

# 滚珠丝杠螺母副的有关参数及计算

椒江市汽车配件厂(317700) 俞志平

临海通用机械厂(317000) 冯志民

滚珠丝杠螺母副机构已走过 30 余年的历程。目前, 它不但广泛应用在数控车床、摇臂钻床、平面磨床、工具磨床、龙门铣床、数控冲压机床、加工中心、电加工机床及工业机器人行业, 而且也可用于数控绘图机、切纸机械、食品机械、轧钢机、汽车转向杆及刹车器、造波水槽驱动装置、立体停车场的升降机以及微波天线或雷达定位器, 就连一架民航客机上, 也至少装有 10~30 套。

滚珠丝杠螺母副的特征是丝杠和螺母上都磨有圆弧形螺旋槽, 对合起来即形成螺旋线滚道, 滚道内装有滚珠作为中间传动元件。当丝杠回转时, 滚珠相对于螺母上的滚道滚动, 这是以点接触的滚动方式来取代传统的面接触。由于接触面减少, 不但提高定位精度, 而且节省了能源。按照德国 DIN 标准: 这是一种将旋转运动转换为直线运动的驱动装置, 反之亦然。即丝杠和螺母都可以作为主动件。为了防止滚珠从螺母中滚出来, 在螺旋槽的两端设有回程引导装置使滚珠在内循环滚动。

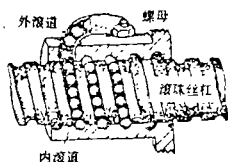


图1 滚珠丝杠螺母副

滚珠丝杠副的特点是:

(1) 由于滚动摩擦系数极小, 故传动效率  $\eta = 0.92 \sim 0.96$ , 比传统丝杠螺母副提高 3~4 倍。因摩擦引起的功能损耗也只有常规丝杠螺母副的 25~33%。

(2) 适当预紧即可消除两者间的螺纹间隙, 达到零背隙, 定位精度高; 反向时可消除空程死区。轴向刚度高, 可准确执行数控指令。

(3) 运动平稳无爬行现象, 并且在停止时也能将惯性减至最低。

缺点是:

(1) 加工精度高以至制动成本高。

(2) 不能自锁, 尤其作为垂直丝杠, 必须增设制动装置。

## 一、滚珠丝杠副的参数

1、名义(公称)直径  $d_0$ : 滚珠与螺纹滚道在理论接触角状态时包络滚珠球心的圆柱直径, 它是滚珠丝杠副的特征尺寸。

2、导程  $P_h$ : 丝杠相对于螺母旋转任意弧度时, 螺母上基准点的轴向位移。

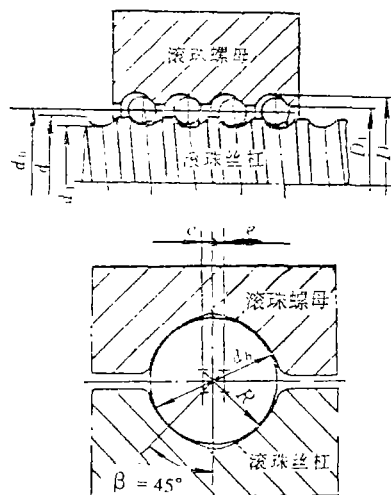


图2 滚珠丝杠螺母副基本参数

(a) 滚珠丝杠副轴向剖面 (b) 滚珠丝杠副法向剖面

3、基本导程  $L_0$ : 丝杠相对于螺母旋转  $2\pi$  弧度时, 螺母上基准点的轴向位移。

4、行程补偿值  $C$ : 有效行程内, 目标行程与公称行程的差。

5、实际行程  $L_a$ : 滚珠螺母相对于丝杠的轴向实际位移。

6、实际平均行程  $L_m$ : 实际行程线的最佳拟合直线。

7、实际平均行程偏差  $e_{sa}$ : 在有效行程

• 本文于 1995 年 3 月 2 日收到。

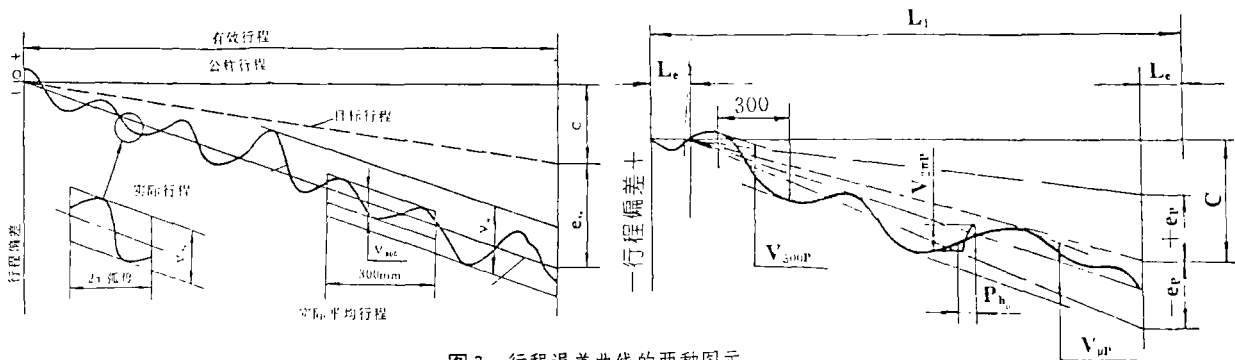


图3 行程误差曲线的两种图示

内, 实际平均行程与目标行程之差。

#### 8、行程变动量 $V_{2\pi}$ 、 $V_{300}$ 、 $V_u$ :

平行于实际平均行程包容行程曲线的带宽。它包括  $2\pi$  弧度内行程变动量  $V_{2\pi}$ , 任意 300mm 长度内行程变动量  $V_{300}$ , 有效行程内行程变动量  $V_u$ 。

9、接触角  $\beta$ : 在螺纹滚道法向剖面内, 滚珠球心与滚道接触点的连线和螺纹轴线的垂直线间的夹角, 理想接触角  $\beta = 45^\circ$ 。

另外还有丝杠螺纹大径  $d$ 、丝杠螺纹小径  $d_i$ 、螺纹全长  $l$ 、滚珠直径  $d_b$ 、螺母螺纹大径  $D$ 、螺母螺纹小径  $D_i$ 、滚道圆弧偏心距  $e$  以及滚道圆弧半径  $R$  等参数。

导程大小是按机床的加工精度要求确定的。精度要求高则导程应取小些, 这样在一定的轴向力作用下, 丝杠上的摩擦阻力较小。但为了使滚珠丝杠具有一定的承载能力, 滚珠直径  $d_b$  不能太小。在满足机床加工精度的条件下, 导程应尽可能取大些。

名义直径  $d_o$  与承载能力有关,  $d_o$  应大于丝杠工作长度的  $1/30$ 。

数控机床常用进给丝杠的名义直径  $d_o$  一般为  $\phi 30 \sim \phi 80\text{mm}$ 。

滚珠直径  $d_b$  大, 则承载能力也大。一般情况下, 滚珠直径  $d_b \approx 0.6L_o$ 。

设滚珠的工作圈数为  $j$ 、滚珠总数为  $N$ , 据有关资料: 在每一个循环回路中, 各圈滚珠

所受的轴向负载不均匀。第一圈滚珠承受总负载的 50% 左右, 第二圈约承受 30%; 第三圈约为 20%。因此, 滚珠丝杠副中的每个循环回路的滚珠工作圈数  $j = 2.5 \sim 3.5$  圈, 若大于 3.5 无实用意义。

滚珠的总数  $N$  不要超过 150 个。

#### 二、计算

##### 1、计算滚珠丝杠副的载荷

(1) 最小载荷  $F_{\min}$ ——机床空载时的传动力, 如导轨摩擦力。

(2) 最大载荷  $F_{\max}$ ——机床承受的最大负荷, 即切削力在滚珠丝杠轴向的分力及工作台重量、工件重量与切削力的其他分量所引起的传动力(包括导轨摩擦力)。

##### (3) 当量载荷 $F_m$

$$F_m = \sqrt[3]{(F_1^3 n_1 t_1 + F_2^3 n_2 t_2 + \dots + F_i^3 n_i t_i) / (n_1 t_1 + n_2 t_2 + \dots + n_i t_i)} \quad (\text{N})$$

##### (4) 当量转速 $N_m$

$$N_m = (n_1 t_1 + n_2 t_2 + \dots + n_i t_i) / (t_1 + t_2 + \dots + t_i) \quad (\text{r/min})$$

