

## 基于 ANSYS Workbench 的滚珠丝杠副模态分析

魏效玲, 王佳宁, 刘强

(河北工程大学 机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 针对滚珠丝杠副在外力作用下容易产生变形、振动等特点, 以滚珠丝杠副为研究对象, 应用 Solid Works 软件建立滚珠丝杠副三维装配体模型, 简化后导入到 ANSYS Workbench 软件中, 在对模型设置约束条件和划分网格后, 对其进行模态分析, 结果表明: 滚珠丝杠副的前六阶振型都为弯曲变形振动, 在第六阶固有频率下, 丝杠正中位置振动幅度最大, 为滚珠丝杠副的薄弱环节。

**关键词:** 滚珠丝杠副; 有限元; 模态分析

中图分类号: TG502.3

文献标识码: A

## Modal Analysis of Ball Screw Based on ANSYS Workbench

WEI Xiaoling, WANG Jianing, LIU Qiang

(College of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** Aiming at the characteristics of easy deformation and vibration of ball screw under the action of external force, the three-dimensional assembly model of ball screw is established by using SolidWorks software, and then it is simplified into ANSYS Workbench software. After setting the constraint conditions and meshing the model, the modal analysis is carried out to obtain the first six natural frequencies and vibration modes of ball screw. The results show that the first six vibration modes of ball screw are bending deformation, and the middle position's vibration amplitude of the screw is the largest in the natural frequency of the sixth order, which is the weak link of ball screw.

**Key words:** ball screw; FEM; modal analysis

滚珠丝杠副具有高精度、可逆性和高效率的优点, 被广泛应用于数控机床伺服进给系统中。随着数控机床不断向高速度、高精度和高可靠性方向发展, 对滚珠丝杠副的动态性能也提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。滚珠丝杠副属于低刚度部件, 在外力的作用下容易产生变形、振动和噪声, 如果激振频率接近滚珠丝杠副的共振频率, 系统可能会产生共振, 会直接影响零件的加工精度和表面质量。因此, 对滚珠丝杠副的动态特性进行分析研究具有重要意义。前人的研究工作虽然获取了很多的成果<sup>[2-4]</sup>, 但也有些问题, 如仅对丝杠进行模态分析、有限元模型过于简单等。本文首先建立了适当简化的滚珠丝杠副三维装配体模型, 并建立了较为完整的有限元模型,

对滚珠丝杠副模型进行模态分析, 得到滚珠丝杠副的固有频率和振型, 为滚珠丝杠副结构的优化设计奠定基础。

### 1 滚珠丝杠副建模

#### 1.1 滚珠丝杠副三维模型的建立

本文以某数控加工中心使用的 CM2004 型滚珠丝杠副为研究对象, 丝杠的公称直径  $d_0=20$  mm, 基本导程  $P_h=4$  mm, 滚珠直径  $d_b=2.381$  mm。应用 Solid Works 软件建立其三维装配模型, 忽略对滚珠丝杠副仿真分析结果几乎无影响的键槽、倒角、孔等, 并对各个零件模型进行装配。装配时, 要使滚珠精

确定位,需要将滚珠安装螺旋线与螺母和丝杠的滚道螺旋扫描线三线重合,得到滚珠丝杠副的三维装配模型如图1所示。

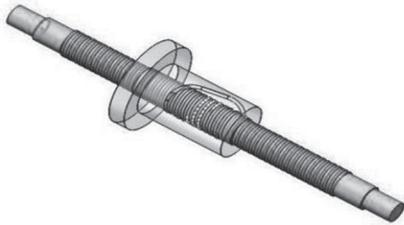


图1 滚珠丝杠副三维装配体模型

Fig.1 Three-dimensional assembly model of ball screw

## 1.2 滚珠丝杠副有限元模型的建立

将滚珠丝杠副模型以IGES格式导入到ANSYS Workbench软件中。设置滚珠丝杠副材料属性为:弹性模量 $E=210\ 000\ \text{MPa}$ ,泊松比 $\mu=0.3$ ,材料密度 $\rho=7\ 850\ \text{kg/m}^3$ 。在对滚珠丝杠副进行模态分析时,如果采用不同的约束对分析结果将会产生直接的影响,边界条件不同,所得模态参数也不同。根据滚珠丝杠副的实际运行情况,约束丝杠两个端面沿着x、y、z方向的直线移动和绕y、z轴的旋转,对螺母沿x方向的移动不进行约束,约束其余的五个自由度<sup>[5]</sup>。进入Modal模块中进行网格划分,设置单元类型为四面体单元,并采用自动划分法对滚珠丝杠副三维装配模型进行网格划分<sup>[6]</sup>。滚珠丝杠副有限元模型如图2所示。

