

[文章编号] 1003-4684(2014)01-0087-03

# 接触角螺旋升角对滚柱丝杠副传递效率的影响

李迎峰<sup>1</sup>, 杨家军<sup>1</sup>, 廖雯俊<sup>1</sup>, 朱继生<sup>2</sup>

(1 华中科技大学 机械学院, 湖北 武汉 430074; 2 山东博特精工股份有限公司, 山东 济宁 272071)

[摘要] 建立行星滚柱丝杠副的传递效率数学模型, 对行星滚柱丝杠副的正传递效率进行研究, 并对传动效率影响较大的接触角和螺旋升角进行定量定性的分析, 得出了螺旋升角最优值为 5°, 接触角 45°为最佳值, 为行星滚柱丝杠副的结构参数优化及产品系列化设计提供参考。

[关键词] 行星滚柱丝杠副; 传动效率; 螺旋升角 接触角

[中图分类号] TH11

[文献标识码]: A

作为一种新型的直线传动单元, 行星滚柱丝杠副相比滚珠丝杠传动来说具有承载能力强、摩擦系数小、刚性高, 结构紧凑, 磨损小, 寿命长, 速度快, 安装及维护方便的特点。目前, 国内对行星滚柱丝杠副研究的比较少, 且研究主要集中在行星滚柱丝杠副的均载特性、平稳性、刚度、预紧力、轴向弹性变形、行星齿轮优化等方面<sup>[1-6]</sup>。本文将从行星滚柱丝杠副正传动效率角度着手进行分析, 找出其与螺旋升角和接触角的关系曲线, 并对螺旋升角和接触角进行优化设计<sup>[7]</sup>, 得出最优值。

## 1 行星滚柱丝杠副数学模型

行星滚柱丝杠副主要由滚柱、丝杠、螺母、齿轮、支撑环组(图 1)<sup>[8]</sup>。

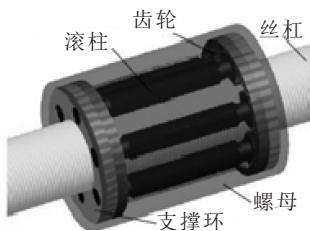


图 1 行星滚柱丝杠副的三维模型

丝杠与滚柱之间的接触点沿着丝杠的螺旋面上, 接触轨迹为螺旋线。在本文分析的接触点全部

位于螺旋轨迹线上。由于滚柱丝杠副特殊的结构, 滚柱与丝杠和螺母之间都有多个接触点, 并且螺母与滚柱接触点位置坐标和丝杠与滚柱接触点位置坐标表示方法很相似(图 2)。

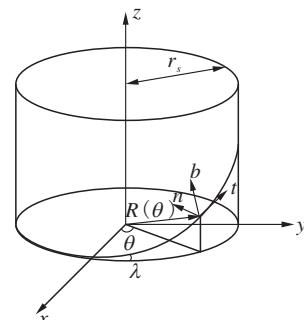


图 2 滚柱丝杠副接触点在笛卡尔坐标系和 Frenet 标架中的位置示意图

为了便于滚柱丝杠副接触点位置关系的建立, 设笛卡尔坐标系  $xyz$ , 及相对应的矢量坐标为  $i, j, k$ , 其  $z$  轴与丝杠轴线重合(图 1)。建立以丝杠轴线用单位向量  $t, n$  和  $b$  表示的 Frenet 标架为参考系<sup>[9]</sup>, 建立接触点位置方程。

为了方便推导, 进行如下符号定义:  $r$  表示接触点的螺旋半径;  $\lambda$  表示接触点的螺旋角度;  $l$  表示螺距; 下标  $S, N, R$ , 分别代表丝杠, 滚柱和螺母。设接触点轨迹线上任意一点所在的角度位置为  $\theta k$ , 则接触点的位置矢量

[收稿日期] 2013-12-16

[基金项目] 湖北省科技重大项目(2013ZX04008-031)

