

主轴系统加工条件下的动态特性研究



扫码了解更多

■ 清华大学机械工程系 (北京 100084) 刘成颖 张 洁 刘 巍

摘要: 主轴系统的动态特性对其加工时的稳定性具有决定性的影响。为了有效避免或抑制颤振的发生,对主轴系统加工条件下的动态特性进行研究十分必要。本文研究了加工模态的识别方法和具体流程,在此基础上设计了切削试验,提取不同加工条件下系统的模态参数,进一步研究系统模态参数随加工条件变化的规律并分析其原因。研究表明,主轴转速对主轴系统的动态特性影响较为显著,且不同加工条件下系统的稳定性叶瓣图差异较大。

在实际加工条件下,回转力矩、离心力以及热膨胀等因素使得主轴系统的动力学特性发生明显变化。与静态条件下不同的是,加工条件下系统的动态特性不能通过锤击试验直接获取,虽然能通过测力仪测量系统的输入和通过加速度传感器测量系统的输出,但由于输入信号中含有许多周期性成分,仍然难以辨识出系统的真实模态。在模态提取方

法上,加工模态分析方法是目前常用的一类方法,这种方法不需要知道系统的输入,仅通过系统输出便可提取系统的模态。

常用的加工模态分析方法主要有自然激励技术、基于离散时间数据分析的自回归方法和子空间识别方法等。这些方法的直接应用仅限于系统激励可近似为白噪声的情况,如图1所示。而切削加工中,切削力激励带有很

强的周期性,因此,在实际应用中需要基于以上方法进行改进。Mohanty基于最小二乘复指数方法的修正算法,并利用多种周期性激励叠加白噪声对梁结构进行了试验验证。Zaghbani在Mohantay的基础上设计了切削试验,采用测力仪、加速度传感器等提取加工信号,采用LSCE和ARMA方法提取了不同加工条件下的模态参

片,从而产生制动。

刹车压板在运动过程中,相互接触的球面关节不断的自适应调整刹紧压板的姿态,使得刹车压板始终不会与活塞干涉,即达到了所谓的变形补偿。

当液压油卸荷时,活塞在圆柱螺旋弹簧的作用下,向下运动,直至回到初始位置。同时,刹车压板围绕支点心轴旋转,原本压紧刹车片的一端抬起,放松

刹车片,制动解除,整个过程完成。

3. 结语

本文提出的自适应万向杠杆式锁紧制动装置能够以小功率的液压输入实现大功率的锁紧能力,并补偿锁紧时产生的微量变形。具有节能环保、寿命长和可靠性高的优点。

本装置系统还可以做如下改进:①圆柱螺旋弹簧可以更换成

碟形弹簧。②支点心轴位置可移动,改变杠杆的力臂,放大或缩小锁紧力矩。③密封圈组数可以增加。④刹紧片数量可以增加,形成叠加式的增力结构,保证更好的锁紧可靠性。

参考文献:

[1] 王先逵.机械制造工艺学[M].北京:机械工业出版社,2003.

MW (收稿日期:20180612)

数,发现了模态参数随加工条件的变化规律,并进一步绘制出不同加工条件下的叶瓣图。

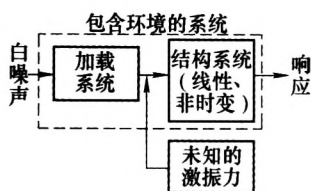


图1 OMA方法工作流程

基于OMA方法可以获取系统的加工模态参数,却无法获取刀尖点的频响函数,原因在于激励的周期性。为了尽量减小切削力的周期性,Özsahin采用Opitz提出的一种特殊加工表面模拟随机表面进行切削试验,获取了刀尖-刀柄跨点频响函数。Özsahin从实际切削试验获取的稳定性叶瓣图入手,反向求取实际加工中刀尖点的频响函数,并证明与静止状态相比,加工条件下刀尖点频响函数和叶瓣图都发生了明显变化。

1.工作模态提取方法

根据NExT方法理论可知,假设系统受白噪声激励, i 点和 j 响应的互相关函数 R_{ij} 与在 j 点施加脉冲激励 i 点的响应类似,即 R_{ij} 与锤击试验中锤击 j 点时, i 点的频响函数类似。基于这种思想,利用系统不同两点处的响应信号,即

