

超高精度车床直线运动误差检测 与补偿系统的理论与实验研究

王浩藩 潘仲明 梁建成

(精密机械与仪器系)

摘要 本文介绍了用三传感器误差分离法在线检测超高精度车床拖板直线运动误差和加工工件的素线直度误差。检测系统的精度高达 $\pm 0.078\mu\text{m}$ 。在此基础上,通过微计算机对误差数据进行数学处理,并驱动伺服机构对工件素线直度误差进行补偿加工。结果使工件素线直度精度提高到 $0.5\mu\text{m}/160\text{mm}$,比补偿前的精度提高了50%以上。

关键词 高精车床;直线运动误差;在线检测与补偿

1. 概 述

美国、日本等技术先进国家,早在六十年代就在批生产线上实现了1~10微米级的加工精度。随着航天事业、激光技术和微电子技术的发展,对零件的尺寸精度和形状精度的要求愈来愈高。为此,美、日等国家投入了大量的人力、物力开发超精密加工技术,发展了新型的超精密加工机床,在八十年代初便跨入了亚微米级加工时代。随着可控光束向X射线区域的移进,纳米级加工技术将成为未来制造技术的开发目标之一。

目前,我国的超精密加工技术还很落后。为了缩小这个差距,除了遵循“将精度溶入机床”的原则、发展我国新型的超精密机床外,当务之急是必须应用现代电子技术,研究、开发超精密在线检测技术和补偿控制技术,挖掘国产超高精度机床的超精密加工潜力,在短时间内,使我国现有机床的最高加工精度提高一个数量级,以满足当代科学技术发展的迫切要求。我们认为,随着检测和控制技术的日臻完善,将有可能摆脱那种仅仅依靠采用新的结构提高机床精度,来获得超精密零件的传统方法,而出现具有现代在线检测与实时控制技术的超高柔性精度的超精密机床。

基于上述设想,文中介绍一种应用电感测微仪三测头扫划直线的误差分离方法,并在SI-255型超高精度车床(国产)上在线检测拖板的直线运动误差和被加工工件的素线直线度误差,检测结果表明二者具有较强的相关性。据此,我们对拖板的直线运动误

差和工件素线直线度误差的数据进行数学处理,找出二者变化的规律性,并按此对工件进行补偿加工。补偿后工件素线的直线度精度提高了50~60%,实现了所谓的“创造性”加工。另外,对本检测与补偿系统稍加改进,就可作为圆柱度误差的在线检测与补偿装置。

2. 直线度误差的测试方法

1) 拖板直线运动误差的分析

拖板在床身导轨上运动,由于受到导轨的几何形状误差、导轨上油膜厚度不均等因素的影响,通常不是理想的直线运动,致使刀具的修光刃和工件的接触线不是沿着一条理想的直线前进,而是时尔做上、下或前、后变位,时尔做滚、颠、摆的角度变位,结果使所车削的外圆工件存在着严重的圆柱度误差。设 X 方向为所要考虑的拖板运动方向(如图1所示),则其直线运动误差可分解成六个分量,分别为沿 X 、 Y 和 Z 三个坐标

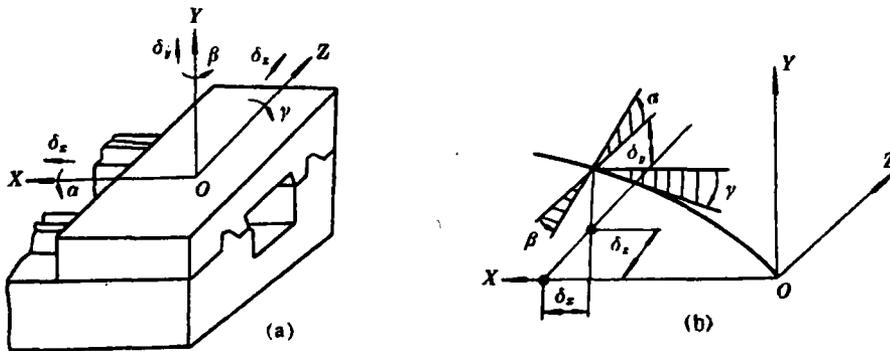


图1 拖板直线运动误差分析

轴的位移误差分量 δ_x 、 δ_y 和 δ_z ;及其绕这三个轴旋转的角度误差分量 α 、 β 和 γ 。

一般说,沿拖板运动方向上的位移误差分量属于定位误差,它仅对加工螺纹工件的螺距精度有影响。而影响圆柱体工件的加工精度主要是其它五个误差分量。其中,在水平方向(xoz 平面)的误差分量 δ_z 和 β 的影响最大。当把坐标系固联在刀尖上时,有

$$\delta_R = \delta_z + \beta \cdot f(t) \quad (1)$$

式中 δ_R ——工件的半径误差(在 Z 方向上) δ_z —— z 方向上的拖板位移误差;

