

滚珠丝杠副选型

Jeff G. Johnson, 产品工程师
Thomson Industries, Inc.
Wood Dale, IL
540-633-3549
www.thomsonlinear.com
Thomson@thomsonlinear.com

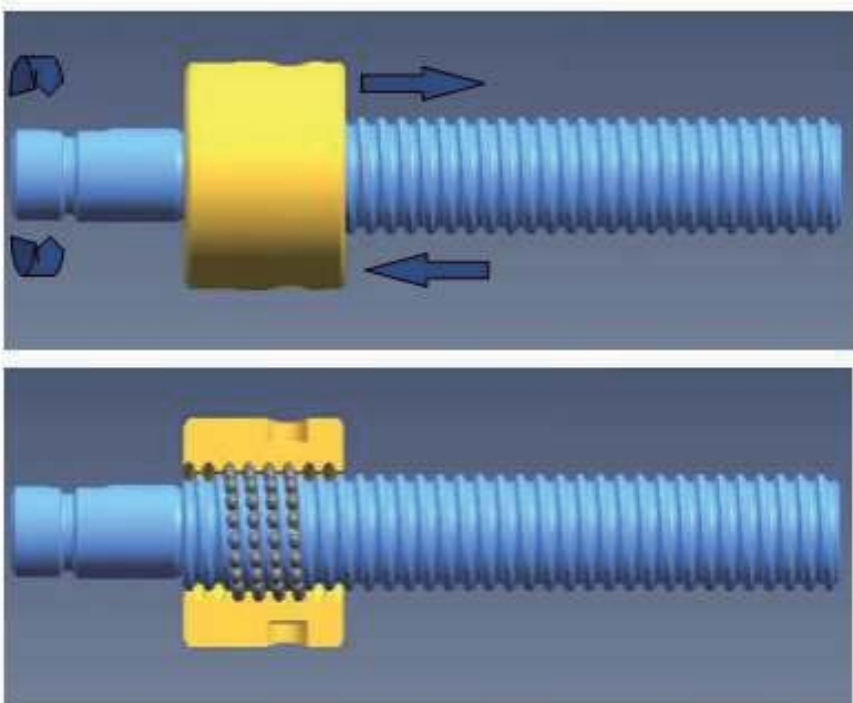


图1：滚珠丝杠副是一种常用的直线执行器

简介

滚珠丝杠副是一种将旋转运动转化为直线运动或将直线运动转化为旋转运动的装置。滚珠丝杠副由滚珠丝杠和含有循环滚珠的螺母组成。丝杠和螺母都有与滚珠配合的滚道，二者通过循环滚珠联接在一起。传递的力均布在大量的滚珠上，这样每个滚珠上承载的力就会相对较小。因为滚珠丝杠副含有滚动体，因此摩擦系数非常小。滚珠丝杠副的机械效率通常大于90%，因此较高的初始安装费用通常可以用降低使用功耗来抵消。滚珠丝杠及其它直线执行器的特点总结如下表所示：

手动执行器	低成本、低速
爱克米螺纹	低成本、中速、多点定位
气缸	单点定位、中等负载，如果不具有气源则应用成本较高，存在漂移现象
滚珠丝杠 – 超精密或精密	高速、重复精度高、精度高、中等成本，螺母旋转型具有较长的行程
带传动	高速、多点重复定位、中等精度、中等负载
缆线和链条传动	低成本、轻载应用、稳健性欠佳
液压缸	负载非常高、单点定位
直线电机	速度最高、负载相对较轻、精度最高
齿条和齿轮传动	中速，长行程，中等载荷至重载
滚柱丝杠	重载、中速

图2：直线执行器装置概要

滚珠丝杠的重要技术参数

额定静载荷 – 最大的非操作负载能力，超过此值将导致滚道发生布氏硬度压入失效。载荷禁止大于额定静载
额定动载荷 – 滚珠丝杠能够运行百万英寸行程（英制系列）或百万转（公制系列）所允许的最大负载。不推荐负载大于额定动载荷
导程误差 – 每英尺的定位误差（英制系列）或每300mm的定位误差（公制系列），用来量度运动精度。
背隙 – 滚珠螺母与丝杠间的轴向自由运动，用来量度滚珠丝杠的刚度和可重复性。
末端固定方式 – 末端支承方式影响丝杠的速度和柱负载

