



海德汉进给传动精度系列讲座

第4讲 滚珠丝杠长度方向温度分布的影响

海德汉(天津)光学电子有限公司 Jan Braasch, Dr. Ing.

除了轴承轴向刚度之外,影响热力学零点最大的因素是丝杠长度方向的温度分布。图1显示的是一根丝杠在相距150mm两点间往复运行几小时之后的热像图。清晰可辨的是,即使是几小时之后,丝杠的发热也几乎仅限于丝杠螺母所运动的区域之内。因此滚珠丝杠发热及伸长是很局域性的。

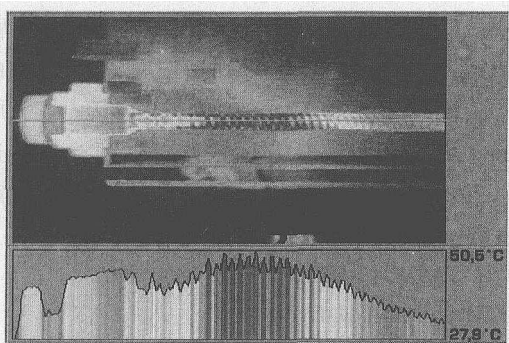


图1

丝杠螺母移动范围内的局部生热。螺母往返移动速率为24m/min,试验时间6h,往返移动两点间距为150mm。这张热成像图摄于试验结束,工作台移开之后。图中可见皮带轮,固定端轴承和滚珠丝杠。

由于丝杠轴承所提供的轴向力最多可以在丝杠内产生均匀的应力和单位伸长,所以在丝杠局部升温时想通过丝杠轴承所提供的轴向力进行对热膨胀的补偿是不可能的。一个简单的例子可以清楚地证实这一点(图2)。如图2

中红线所示的由10K局部升温而导致的丝杠上产生图2中绿线所示的误差曲线。在同样条件下,一根两端紧固的丝杠会产生图2中蓝线所示的误差曲线。丝杠的未升温部分

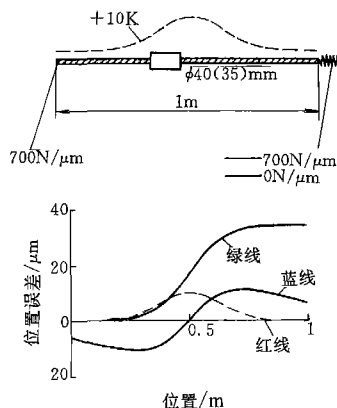


图2

会因轴承传递来的轴向力被压缩。丝杠中部误差曲线的斜率与单边紧固时几乎相同。两端紧固时的定位误差为22μm,约为单边紧固时的2/3。

半闭环控制时,滚珠丝杠局部升温而导致的定位误差

1. 对应措施

至目前为止的试验显示,由于滚珠丝杠轴承及丝杠螺母的发热,尤其是后者,在采用半闭环控制时会导致极大的定位误差。为了避免这种误差,除了采用直线光栅尺之外,还有采用中空内冷丝杠或纯软件补偿等的尝试。

2. 内冷丝杠

为了能将冷却介质引入丝杠中,需要在丝杠内钻孔并在丝杠两端的轴承附近为冷却介质设计由旋转部分到静止部分的联接。除了这个联接部分的密封性难以保证之外,丝杠内部的冷却通道也会导致原本已经很弱的丝杠轴向刚度进一步被削弱。但这个解决方案最大的难点还在于如何确保冷却介质的恒定。要知道,每一摄氏度的温度变化都会在每米丝杠上产生约11μm的长度变化。考虑到冷却系统要排出的热量总额,要将冷却介质的温度变化控制在1℃不是件很容易的事,特别是当机床主轴也采用同一冷却系统时。在这种情况下,所需冷却功率可以很容易就达到千瓦级的范围。目前所采用的主轴冷却系统温度误差大多远超过1K。因此采用这种冷却系统来进行丝杠系统的温控大多不可行。为了控制成本,大多数冷却系统都采用了开关式的控制器。由于这类控制器只有在超出设定温度范围时才被触发,因此每次触发过程都会以丝杠长度变化及进给轴定位误差变化的形式体现出来。

一台立式加工中心的X轴,其带内冷系统的滚珠丝杠为单边紧固。图中所示为远离固定轴承端测试点的定位误差。测试行程为500mm(总行程为800mm)测试速度为2.5m/min。为便于比较,该轴在临时安装直线光栅尺后也进行了定位测试。

