + R_L \quad (1)$$

基于式(1)可将带载后的超声振子等效电路简化为图2。

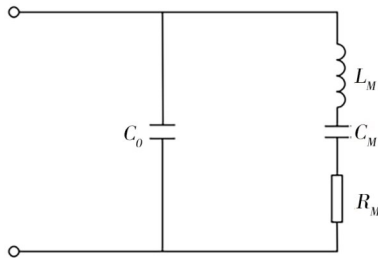


图2 带载时超声振子等效电路简化图

Fig. 2 Simplified equivalent circuit of ultrasonic oscillator with load

为获得最大的转化效率和振幅,超声振子一般工作在谐振频率处,其串谐振频率为 $\omega_s$ :

$$\omega_s = 1/\sqrt{L_M C_M} \quad (2)$$

图3为静态负载实验示意图,图4为3种被加工材料测头(不锈钢平面、塑料平面、金属V型槽),按图3所示将不同加工材料测头与超声振子刀具头末端接触,分别施加轴向、径向两个方向的负载力。通过加载轴向负载力或径向负载力,按照一定进给力均匀增大负载力的值,直接用阻抗分析仪PV70A来测量超声振子的串联谐振频率 $f_s$ 、并联谐振频率 $f_p$ 、静态电容 $C_0$ 、动态电容 $C_M$ 、动态电感 $L_M$ 、动态电阻 $R_M$ 电学参数,利用计算机记录实验数据,绘制轴向与径向加载下的被加工材料测头-负载力-电学特性参数的关系曲线,对实验数据进行分析,探究加载方式对超声振动特性影响。

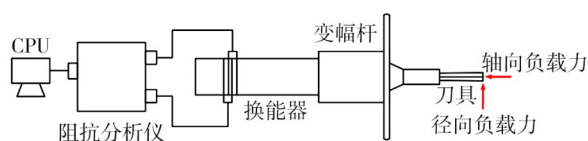


图3 静态负载实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of static load experiment

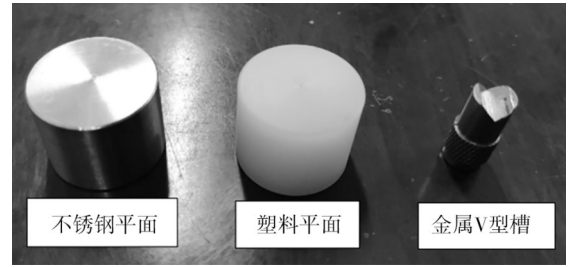


图4 被加工材料测头

Fig. 4 Probe of processed material

### 1.1.2 轴向加载实验

图5所示为轴向加载实验装置,超声振子固定在机床主轴上,测力计通过夹具安装在Z导轨滑台上,通过滑移导轨使测力计能在YZ平面上移动,使得被加工材料测头正对着超声振子轴线方向。通过控制器和驱动器使电机运转,电机运转带动测力计沿导轨Z方向的移动来加载轴向负载力,每次进给加载10 N,最终加载至120 N,每加载一次使用阻抗分析仪测量一次,并纪录超声振子的电学参数。

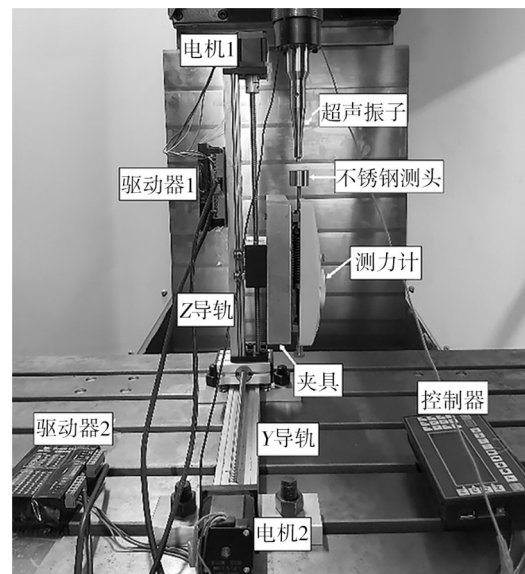


图5 轴向负载力的实验装置

Fig. 5 Experimental device of axial load

经过3次反复加载实验后,对轴向负载力加载后的超声振子电学参数数据取平均值,分别使用图4中所示的塑料平面及金属V型槽替换图5中的不锈钢平面,重复上述实验。

### 1.1.3 径向加载实验

图6所示为径向加载实验装置,径向加载实验与轴向加载实验的实验装置相同,被加工材料测头对着超声振子径向方向,测力计沿导轨Y方向移动加载径向负载力,每次进给加载10 N,最终加载至80 N,每加载一次就使用阻抗分析仪测量一次,并记录超声振子的电学参数。