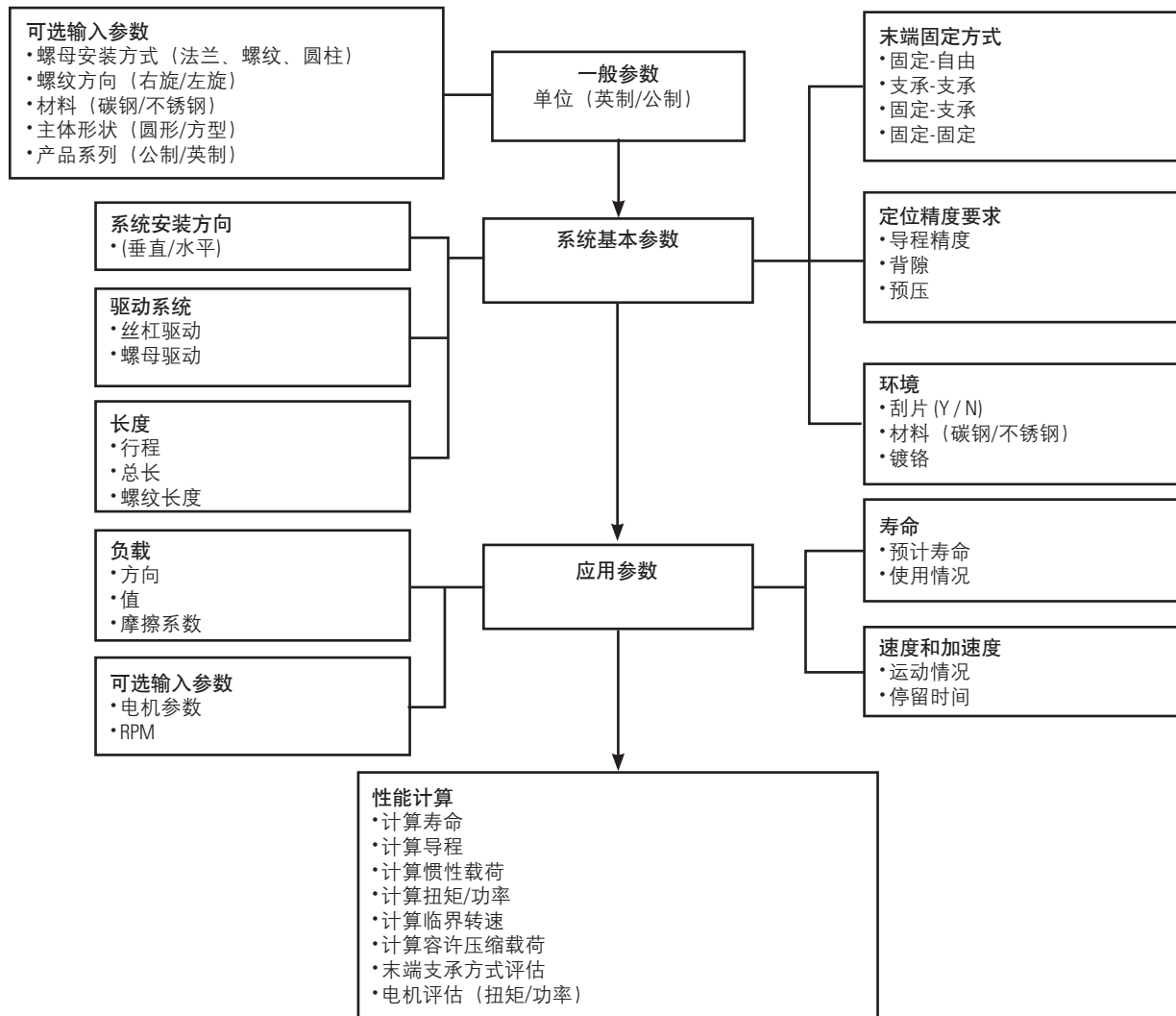


图3: 滚珠丝杠选型参数

可选输入参数

图3概述了滚珠丝杠选型过程中所需的参数。可选输入参数能够让设计工程师在滚珠丝杠选型的早期就能够根据特定性能来选择具体类型的滚珠丝杠。值得注意的是，指定可选输入参数可能会不必要地限制滚珠丝杠的选择范围。例如，如果你选择了公制产品系列，那就会放弃掉所有的英制系列产品，但英制的滚珠丝杠也很可能很好地适合此应用。

