

基于局部共振理论的超声加工技术研究进展*

赵波¹, 别文博¹, 王晓博¹, 陈凡², 赵重阳¹

(1. 河南理工大学机械与动力工程学院, 焦作 454003;

2. 平顶山学院电气与机械工程学院, 平顶山 467000)

[摘要] 为促进局部共振理论在超声加工中的应用和实现主动可控的加工制造, 从局部共振现象的提出入手, 分析了局部共振产生的机理, 并对基于局部共振现象的非谐振理论进行介绍。分别论述了局部共振在简单和复杂振动系统中的应用以及非谐振设计理论在超声齿轮加工和超声磨削中的应用, 并对基于局部共振理论的超声振动稳定性研究进行综述。基于局部共振的优势, 就其在超声加工中值得关注的问题进行展望, 为局部共振理论的发展提供参考。

关键词: 超声加工; 声学系统; 局部共振; 非谐振设计理论; 稳定性

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.21.040



赵波

教授、博士生导师, 享受政府特殊津贴, 河南省省管优秀专家, 河南省杰出人才, 省跨世纪学术技术带头人, 河南理工大学河南省先进制造技术创新型科研团队带头人。主要从事先进制造技术、难加工材料精密与特种加工理论及装备的教学科研工作。

随着科学技术的发展, 超声加工技术在工业、农业、医疗、军事等领域的应用越来越广, 在超声加工中, 超声振动系统大多按“全调谐”方式工作^[1], 这种工作方式是对组成振动系统的换能器、变幅杆及加工工具分别进行设计计算, 按谐振频率要求求得结构尺寸, 使换能器和变幅杆具有相同的谐振频率, 然后连接起来, 使系统谐振于同一频率。

由于全谐振设计方法是按照同一频率对整个系统进行设计, 从而对系统各部分的精度要求比较高, 在制造过程中如果出现少许偏差, 就会导致各部分的谐振频率发生漂移, 从而影响系统的稳定性^[2]。同时系统中各部分的耦合状态、夹持力及接触面间的表面粗糙度、同轴度等对系统的谐振频率将产生影响, 即使各部分的设计频率相同, 组装后系统的谐振频

率也可能产生漂移^[3]。通常在系统设计的时候往往忽略系统负载的影响, 而振动系统的机械负载又确实存在, 并且在实际工作中, 系统的负载是随时变化的, 难以保证系统一直处于稳定状态^[4]。超声加工在实际应用中面临着工装设计和制造方面的复杂性和准确性, 同时组成振动系统的各部件需要按照具体的应用情况进行设计, 这样就会导致通用的设计方法“全谐振设计”的系统往往不能实现预期的目标, 从而需要采用新的设计方法对振动系统进行设计。

局部共振理论为超声振动系统的设计提供了一种新的设计方法, 本文从局部共振现象入手, 对局部共振的相关理论及应用进行论述, 旨在为局部共振理论的发展提供参考。

局部共振现象

范国良等利用超声加工深小孔时, 发现当工具杆的直径(或面积)

* 基金项目: 国家重点联合自然科学基金(U1604255); 国家自然科学基金(51475148)。

远小于与之连接的变幅杆输出端直径(或面积),即二者之比小于0.30(或面积比约小于10%)时,可以将工具杆作为单独的系统进行设计^[5]。在此基础上,许多学者分别从试验和仿真的角度对“局部共振”现象进行研究,刘世清等^[6]对复合振动系统中的局部扭转共振现象进行研究,发现当相连接的粗细杆直径比大于2或面积比大于4时,在复合振动系统中会发生局部扭转共振。季远等^[7]主要通过试验对超声振动系统中细长杆的“局部共振”现象进行研究,结果表明只有当细长杆的共振频率与超声振子的谐振频率接近时,细长杆会出现明显的“局部共振”现象。王艳东等^[8]对超声扭转振动系统中的阶梯形变幅杆中的局部共振进行有限元仿真,结果表明当截面比大于2时会产生扭转局部共振现象。局部共振现象的发现,简化了超声振动系统的设计,摆脱按半波长整数倍叠加的概念,振动系统的调谐方式也不再局限于“全谐振”方式。

局部共振机理研究

1 局部共振理论研究

关于局部共振现象的机理研究,许多学者从不同的角度对其机理进行解释,其中广义变幅器理论认为工具杆实际可以等效为1/4波长的变幅杆,当与磁致伸缩换能器和锥形变幅杆组成D系统,在负载下Q值较低,从而可以在较宽的频带内工作^[9]。全谐振观点认为局部共振现象是由D驱动系统和工具杆组成的复合系统在某些共振频率工作时,与工具杆按固定-自由方式单独谐振的频率一致时出现的现象^[10]。当工具杆的直径远小于与其相连的变幅杆的直径时,局部共振才能发生,所以在连接处的耦合系数很小,得到局部共振是D系统与工具杆的弱耦合振动的一种特殊表现^[11]。动力吸收器装置的消振原理分别将换能器、变

