

文章编号:1000-582X(2010)12-027-07

滚珠螺旋副中滚珠滑移及自锁效应分析

龚宪生¹, 刘志强¹, 权 威²

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 解放军装备指挥技术学院士官系, 北京 101416)

摘 要:针对限制滚珠螺旋副高速运转的滚珠滑移及自锁现象,建立滚珠螺旋副的三维实体模型,并对滚珠运动特性进行理论计算和分析,揭示出滚珠螺旋副中滚珠滑移和自锁效应产生的原因以及对滚珠螺旋副高速性能的影响。以滚珠运动规律为基础,推导滚珠滑移速度公式,提出如何避免滚珠卡死及减小滑移以提高滚珠螺旋副高速性能的方法。并用 ADAMS 软件对其进行了动力学仿真分析,仿真结果证实了所推导滚珠运动规律的正确性。

关键词:滚珠;螺旋;自锁效应;滑移;高速性

中图分类号:TH132.1

文献标志码:A

Analysis on the self-locking effect and slipping motion of balls in the screw pair

GONG Xian-sheng¹, LIU Zhi-qiang¹, QUAN Wei²

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. The Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, P. R. China)

Abstract: In view of self-locking and slipping phenomenon on restricting high-speed operation of ball screw, the model of ball screw is constructed and theoretical analysis of the movement feature of ball screw is made to reveal the reason of self-locking and slipping, and its influence on high-speed operation. Then the sliding speed format of ball screw is derived according to the movement rules of ball screw, and effective methods to avoid ball self-locking and slipping are put forward. Dynamics analysis is conducted with ADAMS software. Simulation results have confirmed the correctness of ball screw' movement.

Key words: ball; screw; self-locking effect; slip; speed

滚珠螺旋副是机床和精密机械上最常使用的传动元件,其主要功能是将旋转运动转换成线性运动,或将扭矩转换成轴向作用力。其中滚珠是中间元件,通过它实现运动和力的传递,并将传统的滑动摩擦变换为滚动摩擦,因此滚珠的运动情况及受力状态直接影响滚珠螺旋副的运动特性。目前对

滚珠螺旋副的研究主要集中在高速化、高精度等方面。美国学者 Mundo d 对滚珠螺旋副进行了运动学优化^[1]; Brecher 对高性能滚珠螺旋副的操作进行了可行性研究^[2]。日本学者 Yoshida; Takafum 等详细分析了滚珠螺旋副中载荷分布和滚珠的运动情况,并对其判定方法进行了参数化研究^[3]。日本

收稿日期:2010-07-15

基金项目:重庆市科委科技攻关项目(CSTC, 2007AC3015),机械传动国家重点实验室自主研究基金项目(0301002109137)

作者简介:龚宪生(1956-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为机械设计理论。(Tel)13062333307, (E-mail) xsgong@cme.cqu.edu.cn.

学者 Miyaguchi; Kazuo 等详细论述了滚珠螺旋副中滚珠接触点的变化与摩擦力矩变换的关系^[4]。我国台湾学者 Wei, Chin Chung, Lin, Jen Fin 等从接触角和弹性变形方面对滚珠螺旋副进行了运动学分析^[5]。山东建筑大学的宋现春、姜洪奎等对高速滚珠螺旋副的弹性变形进行了有限元分析^[6]。滚珠螺旋副在高速运行时,经常出现严重影响其性能发挥的滚珠自锁及滑移问题。国内外各大滚珠丝杠厂主要通过选取小滚珠、大导程来避免这一问题^[7],而对于如何选取小滚珠,选取小滚珠的原因则未见报道。

笔者针对这一问题,以滚珠螺旋副为研究对象,从运动学角度,建立滚珠螺旋副运动学模型,对滚珠运动特性进行理论计算和分析,揭示滚珠螺旋副中滚珠的自锁和产生滑移的原因,及其对滚珠螺旋副高速性的影响,在此基础上提出避免滚珠卡死及减小滑移以提高滚珠螺旋副高速性的方法;并应用 Pro/E 和 ADAMS 软件对滚珠螺旋副进行了动力学仿真研究。

1 滚珠螺旋副运动模型的建立

为讨论问题方便,选取滚珠螺旋副参数如下:螺旋公称直径 $d_0 = 50$ mm、螺旋升角 $\alpha = 5^\circ$ 、接触角 $\epsilon = 45^\circ$ 、滚道曲率比值 $t = 2R/d_b = 1.08$ 、导程 $L = 13.47$ mm。采用三维实体建模软件 Pro/E 对滚珠螺旋副进行建模,建立的模型如图 1 所示。分别选取滚珠直径 $d_{b1} = 5$ mm, $d_{b2} = 8$ mm, 做比较研究,各模型中除滚珠直径和滚道型面半径不同外其他参数一致。

