

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 3 月 19 日 (19.03.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/051818 A1

(51) 国际专利分类号:
B23Q 17/09 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2018/105389

(22) 国际申请日: 2018 年 9 月 13 日 (13.09.2018)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: 大连理工大学 (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。

(72) 发明人: 孙玉文 (SUN, Yuwen); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 姜尚磊 (JIANG, Shanglei); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,

CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第 21 条 (3))。

(54) Title: CROSS-AXIS/CROSS-POINT MODAL TEST AND PARAMETER IDENTIFICATION METHOD FOR CUTTING STABILITY PREDICTION

(54) 发明名称: 一种面向切削稳定性预报的跨轴跨点模态测试与参数辨识方法

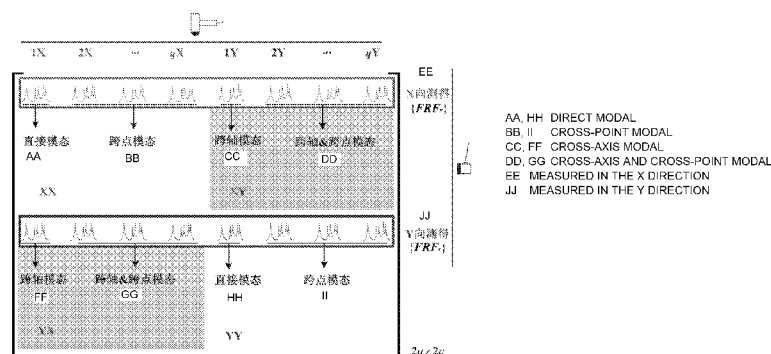


图 2

(57) Abstract: A cross-axis/cross-point modal test and parameter identification method for cutting stability prediction, comprising: firstly mounting a three-axis acceleration sensor on a tool tip, performing, by means of a hammer, cross-axis/cross-point modal hammering in two horizontally orthogonal directions at a plurality of points preset on the tool axis, grouping the measured transfer functions according to different measuring axes, and performing kinetic parameter identification on each group of transfer functions; then dividing, at a given axial depth of cut, the engagement portion between a tool and a workpiece into a plurality of cutting layer units along the tool axis, and allocating, by means of linear interpolation and for each layer unit, the modal formation values identified at the points above, and assembling, in combination with other kinematic parameters, a parameter matrix matching the kinematic model; finally, obtaining a kinetic parameter matrix including the cross-axis/cross-point modal coupling effect. In the method, the acceleration sensor only needs to be installed once. The method is used to improve the accuracy of the existing method for cutting stability prediction.

(57) 摘要：一种面向切削稳定性预报的跨轴跨点模态测试与参数辨识方法，首先将一个三轴加速度传感器安装于刀尖，通过力锤在刀轴上预设的多个节点处分别沿两个水平正交的方向进行跨轴跨点模态敲击，将测量的传递函数按照不同测轴进行分组，对每组传递函数分别进行动力学参数辨识；再将给定轴向切深下刀具与工件之间的啮合部分沿刀轴划分成多个切削层微元，对每一层微元通过线性插值分配在上述节点处辨识的模态阵型值，并连同其它动力学参数进行与动力学模型相匹配的参数矩阵拼装处理；最后可获得包含跨轴跨点模态耦合效应的动力学参数矩阵。该方法中加速度传感器只需一次安装。该方法用于提升现有切削稳定性预报方法的精度。

一种面向切削稳定性预报的跨轴跨点模态测试与参数辨识方法

技术领域

本发明涉及一种面向切削稳定性预报的模态测试与参数辨识方法，具体涉及一种面向切削稳定性预报的跨轴跨点模态测试与参数辨识方法。

背景技术

对切削过程进行稳定性预报有利于改善零件加工质量、提高材料去除率、减缓刀具磨损，还能避免由于剧烈振动损坏机床主轴，现已逐渐成为自动化、智能化加工的一个重要考量。目前，对切削过程进行稳定性预报通常采用绘制稳定性叶瓣图的方法来实现，即：通过计算得出的稳定性叶瓣将加工参数域划分成稳定、颤振和临界稳定的三类不同组合。在此基础上可展开进一步的颤振抑制方案设计和无颤振加工参数优化。

这类方法需要建立延时的切削动力学方程，涉及的动力学参数主要有模态质量矩阵、模态阻尼矩阵、模态刚度矩阵和模态阵型矩阵。实现这类方法的一个核心步骤在于如何展开相关模态分析从而准确获得这些动力学参数矩阵，这个步骤直接决定了稳定性叶瓣图的预报精度。通过检索相关文献与专利，可以发现存在的面向切削稳定性预报的模态分析方法主要有基于有限元分析的数值仿真方法和基于力锤敲击的实验测试方法。基于有限元分析的数值仿真方法一般需要对结构进行精密的网格划分，这带来了计算效率方面的损失；同时需要准确地建立、设置和输入待测结构的几何模型、边界条件和材料参数，这使得计算精度也难以保障。