[作者简介] 李迎峰(1988-), 男, 湖北荆门人, 华中科技大学硕士研究生, 研究方向为机械设计及理论

[通讯作者] 杨家军(1953-), 男, 湖北武汉人, 华中科技大学机械学院教授, 研究方向为智能机械与计算机仿真, 机械产品创新与机电产品动态设计

$$\mathbf{R}(\theta) = r_s (\cos \theta \mathbf{i} + \sin \theta \mathbf{j} + q \tan \lambda_s \mathbf{k})。 \quad (1)$$

此外,螺旋角、螺旋半径和螺距之间的关系为

$$\tan \lambda_s = \frac{l_s}{2\pi r_s}。 \quad (2)$$

Frenet 坐标系中的单位矢量可用笛卡尔坐标系表示为

$$\mathbf{t} = -\cos \lambda_s \sin \theta \mathbf{i} + \cos \lambda_s \cos \theta \mathbf{j} + \sin \lambda_s \mathbf{k}; \quad (3)$$

$$\mathbf{n} = -\cos \theta \mathbf{i} - \sin \theta \mathbf{j}; \quad (4)$$

$$\mathbf{b} = \sin \lambda_s \sin \theta \mathbf{i} - \sin \lambda_s \cos \theta \mathbf{j} + \cos \lambda_s \mathbf{k}。 \quad (5)$$

笛卡尔坐标系与 Frenet 标架之间的转换可以表示为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{j} \\ \mathbf{k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \lambda_s \sin \theta & -\cos \theta & \sin \lambda_s \sin \theta \\ \cos \lambda_s \cos \theta & -\sin \theta & -\sin \lambda_s \cos \theta \\ \sin \lambda_s & 0 & \cos \lambda_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{t} \\ \mathbf{n} \\ \mathbf{b} \end{pmatrix}。 \quad (6)$$

因此,接触点的位置向量可以用 Frenet 标架表示为

$$\mathbf{R} = \mathbf{r}_s (\theta \sin \lambda_s \tan \lambda_s \mathbf{t} - \mathbf{n} + \theta \sin \lambda_s \mathbf{b})。 \quad (7)$$

如图 3 所示,给出了丝杠与滚柱之间接触点的位置关系,接触点位于由单位法线向量  $\mathbf{n}$  和单位法线向量  $\mathbf{b}$  组成的法线平面上。

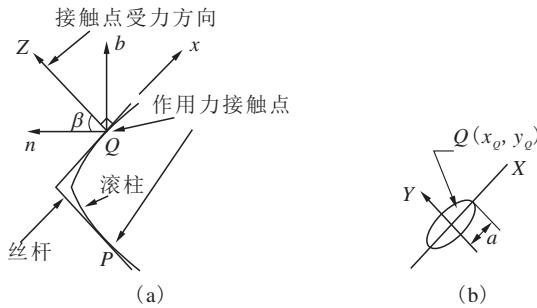


图 3 滚柱在  $\mathbf{n}\mathbf{b}$  平面上的接触点受力分析

由滚柱丝杠几何关系可知,丝杠和螺母上螺旋线的螺距是相等的,即  $l_s = l_N$ ;滚柱和螺母上螺旋升角也相等,即  $\lambda_N = \lambda_R$ ,丝杠副的螺旋半径关系为  $r_N = r_s + 2r_R$ 。螺母和滚柱的螺距与螺旋半径之间的关系分别为  $l_N = 2\pi r_N \tan \lambda_N$  和  $l_R = 2\pi r_R \tan \lambda_R$ ,则丝杠副中螺旋升角和螺距之间的关系可以表示为

$$\frac{r_s}{r_R} = \frac{l_s}{l_R} - 2。 \quad (8)$$

因此,对于同一个的螺距比值,可以有多组不同的螺距值。滚柱为单头数,如果丝杠的头数为 5 或

$$\eta = \frac{r_s \tan \lambda_s (\cos \lambda_s \cos \rho \sin \beta - \sin \lambda_s \sin \rho - f_k (\sin \lambda_s \cos \rho + \cos \lambda_s \sin \rho \sin \beta))}{r_s (\cos \rho \sin \lambda_s \sin \beta + \sin \rho \cos \lambda_s) + r_{RP} (1 - \cos \rho) (\sin \rho + \cos \rho) \cos \lambda_s \cos \beta}。 \quad (18)$$