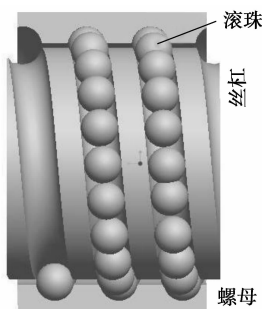


图 1 滚珠螺旋副模型图

2 滚珠螺旋副中滚珠运动特性分析

在承受轴向载荷的滚珠螺旋副中,滚珠分别与丝杠滚道及螺母滚道面接触,当丝杠与螺母发生相对运动时,滚珠就沿螺旋面运动。但滚珠中心在螺旋面作用下,其轨迹为一过滚珠中心圆的螺旋线,2

接触点的轨迹亦同样为一螺旋线,如图 2 所示。滚珠与丝杠滚道面在 A 点接触,轨迹为螺旋线 l_A ;滚珠与螺母滚道面在 B 点接触,其轨迹为螺旋线 l_B ;而滚珠中心 O 的运动轨迹为螺旋线 l 。

由空间解析几何出发,设过滚珠中心 O 的螺旋线 l 的参数方程为^[8]

$$l = \{r_0 \cos\theta, r_0 \sin\theta, p\theta\}. \quad (1)$$

式中: r_0 为滚珠中心圆半径; θ 为参数角; p 为螺旋参数; $p = L/2\pi$, L 为导程。

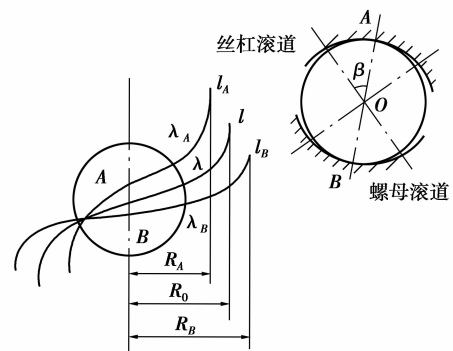


图 2 滚珠运动轨迹示意图

对应的滚珠与丝杠螺旋滚道面的接触点 A 的轨迹,即螺旋线 l_A 的参数方程为

$$l_A = \left\{ \begin{aligned} &(r_0 - r_b \cos\epsilon) \cos\theta + r_b \sin\alpha \sin\epsilon \sin\theta, \\ &(r_0 - r_b \cos\epsilon) \sin\theta - r_b \sin\alpha \sin\epsilon \cos\theta, \\ &p\theta + \cos\alpha \sin\epsilon \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

式中: r_b 为滚珠半径。同理滚珠与螺母螺旋滚道面接触点 B 所形成的轨迹,即螺旋线 l_B 的参数方程为

$$l_B = \left\{ \begin{aligned} &(r_0 + r_b \cos\epsilon) \cos\theta + r_b \sin\alpha \sin\epsilon \sin\theta, \\ &(r_0 + r_b \cos\epsilon) \sin\theta - r_b \sin\alpha \sin\epsilon \cos\theta, \\ &p\theta + \cos\alpha \sin\epsilon \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

上述公式是对右旋丝杠而言的,当丝杠为左旋时将 p 值以 $-p$ 代入即可。当丝杠与螺母有相对运动时,在理想情况下,滚珠中心 O 就沿螺旋线 l 作螺旋运动,运动的速度方向即为螺旋线 l 的切线方向。由螺旋线 l 的方程(1)可得其切线方程为

$$\frac{x - r_0 \cos\theta}{\cos\alpha \sin\theta} = \frac{y - r_0 \sin\theta}{\cos\theta \cos\alpha} = \frac{z - p\theta}{\sin\alpha}.$$

该直线通过滚珠中心 $O(R_0 \cos\theta, R_0 \sin\theta, p\theta)$, 且方向数为

$$\{l, m, n\} = \{-\cos\alpha \sin\theta, \cos\alpha \cos\theta, \sin\alpha\}. \quad (4)$$

同样,按螺旋线方程(2)、(3)可求出滚珠与丝杠螺旋滚道面、滚珠与螺母滚道面的对应接触点 A、B 处滚珠运动的速度方向,即螺旋线 l_A 、 l_B 的切线方程,其方向数分别有

l_A 切线方程方向数

$$\{l, m, n\} = \{-\cos\alpha_A \sin\theta, \cos\alpha_A \cos\theta, \sin\alpha_A\} \quad (5)$$

l_B 切线方程方向数

$$\{l, m, n\} = \{-\cos\alpha_B \sin\theta, \cos\alpha_B \cos\theta, \sin\alpha_B\} \quad (6)$$