另一方面，基于力锤敲击的实验测试方法，由于具有建模简便、计算精度高和数据处理快等优点，得到了较为广泛的研究与应用。这类方法的相关文献与专利主要集中在刀尖点动力学参数的获取上。文献 1 “B.P. Mann, K.A. Young,

T.L. Schmitz, D.N. Dilley, Simultaneous Stability and Surface Location Error Predictions in Milling, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 127 (2005) 446.”给出了一种铣削稳定性预报方法,如图 1(a)所示,该方法在刀尖点处(节点 1)建立系统阵型归一的动力学方程,通过力锤分别敲击刀具的1X和1Y方向,并保持单轴加速度传感器的响应测量方向与敲击方向始终一致,需要两次安装单轴加速度传感器,可获得系统在刀尖点处相互独立的系统动力学参数。

文献 2“X.J. Zhang, C.H. Xiong, Y. Ding, M.J. Feng, Y.L. Xiong, Milling stability analysis with simultaneously considering the structural mode coupling effect and regenerative effect, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 53 (2012) 127–140.”考虑了刀尖点动力学参数的模态耦合效应,其特点是,在文献 1 的敲击方案基础上补充了单轴加速度传感器的响应测量方向与力锤敲击方向相垂直的敲击实验,依然需要两次安装单轴加速度传感器,该方法实际上考虑了切削系统在刀尖点处跨轴耦合的动力学特性。申请专利号为201310409076.5的发明专利公开了一种考虑刀尖点处多模态耦合的稳定性预报方法,敲击方案与文献 1 相同,但分别辨识了两个独立方向(X向和Y向)的多阶模态,对处于同一模态阶的动力学参数进行匹配并绘制出相应的稳定性叶瓣,将不同模态阶所确定的叶瓣下缘连接而成的包络线作为最终的稳定性叶瓣。上述文献与专利的共同特点是均假设切削系统的动力学行为发生在刀尖点处,即忽略了切削系统沿刀具轴向变化的动力学特性,这在较大的轴向切削条件下,往往不能满足系统动力学模型的精度要求,从而导致所预报的稳定性叶瓣图在某些转速范围内存在一定程度上的失真。文献 3“C. Eksioglu, Z.M. Kilic, Y. Altintas, Discrete-Time Prediction of Chatter Stability, Cutting Forces, and Surface Location Errors in Flexible Milling Systems, *Journal of Manufacturing Science and*

Engineering. 134 (2012) 61006.”给出了一个刀具与工件多点接触的动力学模型，其特点为：如图1（a）所示，加速度传感器安装于刀尖点，测量方向保证始终与敲击方向平行，但进行力锤敲击不仅在刀尖点处（节点1）执行，还要依次沿刀具轴线敲击多个节点（如节点2，…，节点 q ），尽管该方法考虑了切削系统沿刀轴跨点耦合的动力学特性，但却忽略了系统跨轴模态耦合的影响。目前相关文献与专利均未同时考虑切削系统跨轴耦合和跨点耦合的动力学特性；且可预见，同步考虑跨轴和跨点耦合的敲击测试还涉及新的系统传递函数处理与动力学参数辨识的问题。

发明内容

针对现有技术的不足，本发明提供了一种面向切削稳定性预报的跨轴跨点模态测试与参数辨识方法，以获得切削系统同时考虑跨轴耦合和跨点耦合的动力学参数。如图1(a)和(b)所示，该方法首先将一个微型三轴加速度传感器安装于刀尖，通过力锤在刀轴上预设的多个节点处分别沿两个水平正交的方向进行跨轴和跨点的模态敲击实验。将测量的传递函数按照不同测轴进行分组，对每组传递函数分别进行动力学参数（模态质量、阻尼、刚度和阵型）辨识。再将给定轴向切深下刀具与工件之间的啮合部分沿刀轴划分成多个切削层微元，对每一层微元通过线性插值分配在上述节点处辨识的模态阵型值，并连同其它动力学参数进行与动力学模型相匹配的参数矩阵拼装处理。最后可获得包含跨轴耦合和跨点耦合的动力学参数矩阵。以侧铣过程为例，采用的具体步骤为：

步骤①、将铣刀安装于刀柄中，刀柄装夹到机床主轴上，建立刀具坐标系：坐标原点为刀具自由端的中心，X轴为刀具的进给方向，Y轴为待加工表面的垂直方向（顺铣垂直表面向外，逆铣垂直表面向里），Z轴为远离刀具自由端的刀具轴线方向。

