

文章编号:1000-582X(2013)03-037-05

# 直线滚动导轨动力学精细有限元建模

孙 伟,孔祥希,汪 博,闻邦椿

(东北大学 机械工程与自动化学院,沈阳 110819)

**摘 要:**提出一种可以减少或避免繁琐实验的、通用的导轨精细有限元建模方法。从分析单个滚珠-沟槽的接触特性出发,确定了在不同预紧力作用下单个滚珠的接触刚度;用弹簧质量单元模拟单个滚珠-沟槽的接触,在充分考虑滚珠分布的基础上完成了导轨系统的精细有限元建模。详细描述了创建该有限元模型的具体流程以及关键步骤,并以 THK 公司生产的 SHS-35R 型导轨为例进行了实例研究。获得了该导轨系统的固有特性,并与解析模型分析结果相比较,二者计算分析结果基本相符,从而证明所建模型的正确性。

**关键词:**滚动导轨;动力学分析;精细有限元;建模方法

**中图分类号:**TG502.14;TH113

**文献标志码:**A

## A precise finite element modeling approach for analyzing linear rolling guideway dynamics

SUN Wei, KONG Xiangxi, WANG Bo, WEN Bangchun

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** In order to reduce or avoid the tedious experiment for the dynamics modeling of the linear rolling guideway, a general finite element modeling approach is presented. Firstly, the contact characteristic between a single ball and groove is analyzed, and the relative contact stiffness of single ball is determined under different preload levels. Next, using the spring-mass elements to simulate the contact of single ball and groove, and the precise finite element model is created on the basis of considering the distribution of the balls. The detailed procedure and key steps of creating the precise finite element mode are introduced. At last, the SHS-35R guideway produced by THK Corporation is chosen as study object, and its nature characteristics are obtained. The analysis results are found identical with the analytical solution, which proves the proposed approach is correct.

**Key words:** rolling guideway; dynamic analysis; precise finite element; modeling approach

直线滚动导轨是由轨道、滑块、保持架及滚珠等构成的一个复杂的组合系统。作为数控机床的重要功能部件,其动态特性直接影响着数控机床的加工精度、加工效率。因此,对直线滚动导轨的动力学特性的测试和分析已经成为数控机床设计研究中的一

个重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。

目前,多数研究者在对直线滚动导轨动力学特性建模时,往往高度依赖于实验。例如,文献[3]将导轨结合部简化为 8 根等效弹簧组成的动力学模型,弹簧的刚度及阻尼均需要通过实验来获得。文献[4]采用

收稿日期:2012-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50905029)

作者简介:孙伟(1975-),男,东北大学副教授,主要从事复杂机械系统动力学分析及振动控制研究,(E-mail)weisun@mail.neu.edu.cn。

自创有限元单元的方法模拟导轨结合部的动态特性,这种方法同样需要实验确定单元刚度矩阵所需参数。文献[5]同样需要对导轨进行实验模态测试,来确认有限元建模时所需的刚度参数。上述研究是面向某个特定导轨系统从宏观上对导轨系统的建模,模型往往缺乏通用性,导致模型的预测能力受限。

现代机床动力学设计需要建立导轨系统通用模型,以完成对数控机床部件及整机系统的动力学预估。为此,笔者提出一种创建具有通用性的导轨有限元模型的方法。该建模方法可以在少做甚至不做实验的基础上完成较精确的导轨动力学模型创建。因为其考虑了每个滚珠对导轨系统动力学特性的贡献,因而命名为精细有限元模型。

具体建模思路为:从分析单个滚珠-沟槽的接触特性出发,确定在不同预紧力作用下单个滚珠的接触刚度;进一步用弹簧质量单元模拟单个滚珠-沟槽的接触,在充分考虑滚珠分布性的基础上完成了导轨系统的精细有限元建模。详细描述了创建该有限元模型的具体流程以及关键步骤,并以 THK 公司生产的 SHS-35R 型导轨为例进行了实例研究,并与解析模型分析结果相比较,对所创建模型的正确性进行了校验。

