

在线测量精密机床和加工工件直线度的新方法 ——优化误差分离法(OEST)*

李圣怡 梁建成 范大鹏

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

摘要 目前,运用多传感器对工件和精密机床的直线度进行在线测量的方法有STP法、STRP法和FSTP法等。由于受到传感器相邻间隔距离的限制,这些方法往往只适合于长工件的在线测量。本文推荐的新方法——优化误差分离法(OEST)可以用于短工件中的测量,它是基于频域分析和时域优化搜索的原理,可以克服频域变换中出现的边缘失效问题以保证频域变换的正确性。本文还介绍了计算机仿真和实际测量实验的结果,并验证了该方法的可行性和正确性。

关键词 优化;误差分离;直线度测量

分类号 TH161.5

在超精密金刚石车床上加工圆柱形工件,其尺寸和形状都有很高的精度要求。加工工件的直线度误差往往取决于溜板直线运动的误差,而后者主要来源于导轨滑动副的几何形状误差。此外,负载大小、热变形、伺服系统的动态特性以及溜板运动方向等因素也会对上述误差产生影响。通常,测量传感器也是安装在溜板上的,测量的数据也同样混杂了溜板的运动误差。因此,开发一种可以适合于自动化加工环境的在线的工件和机床溜板运动的直线度误差可分离的测量方法是具有十分重要的意义的。

激光干涉仪系统可以用于车床溜板直线运动误差的在线测量,但该系统价格昂贵并对加工环境要求过于苛刻,不适合于生产车间中使用。

多传感器误差分离方法往往采用二个或三个高精度位移传感器。这些传感器安装在溜板上,随着溜板的移动,对工件的一条母线进行测量。顺序两点法(STP)采用两个传感器可实现工件直线度误差和溜板直线运动误差的分离^[1]。如果考虑到溜板的偏摆运动,则可用三个传感器的STRP方法来分离上述两类直线度误差和偏摆角度误差^[2]。这两种方法的缺点是:采样间隔密度受到限制,采样点过于稀疏,不适合于短工件的测量。例如,假设传感器间距为15mm,使用STP法在60mm长的工件上只能测到3个有效点。显然,

* 国家自然科学基金资助

1993年7月18日收稿

用3个点的数据是不可能准确的描述工件直线度误差曲线的形状的。FSTP(Fine Sequential-Three-Points)法^[3]可以使有效采样点加密3倍,但要使用三个传感器,工件测量区至少要105mm长。因此,我们开发的适合于短工件测量的OEST法具有重要的实际意义。

1 OEST法的原理

OEST(Optimum Error Separation Techniques Method)法是工件圆度误差和主轴旋转运动误差分离方法的一种推广。如果被测工件的直径扩大到无穷大,圆度误差的测量就可看成为直线度误差的测量。

基本的EST法的构成和原理如图1所示。

令 XOY 和 $X'O_1Y_1$ 分别为基准坐标和测量坐标,三个传感器的测量方程如下

$$Y_A(x) = R(x) - S(x) \quad (1)$$

$$Y_B(x) = R(x-l_1) - S(x) + l_1\gamma(x) \quad (2)$$

$$Y_C(x) = R(x-l_1-l_2) - S(x) + (l_1+l_2)\gamma(x) \quad (3)$$

式中 $R(x)$, $R(x-l_1)$, $R(x-l_1-l_2)$ 分别为 x , $x-l_1$, $x-l_1-l_2$ 点处的工件直线度误差曲线的值, S

(x) 为 x 处溜板运动误差曲线的值, $\gamma(x)$ 是此刻溜板偏摆角度。 $Y_A(x)$, $Y_B(x)$ 和 $Y_C(x)$ 分别为传感器A, B和C的测量值。

