

文章编号: 1001-2486 (2000) 03-0100-05

直线度误差分离方法的误差分析*

王宪平, 李圣怡

(国防科技大学机械电子工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 在研究精密和超精密加工技术的发展对直线度误差分离技术所提出的新要求的基础上, 定量分析了传感器初始对准误差, 忽略摆角误差和传感器漂移特性差异在时域和频域直线度误差分离方法中造成的误差, 同时指出了频域方法中权系数对测量误差的放大作用。并讨论了一些消除误差的方法。最后由此得出两点法与三点法相结合的组合方法是最适用于超精密直线度测量的误差分离方法的结论。

关键词: 直线度; 误差分离方法; 误差分析

中图分类号: TH161. + 5 **文献标识码:** A

An Analysis of the Accuracy for Straightness Measurement with EST Method

WANG Xian-ping, LI Sheng-yi

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the study of the new requirements of the precision and ultraprecision machine technique for the error separation technique of straightness measurement, this paper analyzes quantitatively the error introduced into the time domain and frequency domain EST results by the misalignment of sensors, the neglect of yaw angle in sequential two-point method and the difference of drifting of these sensors. This paper also describes quantitatively the magnifying ability for measurement errors of the factors $W(k)$ in frequency domain EST methods. Some measures were taken to reduce this influence. The conclusion that sequential two-point method is the best fit method for straightness measurement was arrived at the end of this paper.

Key words: straightness; error separation technique; error analysis

随着加工技术的快速发展, 尤其是超精密加工技术误差在线补偿技术的发展, 对直线度测量提出了更高的要求, 主要体现在两个方面: (1) 测量精度不断提高, 现在超精密测量中使用的微位移传感器一般都是十个 nm 级的分辨率, 期望的误差分离精度接近于 0.1 μ m, 测量和数据处理过程中的误差也必须加以仔细控制; (2) 期望得到的不仅是一个直线度误差数值, 而是包括波纹度信息在内的被测件表面宏观轮廓与机床溜板运动轨迹, 可以更多地反映机床本身的问题, 对改进加工度艺和精密超精密机床的设计, 具有更重要的意义。

由于超精密的直线度物理基准是难以得到的, 误差分离方法得到了广泛的应用和发展。1979年, 日本的 K. Tozawa 首次提出了可分离机床导轨误差的 STP 法 (Sequential-Two-Points), 并于 1981 年与 H. Tanaka 合作, 将该方法应用于大型卧式铣床上, 取得了较理想的结果, 20 世纪 80 年代初期, 日本学者 Y. Kakino 和中国学者 Hong Maisheng 分别提出了时域三点法 (STRP)。这些方法可以在时域频、域分离机床导轨和被测工件的直线度误差。这些方法并没有改变传感器的输出中某成分的符号, 而是通过多个传感器测量值之间的关系, 改变某成分的相位。它们通过对信息源进行变换实现了传感器运动轨迹 (通常是机床溜板运动轨迹) 与被测件直线度之间的解耦。

虽然这些方法都利用了传感器输出的差分, 但还是有一些误差留在了分离结果中。而且因为使用了不只一个传感器, 又引入了一些新的误差。诸多学者对此进行了分析。文献^[1,3]特别分析了实验过程中各种实际因素对三点法和两点法误差分离方法造成的误差。

* 收稿日期: 1999-09-01

基金项目: 国家部委基金资助项目 (18.6.2.1)

作者简介: 王宪平 (1973), 男, 博士生。

1 误差分离原理及数学模型

如图 1 所示, 使用三个传感器 A, B, C 来测量工件的直线度误差, 它们的输出为 y_a, y_b, y_c ; 溜板直线运动误差为 $S(n)$, 被测件直线度误差为 $R(n)$, 溜板的摇摆角度(y_{aw})为 $\gamma(n)$, 传感器 A, B 之间间距为 $m_1 \cdot \Delta L$; B, C 间距为 $m_2 \cdot \Delta L$, 工件长 L , m_1, m_2, N 为整数。

