

# 数控机床进给系统的热变形分析及补偿抑制对策

苟卫东<sup>①</sup> 杨锦斌<sup>①</sup> 谢黎明<sup>②</sup> 靳岚<sup>②</sup> 王书亭<sup>③</sup>

(①青海一机数控机床有限责任公司, 青海 西宁 810018;

②兰州理工大学, 甘肃 兰州730050;

③武汉天喻软件有限责任公司, 湖北 武汉 430223)

**摘要:** 对抑制滚珠丝杠的温升及热变形的对策进行了探讨, 提出解决温升和热变形的办法, 对提高滚珠丝杠副的加(减)速度特性及对运动指令的快速跟踪能力, 保证滚珠丝杠轴系的系统刚度和丝杠副的轴向刚度, 减小起动和停止瞬间弹性变形具有指导意义。

**关键词:** 滚珠丝杠温升 冷却技术 热变形抑制技术

## Heat-deformation Analysis of CNC Machine tool's Feeding System and Compensation & Restraint Measures

Gou Weidong<sup>①</sup> Yang Jinbin<sup>①</sup> Xie liming<sup>②</sup> Jin Lan<sup>②</sup> Wang Shuting<sup>③</sup>

(①Qinghai No.1 CNC Machine Tool Co.,Ltd. Xining, Qinghai 810018;

②Lanzhou Technology University, Lanzhou, Gansu 730050;

③Wuhan Tianyu Software Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430223)

**Abstract:** After discussing the measures to restraint both temperature rise and heat-deformation of ball screw, to offer an approach of resolving temperature rise and heat-deformation. And this kind of approach has a guiding role to acceleration & deceleration characteristics of ball screw pairs' promotion and a rapid tracing ability about movement, to guarantee system rigidity of ball screw and axial rigidity of lead screw pairs. And as well as to reduce the starting and stopping of deformation caused by moment elasticity

**keywords:** temperature rise of ball screw cooling technology heat-deformation restraint technology

### 一、引言

滚珠丝杠副是数控机床和加工中心的关键部件, 起到精密传动和定位的作用。随着数控机床向高速高精方向的发展对滚珠丝杠的精度提出了更高的要求。一般来说, 丝杠加工过程中影响螺纹精度的因素有机床传动链误差、温度变化引起的误差、安装误差、操作者人为误差等。其中, 温度引起的热变形误差是最大的, 也是较难控制的, 成为制约滚珠丝杠副高速化的关键因素研究滚珠丝杠的温升及热变形规律对提高机床的加工精度具有重要意义。

滚珠丝杠螺母副由于处于进给系统传动链的末级, 它的传动误差将直接影响到机

床的定位精度，而温升引起的热变形通常是丝杠定位误差的主要组成部分，滚珠丝杠的温升是由多种因素引起的，温升对丝杠的传动系统是不利的，由温升导致丝杠产生热变形，由热变形导致丝杠定位精度变化，尤其在高速进给过程中还会造成丝杠传动系统的颤动和噪音，因此解决丝杠热变形是非常重要的。

## 二、滚珠丝杠螺母副高速化的主要问题

滚珠丝杠螺母副相对滑动丝杠螺母副来说，具有优良的传动特性，在数控机床的发展中做出了重要贡献。但是，传统结构的滚珠丝杠螺母副并不能满足机床高速化的需要，表现出自身的一些缺点，主要表现在以下几个方面：

(1) 滚珠丝杠螺母副传动系统的刚度较低，受系统共振临界转速的限制由滚珠丝杠螺母副组成的振动系统产生共振的临界转速  $N_c$ ，其计算公式为：

$$N_c = \frac{60\lambda^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EIg}{\gamma A}}$$