将(1)~(3)式离散化,表示为

$$Y_A(n) = R(n) - S(n) \quad (4)$$

$$Y_B(n) = R(n-m_1) - S(n) + m_1\Delta l\gamma(n) \quad (5)$$

$$Y_C(n) = R(n-m_1-m_2) - S(n) + (m_1+m_2)\Delta l\gamma(n) \quad (6)$$

式中 $m_1=l_1/\Delta l$, $m_2=l_2/\Delta l$, Δl 为采样间隔。

将(4), (5)和(6)式乘以适当数值后相加,得

$$Y(n) = Y_A(n) + C_1Y_B(n) + C_2Y_C(n) \quad (7)$$

即 $Y(n) = R(n) + C_1R(n-m_1) + C_2R(n-m_1-m_2) - S(n)$

$$(1+C_1+C_2) + \gamma(n)[m_1C_1 + C_2(m_1+m_2)]\Delta l \quad (8)$$

令 $1+C_1+C_2=0$ (9)

$$m_1C_1 + C_2(m_1+m_2) = 0 \quad (10)$$

则有 $C_1 = -1 - (m_1/m_2)$, $C_2 = m_1/m_2$ (11)

(8)式可以写为

$$Y(n) = R(n) + C_1R(n-m_1) + C_2R(n-m_1-m_2) \quad (12)$$

如果先假设被测直线度误差曲线是以 N 为周期的,我们用DFT将(12)式变换为

$$Y(k) = R(k) + C_1R(k)e^{-j(2\pi/N)km_1} + C_2R(k)e^{-j(2\pi/N)k(m_1+m_2)}$$

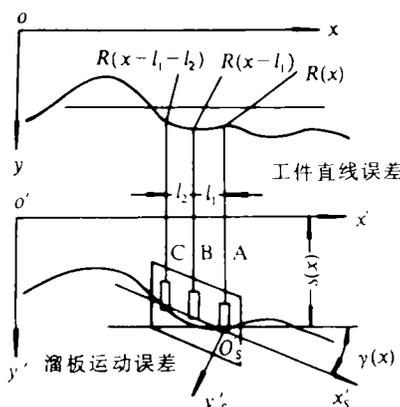


图1 EST法的原理

$$= R(k)[1 + C_1 e^{-j(2\pi/N)km_1} + C_2 e^{-j(2\pi/N)k(m_1+m_2)}] = R(k)W(k) \quad (13)$$

式中 N 为一个周期的点数, $W(k)$ 称为频域权函数, 它仅仅取决于测量参数, 比如 $l_1, l_2, \Delta l$ 和 N , 是可以预先求得的。

工件直线度误差曲线的频率分量为

$$R(k) = \begin{cases} 0, & k = 0 \\ Y(k)/W(k), & k = 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (14)$$

式中 $R(0)$ 是直流分量, 它是传感器对准误差所造成, 它不能从 (13) 式中求得。由于 $R(0)$ 对直线度误差曲线的形状和评价都没有影响, 可以令其为零。用 IDFFT 可以求出 $R(n)$ 如下:

$$R(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} R(k) e^{j(2\pi/N)kn}, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (15)$$

从 (1), (2) 式, 可以求出溜板运动误差和偏摆角度误差如下:

$$S(n) = R(n) - Y_A(n) \quad (16)$$

$$\gamma(n) = [Y_B(n) - R(n - m_1) + S(n)]/m_1 \Delta l \quad (17)$$

对于短工件而言, 我们采用两个传感器, 以减少传感器所占空间。这时, 计算的结果将忽略溜板偏摆造成的影响。

在这种情况下, 令 $C_1 = -1, C_2 = 0, m_1 = m$, (14) 和 (15) 式可改写为

$$R(k) = Y(k)/(1 - e^{j2\pi k \cdot m/N}), \quad k \neq 0 \quad (18)$$

$$R(n) = \text{IDFT}[Y(k)/(1 - e^{j2\pi k \cdot m/N})] \quad (19)$$

但是, 实际上误差曲线是非周期的, 选定测量长度 N , 则 $R(n) \neq R(N+n)$, $n=0, 1, \dots, m-1$ 。如图 2 所示, 和圆度测量比较。在圆度测量中, N 为一周的测量点, 其信号是以 N 为周期的。但直线度测量不具备这样周期性。因此位移定理 $L[f(t \pm b)] = F(s)e^{\mp bs}$, 在传感器 A 运动超过第 N 点后的边缘区域内不再适用, 这样, 从 (12) 式不能推导出 (13) 式。

