

一种计及滑块裙部变形的滚珠 直线导轨副模态分析方法

陈 汀 黄其柏

华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉, 430074

摘要:基于计及滚珠直线导轨副滑块裙部变形的刚度模型,提出了一种滚珠直线导轨副的有限元模态分析方法,建立了一种滚珠直线导轨副的三维有限元模型并进行了有限元模态分析,求得了滚珠直线导轨副的模态频率及模态振型。利用实验模态分析技术,对滚珠直线导轨副进行了模态测试,测得了滚珠直线导轨副的模态。测试结果验证了有限元建模与分析方法的有效性。

关键词:滚珠直线导轨副;接触刚度;有限元分析;模态分析

中图分类号:TH113

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.007

A Modal Analysis Method of a Linear Ball Guide Incorporating Flexibility of the Carriage

Chen Ting Huang Qibai

The State Key Lab of Digital Manufacturing Equipment & Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

Abstract:Based on the rigidity model of a linear ball guide incorporating the flexibility of the carriage, a modal analysis method was proposed by using finite element analysis. A three dimensional finite element model of a linear ball guide was established. The finite element modal analysis was conducted and the modal frequencies and vibration modes were presented. The modal testing experiment was conducted on the type of linear ball guide. For the occurrence of the modes, the finite element analysis results based on the presented method almost match with the experimental ones.

Key words:linear ball guide; contact rigidity; finite element analysis; modal analysis

0 引言

滚珠直线导轨副具有低摩擦、高刚性、高耐磨

性、高可靠性和精确的导向性等特点,已成为各类数控机床、制造装备的必要部件。当前,有限元分析技术在制造装备整机设计过程中的应用日益广泛,但系统部件之间的滚动接触面(如滚动轴承、滚动直线导轨等运动部件的接触面)特性在系统

收稿日期:2011-02-22

基金项目:数字制造装备与技术国家重点实验室资助项目(2010Z014)

from Linear and Circular Paths to Nurbs Curves [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39 (7/8):760-773.

[5] Yeh S S, Su H C. Implementation of Online NURBS Curve Fitting Process on CNC Machines[J]. Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(5/6):531-540.

[6] 李建刚,张婷华,李泽湘,等. 数控加工中的连续多段直线轨迹 B-Spline 拟合[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(10):1606-1608.

[7] 杨旭静,胡仲勋,钟志华. 面向刀具路径生成的 NURBS 曲线拟合算法研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(8):984-987.

[8] Lee R S, Liang S P. A Strain Energy Minimization Method for Generating Continuous NURBS-based Motion Curves in Free-form Surface Machining [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28 (11/12):1136-1145.

[9] Wang Y Z, Liu Y, Han Z Y, et al. Integration of a 5-axis Spline Interpolation Controller in an Open CNC System[J]. Chinese Journal of Aeronautics,

2009, 22(2):218-224.

[10] 刘源,王永章,富宏亚,等. 用于五轴联动数控机床的曲线插补控制策略[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(4):758-761.

[11] Fleisig R V, Spence A D. A Constant Feed and Reduced Angular Acceleration Interpolation Algorithm for Multi-axis Machining[J]. Computer-Aided Design, 2001, 33(1):1-15.

[12] Toshiaki O, Hideo O, Soichiro I, et al. Curve Interpolation Method; USA, US2004/0122549[P]. 2004-06-24.

[13] 胡寅亮,熊涛,黄翔. 五轴联动数控机床的后置处理方法[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(7):175-177.

(编辑 张 洋)

作者简介:赵 鹏,男,1984 年生。南京航空航天大学机电学院博士研究生。主要研究方向为复杂曲线曲面高速数控加工技术。发表论文 5 篇。楼佩煌,男,1962 年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。刘明灯,男,1975 年生。南京四开电子企业有限公司总工程师。胡荣华,男,1980 年生。南京航空航天大学机电学院博士研究生。

仿真过程中往往得不到足够的重视,其主要原因是,这些运动接触面之间存在数目众多的滚动接触对,且接触对具有非线性特性。如何对这些接触对进行合理建模直接影响对制造装备进行动态特性预测的结果。

