

基于面压不均匀分布的结合部动力学建模研究^{*}

李世超, 高宏力

(西南交通大学机械工程学院 成都, 610031)

摘要 提出了一种基于结合面压力不均匀分布的螺纹固定结合部动力学建模方法。首先,利用 Ansys 对施加预紧力的装配体整机进行静力学分析,提取结合面处的节点、单元信息及压力分布,基于节点间距离最短的原则对上、下结合面中的节点进行匹配,在匹配好的两节点间建立 Matrix27 刚度和阻尼单元,以此来描述结合部的动力学特性;其次,基于结合面压力分布及 Yoshimura 法,求解 Matrix27 单元中的刚度系数和阻尼系数;最后,将结合部与零部件有限元模型综合成整机有限元模型。对比前四阶理论模态与试验模态可知:理论模态振型与试验模态振型相似且一一对应,理论固有频率与试验固有频率间的误差在 0.7%~7.2% 范围内,从而验证了该建模方法的有效性。

关键词 螺纹固定结合部; 结合面; 压力分布; 动力学建模; 模态分析

中图分类号 TH113.1; O327

引言

机床动态特性对其加工精度、性能与寿命存在重要影响,在设计阶段建立高精度整机动力学模型是评价、优化其动态特性的关键手段。机床是由众多零部件通过各类结合部装配在一起的组合体,其中螺纹固定结合部最为常见,指的是两零部件通过螺纹紧固件连接成整体时其相互接触的部分。研究表明^[1-3],结合部刚度占整机刚度的 60%~80%,整机阻尼的 90% 以上源自结合部。因此,建立合理的结合部动力学模型将有助于提高机床整机动力学建模的精度。然而,结合部的形状、材料属性、结合面粗糙度及所受的外部载荷对其传力特性影响显著,如何建立能准确描述结合部传力特性的动力学模型既是机床整机动力学建模研究的热点,也是当前的一个技术难题。

国内外学者开展了大量的结合部动力学建模研究。文献[4]提出了基于统计分析的分形模型,该模型将结合面上表面形貌的高度分布看成随机变量,结合 Hertz 接触理论和统计学相关知识获得了接触面压力与变形之间的关系。Yoshimura 等^[5]将结合面等效成一个节点,建立了结合面间六自由度的等效动力学模型,并计算了每个自由

度的等效刚度与阻尼。文献[6-9]通过在结合面间建立一系列弹簧阻尼单元来描述结合部的动态特性,单元的刚度与阻尼可通过解析计算和参数辨识的方法获得,由于该方法简单实用,因此较为广泛被采纳。张杰等^[10]提出了用于建立理想结合面动力学模型的有限元单元,并推导出了单元的刚度矩阵和阻尼矩阵,矩阵中的参数是通过参数辨识的方法获得。Tian 等^[11]将结合面的动态特性等效成一层虚拟材料,该虚拟材料与组成结合部的零部件固定连接,基于分形理论和 Hertz 接触理论推导出虚拟材料的弹性模量、密度及泊松比的解析式。Mao 等^[12]提出了一种螺纹固定结合部建模方法,该方法在结合部中每个螺纹紧固件位置处建立一个形状与结合部吻合的 8 节点 24 自由度的有限单元,该单元的刚度矩阵及阻尼矩阵中的参数均通过参数辨识的方法获得。

以上研究在很大程度上解决了螺纹固定结合部动力学建模问题,但忽略了结合面压力不均匀分布对结合部建模精度的影响。由于螺纹固定结合部在螺纹紧固件的预紧力作用下会出现结合面压力分布不均匀的现象,且结合面接触压力是决定其接触刚度与阻尼的关键因素之一^[13-16],因此笔者提出了一种基于结合面压力不均匀分布的螺纹固定结合部有限元建模方法,并通过模态试验

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51775452,51275426)
收稿日期:2018-03-04;修回日期:2018-06-03