OEST 法的特点是利用优化搜索的方法来使条件 $R(n) = R(N+n)$ 可近似得到满足, 从而解决上述边缘区遇到的困难。

首先从 (19) 式求取 $R(n)$, 再用最小二乘法 (LS) 求出最小二乘拟合直线方程和直线度评价因子。

$$a = \left[N \sum_{n=0}^{N-1} n R(n) - \sum_{n=0}^{N-1} n \sum_{n=0}^{N-1} R(n) \right] / \left[N \sum_{n=0}^{N-1} n^2 - \left(\sum_{n=0}^{N-1} n \right)^2 \right] \quad (20)$$

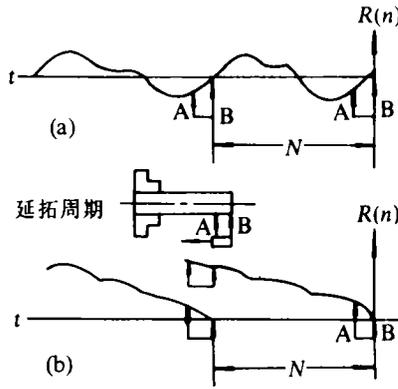


图 2 圆度、直线度误差曲线与测量原理比较
(a)圆度 (b)直线度

$$b = \left[\sum_{n=0}^{N-1} n^2 \sum_{n=0}^{X-1} R(n) - \sum_{n=0}^{N-1} n R(n) \sum_{n=0}^{N-1} n \right] / \left[N \sum_{n=0}^{N-1} n^2 - \left(\sum_{n=0}^{N-1} n \right)^2 \right] \quad (21)$$

最小二乘直线方程为

$$R(n) = b - an \quad (22)$$

取距上述直线方程的最大、最小偏差 e_{\max} 和 e_{\min} ，并定义直线度评价因子为

$$\hat{R}_E = [|e_{\max}| + |e_{\min}|] / [1 + (1 + a)^2]^{1/2} \quad (23)$$

取代价函数 $J = |R_E - \hat{R}_E|$ ，其中 R_E 是评价因子的真值。由于 R_E 是未知的，代价函数可选取为邻近两次迭代的评价因子之差，即

$$\begin{aligned} J &= J_k - J_{k-1} = |R_E - \hat{R}_{E,k}| - |R_E - \hat{R}_{E,k+1}| \\ &= |\hat{R}_{E,k} - \hat{R}_{E,k+1}| \leq \epsilon \end{aligned} \quad (24)$$

式中 k 为迭代次数， ϵ 为任意小的值。

假设工件和导轨轮廓都是光滑的，(7)式中边缘区域的加权信息可以用下式来修正：

$$\begin{aligned} Y(N - m + i) &= [R(N - m + i) - R(i)]G_1G_2^* \\ i &= 0, 1, \dots, m - 1 \end{aligned} \quad (25)$$

式中 G_1 是平移因子， G_2^* 是旋转因子， $G_2^* = G_2i/m$ 。

为了使 J 趋于最小，分别对 G_1 和 G_2 进行两维的 0.618 法最优搜索，直到 $J \leq \epsilon$ 为止。计算机优化处理的程序框图如图 3 所示。

2 仿真与实验

仿真是在 IBM 386 微机上的。先给定任意两个非周期性误差曲线表示为工件和溜板的直线度误差，再用传感器 A, B 模拟测量，然后用 OEST 法把测量信息中的两种误差分离开。

例如，设工件直线度误差为

$$\begin{cases} R(i) = 0.5 \sin(0.75\pi \cdot i/32) + F, & i = 0, 1, \dots, 31 \\ F = \begin{cases} 0.2, & 5 < i < 10 \text{ 和 } 15 < i < 20 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