可利用OMA方法获取系统模态参数。下面介绍利用LMS Test.Lab的Operational Modal Analysis模块识别主轴系统的模态。

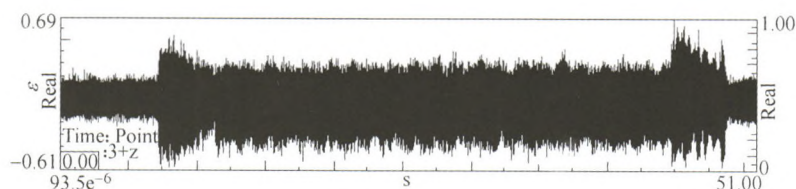
加工模态识别过程主要包括:时域数据提取(Time Data Selection)、互相关函数求取(Op. Data Collection)、稳定性图谱绘制(Op. Time MDOF)以及模态验证(Op. Synthesis)等步骤。

(1)时域数据提取。如图2a所示,在实际加工中,刀具在切入和切出时主轴振动的时域信号出现明显剧增,属于不稳定切削阶段,在进行加工模态提取时,应避免不稳定切削信号,截取如图2b所示的稳定切削信号,同时,所截取的信号段应至少包含

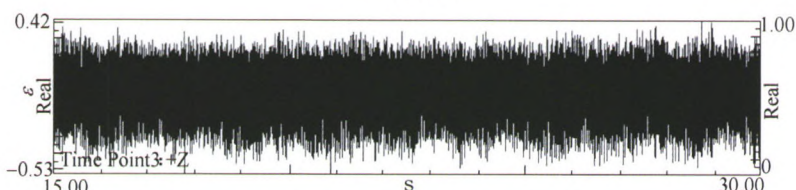
20 000个数据点,从而保证模态提取算法的收敛性。

(2)互相关函数求取。如图3所示,截取所研究方向上不同测点的振动信号后,计算两测点信号之间的互相关函数并保存用于后续的模态识别,计算时,可以选择一个或者多个测点信号作为参考信号,尤其是在不止两个测点时,选择多个测点作为参考信号有利于提高识别准确性。

(3)稳定性图谱绘制。利用互相关函数,进入Stabilization模块绘制稳定性图谱。如图4所示,图谱中横坐标表示频率,右端纵坐标表示模态阶次,图中字母标注的每一个点都表示一个极点,各个字母的含义如表1所示。只有同一频率对应的极点随阶次收敛



(a) 原始信号



(b) 截取后的稳定信号
图2 主轴振动时域信号

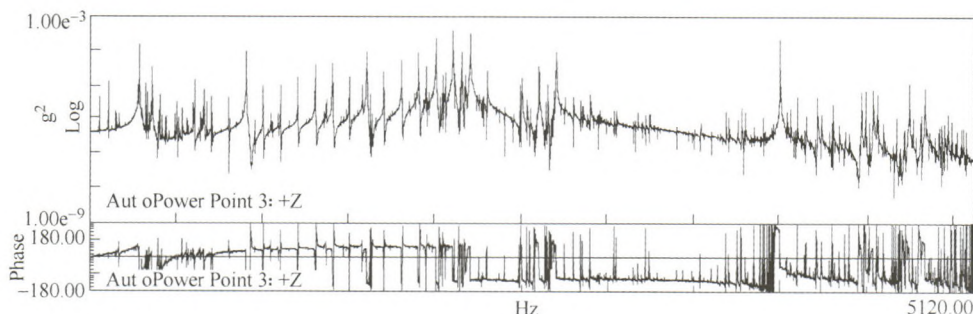


图3 不同测点信号的互相关函数

并稳定，即同一频率对应的多阶极点均为s时，该列极点才可能作为系统稳定的模态参数。

然而，由于切削力激励具有周期性，系统的强迫振动响应会使得OMA方法提取的模态中包含与强迫振动频率相关的虚假模态。通常，模态阻尼为0的模态可被认为是虚假模态。

2.加工模态提取试验设计

如图5所示为加工模态测量试验示意图和现场图，将工件装夹在固定于工作台的Kistler9257B型三向动态测力仪上，监测加工过程中的切削力信号，以确保加工过程的稳定性。两个PCB356A16三向加速度传感器置于主轴上不同高度的位置处，并与LMS数据采集设备相连，用来测量加工过程中在切削力激励下主轴的振动响应。