式中： $\lambda$ —由支承形式决定的支承系数；

$L$ —丝杠支承间距，mm；

$E$ —丝杠轴材料的纵向弹性模量，MPa；

$I$ —丝杠轴底径的最小惯性矩，mm<sup>4</sup>；

$g$ —重力加速度，mm/s<sup>2</sup>；

$\gamma$ —丝杠轴材料的密度，N/mm<sup>3</sup>；

$A$ —丝杠轴底径的横截面积，mm<sup>2</sup>。

从上式可以看出，丝杠螺母副系统产生共振的临界转速与丝杠轴材质、支承形式、支承间距、丝杠轴底径等因素有关，要提高丝杠的转速不是一个简单的问题。

(2) 滚珠受安全转速的限制

为了表示滚珠在丝杠螺纹滚道内和循环装置内滚动的安全性、可靠性，可以借用滚珠轴承的“ $d_0 \cdot N$ ”值（此处  $d_0$  为滚珠丝杠的名义直径， $N$  为丝杠的转速）来表示。但同滚珠轴承相比，滚珠丝杠螺母副没有防止滚珠之间相互摩擦的保持架，反而多了循环反向装置，这使得滚珠丝杠螺母副的“ $d_0 \cdot N$ ”值比滚珠轴承的“ $d_0 \cdot N$ ”小得多，从而使滚珠能安全、畅通流动的转速受到限制。

(3) 丝杠螺母副在高速回转下发热比较严重，影响机床传动精度有关实验表明，滚珠丝杠螺母副的发热量主要取决于摩擦扭力和转速，当回转速度增大时，丝杠螺母副产生的热

量无法实时散发而造成温升,引起滚珠丝杠轴变形,改变了工件和刀具之间的相对位置,使得加工精度降低。

#### (4) 噪声较大,环保性差

高速回转时滚珠丝杠螺母副噪声的来源是滚道表面粗糙度、滚道表面形状、转速和滚珠的形状以及相互之间的碰撞。这些因素取决于滚珠丝杠螺母副的加工工艺。

从以上四点可以得知,单靠提高丝杠的转速来提高滚珠丝杠螺母副进给驱动速度是不可取的。

### 三、滚珠丝杠螺母副高速化的技术措施

滚珠丝杠螺母副的进给速度为转速和导程的乘积,因而实现滚珠丝杠螺母副的高速化的根本途径有两种:一是提高滚珠丝杠的转速;二是加大丝杠的导程,朝大导程方向发展。两者相比,采用大导程滚珠丝杠更加有效。为了从以上两个途径实现滚珠丝杠螺母副高速化,在本次攻关中技术上采取了以下具体措施:(1)提高滚珠丝杠螺母副传动系统的动、静态刚度传动系统高的动、静态刚度是实现高速进给驱动的基础,为了提高滚珠丝杠螺母副的进给速度和加速度,必须首先提高丝杠扭曲刚度和轴向刚度。为此,可采取如下措施:①丝杠采用中空结构,并进行预拉伸处理;②提高丝杠的支承刚度,采用固定-固定的支承形式。

### 四、温升原因及对传动系统的影响分析

由于机床加工范围内,根据所加工零件结构形式的不同,加工时工况多变,进给系统按照指令在滚珠丝杠的不同部位运行,丝杠与丝杠螺母摩擦发热具有多变化热源的特点,其丝杠的热变形状况不甚一致,要进行热变形补偿具有一定的难度。并且丝杠人变形伸长后,使滚珠丝杠副原有的预拉伸逐步减小甚至消失,造成滚珠丝杠副在高速旋转时的颤震和噪音,对运动指令的快速跟踪能力、滚珠丝杠轴系的系统刚度和丝杠副的轴向刚度下降,加速起动和停止瞬间弹性变形增加,传动精度和可靠性下降。

#### 1、滚珠丝杠系统的热源分析

滚珠丝杠系统的热源主要有三个:①端部的驱动电机功率损耗发热;②丝杠两端轴承摩擦发热;③丝杠与丝杠螺母摩擦发热。滚珠丝杠系统的发热主要是由丝杠两端轴承摩擦力矩及丝杠与螺母摩擦的摩擦力矩引起的,摩擦力矩又可以概括为2个部分,即负荷因素和速度因素。

## 2、滚珠丝杠系统补偿热变形的的方法

为了补偿热膨胀造成的精度变化，一般采取以下对策：(1) 滚珠丝杠预压设定需适量；(2) 适当增大滚珠丝杠副的导程可以达到增大移动速度，降低转速之目的；(3) 将丝杠预拉伸，预拉伸量可略大于热伸长量；(4) 润滑剂的选择(黏度指数)及充分供油减小摩擦力矩；(5) 采用光学尺进行全闭环反馈。