溜板直线运动误差为

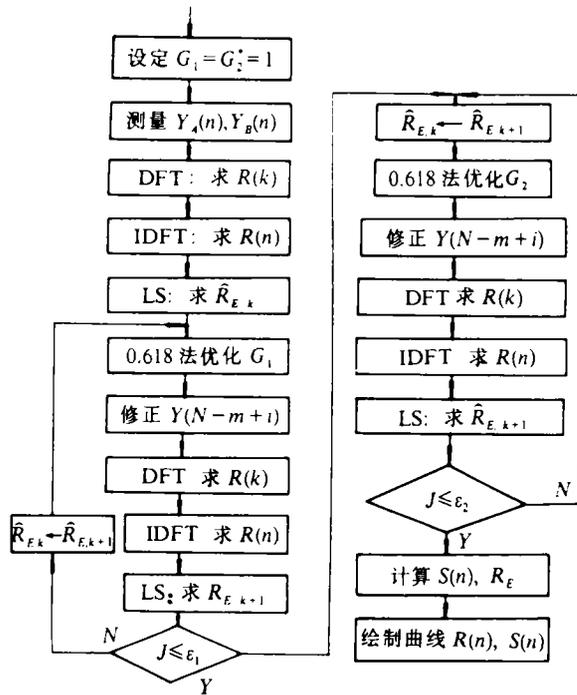


图 3 OEST 方法的程序框图 ($\epsilon_2 < \epsilon_1$)

$$\begin{cases} S(i) = \pm 0.5\sin(\pi i/32) + F, & i = 0, 1, \dots, 31 \\ F = \begin{cases} 0.1, & 11 < i < 16 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (27)$$

上述给定曲线分别用图 4(a)、4(b)表示。图 4(c)、4(d)分别为传感器对上述给定误差曲线测量的值。图 4(e)、4(f)为用 OEST 法进行误差分离计算后的结果,可见其结果和给定的误差曲线很接近。

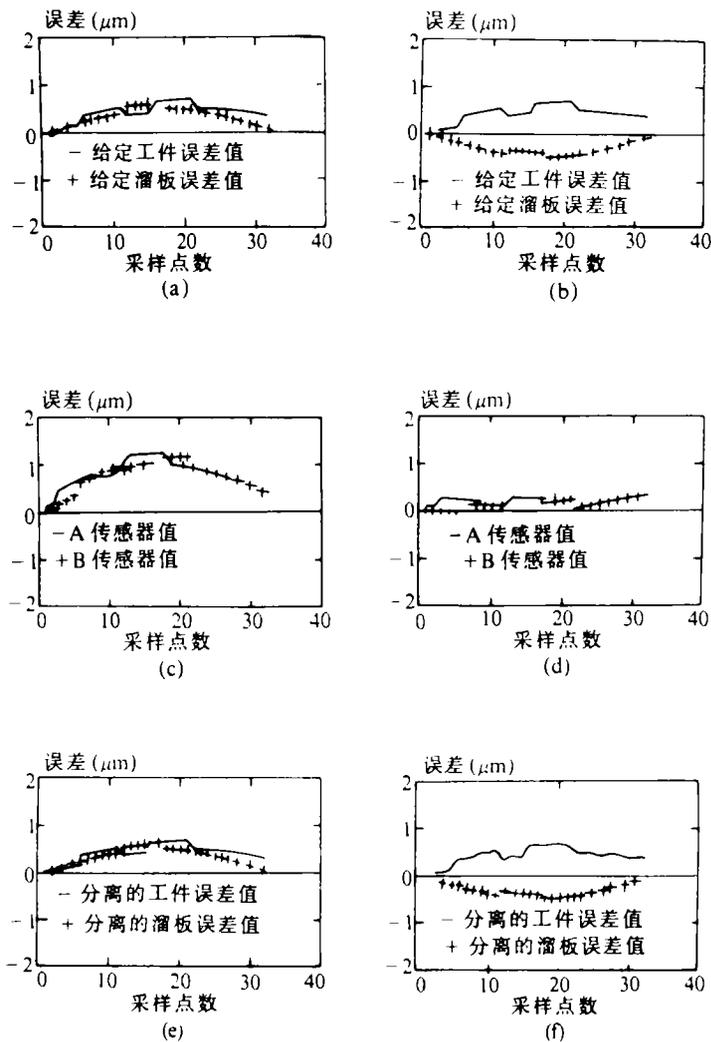


图 4 OEST 计算机仿真结果

(a),(b) 给定的误差曲线; (c),(d) 传感器测量值曲线; (e),(f) 误差分离后曲线

实际测量是在 S1-235 超精密金刚石车床上进行的。两个传感器使用电容式传感器,相距 15mm,采样间隔为 3mm,工件为 $\phi 40 \times 60\text{mm}$ 的铝合金圆棒。在用金刚石车刀切削后,其中 48mm 长一段作为测量区,用 OEST 法四次测量的结果如图 5(a)、5(b)所示。分

