

·研究简报·

滚珠丝杠副摩擦力矩影响因素的分析

黄寿荣 黄家贤

(机械工程系)

滚珠丝杠副是数控设备中的一个重要元件,其摩擦力矩特性直接影响设备的动态性能.本文应用力学分析及几何分析的方法,建立了摩擦力矩的理论模型,分析了丝杠及螺母的螺纹半径误差、导程误差及滚道的形状误差等制造误差以及滚珠进出反向器时的冲击等因素对摩擦力矩的影响.

1 丝杠与螺母滚道间相对位移量的分析

1.1 丝杠与螺母导程误差的影响

丝杠及螺母导程的螺旋线误差,直接影响丝杠与螺母间的相对轴向位移.若某滚珠处丝杠、螺母的导程误差分别为 ΔL_s 和 ΔL_n ,则该位移量 δ_L 为

$$\delta_L = \pm (\Delta L_s - \Delta L_n) \quad (1)$$

式中+和-对应于图1中的螺母I和II.

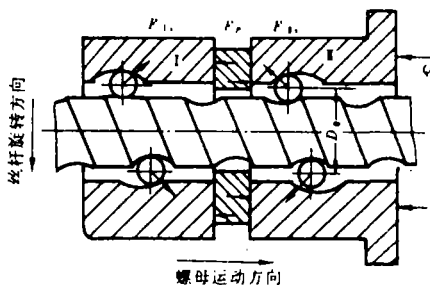


图1 滚珠丝杠副受力简图

1.2 螺纹半径误差的影响

滚珠丝杠副公称接触角的计算公式为

$$\alpha_0 = \cos^{-1} \frac{(r_s + r_n) - (R_s - R_n)}{r_s + r_n - d_b} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{R_s - R_n - d_b}{r_s + r_n - d_b} \right) \quad (2)$$

式中, R 为螺纹半径, r 为滚道半径,下标 s 及 n 分别代表丝杠和螺母, d_b 为滚珠直径.

若丝杠、螺母分别存在螺纹半径误差 ΔR_s 、 ΔR_n ,则将改变丝杠与螺母间的接触变形.由图2知,由半径误差 ΔR_s 、 ΔR_n 引起的位移量 δ_R 为

$$\delta_R = (r_s + r_n - d_b)(\sin \alpha_R - \sin \alpha_0) \quad (3)$$

式中 α_R 为滚珠的实际接触角,

$$\alpha_R = \cos^{-1} \left(\cos \alpha_0 - \frac{\Delta R_s - \Delta R_n}{r_s + r_n - d_b} \right) \quad (4)$$

经三角变换后得到

$$\delta_R = \operatorname{ctg} \frac{\alpha_0 + \alpha_R}{2} (\Delta R_s - \Delta R_n) = C_R (\Delta R_s - \Delta R_n) \quad (5)$$

本文于1993年3月1日收到.

式中, $C_R = \operatorname{ctg} \frac{\alpha_0 + \alpha_R}{2}$. 若取 $\alpha_R \approx \alpha_0$, 则 $C_R \approx \operatorname{ctg} \alpha_0$.

1.3 滚道半径误差的影响

利用与 1.2 类似的方法, 可推得由滚道半径误差 Δr_r 和 Δr_s 引起的相对轴向位移量 δ_r 为

$$\delta_r = C_r(\Delta r_s + \Delta r_r) \quad (6)$$

式中, $C_r = \sin \alpha_s - (1 - \cos \alpha_0) \operatorname{ctg} \frac{\alpha_0 + \alpha_s}{2}$.

若取 $\alpha_s \approx \alpha_0$, 则

$$C_r = \frac{1 - \cos \alpha_0}{\sin \alpha_0}$$

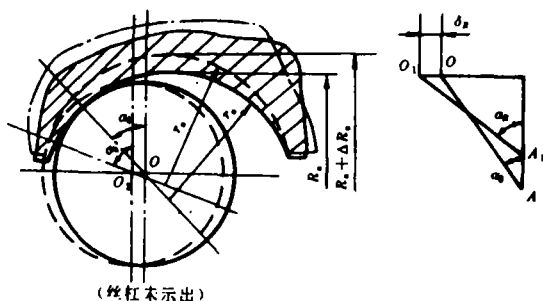


图2 螺纹半径误差引起的位移量

1.4 滚珠直径误差的影响

由滚珠存在直径误差 Δd_s 引起的相对轴向位移 δ_s 为

$$\delta_s = C_s \Delta d_s \quad (7)$$

式中, $C_s \approx \sin \alpha_0$.