幅杆和工具杆类比为振动基座、原振动系统和辅系统,当工具杆自身的固定-自由模式的谐振频率与振动基座的振动频率相同时,在变幅杆和工具杆的连接处会出现位移节点,并且工具杆会出现有规律的谐振^[12]。声波导理论认为当杆的半径小于波长时,工具杆将会发生局部共振^[13]。然而,该理论只是从声波导理论对局部共振发生的条件进行阐述,有待进行相关的试验进行验证。郑建新等^[14]在建立数学物理模型的基础上,如图1所示,分析超声加工声学系统的动力学规律,将变幅杆和工具杆组成二自由度系统。设变幅杆为 m_1, k_1, c_1 ,工具杆为 m_2, k_2, c_2 ,则该振动系统的微分方程为:

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_0 e^{i\omega t} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

设系统的稳态响应为 $\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} e^{ikt}$,则变幅杆和工具杆的向量分别为:

$$\begin{cases} X_1 = \frac{-m_2 k^2 + ic_2 k + k_2}{f(k^2)} u_0 \\ X_2 = \frac{ic_2 k + k_2}{f(k^2)} u_0 \end{cases} \quad (2)$$

当 $k = k_2 \approx k_1$,则变幅杆和工具杆在连接处为位移节点,即整个声学系统处于一种谐振状态。并通过模拟试验,当工具杆发生一定磨损时,只需要适当调整超声波电源的频率,就可以保证工具杆处于较大的振幅,并且工具杆的磨损 W 和可调频率范围 Z 满足 $W = Z / (1 + Z)$ 的关系。徐可伟等采用阻抗综合法,通过将整个系统分为若干个子系统,分别求出每个子系统在连接处的输入阻抗,按照具体的连接形式,对整个系统输入的阻抗进行求解,其原理如图2^[15]所示。设 Z_p, Z_p^A, Z_p^B 分别代表整个系统、子

系统A、子系统B在连接点P处的机械阻抗, F_p, F_p^A, F_p^B 分别代表整个系统、子系统A、子系统B在连接点P处所受到的外部力。

根据连接点的力平衡和位移相容条件,由约束方程:

$$\begin{cases} F_p = F_p^A + F_p^B \\ X_p = X_p^A + X_p^B \end{cases} \quad (3)$$

得出:当整个系统在连接点的阻抗等于两个子系统在连接点的阻抗之和时,即 $Z_p = F_p / X_p = Z_p^A + Z_p^B$,整个系统会产生共振,通过对不同截面比值的变幅杆和工具杆组合的系统进行计算,当二者的固有频率接近时,系统达到共振状态。Yang等^[16]采用机械四端网络法推导出了阶梯形的圆锥复合变幅杆的局部共振频率方程,并进行有限元仿真,发现应力集中导致局部共振的发生,截面面积变化与局部共振的频率存在一定的关系。Zhu等^[17]在研究超声珩磨局部共振的特点时,采用传递矩阵法对局部共振的机理进行解释,并发现其与超声深孔加工具有相同的本质。综上所述,研究人员从不同的角度对局部共振的

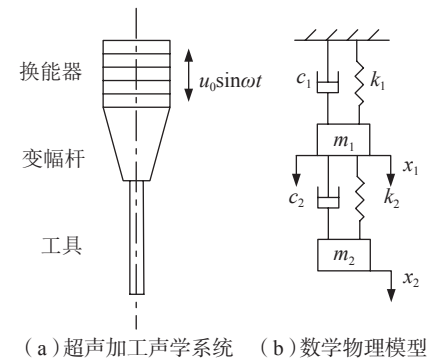


图1 局部共振现象的数学模型

Fig.1 Mathematical model of local resonance phenomenon

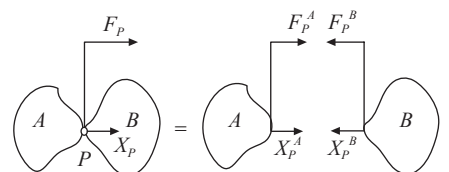


图2 单一坐标连接的组合系统

Fig.2 Combined system of single coordinate connections

机理进行阐述,这些观点主要是源自理论的推导和计算,还需要经过相关试验的验证。

2 基于局部共振的理论

随着超声加工技术的发展,基于局部共振理论,一些学者提出整体共振设计^[18]和非谐振设计理论^[19-20]。其中整体共振设计认为振动系统的各个组成部分,不一定也不必要工作于各自的工作频率上,而是作为一个整体共振于所设计的工作频率上。由于在整体共振设计中的振动位移分布和位移节点位置难以确定,从而影响系统的振动效果。目前相关的文献只是定性地对理论进行阐述,未见相关的模型和定量分析。非谐振设计理论根据工件的具体使用要求,联合建立工件与变幅杆的振动系统模型,通过振动耦合的位移、力、弯矩等连续条件和边界条件建立系统的振动频率方程,进而确定满足谐振频率和振动模态的系统形状尺寸参数,其设计体系如图3所示。

