

## 采用弹性连接降低滚珠丝杠副中滚珠对返回器的冲击\*

张佐营<sup>1</sup>, 赵越<sup>2</sup>, 李志<sup>1</sup>

(1. 徐州工程学院 机电工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 东南大学 自动化学学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 建立了滚珠丝杠副中返回器与螺母弹性连接时滚珠与返回器碰撞的模型, 推导了连接刚度处于两种极限状态下最大碰撞力的公式, 讨论了连接刚度对碰撞力的影响。研究表明, 连接刚度较大时, 滚珠对返回器的碰撞力也较大, 连接刚度对碰撞力的影响程度受滚珠与返回器质量比的影响, 该质量比较大时, 连接刚度对碰撞力的影响比较明显。振动和噪声的测试结果表明, 在返回器与螺母之间采用弹性连接可以有效降低滚珠对返回器的冲击, 提高滚珠丝杠副的性能。

关键词: 碰撞力; 滚珠丝杠副; 弹性连接; 赫兹模型

中图分类号: TH132.1; CB13.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-2354(2010)05-0028-03

精密滚珠丝杠副是数控机床的关键功能部件, 高速切削技术的不断发展, 对滚珠丝杠副的速度要求越来越高。由于滚道曲率的不连续, 滚珠进出返回器时会产生碰撞冲击, 特别是在高速情况下, 滚珠对返回器的冲击会激起较大的振动和噪声, 影响滚珠丝杠副的定位精度, 反复的冲击还会迅速导致返回器疲劳失效, 严重影响返回器的寿命<sup>[1]</sup>。因此, 研究滚珠进入返回器时的碰撞行为, 减小滚珠对返回器的碰撞力对于降低滚珠丝杠副的振动和噪声、提高其性能具有重要的意义。

台湾学者 Ju-Pin Hung<sup>[2]</sup>利用赫兹接触模型和牛顿第二定律建立了滚珠与导珠管碰撞的力学模型, 并利用有限元软件分析了导珠管上的应力分布, 研究了导珠管的疲劳问题。意大利的 Claudio Braccisi<sup>[3]</sup>利用该模型和材料的弹塑性理论估计了不同材料的滚珠循环系统允许的最高转速。日本 NSK 台湾上银科技等精密滚珠丝杠生产企业都采取了许多措施降低滚珠的冲击, 提高丝杠副的性能<sup>[1,4]</sup>。

文献[2]的研究中将导珠管看作自由的, 这与实际情况并不相符, 实际上任何形式的返回器包括导珠管式并不是处于自由状态, 而是与螺母刚性连接的, 文中提出了返回器与螺母之间采用弹性连接的方法来缓冲滚珠对返回器的碰撞冲击, 提高丝杠副的性能, 并通过振动和噪声的测试证明了该方法是有效的。

## 1 理论分析

## 1.1 碰撞力的公式

通常, 返回器是刚性固连在螺母上的, 如果返回器

与螺母之间采用弹性连接, 则滚珠与返回器的碰撞可简化为如图 1 所示的模型。

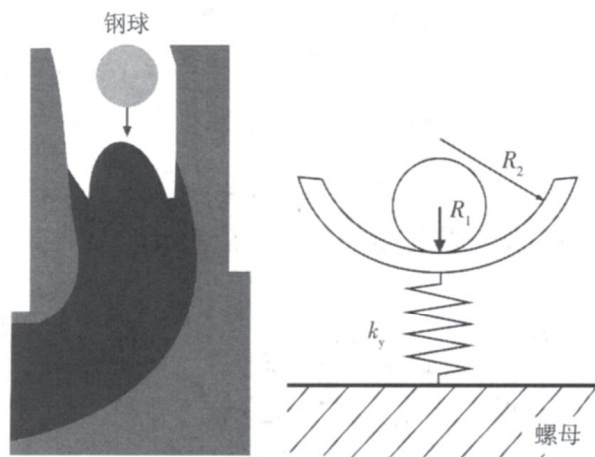


图 1 滚珠与返回器的碰撞模型

根据赫兹弹性接触模型, 任一时刻的接触力可以表示为<sup>[5]</sup>:

$$F = k_h \delta^2 \quad (1)$$

式中:  $\delta$ ——法向变形量;

