

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.03.011

# 滚柱直线导轨结合面的振动分析

成建平, 杨家军\*, 程远雄, 赵美玲

(华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为了实现滚动直线导轨的整体动力学性能的较精确计算,建立了滚动直线导轨结合面的动力学模型。首先,以滚柱直线导轨作为研究对象,利用弹簧单元模拟结合面导轨与滑块的接触,采用Palmgren的经验公式,通过等效的方法计算了弹簧单元的刚度等参数,建立了弹簧位移与系统广义坐标的函数关系,运用拉格朗日方法建立了系统的振动微分方程;最后,采用动力学仿真软件ADAMS创建了动力学模型,计算出了系统的固有频率及其对应的振型。研究表明,滚柱直线导轨的固有频率较高,这与滚柱直线导轨的高刚度特性是一致的,所建立的动力学模型可以应用到其他的动力学分析中。

**关键词:** 滚柱直线导轨; 结合面; Palmgren经验公式; ADAMS

**中图分类号:** TH113.1 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2013)03-0296-04

## Vibration analysis of roller linear guide's contact interface

CHENG Jian-ping, YANG Jia-jun, CHENG Yuan-xiong, ZHAO Mei-ling

(School of Mechanical Design and Theory, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to realize the accurate calculation of the linear rolling guide's overall dynamics performance, the dynamic model of the linear rolling guide involving the contact interface was established. Based on roller linear guide as the research object, spring element was used. The Palmgren's experience formula was applied to calculate the stiffness in equivalent method. After the relationship between the displacement of the spring and the general coordinates of the system was built, the system's vibration differential equation was established by using Lagrange equation. Finally, with the dynamics simulation software ADAMS, the dynamic model was created and the natural frequency of the system and its corresponding vibration mode were calculated. The results indicate that the system has a high frequency which is consistent with the high stiffness of roller linear guide, and the dynamic model can be used in some other dynamic analysis.

**Key words:** roller linear guide; contact interface; Palmgren empirical formula; ADAMS

## 0 引言

在工程应用中,为了防止机械装备被破坏,或者是针对诸如数控机床一类有高精度要求的机械装备,往往要求装备的各阶固有频率远离工作频率,这时研究者就需要对装备进行动力学分析。滚动直线导轨广泛地应用于数控机床一类的高精度的机械装备中,属于其中的关键部件,该部件的动力学特性不仅影响自身的寿命,还直接影响到机械装备的精度。

滚动直线导轨主要由滑块、导轨、滚动体以及其他附属件等组成,滚动体可以是滚珠或者滚柱。对于

滚柱直线导轨,由于是线接触,具有更高的刚度,常常作为重载荷机械装备的首选。目前,对滚动直线导轨的静力学特性研究比较多,而对其动力学特性的研究则比较少。在目前的研究中,研究者常常用阻尼弹簧单元来模拟导轨和滑块的接触<sup>[1-2]</sup>,Hiroyuki Ohta用阻尼弹簧代替滚珠,建立了滚珠直线导轨的动力学模型,通过有限元分析软件得到了模型求解,并且通过实验说明了模型的不同模态对系统动力学性能的影响,但是由于滚珠太多,阻尼弹簧单元的数量较多,对计算机要求比较高。也有研究人员利用分形理论,通过设计一种无厚度的三维薄膜单元来模拟<sup>[3-4]</sup>,谢波在

收稿日期: 2012-10-30

作者简介: 成建平(1988-),男,湖北咸宁人,主要从事数控机床相关功能性关键部件方面的研究。E-mail:thinkself@yahoo.cn

通信联系人: 杨家军,男,教授,博士生导师。E-mail:yjjar@sina.com

论文中采用一个独立的多节点单元来模拟滚动直线导轨的结合面,可以解决接触的非线性问题,测试所得结论比阻尼弹簧单元的精度要高,但是对单元本身的相关参数的确定过程相对比较复杂。孙伟<sup>[5]</sup>在论文中提到,用一种假想材料模拟结合面,在导轨滑块和轨道之间加入假想的弹性垫片,来模拟结合面的刚度,并通过实验的方法来修正弹性垫片的参数。