步骤②、从刀具自由端开始按一定间距沿刀具轴线标记 q 个待敲击节点，将一个微型三轴加速度传感器安装于刀尖节点，然后在每个节点处分别从 X 和 Y 两个水平正交的方向上进行力锤敲击，测得主轴-刀柄-铣刀系统在每个节点处所有传递函数。

步骤③、在步骤②所测量的传递函数中，剔除所有由加速度传感器 Z 轴测得的传递函数，然后将剩余的传递函数根据振动响应是由加速度传感器的 X 轴或 Y 轴测量划分成不同的两组传递函数集合。分别标记为 $\{FRF_x\}$ 和 $\{FRF_y\}$ 。

步骤④、对步骤③得到的传递函数集合 $\{FRF_x\}$ 和 $\{FRF_y\}$ 分别进行动力学参数辨识，基于 $\{FRF_x\}$ 辨识的前 m 阶动力学参数结果：自然频率为 $\omega_{nx,1}, \omega_{nx,2}, \dots, \omega_{nx,m}$ ；阻尼比为 $\xi_{x,1}, \xi_{x,2}, \dots, \xi_{x,m}$ ；阵型矩阵为 $\Psi_x = [\varphi_{x,1} \varphi_{x,2} \dots \varphi_{x,m}]_{2q \times m}$ ；其中 $\varphi_{x,j} (j=1,2,\dots,m)$ 的维数为 $2q \times 1$ ，是主振动方向为 X 向对应每一敲击节点的第 j 阶阵型向量。基于 $\{FRF_y\}$ 辨识的前 m 阶动力学参数结果：自然频率为 $\omega_{ny,1}, \omega_{ny,2}, \dots, \omega_{ny,m}$ ；阻尼比为 $\xi_{y,1}, \xi_{y,2}, \dots, \xi_{y,m}$ ；阵型矩阵为 $\Psi_y = [\varphi_{y,1} \varphi_{y,2} \dots \varphi_{y,m}]_{2q \times m}$ ；其中 $\varphi_{y,j} (j=1,2,\dots,m)$ 的维数为 $2q \times 1$ ，是主振动方向为 Y 向对应每一敲击节点的第 j 阶阵型向量。

步骤⑤、沿刀轴方向将给定轴向切深 a_p 下刀具与工件之间的啮合部分划分成 p 个切削层微元，根据每一层微元的中心与上述敲击节点的相对位置通过线性插值对这些切削层微元分配由步骤④辨识的模态阵型值。

步骤⑥、将不同类别动力学参数按照不同模态阶次拼装成与系统动力学模型相匹配的模态质量矩阵、模态阻尼矩阵、模态刚度矩阵和模态阵型矩阵。拼装后得到：

模态质量矩阵为 $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix}_{2m \times 2m};$

模态阻尼矩阵为 $\mathbf{C} =$

$$\begin{bmatrix} 2\xi_{x,1}\omega_{nx,1} & & & & & 0 \\ & 2\xi_{y,1}\omega_{ny,1} & & & & \\ & & 2\xi_{x,2}\omega_{nx,2} & & & \\ & & & 2\xi_{y,2}\omega_{ny,2} & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & 2\xi_{x,m}\omega_{nx,m} \\ 0 & & & & & & 2\xi_{y,m}\omega_{ny,m} \end{bmatrix}_{2m \times 2m};$$

模态刚度矩阵为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \omega_{nx,1}^2 & & & & & 0 \\ & \omega_{ny,1}^2 & & & & \\ & & \omega_{nx,2}^2 & & & \\ & & & \omega_{ny,2}^2 & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \omega_{nx,m}^2 \\ 0 & & & & & & \omega_{ny,m}^2 \end{bmatrix}_{2m \times 2m};$$

模态阵型矩阵为: $\mathbf{\Psi} = [\tilde{\varphi}_{x,1} \quad \tilde{\varphi}_{y,1} \quad \tilde{\varphi}_{x,2} \quad \tilde{\varphi}_{y,2} \quad \cdots \quad \tilde{\varphi}_{x,m} \quad \tilde{\varphi}_{y,m}]_{2p \times 2m},$

其中: $\tilde{\varphi}_{d,j} (j=1,2, \cdots, m; d=x \text{ 或 } y)$ 的维数为 $2p \times 1$, 是主振动方向为 X 向或 Y 向对应每一切削层的第 j 阶阵型向量。

本发明的有益效果: 该方法首先将一个三轴加速度传感器安装于刀尖, 通过力锤在刀轴上预设的多个节点处分别沿两个水平正交的方向进行跨轴跨点模态敲击, 将测量的传递函数按照不同测轴进行分组, 对每组传递函数分别进行动力学参数 (模态质量、阻尼、刚度和阵型) 辨识。再将给定轴向切深下刀具