螺旋线 l_A, l, l_B 对应的 3 条切线相互为空间交错直线。应用空间解析几何求取两直线的夹角,由式(4)-(6)求出 l_A, l_B 相对于 l 的切线间的夹角 γ_{AO}, γ_{BO} :

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg}\gamma_{AO} &= \frac{d_b \sin\alpha \cos\alpha}{d_0 - d_b \cos\epsilon \cos^2\alpha} \\ \operatorname{tg}\gamma_{BO} &= \frac{d_b \sin\alpha \cos\alpha}{d_0 + d_b \cos\epsilon \cos^2\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

设滚珠中心 O 在某一瞬时的速度为 v ,如图 3 所示。把滚珠中心 O 作为滚珠运动的瞬时中心,其接触点 A, B 处的速度如图中的 v_A, v_B 。由式(7)及图 3 可知, v_A, v_B 可分别分解出与滚珠中心运动速度 v 平行的速度分量 v'_A, v'_B ,以及和滚珠中心运动速度垂直的速度分量 v''_A, v''_B ,其大小为

$$\begin{cases} v'_A = v_A \cos\gamma_{AO} \\ v'_B = v_B \cos\gamma_{BO} \end{cases}, \quad \begin{cases} v''_A = v_A \sin\gamma_{AO} \\ v''_B = v_B \sin\gamma_{BO} \end{cases}$$

由于速度 v_A, v_B 与 v 的空间夹角恰好在螺旋线 l 的两侧,故在接触点 A, B 处的分速度 v''_A, v''_B 是同方向的。滚珠除了沿螺旋线 l 的切线方向以线速度 v'_A, v'_B 滚动外,还将在滚道型面内在与 AOB 直线垂直的方向上产生 1 个滑移运动,即在法面上存在滑移运动。滚珠除了上述 2 种运动外,还存在绕 l 切线的自转运动,这 3 种运动的合成构成了滚珠螺旋副中的滚珠的运动特性。

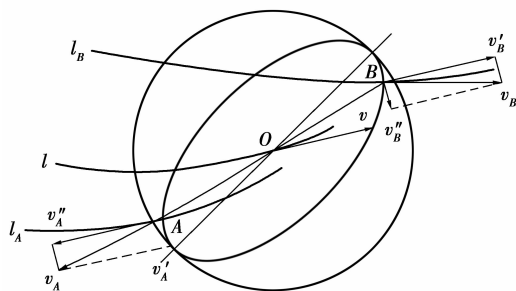


图 3 滚珠运动示意图

3 滚珠螺旋副的自锁效应

滚珠螺旋副中滚珠与丝杠、螺母的接触状态与工作条件和受力状态有关。实际工作中滚珠螺旋副内外螺纹滚道由于制造误差及滚珠的滑移导致滚珠所受两个法向力不在同一直线上。如图 4 所示,

2 接触平面不平行而成 2γ 夹角,在接触点 A, B 处作用于滚珠的法向力 N_A, N_B 不在同一直径线上。法向力 N_A, N_B 的合力作用下,滚珠存在向左运动趋势,故在接触点 A, B 处分别有摩擦力 f_A, f_B ,方向如图所示。当法向力的合力大于摩擦力 f_A, f_B 的合力时,滚珠就向左滑动。而当法向力的合力小于摩擦力的合力时,滚珠则静止不动。后一种情况就是“自锁效应”,出现这种现象的条件为

$$\gamma \leq \operatorname{tg}^{-1}\mu \quad (8)$$

式中: γ 为 2 平面夹角的 $1/2$; μ 为滚珠与平面的滑动摩擦系数。

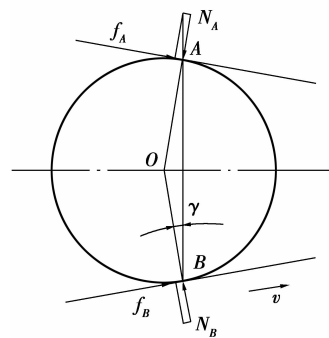


图 4 自锁示意图

在满足式(8)条件下,若其中 1 个平面向右运动,则滚珠就在摩擦力作用下向右运动,且滚珠在 2 平面内被愈挤愈紧。随着法向压力的增大,摩擦力也愈来愈大,最后导致弹性体的滚珠和接触平面在接触点处发生弹性或塑性变形。滚珠螺旋副中滚珠与螺纹滚道面间的接触处就存在这种形式的运动,故称为滚珠螺旋副的自锁效应。滚珠在滚道法向平面内发生滑动,滚珠就挤入滚道,滚道的自锁作用也立即产生 1 个排斥滚珠挤入的反作用力,因而滚珠螺旋副中的摩擦亦有较大的波动。