其中: k_{xx}, k_{yy}, k_{zz} 分别为两节点间沿 x, y, z 方向的刚度系数。

Matrix27 阻尼单元的表达式与刚度单元相似。

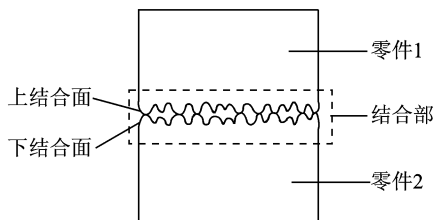


图3 结合面微观简图

Fig. 3 Micro-schematic of joint

2.1 创建接触对及 Matrix27 单元

由于 Matrix27 刚度、阻尼单元的节点应分别位于上下结合面中,对上下结合面中的节点进行配对是在结合部中建立 Matrix27 刚度、阻尼单元的前提,节点配对的基本原则为:每个节点对的空间长度为所有配对方案中的最小值且不高于设定值 ϵ 。

结合面间节点配对的具体流程为:首先,分别提取上下结合面中的节点信息(包括节点编号与节点坐标);其次,在 Matlab 中编写算法,分别计算出某结合面上的每个节点相对另一个结合面上所有节点间的距离,计算公式为

$$L = \sqrt{(x'_n - x_N)^2 + (y'_n - y_N)^2 + (z'_n - z_N)^2} \quad (3)$$

其中: $x'_n, y'_n, z'_n, x_N, y_N, z_N$ 分别为下结合面中编号为 n 的网格节点与上结合面中编号为 N 的网格节点的 x, y, z 坐标值。

取距离最短的两节点编号并判断其空间距离 L 是否小于 ϵ ,如果满足条件,则确定该两节点对为配对节点。基于 Ansys 的 APDL 语言编写二次开发程序,在配对好的每个节点对间分别建立一个 Matrix27 刚度单元与 Matrix27 阻尼单元。经过上述工作,结合面间的所有 Matrix27 刚度、阻尼单元建立完成。

经统计发现,本研究对象中两结合面共配对 676 对节点对,所有节点对中,节点间距离最大为 2.1 mm,由此说明,任一节点对中的两节点在空间内近乎吻合,满足节点配对要求。结合部中 Matrix27 刚度、阻尼单元总数均为 676 个,每个 Matrix27 刚度、阻尼单元模拟了节点对在法向、切向的刚度及阻尼特性。