与工件之间的啮合部分沿刀轴划分成多个切削层微元，对每一层微元通过线性插值分配在上述节点处辨识的模态阵型值，并连同其它动力学参数进行与动力学模型相匹配的参数矩阵拼装处理。最后可获得包含跨轴跨点模态耦合效应的动力学参数矩阵。该方法可显著提高现有切削稳定性预报方法的精度，获得更加准确的稳定性叶瓣图，且加速度传感器只需一次安装。

附图说明

图 1 是本发明的跨轴跨点模态测试示意图，(a)代表力锤沿 X 方向敲击；(b)代表力锤沿 Y 方向敲击。

图 2 是本发明的根据三轴加速度传感器 X 轴和 Y 轴响应测量划分的工艺系统传递函数集合。

具体实施方式

下面结合附图和技术方案，详细说明本发明的具体实施。如图 1(a)和 1(b)所示，该方法首先将一个微型三轴加速度传感器安装于刀尖，通过力锤在刀轴上预设的多个节点处分别沿两个水平正交的方向（X 向和 Y 向）进行跨轴和跨点的模态敲击实验。将测量的传递函数按照不同测轴进行分组，对每组传递函数分别进行动力学参数（模态质量、阻尼、刚度和阵型）辨识。再将给定轴向切深下刀具与工件之间的啮合部分沿刀轴划分成多个切削层微元，对每一层微元通过线性插值分配在上述节点处辨识的模态阵型值，并连同其它动力学参数进行与动力学模型相匹配的参数矩阵拼装处理。最后可获得包含跨轴耦合和跨点耦合的动力学参数矩阵。以侧铣过程为例，采用的具体步骤为：

步骤①、将铣刀安装于刀柄中，刀柄装夹到机床主轴上，建立刀具坐标系：坐标原点为刀具自由端的中心，X 轴为刀具的进给方向，Y 轴为待加工表面的垂直方向（顺铣垂直表面向外，逆铣垂直表面向里），Z 轴为远离刀具自由端的

刀具轴线方向。

步骤②、从刀具自由端开始按一定间距沿刀具轴线标记 q 个待敲击节点，如图 1 所示，将一个微型三轴加速度传感器安装于刀尖节点，然后在每个节点处分别从 X 和 Y 两个水平正交的方向上进行力锤敲击，测得主轴-刀柄-铣刀系统在每个节点处所有传递函数。

步骤③、在步骤②所测量的传递函数中，剔除所有由加速度传感器 Z 轴测得的传递函数，然后将剩余的传递函数根据振动响应是由加速度传感器的 X 轴或 Y 轴测量划分成不同的两组传递函数集合，如图 2 所示，分别标记为 $\{FRF_x\}$ 和 $\{FRF_y\}$ 。

步骤④、对步骤③得到的传递函数集合 $\{FRF_x\}$ 和 $\{FRF_y\}$ 分别进行动力学参数辨识，基于 $\{FRF_x\}$ 辨识的前 m 阶动力学参数结果：自然频率为 $\omega_{nx,1}, \omega_{nx,2}, \dots, \omega_{nx,m}$ ；阻尼比为 $\xi_{x,1}, \xi_{x,2}, \dots, \xi_{x,m}$ ；阵型矩阵为 $\Psi_x = [\varphi_{x,1} \varphi_{x,2} \dots \varphi_{x,m}]_{2q \times m}$ ；其中 $\varphi_{x,j} (j=1,2, \dots, m)$ 的维数为 $2q \times 1$ ，是主振动方向为 X 向对应每一敲击节点的第 j 阶阵型向量。基于 $\{FRF_y\}$ 辨识的前 m 阶动力学参数结果：自然频率为 $\omega_{ny,1}, \omega_{ny,2}, \dots, \omega_{ny,m}$ ；阻尼比为 $\xi_{y,1}, \xi_{y,2}, \dots, \xi_{y,m}$ ；阵型矩阵为 $\Psi_y = [\varphi_{y,1} \varphi_{y,2} \dots \varphi_{y,m}]_{2q \times m}$ ；其中 $\varphi_{y,j} (j=1,2, \dots, m)$ 的维数为 $2q \times 1$ ，是主振动方向为 Y 向对应每一敲击节点的第 j 阶阵型向量。 Ψ_x 和 Ψ_y 可分别表达为