β ——绕 Y 轴旋转的角度误差; $f(t)$ ——拖板沿 X 方向上的进给量; t ——时间。

2) 三点法误差分离原理^[2]

当工件素线的直线度误差尚未确知时,可用所谓的三点法误差分离法进行测试。如图2所示,工件装在车床的三爪卡盘上,沿着拖板运动方向设置各保持一定间隔的三个测微头。测微头随拖板运动先后扫划工件素线的同一部分,由此就能够消去载有测微头的拖板的直线运动误差,求出工件素线的直线度误差;或者反过来先消去工件素线的直线度误差,求出拖板的直线运动误差。三点法误差分离原理如下:

不妨设测量开始时,坐标系原点固联在测微头 p_1 上;令测量开始时和测量结束时

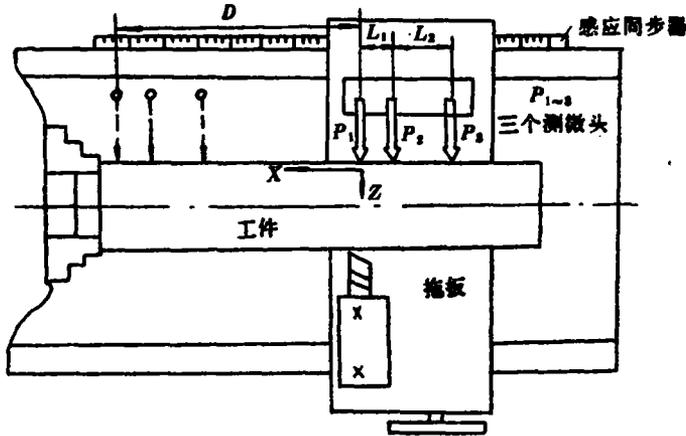


图2 直度误差测试原理

拖板走过的两点间的距离为 D ；测微头 p_1 、 p_2 和 p_3 的输出顺序为 z_1 、 z_2 和 z_3 。则有：

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= a \cdot x + h(x) + \delta(x) + n_1 \\ z_2 &= a \cdot (x - L_1) + h(x - L_1) + \delta(x) + L_1 \cdot \beta(x) + n_2 \\ z_3 &= a \cdot (x - L_1 - L_2) + h(x - L_1 - L_2) + \delta(x) + (L_1 + L_2) \cdot \beta(x) + n_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 a —— 工件的素线平行度； $h(x)$ —— 工件素线的直线度误差； $\delta(x)$ —— 拖板的直线运动误差； n_i —— 测试过程的随机误差($i=1,2,3$)。

由此，如用 z_1 、 z_2 和 z_3 计算出

$$z = z_1 - \left(1 + \frac{L_1}{L_2}\right) z_2 + \frac{L_1}{L_2} z_3 \quad (3)$$

而得到

$$z = h(x) - \left(1 + \frac{L_1}{L_2}\right) h(x - L_1) + \frac{L_1}{L_2} h(x - L_1 - L_2) + n \quad (4)$$

就得到只与工件素线直线度误差有关，而与拖板运动误差 $\delta(x)$ 无关的量 z 。又为消去(4)式中 n 的影响，必须对 z 作多次重复测量而得到其估计值（数学期望） \hat{z} 。

设采样间隔为 D_1 ，且令 $L_1/D_1 = m_1$ ， $L_2/D_1 = m_2$ 和 $D/D_1 = N$ ，并使 m_1 、 m_2 和 m_3 均为整数，则可将连续函数表达式(4)离散化，可简写成如下形式：

$$\hat{z}(j) = h(j) - \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) h(j - m_1) + \frac{m_1}{m_2} h(j - m_1 - m_2) \quad j=1,2,\dots,N \quad (5)$$

用 N 个点的 Fourier 展开式来表示 $\hat{z}(j)$ ：

$$\hat{z}(j) = \sum_{k=1}^M \hat{r}_k \cos\left\{\frac{2\pi k}{N-1}(j-1) - \phi_k\right\} \quad (6)$$