ϵ 的作用是保证 Matrix27 刚度、阻尼单元在结

合部中呈均匀、离散分布。 ϵ 的确定依据为将结合面均匀分块,如图 4 所示,计算各子区域中节点对的密度,计算公式为

$$\rho_n = N_n / S_n \quad (4)$$

其中: N_n 为编号为 n 的子区域中节点对的个数; S_n 为该子区域的面积; ρ_n 为区域的节点对密度。

依据式(5),(6)计算出结合面所有区域节点对密度的均值及相对于均值的偏差

$$E = \sum_{n=1}^N \rho_n / N \quad (5)$$

$$\delta_n = |\rho_n - E| \quad (6)$$

其中: n 为子区域的编号; N 为子区域的个数; E 为节点对密度分布的均值; δ_n 代表编号为 n 的子区域节点对密度分布相对于均值的偏差。

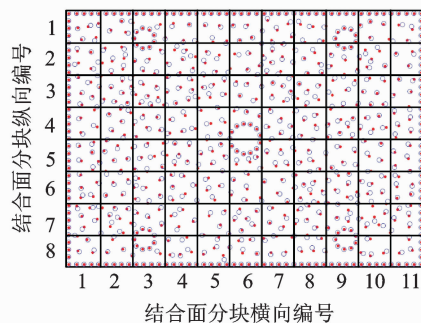


图4 结合面分块

Fig. 4 Block of joint surface

选取方差为最小值时所对应的 ϵ ,通过计算取 $\epsilon = 3$ mm,各子区域的节点对密度偏差分布如图 5 所示。可见,节点对密度在结合面分布均匀。

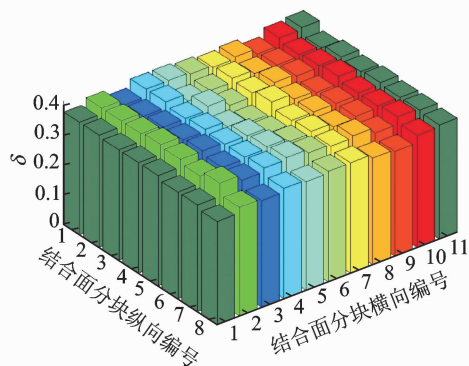


图5 子区域密度偏差

Fig. 5 Density deviation of sub-area

图 6 为所有配对节点在结合面上的位置分布,其中实心点为节点对中属于上块体结合面的节点分布,圆圈为节点对中属于下块体结合面的节点分布。

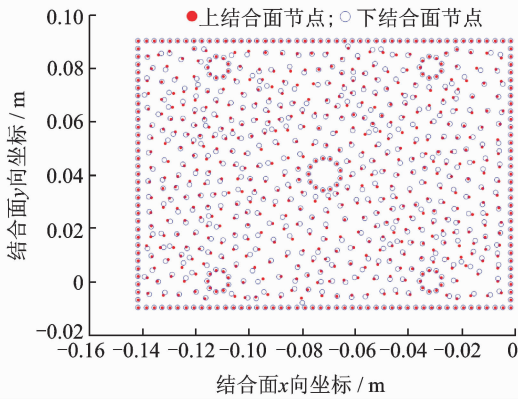


图 6 结合面节点分布图

Fig. 6 Node distribution map of joint surface

2.2 结合面面元划分

结合面面元指的是零部件有限元模型中的单元与结合面重合时的轮廓形状,是求解结合面刚度和阻尼分布的关键。对结合面进行面元划分是在已有的有限元网格基础上,结合面网格分布如图 7 所示,具体流程如下:分别提取上、下块体结合面中的所有节点编号及坐标并以集合的形式表示,记为 A_1, A_2 。分别将集合 A_1, A_2 中属于同一单元的节点编号进行归类,以集合 B_n 表示。其中: n 为集合的序号; B_n 为编号为 n 的结合面面元, B_n 中的所有节点属于单元与结合面重合的轮廓。分别将上、下块体结合面中每个面元的轮廓在 Matlab 中绘出,如图 7(a),7(c)所示。由于对装配体进行有限元网格化分时采用的是 Solid187 单元,因此结合面上的面元形状均为三角形。对比 Ansys 在结合面处的有限元网格(图 7(b),7(d))发现,Matlab 绘制的网格与 Ansys 网格完全吻合,可见上述关于结合面面元的划分是正确的。

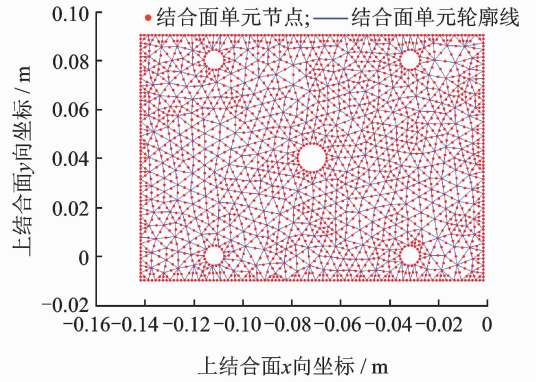
2.3 结合面刚度与阻尼分布计算

螺纹固定结合部中所有 Matrix27 刚度单元的刚度系数计算流程如下。

首先,分别计算出下块体结合面内每个面元中的每条轮廓函数表达式 f_{n1}, f_{n2} 和 f_{n3} ,其中: n 为面元的编号;1,2,3 分别为面元轮廓线的序号。图 8 为结合面中的某个三角形面元。每个结合面面元内的压力场分布为