经过3次反复加载实验后,对径向负载力加载后

测得的超声振子电学参数数据取平均值,分别使用图4中所示的塑料平面及金属V型槽替换图6中的不锈钢平面,重复上述实验。

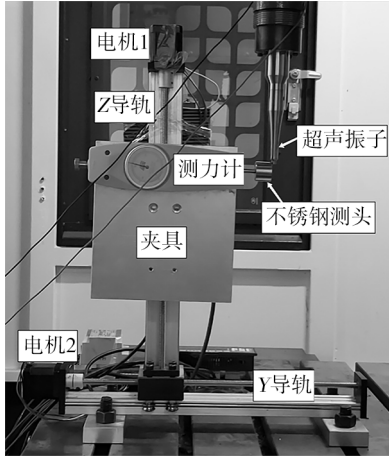


图6 径向负载力的实验装置  
Fig. 6 Experimental device of radial load

### 1.2 负载力对非接触供电超声振动系统能量传输的影响

如图7所示为连接非接触供电系统条件下旋转超声振动系统的等效电路模型,其中 $L_p$ 和 $L_s$ 部分代表非接触电磁耦合器的主边线圈和副边线圈, $M$ 为主边与副边线圈之间的互感, $R_p$ 和 $R_s$ 分别为主边线圈与副边线圈的交流电阻。非接触电磁耦合器的主边线圈与超声波电源相连,副边线圈与超声振子相连,通过电磁感应原理,将超声电源提供的能量非接触地传输给副边线圈。

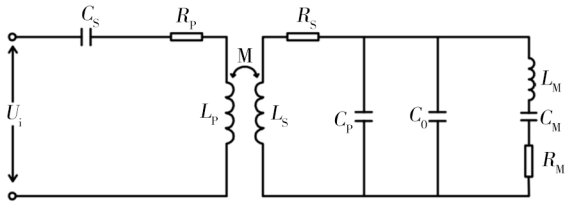


图7 负载为超声波振子的非接触电磁耦合器互感模型  
Fig. 7 Mutual inductance model of contactless electromagnetic couple loaded with ultrasonic vibrators

为了使电源电压电流同相位,消除无功功率提高系统功率因数,一般通过主边补偿来实现;为了提高非接触能量传输系统的功率传输能力,一般通过副边补偿来实现。本文以主边串联电容补偿——副边并联电容补偿(SP补偿)方式为研究对象,如图8所示为SP补偿下的等效电路图,超声振子工作于串联谐振频率( $\omega_s$ )下, $C_s$ 为主边串联的补偿电容, $C_p$ 为副边并联的补偿电容。

实验的连接图如图9所示,主边线路由信号发生器,功率放大器,串联电容 $C_s$ ,主边功率计和非接触电磁耦合器的主边线圈构成;副边线路由非接触电磁耦合器的副边线圈、并联电容 $C_p$ ,副边功率计和超

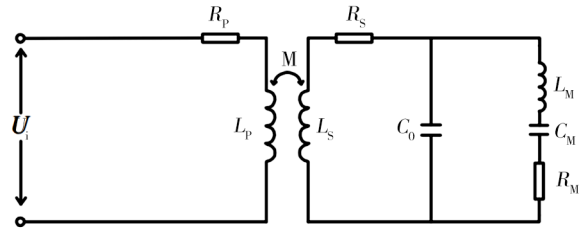


图8 SP- $\omega_s$ 补偿下的等效电路图

Fig. 8 Equivalent circuit diagram under SP- $\omega_s$  compensation

声振子构成。信号发生器输出超声频带电信号,并调节输出频率至超声振子的谐振频率,电信号通过功率放大器将功率放大,传输至非接触电磁耦合器的主边线圈上,通过电磁感应原理非接触地传输至副边线圈,最终传送到超声振子上。主边功率计和副边功率计分别记录其功率值。按照静态加载实验的加载方式,分别进行轴向加载实验和径向加载实验,测量并记录3种不同加工材料平面在SP- $\omega_s$ 补偿方案下的主边电源输出功率、副边超声振子获得的功率、谐振频率及传输效率,并绘制能量传输特性参数随负载力变化的曲线,分析负载力及不同被加工材料对非接触能量传输系统传输性能的影响。

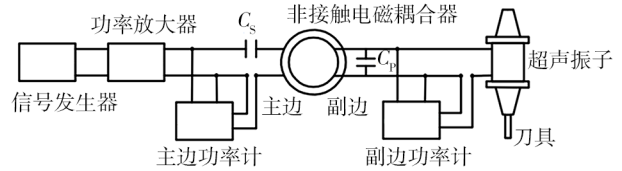


图9 实验线路连接图

Fig. 9 Experimental circuit connection diagram

#### 1.2.1 轴向负载实验

轴向加载的实验装置如下图10所示。加载方式与静态加载实验相同,对超声振子施加轴向负载力,每次加载10 N,每完成一次加载后调节信号发生器输出工作频率至超声振子谐振频率,记录数据,重复以上操作直到加载至120 N。