以上方法虽然能补偿由于温升造成的丝杠热膨胀，但是只要滚珠丝杠副有运转，发热是不可避免的，轴向刚度还会降低，丝杠的预拉伸量会被抵消一部分，增加起动和停止瞬间弹性变形，引起丝杠高速运行时的颤震和噪音。

## 3、抑制热变形的的方法

在物体温度发生变化时，它的体积将随温度的升高或减低而改变，由于影响机床加工精度的热变形主要是轴线方向的热变形，因此不考虑丝杠径向方向的热变形。伸长量和温度的改变关系如下：

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

式中： $\Delta L$ 为变形量； $L_0$ 为原丝杠长度； $\Delta T$ 为温升； $\alpha$ 为线膨胀系数。

从式中可以看出控制丝杠热伸长的最好方法是如何降低温升 $\Delta T$ ，采用中空滚珠丝杠冷却内部冷却是解决进给系统发热问题的有效方法，将冷却介质通入空心丝杠内部进行强制循环冷却，抑制因机床高速运转带来的丝杠热膨胀导致刚度和精度发生变化。在本次专项攻关中解决发热问题的有效办法是将冷却液通入空心丝杠内部进行强制循环冷却。

本次专项攻关中建立了中空丝杠冷却介质流量与丝杠热变形之间的数学模型，通过实验分析进给系统丝杠温度变化及其与冷却介质的流量之间的关系，为滚珠丝杠副热变形控制提供理论依据。通过监测中空丝杠入口、出口处冷却介质的温度变化量，间接控制滚珠丝杠副的温升，另外空心丝杠还有助于减小高速运转时的惯性，增加丝杠轴的扭曲刚度，以保持丝杠的传动刚度。

因为在各种不同的零件加工中，不会经常在全行程运行，根据统计大部分在行程的1/2左右，在本次攻关中将控制温差设定为 $0.5^{\circ}\text{C}$ ，机床最大行程为1400mm，如果按大部分在行程的1/2左右，这时丝杠伸长量 $\Delta L$ 约为 $0.0056\text{mm}$ ，这种控制精度下，C3级精度的滚珠丝杠（任意300mm导成变动量 $0.006\text{mm}$ ），满足了机床本次攻关定位精度

0.01mm 和重复定位精度 0.006mm 的要求。

## 五、控制热变形原理

温度控制原理：对机床 X、Y、Z 轴丝杠分别进行油液进出口端的温度检测，按照三个温差信号中最大温差的一个选择温度控制信号，控制系统按温差大小给出变频调速指令，变频器变频调速驱动定量油泵，油泵向丝杠、轴承座端面供油，通过热交换方式将丝杠副及轴承座端面的热量随回油带走，回油温度升高，回油通过散热器、冷凝器及制冷机降温后回到油箱，循环使用。进出口冷却油温度差增大，通过控制系统指令使变频器驱动变频电机转速升高，油泵输出油液流量、流速增大，加快油液冷却循环，快速将热量带走，使丝杠和轴承座端面温升得到抑制，保证了丝杠不会热膨胀导致刚度和精度发生变化，控制原理图见图 1。

油冷机的冷却能力：按照冷却介质进出口温差，根据变频制冷系统自动检测到的环境温度，自动控制压缩机的制冷能力，但冷却介质与环境温度的温差最后不要超过 5℃。，否则会形成滚珠丝杠外部的冷凝现象，造成滚珠丝杠的锈蚀或润滑不良影响运转精度。