建立合理有效的滚珠直线导轨副动态仿真模型,是进行制造装备动态特性预测的重要环节。有学者对滚动直线导轨副的动态特性进行了分析。Ohta 等^[1]基于均匀分布的弹簧单元,模拟滑块与导轨的接触特性,对某型号滚珠直线导轨副的滑块进行了有限元模态计算,并通过滚珠直线导轨副进行模态测试,得出滚动直线导轨副的滑块存在滚动、偏摆、俯仰、垂直振动等振型的结论。Hagi 等^[2]应用赫兹接触理论,建立球轴承法向力与弹性变形方程,分析了机床的动态特性。文献[3-4]应用赫兹接触理论,讨论了球轴承的振动与刚度矩阵的关系。Pimsarn 等^[5]提出了一种 PISE(pseudo-interference stiffness estimation)方法,该方法可快速估计球轴承的等效刚度。文献[6-7]对具有两列滚珠的滚珠直线导轨副进行了有限元模态分析,将滚珠与滚道的接触区视为面接触,利用膜单元模拟接触特性,并在 Ohta 模型^[1]的基础上引入了一个切向弹簧单元模拟二维点接触,进行了计算模态分析,并将计算结果分别与 Ohta 的计算模型的结果和试验模态的结果进行了比较。张耀满等^[8]用弹簧阻尼单元模拟滚动直线导轨的结合面进行机床进给系统的模态分析,然后对包含滚动直线导轨副的数控机床进行了静刚度和动刚度试验。分析表明,试验测试结果与有限元分析结果差别较大,说明直线导轨副运动结合面的建模直接影响制造装备的物理特性。由以上文献分析可知,在对滚珠直线导轨副进行动力学仿真时,往往根据赫兹接触理论将整个导轨副视为刚体,仅考虑接触区的变形,计算导轨副的接触刚度。实际上,由于滚珠直线导轨副受预紧力作用,滑块裙部会产生变形,从而影响滚珠直线导轨副的接触刚度。作为制造装备中重要的功能部件,如何使仿真模型尽可能准确地反映实际物理模型是动态特性预测的关键技术。而以上文献在分析滚珠直线导轨的动态特性时,均未考虑滑块的变形。

本文以某精密制造装备中用到的某型号滚珠直线导轨副为对象,首先,基于计及滚珠直线导轨副滑块裙部变形的刚度模型^[9],建立了一种滚珠直线导轨副的三维有限元模型。然后,通过有限元模态计算,求得了滚珠直线导轨副的模态频率

及其相应的振型。最后,利用试验模态分析技术,对滚珠直线导轨副进行了模态测试,以验证有限元建模与分析方法的有效性。

1 滚珠直线导轨副运动坐标系

滚珠直线导轨副的运动坐标系如图 1 所示。滚珠直线导轨副坐标系的原点 O 与滑块的质心重合, α 为滑块与滚珠的接触角, z 轴平行于导轨的轴线。由于滑块的驱动方向为 z 向,故不考虑滑块沿 z 轴的位移。滑块的运动主要产生沿 y 轴的振动位移 v 、沿 x 轴的振动位移 u 、绕 x 轴的振动角 θ 、绕 y 轴的振动角 ψ 以及绕 z 轴的振动角 φ 。

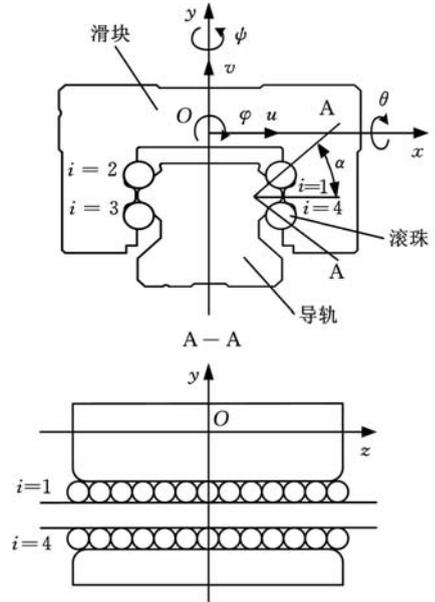


图 1 滚珠直线导轨副的坐标系

2 滚珠直线导轨副接触刚度计算

不受预加载荷作用时,滑块与导轨沟槽曲率中心距为

$$s_0 = r_c + r_r - d_0 \tag{1}$$

式中, r_c 为滑块沟槽曲率半径; r_r 为导轨沟槽曲率半径; d_0 为基准滚珠直径。

在预加载荷作用下,滚珠的过盈量为

$$\delta_0 = d - d_0 \tag{2}$$

式中, d 为实际滚珠直径。

将式(2)代入式(1),可得预加载荷作用下,滑块与导轨沟槽曲率中心距:

$$s_0 = r_c + r_r + \delta_0 - d \tag{3}$$

在预紧力和垂直载荷作用下,导轨副产生垂直位移 v ,滚珠直线导轨副第 i 列滚道中的第 j 个钢球所受到的接触力为 F_{ij} ,滚珠与滑块滚道之间的接触变形为 δ_{cij} ,滚珠与导轨滚道之间的接触变形为 δ_{rij} 。在滚珠与滑块滚道之间的接触力的作

用下, 滑块滚道处产生 Δc_i 的弹性变形。由于滑块的变形, 滑块的沟槽曲率中心位置变为 O'_{ci} , 假设导轨的沟槽曲率中心位置不变, 则导轨副变形后的沟槽曲率中心距为

$$s_i = \begin{cases} \sqrt{(s_0 \sin \alpha_0 + v)^2 + (s_0 \cos \alpha_0 - \Delta c_i)^2} & i = 1, 2 \\ \sqrt{(s_0 \sin \alpha_0 - v)^2 + (s_0 \cos \alpha_0 - \Delta c_i)^2} & i = 3, 4 \end{cases} \quad (4)$$

变形后的接触角的计算式为

$$\cos \alpha_i = (s_0 \cos \alpha_0 - \Delta c_i) / s_i \quad (5)$$

其中, Δc_i 可通过对滑块裙部进行计算求得。

滚珠直线导轨副第 i 列滚道中的第 j 个滚珠的弹性趋近量为

$$\delta_{ij} = \delta_{cij} + \delta_{rij} = s_i - m_0 \quad (6)$$

$$m_0 = r_c + r_r - d$$

根据 Hertz 接触理论^[10], 滚珠与滑块以及滚珠与导轨之间的弹性趋近量分别为

$$\left. \begin{aligned} \delta_{cij} &= C_{cij} F_{ij}^{2/3} \\ \delta_{rij} &= C_{rij} F_{ij}^{2/3} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中, C_{cij} 、 C_{rij} 分别为滚珠与滑块滚道、滚珠与导轨滚道之间的变形系数, 它们与导轨副的材料、变形系数及接触点处的曲率和有关:

$$\left. \begin{aligned} C_{cij} &= \left(\frac{2K}{\pi\mu} \right)_c \sqrt[3]{\frac{1}{8} \left[\frac{3}{E} (1 - \sigma^2) \right]^2 \sum \rho_c} \\ C_{rij} &= \left(\frac{2K}{\pi\mu} \right)_r \sqrt[3]{\frac{1}{8} \left[\frac{3}{E} (1 - \sigma^2) \right]^2 \sum \rho_r} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \cos \tau_c &= 1 / (r_c \sum \rho_c) \\ \cos \tau_r &= 1 / (r_r \sum \rho_r) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum \rho_c &= 4/d - 1/r_c \\ \sum \rho_r &= 4/d - 1/r_r \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, E 为弹性模量; σ 为泊松比; $\sum \rho_c$ 、 $\sum \rho_r$ 分别为滑块与导轨的沟槽曲率和; $\left(\frac{2K}{\pi\mu} \right)_c$ 、 $\left(\frac{2K}{\pi\mu} \right)_r$ 分别为由辅助角 $\cos \tau_c$ 和 $\cos \tau_r$ 决定的系数; K 为第一类椭圆积分函数; μ 为接触区尺寸函数。

故, 滑块各滚道处的接触力为

$$F_{ij} = \left(\frac{s_i - m_0}{C_{cij} + C_{rij}} \right)^{3/2} \quad (11)$$

在垂直载荷作用下, 滚珠直线导轨副的静力平衡关系为

$$\sum_{j=1}^n (F_{1j} \sin \alpha_{1j} + F_{2j} \sin \alpha_{2j} - F_{3j} \sin \alpha_{3j} - F_{4j} \sin \alpha_{4j}) = F_v \quad (12)$$