基于局部共振理论在超声加工中的应用

在超声钻孔、超声切削、超声珩磨和超声磨削中,按照局部共振发生的条件,对系统进行设计,可以避免整个系统按照全谐振设计时的复杂性,在加工过程中,当工具被磨损后,可以通过调整激励频率来消除工具磨损所造成的不利影响。

1 局部共振理论的应用

文献[5]按照局部共振原理,采用外径6mm、壁厚2mm的细长不锈钢工具,对玻璃进行超声振动钻孔加工,完成了直径6mm的不同深孔的加工,其最大孔深达280mm,加工过程中克服了由于工具磨损而发生的加工不稳定问题。范国良等^[21]按照局部共振原理设计的金刚石钻头实现了直径3~10mm,长度50~115mm,最长达160mm的YAG激光晶体棒的加工,提高加工效率,延长钻头的

使用寿命。赵继等^[22]按照局部共振原理设计超声切削系统加工的弯曲振动刀杆,刀杆可以进行局部共振,简化了整个超声切削系统的设计和操作。以上文献中关于局部共振的论述仅限于对工具的控制,其振动系统相对简单,易于实现,而关于复杂振动系统的局部共振理论设计方法研究相对较少。在超声珩磨中,当按照全谐振方式对由换能器、变幅杆、振动圆盘、挠性杆、油石座等各振动子系统进行设计时,不仅造成能量的大量损失,而且使珩磨头内部的精密零件因振动而严重磨损,导致加工精度降低和系统的温度升高。为克服

全谐振设计过程中存在的问题,赵波^[23]通过试验研究首次采用局部共振原理对超声珩磨挠性杆—油石座振动子系统进行设计,将换能器—变幅杆—振动圆盘和挠性杆—油石座分别作为单独的系统进行设计,其装置示意图如图4所示^[23],采用振动圆盘与挠性杆直接连接,将振动圆盘的能量通过挠性杆传递至油石,有效避免了振动圆盘与珩磨杆连接处能量大量损失的问题。当调整超声发生器的频率时,换能器—变幅杆—振动圆盘和挠性杆—油石座便可达到谐振状态,获得良好的振动效果。当挠性杆长度和油石座长度或系统的负

