数控机床进给系统轴向定位精度分析

沈阳机床（集团）设计研究院有限公司 （辽宁 110142） 李兆维

滚珠丝杠副作为精密、高效的传动元件在精密机床、数控机床中得到广泛应用。在数控机床的进给传动系统中，经常采用滚珠丝杠作为传动元件，其轴向定位精度直接影响了数控机床的整体性能。在数控机床的设计使用中，会有诸多因素对滚珠丝杠轴向定位精度造成影响，本文对这些因素进行分析，并提出一些相应的应对措施。

1. 滚珠丝杠系统轴向刚度

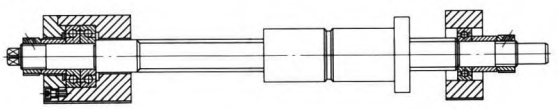
随着数控机床的发展，快移速度及进给速度要求不断提高，导致滚珠丝杠系统所承受的轴向力越来越大。因此，滚珠丝杠系统的轴向刚性对数控机床轴向定位精度的影响也日趋明显。对滚珠丝杠系统刚性产生影响的因素主要包括丝杠轴的轴向刚度、螺母的轴向刚度、支撑轴承的轴向刚度等。

（1）丝杠轴的轴向刚度　对于同种材料、同种规格的丝杠，不同的轴端支撑形式，丝杠轴的轴向刚度也不尽相同。可简化为一端固定和两端固定两种情况。第一种情况是一端固定，另一端支撑或自由（见图1）。此种安装方式可等效为一端固定的悬臂梁形式，根据材料力学相关知识可得：

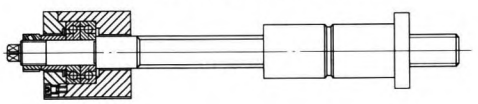
$$K_s = \frac{AE}{1\,000L}$$

式中，K_s 是丝杠轴的轴向刚度（N/μm）；A 是丝杠轴的剖面面积（mm^2）；E 是弹性模量，这里 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa；L 是作用点到固定端的距离（mm）。

由公式可见，在相同轴向载荷作用下，距离固定端越远 K_s 值越小，即轴向变形越大，对定位精度的影响也就越大。所以在使用此种轴端支撑形式的时候，应尽量使进给系统更多地在靠近固定端一侧工作，例如数控车床 Z 轴进给，多采用靠近主轴端固定。



（a）一端固定、一端浮动支撑



（b）一端固定、一端自由

图1　一端固定安装方式示意图

第二种情况是两端固定（见图2）。此种安装方式可等效为两端固定的简支梁形式，根据材料力学相关知识可得：

$$K_s = \frac{AEL}{1\,000ab}$$

式中，K_s 是丝杠轴的轴向刚度（N/μm）；A 是丝杠轴的剖面面积（mm^2）；E 是弹性模量，这里 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa；L 是丝杠安装距离（mm）；a、b 分别是作用点到两个轴端的距离（mm）。