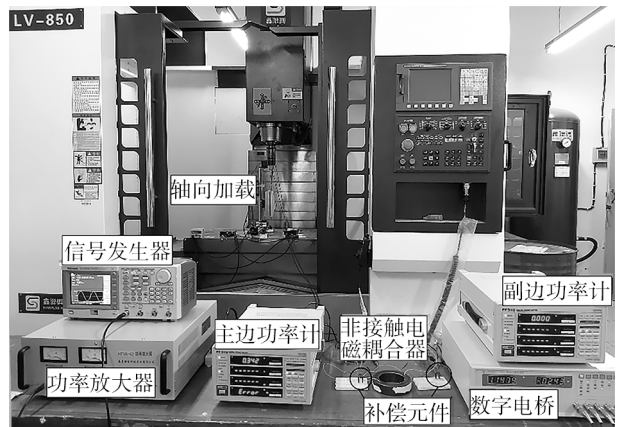


图10 轴向加载的实验装置图

Fig. 10 Experimental device diagram of axial loading

3种加工材料平面的轴向加载实验步骤相同,只需改变与超声振子接触的加工材料即可,重复上述实验,进行3种加工材料面的对比。

### 1.2.2 径向负载实验

径向负载实验装置与轴向负载实验装置相同,将含有加工材料平面的测力计固定在超声振子的径向方向,实验步骤与轴向加载实验相同,每次加载10 N,直到加载至80 N,记录各个能量传输特性的数据。加工材料平面的径向加载实验步骤相同,只需改变与超声振子接触的加工材料即可,重复上述实验,进行3种加工材料面的对比。

## 2 结果与讨论

## 2.1 静态加载实验结果

### 2.1.1 静态轴向实验

对不锈钢平面、塑料平面与金属V型槽所测电学参数进行对比,实验结果如图11所示。

如图11(d)(e)所示,随负载力的增加,3种加工材料平面的动态电容 $C_M$ 与动态电感 $L_M$ 变化的规律相反,它们的相互作用使串联谐振频率和并联谐振频率随负载力增大而增大。如图11(a)(b)所示,不锈钢平面加载方式的谐振频率受负载力的影响最大;塑料平面的谐振频率随负载力增大变化最不明显;金属V型槽的串联谐振频率随负载力的增大变化不稳定,并联谐振频率随负载力增大而增大,这是因为