$$\Psi_x = \begin{bmatrix} u_{x,x,1,1} & u_{x,x,1,2} & \cdots & u_{x,x,1,m} \\ u_{x,y,1,1} & u_{x,y,1,2} & \cdots & u_{x,y,1,m} \\ u_{x,x,2,1} & u_{x,x,2,2} & \cdots & u_{x,x,2,m} \\ u_{x,y,2,1} & u_{x,y,2,2} & \cdots & u_{x,y,2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{x,x,q,1} & u_{x,x,q,2} & \cdots & u_{x,x,q,m} \\ u_{x,y,q,1} & u_{x,y,q,2} & \cdots & u_{x,y,q,m} \end{bmatrix}_{2q \times m} ;$$

$$\Psi_y = \begin{bmatrix} u_{y,x,1,1} & u_{y,x,1,2} & \cdots & u_{y,x,1,m} \\ u_{y,y,1,1} & u_{y,y,1,2} & \cdots & u_{y,y,1,m} \\ u_{y,x,2,1} & u_{y,x,2,2} & \cdots & u_{y,x,2,m} \\ u_{y,y,2,1} & u_{y,y,2,2} & \cdots & u_{y,y,2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{y,x,q,1} & u_{y,x,q,2} & \cdots & u_{y,x,q,m} \\ u_{y,y,q,1} & u_{y,y,q,2} & \cdots & u_{y,y,q,m} \end{bmatrix}_{2q \times m}$$

其中: $u_{d,c,\alpha,\beta}$, ($d = x$ 或 y , $c = x$ 或 y , $\alpha = 1, 2, \dots, q$, $\beta = 1, 2, \dots, m$)代表主振动方向为 d 向第 α 个敲击节点第 β 阶模态 c 方向的阵型位移。

步骤⑤、沿刀轴方向将给定轴向切深 a_p 下刀具与工件之间的啮合部分划分成 p 个切削层微元, 根据每一层微元的中心与上述敲击节点的相对位置通过线性插值对这些切削层微元分配由步骤④辨识的模态阵型位移值。

步骤⑥、将不同类别动力学参数按照不同模态阶次拼装成与系统动力学模型相匹配的模态质量矩阵、模态阻尼矩阵、模态刚度矩阵和模态阵型矩阵。拼装后得到:

$$\text{模态质量矩阵为 } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix}_{2m \times 2m};$$

模态阻尼矩阵为 $\mathbf{C} =$

$$\begin{bmatrix} 2\xi_{x,1}\omega_{nx,1} & & & & & 0 \\ & 2\xi_{y,1}\omega_{ny,1} & & & & \\ & & 2\xi_{x,2}\omega_{nx,2} & & & \\ & & & 2\xi_{y,2}\omega_{ny,2} & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & 2\xi_{x,m}\omega_{nx,m} \\ 0 & & & & & & 2\xi_{y,m}\omega_{ny,m} \end{bmatrix}_{2m \times 2m};$$

模态刚度矩阵为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \omega_{nx,1}^2 & & & & & 0 \\ & \omega_{ny,1}^2 & & & & \\ & & \omega_{nx,2}^2 & & & \\ & & & \omega_{ny,2}^2 & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \omega_{nx,m}^2 \\ 0 & & & & & & \omega_{ny,m}^2 \end{bmatrix}_{2m \times 2m};$$

模态阵型矩阵为

$$\mathbf{\Psi} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{x,x,1,1} & \tilde{u}_{y,x,1,1} & \tilde{u}_{x,x,1,2} & \tilde{u}_{y,x,1,2} & \cdots & \tilde{u}_{x,x,1,m} & \tilde{u}_{y,x,1,m} \\ \tilde{u}_{x,y,1,1} & \tilde{u}_{y,x,1,1} & \tilde{u}_{x,y,1,2} & \tilde{u}_{y,y,1,2} & \cdots & \tilde{u}_{x,y,1,m} & \tilde{u}_{y,y,1,m} \\ \tilde{u}_{x,x,2,1} & \tilde{u}_{y,x,2,1} & \tilde{u}_{x,x,2,2} & \tilde{u}_{y,x,2,2} & \cdots & \tilde{u}_{x,x,2,m} & \tilde{u}_{y,x,2,m} \\ \tilde{u}_{x,y,2,1} & \tilde{u}_{y,y,2,1} & \tilde{u}_{x,y,2,2} & \tilde{u}_{y,y,2,2} & \cdots & \tilde{u}_{x,y,2,m} & \tilde{u}_{y,y,2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{u}_{x,x,p,1} & \tilde{u}_{y,x,p,1} & \tilde{u}_{x,x,p,2} & \tilde{u}_{y,x,p,2} & \cdots & \tilde{u}_{x,x,p,m} & \tilde{u}_{y,x,p,m} \\ \tilde{u}_{x,y,p,1} & \tilde{u}_{y,y,p,1} & \tilde{u}_{x,y,p,2} & \tilde{u}_{y,y,p,2} & \cdots & \tilde{u}_{x,y,p,m} & \tilde{u}_{y,y,p,m} \end{bmatrix}_{2p \times 2m}$$

