文章编号：1006-1355(2014)03-0215-04

高速滚珠丝杠副的碰撞噪声控制

张佐营[1]，杨根喜[1]，姜洪奎[2]

（1. 徐州工程学院，江苏省大型工程装备检测与控制重点建设实验室，江苏 徐州 221018；
2. 山东建筑大学 机电学院，济南 250100）

摘要：滚珠丝杠副是数控机床的关键功能部件，返向器是提供滚珠循环的通道，滚珠进入返向器时的碰撞力会引起较大的噪声。通过分析影响滚珠丝杠副中滚珠与返向器碰撞力的因素，寻找降低该碰撞力的方法，对返向器结构进行改进，并对两种结构丝杠副进行噪声对比试验。研究表明通过减小返向器滚道与丝杠滚道切线的夹角，采用弹性模量较小的工程塑料制作返向器，可以达到降低滚珠与返向器的碰撞力，进而降低滚珠丝杠副噪声的目的。

关键词：声学；噪声；高速滚珠丝杠副；返向器；控制

中图分类号：TH132.1；TB533^{+}.1 **文献标识码**：A DOI编码：10.3969/j.issn.1006-1335.2014.03.046

Impact Noise Control of High-speed Ball Screw Pairs

ZHANG Zuo-ying[1], *YANG Gen-xi*[1], *JIANG Hong-kui*[2]

(1. Jiangsu Key Laboratory of Detection and Control of Large Engineering Equipments, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221018, Jiangsu China;
2. Mechatronics School, Shandong Jianzhu University, Jinan 250100, China)

Abstract: Ball screw pair is a key functional component of digit lathes, in which the re-circulating mechanism provides a channel for steel balls rolling in screw grooves. As the driven shaft in the mechanism operates at a high rotating speed, forces caused by the impact between the steel balls and re-circulating mechanism may induce great noise. In this paper, the method to reduce the impact force is studied through analyzing the influence factor of the impact forces of the ball screw pair. Design of the re-circulating mechanism is improved by reducing the angle between the re-circulating mechanism groove and the shaft groove. Furthermore, engineering plastics are used to make the re-circulating mechanism. The noise of the two types of ball screw pairs is measured and the data is analyzed using spectrum analysis. The experimental results indicate that this method can reduce the impact noise effectively.

Key words: vibration and wave ; noise ; high-speed ball screw pair ; re-circulating mechanism ; control

精密滚珠丝杠副是数控机床的关键功能部件，随着高速切削技术的发展，对滚珠丝杠副的速度要求也越来越高，滚珠丝杠副的高速化必然会产生温升、噪声等诸多问题。随着人们环保意识的增强，噪声已成为制约滚珠丝杠副高速化的关键问题之一。目前，国内企业生产的高速滚珠丝杠副与国外先进产品相比，噪声普遍较大。

日本学者五十岚昭南、德长靖等[1—5]在上世纪末对滚珠丝杠副的噪声机理进行了较为全面的研究，研究认为滚珠丝杠副的主要噪声机理为滚珠对返向器的冲击和丝杠滚道波纹度激起的强迫振动。国内对滚珠丝杠副的噪声问题的研究较少，文献[6]研究了精密滚珠丝杠副轴向振动的激励因素，研究认为滚珠与返向器的碰撞是激起滚珠丝杠副轴向振动的主要因素。文献[7]研究了滚珠丝杠副中滚珠与返向器的碰撞，并通过实验验证了模型的正确性，分析了影响碰撞力大小的因素。