## 1 滚珠-沟槽接触有限元建模

### 1.1 滚珠-沟槽接触有限元建模方法

在直线滚动导轨系统中,滚珠同滑块及轨道的沟槽之间存在一种非线性的接触行为。对直线滚动导轨进行动力学建模,首先要确定滚珠-沟槽之间的接触刚度这一关键参数。

研究采用 ANSYS 软件分析单个滚珠-沟槽接触特性,从而获得滚珠-沟槽之间的接触刚度。下面以 SHS-35R 型导轨的滚珠为例,说明滚珠-沟槽接触有限元建模方法。表 1 为用于接触建模的滚珠-沟槽的基本参数,这里用两个质量块模拟滚珠同滑块及导轨的接触。

表 1 用于接触建模的滚珠-沟槽基本参数

名称	参数值
上质量块(长×宽×高)/mm <sup>3</sup>	4×10×6
下质量块(长×宽×高)/mm <sup>3</sup>	4×10×6
滚珠直径/mm	6.35
沟槽半径/mm	3.302
滚珠及沟槽弹性模量/GPa	206
滚珠及沟槽泊松比	0.3

所创建的滚珠-沟槽接触有限元模型如图 1 所示。采用 SOLID92 单元模拟滚珠及沟槽的机械本

体,分别采用接触单元 CONTA174 以及目标单元 TARGE170 模拟滚珠-沟槽之间的接触。整个模型中共有 103 108 个节点,76 579 个单元,其中接触单元 4 796 个,目标单元 316 个。为了排除网格密度对分析结果的影响,对接触部分采用了网格局部细化。

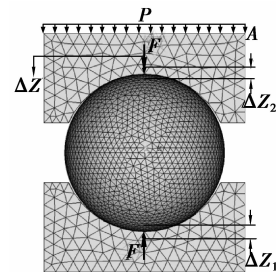


图 1 滚珠与沟槽接触有限元模型

ANSYS 接触分析中需要给定初始接触刚度因子,通过刚度测试,选取初始接触刚度因子为 0.8。约束非接触方向的自由度,同时在上质量块表面施加  $P=F/A$  的均布载荷, $F$  为滚珠预紧力, $A$  为作用面的面积。通过施加不同大小的均布载荷来模拟滚珠所承受的不同的预紧力。采用 ANSYS 接触分析可获得总变形  $\Delta z$ ,进一步,按式(1)至式(3)计算滚珠-沟槽接触刚度。

$$\Delta z = \Delta z_1 + \Delta z_2, \quad (1)$$

$$\Delta z_1 = \Delta z_2, \quad (2)$$

$$K_{n1} = K_{n2} = \frac{F}{\Delta z_1}, \quad (3)$$

式中: $\Delta z$  为滚珠-沟槽在预紧力作用下的总变形量; $\Delta z_1$  为滚珠与导轨沟槽之间的变形量; $\Delta z_2$  为滚珠与滑块沟槽之间的变形量; $K_{n1}$  为滚珠与导轨沟槽之间的接触刚度; $K_{n2}$  为滚珠与滑块沟槽之间的刚度。

应用 Hertzian 接触理论也可以计算滚珠-沟槽之间的接触刚度<sup>[6-7]</sup>,其计算公式为

$$F = k_n \alpha^{3/2}, \quad (4)$$

$$K_n = \frac{dF}{d\alpha} \approx \frac{F}{\alpha}. \quad (5)$$

可将有限元接触分析的结果与 Hertzian 接触解析计算相对照,来校验滚珠-沟槽接触有限元建模的正确性。

### 1.2 预紧力对滚珠-沟槽接触刚度的影响

预紧力对滚珠-沟槽接触刚度有着重要的影响<sup>[8-10]</sup>,以下分别采用所创建的接触有限元模型以及 Hertzian 接触解析公式,来求解不同预紧力水平下的接触刚度值。