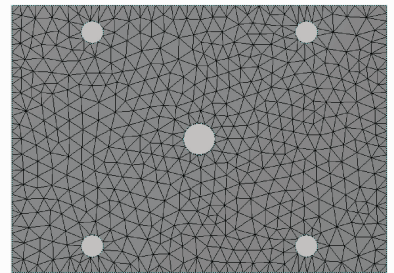
$$P_n(x, y) = P_{00-n} + P_{01-n}x + P_{11-n}y \quad (7)$$

其中: x, y 分别为面元所在平面的横纵坐标; $P_n(x, y)$ 为面元内任意一点的压力值。



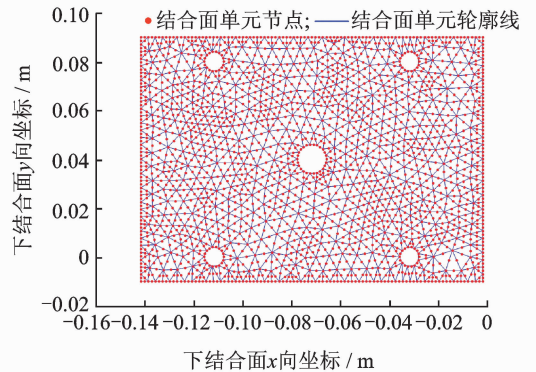
(a) 上结合面网格

(a) The mesh of upper joint surface



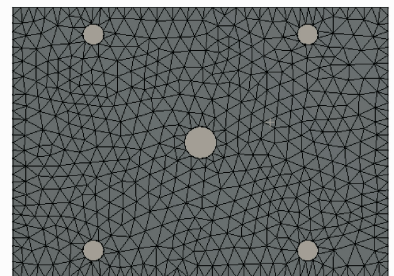
(b) Ansys模型中上结合面网格

(b) The mesh of upper joint surface in Ansys model



(c) 下结合面网格

(c) The mesh of lower joint surface



(d) Ansys模型中下结合面网格

(d) The mesh of lower joint surface in Ansys model

图 7 结合面网格分布图

Fig. 7 Mesh grid distribution map of joint surface

其次,提取下块体结合面内所有节点的法向压力值,基于每个面元节点的坐标及面压值,得到式(6)中的参数 P_{00-n} , P_{01-n} 及 P_{11-n} 。

最后,在 Matlab 中绘制出结合面拟合压力分布,如图 9 所示。

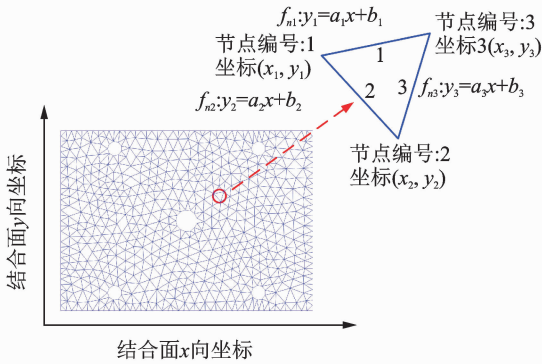


图 8 结合面三角形面元

Fig. 8 Triangle face element in joint surface

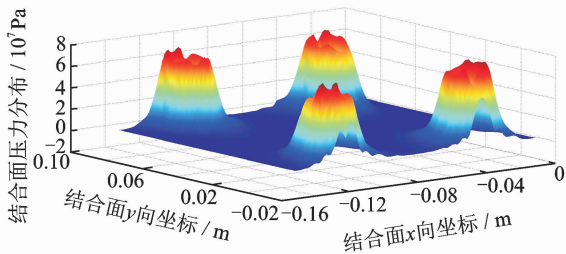


图 9 结合面拟合压力分布图

Fig. 9 Pressure distribution of joint surface

计算出每个结合面面元的平均面压

$$P_{my-n} = \frac{\int_{y_2}^{y_1} \int_{\frac{y_2-b_2}{a_2}}^{\frac{y_3-b_3}{a_3}} P_n(x,y) dx dy + \int_{y_1}^{y_3} \int_{\frac{y_1-b_1}{a_1}}^{\frac{y_3-b_3}{a_3}} P_n(x,y) dx dy}{S_n} \quad (8)$$