当取  $f_r = 1 \times 10 - 5 \text{ m}$ ,  $f_k = 0.055$ ,  $r_s = 0.05$

者 6,则螺距比值  $l_s/l_R$  为 5 或者 6,螺旋半径的比值  $r_s/r_N$  为 3 或者 4。滚柱等距的排在丝杠周围,在实际中滚柱一般为 9~13 个,相邻两个滚柱之间的夹角为  $2\pi/9 - 2\pi/13$ ,则相邻两个滚柱与丝杠的接触点轨迹相对关系可以用一个相位角的函数进行描述。

## 2 行星滚柱丝杠副传动效率分析

效率  $\eta$  为输入功率与输出功率的比值,可以表示为

$$\eta = \frac{F_a (-\theta_s L / 2\pi)}{M \theta_s}。 \quad (9)$$

式中:  $F_a$  为螺母所受轴向力;  $M$  为丝杠驱动力矩;  $\theta_s$  为丝杠旋转角度;  $L$  为丝杠导程。

在不考虑摩擦力的情况下,可得

$$F_a = -N \cos \lambda_s \sin \beta; \quad (10)$$

$$M = -r_s N \sin \lambda_s \sin \beta。 \quad (11)$$

联合式(2)、(9)~(11)可得:  $\eta = 1$ 。

在实际情况中,摩擦力是存在的,而且对运动产生着重要影响,使效率小于 1,由行星滚柱丝杠为螺旋结构,其摩擦角的表达式可表示为

$$\tan \rho = \frac{f_r}{r_{RP} \sin \beta}。 \quad (12)$$

式中:  $\rho$  为当量摩擦角;  $f_r$  为滚动摩擦系数;  $r_{RP}$  为当量滚珠半径。

加入当量摩擦角可得,相应的接触点法向向量

$$\mathbf{n}_c = -\sin \rho \mathbf{t} + \cos \rho \mathbf{n} + \cos \rho \sin \beta \mathbf{b}; \quad (13)$$

相应的接触点切向向量

$$\mathbf{t}_c = \cos \rho \mathbf{t} + \sin \rho \cos \beta \mathbf{n} + \sin \rho \sin \beta \mathbf{b}。 \quad (14)$$

因此,作用在接触点的轴向力由法向力  $F_{aN}$  和摩擦力  $F_{af}$  在轴向的投影组成,分别为:

$$F_{aN} = (-N \mathbf{n}_c) \cdot \mathbf{k} = -N(-\sin \rho \mathbf{t} + \cos \rho \cos \beta \mathbf{n} + \cos \rho \sin \beta \mathbf{b}) \cdot \mathbf{k}; \quad (15)$$

$$F_{af} = f_k N \mathbf{t}_c \cdot \mathbf{k} = f_k N(\cos \rho \mathbf{t} + \sin \rho \cos \beta \mathbf{n} + \sin \rho \sin \beta \mathbf{b}) \cdot \mathbf{k}。 \quad (16)$$

式中,  $f_k$  为库仑动摩擦系数。

因此,考虑滚动阻力和滑动摩擦力,可得轴向力  $F_a = F_{aN} + F_{af}$ ,即

$$F_a = -N(\cos \lambda_s \cos \rho \sin \beta - \sin \lambda_s \sin \rho - f_k (\sin \lambda_s \cos \rho + \cos \lambda_s \sin \rho \sin \beta))。 \quad (17)$$

因此,综合(9)、(11)和(17),考虑存在滚动阻力和 Z 方向滑动情况下的效率

$$\eta = \frac{r_s \tan \lambda_s (\cos \lambda_s \cos \rho \sin \beta - \sin \lambda_s \sin \rho - f_k (\sin \lambda_s \cos \rho + \cos \lambda_s \sin \rho \sin \beta))}{r_s (\cos \rho \sin \lambda_s \sin \beta + \sin \rho \cos \lambda_s) + r_{RP} (1 - \cos \rho) (\sin \rho + \cos \rho) \cos \lambda_s \cos \beta}。 \quad (18)$$