图 2 和图 3 分别为不同预紧力水平下,单个滚珠-沟槽的接触变形以及接触刚度的变化规律。从

图中可以看出,随着预紧力的增加接触变形量以及接触刚度均在增大,但变化趋势不是线性的;另外,接触变形量以及接触刚度增长率逐渐降低。对比有限元模型与 Hertzian 接触模型可以看出:有限元模型分析计算的接触刚度略小于根据 Hertzian 接触理论计算的接触刚度,但变化趋势是一致的。从而,可说明用接触有限元模型计算的接触刚度是正确的。

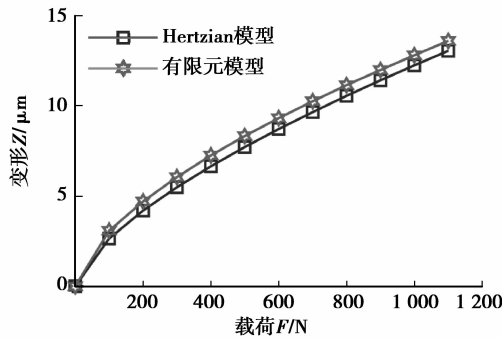


图 2 不同预紧力条件下滚珠-沟槽的接触变形

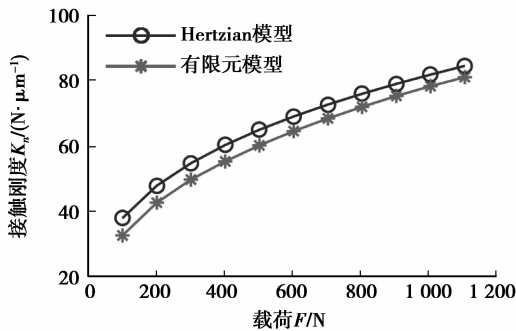


图 3 不同预紧力条件下滚珠-沟槽的接触刚度

接触有限元模型充分考虑滚珠与沟槽接触的各个影响因素,其精度应高于 Hertzian 接触模型计算的精度,因此,主要采纳接触有限元模型计算的结果。按照所绘制的图形,给定一个预紧力,可从图 3 中读取滚珠-沟槽的接触刚度值,用于后续导轨系统的有限元建模。

## 2 直线滚动导轨精细有限元建模方法

面向动力学分析需要,创建直线滚动导轨精细有限元模型可参照如下 3 个关键步骤:

1) 确定单个滚珠-沟槽接触刚度。参照第 1 节所述的方法,可从厂商所提供的导轨技术手册中查到预紧力以及接触有限元建模分析所需的各种参数。进一步,应用 ANSYS 软件计算在该预紧力下单个滚珠-沟槽的接触变形量  $\Delta z$ ,并根据式(1)至式(3)确定相应的接触刚度值。

2) 滚珠-沟槽弹簧质量单元建模。在直线滚动导轨动力学分析中,用弹簧阻尼单元模拟滚珠同沟槽的接触,具有较高的计算效率和精度,因而被广泛采用<sup>[11-12]</sup>。这里,对原有弹簧单元进行了修正(见图 4(a)),在考虑滚珠质量的前提下完成了滚珠-沟槽弹簧质量单元的建模,见图 4(b)。图中  $m$  为滚珠的质量, $K$  为滚珠-沟槽等效刚度, $K_R$ 、 $K_C$  分别为滚珠与导轨以及滑块接触的等效弹簧的刚度系数,且有  $K_R = K_{n1}$ ,  $K_C = K_{n2}$ ,  $\beta$  为接触角。可见,所创建的弹簧质量单元模型同第 1 节的接触有限元分析有很好的对应关系,与传统的弹簧单元相比更加细致。