4 滚珠滑移及自锁对高速性的影响

假定滚珠是刚体,受力时不发生变形,滚珠滑移挤压滚道面时,变形全部由滚道面产生,且滚道面弹性变形不改变滚道圆弧 R 的曲率中心和形状,仅在半径方向上被挤得变长。如图 5 当滚珠中心从点 O 移到点 O' 时,滚道曲率半径的改变量 Δ 值为

$$\Delta = \sqrt{(R - r_b)^2 + \delta^2} - (R - r_b) \quad (9)$$

式中: R 为滚道曲率半径; δ 为滚珠滑移量 OO' 。

根据接触条件,滚珠中心由 O 移到 O' 后,滚珠与螺母、丝杠滚道面的接触点 A, B 亦将移至 A', B' 点。接触点 A', B' 的连线与滚珠和滚道面接触处的公法线间的夹角 γ 满足

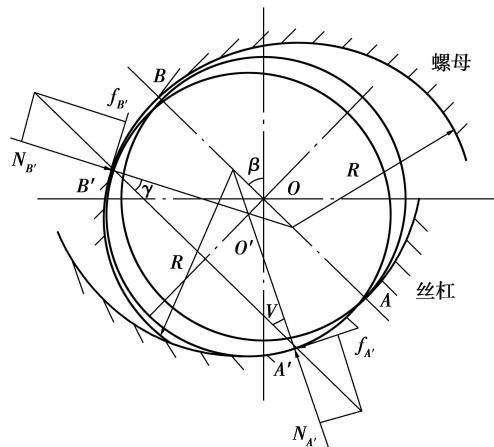


图 5 滑移运动示意图

$$\gamma = \text{tg}^{-1} \frac{\delta}{R - r_b} \quad (10)$$

当式(10)满足式(8)后,滚珠就不再继续移动,处于平衡状态。将式(8)代入式(10),可有

$$\text{tg}^{-1} \mu = \text{tg}^{-1} \frac{\delta}{R - r_b} \quad (11)$$

滚珠滑移量

$$\delta = \mu(R - r_b) \quad (12)$$

将式(11)代入式(10)求出滚道曲率半径的改变量

$$\Delta = (R - r_b) \sqrt{1 + \mu^2} - (R - r_b) \quad (13)$$

Δ 可以近似认为是滚珠滑移 δ 距离所引起的滚道弹性变形量,由弹性接触理论^[9]有

$$\Delta = 1.050 \ 0 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{P^2}{d_0}} \quad (14)$$

式中 P 为单个滚珠的法向载荷。将式(13)代入式(12)得滚道弹性变形量引起的接触点法向载荷的改变量

$$\Delta P = \sqrt{\frac{(R - r_b)^3 (\sqrt{1 + \mu^2} - 1)^3 \times 10^9 d}{1.05^3}} \quad (15)$$

根据式(13),滚珠中心滑移 δ 、滚珠与滚道面接触点 A' 、 B' 处,将发生弹性变形。由上述推导及式(13)和式(14)可知,此时接触点处的法向力将按弹性变量的 $3/2$ 次方关系增加,故此处摩擦力也将按 $3/2$ 次方关系增加。在同样的轴向工作载荷作用下,由于工作滚珠的滑移和自锁运动,将增加滚珠螺旋副的摩擦力矩,降低传动效率。而且当滚珠螺旋副高速运转时,滚珠在离心力和陀螺力的作用下,其运动更趋复杂,滚珠与滚道接触区将发生更大变化。因此应尽量避免滚珠滑移和卡死。

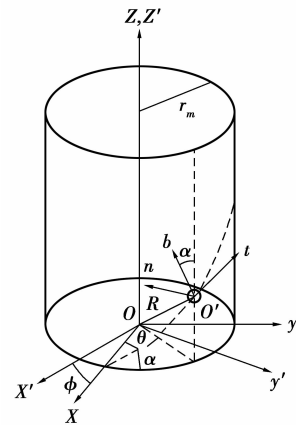


图 6 滚珠沿滚道运动示意图

5 滚珠滑移速度

为了准确描述滚珠的运动情况,建立 3 个坐标系:①固定坐标系 $(ox'y'z')$;②旋转坐标系 $(oxyz)$;③滚珠中心坐标系 $(o'tnb)$ 。其中 z' 与 z 方向同为丝杠轴线方向,螺旋中径半径为 r_o ,固定坐标系与旋转坐标系夹角为 ϕ ,如图 6 所示。可得固定坐标系与旋转坐标系的关系为

$$\left. \begin{aligned} x' &= (\cos\phi + \sin\phi)x, \\ y' &= (\cos\phi - \sin\phi)y, \\ z' &= z. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