本文分析了降低丝杠副中滚珠与返向器的碰撞力的方法，对滚珠丝杠副的返向器进行了改进设计，并通过噪声试验，验证了改进后的滚珠丝杠副的降噪效果。

收稿日期：2013-02-06

基金项目：国家自然基金资助项目（编号：51105232）

作者简介：张佐营(1969-)，男，工学博士，副教授，主要研究方向：精密机械制造与测试。

E-mail: sdzzy2002512@163.com

1 降低碰撞力的方法分析

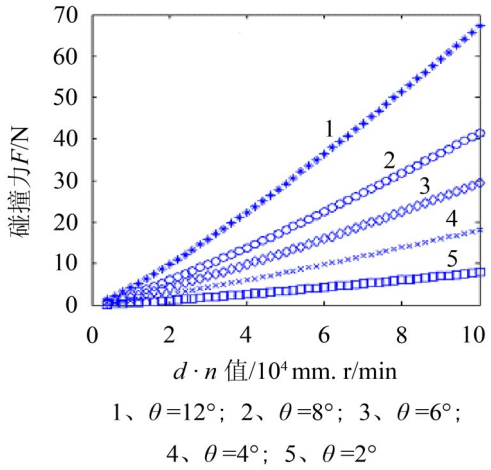
滚珠丝杠副的噪声属于典型的机械噪声，机械噪声来源于机械部件之间的交变力。这些力的传递和作用一般分为三类，即撞击力、周期性作用力和摩擦力。日本学者的研究[2]表明滚珠丝杠副中撞击力产生的噪声最大。而撞击力的大小对噪声的影响也最为显著。文献[7]基于连续介质力学的碰撞模型，利用赫兹接触模型和牛顿第二定律得到了滚珠与返向器碰撞的最大变形量和最大碰撞力分别为

$$\delta_m = \left[\frac{5\, m_1 v_0^{\,2}}{4\, k_h}\right]^{2/5} \tag{1}$$

$$F_m = k_h \delta_m = \frac{1.140\, m_1 v_0^{\,2}}{\delta_m} \tag{2}$$

式中 v_0 表示两碰撞物体碰撞前的法向初速度，m_1 为滚珠的质量，k_h 为刚度系数。

滚珠丝杠副中，滚珠的速度反映在 $d\cdot n$ 值上，$d\cdot n$ 值越大，滚珠的速度越高，v_0 也就越大。保持其它参数不变，可以计算得到不同碰撞角时碰撞力随 $d\cdot n$ 值的变化情况，如图1所示。



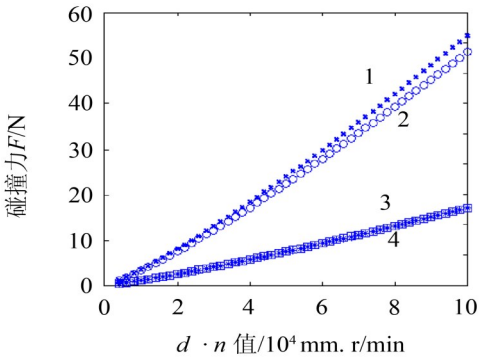
1、θ=12°；2、θ=8°；3、θ=6°；4、θ=4°；5、θ=2°

图1 碰撞角和 $d\cdot n$ 值对碰撞力的影响

从图1可以看出，$d\cdot n$ 值相同的情况下，随着碰撞角的变大碰撞力显著增大，在高 $d\cdot n$ 值情况下，碰撞角的影响更加明显，在 $d\cdot n$ 值到达100 000时，碰撞角从2 °增加到12 °碰撞力则相应地从9 N增大到68 N。因此对于高速丝杠的设计，应特别注意减小碰撞角，尽量使返向器的滚道曲线与丝杠的螺旋滚道线相切。

假定其它参数不变，也不考虑材料密度的变化，滚珠与返向器使用不同的材料组合，弹性模量对碰撞力的影响如图2所示。

由图2可以看出，随着材料弹性模量的降低，碰撞力呈下降趋势，当碰撞的一对材料中有一种材料弹性模量较低时，另一种材料的弹性模量的高低变



1、E_1=310, E_2=190；2、E_1=207, E_2=190；3、E_1=310, E_2=6.5；4、E_1=207, E_2=6.5

图2 弹性模量对碰撞力的影响

化对碰撞力几乎没有影响，图2中工程塑料（E_2=6.5 GPa）与 E_1=310 Gpa，E_1=207 Gpa两种弹性模量不同的滚珠的碰撞力基本没有差别。这说明通过合理选择滚珠与返向器的材料，使一种材料的弹性模量较低即可以达到降低碰撞力的目的。

