

主轴回转精度测试数据的微机处理

宋京伟 楼柏青

(机械工程系)

提 要

本文介绍了在用单向法进行主轴回转精度测试时,采用计算机辅助测试技术,由微机及软件实现产生误差圆图象、对测试数据用正弦回归法分离测量球安装偏心分量、并用单纯形优化方法求出符合最小条件法判别准则的回转轴误差运动值。由于用微机处理测试数据,使得测试装置简单,调试、操作方便,测试结果精确可靠,还便于在生产现场进行测试和处理数据。

一、问题的提出

主轴的回转精度反映了机器设备的自身工作状态,测试和分析主轴回转精度是为了研究其结构设计的合理性,评定制造质量的优劣和工作性能的好坏。在机械加工中,机床的主轴回转精度还直接关系到被加工件的加工精度及质量。通过测试和分析研究主轴的回转精度,从而寻求提高它的途径。现有测试主轴回转精度的方法很多。多数是在主轴的前端安装一个精密的测量球,利用一些测量仪器测量主轴回转时测量球的径向跳动量。其实质是属于微小位移量的动态测量。在所测得的径向跳动量中,除回转轴在敏感方向的误差运动外,还包含了测量球安装偏心和测量球本身的形状误差。为了达到分析研究回转精度的目的,则需从测得数据中消除测量球安装偏心的影响,分离出测量球的形状误差,并使之转化成相应的误差圆图象,最后还需得出符合判别准则的回转轴误差运动值。这样一来就使测试装置复杂化,而且一般在现场很难得到最后的测试结果。采用计算机辅助测试,我们利用微机与电容式位移测量仪等仪器组成测试系统(见参考资料[2]),由软件配合硬件来处理测试数据,可以达到消除测量球的安装偏心,产生基圆绘出误差圆图象,计算出回转轴误差运动值等目的,而且测试系统简单,数据处理精确可靠,并可实现在线测试。下面介绍微机处理数据的原理及方法。

二、测量球安装偏心误差的消除

在主轴回转精度测试方法中,最有吸引力的是单向法测量,它安装方便,可进行非接触

本文于1987年9月8日收到

式主动测量。然而单向法中存在着测量球的安装偏心误差,为此常采用以下几种方法消除偏心误差:

- (1) 用另外一个偏心调整装置来补偿测量球的安装偏心量;
- (2) 将误差信号与从装在主轴上的同步分解器输出的正弦波相减,抵消偏心误差;
- (3) 用电子定心圆线路去补偿所有与主轴旋转具有相同周期的谐波分量;
- (4) 采用带阻滤波器,将与主轴回转频率一致的基波成分滤掉;
- (5) 将误差信号进行FFT变换,剔除与主轴回转频率一致的频率,然后再进行IFT变换。

这些方法中的第(1)种在每次测量时都要做比较复杂的调整,要达到所要求的调整精度比较困难。后三种方法有一个共同的特点是在消除残余偏心误差时,把回转轴径向误差中的一次频率分量也在一起剔除掉了,从而造成新的误差,上述方法还都存在操作要求高,仪器制作复杂,第(3)、(4)种方法对主轴的转速范围有一定的使用区间。

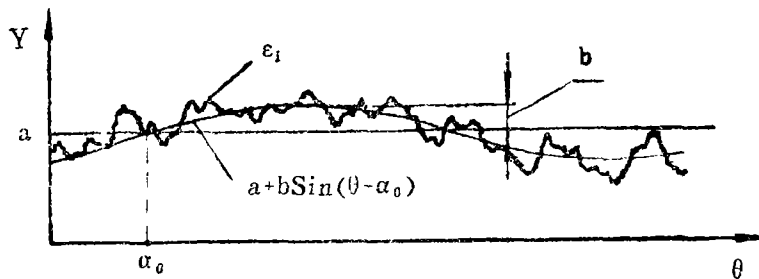
鉴于上述情况,用正弦回归方法分离偏心量,达到消除偏心误差的目的则有它的优点:

- (1) 不需增添专用仪器;
- (2) 可用计算机直接处理,没有操作要求;
- (3) 基本上保留了主轴本身回转误差中的一次分量。(因该分量是随机的,一般不会每转都与偏心量保持同相位)。具体的原理和方法如下。