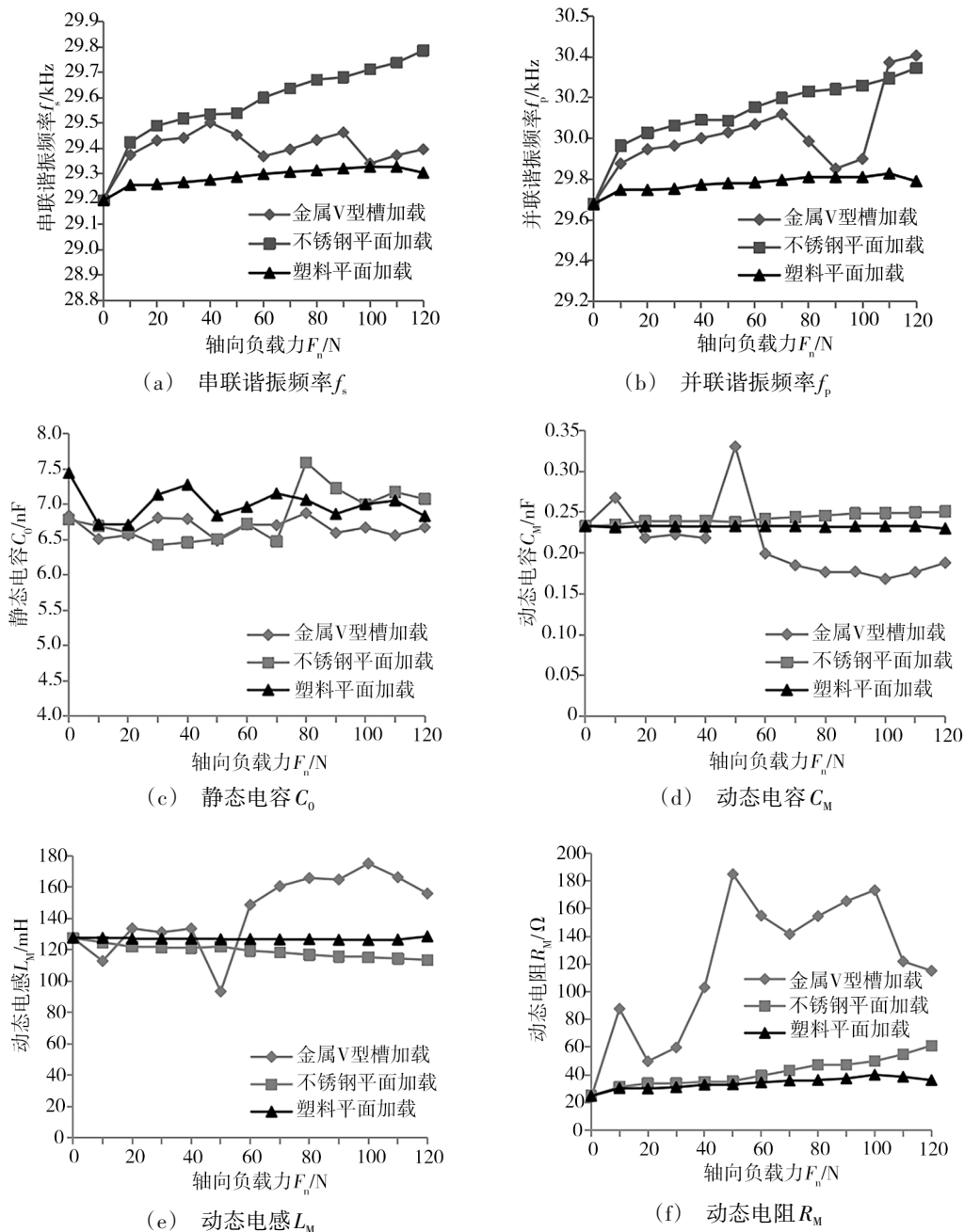


图11 轴向负载对超声波振子电学参数的影响规律图

Fig. 11 Effect of axial load on electrical parameters of ultrasonic oscillator

此时金属V型槽与超声振子进行的点接触,载荷不稳,导致谐振频率不稳定。由此可得,加工弹性模量较高的硬性材料时,超声振子的谐振频率受轴向负载力变化影响更大。

如图11(e)所示,3种被加工材料加载方式下的静态电容 $C_0$ 在7 nF附近波动,轴向负载力对它的影响不明显。

如图11(f)所示,不锈钢平面与塑料平面轴向加载实验的动态电阻 $R_M$ 随负载力的增大而增大,金属

V型槽的动态电阻随负载力变大呈现先增大后减小的变化形式。动态电阻的增加将导致更多的电源能量用于克服加工负载力做功,如果超声电源输出的功率不能随负载力的增加而增加,那么用于克服材料摩擦力产生振动的电能减少,最终导致超声振子产生振幅衰减现象。