$k_h$ ——刚度系数,  $k_h$ 与接触物体的材料特性及几何形状

参数有关,  $k_h = \frac{4}{3} R^*{}^{1/2} E^*$ ;

$R^*, E^*$ ——等效曲率半径和等效弹性模量,

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{2R_2}, \quad \frac{1}{E^*} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2};$$

$E_1, E_2, \mu_1, \mu_2$ ——滚珠和导珠管材料的弹性模量和泊松比;

$R_1, R_2$ ——滚珠和返回器滚道的曲率半径。

考虑滚珠的受力, 根据牛顿第二定律, 可建立碰撞

\* 收稿日期: 2009-04-20; 修订日期: 2009-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675124); 徐州工程学院培育资助项目(XKY2008317)

作者简介: 张佐营(1969—), 男, 山东费县人, 讲师, 工学博士, 研究方向: 精密机械制造与测试技术, 军队科技进步三等奖 2 项, 发表论文 9 篇。

力与加速度的关系:

$$F = -m_1 \frac{d\dot{y}}{dt} \quad (2)$$

式中:  $m_1$ ,  $\dot{y}$ ——滚珠的质量和速度。

考虑反向器的受力情况,可得到反向器与连接刚度组成的质量弹簧系统的运动微分方程:

$$m_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + k_y y = -F \quad (3)$$

式中:  $m_2$ ,  $y$ ,  $\frac{d^2 y}{dt^2}$ ——反向器的质量、位移和加速度;

$k_y$ ——反向器与螺母的连接刚度。

分析滚珠、反向器的加速度与接触点变形加速度之间的关系,可得:

$$d\delta/dt = d\dot{y}/dt + d^2 y/dt^2 \quad (4)$$

联立式(1)~式(4),即可建立起关于变形量  $\delta$  的非线性方程,由于方程中还含有另一变量  $\dot{y}$  使方程求解非常困难,下面分别就  $k_y$  的两个极限状态进行讨论。

状态 1: 当基础刚度为 0 时,反向器处于自由状态,与文献[4]简化的状态相同,通过方程两边对  $\delta$  积分,利用已知边界条件可得到最大变形量  $\delta_{q1}$  和最大碰撞接触力  $F_{m1}$  [4]:

$$\delta_{q1} = \left| \frac{5m_1 m_2 \dot{V}_0}{4k_h(m_1 + m_2)} \right|^{2/5} \quad (5)$$

$$F_{m1} = k_h \delta_{q1}^2 = k_h^{3/5} \left| \frac{5m_1 m_2 \dot{V}_0}{4(m_1 + m_2)} \right|^{3/5} \quad (6)$$

式中:  $\dot{V}_0$ ——碰撞前滚珠和反向器之间的相对速度。

状态 2: 当连接刚度较大,远大于反向器材料本身的刚度时,反向器与螺母之间为刚性连接,因此,在碰撞过程中反向器的加速度为 0 这时:

$$d\delta/dt = d\dot{y}/dt = -\frac{F}{m_1} = -\frac{1}{m_1} k_h \delta^2 \quad (7)$$

采用上面同样的处理方法,可得到此时的最大变形量  $\delta_{q2}$  和最大碰撞接触力  $F_{m2}$ :

$$\delta_{q2} = \left| \frac{5m_1 \dot{V}_0}{4k_h} \right|^{2/5} \quad (8)$$

$$F_{m2} = k_h \delta_{q2}^2 = k_h^{3/5} \left| \frac{5m_1 \dot{V}_0}{4} \right|^{3/5} \quad (9)$$