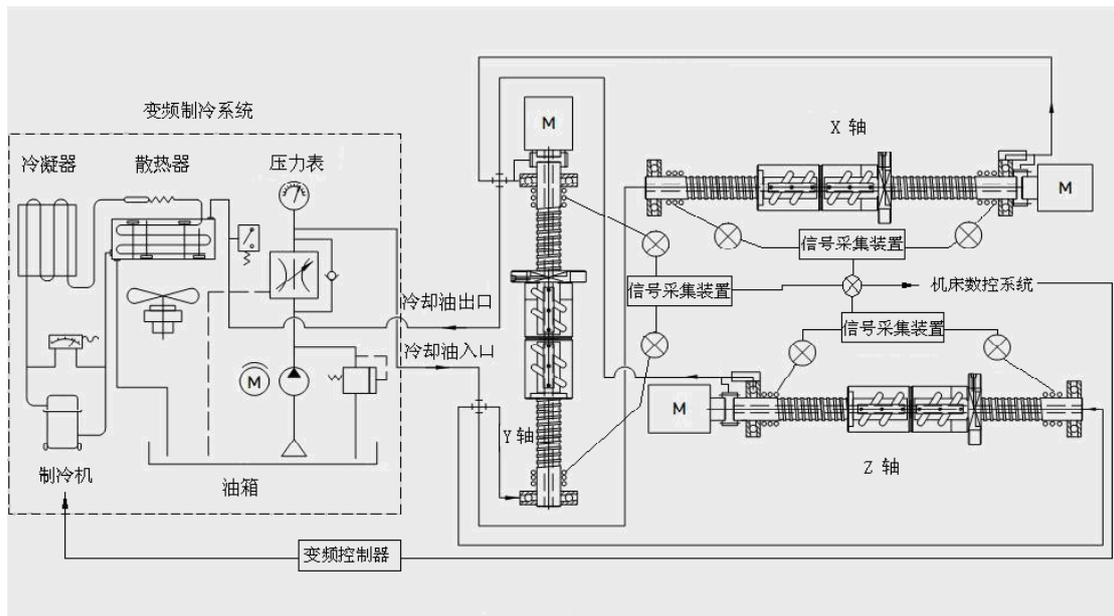


图 1 中空丝杠温度控制原理图

## 六、机械结构示意图

滚珠丝杠、丝杠支撑座端进出油口及温度传感器的联接描述：

图 2 中，01-弹性联轴器；02，15-锁紧螺母；03,16-隔套；04,17-丝杠专用轴承；



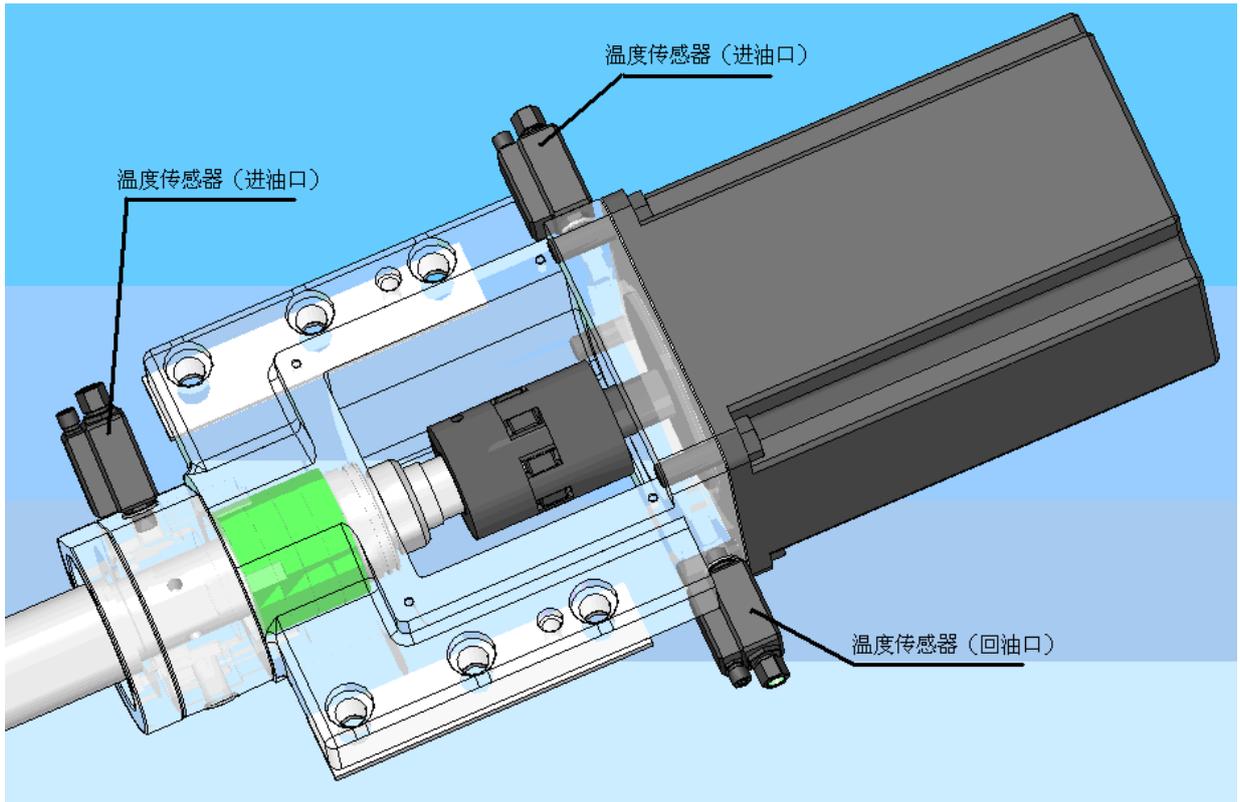


图 3 中空丝杠支撑座安装三维结构图

