

数字滤波法在主轴回转精度测试中的应用

李均 尹苟保 刘桂秋

(精密机械与仪表系)

摘 要

机床主轴回转精度的测量是机械工程测试中的重要项目之一。本文提出一种数字式测量系统,用数字滤波技术成功地解决了模拟式测量方法中难以解决的一些技术难关,使测量精度达到0.1微米。

关键词 机械测量, 主轴, 机床

1 前 言

现代空间技术和计算技术等许多领域对零件的精度提出了很高的要求。而加工这些零件的机床大主轴回转精度直接影响加工精度,因此,如何正确测量主轴回转精度已成为重要的研究课题。

机床主轴绕之转动的瞬时回转轴线的空间位置实际上是在不断变化的。它相对于平衡轴线(处于轴线的平均位置处)的位移定义为回转误差运动,用来表征主轴的回转精度^{[1][2]}。位移越大,精度越低。

研究机床主轴回转精度的目的,从机床的使用角度来说,是预测回转精度对加工精度的影响。因此测量应在敏感方向上进行(在车床上,安装车刀的水平方向为敏感方向);从机床设计和诊断角度来说是要找出影响主轴回转精度的因素,以便改进机床的性能。

机床主轴回转精度的测量方法,多数采用精密钢球及非接触式传感器来进行动态测试^[3]。信号的记录及数据处理方式分两大类:

1. 极坐标法:将信号叠加到一个真圆(称为基圆)上,形成一个圆图象,以其圆度作为主轴回转精度的数字特征。

2. 直角座标法(CMTI):以时间或主轴转动的角度为横座标,主轴回转误差信号为纵座标进行记录,用信号的峰峰值作为评定主轴回转精度的数字特征。

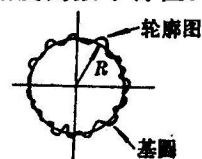
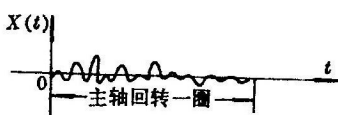


图1 a. 回转误差信号 $X(t)$

b. 误差信号叠加到基圆上

2 数字式测量系统原理^[4]

系统由精密钢球，电容式位移测量仪和信号采集及数据处理系统三大部分组成。图2所示的系统用于车床等固定敏感方向类机床主轴回转精度的测量。

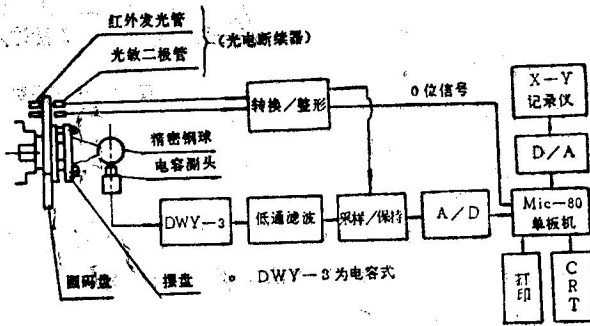


图 2

在车床主轴上固定一个多孔码盘和精密钢球。通过摆盘调节钢球使之尽量对中。圆盘码周边上等角度分布若干个通光孔，它和光电断续器用来发出采样信号，触发采样保持器。电容测头通过随主轴旋转着的钢球拾取位移信号（包括回转误差和钢球安装偏心引起的一次谐波分量），经DWY-3型电容式位移测量仪换成电压信号，送低通滤波器去掉高频干扰，然后经A/D换成数字量，最后送入微处理机进行数据处理和圆度评定。其结果可以打印，或CRT显示，也可用X-Y记录仪绘出图形。

数字式测量系统与常用的模拟式测量系统比较有明显的优点：①评定圆度时，由基准钢球安装偏心 e 所造成的测量误差与回转误差 Δ 之比 e （称为相对误差）与基圆半径 R 成反比^[1]。

$$e \approx \frac{e^2}{2R\Delta} \times 100\% \quad (1)$$

在模拟式中，由于显示装置尺寸的限制， R 不可能取大，因此 e 较大，而数字式的基圆由算法产生，只要字长允许，可产生足够大的基圆，因而 e 可以很小。②在直角座标法中，偏心量 e 对峰峰值影响极大，从而引起极大的测量误差。这在模拟式中很难解决，而在数字式中，利用FFT分析可以除去一次谐波分量，从而达到提高精度的目的。③在机床设计或诊断中常常需要知道主轴回转误差运动的频谱特性，但模拟式很难提供，而数字式用FFT分析即可解决。④数字式中不需专门的基圆产生装置。