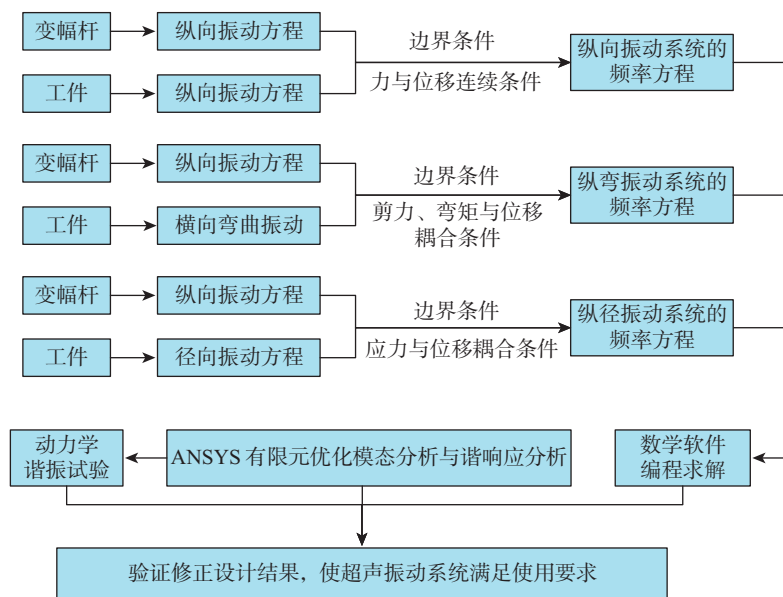


图3 非谐振振动系统设计体系

Fig.3 Design of non-resonant vibration system design

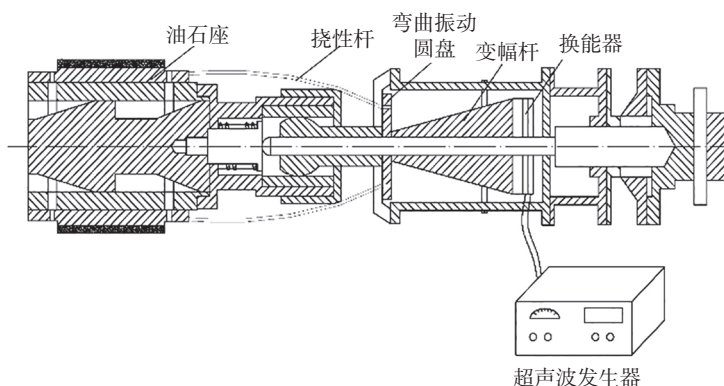


图4 局部共振新型超声珩磨装置示意图

Fig.4 Schematic of new ultrasonic honing device based on local resonance

载发生变化时,通过改变超声发生器的频率,系统仍能处于良好的谐振状态,并产生较大的振幅。研究表明,考虑珩磨直径和油石座的抗弯强度等因素,当挠性杆直径和圆盘直径(变幅杆直径)比值小于0.3时,挠性杆截面与油石座截面比值小于10%时,系统便可以按照局部共振的原理进行设计。

2 非谐振理论的应用

2.1 齿轮超声加工

在超声珩齿中,超声振动施加在齿轮工件上,变幅杆与齿轮组成的振动系统比较复杂,当变幅杆做一维纵向振动时,齿轮由于尺寸不同将会出现纵向振动、弯曲振动、径向振动模式转换,同时二者之间的耦合关系比较复杂,并且齿轮的重量在振动系统设计时不能等效为变幅杆输出端的质量,导致全谐振设计方法难以满足振动系统的设计。基于薄环盘振动理论和局部共振现象,吕明等^[24]提出非谐振单元变幅器的设计理论,采用应力耦合及力耦合原理对非谐振单元组成的振动系统进行设计。余银柱^[25]基于前述的阻抗匹配理论,以剪力、弯矩与位移耦合为边界条件,对圆锥形变幅杆和齿轮组成的振动系统进行求解,当变幅杆小端阻抗幅值 z_1 与齿轮在连接处的阻抗幅值 z_2 相等时二者才能谐振。通过试验研究,对于中小模数的齿轮,当加工齿轮的分度圆小于100mm,厚径比大于0.3的齿轮适宜利用纵向谐振方式进行设计;当加工齿轮的分度圆大于100mm,厚径比小于0.3的齿轮适宜利用纵弯谐振方式进行设计^[26]。文献[25]通过将齿轮安装于变幅杆的节点位置,在泊松效应的作用下引起齿轮径向振动,仅定性地对径向谐振进行研究,表明变幅杆的长度和直径对齿轮的径向振动有影响,并未定量地对径向谐振进行分析,是否存在某一参数以及对径向谐振系统的影响有待进一步研究。

Wang等^[27]基于非谐振设计理论,对超声珩齿振动系统进行设计,发现齿面的微切削波动纹理十分明显,如图5^[27]所示,并对加工后的齿面粗糙度进行比较,发现超声珩齿的齿面的表面粗糙度 R_a 为0.45 μm ,较普通珩齿降低37.5%。

通过非谐振设计理论,可以根据工件的具体使用要求,通过对变幅杆的结构和尺寸进行任意的调整,使二者组成的系统谐振于超声波发生器的额定工作频率,从而简化谐振系统的设计,然而在实际的齿轮超声加工中由于齿轮的不同尺度和空间限制,如要获得预期的加工要求和扩大齿轮超声加工的应用范围,就必须基于局部共振理论对非谐振齿轮零件与超声谐振系统组成的复杂混合系统进行研究。

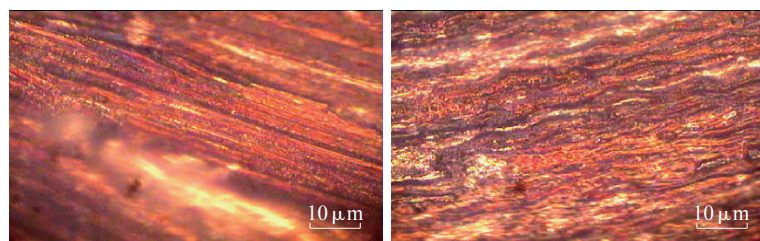
2.2 超声磨削

此前对非谐振系统进行设计时,对由变幅杆和工件组成的系统进行设计,主要是在工件上施加振动。然而,在超声振动加工中超声振动施加方式有两种,既可将超声振动施加在工件上,也可将超声振动施加在砂轮上。欲将超声振动施加到砂轮上通常需要改变机床主轴的结构,设计起来相对复杂,对于一般的试验研究,为简化试验过程常常对工件施加超声振动,但是在实际生产过程中为了提高加工的通用性,需要将振动施加在砂轮上。赵波等^[28]在对超声内圆磨削进行研究时,采用分段近似趋近法,将工具砂轮简化为圆柱体,利用传输矩阵对系统进行理论分析,对系