$$S_n = \int_{y_2}^{y_1} \int_{\frac{y_2-b_2}{a_2}}^{\frac{y_3-b_3}{a_3}} 1 dx dy + \int_{y_1}^{y_3} \int_{\frac{y_1-b_1}{a_1}}^{\frac{y_3-b_3}{a_3}} 1 dx dy \quad (9)$$

其中: P_{my-n} 为结合面上第 n 个面元的平均面压; $P_n(x,y)$ 为拟合获得的结合面中编号为 n 面元的压力场分布函数; S_n 为此面元的面积。

Yoshimura^[5]认为任意固定结合部在相同表面粗糙度及面压条件下,单位面积的刚度与阻尼系数相同。首先,根据结合面面元平均面压计算得到每个面元区域内的单位面积法向、切向刚度系数,将单位面积法向、切向刚度系数乘以该面元面积,得到面元的总法向、切向刚度。

其次,将面元的总刚度均分至该面元的 3 个角点,由于同一个节点会被多个面元共用,利用下式计算出各节点的总刚度为

$$K_M = \sum_{n=1}^N k_{M-n} \quad (10)$$

其中: K_M 为编号为 M 的节点总刚度; n 为面元编号; N 为拥有共同节点 M 的面元个数。

基于文献[15],获得本研究对象结合面压力与单位面积法向、切向刚度的数值关系式为

$$K_n = 806\ 256 (P_n)^{0.8} \quad (11)$$

$$K_t = 168\ 472 (P_n)^{0.41} \quad (12)$$

其中: P_n 为结合面接触面压; K_n 为单位面积法向刚度; K_t 为单位面积切向刚度; 结合面粗糙度 $R_a = 1.6\ \mu\text{m}$ 。

从结合面节点刚度分布图可以看出,螺栓孔附近的刚度相对其周围明显要大,这是由于在螺栓预紧力作用下,螺栓孔周围压力集中,因此刚度均较周围要大。

通过式(13)~(16)求解每个节点阻尼。

$$c_n = \frac{C'_n}{N} \quad (13)$$

$$c_t = \frac{C'_t}{N} \quad (14)$$

$$C'_n = CS \quad (15)$$

$$C'_t = C'S \quad (16)$$

其中: c_n, c_t 分别为结合面上每个配对节点间的法向阻尼与切向阻尼系数; C'_n, C'_t 分别为结合面的法向、切向总阻尼值; N 为结合面间配对的节点对总个数; S 为结合面总面积; C, C' 分别为某一面压值下单位面积法向、切向阻尼值,通过文献[15]获得。

最后,将所求出的刚度及阻尼带入到与之相对应的 Matrix27 刚度、阻尼单元中,至此螺纹固定结合部有限元模型建模工作结束。

2.4 面压分布对结合面刚度分布的影响

结合面面压对结合部动态特性有重要影响^[18],为了揭示其对结合部法向、切向刚度分布的影响规律,基于式(11),(12)分别计算了考虑结合面压均匀分布、不均匀分布时结合部的法向、切向刚度分布,如图 10~13 所示。可以看出,当结合面面压为均匀分布时,结合部法向、切向刚度分布与结合面面压不均匀分布所得到的结合部法向、切向刚度分布存在