2 返向器的结构改进

滚珠丝杠副的返向器结构目前主要有三种，即内循环结构、插管式外循环结构和端部偏转式外循环结构。插管式结构制造工艺简单，可用于一列多圈滚珠的情况，因此在高速丝杠副中被国内企业广泛采用。但插管式丝杠副由于结构本身的原因，插管与丝杠滚道的切线不可避免地存在较大的角度，滚珠进入时碰撞角偏大。而且，插管多采用钢管制造，其材料的弹性模量与钢球相差不大，因此不利于降低碰撞力。

对新设计的丝杠副采用端部偏转式返向器，返向器材料选用高强度工程塑料，采用注塑成型方式一次成型，材料的弹性模量约6.7 GPa，约为钢管的弹性模量的2 %，返向器滚道与丝杠滚道的切线方向夹角小于3°。返向器结构如图3所示，左面为改进前的插管式返向器，材料为钢质，右面为改进后的端部偏转式返向器，材料为工程塑料。

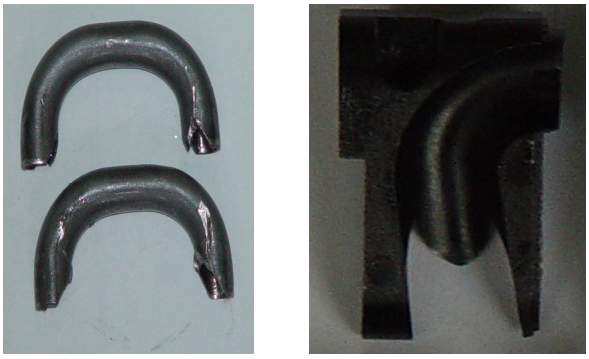
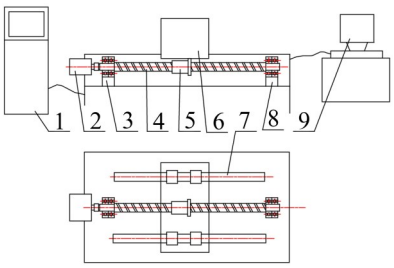


图3 返向器结构

3　噪声对比试验

3.1　实验仪器及试验环境

噪声对比实验是在高速滚珠丝杠副综合性能实验台上进行的，实验台结构如图4所示，主要由控制柜、伺服电机、床身、直线导轨和前后轴承座、丝杠副、工作台和配重块组成[8]。



1—控制柜；　2—伺服电机；　3—前轴承座；
4—滚珠丝杠；　5—螺母座；　6—配重块；
7—直线导轨；　8—后轴承座；　9—计算机

图4　高速滚珠丝杠副综合性能实验台

噪声测量采用了B&K公司的2230声级计，噪声计输出的电压信号由采集仪采集，送微机进行后续处理和分析。

噪声信号采集使用东方振动噪声研究所的INV振动噪声采集仪，配套DASP数据分析软件对采集的数据进行处理和分析，本文采用自功率谱分析原始数据。实验时要求实验台距墙壁之间的距离大于3 m。置噪声计于丝杠副螺母行程中间位置，与水平方向成45 °角指向丝杠副，距离为0.5 m。

由于滚珠丝杠副无法脱离伺服电机、轴承和导轨而单独运行，因此，所测噪声中不可避免地会包含电机、轴承和导轨的噪声成份，这里把这些噪声当作背景噪声来处理。经现场测量，不带丝杠和导轨时，电机和轴承的噪声水平在57 dB以下，导轨采用了NSK的静音导轨，而在500 r/min以上的速度下，滚珠丝杠副的噪声一般在69 dB以上，因此，背景噪声对所测噪声影响不大，频谱分析时重点观察幅值较高的谱峰即可。