系统基本参数

系统基本参数确定了应用要求的基本几何尺寸。系统的安装方向同样也很重要，因为水平方向放置时负载等于有效载荷重量乘以摩擦系数，而竖直方向放置时负载等于重力。定位精度要求决定了应用所需滚珠丝杠的精度等级。以下表中显示了不同类型滚珠丝杠的定位精度水平。

滚珠丝杠类型	精度
精密英制	+/- 0.004 in/ft
超精密英制	+/- 0.0005 in/ft
精密公制 – 精度等级为T7级	+/- 50mm/300m
精密公制 – 精度等级为P5级	+/- 23mm/300m
超精密公制 – 精度等级为P3级	+/- 12mm/300m

背隙是指滚珠丝杠和滚珠螺母间的直线自由运动，可以通过预压螺母进行调节。变导程预压使螺母中的螺纹导程略小于丝杠导程，从而实现精确的预压。这种预压方式典型应用于既需要高重复精度又需要高刚度的场合。双螺母调节预压方式中两个滚珠螺母通过中间的一个压缩弹簧进行轴向预压。这种预压方式典型应用于重复定位要求高的定位应用。如果没有预压，那么丝杠和螺母间的轴向间隙通常为0.002-0.008英寸，具体数值取决于丝杠尺寸。无预压滚珠丝杠通常应用于运输或竖直应用。

驱动系统类型是另一个基本丝杠参数。在丝杠驱动系统中，螺母是固定的，丝杠用于驱动；在螺母驱动系统中，丝杠是固定的，螺母用于驱动。

滚珠丝杠末端安装方式有支承和固定两种形式。末端支承形式只在单点对滚珠丝杠进行支承，不能够承受弯矩。末端固定形式能够承受弯矩，因为它通常使用两个充分隔开的轴承进行支承，因此能够保证滚珠丝杠垂直于旋转轴承端面。末端固定形式能够提供较大的断裂强度和更高的临界转速。而另一方面，末端支承形式结构更加紧凑，成本更低。末端支承形式通常比末端固定形式更容易调整 and 安装，因此安装成本通常更低一些。滚珠丝杠的固定方式通常有：

- 一端固定，一端自由
- 两端支承
- 一端固定一端支承
- 两端固定

应用参数

首先要确定的应用参数是负载方向和水平。滚珠丝杠最好只承受轴向负载。滚珠丝杠在压缩载荷下避免屈曲的能力叫做断裂强度。滚珠丝杠必须承受轴向力，这个力与电机扭矩作用在滚珠螺母上的力大小相等，方向相反。总的来说，断裂强度决定了设计参数，因为对于长柱形产品，断裂强度远低于其抗压强度。因为长径比对于断裂屈曲非常重要，于是滚珠丝杠的压缩负载强度将取决于丝杠的长度。在支承相同负载而不发生屈曲的情况下，两端固定滚珠丝杠的长度可以是两端支承滚珠丝杠长度的1.5倍，是一端自由滚珠丝杠长度的2.5倍。

滚珠丝杠的极限速度通常为滚珠丝杠自然频率对应的转速。滚珠丝杠的临界转速通常是指滚珠丝杠发生谐波振动时的旋转速度，它通常是滚珠丝杠振动的特征频率。例如，一根长100英寸、齿根直径1英寸的滚珠丝杠两端固定时自然频率约为18 Hz。同样的一根滚珠丝杠，两端支承时自然频率将降为8 Hz。如果丝杠的转动频率与丝杠的自然频率相同，微弱的不平衡都能够导致丝杠的共振，从而使丝杠过度弯曲，导致丝杠不能够正常工作。