3 数字式采样方案及参数选择

3.1 数字式采样方案

(1) 转速跟踪法：在主轴上贴一箔条，主轴回转时，位移传感器便送出一个脉冲/圈，经相位跟踪并整形后，就得到 N 脉冲/圈的采样脉冲。此法优点：①装拆方便，不影响回转性能；② N 数选择灵活。此法缺点是需要一定跟踪时间，因此只能跟踪主轴前几周的回转周期。实际上转速常有0.1%~0.01%的变化，致使采样频率也有相应的变化。

(2) 分频法：测出主轴回转周期，利用硬件或软件除以 N ，得出采样脉冲周期，优缺点同(1)法。

(3) 光电码盘法^[1]：(见图 1) 圆盘直径的选择要考虑到：①每个孔的采光量足以启动光电管；②能容纳由采样定理确定的孔数；③受机床上安装位置的限制。此法优点是实时、准确、可靠和简单，缺点是增加主轴负荷， N 数不能随意变动。本系统采用此法。

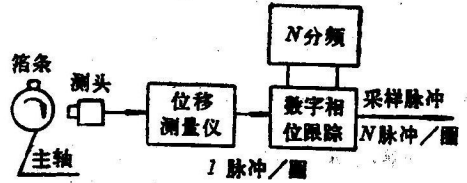


图 3 转速跟踪法

3.2 参数选择

(1) 低通滤波器截止频率 f_c ：设主轴最大转速为 n_{\max} rpm，由于影响主轴回转精度的频率分量一般在 6~15 次谐波以下，其它都应滤除，因此取

$$f_c = (6 \sim 15)n_{\max}/60$$

(2) 采样频率 f_s ：根据采样定理要求，再留有一定的余量，取

$$f_s = (2.5 \sim 4)f_c$$

(3) 如采用码盘采样时，码盘孔数 M ：

$$M = 60f_s/n \quad (4)$$

其中 n 为主轴转速，如果存在与 n 无关的外来高频噪声，为使任何情况下都不造成频率混迭，应取 $n = n_{\min}$ ，即

$$M = 60f_s/n_{\min} \geq (15 \sim 60)n_{\max}/n_{\min} \quad (5)$$

如不存在这样的噪声，则式(2)中的 n_{\max} 可用 n 代替，得

$$M > 15 \sim 60 \quad (6)$$

若用基-2 FFT 作信号处理，应取 M 为 2 的幂。

4 数字滤波及数据处理

被测信号由 A/D 变换送入计算机进行数字滤波和数据处理。其目的有二：一是进行频谱分析以便做机床诊断；二是评定主轴的回转精度。流程框图见图 4。信号经错误点剔除后进行 FFT 分析，因信号是实数，故只需用 $N/2$ 点的 FFT 程序来运算，以减少计算

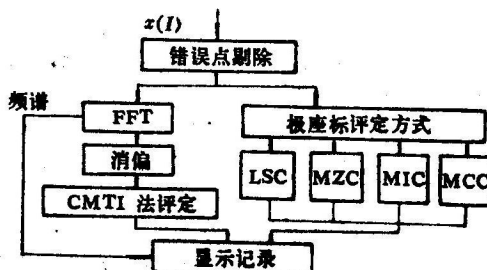


图 4 数据处理基本流程框图

量。频谱信号可以直接作为机床诊断的依据,也可用来进行消偏。消偏算法如下: $x(I)$ 为输入数字信号,它包括由于偏心引起的一次谐波分量。设主轴每转一圈采样 512 点,对 $x(I)$ 进行 FFT 变换后,得到频谱 $S(I) = SR(I) + jSI(I)$, $I = 0, 1, \dots, 511$ 。对应一次谐波分量的频谱为

$$S(1) = SR(1) + jSI(1) \quad (7)$$

$$\text{和} \quad S(511) = SR(511) + jSI(511) \quad (8)$$

这是一对共轭复数。消去一次谐波分量以后的信号序列为

$$\begin{aligned} x'(I) &= x(I) - \frac{1}{512} \left[s(1) \left(\cos \frac{2\pi I}{512} + j \sin \frac{2\pi I}{512} \right) \right. \\ &\quad \left. + s(511) \left(\cos \frac{511 \times 2\pi I}{512} + j \sin \frac{511 \times 2\pi I}{512} \right) \right] \\ &= x(I) - \frac{1}{512} \left[2sR(1) \cos \left(\frac{2\pi I}{512} \right) - 2sI(1) \sin \left(\frac{2\pi I}{512} \right) \right] \\ I &= 0, 1, \dots, 511 \end{aligned}$$