当取  $f_r = 1 \times 10 - 5 \text{ m}$ ,  $f_k = 0.055$ ,  $r_s = 0.05$

的效率与螺旋升角和接触角之间的变化关系。

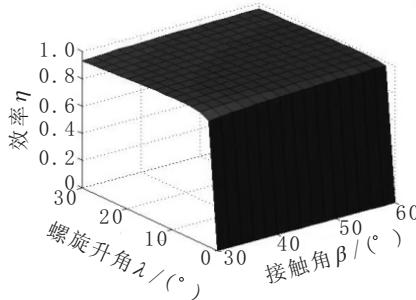


图 4 接触角  $\beta$  和螺旋升角  $\lambda$  与效率  $\eta$  的关系图

从如图 5 可知,丝杠的螺旋升角及接触角对行星滚柱丝杠副的效率有着较大影响。

### 3 传递效率的影响因数分析

以传动效率作为目标函数,对螺旋升角和接触角分别进行定量定性分析,来找出其对行星滚柱丝杠副传递效率的影响曲线。

#### 3.1 螺旋升角对传动效率的影响

从图 5 中可知,当螺旋升角在  $10^\circ$  以内时,效率值随螺旋升角的增大而显著提高。同时,效率值随接触角的增大而更加稳定,这是由于当螺旋升角较小时,滚珠丝杠副的反向间隙变小,从而传动效率较高;而当螺旋升角过大时,摩擦力也随之增大,从而致使传动效率降低。故,螺旋升角  $\lambda$  一般选择在  $5^\circ$  左右。

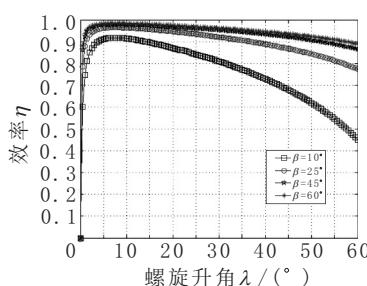


图 5 螺旋升角  $\lambda$  与效率的关系图

#### 3.2 接触角对传动效率的影响

从如图 6 可知,行星滚柱丝杠副的传动效率随接触角的增大而提高,最后趋于平稳。当  $\lambda = 2.5$  时,效率接近稳定值时,接触角  $\beta$  在  $60^\circ$  左右。同时,在一定范围内随着螺旋升角  $\lambda$  的增大,其趋于稳定值得接触角  $\beta$  越小。因此,一般行星滚柱丝杠副的接触角选为  $45^\circ$  左右。

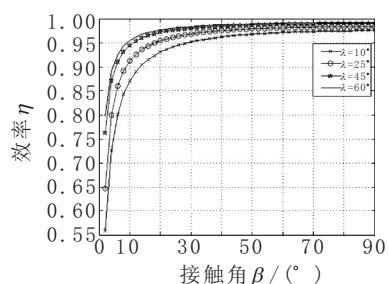


图 6 接触角  $\beta$  与效率  $\eta$  的关系图

## 4 结论

1) 对行星滚柱丝杠副受力特点进行分析,推导出来了行星滚柱丝杠副的正传动效率,并绘制了效率曲线,得出螺旋升角和接触角对传动效率的影响情况。

2) 在  $10^\circ$  范围内,随着螺旋升角  $\lambda$  的增大,传动效率明显提高,得出了螺旋升角  $\lambda$  最优值为  $5^\circ$ ;随着接触角  $\beta$  的增大,传动效率显著提高,接触角  $\beta$  在  $60^\circ$  左右时,传动效率趋于稳定,最终通过曲线的分析得出  $\beta$  在  $45^\circ$  为最佳值。通过分析接触角和螺旋升角对行星滚柱丝杠副传递效率的分析,得到了最优值。