此外，还可以使用各种类型的轨道进行导向，如直线导轨和方轨。导轨寿命取决于使用情况（滚珠丝杠每天使用多少小时，每周使用几天，每年使用多少周）和滚珠丝杠的总寿命要求。对于更加复杂的应用，你还可以选择构建更加完整的运动属性。每段运动的属性只需输入初始速度、结束速度、运动时间和此段运动间的扭矩。

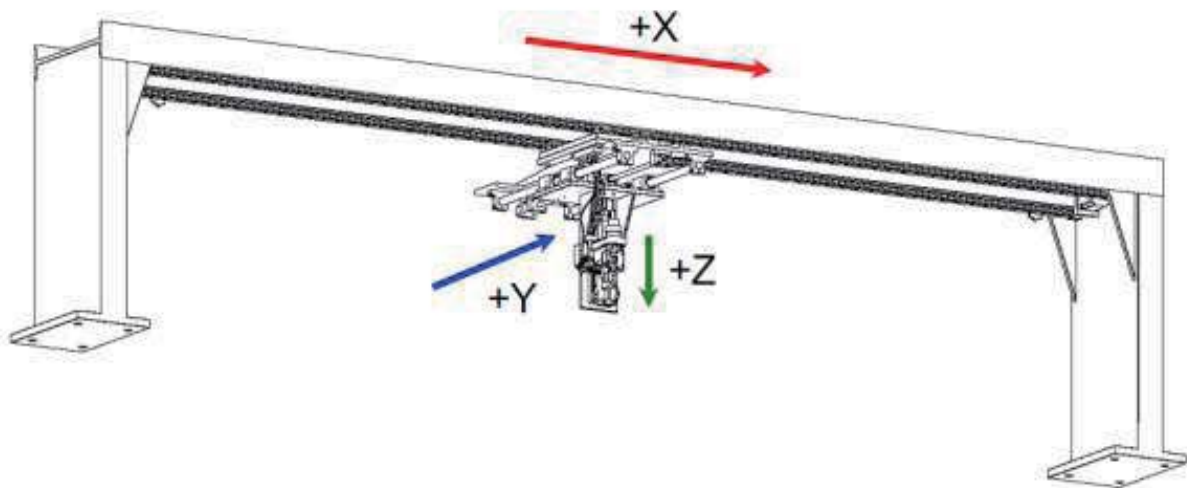


图4：门式焊机应用

选型范例

我们以三轴门式焊机应用为例来演示如何对滚珠丝杠副进行选型。滚珠丝杠副在整个X轴上运动，丝杠的两端采用轴承支座支承的安装方式。为简单起见，我们规定滚珠螺母的安装方式为法兰安装，材料是合金钢，右旋螺纹，公制系列产品。在此应用中，系统螺旋传动方向为水平方向。X轴的长度是6米。安装方式为带有热稳定法兰的两端固定式。因为此应用并不要求非常高的精度，因此我们可以选择无预压的精密滚珠丝杠副。因为工作环境为多尘环境，因此滚珠丝杠副需要配置刮片，刮片材料可选择合金钢，不需进行特殊的表面处理。

架在滑轨上的托板施加了2,668.9 N (600 lbs) 的力。行程为4.5 m (177.165 in)，跨距为5.818 m (229.055 in)。要求速度为0.1 m/s (3.927 in/sec)，加速度和减速度为(3.927 in/sec)。工况要求为10次/小时，8小时/天，5天/周，50周/年。对于滚珠丝杠的寿命要求为20年，配件寿命要求为5年。此外，根据电气部门的要求，与滚珠丝杠副配合的电机为步进电机。

接下来我们要为X轴选择直线导轨。这个应用的首要要求是高承载能力和高刚度。应用中滚珠丝杠的长度较长，达5.5 m (18英尺)，但6 m以下的丝杠都可以做成一体式的，不需要进行拼接。此外，少量维护是此应用的另一个重要要求。根据以上要求，最终选择500 系列滚珠直线导轨。Thomson 500 系列滚珠直线导轨的寿命长，刚度非常高，动载和静载的承载能力大，能够承受高扭矩载荷，运动精度高，多种密封和润滑油注入口可选。