##### (5) 滚珠丝杠副的转速 $N_c$

滚珠丝杠副的转速除受自身结构及支承形式制约外, 还受临界转速, 滚珠循环返回机械所限制的安全转速以及温升, 寿命等因素的影响。

使滚珠丝杠副产生共振的临界转速  $N_c$  的计算式为:

$$N_c = (60 \lambda^2 / 2 \pi l^3) \sqrt{(EIg / rA)} \quad (\text{r/min})$$

式中,  $l$ —丝杠的支承间距(mm)

$E$ —丝杠材料的纵向弹性模量,

$$E = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$I$ —丝杠底径的惯性矩

$A$ —丝杠的横截面积( $\text{mm}^2$ )

$g$ —重力加速度

$r$ —丝杠材料的密度,  $r = 7.9 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^2$

$\lambda$ —由支承形式决定的系数

固定—支承:  $\lambda = 3.927$

固定—固定:  $\lambda = 4.73$

固定—自动:  $\lambda = 1.875$

支承—支承:  $\lambda = 3.14$

一般丝杠轴的允许转速  $N_p = 0.8 N_c$ 。

#### (6) 机械效率

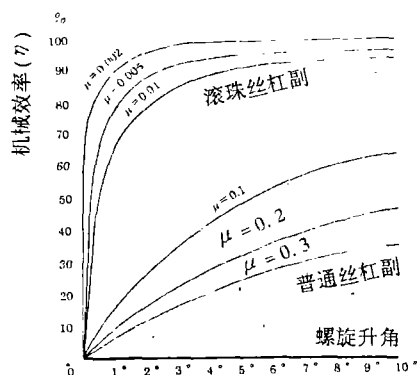


图4 普通丝杠副和滚珠丝杠副机械效率的对比

从  $\eta - \psi$  特性曲线图可知: 当螺旋升角  $\psi = 0^\circ \sim 3^\circ$  时, 传动效率  $\eta$  变化最明显; 当  $\psi \geq 5^\circ$  时,  $\eta$  趋于平缓; 当  $\psi \geq 9^\circ$  时, 则  $\eta > 90\%$ 。由图可见, 大导程 ( $9^\circ \leq \psi \leq 17^\circ$  或  $\frac{1}{2}d_o \leq P_h \leq d_o$ ) 比普通导程滚珠丝杠副的传动效率更高, 且正传动效率与逆传动效率很接近, 故更适合于逆传动装置。

#### 2、计算滚珠丝杠副的导程 $P_h$

根据工作台的最高及最低速度, 伺服电机转速 (如  $2000 \text{ r/min}$ ), 脉冲当量 (脉冲编码器每转脉冲数) 等进行计算。

#### 3、计算额定动载荷 $Ca$

(1) 按滚珠丝杠副的预期工作时间  $L$  (h)

计算

使用机种	运行距离 $L_d$ (km)
一般机械	100~250
机床	250
控制设备	350
测量机械	210
飞行器	30

回转寿命  $L_h$  的计算:

$$L_h = \frac{L_d \times 10^6}{P_h} \cdot \frac{1}{60n}$$

式中:

$L_h$ —回转寿命(h)

$L_d$ —回转距离(km)

$P_h$ —丝杠导程(mm)

$n$ —平均运转速度(r/min)

$$Ca = \sqrt[3]{60nL(F_m f_w / 100 f_a)} \text{ (N)}$$

(2) 按滚珠丝杠副的预期运行距离  $L$  (h)

计算

$$Ca = \sqrt{(L/P_h) \cdot (F_m f_w / f_a)} \text{ (N)}$$

式中精度系数  $f_a$  及负荷系数  $f_w$  可查表1与表2。

表1

精度等级	1、2、3	4、5	7	10
$f_a$	1	0.9	0.8	0.7

表2

负荷性质	无冲击	轻微冲击	有振动
$f_w$	1~1.2	1.2~1.5	1.5~2

(3) 对预加负荷的滚珠丝杠副则按最大轴向负荷  $F_{\max}$  计算  $Ca = f_e F_{\max}$

式中预加负荷系数  $f_e$  可查表3。

表3

预加负荷	轻	中	重
$f_e$	>6.7	3.3~6.7	<3.3

#### 4、计算螺纹滚道的最小底径 $d_{2m}$

(1) 估算滚珠丝杠的允许抗压变形量

$\delta_m$

可按定位精度要求的 25%~30% 或加工精度要求的 20%~25% 中较小的值定为  $\delta_m$ 。

(2) 当滚珠丝杠副安装方式为一端固定, 一端自由或游动时,

$$d_{2m} \geq 2 \times 10^2 \sqrt{10FL / \pi \delta_m E} \text{ (mm)}$$

式中  $E$  为杨氏弹性模量  $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ;