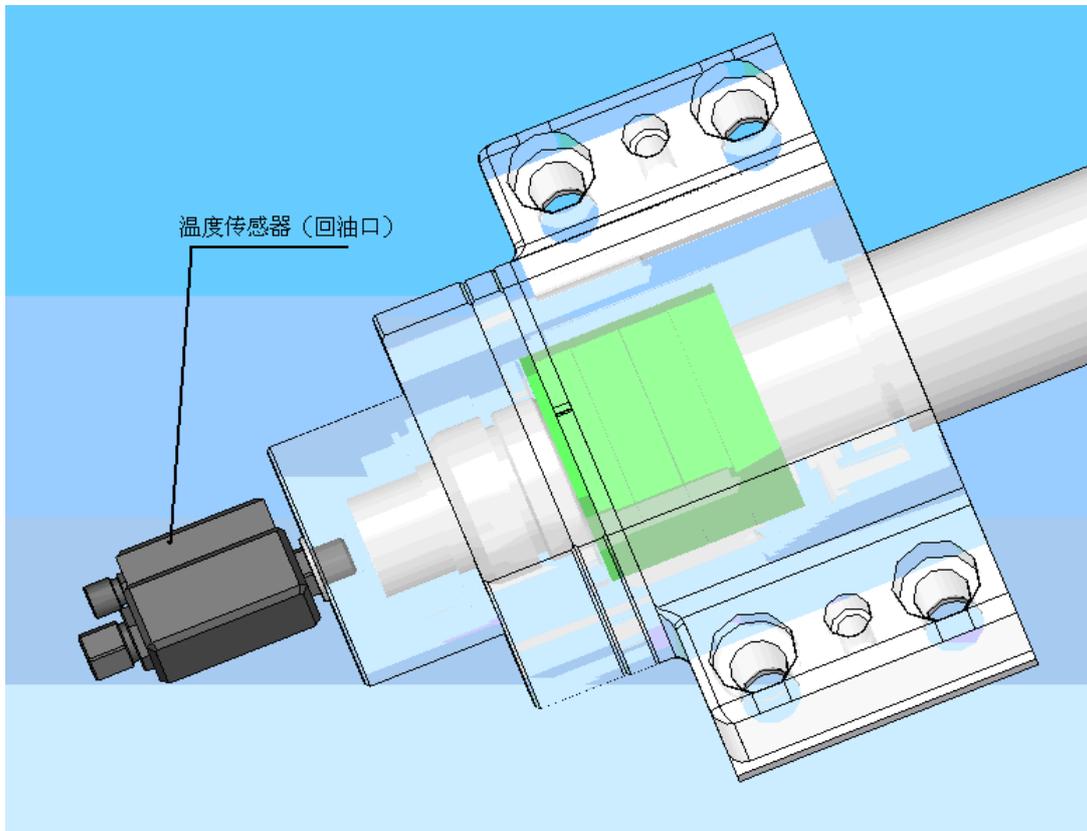


图 4 中空丝杠轴承座安装三维结构图

## 七、试验检测结果

表 1 被测滚珠丝杠副几何参数

公称直径 / mm	d0	55
导程 / mm	Ph	20
丝杠总长 / mm	L	1754
精度等级	P	C3
方向目标值 / mm	C	-0.04
滚珠丝杠副预紧转矩 / N·m	Mf	0.434-0.687
滚珠丝杠副预拉伸量 / mm	$\lambda$	0.05
工作台重 / kg	W	1500