### 2.1.2 静态径向实验

对不锈钢平面、塑料平面与金属V型槽所测电学参数进行对比,实验结果如图12所示。

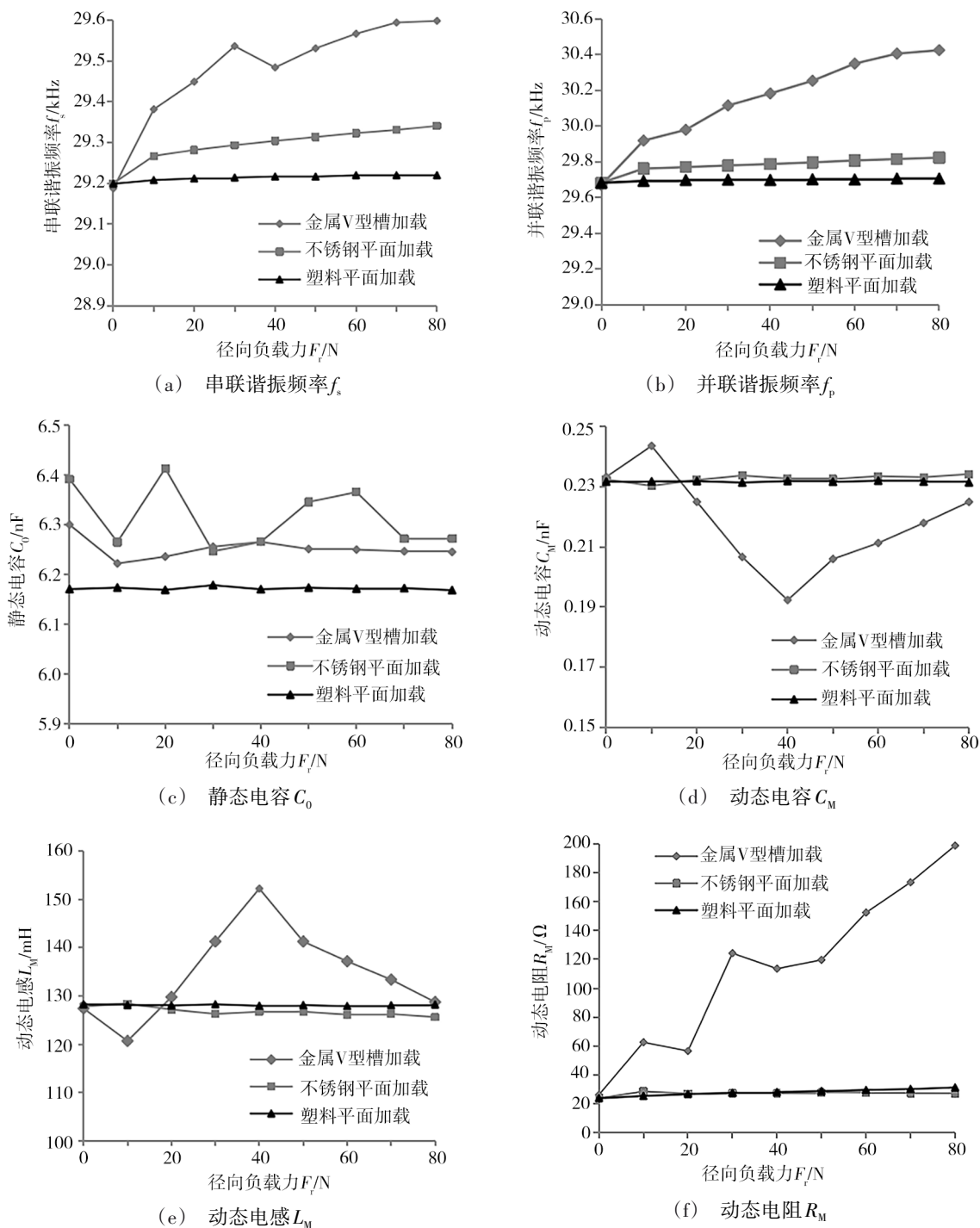


图12 径向负载对超声振子电学参数的影响规律

Fig. 12 Effect of radial load on electrical parameters of ultrasonic oscillator

如图 12(d)(e)所示,随负载力的增加,3种加工材料平面的动态电容  $C_M$  与动态电感  $L_M$  变化的规律相反,动态电容与动态电感改变的相互作用使谐振频率发生变化。如图 12(a)(b)所示,3种加工材料平面的串联谐振频率和并联谐振频率随负载力增大而增大,其中金属 V 型槽平面加载的谐振频率增加的幅度最大,塑料平面的谐振频率随负载力增大变化最不明显。对于不锈钢平面和塑料平面,与轴向加载实验相比,径向加载时的谐振频率幅值较小,且变化幅度较小,即径向负载力对超声振子的电参数变化影响较小。对于金属 V 型槽,轴向加载实验时进行的是点接触,载荷不稳,会导致其谐振频率变化不稳定;径向加载时进行的是线接触,谐振频率随负载力增大而增加,其变化较于轴向加载时稳定。

如图 12(c)所示,3种加工材料平面所得的静态电容  $C_0$  在 6.3 nF 附近波动,径向负载力的改变对它没有太大影响。与轴向加载实验相比,其容值发生

微小波动,原因是受环境影响。

如图 12(f)所示,随着径向负载力的增大,动态电阻呈现增大的变化形式,由于材料不同,变化幅度也不相同。与轴向加载实验相比,径向加载时不锈钢平面和塑料平面的动态电阻阻值幅度变化较小,即径向负载力对超声振子的电参数影响更小。对于金属 V 型槽的动态电阻,轴向加载的变化形式与径向加载的变化形式不同。轴向加载时的动态电阻呈现出先增大后减小的变化形式,而径向加载时的动态电阻呈现出随径向负载力增大而不断增大。金属 V 型槽进行的点接触,加载不平稳,导致轴向加载时数据不平稳,径向实验与轴向实验对比,径向加载时进行的线接触,故径向加载的电参数数据较平稳。