旋转坐标系与滚珠中心坐标系的关系为

$$\left. \begin{aligned} x &= (\cos\alpha\cos\theta - \cos\alpha\sin\theta + \sin\alpha)t, \\ y &= (-\cos\theta - \sin\theta)n, \\ z &= (\sin\alpha\sin\theta - \sin\alpha\cos\theta + \cos\alpha)b. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

由于滚珠沿螺旋滚道运动,设滚珠中心在某时沿滚道移动角度为 θ ,滚珠中心位置方程在旋转坐标系中的表达式为^[10]

$$\left. \begin{aligned} U &= r_o \cos\theta x, \\ V &= r_o \sin\theta y, \\ W &= r_o \theta \tan\alpha z. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

将式(16)代入式(17)可得滚珠中心位置方程在滚珠中心坐标系中的表达式为

$$\left. \begin{aligned} U &= r_o \cos\alpha \tan\alpha t, \\ V &= -r_o n, \\ W &= r_o \cos\alpha \tan\alpha b. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

将式(18)对时间求导,可得滚珠中心运动速度 V

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU}{dt} &= \left(\frac{r_o}{\cos\alpha} \omega_m + r_o \cos\alpha \omega \right) t, \\ \frac{dV}{dt} &= 0, \\ \frac{dW}{dt} &= -r_o \sin\alpha \omega b. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: $\omega_m = d\theta/dt$ 为滚珠沿滚道螺旋运动角速度; $\omega = d\varphi/dt$ 为丝杠旋转角速度。

滚珠在运动中与丝杠和螺母接触,其自转轴线不断变化,如图 7 中所示滚珠与螺母接触点为 A,滚珠与丝杠接触点为 B。由于滚珠在运动过程中接触点不断变化,接触角也随之不断变化,设滚珠在 A, B 接触点的接触角相等均为 $\varepsilon = 45^\circ$, 滚珠半径为 r_b , 可得接触点 A, B ($R_{Ao'}, R_{Bo'}$) 与滚珠中心 O' 在滚珠中心坐标系中的矢量表示为^[11]

$$\left. \begin{aligned} X &= t, \\ Y &= 0 \cdot n, \\ Z &= \sqrt{2}b_0. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

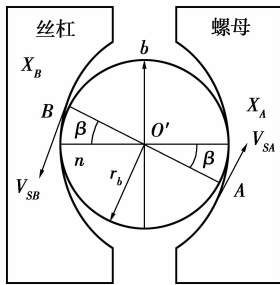


图 7 滚珠与丝杠螺母接触示意图

设滚珠运动时自转角速度为 ω' , ω' 在滚珠坐标系中各个坐标轴上的分量为 $\omega_t, \omega_n, \omega_b$ 。如图 8 所示, $o'u$ 为滚珠自转轴线, β 为 $o'u$ 与 xoy 平面的夹角, β' 为 $o'u$ 在 xoy 平面内的投影与 x 轴的夹角^[12]。

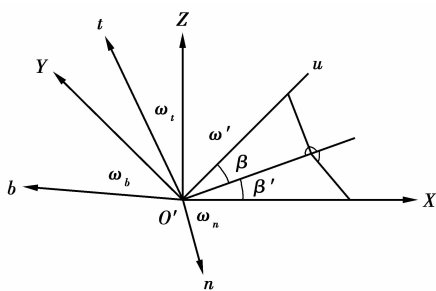


图 8 滚珠运动分析坐标系

由图 8 可得 $\omega_t, \omega_n, \omega_b$ 与 ω' 的关系为

$$\left. \begin{aligned} \omega_t &= \omega' \cos\beta \sin\beta', \\ \omega_n &= -\omega' \sin\beta, \\ \omega_b &= -\omega' \cos\beta \cos\beta'. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

由于 β' 一般较小,可近似取 $\beta' = 0$ 。接触点 A, B 处滚珠侧的速度为

$$\left\{ \begin{aligned} V_{Ab} &= V + \omega \times R_{Ao'} \\ V_{Bb} &= V + \omega \times R_{Bo'} \end{aligned} \right. \quad (22)$$