其中： $\tilde{u}_{\tilde{d},\tilde{c},\tilde{\alpha},\tilde{\beta}}$, ($\tilde{d} = x$ 或 y , $\tilde{c} = x$ 或 y , $\tilde{\alpha} = 1, 2, \dots, p$, $\tilde{\beta} = 1, 2, \dots, m$)代表主振动方向为 $\tilde{d}$ 向第 $\tilde{\alpha}$ 个切削层第 $\tilde{\beta}$ 阶模态 $\tilde{c}$ 方向的阵型位移。

权利要求书

1. 一种面向切削稳定性预报的跨轴跨点模态测试与参数辨识方法，其特征在于，步骤如下：

步骤①、将铣刀安装于刀柄中，刀柄装夹到机床主轴上，建立刀具坐标系：坐标原点为刀具自由端的中心，X 轴为刀具的进给方向，Y 轴为待加工表面的垂直方向，顺铣垂直表面向外，逆铣垂直表面向里，Z 轴为远离刀具自由端的刀具轴线方向；

步骤②、从刀具自由端开始按一定间距沿刀具轴线标记 q 个待敲击节点，将一个微型三轴加速度传感器安装于刀尖节点，然后在每个待敲击节点处分别从 X 和 Y 两个水平正交的方向上进行力锤敲击，测得主轴-刀柄-铣刀系统在每个待敲击节点处所有传递函数；

步骤③、在步骤②所测量的传递函数中，剔除所有由加速度传感器 Z 轴测得的传递函数，然后将剩余的传递函数根据振动响应是由加速度传感器的 X 轴或 Y 轴测量划分成不同的两组传递函数集合，分别标记为 $\{FRF_x\}$ 和 $\{FRF_y\}$ ；

步骤④、对步骤③得到的传递函数集合 $\{FRF_x\}$ 和 $\{FRF_y\}$ 分别进行动力学参数辨识，基于 $\{FRF_x\}$ 辨识的前 m 阶动力学参数结果：自然频率为 $\omega_{nx,1}, \omega_{nx,2}, \dots, \omega_{nx,m}$ ；阻尼比为 $\xi_{x,1}, \xi_{x,2}, \dots, \xi_{x,m}$ ；阵型矩阵为 $\Psi_x = [\varphi_{x,1} \varphi_{x,2} \dots \varphi_{x,m}]_{2q \times m}$ ；其中 $\varphi_{x,j}, j=1,2,\dots,m$ 的维数为 $2q \times 1$ ，是主振动方向为 X 向对应每一敲击节点的第 j 阶阵型向量；基于 $\{FRF_y\}$ 辨识的前 m 阶动力学参数结果：自然频率为 $\omega_{ny,1}, \omega_{ny,2}, \dots, \omega_{ny,m}$ ；阻尼比为 $\xi_{y,1}, \xi_{y,2}, \dots, \xi_{y,m}$ ；阵型矩阵为 $\Psi_y = [\varphi_{y,1} \varphi_{y,2} \dots \varphi_{y,m}]_{2q \times m}$ ；其中 $\varphi_{y,j}, j=1,2,\dots,m$ 的维数为 $2q \times 1$ ，是主振动方向为 Y 向对应每一敲击节点的第 j 阶阵型向量；

步骤⑤、沿刀轴方向将给定轴向切深 a_p 下刀具与工件之间的啮合部分划分成 p 个切削层微元，根据每一层微元的中心与上述敲击节点的相对位置通过线

性插值对这些切削层微元分配由步骤④辨识的模态阵型值；

步骤⑥、将不同类别动力学参数按照不同模态阶次拼装成与系统动力学模型相匹配的模态质量矩阵、模态阻尼矩阵、模态刚度矩阵和模态阵型矩阵；拼装后得到：

$$\text{模态质量矩阵为 } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix}_{2m \times 2m};$$

模态阻尼矩阵为 $\mathbf{C} =$

$$\begin{bmatrix} 2\xi_{x,1}\omega_{nx,1} & & & & & 0 \\ & 2\xi_{y,1}\omega_{ny,1} & & & & \\ & & 2\xi_{x,2}\omega_{nx,2} & & & \\ & & & 2\xi_{y,2}\omega_{ny,2} & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & 2\xi_{x,m}\omega_{nx,m} \\ & 0 & & & & & 2\xi_{y,m}\omega_{ny,m} \end{bmatrix}_{2m \times 2m};$$

$$\text{模态刚度矩阵为 } \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \omega_{nx,1}^2 & & & & & 0 \\ & \omega_{ny,1}^2 & & & & \\ & & \omega_{nx,2}^2 & & & \\ & & & \omega_{ny,2}^2 & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \omega_{nx,m}^2 \\ 0 & & & & & & \omega_{ny,m}^2 \end{bmatrix}_{2m \times 2m};$$