## 1.2 连接刚度对碰撞力影响

比较式(6)和(9),可得参数  $c$ :

$$c = \frac{F_{m2}}{F_{m1}} = \left( \frac{m_1 + m_2}{m_2} \right)^{3/5} = \left( 1 + \frac{m_1}{m_2} \right)^{3/5} \quad (10)$$

反映了连接刚性  $k_y$  处于最大和最小两种极限状态时碰撞力的变化幅度,显然,  $c$  是一个大于 1 的值,这说明反向器与螺母之间刚性连接时滚珠对反向器的碰

撞力较大。为此,可以定义一个系数  $k_s$  来反映反向器与螺母的连接刚性对最大碰撞接触力的影响,  $k_s$  是刚度  $k_y$  的函数,取值范围为 1 ~  $c$ 。对于任一刚度值  $k_y$  有最大碰撞接触力  $F_m$ :

$$F_m = F_{m2} / k_s \quad (11)$$

从式(10)可以看出,  $c$  值受滚珠与反向器质量比的影响,也就是说反向器与螺母的连接刚度  $k_y$  对碰撞力的影响程度受两碰撞物体质量比的影响,当滚珠与反向器的质量比较小时,比如插管式结构,连接刚度对碰撞力的影响不显著,但是当滚珠与反向器的质量比较大时,其影响是比较明显的。以使用工程塑料反向器的滚珠丝杠副 KD4020 为例,钢球直径为 5.953 mm 质量  $m_1 = 0.862$  g 反向器质量  $m_2 = 1.414$  g 计算可得  $c = 1.331$ ,也就是说,对该滚珠丝杠副而言,反向器与螺母之间的连接刚度对碰撞力的影响在 1 ~ 1.331 之间。

上述分析表明,对于滚珠与反向器的质量比较大的丝杠副结构,反向器与螺母刚性连接时,滚珠对反向器的碰撞力较大,通过改变反向器与螺母之间的连接刚度,变刚性连接为弹性连接可以减小滚珠对反向器的碰撞冲击,进而降低滚珠丝杠副的振动和噪声,改善反向器的寿命,提高丝杠副的性能。

## 2 试验验证

由于碰撞力是瞬时值,不容易测量,而碰撞力的减小会使丝杠副的振动和噪声降低,因此,可以通过对振动和噪声的测量来验证上面的理论分析。

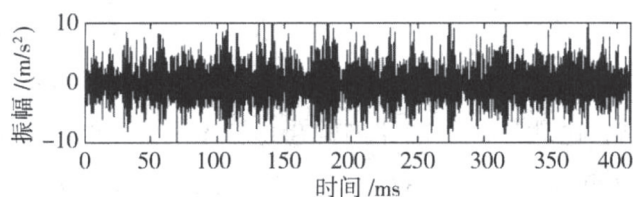
试验所用丝杠型号为 KD4020×1228 端盖式结构,其中一根装有正常的反向器,另外一根上的反向器进行了表面贴胶处理,胶皮厚度为 0.45 mm。试验在精密滚珠丝杠试验台 [6] 上进行,转速为 1 500 r/min 行程为 800 mm,所用仪器主要有 TES352A 型噪声计、振动加速度传感器、数据采集卡和微机。

噪声测量取单个行程中的平稳运行阶段,然后对数据进行平均,装有不同反向器的两种丝杠副的噪声声压级平均值分别为 79.1 dB 和 77.3 dB。反向器经过处理的丝杠副的噪声水平约降低 1.8 dB。

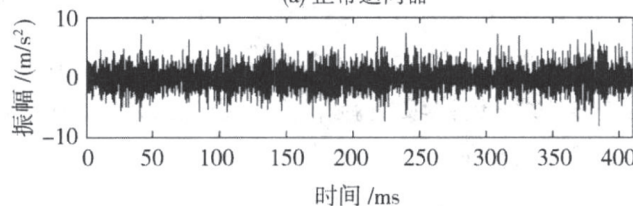
振动信号的采集频率为 10 kHz,采集点数为 4 096。实验结果如图 2 所示,信号的 AR 功率谱如图 3 所示。由图 2 可以看出,反向器经过贴胶处理的丝杠副振动幅值明显降低,振动的能量明显减弱。