将式(19)、(20)代入(21)中可有

$$\left\{ \begin{aligned} V_{Ab} &= \left[\frac{r_o}{\cos\alpha} \omega_m + r_o \cos\alpha\omega + \frac{\sqrt{2}}{2} r_b (\omega_b - \omega_n) \right] t + \\ &\quad \frac{\sqrt{2}}{2} r_b \omega_t n - \left(r_o \sin\alpha\omega + \frac{\sqrt{2}}{2} r_b \omega_t \right) b \\ V_{Bb} &= \left[\frac{r_o}{\cos\alpha} \omega_m + r_o \cos\alpha\omega + \frac{\sqrt{2}}{2} r_b (\omega_b - \omega_n) \right] t - \\ &\quad \frac{\sqrt{2}}{2} r_b \omega_t n - \left(r_o \sin\alpha\omega - \frac{\sqrt{2}}{2} r_b \omega_t \right) b. \end{aligned} \right. \quad (23)$$

螺母沿丝杠轴向滚动时,丝杠转动角速度为 ω , 则螺母转动的距离为

$$S = \frac{\varphi L}{2\pi}. \quad (24)$$

对上式求导即可得接触点 A 螺母侧的速度为

$$V_{An} = -r_o \sin\alpha\omega \tan\alpha t - r_o \sin\alpha\omega b. \quad (25)$$

接触点丝杠侧的速度为

$$V_{BS} = \omega(r_o - r_b \cos\beta) \cos\alpha t - r_b \sin\beta \sin\alpha n - (r_o - r_b \cos\beta) \sin\alpha b. \quad (26)$$

接触点 A 的滑移速度

$$V_{SA} = V_{Ab} - V_{An},$$

$$|V_{SA}| = \left| \left[\frac{r_o}{\cos\alpha} (\omega + \omega_m) + r_b (\omega_b \cos\beta - \omega_n \sin\beta) \right] t + r_b \omega_t \sin\beta n - r_b \omega_t \cos\beta b \right|. \quad (27)$$

同理接触点 B 处滚珠的滑移速度^[11]

$$V_{SB} = V_{Bb} - V_{BS},$$

$$|V_{SB}| = \left| \left[\frac{r_o \omega_m}{\cos\alpha} + \frac{\sqrt{2}}{2} r_b (\omega' \sin\beta + \omega \cos\alpha) \right] t + \frac{\sqrt{2}}{2} r_b \sin\alpha n - \left[r_o \sin\alpha (\omega - 1) + \frac{\sqrt{2}}{2} r_b \sin\alpha \right] b \right|. \quad (28)$$

由式(27)及式(28)可知,滚珠滑移与螺旋中径、螺旋升角、滚珠直径、滚珠自转角速度有关,而导程 $L = \tan\lambda 2\pi r$, 可以把螺旋中径与螺旋升角统一为与导程有关。滚珠自转角速度与转动惯量有关,而转动惯量在相同材料下与滚珠半径成 5 次方关系,由此可知直径是影响滚珠滑移最主要的因素。另外由于滚珠自转轴线不断变化,滚珠还要受到陀螺力矩的作用。滚珠的离心力与滚珠材料的密度成正比,和滚珠直径的 3 次方成正比,且随着速度的升高,陀螺力矩也急剧增大。在超高速情况下,滚珠将产生巨大的离心力和陀螺力矩,这都会使滚珠与滚道的接触压力急剧增大,使得摩擦与温升增加。滚珠丝杠的运转条件变差,因此必须设法减小离心力和陀螺力矩。

6 减小滚珠滑移及自锁的方法

滚珠螺旋副滚珠的滑移现象说明滚珠并非纯滚动而是带有滑动的滚动,滚珠的滑移带来的直接结果是自锁效应,由于滚珠的滑移使滚珠与丝杠的摩擦力矩增加,这部分摩擦在滚珠螺旋副的摩擦中占很大比重,导致其传动效率大大降低,影响滚珠螺旋副的高速运转,而且滚珠直径超出一定范围会使摩擦力和滚珠与滚道的接触力急剧增加,导致滚珠卡死。因此为保证高的传动效率,避免滚珠卡死,提高滚珠螺旋传动的效率和高速性,首先要设法减少滑移和自锁效应的作用,其次就是减少其摩擦,在工艺、材料等方面予以改进。

1)减小滑移和自锁效应的作用:合理选择滚珠螺旋副的主要参数。使滚珠直径、滚珠螺旋副公称直径及导程满足一定关系。滚珠滑移率与滚珠直径成正比,滚珠直径越大,滑移率越大,导致滑移及自锁的机率越大。在高速滚珠螺旋副中必须保证滚珠灵活流畅,避免出现卡球、自锁,并把冲击、摩擦降到最小。由于提高滚珠螺旋副高速性能要增大导程 L ,而螺旋副公称直径 d_0 变大将增大滚珠螺旋副质量及转动惯量,因此,在 d_0 一定的情况下选取小滚珠以降低滑移率是非常必要的。选取小滚珠后,可以适当增加滚珠数和滚道数来提高滚珠螺旋副的承载能力。