统进行ANSYS优化设计,并对系统的振动特性进行试验,结果表明系统可以达到良好的振动效果。付俊帆等^[29-30]基于Mindlin理论,对超声磨削系统中的大负载砂轮进行纵弯谐振设计,将整个系统分为变幅杆、基体环盘和磨料层环盘3个部分,分别建立各部分的位移与应力函数,利用边界条件建立振动系统的频率方程,并对系统进行有限元仿真和试验验证,系统的谐振频率与设计频率之间的误差为4.92%,砂轮的外缘振幅增加,有利于磨削加工。以上研究只是从理论方面对大负载砂轮的谐振系统进行分析,并未对其加工效果进行验证。因此,针对非谐振系统的稳定性及加工效果都需要进行进一步研究。

3 振动系统稳定性

目前在非谐振系统设计时仅从工具或工件单方面考虑,鉴于近年来二维或多维超声加工技术的出现,对振动系统的设计提出新的要求,当分别对大负载的工具或工件同时按照非谐振方式进行设计,能否出现系统共振于某一频率,这将对超声加工的稳定性及加工效果有着重大的影响。同时关于超声振动的振幅、频率和加工参数对整个系统的影响以及系统稳定性的判据等研究相对较少,如何通过合理的数学模型来实现超声参数与加工参数之间结合,并对系统的稳定性进行预测,这就需要基于局部共振机理的非谐振设计理论进行深入的研究。Zhang等^[31-33]基于局部共振理论及再生效应,分别建立了



(a) 普通珩齿

(b) 超声珩齿

图5 齿面珩磨后的微观照片

Fig.5 Microscopic photograph of honed tooth surface

进给方向、垂直进给方向、椭圆、扭转超声振动辅助铣削的动力学模型,如图6^[33]所示,其不同方向的动力学模型可以统一为一时滞微分方程:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = a_p K_n(t)(u(t) - u(t - \tau)) \quad (4)$$

在时域内运用全离散法对不同方向的切削稳定性进行分析,结合稳定性预测图谱如图7^[33]所示,得出不同方向超声振动辅助铣削的极限切削条件。

在前述稳定性研究中,忽略了结构模态耦合效应,而在超声振动辅助铣削中,结构耦合效应又是确实存在的,其对系统稳性的影响有待进一步研究。同时针对复杂超声振动系统,影响其稳定性的因素增加,导致复杂系统的稳定性研究相对较少,然而系统的稳定性对加工表面质量的稳定性以及工艺参数和声学参数复合后所形成的表面应力状态和组织状态的主动可控起着决定作用,因此基于局部共振理论下的复杂超声振动系统工作的稳定性模型、极限切削条件及稳定性判据的研究对超声加工的发展有着重要的意义。

结论

从目前局部共振理论在超声加工中的应用来看,仍有很多问题需要探讨和解决,应在以下3方面开展相关的研究。

(1) 局部共振理论尚未形成完善的理论体系,针对不同的超声应用,定性的分析较多,相应的理论分析较少,亟待从局部共振发生本质进行理论探究和完善。

(2) 按照局部共振条件设计超声振动系统,当振动参数和加工参数等发生变化时,如何通过参数的改变来对工具的磨损或负载的变化进行补偿,实现振动系统的持续稳定,以及对系统加工效果的影响需要进一步的研究。