1.5 相对轴向总位移的计算

若滚珠丝杠副中同时存在上述诸误差, 且由于预紧力的作用, 螺母有一初始轴向预位移 δ_0 , 丝杆螺母副的综合导程误差为 ΔL_s , 根据误差迭加原理, 可得到某滚珠处丝杠与螺母滚道间的相对轴向总位移量 δ 为

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_L + \delta_R - \delta_r + \delta_s + \delta_0 \mp \Delta L_s = \Delta E + \delta_0 \mp \Delta L_s \\ &= \pm (\Delta L_s - \Delta L_n) + C_R(\Delta R_s - \Delta R_n) - C_r(\Delta r_s + \Delta r_r) + C_s \Delta d_s + \delta_0 \mp \Delta L_s \end{aligned} \quad (8)$$

式中 \pm 及 \mp 分别对应螺母 I 和 II, $\Delta E = \delta_L + \delta_R - \delta_r + \delta_s$.

2 摩擦力矩的理论模型

根据 Hertz 弹性接触理论, 若某滚珠所受力的轴向分量为 F , 该滚珠处丝杠滚道与螺母滚道的相对轴向位移为 δ , 则 F 与 δ 的关系为

$$F = C_f \delta^{3/2}$$

式中, C_f 为与滚珠丝杠副的几何尺寸, 与所用材料及热处理等因素有关的常数. 若将式(8)中的 δ 代入上式, 所得 F 即为滚珠对螺母的作用力.

设两螺母中的滚珠数目均为 Z , 将各原始误差按滚珠间隔离散化. 若某时刻螺母处在第 k 采样点位置, 则螺母 I 和 II 上第 i 个滚珠对螺母的轴向作用力 $F_1(i, k)$, $F_2(i, k)$ (见图 3) 分别为:

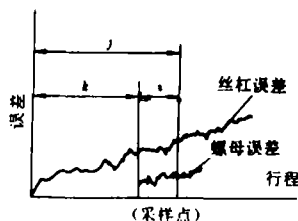


图3 采样点关系图

$$\left. \begin{aligned} F_{1,i,k} &= C_f \delta^{3/2}(i,k) = C_f [\Delta E_{1,i,k} + \delta_0 - \Delta L_{s1}(k)]^{3/2} \\ F_{1,i,k} &= C_f \delta^{3/2}(i,k) = C_f [\Delta E_{1,i,k} + \delta_0 + \Delta L_{s1}(k)]^{3/2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} \Delta E_{1,i,k} &= [\Delta L_{s1}(j) - \Delta L_{s1}(i)] + C_R [\Delta R_{s1}(j) - \Delta R_{s1}(i)] \\ &\quad - C_r [\Delta r_{s1}(j) + \Delta r_{s1}(i)] + C_d \Delta d_{s1}(i) \\ \Delta E_{1,i,k} &= -[\Delta L_{s1}(j) - \Delta L_{s1}(i)] + C_R [\Delta R_{s1}(j) - \Delta R_{s1}(i)] \\ &\quad - C_r [\Delta r_{s1}(j) + \Delta r_{s1}(i)] + C_d \Delta d_{s1}(i) \\ j &= i + k; i = 1, 2, \dots, Z; k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

由[3]并结合本文具体情况,可推得单个滚珠与丝杆、螺母的总摩擦力矩 M_f 为

$$M_f = C_M \cdot \delta^{5/2} \quad (10)$$

式中, $C_M = 0.081 \frac{C_f f}{\sin \alpha \cos \lambda} \left(1 + \frac{d_s}{2r} \right)$, f 为滚珠与滚道间的摩擦系数, λ 为螺纹升程角。

此外,由于制造及安装等误差的影响,滚珠在进出反向器时会有一冲击力 $H_{1,i}(k)$ 。因此,整个滚珠丝杠副的总摩擦力矩 $M_f(k)$ 为

$$M_f(k) = \sum_{i=1}^Z C_M [\delta^{5/2}(i,k) + \delta^{5/2}(i,k)] + [H_{1,i}(k) + H_{1,i}(k)] \frac{D_0}{2} \quad (11)$$

式中, D_0 为滚珠丝杠副的公称直径。

将 $\delta_{1,i}(i,k)$ 的表达式代入上式,并运用 Taylor 展开理论,可得到

$$\begin{aligned} M_f(k) &\approx 2C_M Z \delta_0^{5/2} + \frac{5}{2} C_M \sum_{i=1}^Z [\Delta E_{1,i,k} + \Delta E_{1,i,k}] \\ &\quad + \frac{1}{2} D_0 [H_{1,i}(k) + H_{1,i}(k)] \end{aligned} \quad (12)$$