2)工艺:采用 PVD 涂层改善滚珠丝杠副的摩擦特性。在滚道、滚珠表面采用 PVD 涂层可使高速运转时的摩擦力矩降低 10% 左右,并明显减少钢球在非纯滚动的“滑移”过程中对螺旋滚道的擦伤,降低温升,提高运动的平稳性,延长使用寿命。

3)材料:采用 Si₃N₄ 氮化硅陶瓷球。Si₃N₄ 热压氮化硅陶瓷球具有硬度高、密度小、弹性模量大、热膨胀系数小、磨损慢和寿命高等特点,在高速运转时可大大减小滚珠的离心力和进出反向机构的冲击力,由于滚珠的旋滚比减小使自旋运动引起的滑移摩擦减少,从而降低螺旋副的噪声和温升^[13]。

4)合理选择滚道曲率比值。由式(8)、(10)在摩擦系数 μ 一定的条件下,若式(11)中分母项愈小,则在较小的滑移量 δ 下即能满足式(8)的要求,达到稳定状态。

5)采用双圆弧滚道型面来代替单圆弧滚道型面。因为双圆弧滚道型面可以保证滚珠和滚道面的“三点接触”,通过“第 3 个接触点”处的反力来和引起滑移的摩擦力分力相平衡^[14-15]。

7 ADAMS 仿真动力学分析

为了精确模拟滚珠滑移和卡死对滚珠运动特性的影响,笔者采用 ADAMS 软件对滚珠螺旋副的运动情况进行仿真分析。将 PRO/E 中建立的模型导入 ADAMS 中,添加质量属性及约束,将丝杠与大地之间添加转动副,螺母与丝杠之间添加螺旋副,螺母与大地之间添加移动副,定义接触和摩擦,添加驱动,设置仿真时间 5 s,仿真步数 50 步,进行运动仿真。仿真结果如图 9-11 所示:5 mm 滚珠运动情况比较正常,8 mm 滚珠运动一段时间后滚珠发生滑移,10 mm 滚珠则启动就很困难,过了 2.5 s 之后才开始滚动。滚珠运动时轴向速度为零时,说明滚珠发生卡死。

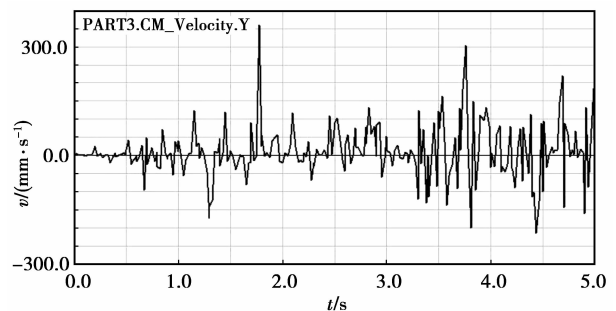


图 9 5 mm 滚珠轴向速度曲线图

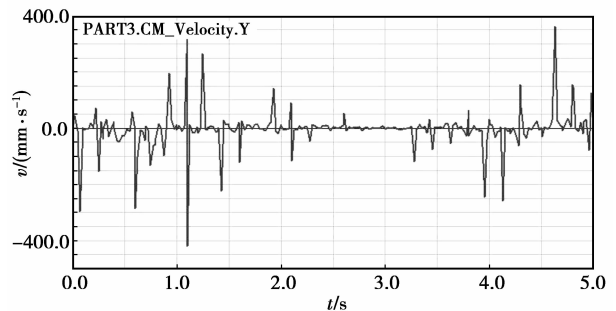


图 10 8 mm 滚珠轴向运动曲线图

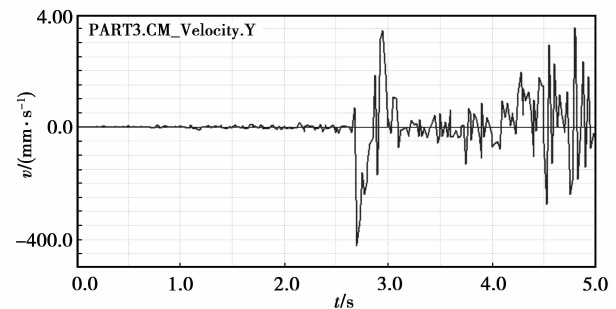


图 11 10 mm 滚珠轴向运动曲线图

由此可知,滚珠直径是滚珠滑移和自锁中非常重要的影响因素,在其它条件相同的情况下,滚珠直径越大越容易发生滑移和卡死。同时随着滚珠直径增大,摩擦力和滚珠与滚道的接触力也逐渐增大,如图 12 所示。特别当滚珠直径、滚珠螺旋公称直径、导程的比例关系超出一定关系时,摩擦力和滚珠与滚道的接触力以指数级急剧增大。仿真的结果与前面理论分析结果一致,因此对于高速运转的滚珠螺旋副,在一定范围内选取滚珠直径是非常必要的。