按照选型结果，我们可以计算出施加在滚珠丝杠上的负载大小。

$$F = N \times \mu_r$$

式中 μ_r 表示摩擦系数，对于此应用所选的直线导轨，其值为0.005。

$$F = 2,698 \text{ N} \times 0.005 = 13.3 \text{ N} (3.0 \text{ lbs})$$

$$F = ma = 2,668.9 \text{ N} / 9.81 \text{ m/s}^2 \times 2.5 \text{ m/s}^2 = 680.1 \text{ N} (153 \text{ lbs})$$

$$F_{eq} = 303.8 \text{ N} (68.3 \text{ lbs})$$

基于以上计算所得的负载值，我们首先选择NEFF KGF-D滚珠螺母。这种滚珠螺母具有整体式法兰、整体式刮片及DIN 69051安装基座，丝杠的精度为 $\pm 50 \mu\text{m} / 300 \text{ mm}$ 。

然后，我们将考虑电机要求。因为此应用要求使用步进电机驱动，因此我们要保持电机转速非常慢。电机转速可由以下公式确定：

$$\text{转速 (RPM)} = \text{行进速度 (mm/min)} / \text{导程 (mm)}$$

以下导程可供选择：

$$100 \text{ mm/s} \times 60 / 1200 \text{ rpm} = 5 \text{ mm}$$

$$100 \text{ mm/s} \times 60 / 600 \text{ rpm} = 10 \text{ mm}$$

$$100 \text{ mm/s} \times 60 / 300 \text{ rpm} = 20 \text{ mm}$$

因为要保持较慢的转速，所以我们选择了20 mm导程的滚珠螺母，这样就能够在满足步进电机较低转速的条件下满足滚珠螺母的运动周期要求。

我们可以用以下公式计算所需扭矩：

$$T_d [\text{N} \cdot \text{M}] = 1.77 \times 10^{-4} \times F_{eq} \times P$$

式中：

$$T = \text{Torque (Nm)}$$

$F = \text{Load (N)}$

$P = \text{Lead (mm)}$

计算出所需扭矩为：

$T_d = 2.15 \text{ Nm (304.5 oz-in)}$

加速过程中的最大扭矩为：

$T_d = 4.82 \text{ Nm (682.6 oz-in)}$

按照应用情况与扭矩数据，选择的电机为NEMA 42步进电机。

下一步，我们将用以下公式计算丝杠的临界转速。

$$n_c [\text{rpm}] = C_s \times 1.2 \times 10^8 \times d_r / l^2$$

式中：

C_s 为丝杠末端固定形式系数：

末端固定形式	C_s
一端固定，一端自由	0.36
两端支承	1.00
一端固定，一端支承	1.47
两端固定	2.23

$d_r = \text{齿根直径 (mm)}$

$l = \text{跨距 (mm)}$

在这种情况下，此应用我们要考虑三种不同尺寸滚珠丝杠的临界转速：

40 mm x 20 mm

$d_r = 35.9 \text{ mm}$

$l = 5,818 \text{ mm}$

$n_c = 283.8 \text{ rpm}$

$n_s = n_c \times S$ （ S 表示安全系数，取为0.8）

$n_s = 227.1 \text{ rpm}$

$300 > 227.1$ – 不满足要求！

50 mm x 20 mm

$d_r = 44.1 \text{ mm}$

$l = 5,818 \text{ mm}$

$n_c = 348.6 \text{ rpm}$

$n_s = n_c \times S$ （ S 表示安全系数，取为0.8）

$n_s = 278.9 \text{ rpm}$

$300 > 278.9$ – 不满足要求！

63 mm x 20 mm

$d_r = 56.9 \text{ mm}$

$l = 5,818 \text{ mm}$

$n_c = 449.8 \text{ rpm}$
 $n_s = n_c \times S$ (S表示安全系数, 取为0.8)
 $n_s = 359.9 \text{ rpm}$
 $300 < 359.9$ – 满足要求, 通过!

现在, 我们将用以下公式校核螺母临界转速:

$DN = d_0 \times n$
式中:
 $DN = 140,000$
 d_0 = 公称直径 (mm)
 n = rpm

校核滚珠丝杠的螺母临界转速是否满足滚珠临界转速要求:

$DN = 63 \times 300 = 18,900$
 $18,900 < 140,000$ – 满足要求, 通过!