## 2.2 加载负载力实验结果

### 2.2.1 轴向负载实验

对不锈钢平面、塑料平面与金属 V 型槽所测电学参数进行对比,实验结果如图 13 所示。

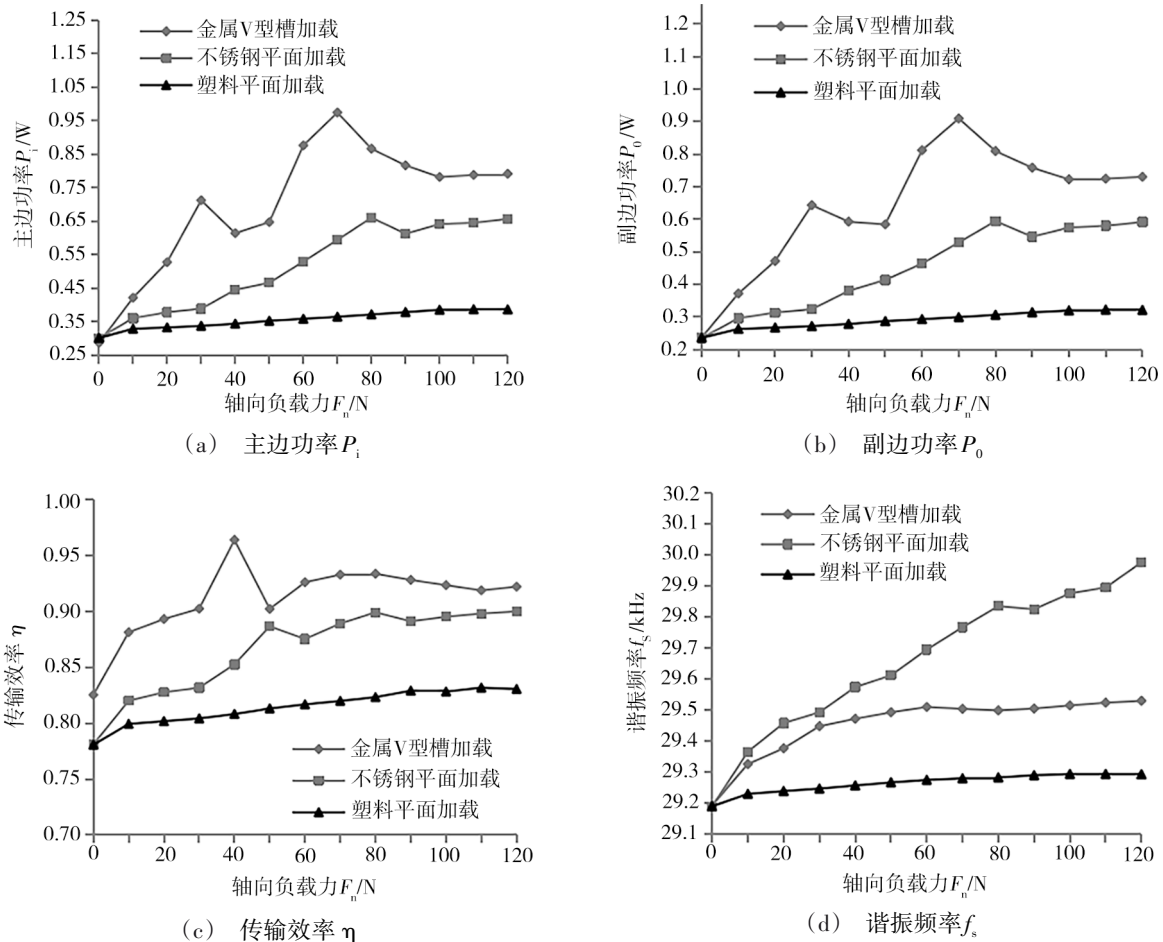


图 13 SP- $\omega_s$ 轴向加载的能量传输特性曲线

Fig. 13 Energy transfer characteristic curve of SP- $\omega_s$  axial loading

如图 13(a)所示,随负载力增大,金属 V 型槽的主边功率呈现出先增大后减小的变化形式,变化幅

度最大;不锈钢平面与塑料平面的主边功率随负载力的增大而不断增大,不锈钢平面的功率值及功率

变化幅度大于塑料平面。如图 13(b)所示,超声振子获得的功率(副边功率)与主边功率有相同的变化形式,故在  $SP-\omega_s$  补偿下能有效地减小振幅的衰减。 $SP-\omega_s$  补偿下加载实验的功率变化与静态加载实验中动态电阻的变化趋势基本一致,静态加载时,金属 V 型槽的动态电阻随负载力增大呈现先增大再减小的形式,不锈钢平面和塑料平面的动态电阻变化都是随负载力增大而增大。如图 13(c)所示,传输效率是主边功率和副边功率的比值,故金属 V 型槽的传输效率也呈现出先增大再减小的变化形式,不锈钢平面和塑料平面的传输效率呈现随负载力增大而增大。如图 13(d)所示,3 种加工材料面所测的谐振频率随负载力增大呈现不断增加的变化形式,不锈钢平面的谐振频率高于其他两种加载平面。

### 2.2.2 径向负载实验

对不锈钢平面、塑料平面与金属 V 型槽所测电学参数进行对比,实验结果如图 14 所示。3 种加工

材料面进行径向力实验中所获得的主边功率、副边功率及谐振频率,随负载力增加呈现出不断增加的变化形式。传输效率是主边功率和副边功率的比值,随负载力增大也呈现出增大的变化形式。在径向加载方式下,金属 V 型槽的主边功率、副边功率及谐振频率的变化幅度最大,不锈钢平面与塑料平面随负载力变化各数据的变化较小。副边功率随负载力的增大而增大,说明  $SP-\omega_s$  补偿能有效的减小振幅衰减。随着径向负载力的不断增加,不锈钢平面和塑料平面的功率和传输效率的变化幅度小,这与静态加载实验中负载力对动态电阻的影响相一致,这说明负载力的变化导致超声振子电学参数的变化,进而会对非接触电磁耦合器的能量传输特性产生影响。如图 14(d)所示,径向加载的谐振频率变化与轴向加载时的不同,径向加载下,金属 V 型槽的谐振频率高于其他两种材料面,且数值低于轴向加载。