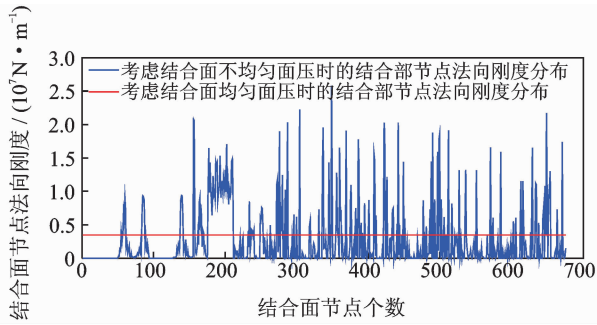


图 10 考虑面压不均匀分布对结合面法向刚度分布的影响

Fig. 10 Considering the effect of uneven distribution of surface pressure on the distribution of normal stiffness of the joint surface

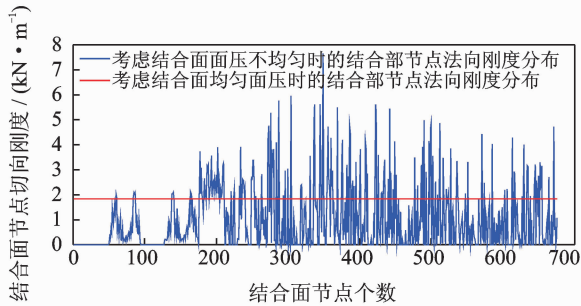


图 11 考虑面压不均匀分布对结合面切向刚度分布的影响

Fig. 11 Considering the effect of uneven surface pressure distribution on the tangential stiffness distribution of the joint surface

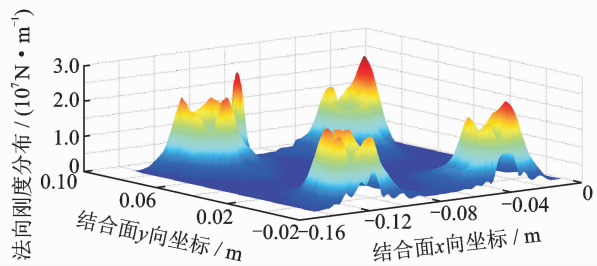


图 12 结合面法向刚度分布

Fig. 12 Normal stiffness distribution of joint surface

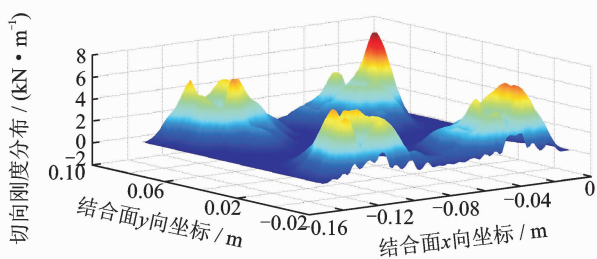


图 13 结合面切向刚度分布

Fig. 13 Tangential stiffness distribution of joint surface

不可忽略的偏差,由此说明考虑结合部面压不均匀分布对正确建立结合部动力模型有不可忽视的影响。

3 模型验证

将螺纹固定结合部有限元模型与装配体中上、下块体的有限元模型合成整体有限元模型,运用 Ansys 模态分析模块对其进行模态分析,提取前四阶模态频率的计算结果如表 1 所示。

表 1 理论模态值与试验模态值对比

Tab. 1 Comparison between theoretical modal and experimental modal

项目	第 1 阶模态 频率/Hz	第 2 阶模态 频率/Hz	第 3 阶模态 频率/Hz	第 4 阶模态 频率/Hz
试验值	2 506.9	3 044.5	3 746.5	3 991.1
计算值	2 327.4	2 913.2	3 779.5	3 963.3
误差/%	7.2	4.3	0.9	0.7

图 14 为锤击法模态试验。图 15 为试验获得的频响函数幅值图。试验采集设备主要包括 PCB 公司的 086C03 型力锤及 356A16 型三向加速度传感器, LMS 公司的 SCM202 型 16 通道数据采集仪。