切削加工试验在台湾友嘉VMP-23A型立式加工中心上进行，其主轴最高转速为10 000r/min，搭配BT40系列刀柄，刀具为两齿硬质合金铣刀，刀具直径12mm，总长75mm，安装悬长为60mm，加工对象为7075-T6系列航空铝块。为探究切削加工过程中切削参数对系统动态特性的影响，设计如表2所示的切削试验表，试验分为3组，分别对应转速、切深和每齿进给的变化。

3.试验研究

针对加工过程的3要素：转速、切深和进给，通过加工模态提取分别探究它们对主轴系统模态参数变化的影响大小及规律。

(1) 转速的影响。如试验组I所示，保持切深0.5mm和每齿进

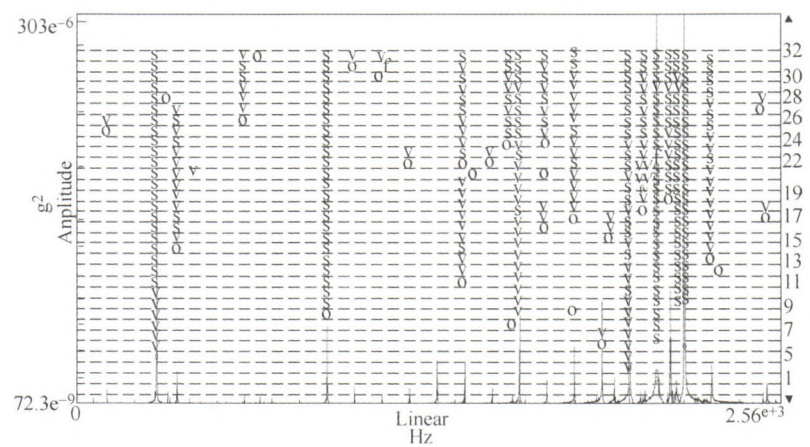


图4 稳定性图谱

表1 稳定性图谱中各字母含义

字母	含义
<i>o</i>	极点不稳定
<i>f</i>	极点在公差范围内稳定
<i>d</i>	极点的频率和阻尼在公差范围内稳定
<i>v</i>	极点向量在公差范围内稳定
<i>s</i>	极点的频率、向量和阻尼均在公差范围内稳定

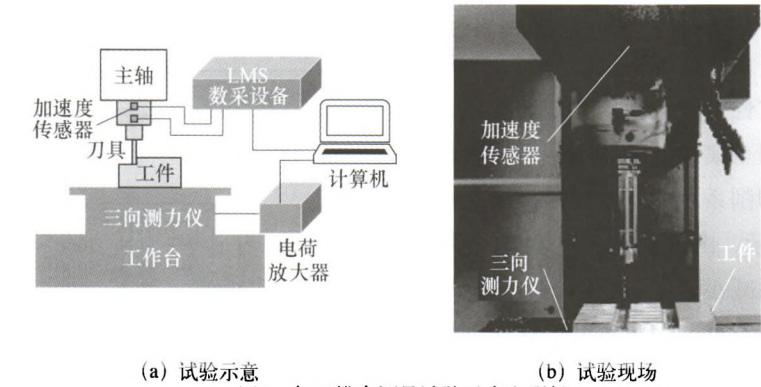


图5 加工模态测量试验示意和现场

表2 试验切削参数表

组号	试验序号	切深/mm	切宽/mm	转速/ (r/min)	每齿进给/mm
I	1	0.5	12	2 000	0.2
	2	0.5	12	3 000	0.2
	3	0.5	12	4 000	0.2
II	1	0.2	12	3 000	0.2
	2	0.3	12	3 000	0.2
	3	0.4	12	3 000	0.2
III	1	0.5	12	3 000	0.08
	2	0.5	12	3 000	0.15
	3	0.5	12	3 000	0.23
	4	0.5	12	3 000	0.30