## 2 滚珠丝杠副模态分析

模态分析是计算结构振动特性的数值技术,结构振动特性包括固有频率和振型。模态分析是最基本的动力学分析,也是其他动力学分析的基础。模

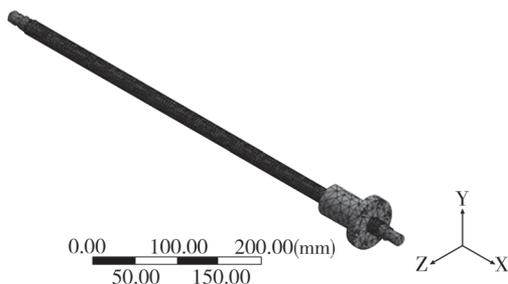


图2 滚珠丝杠副有限元模型

Fig.2 Finite element model of ball screw

态分析可以帮助设计人员确定结构的固有频率和振型,从而使结构设计避免共振<sup>[7]</sup>。

## 2.1 有限元模态分析理论基础

有限元模态分析的过程由两部分组成,首先构造系统的模态模型,然后对其进行数值分析。自由振动系统方程为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (1)$$

式中 $[M]$ —结构质量矩阵; $[C]$ —结构阻尼矩阵; $[K]$ —结构刚度矩阵; $\{x\}$ —位移向量; $\{F\}$ —外部载荷向量。

由于结构的阻尼对模态的频率和振型影响很小,所以可将阻尼忽略。系统的无阻尼自由振动系统方程为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (2)$$

将(2)式写成位移向量的形式为:

$$\{x\} = \{X\} \sin(\omega_n t + \varphi) \quad (3)$$

对其求导得:

$$\{\dot{x}\} = -\omega_n^2 \{X\} \sin(\omega_n t + \varphi) \quad (4)$$

将(3)、(4)式带入(2)式得到系统的特征方程为

$$([K] - \omega_n^2 [M])\{X\} = 0 \quad (5)$$

要想让上式(5)成立,必须使得矩阵的行列式等于零,特征方程式(6)如下:

$$\Delta(\omega_n^2) = |[K] - \omega_n^2 [M]| = 0 \quad (6)$$

对(6)式进行求解得出特征值,特征值的平方根就是系统的固有频率,将固有频率代入到特征方程式(5)中,求解所得的幅值矩阵 $\{X\}$ 即为振型向量。

## 2.2 滚珠丝杠副的模态分析结果

由于滚珠丝杠副模态分析中高阶模态对结构振动影响很小,当模态阶数较高时,滚珠丝杠副的固有频率远离其振动频率,产生的振型较复杂,且对结构的动态特性分析不起主导作用,因此动态特性分析只提取前六阶对结构振型进行分析<sup>[8]</sup>。通过Frequency Finder模态求解器对滚珠丝杠副进行自由模态求解,计算得出丝杠副各阶固有频率和相应振型。滚珠丝杠副的前六阶固有频率及振型见表1。

由表1可以看出:滚珠丝杠副1、2阶,3、4阶,5、6阶的固有频率比较接近,振型基本相同,表1

表 1 滚珠丝杠副前六阶固有频率和振型  
Tab.1 The first six natural frequencies and mode shapes of ball screw

阶数	固有频率 /Hz	振型
1	122.16	丝杠沿 z 轴正方向一次弯曲变形
2	122.65	丝杠沿 y 轴正方向一次弯曲变形
3	355.80	丝杠沿 z 轴正方向二次弯曲变形
4	356.64	丝杠沿 y 轴负方向二次弯曲变形
5	732.59	丝杠沿 z 轴正方向三次弯曲变形
6	734.80	丝杠沿 y 轴负方向三次弯曲变形