(3) 加大局部共振理论的工程

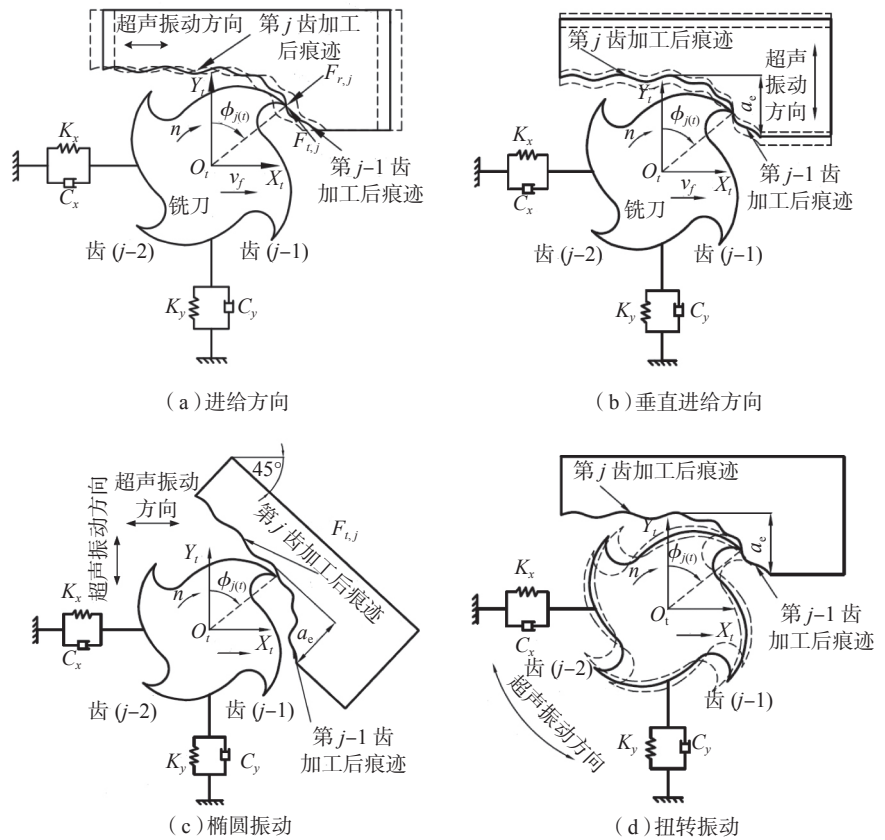


图6 不同方向超声振动辅助铣削动力学模型

Fig.6 Dynamic model of ultrasonic vibration assisted milling at different directions

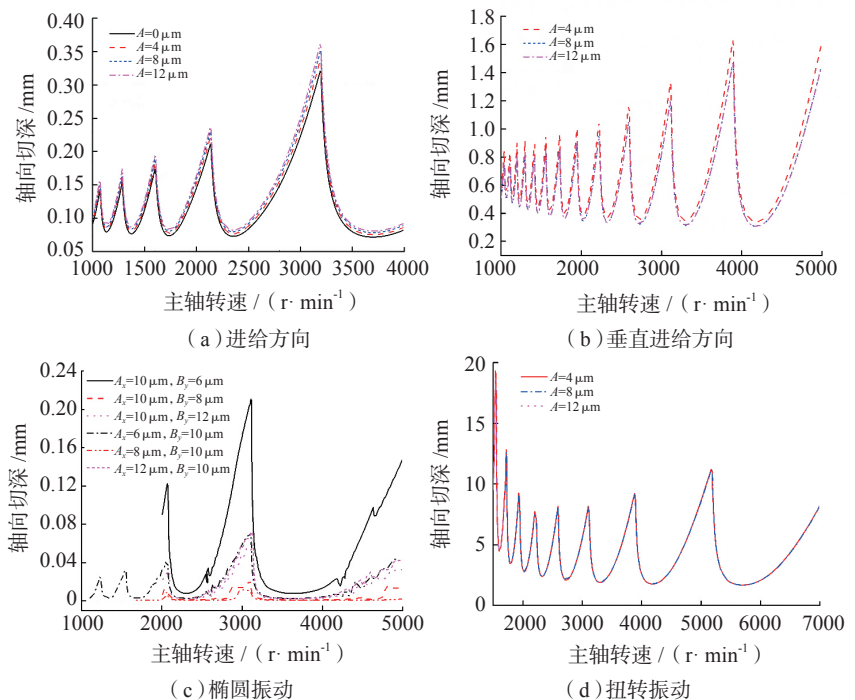


图7 不同方向超声振动辅助铣削稳定性预测图

Fig.7 Stability prediction diagram of ultrasonic vibration assisted milling at different directions