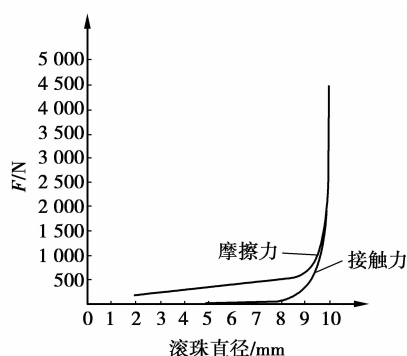


图 12 摩擦力接触力变化曲线图

8 结 论

1) 滚珠螺旋副中滚珠承受法向力方向的差异及接触点的变化直接导致了滚珠的滑移及自锁,同时,在其他条件相同的情况下,滚珠直径越大,其滑移及自锁的现象越严重。

2) 由滚珠螺旋副中滚珠运动公式推导及分析知道,滚珠滑移及自锁对滚珠螺旋副的运动特性有重要影响,严重制约滚珠螺旋副高速性能的发挥。

3) 提出了通过减小滚珠直径等方法来降低滚珠螺旋副中滚珠滑移及自锁的方法,通过 ADAMS 运动仿真分析,验证了文中所提方法的正确性。

参考文献:

- [1] MUNDO D, YAN H S. Kinematic optimization of ball-screw transmission mechanisms [J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(1): 34-47.
- [2] CHRISTIAN B. Study of the operational behavior of high performing ball screws [J]. Konstruktion, 2008, 1: 24-26.
- [3] YOSHIDA T, TOZAKI Y, MATSUMOTO S. Study on load distribution and ball motion of ball screw [J]. Journal of Japanese Society of Tribologists, 2003, 48(8): 659-666.
- [4] MIYAGUCHI K, NINOMIYA M, WATANABE Y, et al. A study on the friction torque variation of a ball screw at motion direction change. Friction torque variation due to the change in ball contact points [J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2002, 68(6): 833-837.
- [5] WEI C C, LIN J F. Kinematic analysis of the ball screw mechanism considering variable contact angles and elastic deformations [J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(4): 717-733.
- [6] 宋现春, 姜洪奎, 许向荣, 等. 高速滚珠丝杠副弹性变形的有限元分析 [J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(5): 582-586.
SONG XIAN-CHUN, JIANG HONG-KUI, XU XIANG-RONG, et al. Analysis of elastic deformation for high speed ball screw based on the finite element method [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(5): 582-586.
- [7] 二宫瑞穗, 宫口和男. 滚珠丝杠高速化的最新技术动向 [J]. 现代制造, 2002, (9): 40-41.
NIMIYA MIZUHO, MIYAGUCHI KAZUO. The latest technology trends of high-speed ball screw [J]. Modern manufacturing, 2002(9): 40-41.
- [8] 程光仁. 滚珠螺旋传动设计基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [9] 施祖康. 滚珠丝杠付的弹性接触变形问题 [J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 1978, (3): 61-70.
SHI ZU KANG. The contact deformation of ball screw [J]. Nanjing Polytechnic University Journal: Natural Science Edition, 1978(3): 61-70.
- [10] CHEN J S. Mechanical model and contouring analysis of high-speed ball-screw drive systems with compliance effect [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 24(3/4): 241-250.
- [11] LIN M C, RAVANI B, VELINSKY S A. Kinematics of the ball screw mechanism [J]. Journal of mechanical design, 1994, 116(3): 849-855.
- [12] LEVIT G A. Recirculating Ball Screw and Nut Units [J]. Machines and Tooling, 1963, (4): 3-8.
- [13] 深圳威远精密技术有限公司柔顺性课题组. 初论滚珠丝杠副的柔顺性 [J]. 机械工人: 冷加工, 2006, 1: 25-27.
Task Group of Compliant Properties, Shenzhen WeiYuan Precision Technology, Ltd. Preliminary Discuss compliant of ball screw [J]. Mechanics: Cold working, 2006, 1: 25-27.
- [14] LEE M T, LEE H C. Muffling structure of high-speed ball screw: US, US20060169079 [P]. 2006-08-03.
- [15] 李承志, 胡来瑒, 朱敬成. 滚珠环面蜗杆副的传动特性 [J]. 湖北工学院学报, 1998, (4): 39-42.
LI CHENG-ZHI, HU LAI-RONG, ZHU JING-CHENG. Study on specific property of motion of ball-bearing torus worm pair [J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 1998, (4): 39-42.