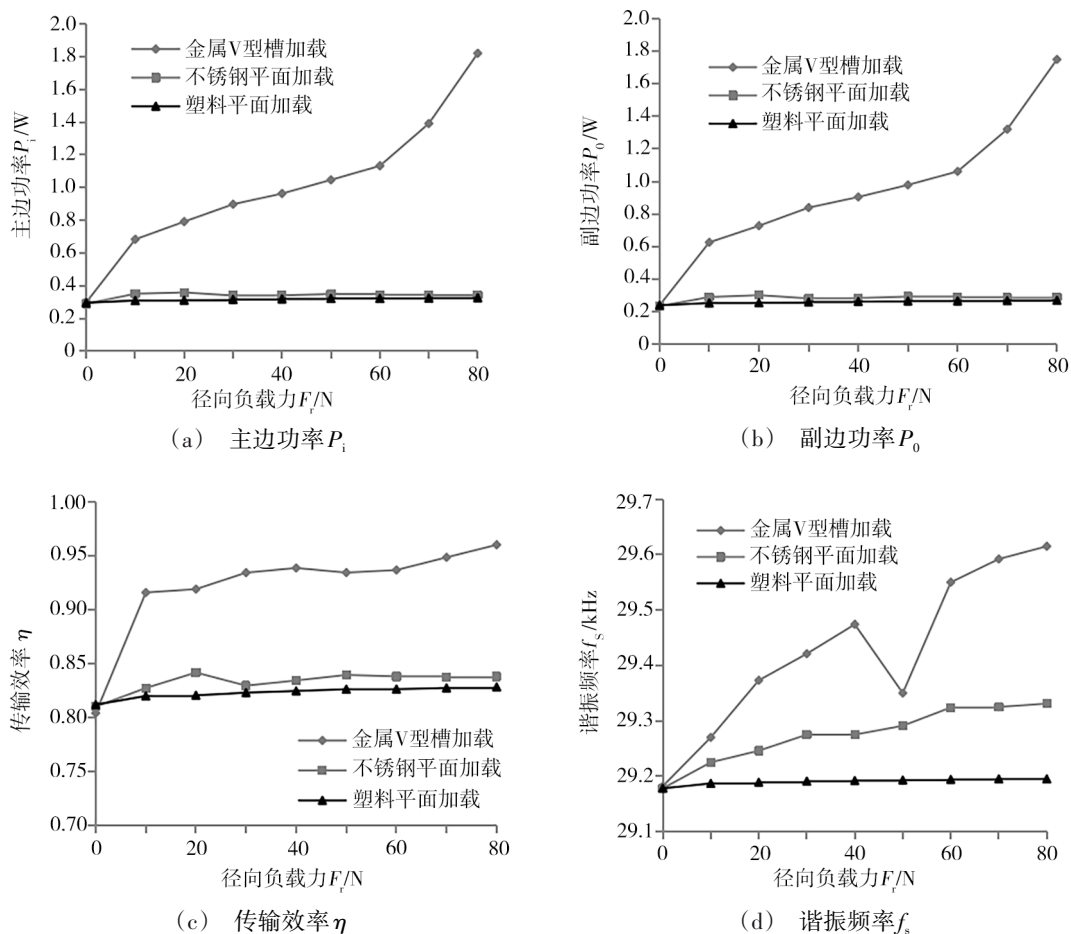


图 14  $SP-\omega_s$  径向加载的能量传输特性曲线

Fig. 14 Energy transfer characteristic curve of  $SP-\omega_s$  radial loading

### 3 结论

为研究负载对超声振子及非接触电能传输系统的影响,本文对超声振子电路及非接触供电系统补

偿电路进行分析,后进行加载实验,通过负载对超声振子电参数和能量传输特性的分析可以得到以下结论。



(1)在超声振子静态加载实验中,超声振子的电学参数会随着负载的变化而发生变化。对于负载大小对超声振子电参数的影响:随着负载力的增加,谐振频率增大,静态电容基本不变,动态电容、动态电感的变化形式相反,动态电阻增大。对于不锈钢平面、塑料平面和金属V型槽对电参数的影响,由于三种材料的特性不同,随负载力变化得到的电学参数变化也不相同,当加工弹性模量较高的硬性材料时,超声振子的谐振频率受轴向负载力变化影响更大,并在加载时应避免点接触,避免载荷不稳造成电参数的不稳定;对于同一种加工材料,与加载径向负载力相比,轴向负载力对电学参数的影响更加明显;因此,超声振子的电学参数受负载力大小、负载力方向和被加工材料特性共同影响。

(2)为了改善非接触能量传输系统的振幅衰减问题,本文针对SP- $\omega_s$ 补偿进行了非接触能量传输系统的加载实验,研究载荷对传输特性的影响。由实验可知:非接触能量传输系统的谐振频率随着负载力的增大而增大;在谐振频率跟踪状态下,通过SP- $\omega_s$ 补偿能够得到较高的传输效率;对于不锈钢平面、塑料平面和金属V型槽三种被加工材料,由于材料的特性不同,导致功率变化也不同,结合静态加载实验的数据可知,负载的变化导致超声振子电学参数的变化,进而会对非接触电磁耦合器的能量传输特性产生影响;通过SP- $\omega_s$ 补偿后,非接触的能量传输系统的功率变化与加工过程中超声振子的动态电阻的变化保持基本一致,即超声振子获得的功率会随着负载变化自适应地做出相应的变化,说明此补偿方式能有效地减小振幅衰减的问题。

