精密主轴回转精度的动态测试

俞　洋
(中国科学院长春光学精密机械研究所，长春130022)

摘要　本文应用曲线拟合法对测量信号进行拟合，识别并保留了一次误差运动，正确消除了测量球的偏心，从而得到包含一次误差运动在内完整的误差运动。并用LSC中心进行误差评定。编制了操作简便、容易掌握的实用软件。

关键词：一次误差运动；偏心；曲线拟合；LSC中心；软件

1　前　　言

主轴回转精度的动态测试技术，是几年来工程技术上的重要课题之一。采用测试的方法，基本上是对置于主轴测端的精密测量钢球拾取测量信号，然后对测量信号进行数据处理，对误差作出误定。由于测量球安装时存在的偏心，使测量信号中必然混有偏心成分。现行消除偏心的方法在测除偏心的同时，也将主轴误差运动中与转速同频的一次误差运动同时消去，这势必会影响测试的精度，本文采用了曲线拟合的方法识别并分离了偏心运动与一次误差运动，提高了测试的精度，并编制了相应的实用软件。

2　测试系统结构

本文采用双向测试法对主轴的回转精度进行动态测试，系统结构如图：

即在主轴轴端安装高精度测试钢球，在测量球互相垂直的方向上安装有两个非接触的电容传感器，以拾取x、y两路信号。当主轴旋转时，二个传感器拾取位移信号并传送至电容测微仪，测微仪将信号经放大后以电压形式送入A/D转换板(A/D板插在微机扩展槽中)，A/D板把输入的模拟信号采样量化，放入内存并同时存入软盘中，运

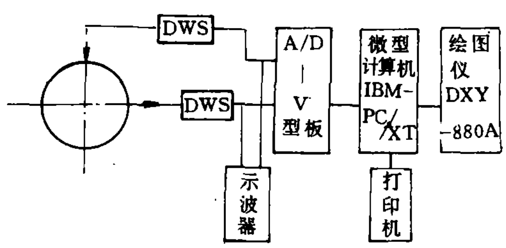

图1　测试系统结构图

收稿日期：1993年11月20日；注：本文作者的导师为郭德申

行编制好的软件进行数据处理，对误差作出评定，并绘出各种图形。最后在绘图仪上输出结果和图形。

3 数据处理

对主轴的回转误差值作出评定，首先需从测量信号中消除偏心，消除偏心原理如下：

为了消除偏心，首先需从测量信号中拾取与转速同频的成分即基波，其中含有偏心与一次误差运动。

我们以 y 方向为例，阐述分离基波分量的原理。

测量信号 $y(t)$ 等于 y 方向上的偏心分量 $\delta_{ey}(t)$ 和主轴误差运动径向误差分量 $\delta_{Y}(t)$ 之和表示为：

$$y(t) = \delta_{ey}(t) + \delta_{y}(t) \tag{1}$$

由于偏心部分与主轴转速同频。其运动形式为圆运动，设

$$\delta_{ey}(t) = e\cos(\omega t + \lambda)$$

$\delta_{y}(t)$ 等于误差运动的一次分量 $\delta_{fy}(t)$ 和非一次径向误差分量 $\delta_{oy}(t)$ 之和，即：

$$\delta_{y}(t) = \delta_{fy}(t) + \delta_{oy}(t)$$

则(1)式可表示为

$$y(t) = e\cos(\omega t + \lambda) + \delta_{fy}(t) + \delta_{oy}(t) \tag{2}$$

而一次径向误差运动 $\delta_{fy}(t)$ 与偏心运动频率相同，其和应为简谐运动。则式(2)可表示为：

$$y(t) = a\cos(\omega t + \beta) + \delta_{oy}(t)$$

$\delta_{oy}(t)$ 可看作迭加在 $a\cos(\omega+\beta)$ 上的误差。应用曲线拟合法可找到 $y(t)$ 的一个拟合函数 $\hat{y}(t)$。