这种安装方式当 $a = b = L/2$ 时刚度最小，为 $K_s = \frac{4AE}{1\,000L}$，故两端固定的安装方式刚度远高于一端固定。

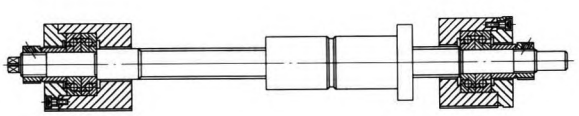


图2　两端固定安装方式示意图

（2）螺母的轴向刚度　滚珠丝杠螺母的刚度不仅与螺母尺寸、钢球大小、螺母形式有关，对于相

同规格的螺母而言，预压不同，螺母的轴向刚度会有很大差别，二者的弹性变形曲线如图3所示。

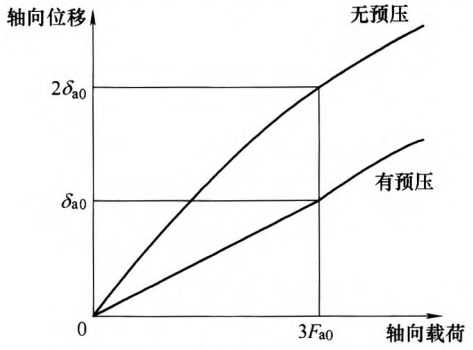


图3 滚珠丝杠弹性变形曲线

对于无预压型产品，多以轴向载荷为额定载荷30%时的刚度值作为衡量标准，即

$$K_N = K\left(\frac{F_a}{0.3C_a}\right)^{1/3} \times 0.8$$

式中，K_N 是螺母的轴向刚度（N/μm）；K 是理论轴向刚度值（N/μm）；F_a 是承载轴向载荷（N）；C_a 是基本额定动载荷（N）。

对于预压型产品，则多以轴向载荷为基本额定动载荷10%时的刚度值作为衡量标准，即

$$K_N = K\left(\frac{F_{a0}}{0.1C_a}\right)^{1/3} \times 0.8$$

式中，K_N 是螺母的轴向刚度（N/μm）；K 是理论轴向刚度值（N/μm）；F_{a0} 是预压负荷（N）；C_a 是基本额定动载荷（N）。

通过对比不难发现，预压型产品的刚度值高于无预压型产品，而且预压值越大，刚度也越高。但预压负载不能无限增大，如图3所示，当轴向负载小于 $3F_{a0}$ 时，位移与载荷成线性关系；当轴向负载大于 $3F_{a0}$ 时，另一侧的轴承将卸荷，故应使轴向负载始终处于小于 $3F_{a0}$ 的状态，即 F_{a0} 应大于最大轴向载荷的1/3。预压负荷的增大会导致丝杠磨损程度加剧，使用寿命降低，一般情况下，预压负载不能大于额定动载荷的10%。

（3）支撑轴承的轴向刚度　滚珠丝杠支撑轴承除了支撑滚珠丝杠及相关附件外，一般还要承受很大的轴向载荷，目前固定端多采用滚珠丝杠专用的60°角接触球轴承来提高轴向刚度。

2. 滚珠丝杠热变形

在数控机床的工作过程中，会不可避免地产生热量并导致温度的升高，此时丝杠轴也会出现热位移进而导致定位精度的下降。热位移 δ_t 的大小可通过下式求得：

$$\delta_t = \alpha \Delta t l_u$$

式中，α 是线膨胀系数；Δt 是丝杠轴温升；l_u 是螺纹有效长度。

由上式可见，温升对定位精度影响明显。为防止滚珠丝杠温度上升，可采用如下对策：

（1）不对滚珠丝杠及支撑轴承施加过大的预紧力。

（2）正确选定并补充适当的润滑剂。

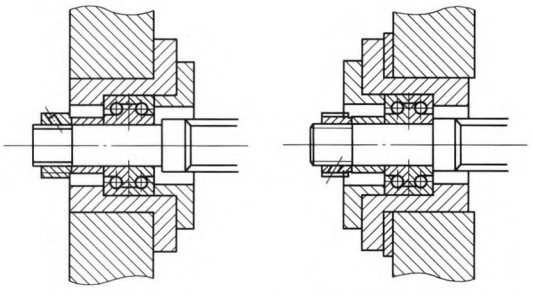
（3）在快移速度不变的前提下，通过加大滚珠丝杠导程来降低转速。

（4）对丝杠进行强制冷却（如中空丝杠、螺母循环水冷等）。

（5）将基准运行距离的目标值设定为负值。

（6）对丝杠轴进行预拉伸。

其中，（1）影响丝杠系统刚性，（3）影响驱动电动机的选择，需要在设计过程中综合考虑。在结构设计中，对于两端固定的支撑形式，通常对丝杠轴进行预拉伸来补偿热伸长。丝杠两端固定，其中一端轴承座轴向可调，拉伸量 δ_t' 等于或略大于热伸长量 δ_t。丝杠伸长后，会使预拉伸力下降以至消失，却不会产生行程误差。进行预拉伸时轴承结构如图4所示，其中 a、b 两种结构均可对丝杠轴进行预拉伸处理。