从所求得的 $2M$ 个 \hat{r}_k ， ϕ_k （ $k=1,2,\dots,M$ ， $M < \frac{N}{2}$ ）中，即可算出 $h(j)$ ，此时

$$r_k = \hat{r}_k / A_k \quad (7)$$

$$\phi_k = \hat{\phi}_k + \psi_k \quad (8)$$

式(7)、(8)中的 A_k 、 ψ_k 表达式分别是

$$\begin{aligned} A_k^2 &= \left\{ 1 - \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right) \cos \frac{2\pi k m_1}{N} + \frac{m_1}{m_2} \cos \frac{2\pi k (m_1 + m_2)}{N} \right\}^2 \\ &\quad + \left\{ \frac{m_1}{m_2} \sin \frac{2\pi k (m_1 + m_2)}{N} - \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right) \sin \frac{2\pi k m_1}{N} \right\}^2 \\ \operatorname{tg} \psi_k &= \frac{m_1 / m_2 \sin \frac{2\pi k (m_1 + m_2)}{N} - \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right) \sin \frac{2\pi k m_1}{N}}{1 - \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right) \cos \frac{2\pi k m_1}{N} + \frac{m_1}{m_2} \cos \frac{2\pi k (m_1 + m_2)}{N}} \end{aligned} \quad (9)$$

而 $h(j)$ 则可表示为:

$$h(j) = \sum_{k=1}^M r_k \cos \left\{ \frac{2\pi k}{N-1} (j-1) - \phi_k \right\} \quad j=1, 2, \dots, N \quad (10)$$

根据上式即可求出工件素线直线度误差的估计值 $h(j)$ 。将已知的 $h(j)$ 代入(2)式可求出拖板的直线运动误差 $\delta(j)$ 和 $\beta(j)$ 。

3) 几个问题讨论

(1) 采样点数 N : 如果误差的最高谐波次数为 M , 而在误差分离的同时, 还作谱分析, 根据采样定理, 应取 $N > 2M$; 若应用 FFT 进行计算, 应使 $N = 2^n$, n 为整数。

(2) 测微头安装位置和权函数 A_k : 由(9)式可知, 权函数 A_k 仅由与测微头的位置有关的 L_1 , L_2 和采样间隔 D_1 以及采样点数 N (D/D_1) 决定的。权函数反映了在频域上测微头的组合信号与工件直线度误差之间的关系。各次谐波的权函数各不相同, 不适当的权函数将使测量误差放大。因此, L_1 、 L_2 、 D_1 和 D 的正确选择十分重要; i) m_1 与 $m_1 + m_2$ 之一不可取 $N/2$ (m_1 、 m_2 和 N 的定义同前文), 否则 A_k 中的某些信息将丢失; ii) m_1 、 m_2 和 N 应互质, 否则 A_k 中的某次谐波信息将全部丢失。

(3) 直线运动误差的估计: 要用上述方程式, 根据测微头输出的数据来求直线运动误差, 必须剔除异常值并进行误差的统计处理。

为了抑制测试噪声的影响, 对测量值进行了统计、滤波处理。对于单一的突变值已经在 A/D 变换前通过一个低通滤波器作了某种程度的剔除。如果还不能剔尽异常值, 则采用“肖维勒准则”剔除异常值。

统计处理是这样进行的。作 m 次重复测量, 每一次测量均得到 N 点测量值。以 $z_i(j)$ 表示, 则某一实测值为

$$z_i(j) \quad i=1, 2, \dots, m; \quad j=1, 2, \dots, N$$

先对上述实测值序列作去均值的零点调整:

$$\hat{z}_i(j) = z_i(j) - \sum_{j=1}^N z_i(j) / N \quad (11)$$

然后就可改用 $\hat{z}_i(j)$ 来对 $z_i(j)$ 作统计处理。因为从各点所测得的值均服从以各点的均值 $\mu(j)$ 和方差 σ^2 的正态分布, 这样, 可估计出表征随机误差强度的 σ^2 值:

$$\sigma^2 = \frac{1}{(m-1)N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^m \{z_i(j) - \bar{z}(j)\}^2 \quad (12)$$

式中
$$\bar{z}(j) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^m z_i(j) \quad (13)$$

按上式计算，本测量装置的误差($\pm 3\sigma$)为 $0.078\mu\text{m}$ 。

3. 实验装置和测试方法

本实验在国产 SI-255 型超高精度车床上进行。主要实验参数和材料如下：

- 拖板运动范围 250mm (X方向上)
- 机床主轴转速 300~600rpm
- 拖板运动速度 40~60mm/min (无级调速)
- 工件材料 LY-13
- 刀 具 金刚石刀具
- 切 削 油 煤油
- 吃 刀 量 $< 5\mu\text{m}$