虚拟样机技术越来越多地应用到各种领域中,对于动力学的分析,也有很多软件具有这一功能,如 ANSYS 提供了 Modal、Dynamic 等功能模块,ADAMS 提供了振动模块。本研究采用 ADAMS 提供的线性模块进行动力学建模和分析。ADAMS(即机械系统动力学自动分析)是美国 MSC 公司开发的虚拟样机分析软件,已经被世界各行各业的主要制造商采用,占据了一半以上的市场。ADAMS 的求解器采用多刚体动力学中的拉格朗日方程法,通过建立系统动力学方程,可以进行静力学、运动学和动力学分析,并且具有较好的后处理功能。

本研究采用振动理论,通过采用 8 个弹簧建立系统的振动模型,并且采用一种新的建模方法,利用 ADAMS 的功能建立滚柱直线导轨振动仿真模型,在弹簧单元的参数识别上,通过等效的方法确定刚度。本研究以滚柱直线导轨为研究对象,为了重点研究滚柱直线导轨结合部的动力学模型,把滑块和导轨看作是刚体,并且采用弹簧单元模拟直线导轨结合部,建立一个多刚体的振动系统。

## 1 振动模型

本研究首先对滚柱直线导轨进行简化,仅包括滑块和导轨两个部分,并且用弹簧单元连接滑块和导轨,把导轨和滑块看成是刚体。笔者将导轨与地面固定,这样系统具有 5 个自由度,包括滑块分别绕  $y$  轴和  $z$  轴的直线运动,分别绕轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$  的转动。滑块在  $x$  方向是自由运动,不需要考虑到振动系统中去。一般把振动系统的这 5 种运动对应的定义为:左右运动  $u$ 、上下运动  $v$ 、侧翻运动  $\Phi$ 、俯仰运动  $\theta$  以及偏航运动  $\varphi$ 。这样研究者可以用 8 个具有阻尼的弹簧单元表达这 5 种运动情形,建立一个多刚体的振动模型,阻尼弹簧单元的动力学模型如图 1 所示<sup>[6]</sup>。按顺时针方向,左上角为第一组弹簧,定义为第 1、2 根,然后依次定义为第 3、4、5、6、7、8 根。

## 2 弹簧单元的刚度

无论是采用振动理论对系统振动模型求解,还是利用仿真模型直接进行求解,对模型中参数的确定是关键的一步。该系统模型中需要确定的参数包括阻尼弹簧

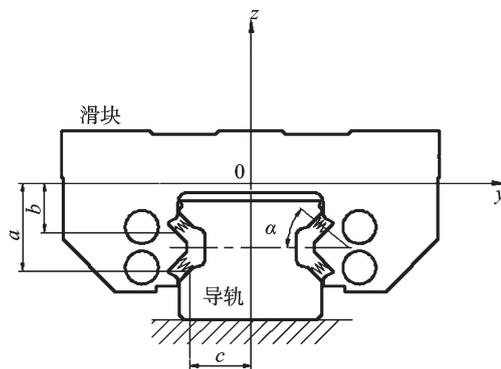


图1 阻尼弹簧单元的动力学模型

单元的刚度。本研究通过计算每个滚柱的接触刚度,然后计算多个滚柱的等效刚度,便可以求得所需参数。

本研究采用 Palmgren 的经验公式计算得到每个滚柱的接触刚度,从而计算模拟弹簧的等效刚度等参数<sup>[7-8]</sup>。

根据 Palmgren 的经验公式,圆柱中心与平面间的相对趋近量为:

$$\delta = 3.81 \times \left[ \frac{2(1-\mu^2)}{\pi E} \right]^{0.9} \frac{Q^{0.9}}{l^{0.8}} \quad (1)$$