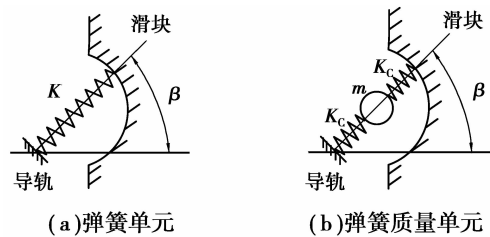


图 4 滚珠-沟槽的动力学建模

3) 直线滚动导轨整体有限元建模。以具有 4 排滚珠的直线滚动导轨系统为例,说明直线滚动导轨整体有限元建模方法。将每一个滚珠与沟槽之间的接触模型都等效为弹簧质量单元(如图 5 所示),按滚珠同沟槽的接触角  $\beta$  确定弹簧的方向,进一步用实体单元模拟滑块及轨道,从而完成了直线滚动导轨系统整体有限元模型的创建。该模型充分考虑了滚珠的分布性,与真实导轨结构更加接近。

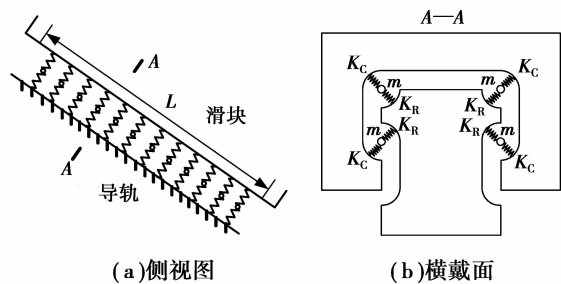


图 5 直线滚动导轨整体有限元建模

也可以采用拉格朗日方程完成导轨系统的解析建模<sup>[13-14]</sup>,对于上述导轨,其固有频率的求解公式为<sup>[15]</sup>

$$f_v = \frac{2 \sin \beta}{\pi} \sqrt{\frac{3K}{M}}, \quad (6)$$

$$f_\theta = \frac{L \sin \beta}{12\pi} \sqrt{\frac{143K}{J_y}}, \quad (7)$$

$$f_\psi = \frac{L \cos \beta}{12\pi} \sqrt{\frac{143K}{J_z}}, \quad (8)$$

$$f_u = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Mc_{22} + J_x c_{11} + \sqrt{(Mc_{22} + J_x c_{11})^2 - 4MJ_x(c_{11}c_{22} - c_{12}^2)}}{2MJ_x}}, \quad (9)$$

$$f_\varphi = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Mc_{22} + J_x c_{11} - \sqrt{(Mc_{22} + J_x c_{11})^2 - 4MJ_x(c_{11}c_{22} - c_{12}^2)}}{2MJ_x}}. \quad (10)$$

其中:  $f_v$ 、 $f_\theta$ 、 $f_\psi$ 、 $f_u$ 、 $f_\varphi$  分别为对应垂直、俯仰、偏航、低阶侧翻及高阶侧翻运动的固有频率;  $L$  为滚珠受力区长度;  $J_x$ 、 $J_y$ 、 $J_z$  为滑块绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴转动惯量;  $M$  为滑块质量,  $c_{11}$ 、 $c_{12}$ 、 $c_{22}$  分别为与导轨几何形状及滚珠刚度相关的系数。

可以将拉格朗日方程解析建模与所提出的精细有限元建模方法进行对照, 以说明所提出的建模方法的合理性。

### 3 研究实例

采用提出的精细有限元建模方法对 THK 公司生产的 SHS-35R 型导轨系统进行固有特性分析并与解析计算结果进行对照。

#### 3.1 直线滚动导轨的整体有限元建模

按照 THK 公司提供的导轨技术手册, 查找 SHS-35R 型导轨主要参数见表 2。由图 3 可知在轻度及中度预紧力作用下, 滚珠-沟槽的接触刚度分别为  $54.70 \text{ N}/\mu\text{m}$  和  $79.32 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。