适应性研究,依据使役性能,对被加工件进行定量描述,并进行相应的超声振动系统及工艺设计,实现主动可控加工制造。

参考文献

- [1] IBRAHIM R, BATEMAN R, CHENG K, et al. Design and analysis of a desk top micro-machine for vibration-assisted micro-machining[J]. Proc IMechE Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(B8): 1377-1391.
- [2] 赵波,何定东. 超声珩磨局部共振问题研究[J]. 现代制造工程, 1998(6): 4-5.
- ZHAO Bo, HE Dingdong. Research on local resonance of ultrasonic honing[J]. Modern Manufacturing Engineering, 1998(6): 4-5.
- [3] 林书玉,鲜小军. 功率超声换能振动系统的优化设计及其研究进展[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 31-39.
- LIN Shuyu, XIAN Xiaojun. Progress and optimization design of high power piezoelectric ceramic ultrasonic vibrating system[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2014, 42(6): 31-39.
- [4] 吕明,王时英,轧刚. 超声珩齿弯曲振动变幅器的位移特性[J]. 机械工程学报, 2008, 44(7): 106-111.
- LÜ Ming, WANG Shiyang, YA Gang. Displacement characteristics of transverse vibratory disc transformer in ultrasonic gear honing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(7): 106-111.
- [5] 王得胜,李智. 超声珩磨装置振动子系统的振动特性研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(2): 226-230.
- WANG Desheng, LI Zhi. Research on characteristics of vibration subsystem in ultrasonic honing device[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2015, 34(2): 226-230.
- [6] 刘世清,丁大成,董彦武. 复合振动系统中“局部扭转共振”现象的研究[J]. 中南工学院学报, 1995(1):1-6.
- LIU Shiqing, DING Dacheng, DONG Yanwu. The research of part-torsion resonance in complex vibration system[J]. Journal of Central-South Institute of Technology, 1995(1):1-6.
- [7] 季远,张德远. 超声复合振动系统中的“局部共振”现象实验研究[J]. 应用声学, 2003, 22(6): 6-9.
- Ji Yuan, ZHANG Deyuan. Experimental study on the phenomenon of “local resonance” in compound ultrasonic vibration systems[J]. Journal of Applied Acoustics, 2003, 22(6): 6-9.
- [8] 王艳东,王敏慧,鲍善惠. 超声扭转振动系统局部共振的有限元仿真研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 49-52.
- WANG Yandong, WANG Minhui, BAO Shanhui. A finite-element simulation study local resonance in torsional ultrasonic vibration systems[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2005, 33(3): 49-52.
- [9] 王燕忠. 超声珩齿非谐单元变幅器的设计理论研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- WANG Yanzhong. Theoretical research on transformer composed of non-resonance structure in ultrasonic gear-honing[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [10] 周光平,鲍善惠,程存弟,等. 局部共振现象的理论解释[J]. 声学技术, 1994(6): 39-42.
- ZHOU Guangping, BAO Shanhui, CHENG Cundi, et al. Explanation of local resonance phenomenon[J]. Technical Acoustics, 1994(6): 39-42.
- [11] 鲍善惠. 超声耦合振动与“局部共振”现象[J]. 应用声学, 1998, 17(4): 6-10.
- BAO Shanhui. Ultrasonic coupled vibration and the “local resonance” [J]. Journal of Applied Acoustics, 1998, 17(4): 6-10.
- [12] 应崇福,范国良. 超声复合振动系统中的“局部共振”现象—20年来的应用和机理分析情况[J]. 应用声学, 2002, 21(1): 19-25.
- YING Chongfu, FAN Guoliang. The phenomenon of “local resonance” in compound ultrasonic vibration systems — applications and mechanism analyses during the 20 years after its discovery[J]. Journal of Applied Acoustics, 2002, 21(1): 19-25.
- [13] 应崇福. 对超声复合振动系统中“局部共振”现象的一种解释[J]. 应用声学, 2006, 25(6): 380-383.
- YING Chongfu. An explanation for the mechanism of “local resonance” in compound ultrasonic vibration systems[J]. Journal of Applied Acoustics, 2006, 25(6): 380-383.
- [14] 郑建新,徐家文,刘传绍,等. 超声加工中局部共振机理的模拟试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(5): 644-648.
- ZHENG Jianxin, XU Jiawen, LIU Chuanshao, et al. Research on simulation test of local resonance mechanism in ultrasonic machining[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 38(5): 644-648.
- [15] 徐可伟,朱训生,赵波. 用谐振来解释超声加工中的“局部共振”现象[J]. 应用声学, 2002, 21(5): 30-33.
- XU Kewei, ZHU Xunsheng, ZHAO Bo. Using full resonance to explain “local resonance” phenomenon in ultrasonic machining[J]. Journal of Applied Acoustics, 2002, 21(5): 30-33.
- [16] YANG J J, FANG Z D, WEI B Y, et al. Theoretical explanation of the ‘local resonance’ in stepped acoustic horn based on Four-End Network method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(6): 3106-3110.
- [17] ZHU X S, XU K W, ZHAO B, et al. Experimental and theoretical research on ‘local resonance’ in an ultrasonic honing system[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1-3): 207-211.
- [18] LIN S, XU L, HU W. A new type of high power composite ultrasonic transducer[J]. Journal of Sound & Vibration, 2011, 330(7): 1419-1431.
- [19] SUZUKI N, HARITANI M, YANG J, et al. Elliptical vibration cutting of tungsten alloy molds for optical glass parts[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(1): 127-130.
- [20] SILGE M, SATTEL T. Design of contactlessly powered and piezoelectrically actuated tools for non-resonant vibration assisted milling[J]. Actuators, 2018, 7(2): 1-17.