式中:  $\delta$ —圆柱中心与平面间的相对趋近量, mm;  $\mu$ —材料的泊松比;  $E$ —材料的杨氏模量, MPa;  $Q$ —圆柱与平面的作用力, N;  $l$ —圆柱与平面的接触长度, mm。

本研究采用的导轨是凯特精机的 LGR 系列滚柱直线导轨 LGR45EA, 该直线导轨的圆柱滚子与导轨、滑块为线接触, 在承受高负荷时仅形成微小的弹性变形; 直线导轨采用 DB45 组合, 能承受上、下、左、右四向等载荷。相关参数如表 1 所示。

表1 滚柱直线导轨 LGR45EA 的结构参数

杨氏模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	滚柱长度 $l/\text{mm}$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	滑块长度 $L/\text{mm}$	单列滚柱个数 $Z$
206	0.3	7	$7.8 \times 10^3$	105	221

将数据代入公式,得:

$$\delta = 8.096 \times 10^{-6} Q^{0.9}$$

公式对应的曲线图如图 2 所示,通过对曲线进行线性拟合得到:单个滚柱的接触刚度  $k = 3.33 \times 10^5 \text{ N/mm}$ 。

考虑到滚柱分别与滑块和导轨有相对趋近量,所以每根模拟弹簧的刚度为  $K_n = 1/4 \times 21 k = 1.75 \times 10^6 \text{ N/mm}$ ,其中弹簧处在滑块长度方向 1/4 和 3/4 处。

表 1 中列出的参数滚柱长度、单列滚柱个数是一个估计值,并且在计算过程中也忽略了一些因素,如在不同受力的时候,参与接触的滚柱个数不一样;为了消除滚柱从载荷区到非载荷区的变化过程中的噪音,滑块会存在不一样的工艺,接触的滚柱个数也会不一样;

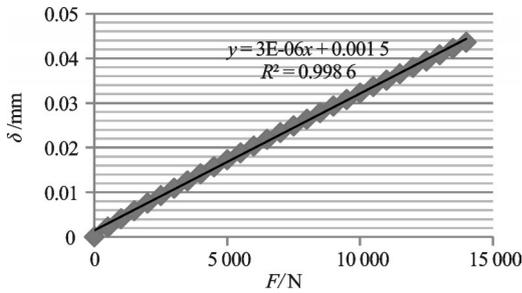


图2 单个滚柱的接触刚度曲线

滚柱本身的工艺对滚柱的接触长度的影响等。

本研究重点对滚柱直线导轨进行模态分析,分析振动系统的固有频率。该系统中存在起润滑作用的油膜,具有小的粘性阻尼,会影响系统的共振响应,但系统的阻尼对系统的固有频率无影响,所以笔者忽略系统的阻尼。

### 3 系统振动微分方程

研究者可以用影响系数法来确定系统的质量矩阵、刚度矩阵以及阻尼矩阵,在此基础上确定系统的振动微分方程;也可以用拉格朗日方程来建立系统的振动微分方程。

本研究采用拉格朗日方程方法。滚柱直线导轨除了受到驱动力外,还会受到各个方向的力和力矩,所以方程组中既有关于力的微分方程,也有关于力矩的微分方程。

本研究以滑块质心为原点建立直角坐标系,绕轴的转动以沿着坐标系逆时针方向为正方向,如图1所示。本研究设定左右运动  $u$ 、上下运动  $v$ 、侧翻运动  $\Phi$ 、俯仰运动  $\theta$  以及偏航运动  $\varphi$  为系统的广义坐标。滑块的相关参数如表2所示。

本研究描述的是一个具有5个自由度的振动系统,首先计算系统的动能和势能,并表示为5个广义坐标的函数。

表2 滚柱直线导轨质量参数

滑块质量 $M / \text{kg}$	转动惯量 $J_x / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	转动惯量 $J_y / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	转动惯量 $J_z / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
2.9	$4.47 \times 10^{-3}$	$2.29 \times 10^{-3}$	$6.40 \times 10^{-3}$