接下来我们将用以下公式确定此应用的压缩载荷:

$F_c [N] = C_s \times 9,687 \times 10^4 \times d_r^4 / l^2$
式中:
 F_c = 临界弯力 (N)
 C_s = 末端固定形式系数, 数值如下表所示:

末端固定形式	C_s
一端固定, 一端自由	0.25
两端支承	1.00
一端固定, 一端支承	2.00
两端固定	4.00

d_r - 齿根直径 (mm)
 l = 跨距 (mm)

输入:
 $D_r = 56.9$
 $l = 5,818 \text{ mm}$
 $C_s = 4.00$

输出
 $F_c = 119,991.6 \text{ N}$
 $F_s = F_c \times S$ (S表示安全系数, 取为0.8)
 $F_s = 95,993 \text{ N}$

验证
 $680.1 \text{ N} < 95,993.3 \text{ N}$ – 满足要求, 通过!

最后还要验证滚珠丝杠的预期寿命。预期寿命通常用L10表示, 它表示在此时间后90%的滚珠丝杠仍然能够正常工作。

$$L_{10} [\text{转数}] = (C_{am} / F_{eq})^3 \times 10^6$$

在此应用中，预期寿命为1,035,752.6年。因为计算所得的预期寿命太长，因此我们基于临界转速而非预期寿命来选择滚珠丝杠。

最后，我们要验证轴承支承的预期寿命。典型的固定轴承支承是WBK系列产品。轴承支承的预期寿命可由以下公式计算。

$$L_{10} [\text{小时}] = (C_{am} / P_r)^3 \times (1 \times 10^6 / 60 \times n)$$
$$P_r = (0.35 \times F_r) + (0.57 \times F_a)$$

$$C_{am} = 51.5 \text{ kN (11,577.7 lbs)}$$

$$F_a = 68.3 \text{ lbs} / 2 = 34.15 \text{ lbs}$$

$$F_r = 0.0 \text{ lbs}$$

$$P_r = 19.47 \text{ lbs}$$

$$L_{10} = 22.1 \text{ years}$$

22.1 > 5 – 满足要求，通过！

Y轴和Z轴滚珠丝杠副的选型方法类似。

结论

如本示例所示，对于一个特定的应用，滚珠丝杠副的正确选型是一个确定尺寸最小、最具性价比的解决方案的迭代过程。该过程先根据设计负载、直线速度和定位精度来计算滚珠丝杠副的直径、导程和负载能力，然后根据寿命、尺寸限制、安装配置及环境要求选择独立的滚珠丝杠配件。

一种更加简单的滚珠丝杠副选型方法

网页选型工具正成为一种日益流行的简化机械设计流程的方法。这些资源可大大缩短选择最佳标准部件的时间，满足绝大多数应用的需求。

例如Linear MOTIONEERING®：Thomson滚珠丝杠和螺纹丝杠(www.thomsonlinear.com/linear_motioneering_screws)。用户可简单地输入一些关键的产品和应用属性，包括：

- 系统放置方位
- 定位精度要求
- 使用环境条件
- 负载条件
- 运动轨迹

输入这些信息后，“Linear MOTIONEERING®：滚珠丝杠和螺纹丝杠”页面将显示出所有符合要求的Thomson滚珠丝杠产品，输出结果包括：

- 技术参数
- 尺寸信息
- 可供下载的不同格式的2D和3D CAD文件
- 报价和价格信息



Linear Motion. Optimized.

关于Thomson

Thomson拥有超过60年的运动控制单元生产经营历史，是Linear Ball Bushing®轴承、Profile Rail轴承、60 Case™轴系、磨削和轧制滚珠丝杠、直线执行器、减速机、离合器、制动器、直线系统及相关配件的业内领先供应商。Thomson于1945年发明了直线滚珠轴套轴承，并凭借一系列无可比拟的机械运动控制解决方案始终引领全球商用、航天航空和国防市场。Thomson工业公司在北美、欧洲和亚洲都设有制造厂，并在全球拥有超过2000家分销商。

联系我们：

电话：400 666 1802

邮件：sales.china@thomsonlinear.com

网站：www.thomsonlinear.com.cn