别定义工件直线度误差因子,溜板直线运动误差因子为 R_E 和 R_s , 定义误差曲线上所有点到最小二乘直线方程的垂直距离绝对值之和

$$d_i^R = \sum_{n=0}^{15} |R(n)| \sqrt{1/(1+a_R)^2} \quad (28)$$

$$d_i^S = \sum_{n=0}^{15} |S(n)| \sqrt{1/(1+a_s)^2} \quad (29)$$

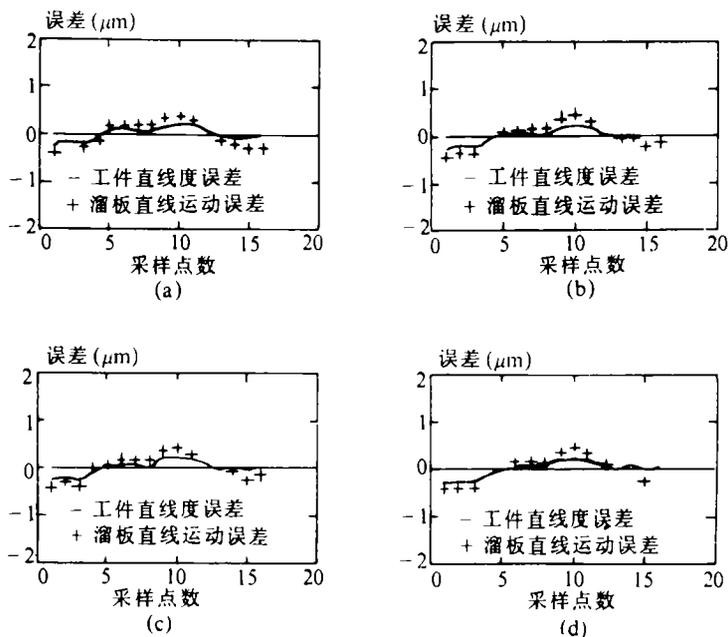


图 5 OEST 在 S1-235 车床上的测量结果

四次测量的结果如表 1 所示, 工件形状的曲线具有很强相似性, R_E 和 d_i^R 的测量偏差小于 R_s 和 d_i^S , 其结果也是合理的。

3 结论

OEST 法是一种简单的、可以用于短工件的测量方法。它可同时分离出工件和溜板运动的直线度误差, 还可测出工件的锥度误差, 是目前对短工件进行测量的最好方法, 该方法也可用于其他加工机床的在线直线度测量的场合。

表 1

测量点	$R_E/\mu\text{m}$	$S_E/\mu\text{m}$	$d_i^R/\mu\text{m}$	$d_i^S/\mu\text{m}$
1	0.375	0.771	1.847	3.670
2	0.377	0.785	1.743	3.388
3	0.366	0.815	1.827	3.560
4	0.381	0.846	1.783	3.489
最大偏差	0.015	0.075	0.104	0.282

参考文献

- 1 Koichi Tozawa, Hisayushi Sato, Masanori O-hori. A New Method for the Measurement of the Straightness of Machine Tools and Machined Work. J. of Mechanical Design. July, 1982, 104/587
- 2 H Tauaka, H sato. Extensive Analysis and Development of Straightnees Measurement by Sequential-Two-Points Method. Transactions of the ASME, 1986, 108: 174
- 3 Li Shengyi, Tan Jie, Pan Peiyuan. Fine Sequential-three-points for On-line Measarement of the Straightness of Precision Latches. ISMTII, P. R. China, 1993

The Optimum EST-A New Method for On-line Measurement of the Straightness of Precision Machine Tools and Machined Workpiece

Li Shengyi Liang Jiancheng Fan Dapeng

(The Department of Mechantronics and Instrumentation, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract

There are some of multiple-sensor methods used for on-line measurement of the straightness of precision machine tool and machined workpiece. But, all of these methods are only used for long workpiece measurement.

The OEST method proposed in this paper is a new one that can be used for short workpiece measurement. It is based on the analysis of frequency domain and optimum search in time domain. It can overcome the mismatch problem in boundary area caused by shift in frequency domain. And, computer simulation and experiment results prove that this method is easy and efficient.

Key words optimum; error separation; straightness measurement