图 14 锤击法模态试验

Fig. 14 Modal test

由表 1 可以看出,最大误差出现在第 1 阶模态处,为 7.2%,其余均在 5%以内。将装配体的前四阶理论模态振型与试验模态振型进行对比,如图 16 所示,可以发现,前四阶理论模态振型与前四阶试验模态振型相似且一一对应。这说明笔者提出的螺纹固定结合部动力学建模方法是合理可行的。

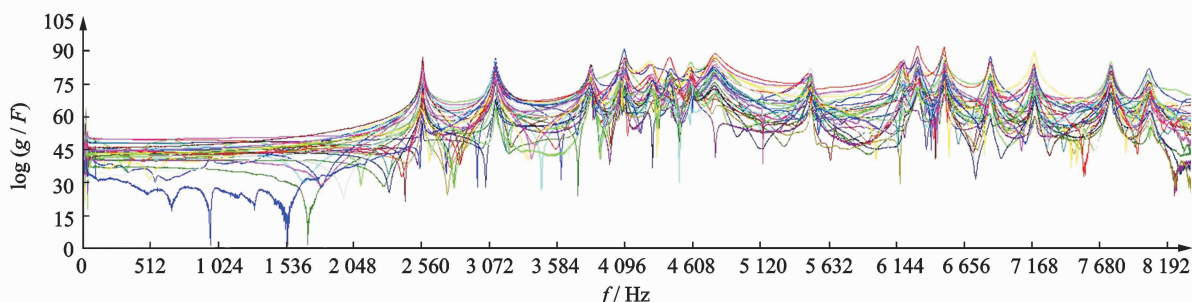


图15 频响函数幅值图

Fig. 15 The graph of frequency response function amplitud

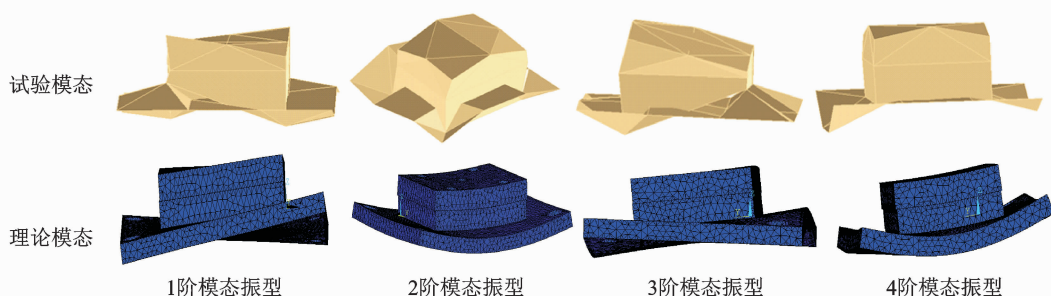


图16 理论模态振型与试验模态振型对比

Fig. 16 Comparison between theoretical modal and experimental modal

4 结论

1) 提出了一种构建螺纹固定结合部动力学模型的新方法。通过在结合面节点间建立 Matrix27 刚度单元和阻尼单元来描述结合部的动态特性, 每个刚度、阻尼单元中的刚度系数、阻尼系数通过计算获得, 并考虑了结合面面压的分布对刚度数值的影响, 即结合面面压越大, 该处的刚度值就越大。

2) 对本研究的装配体试件进行了模态测试, 通过对比试件前四阶的理论模态与试验模态发现, 理论模态的前四阶振型与试验模态的前四阶振型相似且一一对应, 前四阶理论固有频率与试验固有频率之间的误差在 0.7%~7.2% 范围内, 从而证明了本建模方法的有效性。

3) 本建模方法由于在建模过程中不需要通过试验来获得相关建模所需参数, 因此具有成本低、建模效率高和通用性好的优点。

参 考 文 献

[1] BURDEKIN M, BACK N, COWLEY A. Analysis of

the local deformations in machine joints[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1979, 21(1): 25-32.