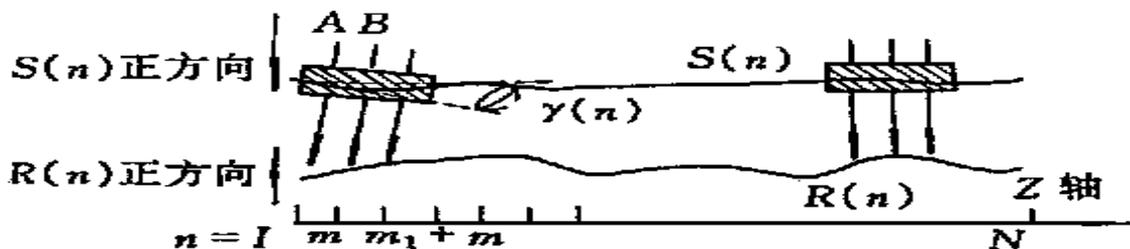


图 1 三传感器测量直线度示意图

Fig. 1 Sketch map of three point straightness measurement

设传感器 A 所在外坐标为 n , 在任一位置测量到的数值 y_a, y_b, y_c 其下标都为传感器 A 的坐标, 由几何关系可得:

$$\begin{aligned} y_a(n) &= R(n) - S(n) \\ y_b(n) &= R(n + m_1) - S(n) - m_1 \cdot \Delta L \cdot \gamma(n) \\ y_c(n) &= R(n + m_1 + m_2) - S(n) - (m_1 + m_2) \cdot \Delta L \cdot \gamma(n) \end{aligned} \quad (1)$$

一般总是调整传感器间距, 使 $m_1 = m_2 = 1$, 把(1)式中三个相加, 计算 $y_c(n) - 2y_b(n) + y_a(n)$, 消去 ΔL 和 $\gamma(n)$ 就得到时域三点法误差分离公式(2), 其中 $S(n)$ 和 $\gamma(n)$ 是 A 点处的平动与转动。

$$\begin{aligned} R(n + 2) &= y_c(n) - 2y_b(n) + y_a(n) + 2R(n + 1) - R(n) \\ \gamma(n) &= [-y_b(n) + R(n + 1) - S(n)] / \Delta L \end{aligned} \quad (2)$$

如果忽略摇摆角度的影响, 就可以只使用两个传感器, (1)式变为两点法(STP)公式,

$$\begin{aligned} y_a(n) &= R(n) - S(n) \\ y_b(n) &= R(n + m) - S(n) \end{aligned} \quad (3)$$

可以得到

$$R(n + m) = R(n) - y_a(n) + y_b(n) \quad (4)$$

另一类直线度误差分离方法是频域方法。把(1)中三式相加, 试图消去导轨误差 $S(n)$ 与摆角 $\gamma(n)$, 得到

$$\begin{aligned} y(n) &= y_a(n) + C_1 \cdot y_b(n) + C_2 \cdot y_c(n) \\ &= R(n) + C_1 R(n + m_1) + C_2 R(n + m_1 + m_2) - S(n) \\ &\quad \cdot (1 + C_1 + C_2) - \gamma(n) \cdot [m_1 C_1 + C_2(m_1 + m_2)] \cdot \Delta L \end{aligned} \quad (5)$$

取 $c_2 = \frac{m_1}{m_2}$, $c_1 = -1 - c_2$, 则

$$y(n) = R(n) + c_1 R(n + m_1) + c_2 R(n + m_1 + m_2) \quad (6)$$

假设 $R(n)$ 是周期性的, 周期为 $N^{[4]}$ 。对(6)式作 DFT, 得

$$\begin{aligned} Y(k) &= R(k) \cdot [1 + C_1 e^{j \frac{2\pi}{N} k m_1} + C_2 e^{j \frac{2\pi}{N} k (m_1 + m_2)}] \\ &= R(k) W(k) \end{aligned} \quad (7)$$

2 各种方法的误差分析

2.1 传感器初始对准误差

多个传感器的对准是困难的。也就是说,难以调整几个传感器的测头使它们在同一个平面上。如图2所示,当A比B高时, Δ_1 为正;当A比C高时, Δ_2 为正。

此时时域两点法的误差分离公式要改为:

$$R'(n+m) = R'(n) + y_b(n) - y_a(n) + \Delta_1 \quad (8)$$

一般取 $m=1$ 。当 $R(n)$ 的起始点假设为 0 时,可得,

$$\begin{aligned} R'(n+1) &= \sum_{k=1}^n (y_b(k) - y_a(k)) + n \cdot \Delta_1 \\ &= R(n+1) + n \cdot \Delta_1 \end{aligned} \quad (9)$$