模态阵型矩阵： $\mathbf{\Psi} = [\tilde{\varphi}_{x,1} \quad \tilde{\varphi}_{y,1} \quad \tilde{\varphi}_{x,2} \quad \tilde{\varphi}_{y,2} \quad \cdots \quad \tilde{\varphi}_{x,m} \quad \tilde{\varphi}_{y,m}]_{2p \times 2m}$ ，

其中： $\tilde{\varphi}_{d,j}$ 的维数为 $2p \times 1$ ，是主振动方向为 X 向或 Y 向对应每一切削层的第 j 阶阵型向量，其中 $j=1,2,\cdots,m; d=x$ 或 y 。

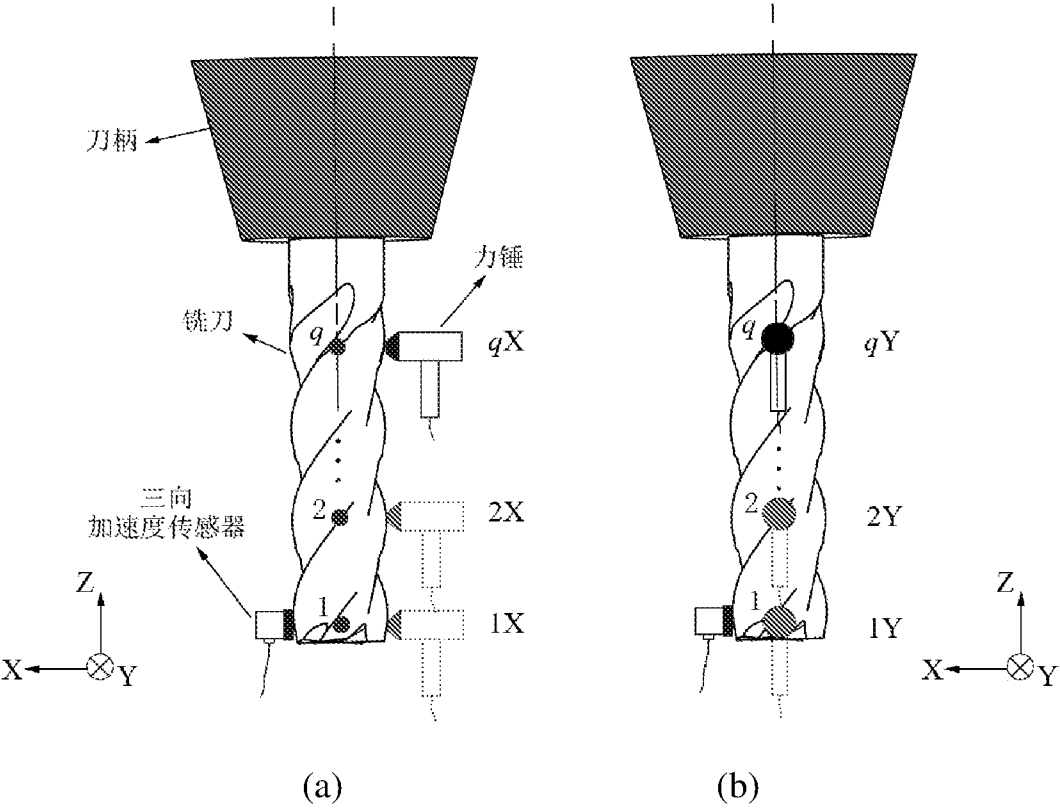


图 1

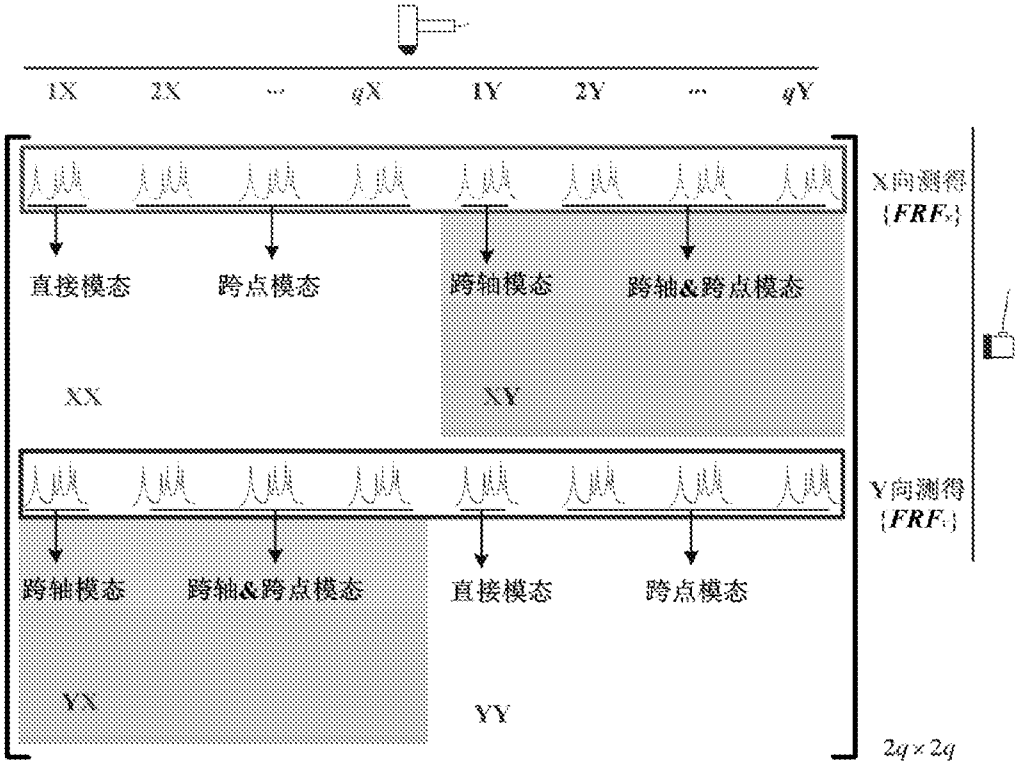


图 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/105389

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B23Q 17/09(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B23Q; G06F; G05B; G06Q

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

VEN; CNABS; CNTXT; CNKI: 孙玉文, 大连理工大学, 切削, 稳定, 刀, 铣刀, 模态, 加速度传感器, 跨轴, 跨点, 微元, 切削层, 敲击, cutter, acceleration, stability, sensor, mill, matrix, instrument

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
E	CN 108958167 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 07 December 2018 (2018-12-07) claim 1	1
A	CN 107423502 A (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY) 01 December 2017 (2017-12-01) description, paragraphs [0007]-[0026], and figures 1-4	1
A	CN 102554326 A (SHANGHAI JIAOTONG UNIVERSITY) 11 July 2012 (2012-07-11) entire document	1
A	CN 107457609 A (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY) 12 December 2017 (2017-12-12) entire document	1
A	CN 103559550 A (NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY) 05 February 2014 (2014-02-05) entire document	1

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

13 June 2019

Date of mailing of the international search report

21 June 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

**China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)**
**No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
 100088**
