

机床主轴回转误差计算机辅助测试

李迅波* 陈光禛

(电子科技大学电子机械系, 自动化系 成都 610054)

【摘要】 应用计算机辅助测试(CAT)技术, 以计算机为基础, 提出了一种高精度主轴回转误差在线测量方法, 并开发了在线测量和数据处理系统。该系统由高精度标准球、涡流传感器、微机和数据处理软件组成。采用数字滤波方法消除一次偏心分量, 在此基础上对数据处理和误差评定进行了探讨, 将系统用于车床主轴回转精度的实际测量, 取得了良好效果。

关键词 计算机辅助测试; 主轴回转误差; 机床; 消偏; 数据处理; 在线测量
中图分类号 TP272; TH113.1

主轴回转误差是影响机床加工工件的几何精度和表面光洁度的重要因素之一。对机床主轴回转误差的研究, 找出产生主轴回转误差的原因, 这对设计高精度机床和保障工件的精度有着重要的实际意义, 历来受到有关研究人员的重视。目前已研制出多种依据不同测试方法的主轴回转误差测试系统, 这些系统可分为两类: 第一类是基于模拟信号处理方法, 不同程度存在着误差大(一般达 10%), 调整使用难, 后期的测试数据复制、计算工作量大等缺点; 另一类为数模混合型的测试系统, 这类系统可大大减轻后期数据处理工作量, 但由于它的整套处理过程仍然是模拟过程, 精度仍依赖于模拟部分的调整精度, 实质上仍属于模拟测试方法。

本文采用计算机辅助测试技术(CAT), 提出主轴回转误差计算方法并开发出计算机辅助测试系统, 对主轴回转误差进行在线测量和数据处理, 评定主轴的回转精度。

1 原理与方法

位移传感检测到主轴回转误差在其敏感方向的信号可描述为

$$X_t = E \cos(2\pi f_0 t + \theta_0) + r_{xt} + \hat{q}_t \quad (1)$$

式中 f_0 为主轴回转频率; E 为基准球的安装偏心; θ_0 为初始相位角; $E \cos(2\pi f_0 t + \theta_0)$ 为基准球安装偏心在固定敏感方向的投影; r_{xt} 为基准球表面的形状误差; \hat{q}_t 为主轴回转误差在固定敏感方向上的投影。

由于选择高精度基准球, 其形状误差可忽略, 则式(1)变为

$$X_t = E \cos(2\pi f_0 t + \theta_0) + \hat{q}_t \quad (2)$$

由于 $E \cos(2\pi f_0 t + \theta_0)$ 将造成测试结果与实际回转误差的偏差, 必须剔除该信号, 得到需要的误差信号, 令 $E \cos(2\pi f_0 t + \theta_0) = 0$, 得 $X_t = \hat{q}_t$, 反映了加工时主轴回转误差, 该误差以 1:1 影响工件加工半径, 使其产生圆度误差。

由以上分析可知, 为了提高主轴回转误差的精确测量, 必须消除基准球的偏心影响, 这里采用软件陷波(NDF)来实现消偏。考虑到衰减特性, 数字滤波器设计成无限冲激数字阻带滤波器, 采用

双线性变换法, 阻带滤波器的传递数表达式为

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{z^{-2} - Ez^{-1} + 1}{(1-D)z^{-2} - Ez^{-1} + 1 + D} \tag{3}$$

式中

$$D = \omega_c \tan(B\pi f_s) \tag{4}$$

$$E = 2\cos(2\pi f_0 T_s) \tag{5}$$

式中 B 为阻带带宽, 其中心频率为 f_0 , 考虑实际频率漂移, B 设定为 $(1/10)f_0$; ω_c 为截止频率; f_s 为 A/D 采样频率; T_s 为对应的采样周期。

由式(3)得

$$Y(n) = [X(n) - EX(n-1) + X(n-2) + EY(n-1) - (1-D)Y(n-2)] / (1+D) \tag{6}$$

在一周内对回转误差均匀采样, 则采样序列为

$$X_i = a + E\cos(2\pi i/n + \theta) + \hat{\alpha}_i \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{7}$$

将式(7)代入式(6)可得到无偏心的输出误差信号。

回转误差运动的测量结果, 通常记录成一定形式的圆图像, 再根据图像分析来确定误差运动的特性和量值。图 1 是采用最小二乘法圆心 LSC 来评定误差曲线圆图像。它是以数学逼近法来求得的, 即等距地足够多地从某个圆到圆图像的径向偏移的平方和为最小, 即为

$$a^2 + b^2 + c^2 + \dots + n^2 = \min \tag{8}$$

则此圆中心就是最小二乘法圆心, 其坐标 (x_0, y_0) 和半径 R 为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ y_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \\ R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{状误} \end{cases} \tag{9}$$