系统的动能为:

$$T = \frac{1}{2} M \dot{u}^2 + \frac{1}{2} M \dot{v}^2 + \frac{1}{2} J_x \dot{\Phi}^2 + \frac{1}{2} J_y \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_z \dot{\varphi}^2 \quad (2)$$

系统的势能为:

$$U = \frac{1}{2} K_n \sum_{i=1}^8 x_i^2 \quad (3)$$

式中:  $x_i$  一对应弹簧的变形量,是  $u$ 、 $v$ 、 $\Phi$ 、 $\theta$ 、 $\varphi$  的函数,根据滑块的结构参数(如图1所示),笔者可以求得它们之间的关系。

$u$  对  $x_i$  的贡献:

$$x_i = -u \cos \alpha \quad (i = 1, 2, 7, 8) \quad (4)$$

$$x_i = u \cos \alpha \quad (i = 3, 4, 5, 6) \quad (5)$$

$v$  对  $x_i$  的贡献:

$$x_i = -v \sin \alpha \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

$$x_i = v \sin \alpha \quad (i = 5, 6, 7, 8) \quad (7)$$

$\Phi$  对  $x_i$  的贡献:

当  $i = 1, 2$  时:

$$x_i = -\sqrt{b^2 + c^2} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \cos(45 + \frac{180 - \Phi}{2} - \arctan \frac{b}{c}) \quad (8)$$

当  $i = 3, 4$  时,  $x_i$  刚好为上述值的相反数。

当  $i = 5, 6$  时:

$$x_i = \sqrt{a^2 + c^2} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \cos(45 + \frac{180 - \Phi}{2} - \arctan \frac{a}{c}) \quad (9)$$

$i = 7, 8$  时,  $x_i$  刚好为上述值的相反数。

$\theta$  对  $x_i$  的贡献:

当  $i = 1, 3$  时:

$$x_i = -\sqrt{b^2 + (\frac{L}{2})^2} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \cos(45 + \frac{180 - \theta}{2} - \arctan \frac{L}{2b}) \quad (10)$$

当  $i = 2, 4$  时,  $x_i$  刚好为上述值的相反数。

当  $i = 5, 7$  时:

$$x_i = -\sqrt{a^2 + (\frac{L}{2})^2} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \cos(45 + \frac{180 - \theta}{2} - \arctan \frac{L}{2a}) \quad (11)$$

当  $i = 6, 8$  时,  $x_i$  刚好为上述值的相反数。

$\varphi$  对  $x_i$  的贡献:

当  $i = 1, 4, 6, 7$  时:

$$x_i = -\sqrt{c^2 + (\frac{L}{2})^2} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \cos(45 + \frac{180 - \varphi}{2} - \arctan \frac{L}{2c}) \quad (12)$$

$i = 2, 3, 5, 8$  时,  $x_i$  刚好为上述值的相反数。

拉格朗日函数为:

$$L = T - U \quad (13)$$

笔者忽略阻尼的影响,对5个广义坐标分别应用拉格朗日方程:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_i} = 0 \quad (14)$$

联合以上各式可以得到系统的振动微分方程,从整个求解的过程中可以看到各个变量之间的关系,下面通过ADAMS进行求解。

### 4 ADAMS 仿真模型及求解

本研究建立的振动模型是刚体动力学系统模型,ADAMS在刚体动力学方面存在很多优势,提供了大量常用的运动副,包括转动副、移动副、凸轮副、齿轮副以及弹簧等接触对。另外本研究提供了线性化分析模块ADAMS/Linear,可以用于快速计算系统的固有