3.2　实验结果对比

实验用丝杠副型号为两种，插管式结构的型号为3212，端部偏转式结构的型号为4032，双螺母预紧，滴油润滑。噪声测量与自谱分析结果如图5—图8所示。

插管式滚珠丝杠副中，由于工艺原因，钢球与导珠管的碰撞角度较大，且导珠管的弹性模量较高，因此，碰撞力较大，碰撞力对其噪声的贡献也非常显著。由图5—图6可以看出，该结构丝杠副的噪声较大，采集到的噪声数据时域波形宽度在±1 000 mv之间；噪声的频率分布比较分散，存在多个较为显著的谱锋，在750 Hz附近有一固定的谱峰，可能是导珠管受到碰撞后激起的固有频率振动所致，实际听起来音色也较差。

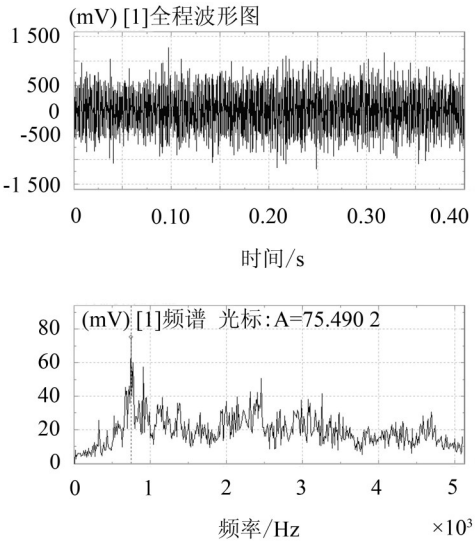


图5　3212丝杠副转速1 000 r/min时的噪声波形与频谱

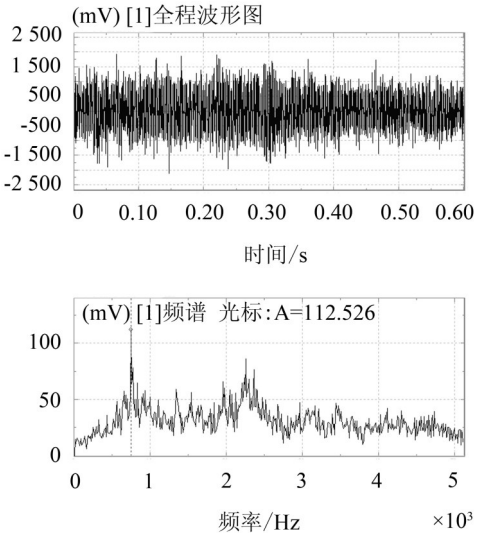


图6　3212丝杠副转速2 000 r/min时的噪声波形与频谱

4032丝杠副采用端部偏转式结构，使得滚珠可以基本上沿切线方向进入工程塑料材质的返向器，因此钢球与返向器的碰撞力很小。由图7—图8可以看出，该结构丝杠副的噪声较插管式丝杠副有了显著的降低，采集到的噪声数据时域波形基本分布在±200 mv之间，只有插管式丝杠副噪声数据的五分之一左右；且噪声的频率分布比较集中，只有一个较为显著的谱锋。事实上，该丝杠副的噪声音色有很大的改善，听起来较插管式丝杠副要柔和的多。