给0.2mm不变，改变切削加工时主轴的转速，测量主轴振动信号并提取主轴系统加工模态参数，并与空闲条件下的模态参数进行对比，如表3所示。

从表3可以看出，在加工条件下，由于边界条件发生变化，系统模态和阻尼均发生突变，而后随着主轴转速的提升，系统的主模态频率逐渐减小，但减小量不大，维持在5%以内。系统的主模态阻尼在加工条件下骤减，而且随着转速增大开始逐渐增大。分析其原因：一方面由于转速的提高，导致主轴轴承的“软化”效应加剧，从而导致模态频率下降，另一方面在加工塑性材料时，随着切削速度增加，切削力减小，从而导致刀尖点的约束力减小，模态频率随之逐渐减小。

系统模态参数的变化会导致稳定性叶瓣图稳定区域的变化，采用全离散法绘制不同转速特性下切削系统的稳定性叶瓣图如图6所示，由于模态频率随着转速增大而减小，叶瓣整体随着转速增大而左移，因此在某一转速下稳定的切削参数在另一转速下可能发生颤振。为尽量提高材料去除率，选择较大的切削参数，应在不同转速下分别绘制对应的叶瓣图进行切削参数的优化选择。

(2) 切深的影响。如试验组II所示，保持转速3 000r/min和每齿进给0.2mm不变，改变加工时的切深，提取系统模态参数并与空闲状态下进行对比，结果如表4所示。

在切削加工中主轴系统的模态频率和阻尼均随着切深的增大而逐渐增大时，切深主要影响刀

尖点受到的切削力，切削力的经验公式为：

$$F = C_F a_p^{x_F} f^{y_F} \tag{1}$$

式中， F 表示某一方向上的切削力， a_p 表示切深， f 表示每齿进给， C_F 为常系数， x_F 和 y_F 分别表示切深和每齿进给的指数。

因此，切深的增大会增大刀尖点所受到的切削力，从而使得系统刚度提高，模态频率也相应

提高，但切深对模态频率的影响幅度明显小于转速的影响。

(3) 进给的影响。如试验组III所示，保持转速3 000r/min和切深0.5mm不变，改变每齿进给，提取系统模态参数并与空闲状态下进行对比，结果如表5所示。

从表5中可以看出，随着每齿进给的加大，主轴系统的模态频率逐渐提高，模态阻尼也呈增大

表3 不同转速下系统的模态参数

转速/(r/min)	0	2 000	3 000	4 000
模态频率/Hz	2 741	2 732	2 684	2 661
模态阻尼/(%)	2.33	0.04	0.04	0.17
频率变化/(%)	0	0.3	2.1	2.9

表4 不同切深下系统的模态参数

切深/mm	0	0.2	0.3	0.4
模态频率/Hz	2 741	2 683	2 688	2 690
模态阻尼/(%)	2.33	0.03	0.05	0.06
频率变化/(%)	0	2.1	2.0	1.9

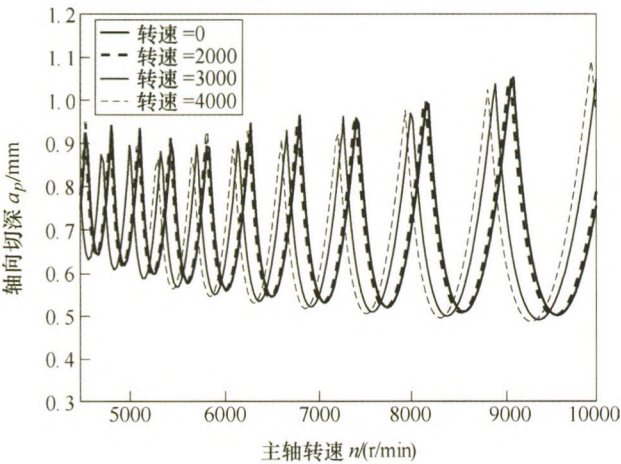


图6 不同转速特性下切削系统的稳定性叶瓣图

表5 不同每齿进给下系统的模态参数

每齿进给/mm	0	0.08	0.15	0.23	0.3
模态频率/Hz	2 741	2 678	2 680	2 692	2 702
模态阻尼/(%)	2.33	0.01	0.01	0.04	0.11
频率变化/(%)	0	2.3	2.2	1.8	1.4