图3是一台立式加工中心的定位精度测量结



果,其丝杠带切削液,为单边紧固安装方式。测试过程中,进给轴在相距500mm的两点之间以2.5m/min的慢速往复运动。最大行程

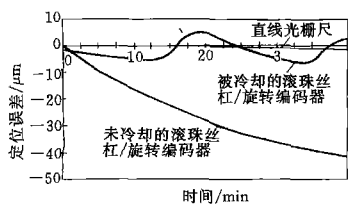


图 3

为800mm。试验纪录的是远离固定轴承端测点的定位漂移。图中冷却系统温度控制器的开/关过程清晰可辨。该温度控制器约有1K的滞后。就定位漂移的绝对值而言,该系统相较于不带冷却的半闭环系统有了很大的改进。但在单件加工时间较短时,由于后者在一个短时间段内相对漂移值要小于前者,故在这种特殊的情况下后者加工出的工件有可能反而优于前者。

4. 软件补偿

目前,想通过分析模型、神经网络及经验公式来补偿热变形的尝试很多。但这些研究的对象主要是由机床内、外部热源而引发的机床结构变形。相较而言,进给轴定位漂移的研究则显得不是很重要。

总体而言,在目前电脑技术日益发达的大环境之下,人们常会高估软件补偿的能力。在试验室里可行的补偿方法通常都是花很大精力针对某台试验机床来制定的。想不经过复杂的,针对每台机床的设置就能将某种试验室补偿法简单地移植到批量生产机床上的想法是行不通的。以下就以进给轴为便,来说明影响补偿的因素是如何多种多样。

因为不同的加工程序会产生丝杠不同的局部升温,所以为了补偿丝杠的伸长,必须知道丝杠每一位置的瞬时温度值。但是,要测量旋转中丝杠的温度是非常困难的。因此,更常用的办法是去计算丝杠的温度分布。如果已知每小段丝杠的热交换状况,理论上是可以精确计算出丝杠的温度分布的。这里所说的热交换包含:丝杠螺母内的摩擦发热、丝杠内部的热传导及丝杠和外部环境的热交换。丝杠螺母内的摩擦与螺母的预紧力几乎成正比,与润滑介质的量、温度的关系则极为复杂。螺母的预紧在丝杠行程范围之内常有 $\pm 10\% \sim \pm 20\%$ 的变化,而且其分布随丝杠的不同而不同。在机床使用的头6个月之内,平均预紧力下降为原有水平的50%是很常见的。

由于丝杠的安装是超静定的,由此引起的局部

卡紧也会造成局部摩擦力的上升。这几个挑出来的简单例子证实了,想要精确计算摩擦发热是非常困难的。由于外界环境条件未知,丝杠散热的计算同样很复杂。例如,丝杠周围空气的温度就为未知,而这对计算丝杠散热起决定性的作用。

总而言之,一个不包含附加温度传感器的针对丝杠热伸长的软件补偿,即使是在简单的单边紧固丝杠之上也难以取得成效。在两端紧固的情况下,还得附加考虑轴承刚度及与预紧力相关的摩擦力等因素。这种情况下的软件补偿会变得更加复杂。

5. 定位误差与其他类型误差的比较

在研究过三台试验用加工中心由温度引起的进给轴定位误差之后,还需要将这类误差与其他静态及类静态误差进行比较。在这三台加工中心上分别按ISO/DIS230—3的要求进行了对由主轴发热而导致的结构变形的测量。第一台加工中心在以6000r/min的最高转速运行几个小时之后,其最大线性变形为($x: 5\mu\text{m}/\text{m}$, $y: 60\mu\text{m}/\text{m}$, $z: 15\mu\text{m}/\text{m}$)。最大旋转变形为($a: 40\mu\text{m}/\text{m}$, $b: 70\mu\text{m}/\text{m}$)。

图4所示为第二台加工中心的变形。在同样条件之下,同样6000r/min的主轴转速之下,最大线性变形为: ($x: 5\mu\text{m}/\text{m}$, $y: 45\mu\text{m}/\text{m}$, $z: 55\mu\text{m}/\text{m}$)。最大旋转误差为($a: 25\mu\text{m}/\text{m}$, $b: 10\mu\text{m}/\text{m}$)。第三台加工中心主轴转速较高且带主轴冷却套。在12000r/min转速下其线性变形为: ($x: 5\mu\text{m}/\text{m}$, $y: 5\mu\text{m}/\text{m}$, $z: 40\mu\text{m}/\text{m}$)。最大旋转变形为($a: 20\mu\text{m}/\text{m}$, $b: 30\mu\text{m}/\text{m}$)。与结构变形相比,所测得的进给轴漂移值至少与之数量级相同。尤其是在配有单边紧固丝杠或带主轴冷却系统,并采用半闭环的机床上,进给轴的漂移值要远远大于结构变形。与常见几何误差的比较也可得出类似的结论。比较16台不同加工中心的俯仰、滚动及偏摆误差可得知,此类误差大多在10~50 $\mu\text{m}/\text{m}$ 之间(图5)。将这些值乘上相应的阿贝距离即可得到定位误差。只有在阿贝距离达到1m