此处的 $R'(n)$ 和 $R(n)$ 分别是存在和不存在传感器对准误差时分离出来的结果。可见 STP 方法中传感器对

准误差是线性累积的,对于分离结果直线度评价不产生影响。对于时域三点法来说,传感器对准误差的累积更加严重。

$$R'(n+2) - R(n+2) = - (n^2 - 1) \Delta_1 + \frac{n(n+1)}{2} \Delta_2 \quad (10)$$

可以看出,在 STRP 方法中,对准误差是呈非线性累积的。它会影响到分离结果的轮廓形状,而且随着分离点数的增多,这种累积会越来越严重。传感器对准误差对 STRP 方法分离工作台摆角误差 $\gamma(n)$ 也有影响,但其影响为线性的。

$$\gamma'(n) - \gamma(n) = (n-1) \Delta_2 + (2n-3) \Delta_1 \quad (11)$$

在实验过程中传感器的初值为:

$$\begin{aligned} y_a(0) &= R(0) - S(0) - \delta_a \\ y_b(0) &= R(m_1) - S(0) - m_1 \cdot \Delta \cdot \gamma(0) - \delta_b \\ y_c(0) &= R(m_1 + m_2) - S(0) - (m_1 + m_2) \cdot \Delta \cdot \gamma(0) - \delta_c \end{aligned} \quad (12)$$

未知数 δ_a 、 δ_b 、 δ_c 是三个传感器偏离原点的真值。初始对准误差为 $\Delta_1 = \delta_b - \delta_a$ 、 $\Delta_2 = \delta_c - \delta_a$ 。此时得到的传感器输出初值中不仅有初始对准误差,还有 R 、 S 和 γ 的影响,因此不可能在测量过程中通过精细调整,获得令人满意的初始对准误差的二次累积。

存在传感器初始对准误差时,频域三点法公式变为:

$$\begin{aligned} y(n) &= y_a(n) + C_1 \cdot y_b(n) + C_2 \cdot y_c(n) \\ &= R(n) + C_1 R(n+m_1) + C_2 R(n+m_1+m_2) \\ &\quad - S(n) \cdot (1 + C_1 + C_2) \\ &\quad - \gamma(n) \cdot [m_1 C_1 + C_2(m_1+m_2)] \cdot \Delta - C_1 \Delta_1 - C_2 \Delta_2 \end{aligned} \quad (13)$$

在此式中,传感器对准误差是以常数项的形式出现的。对 $y(n)$ 做 DFT,常数项是不产生影响的,这就消除了传感器对准误差的影响。

2.2 两点法中忽略摆角造成的误差

设溜板真实的摆角为 $\gamma(n)$,真实的被测件轮廓为 $R(n)$,计算出的被测件轮廓 $R'(n)$,传感器实际输出为 $y(n)$,考虑了摆角的两点法为

$$\begin{aligned} y_a(n) &= R(n) - S(n) \\ y_b(n) &= R(n+1) - S(n) - \Delta \cdot \gamma(n) \end{aligned} \quad (14)$$

$$R(n+1) = R(n) - y_a(n) + y_b(n) + \Delta \cdot \gamma(n) \quad (15)$$

$$R'(n+1) = R'(n) - y_a(n) + y_b(n) \quad (16)$$

$$R'(n+1) - R(n+1) = R'(n) - R(n) - \Delta \cdot \gamma(n) \quad (17)$$

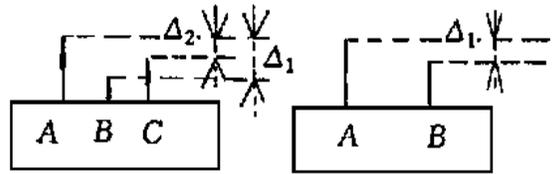


图2 传感器对准误差

Fig. 2 Misalignment of sensors

记 $\delta(n) = R'(n) - R(n)$, 为误差分离得到的被测件轮廓与真实的轮廓之差。(17)也可写作:

$$\begin{aligned}\delta(n+1) &= \delta(n) - \Delta L \cdot \gamma(n) \\ \delta(n) &= -\Delta L \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \gamma(i)\end{aligned}\quad (18)$$