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2018/105389

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	108958167	A	07 December 2018	None			
CN	107423502	A	01 December 2017	None			
CN	102554326	A	11 July 2012	CN	102554326	B	26 February 2014
CN	107457609	A	12 December 2017	None			
CN	103559550	A	05 February 2014	CN	103559550	B	05 October 2016

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/105389

A. 主题的分类 B23Q 17/09 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类		
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) B23Q; G06F; G05B; G06Q 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) VEN; CNABS; CNTXT; CNKI: 孙玉文, 大连理工大学, 切削, 稳定, 刀, 铣刀, 模态, 加速度传感器, 跨轴, 跨点, 微元, 切削层, 敲击, cutter, acceleration, stability, sensor, mill, matrix, instrument		
C. 相关文件		
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
E	CN 108958167 A (大连理工大学) 2018年 12月 7日 (2018 - 12 - 07) 权利要求1	1
A	CN 107423502 A (西安交通大学) 2017年 12月 1日 (2017 - 12 - 01) 说明书第7-26段, 附图1-4	1
A	CN 102554326 A (上海交通大学) 2012年 7月 11日 (2012 - 07 - 11) 全文	1
A	CN 107457609 A (西安交通大学) 2017年 12月 12日 (2017 - 12 - 12) 全文	1
A	CN 103559550 A (西北工业大学) 2014年 2月 5日 (2014 - 02 - 05) 全文	1
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。		
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件		
国际检索实际完成的日期		国际检索报告邮寄日期
2019年 6月 13日		2019年 6月 21日
ISA/CN的名称和邮寄地址		受权官员
中国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		王蕾 电话号码 62085734

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/105389

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	108958167	A	2018年 12月 7日	无	
CN	107423502	A	2017年 12月 1日	无	
CN	102554326	A	2012年 7月 11日	CN 102554326	B 2014年 2月 26日
CN	107457609	A	2017年 12月 12日	无	
CN	103559550	A	2014年 2月 5日	CN 103559550	B 2016年 10月 5日