利用最小二乘法能够得到误差运动的定量值, 即圆度

$$Q = |P + V| = R_{max} - R_{min} \tag{10}$$

式中 P, V 分别为工件轮廓偏离最小二乘圆的最大距离; R_{max}, R_{min} 为其对应的 LSC 的半径。

实际上, 由于机床主轴回转误差是反映在加工件上, 而工件的加工精度才是我们测量主轴回转误差的目的。所以误差圆图像的基圆尺寸应与实际工件的理想圆尺寸相同, 才能正确反映主轴回转误差作用于工件的结果。但实际测量情况下, 工件尺寸与误差相比相当大 (> 1000 倍), 不可能得到这种误差圆图像。往往采用将误差放大, 基圆缩小来得到误差运动圆图像, 这时将大大地扩大

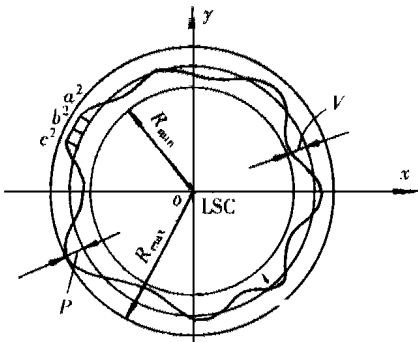


图 1 最小二乘圆心 LSC

一次谐波等的影响, 若以此来评估回转精度, 误差较大。

假设在一理想加工条件(指工件圆度误差仅受主轴的回转误差的影响)得到某工作端面形状如图 2 所示, 设其加工时主轴平均回转轴线在 O 点, 以此作为坐标原点, 现用最小二乘法来评估其圆度误差(即认为是主轴回转误差), 得到最小二乘圆心 O' 及以 R' 为半径的最小二乘圆。设工件

上有一点 a ，它在以 O 和 O' 点为原点的极坐标上的坐标分别为 $a(R, \theta_a)$ 和 $a(R', \theta'_a)$ 。

这里，主轴回转误差已全部反映在工件上了，所以可认为是映有主轴回转误差的工件在绕固定轴心线 O 回转。

在 t 的 θ_a/ω 时刻，工件上 a 点转到 x 轴上，记为 a' ，同时 O' 也转过 θ_a 角度，记为 O'' ，此时 R' 将转过一角度 θ_R ，过 O 作 $oa'' \parallel oa'$ ，则 $\angle a'oa'' = \theta'_a$ ， $\theta''_a = \angle a'oa''$ ， $\theta_R = \theta'_a - \theta''_a$ ，弦 $\overline{aa''} < oo'$ ， $\theta''_a = \angle a'oa'' = \overline{aa''}/R$ 。又 $R \gg oo' > \overline{aa''}$ ， $\theta''_a \ll \theta_a$ ， $0 < \theta''_a \ll 1$ ，所以 $\theta'_a \approx \theta_R$ 。同理认为 $\theta_R = \theta_a$ ，即 R' 也转过了 θ_a 角度。

此刻在 x 方向投影为

$$x_t = \overline{oo''} \cos(\theta_0 + \theta_a) + R'(t) \cos \theta''_a \tag{11}$$

令 $\overline{oo''} = E$ ，将 $\theta_a = 2\pi f_0 t$ 代入式(11)得

$$x_t = E \cos(2\pi f_0 t + \theta_a) + R'(t) \tag{12}$$

此信号通过传感器拾取后，其中心频率为 f_0 ，经陷波去均值处理后，得到

$$\delta'_t = k(R_t - R') \tag{13}$$

式中 k 为传感器调整电路的放大系数。

由式(13)可知， δ'_t 真实地反映了 R 在一周内 δ'_t 的最大值 $\delta'_{\max}(\theta_1/\omega)$ 对应于 R' 的最大值 R'_{\max} ， δ'_t 的最小值 $\delta'_{\min}(\theta_2/\omega)$ 对应于 R' 的最小值 R'_{\min} 。所以