3 摩擦力矩影响因素的分析

由式(12)易知, $M_f(k)$ 可分成三项之和,即

$$M_f(k) = M_0 + M_s(k) + M_n(k) \quad (13)$$

式中 $M_0 = 2C_M Z \delta_0^{5/2}$

$$M_s(k) = \frac{5}{2} C_M \sum_{i=1}^Z [\Delta E_{1,i,k} + \Delta E_{1,i,k}]$$

$$M_n(k) = \frac{1}{2} D_0 [H_{1,i}(k) + H_{1,i}(k)]$$

显然, M_0 是一常值项,与制造误差无关,其大小主要决定于初始变形 δ_0 或预紧力的大小。

第二项 $M_s(k)$ 反映制造误差对摩擦力矩的影响,因为

$$\begin{aligned} \Delta E_{1,i,k} + \Delta E_{1,i,k} &= [\Delta L_{s1}(j) - \Delta L_{s1}(j)] - [\Delta L_{s1}(i) - \Delta L_{s1}(i)] \\ &\quad + C_R [\Delta R_{s1}(j) - \Delta R_{s1}(j)] - C_R [\Delta R_{s1}(i) + \Delta R_{s1}(i)] \\ &\quad - C_r [\Delta r_{s1}(j) + \Delta r_{s1}(j)] - C_r [\Delta r_{s1}(i) + \Delta r_{s1}(i)] \\ &\quad + C_d [\Delta d_{s1}(i) + \Delta d_{s1}(i)] \end{aligned}$$

鉴于:(a) 螺纹半径误差 ΔR 及滚道半径误差 Δr 均以求和的方式,而导程误差 ΔL 以求差的方式影响 $M_s(k)$;(b) 丝杠螺纹长度远大于螺母螺纹长度;(c) 各项误差的变化幅度不会太

大; (d) 滚珠直径便于控制; (e) 若取 $\alpha_0 = 45^\circ$, 则 $C_s = 1 > C_r = 0.414$. 因此可以说, 影响 $M_f(k)$ 的最主要因素是丝杠、螺母的螺纹半径误差, 滚道半径的影响次之, 而导程误差及滚珠直径误差的影响相对较小. 同一制造误差中, 又以丝杠的误差占主导因素.

此外, $M_f(k)$ 是对各制造误差求和, 该运算相当于低通数字滤波, 对高频制造误差成分有平滑作用, 因此 $M_f(k)$ 是一低频分量.

式(13)中的第三项反映滚珠进出反向器时的冲击对摩擦力矩的影响. 可以推算, 丝杠旋转一圈时进(出)反向器滚珠的理论数目 $N_0 = \pi(D_0 - d_s \cos \alpha_0) / (2d_s)$, 因 $D_0 \gg d_s$, 故 $N_0 \gg 1$, 即 $M_n(k)$ 是一高频分量.

上述分析结果可用图4来表示.

作者曾做过实测试验及 Monte Carlo 模拟, 所得结论与理论分析结果有良好的一致性.

本文的完成得到了南京工艺装备制造厂孟皓高级工程师的帮助, 谨致谢意.

参 考 文 献

- 1 平田二郎, なぞ. 最近におけるボールねじの技術動向. 機械研究, 1985, 37(2)
- 2 井沢富, なぞ. ボールねじの摩擦に关する研究. 昭和55年度精机学会春季大会学术讲演会论文集, 1981
- 3 Kragelsky I V, et al. Friction and Wear—Calculation Methods. New York, Pergamon Press, 1982

An Analysis of the Influence of Factors on Frictional Torque of Ball Screw

Huang Shourong Huang Jiaxian

(Department of Mechanical Engineering)

Abstract: The frictional torque of ball screw, which is an important element in NC machine tools, has a significant effect on the dynamic characteristics of tools. Based on the Hertz's theory of elasticity, a model of frictional torque is proposed in the paper, and hence the effects on the frictional torque are analysed of the machining errors of screw and nut as well as the shocks occurring on balls' rolling into or out of the reverser.

Key words: ball screw, frictional torque, model, dynamic features

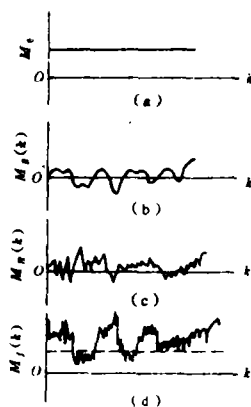


图4 摩擦力矩的分解图