实验结果表明, 反向器与螺母采用弹性连接的丝杠副振动和噪声水平都有明显的改善, 这说明弹性连接对滚珠进入反向器的碰撞冲击起到了较好的缓冲作用, 碰撞力得到了有效的降低。



(a) 正常反向器



(b) 贴胶后的反向器

图 2 轴向振动幅值对比

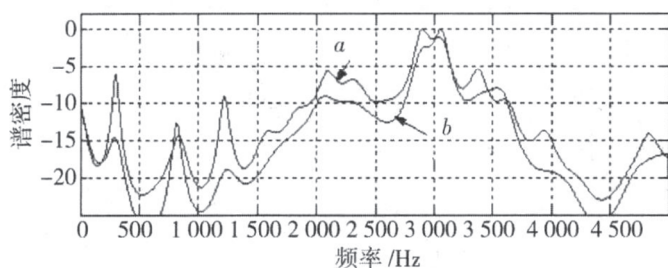


图 3 振动频谱比较

### 3 结论

通过建立滚珠对反向器的碰撞模型, 讨论了反向器与螺母的连接刚度对碰撞力的影响, 研究表明, 反向器与螺母的连接刚度越小, 滚珠对反向器的碰撞力越小, 刚度对碰撞力的影响程度还受滚珠与反向器的质量比的影响, 该质量比越大, 连接刚度对碰撞力的影响程度也越大。振动和噪声的测量表明反向器与螺母采用弹性连接可以对滚珠进入反向器的碰撞冲击起到较好的缓冲作用。

#### 参考文献

- [1] Nimiyama M, Miyaguchi K. Recent technical trends in ball screws [J]. NSK Technical Journal Motion & Control 1998 664: 1—3.

- [2] Hung Jui-Pin, James Shih-Shyn Wu, Jerry Y. Impact failure analysis of recirculating mechanism in ball screw [J]. Engineering Failure Analysis 2004 (11): 561—573.
- [3] Claudio Bracceschi, Luca Landi. A general elastic-plastic approach to impact analysis for stress state limit evaluation in ball screw bearings return system [J]. International Journal of Impact Engineering 2007 34 (7): 1272—1285.
- [4] 上银科技股份有限公司. 滚珠丝杠高速化的技术对策 [J]. 制造技术与机床, 2003 (12): 87—88.
- [5] Goldsmith W. Impact: the theory and physical behavior of colliding solids [M]. London: Edward Arnold Ltd 1960: 82—90.
- [6] 宋现春, 刘剑. 高速滚珠丝杠副综合性能试验台的研制开发 [J]. 工具技术, 2005 (3): 34—36.

Using elastic joint to minimize the impact caused by the ball to the reverse unit of ball screw pair

ZHANG Zuo-ying, ZHAO Yue, LI Zhi

(1. Mechatronics School of Xuzhou Institute of Technology Xuzhou 221008 China; 2. School of Automation, Southeast University Nanjing 211189 China)

Abstract: A model that ball collides with the reverse unit when the reverse unit in the ball screw pair is elastically connecting with the nut was established. The formula of maximum impact under the state of two different limits was deduced, and the influence on the impact by the connecting rigidity was discussed. The research has shown that the impact applied to the reverse unit by the ball becomes bigger as the connecting rigidity becomes bigger. The degree of influence on the impact by the connecting rigidity will be affected by the mass ratio between ball and reverse unit. When this mass ratio is much bigger, the influence on the impact by the connecting rigidity becomes obvious. The vibration and noise test result has shown that the impact to the reverse unit by the ball can be reduced effectively if the elastic connection is used between reserve unit and nut, improving the performance of the ball screw pair.

Key words: impact; ball screw pair; elastic joint; Herzt model

Fig 3 Tab 0 Ref 6

“Jixie Sheji” 9244