表 2 被测滚珠丝杠副运动参数

移动速度	48m/min	行程 1400 mm	
循环方式	线性	温度条件	环境温度
循环周期	5	开始	23. 0℃
间歇时间	5s	结束	23. 3℃

表 3 被测滚珠丝杠副各坐标实测精度

高速卧式加工中心	坐标	定位精度	重复定位精度
第一台	X	0.009	0.006
	Y	0.008	0.006
	Z	0.006	0.005
	B	8"	4"
第二台	X	0.008	0.006
	Y	0.009	0.005
	Z	0.008	0.005
	B	5"	3"
第三台	X	0.010	0.006
	Y	0.009	0.006
	Z	0.008	0.006
	B	4"	2"

表 4 被测滚珠丝杠副实测试块加工精度

检验项目	允差值	实测值		
		001 #	002 #	003 #
中心孔				
a) 圆度	a) 0.015	0.0075	0.0051	0.0040
b) 孔中心轴线与基面 A 的垂直度	b) $\phi$ 0.015	0.0046	0.0080	0.0053
正方形				
c) 侧面的直线度	c) 0.015	0.0066	0.0091	0.0093
d) 相邻面于基面 B 的垂直度	d) 0.020	<u>0.0223</u>	0.0105	0.0078
e) 相对面于基面 B 的平行度	e) 0.020	0.0025	0.0035	0.0030
菱形				
f) 侧面的直线度	f) 0.015	0.0090	0.0119	0.0073
g) 侧面对基面 B 的倾斜度	g) 0.020	0.0097	0.0128	0.0102
圆				
h) 圆度	h) 0.020	0.0130	0.0110	0.0177
i) 外圆和内圆孔 C 的同心度	i) $\phi$ 0.025	<u>0.0271</u>	0.0099	0.0135
斜面				
j) 面的直线度	j) 0.015	0.0109	0.0101	0.0079
k) 3° 角斜面对 B 面的倾斜度	k) 0.020	<u>0.0228</u>	0.0146	0.0071
镗孔				
n) 孔相对于内孔 C 的位置度	n) $\phi$ 0.05	0.0382	0.0388	0.0171
s) 内孔与外孔 D 的同心度	s) $\phi$ 0.02	0.0133	0.0096	0.0106

在第一次切削实验过程中，对标准试块的加工精度按照 JB/T 8771.7—1998《加工中心 检验条件 第7部分：精加工试件精度检验》，进行加工和用三坐标检验，由于第一台还处于对温度补偿控制模型进行修正过程中，试件加工有三项超差，但经过第2台和第3台的实验，完全达到了标准要求，并且在第3台时精度有明显提高。

## 八、结论

1. 以上措施对解决由温升引起的滚珠丝杠热变形是非常有效的。
2. 改善了滚珠丝杠副的加(减)速度特性，同时也提高对运动指令的快速跟踪能力，保证了滚珠丝杠轴系的系统刚度和丝杠副的轴向刚度，减小起动和停止瞬间弹性变形。
3. 在提高丝杠副的刚度和承载能力的同时提高了滚珠丝杠副在高速运行中的平稳性，可以获得更高的线速度，满足精度和加(减)速度的要求。
4. 空心丝杠副还有助于减小高速运转时的惯性，增加丝杠轴的扭曲刚度。

第一作者：苟卫东，男，1963年生，高级工程师/总工程师，硕士，主要从事数控机床、加工中心新技术新产品的开发和研究。

“高档数控机床与基础制造装备” 国家科技重大专项——高速立卧式加工中心攻关课题（课题编号：2009ZX04001-015），承担单位：青海一机数控机床有限责任公司；合作单位：兰州理工大学、武汉天喻软件有限责任公司。