由于偏心量 e 的存在,位移传感器测得的信号 Y_i 由三部分组成:

$$Y_i = e \sin \theta_i + r(\theta_i) + S(\theta_i) \quad (i=1, \dots, n) \quad (1)$$

第一项为偏心误差,第二项为钢球形状误差,第三项为主轴回转误差,第二、三项可认为它是随机误差。因此传感器测得的信号为一具有正弦趋势的随机误差信号(参见图一)。



图一 传感器测得的信号曲线

可以将(1)式改写为:

$$Y_i = a + b \sin(\theta_i + \alpha_0) + \varepsilon_i \quad (i=1, \dots, n) \quad (2)$$

式中: a ——直流分量; b ——对应 e ; α_0 ——初始相位角; ε_i ——包含钢球形状误差与回转轴误差运动的随机变量。

如果由样本(即所测得的 Y_i 值)得到式中的 a 、 b 和 α_0 的估计值 $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$ 和 $\hat{\alpha}_0$,则对于给定的 θ , $a + b \sin(\theta + \alpha_0)$ 的估计为 $\hat{a} + \hat{b} \sin(\theta + \hat{\alpha}_0)$ 记作 $\hat{Y}$ 。而方程

$$\hat{Y}_i = \hat{a} + \hat{b} \sin(\theta_i + \hat{\alpha}_0) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

称为 Y_i 对 $\sin(\theta_i + \alpha_0)$ 的正弦回归方程。

作函数

$$Q = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n [Y_i - \hat{a} - \hat{b} \sin(\theta_i + \hat{\alpha}_0)]^2 \quad (4)$$

由最小二乘原理, 令

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial b} = 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial \alpha_0} = 0$$

解上述方程组, 最后可得到计算 a 、 b 和 α_0 的估计值的公式:

$$\begin{cases} \hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \\ \hat{\alpha}_0 = \arctg \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^n Y_i \cos \theta_i} \\ \hat{b} = \frac{2 \sum_{i=1}^n Y_i \sin(\theta_i + \hat{\alpha}_0)}{n} \end{cases} \quad (5)$$

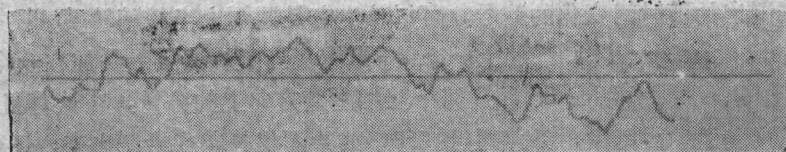
对于正弦回归, $\hat{b}$ 为偏心量 e 的估计值, $\hat{\alpha}_0$ 为初始相位角的估计值, $\hat{a}$ 为直流分量的估计值。根据式(2)得到包含主轴回转误差和 $r(\theta_i)$ 的 ε_i :

$$\varepsilon_i = Y_i - \hat{a} - \hat{b} \sin(\theta_i + \hat{\alpha}_0) \quad (6)$$

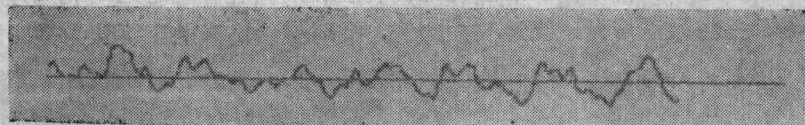
根据上述原理, 可将位移传感器所测得的模拟信号送到计算机, 经A/D转换, 成为离散的数字信号, 每一个数字信号就是一个相应的 Y_i , 由它们求出与各个 Y_i 对应的回归方程值, 然后由式(6)将每个 Y_i 减去对应的回归方程值, 得到的就是已基本消除了偏心量但仍包含 $r(\theta_i)$ 的主轴回转误差运动信号。这里偏心量估计值的方差估计值为:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - 2} \quad (7)$$

图二(a)是消偏前一转的回转误差运动曲线, 可以看出它存在着一个一次的正弦分量(初相角不为零), 即偏心量引起的误差。图二(b)是经消偏后的同一条曲线, 从图中可以看出此时该一次分量已基本消除了, 达到了消偏的目的。消偏工作是通过程序由计算机完成的。