（a）丝杠调整的结构　　（b）垫片调整的结构

图4 丝杠预拉伸时的轴承结构

3. 滚珠丝杠自重变形

在滚珠丝杠水平使用的情况下，滚珠丝杠受自重影响会产生弯曲变形，尽管变形量较小，但是在加工尺寸精度及形状位置精度很高的工件时，这些变形量不可避免地会影响工件的形状和位置精度。

不同的支撑形式，变形量大小也有所区别。对滚珠丝杠系统进行材料力学上的简化等效，固定支撑可等效为固定端，浮动支撑可等效为简支端。通过材料力学的相关知识，不难得出如下结论：

（1）变形量：两端固定＜一端固定、一端支撑＜一端固定、一端自由。

（2）对丝杠进行预紧可抑制重力影响下的变形。

（3）丝杠越长变形量越大。

所以在滚珠丝杠系统的设计和组装过程中，应充分考虑自重与预紧之间的关系，选择合适的配比。在行程很大的进给系统中，建议对滚珠丝杠施加多点浮动支撑，尽量减少自重变形。

4. 提高滚珠丝杠定位精度的方法

除上述因素会对滚珠丝杠的定位精度产生影响外，在生产制造的各个环节中，都有可能出现影响滚珠丝杠定位精度的情况。可在设计调试过程中，对综合定位误差进行补偿，提高滚珠丝杠的定位精度。

（1）合理选择支撑方式　在较短或竖直安装的丝杠系统中，可采用一端固定、一端自由的安装方式，但要注意尽量使丝杠受拉，避免承受压力。在较长的水平安装丝杠系统中，可采用一端固定、一端支撑的安装方式。在精度和刚度要求较高的场合中，可采用两端固定的安装方式，此方式一定要进行预拉伸。当然，由于使用场合不同，丝杠的安装方式也不是一成不变的，需要设计人员进行具体分析计算。

（2）数控系统误差补偿　在数控机床的调试过程中，可根据机床的具体情况，通过数控系统进行误差补偿，以得到较好的定位精度。

（3）闭环控制系统　在定位精度要求较高的场合，可考虑安装直线光栅尺等检测设备，对丝杠的直线运动形成一个全闭环反馈控制系统，通过光栅尺自身的高精度来保证定位精度。

5. 结语

数控机床进给系统的轴向定位精度会直接影响到加工件的精度，定位精度降低会导致加工件的尺寸误差乃至出现缺陷。本文对滚珠丝杠刚性、热变形、自重等影响定位精度的因素进行了分析，并提出了相应的对策和提高定位精度的方法。合理运用上述对策及方法，可有效提高机床轴向定位精度，满足设计要求。**MW**　　（收稿日期：20130917）

黛杰刀具成都办事处开业

2013 年 12 月 18 日，黛杰刀具在天府之国四川成都举行了成都办事处的盛大开业剪彩仪式。当天天公也作美，挂起了非常少见的艳阳，伴随着黛杰刀具成都联络办事处昂首启航。黛杰刀具自 1938 年成立以来，作为从原料粉末到成品产出一贯制专业硬质合金厂家，产品性能和品牌知名度一直深受广大用户的拥戴。自 2002 年在上海设立黛杰上海事务所，2006 年设立黛杰广东事务所之后，又先后在武汉、大连分别设立了联络办事处。



通过 10 余年的努力，黛杰产品在西南市场的知名度和销售量取得了傲人的成绩，特别是在模具制造，重工机械，航空航天以及汽车零部件，电子元器件加工行业受到广泛的青睐和一致的好评。为了在中国西南地区构建更加完善并且可持续发展的销售网络，进一步强化对该区域内客户的售前售后服务，黛杰决定在成都建立联络办事处。

开业典礼上黛杰工业株式会社社长生悦住先生专门用中文致辞。随后黛杰工业株式会社董事，中国区首席代表高永明先生发表了热情洋溢的讲话，引来台下掌声不断。除此之外代理商代表、客户代表及黛杰成都办事处负责人谢军也分别致辞。

在各位嘉宾的鼎力支持下，黛杰成都办事处开业典礼取得了圆满成功，成都联络办事处也于 12 月 18 日正式启动。