取 $x'(I)$ 的峰峰值 s 来做为评定主轴回转精度的数字特征,就是前述的直角坐标法。

用极坐标评定时,评定圆图象的圆度常用的方法有四种:①最小二乘方圆法(LSC),②最小区域法(MZC),③最小外接圆法(MCC),④最大内切圆法(MIC)。四种方法都需要产生基圆,数字测量法只需把 512 个数字信号 $x(I)$, $I = 0, 1, \dots, 511$, 都加上一个常数(基圆半径),再按每一个采样点对应的角度将它们分解成正、余弦分量,简单而准确。

可以证明^[5],由于偏心造成的最大圆度误差 $(P+V)$ 值与所叠加的基圆半径有关,在 $10 < K < \text{钢球半径}/e$ 时,

$$(P+V) \approx e / [2(k+1)] \quad (10)$$

式中 e 为钢球偏心量, K 为基圆半径/ e 。从图 5 可见,如取基圆半径 =

$(30 \sim 100)e$, 就可使钢球偏心造成的测量误差减小到 2% 以下。在数字测量法中,只要有足够的字长,就可以实现。

如果在评定圆度前采用 FFT 消偏,则由于被滤除的直流分量及一次谐波的数值较大,因此数据的动态范围被大大压缩,而且消偏后圆度评定中确定圆心的工作量要少得多。所以采用 FFT 消偏可以减少评定时对存储器及运算字长的要求,并可提高测试速度。

5 测试结果分析

测试条件:车床型号 SI-235; 主轴转速 450 转/分,室温 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 钢球尺寸 $\phi 22$ mm; 钢球圆度 0.15 微米; 钢球中心距三爪卡盘端面 96 毫米。

实验一 频谱分析图 6 中零次谐波分量不影响主轴回转精度,一次分量将被剔除,2 次以上分量对主轴回转精度有影响。根据各次分量的大小便可诊断出机床造成机床主

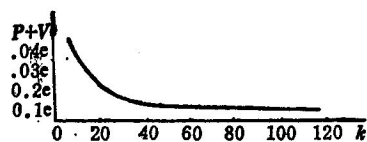


图 5 最大圆度误差与基圆大小的关系

轴回转误差运动的主要根源。

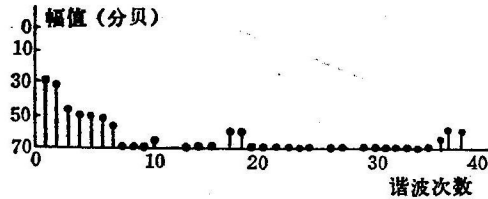


图 6 主轴回转误差信号幅频特性

实验二 消偏的作用。

表 1 圆图象最小二乘方圆法
($e \approx 0.5$ 微米, 基圆半径 $R = 56$ 微米)

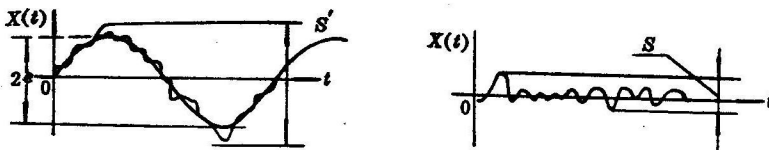
No	主轴回转误差	
	消偏	不消偏
1	0.238	0.232
2	0.235	0.236
8	0.225	0.237
平均	0.232	0.235

表 2 直角座标记录法

No	直角座标记录信号峰峰值	
	消偏 (s)	不消偏 (s')
1	0.238	0.965
2	0.235	0.943
8	0.225	0.965
平均	0.232	0.958
说明	$e \approx 0.47$ 微米	

表 1 给出了分别在消偏与不消偏的情况下用圆图象记录方式及最小二乘方圆法评定主轴回转误差的结果。实验表明：只要选取足够大的基圆半径，钢球偏心所引起的测量误差可以忽略，不需消偏。