### 参考文献

- [1] 李旭,刘震. 超声加工中振幅衰减的原因分析[J]. 中国民航学院学报(综合版),2001(01):54-56.
- LI X, LIU Z. Analysis on the cause of amplitude attenuation in ultrasonic machining [J]. Journal of Civil Aviation University of China (General Edition), 2001 (01): 54-56.
- [2] 秦军,刘传绍,赵波,等. 在频率跟踪后引起振动切削过程中振幅衰减的主要原因分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2006(06):484-488.
- QIN J, LIU C S, ZHAO B, et al. Analysis on the primary cause of causing amplitude attenuation in the ultrasonic vibration cutting after frequency tracking [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2006(06): 484-488.
- [3] 秦军,刘传绍,赵波,等. 关于超声振动切削中振幅衰减理论的探讨[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版),2006(04):42-45.
- QIN J, LIU C S, ZHAO B, et al. About amplitude decay in ultrasonic vibration cutting theory discussion [J]. Journal of Hunan college of engineering (natural science edition), 2006 (04): 42-45.
- [4] 秦哲. 旋转超声加工系统的振幅控制研究[D]. 广州:广东工业大学,2018.
- QIN Z, Research on amplitude control of rotating ultrasonic machining system [D], Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- [5] 刘欣,徐永超,苑世剑,等. 铝合金复杂曲面薄壁件液压成形技术[J]. 精密成形工程,2010,2(1):42-46.
- LIU X, XU Y C, YUAN S J, et al. Hydraulic forming technology for aluminum alloy complex-shaped components [J]. Journal of Net shape Forming Engineering, 2010,2(1):42-46.
- [6] 郑书友,徐西鹏. 超声加工中超声发生器的频率跟踪技术[J]. 计量技术,2005(12):10-14.
- ZHENG S Y, XU X P. Frequency tracking of ultrasonic generator in ultrasonic machining [J]. Measurement Technique, 2005(12):10-14.
- [7] 高春强,杨波,祝锡晶. 功率超声加工中超声波发生器频率自动跟踪[J]. 中北大学学报(自然科学版),2007(S1):38-40.
- GAO C Q, YANG B, ZHU X J. Frequency tracking for ultrasonic generator in ultrasonic vibration machining [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2007(S1):38-40.
- [8] 姚震,郭钟宁,张永俊,等. 旋转超声加工中的频率跟踪技术研究[J]. 机床与液压,2013,41(21):5-7.
- ZHAO Z, GUO Z N, ZHANG Y J, et al. Research on frequency tracking in rotary ultrasonic machining [J]. Machine Tool & Hydraulics. 2013(21):5-7.
- [9] 唐新星. 基于频率自动跟踪与振幅恒定控制的超声电源的研制[D]. 北京交通大学,2014.
- TANG X X. Research and development of ultrasonic power supply based on frequency auto-tracing and constant amplitude control [D]. Beijing Jiaotong University, 2014.
- [10] 马付建,焦首岳,刘宇,等. 用于旋转超声加工的超声波发生器频率跟踪策略[J]. 中国工程机械学报,2020,18(05):377-383.
- MA F J, JIAO S Y, LIU Y, et al. Frequency tracking strategy of ultrasonic generator for rotary ultrasonic machining [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2020 (05): 377-383.
- [11] 孙培星,陈涛,唐梦南. 非接触式旋转超声加工装置的电路补偿研究[J]. 机械设计与制造,2020(04):230-232.
- SUN P S, CHEN T, TANG M N. Study on compensation of rotating ultrasonic machining equipment based on con-tactless power transmission [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020 (04):230-232.

- [12] 申昊,冯平法,张建富,等. 超声振动系统非接触式高效电能传输的电路补偿[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015,55(07):728-733.
- SHEN H, FEN P F, ZHANG J F, et al. Circuit compensation for efficient con-tactless power transmission in ultrasonic vibration systems [J]. Journal of Qinghua University (Science and Technology), 2015,55(07):728-733.
- [13] 张建国. 旋转超声加工无线能量传输补偿优化与控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- ZHANG J G. Research on compensation optimization of wireless power transmission and control system of rotary ultrasonic machining [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [14] JUN Imaoka, MYOUNGSIK Nam, MASAHITO Shoyama, et al. Design of series-parallel combined resonant circuit with rotary transformer used for ultrasonic spindle drive [C]// 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia). IEEE, 2017.
- [15] Jun Imaoka M. Shoyama. A leakage flux cancellation technique for series-parallel combined resonant circuits with asymmetric rotary transformers used for ultrasonic spindle drive, 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia), 2018, pp. 1554-1561.
- [16] 刘帼巾,白佳航,崔玉龙,等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统频率复合控制方法[J]. 电机与控制学报,2020,24(02):63-71.
- LIU G J, BAI J H, CUI Y L, et al. Frequency compound control method of MCR-WPT system [J]. Electric Machines and Control, 2020,24(02):63-71.
- [17] 刘媛媛,冯宏伟,范曦. 磁耦合谐振式无线电能传输系统频率跟踪的自适应模糊控制[J]. 电子器件,2021,44(06):1385-1391.
- LIU Y Y, FENG H W, FAN X. Adaptive fuzzy control of frequency tracking used in magnetic coupled resonance wireless power transfer system [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2021(06):1385-1391.
- [18] LIU Xiaosen et al. An automatic resonance tracking scheme with maximum power transfer for piezoelectric transducers [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015,62(11):7136-7145.
- [19] LONG Z , PAN Z , LI C, et al. Constant amplitude control of high-power ultrasonic drive system [C]. 2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). IEEE, 2014.