双盘式渐开线测量装置误差的计算机补偿方法

佟晓冬　王立鼎

摘要：以双盘式渐开线测量装置为研究对象，研究了对此装置的微机误差补偿方法。从众多的误差源中选出最大的三种误差进行补偿，使装置不确定度由原来的≤±0.7μm下降到≤±0.5μm。

一、前　　言

双盘式渐开线测量装置是用来测量GB6467—86中的1等精度渐开线样板及GB10095—88中的1～2级精度标准齿轮的齿形误差的装置。此装置若用高精度元部件组合起来，系统量值的不确定度 ≤±0.7μm(3σ)。该测量装置的精度虽已超过国内外同类商品仪器，但对于上述被测物来说，仍显得精度不足。为此，我们必须探讨进一步提高装置测量精度的办法。我们不能设想无休止的提高装置元器件的制造精度，因为那样会大大提高制造成本，甚至由于制件精度达到极限，装置的测量精度仍满足不了要求。为了在现有条件基础上进一步提高装置的精度，我们采用了误差补偿技术，随着电子技术及计算机技术的发展，利用微计算机进行误差补偿的技术已在世界各地蓬勃发展。如美国布朗夏普公司对其生产的900mm×700mm×500mm三坐标测量机的空间误差进行补偿，使该机误差值由 ±40μm 降至 ±4μm；日本东京大学通过对加工中心机床的误差补偿，使其加工误差降为原来的1/3左右；华中理工大学对精密丝杠磨床传动链进行了补偿，使加工丝杠的周期误差由4μm降低到了0.5μm，累积误差从6μm/100μm减小至0.8μm/100mm。目前，在双盘式渐开线检查仪上进行微机误差补偿尚未见到先例。

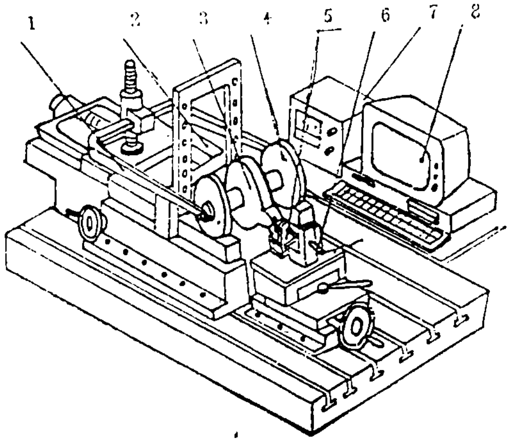
本文介绍一种较实用的微机误差补偿方法。这种方法，用微型计算机可靠地补偿了渐开线测量装置几个组成元部件的误差。这不仅大大提高了装置精度，有效地降低了装置成本，而且还适当地扩大了一对基圆盘的使用范围，使它能够测量相近基圆尺寸的齿轮与样板。

二、装置的工作原理及精度分析

1. 工作原理

如图1所示，两基圆盘与被测齿轮装在同一根心轴上，驱动架带动此轴与基圆盘在导尺上既平动又滚动。测头安装在平行片簧测量架上，并与导尺处在同一水平面上。测量时，测量架固定不动。根据渐开线形成原理，当基圆盘沿平面导轨作纯滚动时，测头就相对于齿轮走出一条理论渐开线轨迹。测头在一定压力下与被测齿面接触，当齿形有误差时，测头就相对于导轨产生纵向位移，其位移量即是这点的齿形误差。此误差由电感测微仪传递到计算机进行误差数据采集，然后根据装置上元部件的实测误差，以人机对话方式输入误差补偿参

数，并传递给误差补偿数学模型，进行逐点误差值补偿，最后处理出各项误差值，与绘图仪通讯画出误差曲线与各项误差值等。



1-驱动架；2-导轨；3-被测齿轮；4-基圆盘；5-测量架；6-传感器；7-电感测微仪；8-微机

图 1　双盘式渐开线测量装置

2．误差分析

双盘式渐开线测量装置的误差源，由四部分组成。第一部分为，影响形成理论渐开线的误差因素；第二部分为，使实际渐开线齿廓产生误差因素；第三部分为，传感测量系统误差；第四部分为，环境及可靠性误差。这四部分包括十七项误差。其中，起主导作用的有：(*a*) 基圆盘直径误差；(*b*) 基圆盘综合偏心误差；(*c*) 心轴上几个工作轴颈不同轴误差；(*d*) 测头相对导尺安装误差；(*e*) 基圆盘滚动中的"弹性蠕滑"误差[3]；(*f*) 齿轮安装偏心误差。以上六项误差占总误差的70%，如果补偿测量装置的误差从这项入手，就能收到十分显著的效果。