用直角座标记录方式以误差信号峰峰值表征回转误差大小时，偏心将引起很大的测量误差。见图 7 及表 2。



(a) 未消偏 e —偏心量
(b) 已消偏 s' , s —误差信号峰峰值

图 7 直角坐标法记录的误差信号

表 2 中消偏的结果与表 1 的结果极为接近，说明 FFT 用于直角坐标消偏方法的成功，从而准确可靠地解决了传统模拟法中难以消偏的问题。

实验三 精度测试及多功能考核

表3 精度测试结果 (用最小二乘方圆法测回转误差运动值 Δ)

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Δ 微米	0.212	0.230	0.208	0.185	0.242	0.176	0.199	0.168	0.200
$\bar{\Delta}$				0.20					
σ				0.02					
工件检验结果	检验记录0.18,0.20,0.14平均工件圆度为0.17(微米)								

实验对多功能进行了考核,除能打印出频谱及主轴各转角方位上的回转误差运动值之外,还进行下述测试:

用最小二乘方圆法测10圈回转误差运动平均值:

$$\bar{\Delta} = 0.22 \text{ 微米}$$

用直角座标法测出回转误差运动峰峰值:

$$S = 0.24 \text{ 微米}$$

用最小区域法测出主轴回转误差运动值:

$$T = 0.218 \text{ 微米}$$

6 结 论

(1) 本文介绍的系统是用钢球和通用仪器(DWY-3,高级单板机)组成的积木式测试系统。组建迅速,使用方便;掌握容易;测试程序编制简单灵活,对主轴回转精度进行研究尤为方便。

(2) 系统功能较多。既能很方便地进行频谱分析,又能对高精度车床主轴回转精度进行测试。可用圆图象和直角座标两种方式进行记录和评价。还为主轴回转误差的在线检测和超精加工中的精度实时控制创造了条件。

(3) 本系统速度快,在开机几分钟内即可测出主轴回转误差,并可作图形显示和笔式记录。

(4) 本系统的测试精度高。置信概率为99%时,系统的总不确定度为 ± 0.09 微米,标准差为0.03微米。实验数字表明,系统的实际精度还要高。实测标准差小于0.013微米。曾用本系统对SI-235车床主轴回转误差进行测试,测出的平均回转误差值同在接近理想的条件下车削的零件不圆度相比,只差0.03微米。

(5) 系统还具有工作稳定可靠,通用性强等优点,适用于工厂检验,科学研究和教学实验。

(6) 在数字式测量系统中,用圆图象记录误差信号时,用算法产生基圆。由于基圆半径不受限制,只要选取足够大的基圆半径,钢球偏心所引起的测量误差可以忽略,不需消偏。

参 考 文 献

- [1] 黄长艺, 卢文祥. 机械制造中的测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [2] 谭汝谋. 主轴回转误差的测量和评定方法. 机床, 1978; (3)
- [3] T.S.R.Murthy, 评定主轴回转误差的新方法. C.I.R.P., 1978; 27(1)
- [4] 黄伯文等. 高精度车床主轴回转误差运动数字式测量法. 航天工艺, 1983; 4
- [5] 李均. 回转轴径向误差运动测量中标准球安装偏心的影响. 兵工学报, 1986; (3)

Single Camera 3-D Vision

Li Shuxiang Xu Shangping

Abstract

A simple and straightforward algorithm for single camera 3-D vision has been introduced. The approach uses both the information of the single image and the information provided by a few laser planes. The analysis of the image information creates the correspondence between the feature points of a solid in space and their image points. The structured light provides a spatial coordinate system to measure these feature points in the working space. The algorithm has been used in GKD-1 robot vision system working with a RM-501 robot.

Key words: Image, Structured light, 3-D vision

The Application of Digital Filtering in the Measurement of Spindle Rotating Accuracy

Li Jun Yin Goubao Liu Guiqiu

Abstract

The measurement of spindle rotating accuracy of machine tool is one of the important items in the field of mechanical measurement. In this paper, a digital measuring system is introduced. Here the digital filtering technique is successfully used to solve the problems which are difficult to be solved by the analog measuring method. The precision of measuring is $0.1\mu\text{m}$.

Key words: Mechanical measurement, Spindle, Machine tools