$$\delta'_{\max} - \delta'_{\min} = R'_{\max} - R'_{\min} = P + V \tag{14}$$

最小二乘法圆心 LSC 与主轴回转径向误差的对应关系如图 3 所示。

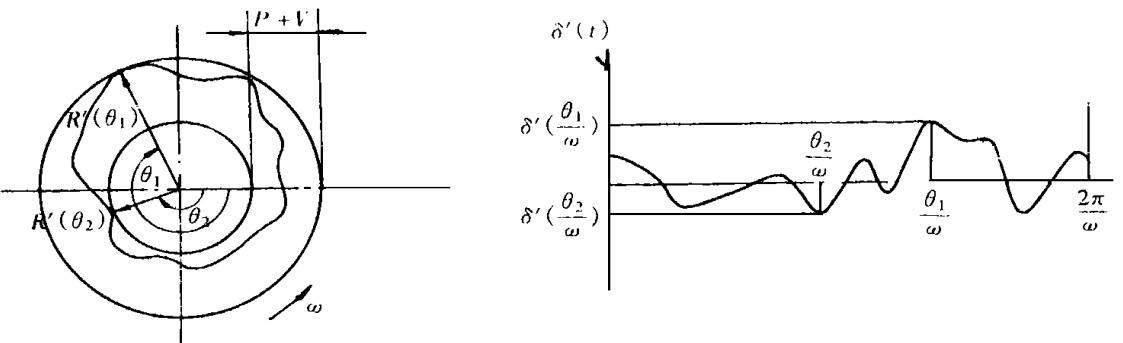


图 3 最小二乘法圆心 LSC 与主轴回转径向误差的对应关系

由式(14)可知，用于结果评估的数据直接源于 δ'_t ，与采用最小二乘法圆心 LSC 来评定误差曲线圆图像结果相同，这样做的优点是中间环节少，评估计算量小，测量精确度高。

2 测试系统的组成

机床主轴回转精度的测试是采用高精度钢球作为基准球，这种方法简单易行。整个测试系统

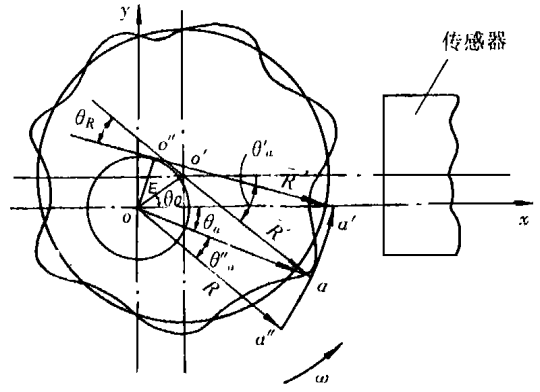


图 2 圆柱工作端面形状示意图

是以高性能计算机为基础,内插多通道数据采集接口卡,在测试软件支持下,主轴回转误差信号的数据采集、数据处理、结果显示都在计算机的控制下完成。图 4 为系统用于车床实际测量框图。图中所示主轴转动过程中电涡流传感器拾取基准球在敏感方向的误差信号,经位移测量仪转化为电压信号,光电传感器在主轴每一周给出同步信号,此同步信号将控制 A/D 采样时,并由此计算出转速即陷波滤波器的中心频率、基圆频率。采集的信号经计算机消偏后进行数据处理,得到误差结果,此误差信号加到基圆上,即可在 CRT 显示器上得到误差圆图像。

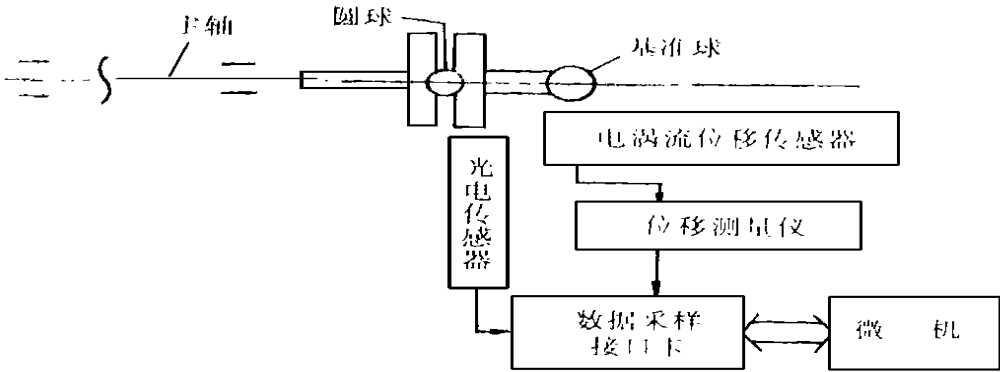


图 4 主轴回转精度测试系统框图

3 实验结果和结论

经对机床主轴回转误差信号的统计分析表明,通过数据采集通道抗频滤波后,误差信号 $\delta(t)$ 的高频成分不会超过基频的 20 倍。由奈奎斯特采样定理,采样频率只要达到基频的 40 倍以上,即每转采样 40 点以上,误差信号频率无失真,为了能在 CRT 上得到连续误差圆的显示,以及信号的进一步的数据处理,可选采样点为 512 点。A/D 采样频率可设置为