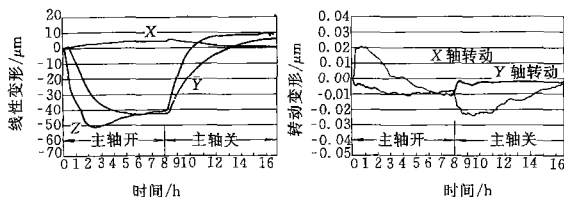


图4 无负载情况下,由主轴(6000r/min)发热而引起的立式加工中心的结构变形



广数数控系统知识讲座

第4讲 GSK928TE (GSK928TC) 车床数控系统硬件组成

广州数控设备有限公司 (广东 510165) 何英武 韦傲峰

普及型车床数控系统是目前市场上销量最大的数控系统。我厂根据这种情况自主开发了GSK928TC普及型车床数控系统,2000年底开发出样机,截止到2002年9月,产销已经超过2500套,根据广泛的用户调查、反馈,并结合国家高技术研究发展计划(863计划)——中档数控系统产业化支撑技术及应用课题,我厂决定GSK928TC改进设计,更能满足中档数控车床的需要,改进后更名为GSK928TE。有效地提高了GSK928TC的产品性价比,提高了该产品的市场销售量,2003年销售量达到4000套(GSK928TC+GSK928TE)。

1. GSK928TC (GSK928TE) 系统基本功能及技术指标

可控制轴数	2轴(X轴、Z轴)
可联动轴数	2轴(X轴、Z轴)
最小设定单位	0.001mm
最小移动单位	X轴: 0.0005mm, Z轴: 0.001mm
最大编程尺寸	±8000.000mm
最大移动速度	15000mm/min
切削速度	5~6000mm/min
加工程序容量	24kB

可存储程序数	100个
图形液晶显示器	320×240点阵
通讯接口	标准RS-232
控制刀位数	4工位(可扩展至8工位)
主轴功能	可设置4挡或16挡开关量输出;或0~10V模拟量输出
	控制变频器,实现无级调速
快速倍率	F0、25%、50%、100%实时可调
进给倍率	0%~150%共16挡实时可调
各轴加减速	可分别设置
数据保护	用户程序、参数断电保护
螺纹功能	米/英制直、锥螺纹,带退尾
电子手轮	标准配置
插补功能	直线/圆弧/螺纹插补
编程方式	全屏编辑,文件管理
程序格式	标准ISO代码,相对/绝对混合编程,圆弧可R编程
螺纹切削	可加工米/英制、直/锥螺纹,高速退尾
循环功能	多种固定循环和复合循环

2. 系统硬件结构

GSK928TC (GSK928TE) 普及型车床数控系

及以上时,这样算出的定位误差才可能达到与进给轴漂移值相应的大小。

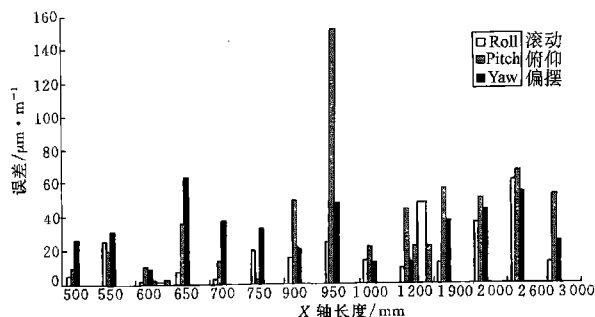


图5 16台NC机床进给轴的滚动,俯仰及偏摆误差

6 结论

通过丝杠和旋转编码器定位的最大问题是滚珠丝杠的热伸长。这类热伸长过程的常见时间常数

为1~2h,按加工程序的不同会产生0.1mm数量级的误差。因此,通常这种误差与加工中心受热后的结构变形及加工中心的几何误差相比要占主导地位。在更换加工程序之后丝杠通常需要约1h的时间来重新达到热平衡状态。同样,在机床停顿及停顿后继续相同加工程序时也需要这段时间来重新达到热平衡。对于单边紧固,1m长度的冷丝杠适用如下经验公式:丝杠每两次全行程往复运行之后会伸长约0.5~1μm。在时间常数所示时间段内,热伸长不断累加。

综上所述,当对机床精度和速度要求越来越高时,采用直线光栅尺的位置测量变得越来越重要。在讨论采用何种测量方案时应顾及到这一点。

(待续)(收稿日期:20040125)