的趋势。由式(1)可知,进给的增大也会增大切削力,从而提高系统边界约束力,使得模态频率有所增大,但增大的幅度较小。

综合比较切削三要素对主轴系统模态的影响,在常用范围内改变切削参数时,转速对系统模态的影响最大,因此,在切削加工中需要重点关注转速的变化带来的系统稳定切削参数范围的改变。

4. 结语

介绍了加工模态分析(OMA)的理论和思想,给出了利用LMS Test.Lab软件进行加工模态识别的具体步骤和关键技术,以及在存在周期性激励条件下真实模态与虚假模态的判定准则。

基于加工模态识别原理设计了切削加工试验,分别从转速、

切深和每齿进给量三个方面探究了加工条件对主轴系统加工模态的影响大小及规律,发现转速对系统动态特性影响最为显著,因此,在切削参数中转速发生变化时,有必要重新判定系统是否会继续稳定。

参考文献:

- [1] James G H, Carne T G, Edmunds R S. STARS Missile - Modal Analysis of First-flight Data Using the Natural Excitation Technique, NExT[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1993, 154 (4) : 749-757.
- [2] Otte D, Yang Q, Sas P. Analysis of multivariate operating response data by means of ARV time series modelling techniques[C]// 1994.
- [3] Gersch W. Estimation of the

autoregressive parameters of a mixed autoregressive moving-average time series[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1970, 15 (5) : 583-588.

- [4] Mohanty P, Rixen D J. Operational modal analysis in the presence of harmonic excitation[J]. Journal of Sound & Vibration, 2004, 270 (1-2) : 93-109.
- [5] Zaghbani I, Songmene V. Estimation of machine-tool dynamic parameters during machining operation through operational modal analysis[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49 (12-13) : 947-957.

MW (收稿日期: 20180424)



江门银特银数控机床有限公司

长条工件加工专家 中切高效精密装备




▲ 精密型材加工中心

600系列: Y轴行程600mm, Z轴行程550mm
X轴行程: 2500、4500、6500、8500、10000、12000、14500mm,
 更长可订制, 主轴、电机等参数可以根据工作要求优化配置
精密型材加工中心动柱式: 适用于桁架机器人手臂、滑台底座以及其他钢、铝长条工件的高效精密加工
精密型材加工中心动龙门式: 适用于宽长工件
精密型材加工中心动梁式: 适用于加工新能源汽车底盘、板形零件

▲ (直线导轨副) 导轨生产成套装备

之一: 数控直线导轨精密复合成型磨床
 (三磨头-同时磨削滚道、侧基准面、底面基准面)
 本机加工产品的精度、表面质量可替代进口装备
之二: 数控线轨平面磨床 (直线导轨适用)
之三: 数控直线导轨钻孔机 (六个主轴, 一次钻二条导轨)
 4米25导轨平均每根加工时间≤6分钟
之四: 数控导轨端面倒角机 (已获得发明专利)

江门银特银数控机床有限公司是专业生产用于长条精密类零件加工的精密型材加工中心(动柱、动龙门、动梁式)和直线导轨生产成套装备的国家高新技术企业。银特银精密型材加工中心针对机床的高刚性、高精度和精度稳定性设计获得了多项专利, 产品在桁架机器人手臂、滑台模组、以及有精度要求的长条工件加工领域, 已经得到了如深圳杨森工业机器人有限公司、南兴装备、京山轻机等对品质有严格要求的各行业领导企业的广泛认同。银特银直线导轨生产成套装备包含了直线导轨关键加工工序的多台数控机床, 其中数控直线导轨精密复合成型磨床采用最新的三磨头一次成型磨削两侧滚道与侧基准面、底面基准面, 在直线导轨零件一致性、互换性上突破, 可替代进口。

专利号: ZL 2016 1 0076981.7 ZL 2015 2 0956186.8

地址: 广东省江门市江海区礼乐镇乐祥东路184号 电话: 0750-3411819 传真: 0750-3411820 邮箱: int_in@163.com 网址: http://www.intin.cn

◆广告 查询编号: 0068