式中, n 为滚道承载区内钢球数目; F_v 为滑块受到的垂直载荷。

故滚珠直线导轨副垂直刚度的理论表达式为

$$K_v = dF_v / dv \quad (13)$$

结合滚珠直线导轨副的结构特点和垂直刚度表达

式, 滚珠直线导轨副的接触刚度为

$$k = \frac{K_v}{4Z_L \sin^2 \alpha_i} \quad (14)$$

式中, Z_L 为滚道承载区内滚珠的数目。

3 滚珠直线导轨副有限元建模

本文应用 PATRAN/NASTRAN 有限元分析软件, 建立了某型号滚珠直线导轨副的有限元模型, 如图 2 所示。首先利用三角形单元对滑块和导轨的端面进行划分, 然后通过拉伸面单元形成体单元。注意到, 滚珠直线导轨副中有 4 列滚道, 各列滚道内的每个滚珠与滚道间形成两点接触状态, 因此必须保证接触界面处有限元模型与物理模型具有等效的接触刚度。

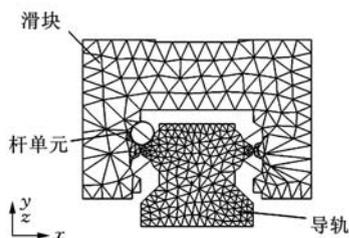


图 2 有限元模型截面图

根据弹性力学基本理论, 杆单元具有沿杆方向的二力性特征, 此特点与滚珠和滚道间的接触特性非常相似; 同时, 杆单元在有限元建模中应用广泛, 而且可以保证计算精度, 故本文用杆单元模拟滚珠与导轨和滑块间的接触刚度。杆单元的刚度

$$k = E_{rod} A / L$$

式中, E_{rod} 为杆单元的弹性模量; A 为杆单元的横截面积; L 为杆单元的长度。

根据已计算的滚珠直线导轨副的接触刚度, 可以确定杆单元的参数。

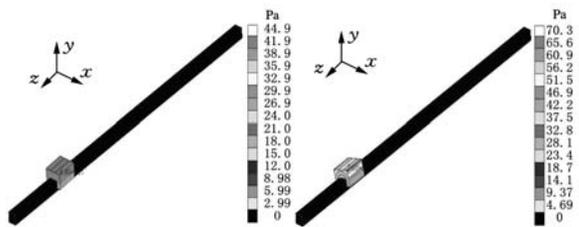
本文研究的某型号滚珠直线导轨副中的滚珠和导轨所用材料的弹性模量 $E_1 = 204 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu_1 = 0.28$, 材料密度 $\rho_1 = 7850 \text{ kg/m}^3$ 。滑块所用材料的弹性模量 $E_2 = 206 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu_2 = 0.3$, 材料密度 $\rho_2 = 7900 \text{ kg/m}^3$ 。

4 滚珠直线导轨副有限元模态分析

在建立了滚珠直线导轨副有限元模型后, 根据滚珠直线导轨副的工作特点, 将导轨底面的自由度全部约束后, 进行有限元模态计算。导轨副主要模态频率及其对应的振型如表 1 和图 3 所示。

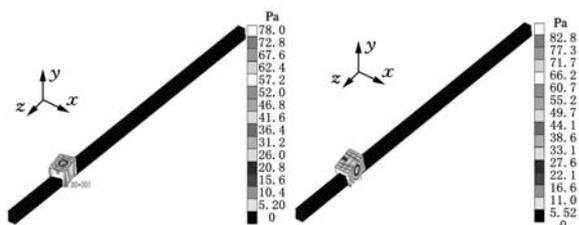
表 1 滚动直线导轨的计算模态频率

阶次	模态频率(Hz)	振型	阶次	模态频率(Hz)	振型
1	329.3	沿 z 轴的振动	4	1047.5	绕 x 轴的俯仰
2	490.4	绕 z 轴的滚动	5	1224	沿 y 轴的振动
3	1030.7	绕 y 轴的偏摆	6	1637.2	绕 z 轴高阶滚动