中的各阶频率为滚珠丝杠副的固有频率，在对滚珠丝杠副进行优化设计时要使系统的工作频率远离滚珠丝杠副的固有频率，防止其发生共振。

通过滚珠丝杠副模态分析获得的前六阶固有频率相对应的振型如图 3 所示。从图中可以看到滚珠丝杠副的振型都为弯曲变形振动，在第六阶固有频率下，丝杠沿 y 轴负方向三次弯曲变形且在丝杠正

中位置振动幅度最大，故丝杠正中位置为滚珠丝杠副的薄弱环节。丝杠的振动会对数控机床的生产加工产生不利的影响<sup>[6]</sup>。

### 3 结论

1) 通过对滚珠丝杠副进行建模和模态分析，确定了滚珠丝杠副的固有频率和振型，为滚珠丝杠副

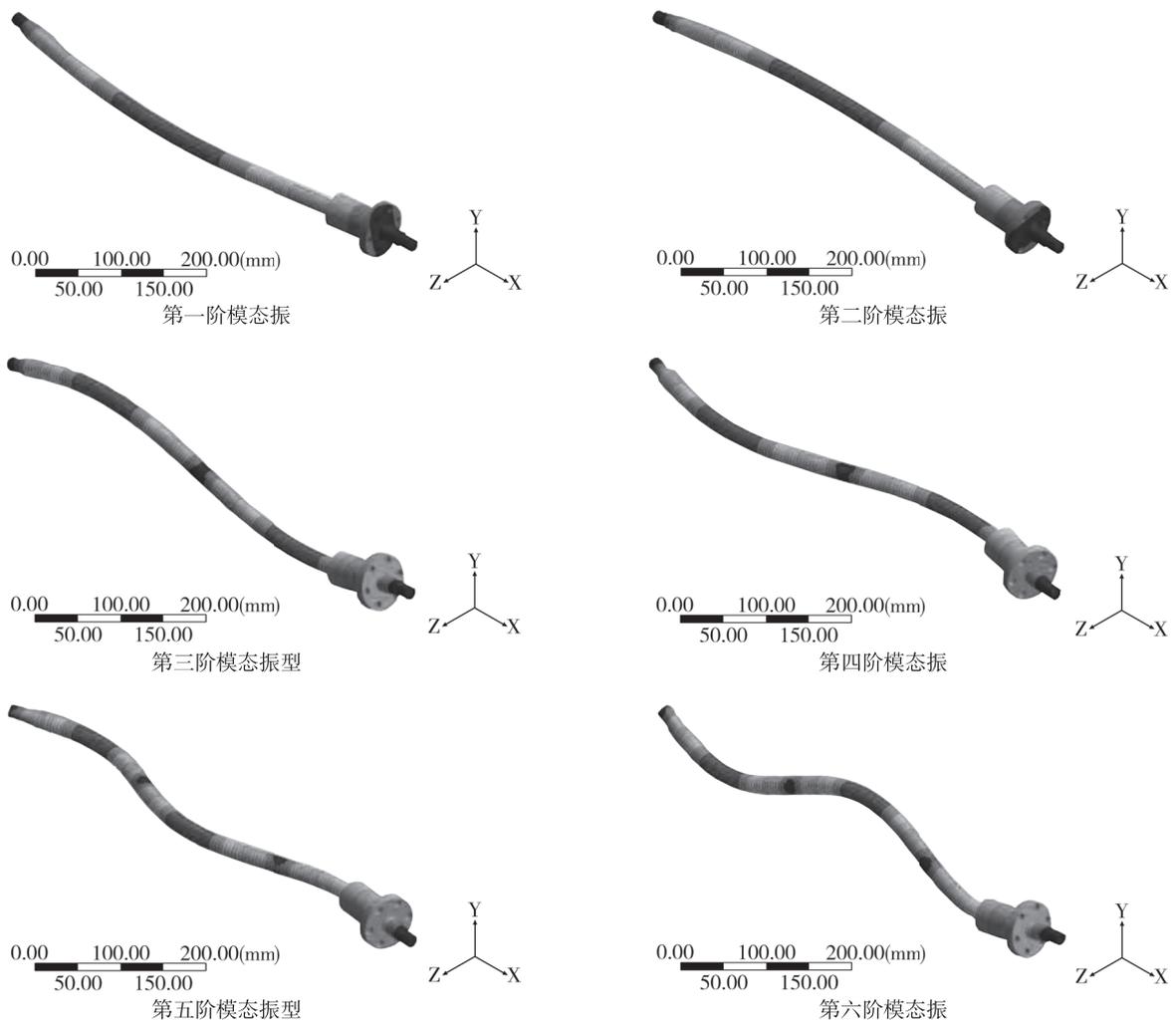


图 3 滚珠丝杠副的前六阶振型图

Fig.3 The first six mode shapes of ball screw

的振动特性分析提供了可靠的理论依据。

2) 丝杠正中位置变形较大,为滚珠丝杠副振动的薄弱环节,在对滚珠丝杠副进行结构设计和优化分析时应该对其采取相应的加强措施,如改变丝杠的材料及其支撑形式,提高滚珠丝杠副的刚度,减小丝杠变形等。

#### 参考文献:

- [1] 李晓,王科社,郝大贤,等.基于ADAMS的滚珠丝杠副动力学建模与仿真[J].机床与液压,2015(13):142-144.
- [2] 宁怀明,王彦红.THK滚珠丝杠基于ANSYS的动态分析[J].煤炭技术,2010,29(7):18-19.
- [3] 安琦瑜,冯平法,郁鼎文.基于FEM的滚珠丝杠进给

系统动态性能分析[J].制造技术与机床,2005(10):85-88.

- [4] 李凌丰,刘彩芬.滚珠丝杠副轴向变形分析[J].中国机械工程,2011(7):762-766.
- [5] 张洪国.滚珠丝杠传动副的接触力学模拟与静动态特性分析[D].长春:吉林大学,2011.
- [6] 徐光远,潘国义,陶卫军,等.基于Pro/E和ANSYS Workbench的滚珠丝杠副造型与有限元分析[J].组合机床与自动化加工技术,2014(4):1-5.
- [7] 浦广益.ANSYS Workbench基础教程与实例详解[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [8] 魏效玲,尉鹤缤,刘梦晗,等.桥式起重机结构动态特性分析[J].煤炭技术,2016,35(2):247-250.

(责任编辑 王利君)

(上接第91页)