(a) 消偏前



(b) 消偏后

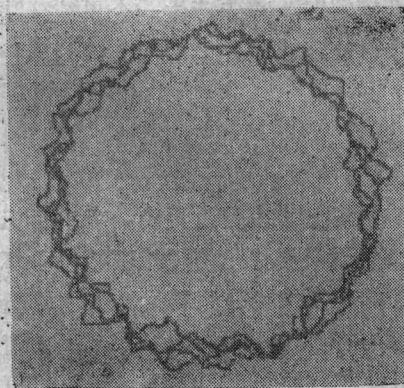
图二消偏前、后的曲线

对于钢球的形状误差 $r(\theta_i)$ 可利用反转法〔1〕测量,将测得的两组数据通过计算机处理很容易分离出钢球的形状误差,此处则不作详细介绍。在实际处理时,先消除偏心误差,然后再消除形状误差。

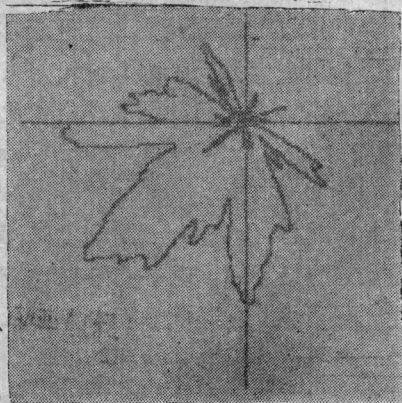
三、误差圆图象的产生

在主轴回转精度测试中,广泛采用两种方法记录误差运动;一是圆图象(极坐标系统)记录,二是采用时基记录(直角坐标系)。采用时基记录使用的仪器简单,只用一套位移测量仪器和普通记录仪(如磁带记录仪或光线示波器)便可进行测量和记录,磁带记录仪记录时还便于送入数据处理仪器中进行处理分析,比较适用于找出设计制造因素和回转精度的关系。采用圆图象形式记录比较适用于研究回转精度和加工精度、质量的关系,其图象直观,可代表理想条件下加工出工件的圆度廓形,并可予测机床在理想条件下能加工出的最好圆度和粗糙度,因此目前主张采用圆图象形式记录。但它所需的仪器和数据处理都比较复杂,例如除了位移测量仪外,还需有产生基圆的装置和拍照装置,现场使用很不方便。

为了解决圆图象形式记录的缺点,可以在进行数据记录时采用时基记录,在数据处理和圆图象显示时利用计算机软件产生基圆,得到与圆图象形式记录同样的效果。具体做法如下。



图三 误差圆图象(四圈)



图四 轴心运动轨迹(1转)

对位移传感器测出的随时间变化的信号,可以认为它是圆周上半径随转角的变化,即 $r(t_i)$ 对应 $r(\theta_i)$,给每个 $r(t_i)$ 都加上一个常量 R 就相当于测试信号叠加在一个半径为 R 的基圆上,再将 $r(t_i) + R$ 分解成 X 、 Y 这两个互相垂直方向上的分量,在计算机屏幕上作图就得到了主轴误差运动圆图象,并可通过打印机或绘图仪打印或绘制出来,还可根据需要得到不同转数的圆图象(见图三)。有时需对回转机械的回转轴轴心运动轨迹进行分析研究,如果令 $R = 0$,并将误差信号适当地放大比例,此时描绘出来的则可认为是回转轴轴心的运动轨迹(见图四)。

四 主轴回转误差的评定

主轴回转误差的评定是主轴回转精度测试中的一个关键问题,一般都是对误差圆图象进行圆度评定,常用的评定方法有下列四种:

1、最小外接圆法(MCC); 2最大内接圆法(MIC); 3最小二乘圆法(LSC) 4最小条件法(MRC)。之所以存在着不同的评定方法,是因为从不同的使用功能角度进行考虑的缘故。对于同一个被测对象的测量数据,用不同的方法进行评定时,一般会得到不同的结果,其中用最小条件法评定时,所得到结果的数值为最小,且是唯一的。所以当需要对某一被测件的测量结果进行仲裁时,ISO和我国国家标准规定,要按最小条件法评定的误差值作为仲裁的依据。