[2] BEARDS C F. Damping in structural joints[J]. Shock and Vibration Digest, 1992, 38(2): 3-7.

[3] ZHANG G P, HUANG Y M, SHI W H, et al. Predicting dynamic behaviours of a whole machine tool structure based on computer-aided engineering[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(7): 699-706.

[4] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces [C] // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. London: The Royal Society, 1966: 300-319.

[5] YOSHIMURA M. Computer-aided design improvement of machine tool structure incorporating joint dynamics data[J]. Annals of the CIRP, 1979, 28(1): 241-246.

[6] TAYLOR S, TOBIAS S A. Lumped-constants method for the prediction of the vibration characteristics of machine tool structures[C]//Proceedings of 5th International Machine Tool Design and Research Conference. Oxford: Pergmon Press, 1964:183-189.

[7] XU C, ZHANG J, WU Z, et al. Dynamic modeling and parameters identification of a spindle-holder taper

- joint[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(5/8): 1517-1525.
- [8] AHMADIAN H, JALALI H. Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(2): 1041-1050.
- [9] 李玲, 蔡安江, 蔡力钢, 等. 栓接结合部动态特性辨识方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 168-175.
LI Ling, CAI Anjiang, CAI Ligang, et al. New method to identify dynamic characteristics of bolted joints [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 168-175. (in Chinese)
- [10] 张杰, 童忠飏. 机床固定结合面动力学建模问题[J]. 振动与冲击, 1994, 13(3): 15-22.
ZHANG Jie, TONG Zhongfang. Dynamic modeling of machine tool fixed joint surface[J]. Journal of Vibration and Shock, 1994, 13(3): 15-22. (in Chinese)
- [11] TIAN H, LI B, LIU H, et al. A new method of virtual material hypothesis-based dynamic modeling on fixed joint interface in machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(3): 239-249.
- [12] MAO K, LI B, WU J, et al. Stiffness influential factors-based dynamic modeling and its parameter identification method of fixed joints in machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(2): 156-164.
- [13] SALIH N M, PATIL M J. Hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints and its load transfer analysis[J]. International Journal of Advanced Engineering Technology, 2012, 3(1): 213-216.
- [14] 黄玉美, 付卫平. 结合面法向动态特性参数研究[J]. 机械工程学报, 1993, 29(3): 74-78.
HUANG Yumei, FU Weiping. Study on dynamic parameters of joint surface [J]. Journal of Mechanical Engineering, 1993, 29(3): 74-78. (in Chinese)
- [15] 张学良. 机械结合面动态特性及应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 55-99.
- [16] 杨佐卫, 殷国富, 尚欣, 等. 高速电主轴热态特性与动力学特性耦合分析模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(1): 100-105.
YANG Zuwei, YIN Guofu, SHANG Xin, et al. Coupling analysis model of thermal and dynamic characteristics for high-speed motorized spindle [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(1): 100-105. (in Chinese)
- [17] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 60-62.
- [18] 邓聪颖, 殷国富, 肖红. 基于能量分布的机床整机动态特性优化方法[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(6): 1083-1089.
DENG Congying, YIN Guofu, XIAO Hong. Dynamic characteristics optimization of machine tool based on energy distribution [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(6): 1083-1089. (in Chinese)



第一作者简介:李世超,男,1990年7月生,博士。主要研究方向为脉冲燃烧风洞测力系统整机动力学建模、结合部动力学建模、脉冲燃烧风洞测力系统新型测试原理研究与误差分析。曾发表《基于结合部优化的脉冲燃烧风洞测力系统动态特性优化》(《推进技术》2018年第1期)等论文。

E-mail: lsc13622162338@163.com

通信作者简介:高宏力,男,1971年12月生,教授、博士生导师。主要研究方向为动力学建模、故障诊断及机电一体化。
E-mail: hongli_gao@home.swjtu.cn