特性,如固有频率、振型等<sup>[9]</sup>。

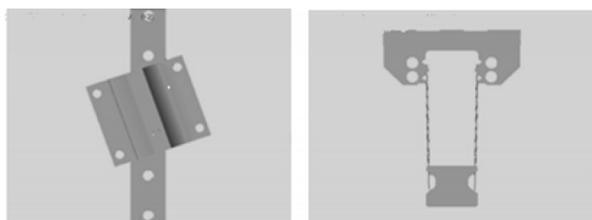
本研究利用 ADAMS 的线性模块进行了振动分析,得到了系统的固有频率及振型<sup>[10-11]</sup>。基本求解过程如下:①用 SolidWorks 建立三维模型,转换成 Parasolid(x\_t)格式,导入到 ADAMS 中。②在滑块和导轨之间建立 8 个弹簧单元,并输入刚度等参数,为了方便建立弹簧,创建模型的时候,在相应的位置创建几个小圆柱,模型如图 3 所示。③进行仿真,首先创建脚本,选择 Simulate/Transient 和 Eigen Solution Calculation,设置 End time 和 Steps,最后选择 Scripted Controls 对模型进行仿真。④在 Linear modes controls 中查看系统的振动特性信息,共 6 阶模态以及每阶模态的振动频率。结果如表 3、图 4 所示。

表 3 振型及对应的频率

阶次	1	2	3	4	5	6
振型		偏航	侧翻	俯仰	上下	左右
频率/Hz	0	4 387	4 716	6 424	7 843	9 036



图 3 ADAMS 动力学仿真模型



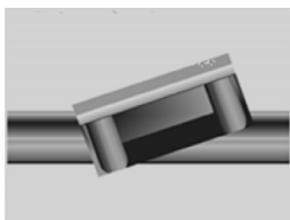
(a) 偏航

(b) 上下



(c) 侧翻

(d) 左右



(e) 俯仰

图 4 滚柱直线导轨的振型

## 5 结束语

在滚柱直线导轨的动力学分析中,建立一种连接滑块和导轨的单元是解决问题的关键,而辨识该种单元的刚度等参数又是困难所在。本研究采用了 8 个弹簧单元,模拟了滚柱直线导轨的几种振动振型,利用拉格朗日方程建立了系统的振动微分方程。笔者通过 Palmgren 的经验公式,计算出了每个滚柱的接触刚度,通过多个滚柱的等效得到了弹簧单元的刚度等参数。

在建立系统的振动微分过程中,本研究建立了弹簧的变形量和定义的广义坐标的函数关系,从而建立了拉格朗日函数,并求得系统的振动微分方程。

本研究通过得到系统的振动微分方程的过程揭示了系统模态的求解方法,然后通过动力学分析软件 ADAMS 进行仿真,得到了求解结果。从 ADAMS 仿真结果看,滚柱直线导轨的振动特性中固有频率比较高,这与滚柱直线导轨具有高刚度的特性是一致的。

## 参考文献 (References):

- [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] WU J 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.
- [3] CUI Zhi-qin, JING Yin-ping. Application of virtual material in joint surface of complex assembled structures [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(s2): 421-424.
- [4] 谢波, 李斌. 滚动直线导轨副可动结合部的动力学建模 [D]. 武汉: 华中科技大学机械科学与工程学院, 2007.
- [5] 孙伟, 鲁明. 直线滚动导轨动力学特性分析方法研究 [J]. *制造技术与机床*, 2011(3): 48-52.
- [6] 羊拯民. 机械振动与噪声 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 1-77.
- [7] 刘曙光, 孙健利. 滚柱直线导轨副的力学性能分析 [D]. 武汉: 华中科技大学机械科学与工程学院, 2011.
- [8] 李慎奎. 直线滚动导轨结合面动态特性的研究 [D]. 沈阳: 东北大学机械工程与自动化学院, 2008.
- [9] 郭卫东. 虚拟样机技术与 ADAMS 应用实例教程 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [10] 蒋书运, 祝书龙. 带滚珠丝杠副的直线导轨结合部动态刚度特性 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(1): 92-98.
- [11] 史安娜, 孙伟. 基于 ADAMS 的导轨系统动力学特性分析 [J]. *机械制造*, 2011, 49(2): 20-22.

[编辑: 李辉]