由此可以看出, 忽略摆角分离出的被测件轮廓误差是摆角误差的 ΔL 倍累积。在超精密测量中, 摆角误差一般是比较小的, 当 $\Delta L = 15 \mu\text{m}$ 时, 1 角秒对应的分离误差为 $0.0727 \mu\text{m}$ 。而当测量使用的导轨较差, 或 $\gamma(n)$ 的符号保持不变时, 其累积和就可能较大, 导致较大的测量误差。后一种情况是较为普遍的。

由于传感器初始对准误差的存在, 由(11)式计算得到的 $\gamma'(n)$ 可以表达如下:

$$\gamma'(n) = \gamma(n) + \beta + \alpha \cdot n \quad (19)$$

α, β 为与传感器初始对准误差有关的常数。去掉上述结果中的初值和斜率, 得到 $\gamma''(n)$, 它与摆角的真值 $\gamma(n)$ 有如下关系:

$$\gamma''(n) = \gamma(n) - \eta \cdot n - \mu \quad (20)$$

式中 η, μ 分别为真实摆角 $\gamma(n)$ 的斜率和直流分量。不妨设 $\delta(0) = 0$, 用计算得到的 $\gamma''(n)$ 补偿两点法公式(4), 得到:

$$\begin{aligned}R'(n+1) &= R'(n) - y_a(n) + y_b(n) + \Delta L \cdot \gamma''(n) \\ &= R'(n) - y_a(n) + y_b(n) + \Delta L \cdot (\gamma(n) - \mu - \eta \cdot n)\end{aligned}\quad (21)$$

上式与(16)式相减, 得到:

$$\begin{aligned}\delta(n+1) &= \delta(n) - \Delta L \cdot \mu - \Delta L \cdot \eta \cdot n \\ \delta(n) &= R'(n) - R(n) \\ &= -n \cdot \Delta L \cdot \mu - \frac{n(n-1)}{2} \cdot \Delta L \cdot \eta\end{aligned}\quad (22)$$

由上式可见, 真实摆角的直流分量在分离结果中线性累积, 而其线性斜率在分量结果中二次累积。当 $\Delta L = 15, L = 300$, 线性斜率为 $1\text{s}/300\text{mm}$ 时, 这种累积的最大值为 $0.046 \mu\text{m}$ 。通常来说, 溜板摆角的累积和可能较大, 而其线性斜率总是很小的。使用三个传感器进行测量, 利用三点法得出的摆角对两法的分离结果进行角度补偿是可行的。这样既避免了三点法中传感器初始对准误差二次累积问题, 又补偿了两点法中忽略摆角在某些情况下引入的较大误差。

2.3 传感器漂移特性差异造成的误差

传感器的输出数据总是有斜率的。其中不仅包含因被测件(平尺)放置倾斜而引起的斜率, 还包括传感器的漂移误差和理想情况下测量数据本身所具有的斜率。设平尺放置的斜率为 α , 传感器输出漂移的线性部分斜率为 β , 除此之外, 在没有测量误差的情况下, 测量输出应有的斜率为 γ , 传感器输出为 $y(n)$, 去掉其斜率后得到 $y'(n)$ 。此时有,

$$\begin{aligned}y_a(n) &= y'_a(n) + \alpha \cdot n + \beta_a \cdot n + \gamma_a \cdot n \\ y_b(n) &= y'_b(n) + \alpha \cdot n + \beta_b \cdot n + \gamma_b \cdot n\end{aligned}\quad (23)$$

把 $y'(n)$ 代入两点法误差分离公式(4), 得到

$$\begin{aligned}R'(n+m) &= R'(n) - y'_a(n) + y'_b(n) \\ &= R'(n) - y_a(n) + y_b(n) - (\beta_b - \beta_a) \cdot n - (\gamma_b - \gamma_a) \cdot n\end{aligned}\quad (24)$$