根据最小二乘原理，应使 $y(t)$ 与 $\hat{y}(t)$。的残差的平均平方和为最小；即

$$Q = \min\{\overline{\sum_{i=1}^{N}[y(t) - \hat{y}(t)]^2}\}$$

代入 $y(t)$、$\hat{y}(t)$

$$Q = D\{[a\cos(\omega t + \beta) + \delta_{oy}(t) - a\cos(\hat{\omega}t + \hat{\beta})]\}$$
$$= D\{a\cos(\omega t + \beta) - \hat{a}\cos(\hat{\omega}t + \hat{\beta}) + \delta_{oy}(t)\}$$

$a\cos(\omega t+\beta) - \hat{a}\cos(\hat{\omega}t+\hat{\beta})$ 与 $\delta_{oy}(t)$ 是相互独立的

则：

$$Q = D[a\cos(\omega t + \beta) - \hat{a}\cos(\hat{\omega}t + \hat{\beta})] + D[\delta_{oy}(t)]$$

为便 Q 取得最小值，需使 $\hat{a}=a$、$\hat{\omega}=\omega$、$\hat{\beta}=\beta$ 则：

$$D[a\cos(\omega t + \beta) - \hat{a}\cos(\hat{\omega}t + \hat{\beta})] = 0$$

$Q=D[\delta_{oy}(t)]$ 取得最小值

因此，拟合函数为：

$$\hat{y}(t) = a\cos(\omega t + \beta)$$

$\hat{y}(t)$ 即为基波。为偏心运动与一次误差运动之和。这样，通过曲线拟合法即可将基波分量从测量信号 $\hat{y}(t)$ 中分离出来。同理出可以得到 x 方向上的基波分量

$$\hat{x}(t) = b\cos(\omega t + \alpha)$$

为了达到分离出偏心运动而保留轴线误差运动中的一次频率成分，需要进一步对基波进行分离。

由曲线拟合法得到 x、y 方向上的基波信号

$$\begin{cases} x(t) = C\cos(\omega t + \alpha) \\ y(t) = D\cos(\omega t + \beta) \end{cases} \tag{3}$$

显然方程为一个椭圆方程，其长轴与 x 轴夹角为 η，且

$$\mathrm{tg}2\eta = \frac{2CD\cos(\alpha - \beta)}{C^2 - D^2}$$

将从坐标系 xoy 旋转 η，则在新坐标系 $x'oy'$ 中

$$\begin{cases} x'(t) = D'\cos(\omega t + \xi) \\ y'(t) = D'\cos(\omega t + \xi) \end{cases} \tag{4}$$

其中：

$$C' = \sqrt{\frac{1}{2}(C^2 + D^2) + \frac{1}{2}\sqrt{(C^2 + D^2)^2 - 4C^2D^2\sin^2(\alpha - \beta)}}$$

$$D' = \sqrt{\frac{1}{2}(C^2 + D^2) - \frac{1}{2}\sqrt{(C^2 + D^2)^2 - 4C^2D^2\sin^2(\alpha - \beta)}}$$

$$\mathrm{tg}\xi = \frac{C\sin\alpha\cos\eta + D\sin\beta\sin\eta}{C\cos\alpha\cos\eta + D\cos\beta\sin\eta}$$

式(4)可分解为二部分，一部分为频率为 ω 的匀速圆周运动，第二部分为 x' 方向上的简谐运动，频率为 ω，幅值为 $C' - D'$。

即：

$$\begin{cases} x'(t) = x'_1(t) + x'_2(t) \\ y'(t) = y'_1(t) + y'_2(t) \end{cases} \tag{5}$$

其中：

$$\begin{cases} x'(t) = D'\cos(\omega t + \zeta) \\ y'_1(t) = D'\cos(\omega t + \zeta) \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} x'_2(t) = (C' - D')\cos(\omega t + \zeta) \\ y'_2(t) = 0 \end{cases} \tag{7}$$