表 2 直线滚动导轨的主要参数

主要参数	主要参数值
接触点垂向距离/m	$8.0285 \times 10^{-3}$
接触点垂向距离/m	$19.2035 \times 10^{-3}$
接触点水平距离/m	$18.5875 \times 10^{-3}$
滑块质量 $M/\text{kg}$	1.811
滑块绕 $X$ 轴转动惯量 $J_x/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$1.2085 \times 10^{-3}$
滑块绕 $Y$ 轴转动惯量 $J_y/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$1.6014 \times 10^{-3}$
滑块绕 $Z$ 轴转动惯量 $J_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$2.2176 \times 10^{-3}$
滚珠受力区的长度 $L/\text{m}$	$93 \times 10^{-3}$
接触角 $\beta/(\circ)$	45
轻度预紧力/N	390
中度预紧力/N	1040
每排沟槽中滚珠的平均数量 $n$	12

进一步, 按照第 2 节所述方法, 可完成导轨系统整体有限元模型创建, 见图 6。这里, 导轨与滑块之间的每个滚珠都用弹簧单元 COMBIN14 及质量单元 MASS21 来代替。该模型节点总数为 13 136 个, 单元总数为 10 383 个, 其中 COMBIN14 单元 96 个, MASS21 单元 48 个。

需要说明的是, 这里导轨建模略去了滑块两端的端盖以及滚珠之间的保持架。在整个导轨系统中, 相对于轨道、滑块和滚珠等导轨质量的主要组成部分,

端盖及保持架的质量很小, 忽略这些部件将不会对整个导轨系统的动力学建模精度造成明显的影响。

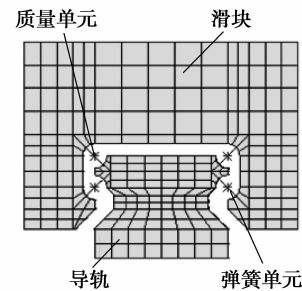


图 6 直线滚动导轨整体有限元模型

#### 3.2 导轨系统固有特性分析

应用 ANSYS 软件进行模态分析, 最终得到导轨系统的前 5 阶固有频率(见表 5)及振型(见图 7)。轻度预紧与中度预紧的固有频率不同, 中度预紧的刚度大, 因此, 固有频率也较轻度预紧高; 但两者的模态振型是一致的, 模态振型如图 7 所示。

表 5 有限元分析与理论计算结果对比

(a) 轻度预紧 ( $F=390 \text{ N}$ )			
阶数	有限元方法	拉格朗日方程	差值
	频率 $f_A/\text{Hz}$	频率 $f_B/\text{Hz}$	$ f_A - f_B /f_B/\%$
1	1 308.5	1 421.5	7.95
2	2 105.6	2 316.6	9.11
3	2 681.1	2 726.0	1.65
4	2 925.2	3 030.0	3.46
5	4 022.8	3 792.0	6.09

(b) 中度预紧 ( $F=1040 \text{ N}$ )			
阶数	有限元方法	拉格朗日方程	差值
	频率 $f_A/\text{Hz}$	频率 $f_B/\text{Hz}$	$ f_A - f_B /f_B/\%$
1	1 499.2	1 711.8	12.42
2	2 444.8	2 789.6	12.36
3	3 110.6	3 282.6	5.24
4	3 409.2	3 648.7	6.56
5	4 718.8	4 566.3	3.34

进一步, 采用式(6)至式(10)所示的解析法求解该导轨系统的固有频率, 结果也列在表 5 中。从两者的对比可以看出: 应用有限元法分析与应用拉格朗日方程计算结果基本一致, 可以说明所采用的有限元建模方法的合理性。

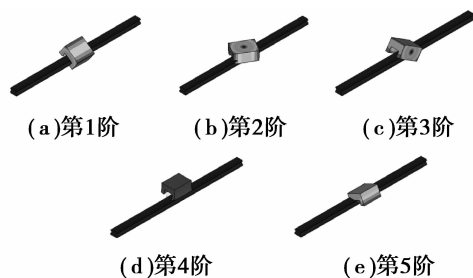


图7 前5阶模态振型

## 4 结论

笔者面向直线滚动导轨,提出了一种具有通用性的有限元建模方法,具体内容包括:

1) 创建了滚珠-沟槽接触有限元模型,由此可确定不同预紧力条件下滚珠-沟槽接触的接触刚度。

2) 提出了创建直线滚动导轨精细有限元模型可参照如下3个关键步骤,包括:确定单个滚珠-沟槽接触刚度、滚珠-沟槽弹簧质量单元建模、直线滚动导轨整体建模等。

3) 以THK公司的SHS-35R型直线滚动导轨为例,应用提出的建模方法对其固有特性进行了分析,获得前5阶固有频率及对应的振型,并与解析计算结果进行了比较。通过对比,发现两种方法获得的直线滚动导轨的固有频率基本一致,由此说明了提出的直线滚动导轨精细有限元建模方法的正确性。

笔者重点研究了导轨-滑块法向动力学特性,在机床的工作过程中,导轨-滑块运动方向的动力学特性也至关重要。研究导轨运动方向的动力学特性,需要考虑滚珠与沟槽之间摩擦阻尼,动力学模型将更加复杂,可作为今后导轨动力学建模研究的重要发展方向。

### 参考文献:

- [1] Dhupia J S, Ulsoy A G, Katz R, et al. Experimental identification of the nonlinear parameters of an industrial translational guide for machine performance evaluation[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2008, 14(5):645-668.
- [2] Yong-Sub Y, Kim Y Y, Choi J S, et al. 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.
- [3] 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. ZHANG Yaoman, LIU Chunshi, XIE Zhikun, et al. Finite element analysis of NC machine tool considering linear rolling guide-way[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2007(7):75-78.
- [4] 毛宽民,李斌,谢波,等. 滚动直线导轨副可动结合部

动力学建模[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2008, 36(8):85-88.

MAO Kuanmin, LI Bin, XIE Bo, et al. Dynamic modeling of the movable joint on rolling linear guide[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2008, 36(8):85-88.

- [5] 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.
- [6] Wu J S S, Chang J C, Tsai G A, et al. The effect of bending loads on the dynamic behaviors of a rolling guide [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(3):671-680.
- [7] 朱才朝,罗召霞,宁杰,等. 新型双曲柄内齿行星减速器的接触分析[J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(4):402-407. ZHU Caichao, LUO Zhaoxia, NING Jie, et al. Contact analysis of a new-style planetary reducer with a double crank and internal gear board[J]. *Journal of Chongqing University*, 2009, 32(4):402-407.
- [8] Hung J P, Lai Y L, Lin C Y, et al. Modeling the machining stability of a vertical milling machine under the influence of the preloaded linear guide [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, 51(9):731-739.
- [9] Ohta H, Tanaka K. Vertical stiffnesses of preloaded linear guideway type ball bearings incorporating the flexibility of the carriage and rail[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2010, 132(1):1-9.
- [10] Hung J P, Lin C Y, Luo T L. Fault detection of linear guide preload of a positioning stage with vibration-acoustic analysis[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2011, 11(6):684-692.
- [11] 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.
- [12] Ohta H. Sound of linear guideway type recirculating linear ball bearings [J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 1999, 121(4):678-685.
- [13] 闻邦椿,刘树英,张纯宇. *机械振动学*[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [14] Ohta H, Hayashi E. Vibration of linear guideway type recirculating linear ball bearings[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 235(5):847-861.
- [15] 孙伟,汪博,鲁明,等. 基于拉格朗日方程的直线滚动导轨系统解析建模[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(4):781-786. SUN Wei, WANG Bo, LU Ming, et al. Analytical modeling of linear rolling guide system based on Lagrange equation [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(4):781-786.

(编辑 张 苹)