$$f_s = 512f_n \quad (16)$$

式中 f_n 为机床主轴转速。

选位移传感器为 WFC-II 型涡流振幅传感器,其传感器探头装夹机构避免与床身接触,以防止床身的振动对探头起的干扰。探头与测试球之间的间隙调整为 1 mm,测试球偏心调到最小,以提高测量精度。

用以上的测试方法及测试系统,对 C616 车床主轴回转精度进行测试,选取主轴转速 $n = 958$ r/min,一次谐波频率为 $f_0 = 16$ Hz,测得数据如表 1 所示。

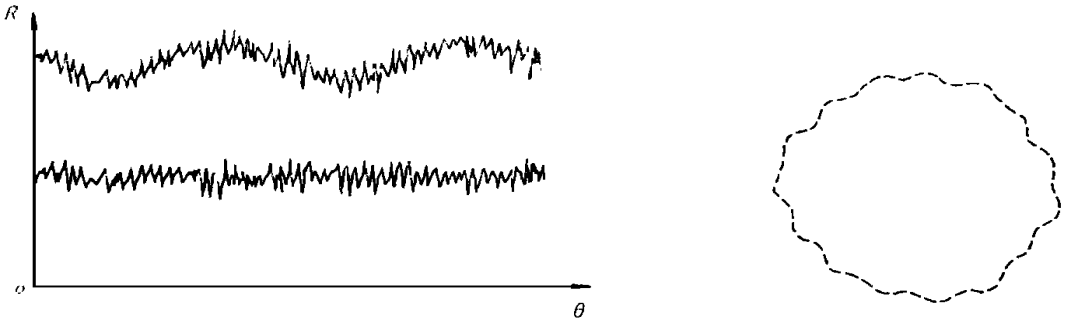
表 1 主轴回转误差值

转速/rpm	采样延时/ μ s	采样点数	回转误差值/ μ m						平均
			第一转	第二转	第三转	第四转	第五转	第六转	
958	122	512	7	7.2	6.8	6.9	7.1	7	7

图 5a 所示为计算机消偏前后误差信号的直角坐标图像。显然,与主轴回转信号同频的偏心分量(一次偏心分量)已基本消除,图 5b 所示为误差圆图像。

经实验证明,本设计方法正确,所设计的计算机辅助测试系统充分发挥了数字系统的特长,简化了操作,实现测试过程少调整或不调整,测试精度高,为主轴回转测试提供了先进的测试方

法和手段。



(a) 计算机消偏前后误差信号比较

(b) 主轴误差圆图像示意图

图5 主轴误差曲线

参 考 文 献

- 1 江志伟. 机械主轴回转精度测试中的一次分量及其处理. 机床, 1985, 1:38~40
- 2 严普强, 黄长艺. 机械工程测试技术基础. 北京:机械工业出版社, 1986
- 3 程佩青. 数字滤波与快速傅里叶变换. 北京:清华大学出版社, 1990
- 4 曾家智, 向世清. 微型计算机系统与接口. 成都:电子科技大学出版社, 1991
- 5 陈光祚禹, 张世箕. 数据域测试及仪器. 北京:电子工业出版社, 1994

A Computer-aided Testing Measurement System for Spindle Rotation Accuracy

Li Xunbo Chen Guangjü

(Dept. of Electromechanical Eng., Dept. of Automation, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract This paper studies the CAT (computer-aided testing) technique with super computer used in on-line high-precision measurement and data processing system for spindle rotation accuracy. The system consists of maset-ball, general-purpose instruments, super computer and a set of software for data processing. Based on eccentricity elimination by digital filter, data processing and error evaluation are discussed. The system is applied in the study of the spindle rotation accuracy of a matching tools' axis. The results of the rotation error are given.

Key words computer-aided testing; rotation accuracy; machine tools; data processing; eccentricity elimination; on-line measurement

编辑 徐培红