如图 3 所示，首先用金刚石车刀按恒定吃刀量 a_p 在车床上加工一根圆棒 ($\phi 50 \times$

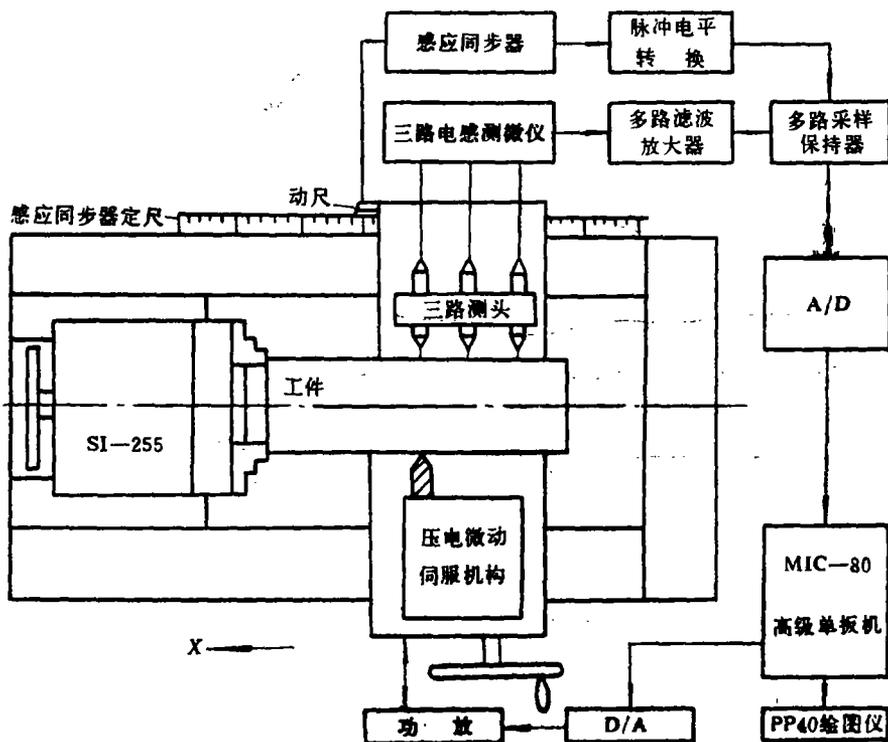


图 3 车床直线运动误差检测及补偿系统原理图

250), 然后在拖板上安装电感测头 (DGC-8zGA 型高精度轴向测头, 其最高频响不低于 40Hz; 最小分辨率为 $0.01\mu\text{m}$; 重复精度优于 $0.03\mu\text{m}$)。为了测出拖板在直线运动中的位置 (参见图 3), 在拖板和床鞍之间装上一对感应同步器 (动尺和定尺), 它的输出口扩充一块脉冲和电平转换板, 便可按随意设定的运动距离发出一系列 TTL 电平的采样脉冲。测微仪的输出量经滤波、采样及 A/D 变换后进入计算机进行数据处理。

测试时, 在 X 方向上以 $40\sim 60\text{mm}/\text{min}$ 的速度, 以 5mm 的采样间隔重复测试 10 次, 行程为 160mm 。测试后, 进行误差分离处理, 在一次运算中同时计算出拖板的直线运动误差和工件的直线度误差。最后, 对拖板的直线运动误差序列进行平滑处理, 且与工件的直线度误差序列进行代数和, 并进行插值运算, 形成以间距为 1mm 的序列, 按该序列对工件进行补偿加工。

4. 实验结果和考察

1) 直线度误差的评定

在不同的标准中, 根据评定直线度误差的基准线不同, 有不同的规定。主要有以下三种: ①最小区域法; ②两端点连线法; ③最小二乘法。

对直线度不同的评定方法各有其优缺点, 而传统的方法都是以作图法来实现的。考虑到评定精度及计算时间^[3]等原因, 我们编制了直线度误差的最小二乘法评定程序。

2) 直线度误差

图 4、图 5 分别表示补偿前后测得的工件素线的直线度误差和拖板的直线运动误差。从图中可见, 两次测试所得的拖板直线运动误差的变化幅值和趋势基本相同, 造成二者的差异的主要因素是两次测试时拖板与导轨的结合面的状态不可能完全一致。在此, 由于 $\beta(j) (j=1, 2, \dots, N)$ 很小, 所以忽略不计。从图中还可看到, 补偿后工件的