由此已经可以看出, $(\beta_b - \beta_a)$ 和 $(\gamma_b - \gamma_a)$ 在分离结果中是二次累积的。不考虑各误差的非线性成分, 则理想的传感器输出可以表达为 $y'(n) + \gamma \cdot n = y(n) - \alpha \cdot n - \beta \cdot n$, 理想分离结果为

$$R(n+m) = R(n) - y_a(n) + y_b(n) - (\beta_b - \beta_a) \cdot n \quad (25)$$

比较式(4)、(24)和(25), 可以得出结论: 在时域两点误差分离方法中, 直接使用传感器的输出进行迭代计算, 则分离结果中有两个传感器漂移之差的二次累积; 去掉传感器输出中的线性趋势, 再进行迭代计算, 则分离结果中有理想的 $y(n)$ 的斜率的二次累积。

2.4 频域方法中权系数的误差放大作用

由(7)式可得, $\Delta R(k) = \Delta Y(k)/W(k)$, 也就是说, 传感器输出值中的误差传递到 $\Delta R(k)$ 中, 又被放大了 $1/W(k)$ 倍, 导致了分离结果 $R(n)$ 的误差。 $m_1 = m_2$ 时可以得到:

$$\begin{aligned} W_2(k) &= 1 - e^{j(2\pi/N)km} = -2j \sin \frac{\pi}{N} km \cdot e^{j(\pi/N)km} \\ W_3(k) &= 1 - 2e^{j(2\pi/N)km} + e^{j(2\pi/N)2km} \\ &= -4 \sin^2 \frac{\pi}{N} km \cdot e^{j(2\pi/N)km} \\ &= [W_2(k)]^2 \end{aligned} \quad (26)$$

可见, 频域三点法的原理性误差为频域两点法的平方, 对误差也就更敏感。图3显示出了 $W_3(k)$ 的数量级。

3 结论

(1) 传感器初始对准误差在时域两点法中是线性累积的, 对直线度测量与评价没有影响; 而在时域三点法中是二次累积的, 因此不适用于测量点数较多的情况, 但对溜板摆角的误差分离没有影响, 对频域方法也没有影响。

(2) 在超精密测量中, 忽略溜板的摆角进行两点法误差分离, 在溜板摆角的累积和较小时, 方法误差较小。否则, 可以使用三个传感器进行测量, 利用三点法得出的摆角对两点法的测量结果进行角度补偿。

(3) 在传感器的漂移特性比较一致的情况下, 不需要¹⁵ 去掉传感器输出中的斜率; 如果传感器的漂移特性近似线性, 而且漂移特性相差较大使分离出的被测件轮廓出现了不合理的二次曲线形状, 就可以去掉传感器输出中的斜率, 再进行误差分离。

(4) 频域两点法和频域三点法对测量误差有较大的放大作用, 不适宜于超精密测量。由此可见, 使用三个传感器进行时域两点法与三点法的组合方法是最适合于超精密直线度测量的误差分离方法。

参考文献:

- [1] Zhang L, Zhang Y. Imitation Analysis of the Effect of Initial-Value Error on Straightness EST Method in Time-Domain[C]. Proceedings of the ICPE'96 and 6th SJSUT. 1996: 401-403.
- [2] Zhang L, Jin J Q. Comparison and Analysis of the Effect of Initial-Value Error on Three-Point Straightness EST Methods in Frequency-domain and Time-domain[C]. Proceedings of the ICPE 96 and 6th SJSUT. 1996: 383-385.
- [3] 张镭, 张玉. 时域两点法和时域三点法直线度EST的误差分析[J]. 仪器仪表学报, 1998, 19(1): 106-108.
- [4] James C, Sheng Yi Li, JianMing Yu. High-Resolution Error Separation Technique for In-situ Straightness Measurement of Machine Tools and Workpieces[J]. Mechatronics, 1996, 16(3): 337-347.

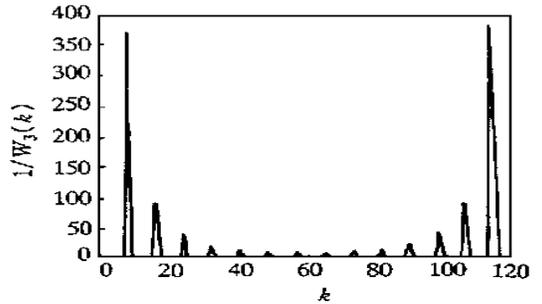


图3 $N = 121, m_1 = m_2 = 15$ 时的 $1/W_3(k)$

Fig. 3 Value of $1/W_3(k)$ at $N = 121, m_1 = m_2 = 15$