#### 参考文献:

- [1] ZHANG L, WU Y, WANG Y, et al. Design, preparation, performance, industrialization and application of advanced clay/rubber nanocomposites[C]//Abstracts Of Papers Of The American Chemical Society. 1155 16TH ST, NW, Washington, DC 20036 USA: Amer Chemical SOC, 2011, 241.
- [2] WU X, WANG Y, LIU J, et al. Improved crack growth resistance and its molecular origin of natural rubber/carbon black by nanodispersed clay[J]. Polymer Engineering & Science, 2012, 52(5): 1027-1036.
- [3] LIANG Y, CAO W, LI Z, et al. A new strategy to improve the gas barrier property of isobutylene-isoprene rubber/clay

nanocomposites[J]. polymer testing, 2008, 27(3): 270-276.

- [4] HE Shaojian. Improving the Gas Barrier Property of SBR/Clay Nanocomposite through In Situ Sulfur Modification during Curing Process[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012(108): 48-51.
- [5] 王韶晖,任文坛,张勇等.原位有机改性法制备EPDM/蒙脱土纳米复合材料的热分解行为及填料-橡胶相互作用[J].弹性体,2005,15(6):15-18.
- [6] 刘俊杰.乳液法制备有机粘土/白炭黑/丁苯橡胶纳米复合材料的微观结构和动态力学性能[J].轮胎工业,2013,33(10):613-617.
- [7] 郑骏驰,叶欣,韩冬礼,等.乳液共混法制备天然橡胶复合材料研究进展[J].橡胶工业,2015,62(6):377-382.

(责任编辑 王利君)