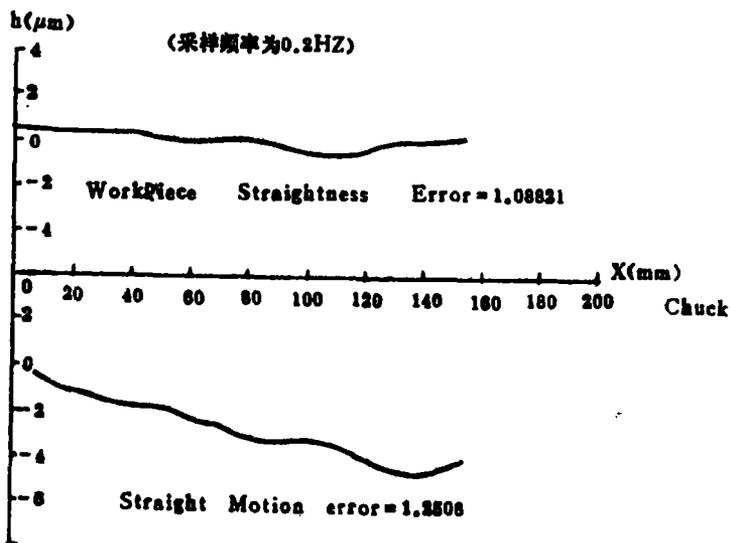


图 4 补偿前的直线度误差

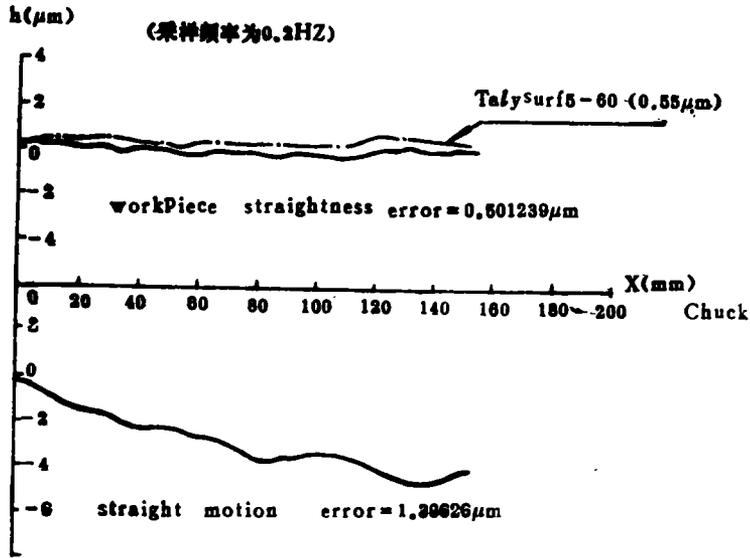


图 5 补偿后的直线度误差

直线度精度比补偿前的精度提高了 50% 以上。

将补偿加工后的工件送往航天部二院计量站进行检验结果为 $0.55\mu\text{m}/160\text{mm}$ (采用两端连线法评定。仪器为英国 Talysurf5-60 型轮廓仪, 重复精度为 $0.02\mu\text{m}$), 与本系统的测试结果仅相差 $0.05\mu\text{m}$, 二者极为一致。

参 考 文 献

- [1] 王浩藩、潘仲明: 分析计算车床精度误差的矢量法, 湖南省第三届机械加工学术年会宣读论文, 1985, 11。
- [2] 恒野义照等: 工作の机械の直线运动误差の测定法, (日) 精密机械, Vol 148, No.2, 1982.2。
- [3] 下河边 明等: 最小领域法してよる形状精度の评价, (日) 《精密机械》, Vol 50, No.4, 1984.4。

A Research on the Measurement and Compensation of the Straightline Error Motion of an Ultra Precision Lathe

Wang Haofan Pan Zhongming Liang Jiancheng

Abstract

This paper discusses the 3-point error separating technique for on-line measurement of straight line error motion of an ultra-precision lathe and straightness of the generatrix of turned works. The accuracy of the measuring system is obtained about $\pm 0.078\mu\text{m}$ ($\pm 3\sigma$). Furthermore, a closed loop, micro-computer control system is built up to process the error data and excite a servo-mechanism for Compensating the error motion, and the straightness of the turned work is increased to $0.5\mu\text{m}/160\text{mm}$, that is, Compensating increases straightness by 50% at least than before compensating.

Key words: Ultra precision lathe; Straight error motion; On-line measurement and compensation