最小条件法(又称最小半径差法)评定圆度误差是指:包括实际圆轮廓,且半径差为最小的两同心圆间的距离,它就是最小条件法的圆度误差值。

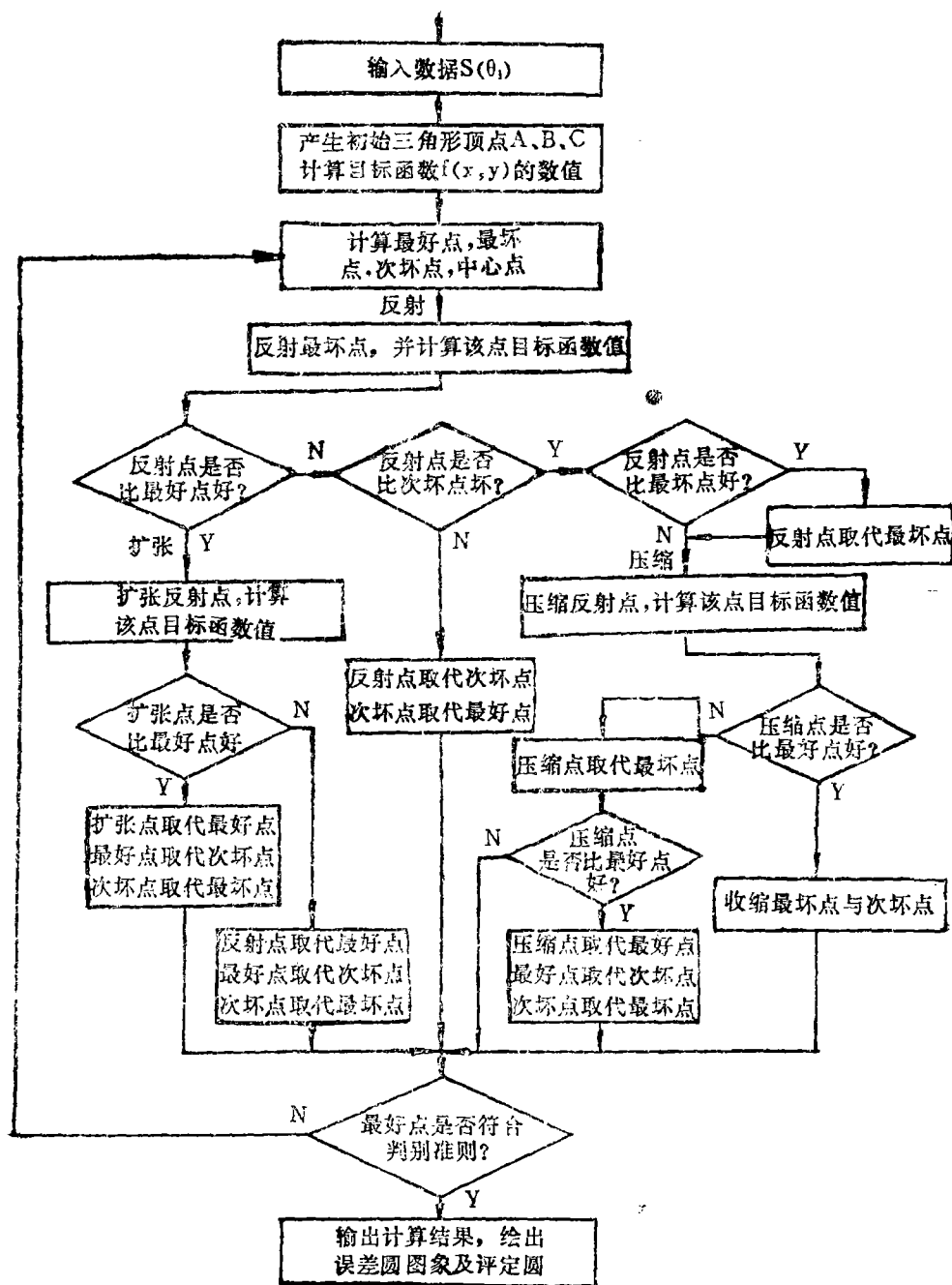
最小条件法的判别准则是指两同心圆包容被测实际圆轮廓时,至少有四个实测点内外相间地在两个圆周上,即有两个等值最大值和最小值,且交替出现。评定时应使结果符合判别准则。