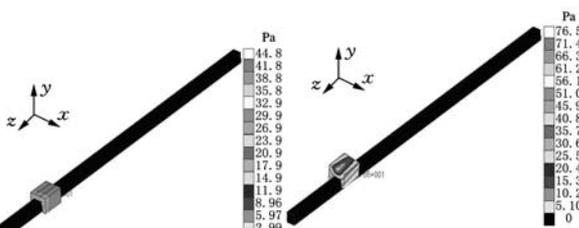
(a)第 1 阶振型图

(b)第 2 阶振型图



(c)第 3 阶振型图

(d)第 4 阶振型图



(e)第 5 阶振型图

(f)第 6 阶振型图

图 3 有限元计算模态振型图

由图 3 所示的有限元计算模态振型可知,滚珠直线导轨副的振动主要表现为滑块的刚体模态。除了第 1 阶模态外,2~6 阶模态的振动都是由导轨副的弹性变形引起的。其中,2~5 阶模态主要由滚珠与滑块滚道之间、滚珠与导轨之间的弹性接触变形引起,模态特性表现为滑块在各自由度上的刚体模态;第 6 阶模态为滑块绕 z 轴的高阶滚动,除了具有刚体模态之外,还表现出滑块的柔性模态,模态频率较高。此分析结果与文献[1,7-8,11-12]中的分析结论基本一致。但是,第 1 阶振型与实际情况不符,此振型为沿 z 轴即为沿运动方向的模态。理论上,在滑块的 6 个方向的自由度上都存在相应的模态频率和振型,但是, z 方向为滑块沿导轨的运动方向,振动机理非常复杂,具有强烈的非线性,不同于其他方向上的振动状态,需要进行专门的研究,在此不再赘述。

5 滚珠直线导轨副模态测试

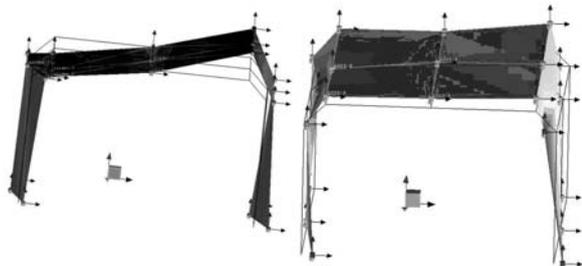
为验证有限元建模方法及计算结果的有效性,对滚珠直线导轨副进行模态测试。本试验中,用于测试的滚珠直线导轨副由广东高新凯特精密机械股份有限公司制造。导轨副的结构与有限元分析模型结构一致。滚动直线导轨副中的导轨根据工作状态的要求安装在一个近似刚性的基座上,以此来避免外界系统对滚珠直线导轨副模态测试的影响。采用美国 PCB 公司的 086C03 硬质锤头的力锤对导轨的滑块进行激振,采用美国 PCB 公司的 352C33 型模态高分辨率 ICP 加速度传感器拾振。信号采集与模态分析系统采用 LMS 公司的 SCADAS Mobile 前端和 Impact Testing 模态测试系统。

6 有限元模态计算结果与模态测试结果

有限元模态计算结果与模态测试结果如表 2 所示。由于实验中很难对滑块的 x 方向进行激振,且 x 方向的动态特性具有非线性特征^[12],故在实验中不考虑 x 方向的模态频率和振型。模态测试的模态振型如图 4 所示。

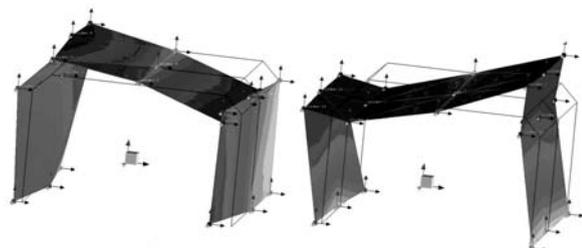
表 2 有限元模态计算与模态测试结果比较

阶次	计算频率 (Hz)	试验频率 (Hz)	误差 (%)	振型描述
1	329.3	—	—	滑块沿 z 轴振动
2	490.4	508.7	3.6	滑块绕 z 轴滚动
3	1030.7	1045.5	1.4	滑块绕 y 轴偏摆
4	1047.5	—	—	滑块绕 x 轴俯仰
5	1224	1251.5	2.2	滑块沿 y 轴振动
6	1637.2	1685	2.8	滑块绕 z 轴高阶滚动