## [参考文献]

- [1] 杨保哲. 行星滚柱丝杠副均载特性及平稳性的分析与研究[D]. 武汉:华中科技大学图书馆,2012.
- [2] 韦振兴. 行星滚珠丝杠副刚度及效率的分析与研究[D]. 武汉:华中科技大学图书馆,2011.
- [3] 韦振兴,杨家军. 行星滚柱丝杠副的结构参数优化设计[J]. 机械传动,2011,35(06):44–47
- [4] 马尚君,刘更. 行星滚柱丝杠副轴向弹性变形的有限元分析[J]. 机械传动,2012,36(07):78–98.
- [5] 杨家军,杨保哲. 预紧力对行星滚柱丝杠副轴向变形及摩擦的影响[J]. 机械传动,2011,35(12):16–22.
- [6] 靳谦忠,杨家军. 滚珠丝杠副和行星式滚柱丝杠副静刚度的比较研究[J]. 机械科学技术,1999,18(02):230–232.
- [7] 孙靖民,梁迎春,陈时锦. 机械结构设计[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004:199–201.
- [8] Plerre C Lemor. The roller screw, an efficient and reliable mechanical component of electro-mechanical actuators[J]. Energy Conversion Engineering Conference, 1996,1(08):215–220.
- [9] Kreyszig E. Advanced Engineering Mathematics[M]. New York: Wiley,1983.
- [10] 陈杰. Matlab 宝典[M]. 北京:电子工业出版社,2006:224–364.

(下转第 107 页)

- London: Academic Press, 1982.
- [12] Sheldrick G M. SHELXL-97, Programm zur Verfeinerung von Kristallstrukturen[C]. Germany: Gottingen, 1997.
- [13] 王贤文. 吡啶-3(4)-甲醛缩-4-氨基安替比林希夫碱及药物喹碘仿为桥联配体金属配位聚合物自组装、表征及性质研究[D]. 广西: 广西师范大学图书馆, 2004.
- [14] 光 磊, 王 蕙. 具有三维超分子结构的单核锌配合物  $[\text{Zn}(\text{py})_3(\text{H}_2\text{O})_3](1,5\text{-nds})$  的合成与表征[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(02): 377–378.
- [15] Wang Xian-Wen, Fu-Ping, et al. Crystal structures and fluorescent properties of two linear trinuclear Zinc(II)
- complexes [J]. Journal of Molecular Structure, 2007 (842): 75–80.
- [16] Allen F H, Kennard O, Watson D G, et al. Tables of bond lengths determined by X-ray and neutron diffraction. Part 1. Bond lengths in organic compounds[J]. Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2, 1987(12): 1–19.
- [17] Kamal Z I, Ali E D, Aziza Z. Shehada. Spectroscopic and magnetic studies on some copper(II) complexes of antipyrine Schiff base derivatives [J]. Polyhedron, 1997, 16(17): 2 909–2 916.

## Synthesis and Characterization of a New Zinc (II) Coordination Complex

HE Xiong<sup>1</sup>, PANG Hai-xia 1, 2

(1 College of Light Industry, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China;

2 Faculty of Material science and Chemistry, China Univ. of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The solvothermal method was adopted to study the ligand forms and biological activities of pyridine class 4-aminoantipyrine Schiff base derivatives. A zinc (II) complexes of pyri-dine-4-carboxaldehyde and 4-aminoantipyrine ligand(L4) single crystal was successfully synthesized, and structurally characterized by Infrared spectrum. The results show that the atom of zinc is in the center of a tetrahedron structure which is slightly deformed.

**Keywords:** Solvothermal method; 4-aminoantipyrine; Crystal structure

[责任编辑: 张 众]

(上接第 89 页)

## Influence of Lead Angle and Contact Angle on Transmission efficiency of Planetary Roller Screws

LI Ying-feng<sup>1</sup>, YANG Jia-jun<sup>1</sup>, LIAO Wen-Jun<sup>1</sup>, ZHU Ji-sheng<sup>2</sup>

(1 Huazhong Univ. of Sci. and Tech. Institute of Mechanical Engin., Wuhan 430074, China;

Shandong brantec Seiko Limited by Share Ltd., Jining 272071, China)

**Abstract:** The paper first established a transmission efficiency mathematical model of the planetary roller screw to analyze the positive transfer efficiency of the screw. It then conducted quantitative and qualitative analyses on the contact angle and lead angle which greatly affect the transmission efficiency. The results show that optimal value of the lead angle is 5°, and the contact angle 45°, which provide references for the planetary roller screw parameter optimization and product series design.

**Keywords:** planetary roller screw; transmission efficiency; lead angle; contact angle

[责任编辑: 张 众]