用最小条件法确定圆度误差时,主要是确定两个同心包容圆的圆心位置,而这个位置没有公式可以直接求出,过去一般用试凑法,即用一个透明的同心圆模板进行试凑,这样很难得到准确的结果,而且结果因人而异。

采用优化的方法,把求该圆心坐标及对应的圆度值问题归结为二维优化问题,利用计算机可以自动地搜索寻优,求得符合判别准则的圆度评定结果,我们采用的是优化方法中的单纯形法。(单纯形法的原理及方法详见[4])在求解时,首先产生一个单纯形法中的初始三角形,其三个顶点作为三个圆心位置,以这三个圆心各自得到的两同心圆的半径差作为优化的目标函数 $f(x,y)$,对目标函数进行优化即:

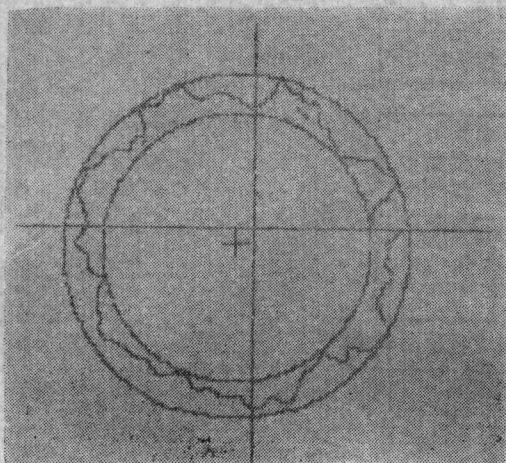
$$\min f(x,y) = \max R_i - \min R_i \quad (8)$$
$$1 \leq i \leq n \quad 1 \leq i \leq n$$

R_i 为所求得圆心 (x,y) 到被测实际圆轮廓的距离。在求解过程中,求出目标函数在这三点哪一点最好(最小),哪一点最坏(最大)。然后根据优化的规律不断舍去坏点,产生新点,反复进行寻优。在寻优过程中把最小条件法的判别准则作为寻优结束的检验依据,最终可以得到一个符合判别准则的圆心位置。由该圆心得到的两同心包容圆半径差值,就是主轴回转误差运动值(圆度值)。实现上述步骤的计算机程序框图见图五,计算机可以对测试数据进行处理,图六是得到的处理结果与图形。从图形和结果来看,它是符合判别准则的。



图五 单纯形法求符合最小条件的圆度误差程序框图

如果程序中目标函数及判别准则不同,则同样可用最小外接圆法和最大内接圆法进行评定。



THIS IS MRC
MACHINE TYPE: CA6140
PIVOT SPEEDTION: 1120 rpm
PIVOT ERROR: 2.9255384 μm

图六 最小条件法评定结果(一转)

五 小 结

- 1 利用正弦回归法分离测量球安装偏心误差,可以达到消除测量球安装偏心影响的目的。
- 2 用软件产生基圆可将时基记录形式的误差运动信号转换成圆图象来表示,并可以轴心运动轨迹的形式表现出来,使时基记录形式具有圆图象记录形式的同样优点。
- 3 通过计算机用单纯形优化方法可以准确地得到符合最小条件法判别准则的主轴回转误差运动值。
- 4 利用微机辅助主轴回转精度测试,使测试仪器装置简化,调整及操作方便,数据处理精确、可靠灵活,便于在生产现场进行测试和数据处理,并可实现在线测试。

参 考 文 献

- 〔1〕 谭汝谋 主轴回转误差的测量和评定方法 《机床》1978年3期
- 〔2〕 宋京伟、楼柏青、刘庆江 机床主轴回转精度APPIE—Ⅱ微机测试系统 《华东交通大学学报》1987年1期
- 〔3〕 于向光 利用正弦回归方法分离偏心误差 《形位误差测量技术专辑》(中集)1985年
- 〔4〕 俞长高、蒋锡藩 《机械制造中的计算机辅助设计》 机械工业出版社