而偏心运动与一次径向误差运动为频率为 ω 的匀速圆周运动。而一次误差直接运动为固定方向的简谐运动。可以认为基波中第一部分式(6)即为一次误差圆运动与偏心运动之和。第二部分式(7)即为一次误差直线运动。一次误差圆运动对加工或误差评定都是毫无影响的。可以和偏心一同加以消除。这样就把偏心运动与一次误差运动(一次误差直线运动)分离出来。

最后采用最小二乘圆中心对总误差圆周图像进行评定，最小二乘圆中心及半径由以下公式求得：

$$x_1 = \frac{2}{n}\sum_{i=1}^{n} r_i\cos\theta_i$$

$$y_1 = \frac{2}{n}\sum_{i=1}^{n} r_i\sin\theta_i$$

$$R_L = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} r_i$$

主轴的径向误差 $\Delta = R_{max} - R_{min}$

R_{max}、R_{min}为与最小二乘圆同心的最大、最小包络圆半均值。

4 软件编制

编制主轴误差数据处理程序是进行主轴误差运动测试的关键部分。在软件编制中，采用了下拉式菜单设计，操作非常简明方便，容易掌握，具有很好的用户界面。其具体功能结构如图2所示

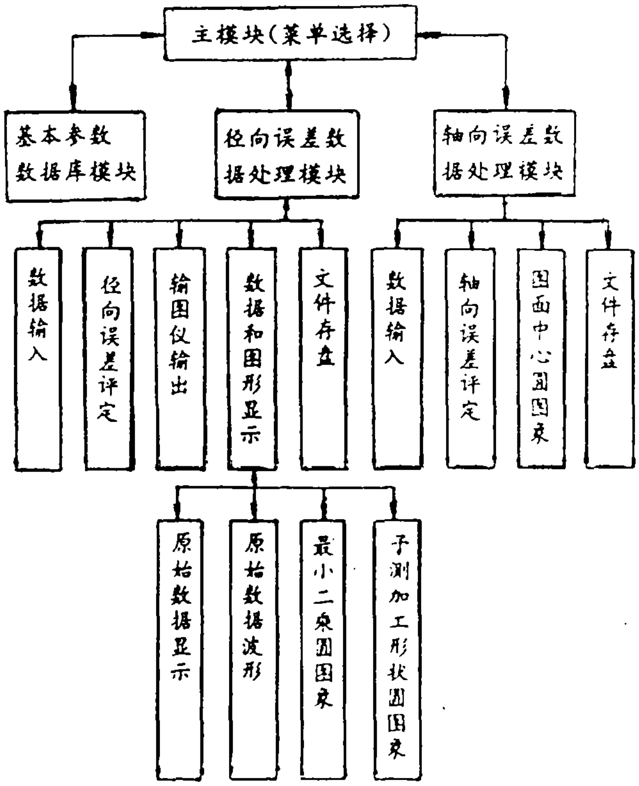

图2

5 结　束　语

本文应用曲线拟合法将偏心运动与一次误差运动分离出来，克服了目前测试方法的缺陷，提高了测试的精度。并编制了相应的实用软件。应用本测试方法对一气浮轴系进行了测试了，结果是正确的。

参 考 文 献

〔1〕刘延山、丘妙贤、周振泉，旋转轴线误差运动的测量和分析．江苏工学院学报，1984．1
〔2〕黄道荼，轴导回转误差运动的处理．教学与科研，1986
〔3〕谭汝谋，轴导回转误差测量与评定方法．机床，1978，3
〔4〕毛英泰主编，《误差理论与精度分析》．国防工业出版社

Dynamic Measuring of Axis Rotating Accuracy

Yu Yang

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

In this paper, the curve — fitting method is used for fitting the measuring signal distinguishes and retains the first harmonic component, eliminates correctly the eccentricity of sphere, thus obtains the complete spindle error motion included the first harmonic component, and evaluates the error of spindle rotation with the center of LSC, and opens up a useful computer software which is easy to be operated and known well.

Key words: First harmonic copmonent, Eccentricity, Curve fitting, Center of LSC. Software