$L$  为螺母至固定端处最大距离 mm;

$F$  为当按定位精度要求时  $F$  为  $F_{\min}$ , 按加工精度要求时  $F$  为进给力与导轨摩擦力之和。

(3) 当滚珠丝杠副安装方式为两端固定时,

$$d_{2m} \geq 10 \sqrt{10FL / \pi \delta_m E} \text{ (mm)}$$

式中  $L$  为两端固定支承间的距离, mm

### 5. 滚珠丝杠副的精度选择

按定位精度要求的  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$  或按加工精度要求的  $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}$ , 估算滚珠丝杠副  $V_{300}$ , 再决定滚珠丝杠精度等级。

注意: 所选择的滚珠丝杠副应满足:  $C_a \geq C_{am}$ ;

$$d_o - 1.2D_w \geq d_{2m}$$

### 6. 选择伺服电机

(1) 电机上最大负载转矩计算:

作用在滚珠丝杠副上的最大负载转矩

$$T_{\max} = \frac{F_{\max} \cdot P_h}{2\pi\eta} \times 10^3 + \frac{F_p P_h}{2\pi} \cdot \frac{1-\eta^2}{\eta} \times 10^3 + T_{f0} + T_{f1} \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

式中  $F_{\max}$ : 滚珠丝杠副最大载荷 (N);

$P_h$ : 滚珠丝杠副导程 (mm);

$\eta$ : 滚珠丝杠副效率, 1、2、3 级  $\eta = 0.9$ , 4 级精度以下  $\eta = 0.85$ ;

$F_p$ : 滚珠丝杠副预紧力, 无预紧的滚珠丝杠副  $F_p = 0$ ;

$T_{f0}$ : 滚珠丝杠副支承轴承的摩擦力;

$T_{f1}$ : 滚珠丝杠副上其他元件产生的摩擦力矩。

电机上的最大负载转矩  $T_{\max} = T_{\max i} + T_c$  (N · m)

式中  $i$ : 电机到滚珠丝杠的传动比;  $T_c$ : 折算到电机上的其他不在滚珠丝杠副上传动件所产生的摩擦力矩。

### (2) 选择伺服电机

其转动惯量  $J_m = (1 \sim 4) T_L (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ , 额定转矩应大于最大负荷转矩  $T_{\max}$  (N · m)

### (3) 验算最大起动转矩 $T_{\max}$

系统转动惯量  $J = J_L + J_m$

$$T_{a \max} = \frac{JW_m}{(3 \sim 4)t_m} = \frac{J\pi n_{\max}}{(90 \sim 120)t_m} \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

式中,  $t_m$ : 电动机的机械时间常数;

$T_{a \max} < T_{\max}$  ( $T_{\max}$  是电机最大输出转矩);

$n_{\max}$ : 快速运动时电机转速。

## 三、设计选用和安装运行中应注意的问题

1、在主机设计和装配时, 要使作用于滚珠丝杠副的轴向载荷通过丝杠轴心, 避免承受径向载荷和颠覆力矩, 因为径向载荷和颠覆力矩会使丝杠弯曲及部分钢球过载, 从而导致传动不平稳。

2、滚珠丝杠副的两端支承方式尽可能采用“两端固定”式或“一端固定、一端支承”式。支承轴承可选用大接触角 ( $60^\circ$ ) 的高刚度专用轴承。两端支承座孔与螺母座孔要精确调整到“三点同心”的最佳状态, 不允许在不同心的情况下强制安装。

3、丝杠轴与驱动电机推荐采用直联方式, 可采用无间隙的弹性联轴器, 不要采用齿轮和键传递动力。

4、主机应配备防止螺母脱出的超程保护装置, 尤其在驱动速度  $V \geq 20 \text{ m/min}$  时。

5、滚珠丝杠副的逆效率高, 不能自锁, 为保证安全运行, 应在丝杠轴一端配置防逆转机构, 如: 制动电机、双向离合器、制动器等。

6、防护与密封: 为防止意外机械副损伤, 避免尘埃、污物及铁屑进入丝杠-螺母副内, 在丝杠轴上应安装防护装置 (例如: 螺旋弹簧保护套、折叠式防护套等), 在螺母两端安装密封圈。

(参考文献略)