(a)绕 y 轴偏摆

(b)沿 y 轴振动



(c)绕 z 轴滚动

(d)绕 z 轴高阶滚动

图 4 试验模态频率对应的振型

由结果对比可以发现,第 2、3、5、6 阶试验模态与有限元模态分析结果完全一致。第 2 阶试验模态对应的振型为绕 z 轴的滚动,第 3 阶试验模态对应的振型为绕 y 轴的偏摆,第 5 阶试验模态对应的振型为沿 y 轴的振动,第 6 阶试验模态对应的振型为绕 z 轴的高阶滚动。从表 3 所示的模态频率中发现,虽然模态测试测得的第 3 阶模态频率与有限元模态计算的第 4 阶模态频率相近,但第 3 阶模态振型主要以绕 y 轴的偏摆为主,故为导轨副的第 3 阶模态频率。

模态测试没有提取到有限元计算中的第 4 阶模态频率,这主要是由于第 4 阶模态频率与第 3 阶模态频率非常接近。从第 3 阶模态对应的振型中可以发现,第 3 阶模态伴随有不太明显的绕 x 轴的俯仰,由于模态密集,导致模态混叠,模态识别困难。

从模态振型中发现,滑块的模态主要表现为滑块的刚体模态,滑块或导轨的弹性变形产生的柔性模态在测得的频带内没有体现出来。这可能主要是由于柔性模态具有比刚体模态更高的模态频率。因此,滚珠直线导轨副的模态主要表现为滑块的模态,滑块的振动状态主要由滚珠与滑块滚道之间、滚珠与导轨滚道之间的接触变形引起,这与有限元分析得到的结论基本一致。

对有限元分析结果与模态测试结果进行对比分析后可知,除滑块运动方向的动态特性识别需要进行专门地研究之外,本文提出的有限元分析方法的计算结果与模态测试结果基本一致。该有限元分析结果比较准确,可满足工程应用的需求。因此,在对滚珠直线导轨副利用有限元方法进行动态分析时,可以利用本文的方法对滚动接触面进行建模和分析。

7 结论

(1)滚珠直线导轨副的模态主要表现为滑块的刚体模态,它是由滚珠与滚道之间的弹性接触变形引起的。除沿导轨运动方向之外,每个自由度上都存在相应的模态。

(2)滚动直线导轨副沿运动方向上的动态特性需要专门的建模、分析与测试方法,有待进一步研究。

参考文献:

[1] Ohta H, Hayashi E. Vibration of Linear Guideway

Type Recirculating Linear Ball Bearings[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 235(5): 847-861.

- [2] Hagi G D, Gafitanu M D. Dynamic Characteristics of High Speed Angular Contact Ball Bearings[J]. Wear, 1997, 211(1): 22-29.
- [3] Lynagh N, Rahnejat H, Erahimi M. Bearing Induced Vibration in Precision High Speed Routing Spindle [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(4): 561-577.
- [4] Hernot X, Sartor M, Guillot J. Calculation of the Stiffness Matrix of Angular Contact Ball Bearings by Using the Analytical Approach [J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 122(1): 83-90.
- [5] Pimsarn M, Kazerounian K. Efficient Evaluation of Spur Gear Tooth Mesh Load Using Pseudo-interference Stiffness Estimation Method [J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(8): 769-786.
- [6] Wu J S S, Chang J C, Hung J P. The Effect of Contact Interface on Dynamic Characteristics of Composite Structures [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2007, 74(6): 454-467.
- [7] Hung J P. Load Effect on the Vibration Characteristics of a Stage with Rolling Guides [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(1): 89-99.
- [8] 张耀满, 刘春时, 谢志坤, 等. 数控机床直线滚动导轨结合面有限元分析 [J]. 制造技术与机床, 2007(7): 75-78.
- [9] 陈汀, 黄其柏. 一种计及滑块裙部变形的滚珠直线导轨副垂直刚度模型 [J]. 中国机械工程, 2011, 22(13): 1546-1550.
- [10] Harris T A. Rolling Bearing Analysis [M]. 4ed. New York: Wiley, 2001.
- [11] 姜大志, 应强, 孙俊兰. 滚动直线导轨的受力分析与载荷计算 [J]. 机床与液压, 2008, 36(4): 270-275.
- [12] Yi Y S, Kim Y Y. Dynamic Analysis of a Linear Motion Guide Having Rolling Elements for Precision Positioning Devices [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(1): 50-60.

(编辑 张洋)

作者简介: 陈汀, 男, 1984 年生。华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室博士研究生。主要研究方向为机电系统振动分析与测试。发表论文 3 篇。黄其柏, 男, 1963 年生。华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室教授、博士研究生导师。