4　结　语

本文通过分析影响滚珠丝杠副中滚珠与返向器

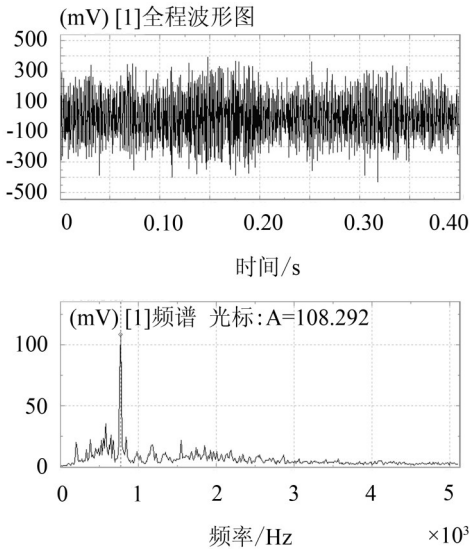


图 7 4032丝杠副转速1 000 r/min时的噪声波形与频谱图

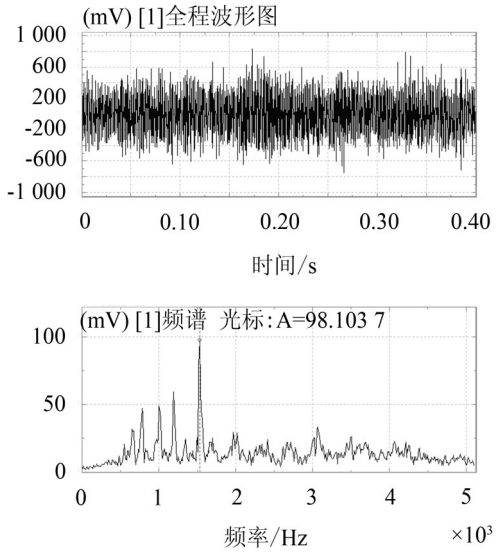


图 8 4032丝杠副 转速2 000 r/min时的噪声波形与频谱图

碰撞力的因素，讨论了降低该碰撞力的方法，对返向器结构进行了改进，并对两种结构丝杠副进行了噪声对比试验。研究表明通过减小返向器滚道与丝杠滚道切线的夹角，并采用弹性模量较小的工程塑料制作返向器，可以达到降低滚珠与返向器的碰撞力，进而降低滚珠丝杠副噪声的目的。

参考文献：

[1] 五十岚昭南，德长靖，大熊一成. Studies on the sound and vibration of a ball screw (1 st report, sound characteristics of a ball screw) [J]. **Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers,** Part C, 1987: 617-622.

[2] 德长靖，五十岚昭南，杉浦哲郎. Studies on the sound and vibration of a ball screw (2nd report, characteristics and generating mechanism of pulse sound) [J]. **Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers,** Part C, 1989: 2945-2950.

[3] 德长靖，五十岚昭南，桥爪一宏. Studies on the sound and vibration of a ball screw (3 rd report, sound caused by waviness on flank of screw shaft) [J]. **Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers,** Part C, 1991: 1874-1879.

[4] 五十岚昭南，德长靖，德嵩敬浩. Studies on the sound and vibration of a ball screw(4 th report, effect of various factors on sound of a ball screw) [J]. **Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers,** Part C, 1993: 3907-3913.

[5] 五十岚昭南，德长靖，上村尚司. Studies on the sound and vibration of a ball screw(5 th report, sound caused by random waviness on flank surface) [J]. **Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers,** Part C, 1995: 3369-3374.

[6] 张佐营，宋现春，姜洪奎. 精密滚珠丝杠副轴向振动激励因素的实验研究[J]. **振动、测试与诊断**，2008(1)：14-17.

[7] 张佐营，宋现春，姜洪奎. 滚珠丝杠副中滚珠与返向器的碰撞研究[J]. **中国机械工程**，2008(1)：850-853.

[8] 宋现春，刘剑等. 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.

(上接第214页)

5 结 语

本文提出的等效方法已经获得CAAC和FAA（美国联邦航空局）的批准，允许在ARJ 21-700飞机噪声适航合格审定试飞中使用，相信这种等效方法可以在ARJ 21-700飞机以及后续的民用飞机噪声适航合格审定试飞中发挥重要作用，并为提高我国民用飞机噪声适航合格审定试飞水平起到积极作用。

参考文献：

[1] 中国民用航空总局. 航空器型号和适航合格审定噪声规定[S]. 2007. 1-50.

[2] 张 青，闫国华，武耀罡，夏 天. 噪声适航标准严格化趋势探究[J]. **振动与噪声控制**，2013，33 (3)：235-240.

[3] ICAO. Environmental protection annex 16 volume I aircraft noise[S]. 2003. 61-84.

[4] FAA. Noise standards: Aircraft type and airworthiness certification[S]. 2003. 69-176.

[5] 刘锦虎，闫国华，谢 福. 利用航空发动机静态远场噪声数据预测飞行噪声级[J]. **噪声与振动控制**，2012，32 (2)：91-94.

[6] Icao. Environmental technical manual on the use of procedures in the noise certification of aircraft[S]. 2004. 8-122.