- [21] 范国良, 张维贤. 超声旋转加工及其在 Nd:YAG 晶体棒外圆成形中的应用 [J]. 激光与红外, 1994(4): 61-64.
- FAN Guoliang, ZHANG Weixian. Rotary ultrasonic machining and its application for fabrication Nd:YAG laser rods[J]. Laser and Infrared, 1994(4): 61-64.
- [22] 赵继, 王立江, 孟继安. 超声振动切削系统中弯曲振动刀杆的谐振模式 [J]. 声学学报, 1992(1): 22-29.
- ZHAO Ji, WANG Lijiang, MENG Jian. The resonance pattern of cutter bar in ultrasonic vibration cutting system[J]. Acta Acustica, 1992(1): 22-29.
- [23] 赵波. 硬脆材料超声珩磨系统及延性切削特征研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 1999.
- ZHAO Bo. Study on ultrasonic honing system and feature of ductile domain cutting of hard-brittle materials[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 1999.
- [24] 吕明, 王时英, 秦慧斌. 非谐振设计理论与齿轮超声加工 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- LÜ Ming, WANG Shiyong, QIN Huibin. Non-resonant design theory and ultrasonic gear machining[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [25] 余银柱. 超声珩齿非谐振单元变幅器的设计理论与实验研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- SHE Yinzhong. Theoretical and experimental research on transformer with non-resonance structure in ultrasonic gear honing[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [26] 秦慧斌. 超声珩齿振动系统的非谐振设计理论与实验研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- QIN Huibin. Theoretical and experimental research on inharmonic design of resonance system in ultrasonic gear honing[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.
- [27] WANG S Y, LV M, YA G. Research on system design of ultrasonic-assisted honing of gears[J]. Advanced Materials Research, 2008, 53-54: 191-196.
- [28] 赵波, 陈凡, 贾晓凤, 等. 非谐振大工具头变幅杆优化设计及声学特性测试 [J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 45-51.
- ZHAO Bo, CHEN Fan, JIA Xiaofeng, et al. Optimization design and characteristics test of non-resonant large tool head horn[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2017, 45(1): 45-51.
- [29] 付俊帆, 秦慧斌, 吕明. 基于 Mindlin 理论的功率超声纵弯谐振变幅器设计理论与实验研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(7): 259-266.
- FU Junfan, QIN Huibin, LÜ Ming. Design and experiment of ultrasonic longitudinal-flexural resonance transducer based on Mindlin theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(7): 259-266.
- [30] 付俊帆, 秦慧斌, 吴霄, 等. 大负载纵弯谐振超声磨削变幅器的设计与试验 [J]. 工具技术, 2018, 4: 20-24.
- FU Junfan, QIN Huibin, WU Xiao, et al. Design and research of longitudinal-flexural resonant ultrasonic grinding transducer with Large load[J]. Tool Engineering, 2018, 4: 20-24.
- [31] ZHANG Y M, ZHAO B, WANG Y Q, et al. Effect of machining parameters on stability of separated and unseparated ultrasonic vibration of feed direction assisted milling[J]. Journal of Mechanical and Science Technology, 2017, 31(2): 851-858.
- [32] ZHANG Y M, ZHAO B, WANG Y Q, et al. The stability analysis of separated feed ultrasonic milling[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(2): 1062-1073.
- [33] 张跃敏. 超声振动辅助铣削系统的稳定性研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2017.
- ZHANG Yuemin. The study on stability of ultrasonic vibration assisted milling system[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017.

通讯作者: 赵波, E-mail: zhaob@hpu.edu.cn。

Development of Ultrasonic-Assisted Machining Based on Local Resonance

ZHAO Bo¹, BIE Wenbo¹, WANG Xiaobo¹, CHEN Fan², ZHAO Chongyang¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. School of Electrical and Mechanical Engineering, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China)

[ABSTRACT] This paper aims to promote the application of local resonance in ultrasonic-assisted machining and realize active and controllable manufacturing. From the phenomenon of local resonance in ultrasonic-assisted machining, the authors discuss its mechanism and introduce other theories based on local resonance. Simultaneously, the application of local resonance in simple and complex systems, and the non-resonant design theory applied in ultrasonic gear machining and ultrasonic-assisted grinding are discussed respectively. Then the stability of ultrasonic vibration based on local resonance theory is also discussed. Furthermore, the development trends and the noteworthy issues of local resonance are prospected on account of its advantages in order to provide reference for its development.

Keywords: Ultrasonic-assisted machining; Acoustic system; Local resonance; Non-resonant design theory; Stability

(责编 大漠)