三、用微机补偿测量装置误差的方法

1．确定误差补偿对象

从上述误差分析中得知，有六项误差较大，我们从中选出三项最大的误差用计算机补偿：(*a*) 基圆盘直径尺寸误差；(*b*) 基圆盘综合偏心误差；(*c*) "弹性蠕滑"误差。

2．误差补偿函数的存贮方式

误差补偿函数的存贮方式有两种。

(1) 列表法

将需要补偿元件的实测误差数据点根据实测误差曲线确定的补偿值，列成误差补偿表〔或矩阵〕存入微机。误差补偿时，若补偿元件的实际变量〔尺寸、几何中心位置坐标、偏心量等〕与误差补偿表中某一数据点〔或补偿点〕相同，则通过查表取出该点的误差矢量进行误差补偿；否则，采用内插值计算误差补偿矢量进行补偿。

(2) 函数法

通过理论分析或实测误差数据建立误差数学模型，将误差函数表达式存入微机。微机根据仪器运行的实际变量，由误差函数式实时求出其误差补偿矢量进行误差补偿。

从我们确立的三个误差补偿项目上看，采用函数法补偿误差较为合适。基圆直径尺寸误差、基圆综合偏心误差、"弹性蠕滑"误差都可以通过一些数学手段建立误差数学模型，然后利用软件来实现补偿。

3．误差曲线拟合

对于测量渐开线样板及渐开线凸轮这类比较长的渐开线，而且类型较固定，我们采用三次样条函数进行基圆盘综合误差拟合，然后按求出的分段方程式插值计算各补偿点的误差补偿值。

过去常用的最小二乘法以及线性函数和拉格朗日多项式函数等，皆不适用于误差补偿，而样条函数符合实际情况，是误差补偿较佳的插值函数。三次样条函数拟合法与其他两线拟

合相比，其特点是样条函数不仅能严格通过已知的误差离散点，而且拟合的误差曲线在各点数连续、光滑，与实际误差，变化规律更为接近。但三次样条拟合的数据处理极其繁杂，必须通过计算机进行数据处理，才能实际应用于精密仪器的误差补偿。

四、误差补偿中单项误差数学模型的建立

（一）补偿基圆直径误差的数学模型

两基圆盘直径尺寸的制造不准确会影响齿形测量，使之产生一个齿形角误差。传递到齿形的作用误差为：

$$\Delta L_1 = 1/4\ (\Delta D_1 + \Delta D_2)\ \phi\ (\mu m)$$

误差补偿时按此函数式计算出相应点的误差补偿值代入测量的齿形误差中进行处理。

式中，ΔD_1——基圆盘 1 的直径误差；

ΔD_2——基圆盘 2 的直径误差；

ϕ——展开角。

（二）、补偿两基圆盘偏心误差的数学模型

由于两基圆盘有偏心误差，使之在测量点处产生的作用误差为：

$$\Delta L_2 = 1/2\{e_1[\cos(\phi_0 + (n-1)\psi + \phi_2) - \cos(\phi_0 + (n-1)\psi + \phi_1)] + e_2[\cos(\theta + \phi_0 + (n-1)\psi + \phi_2) - \cos(\phi_0 + \theta + (n-1)\psi + \phi_1)]\}$$

式中，e_1、e_2——两基圆盘的偏心量；

θ——两基圆盘偏心误差的相位差；

ψ——一个周节对应的齿距角；

ϕ_0——基圆盘 1 的初相角；

$\phi_2\phi_1$、——基圆盘上一齿的起始与终止展开角；

n——测量第几个齿的齿序号。

按上式输入相应参数能得到各补偿点的误差补偿值，两基圆盘的相位关系如图 2 所示。

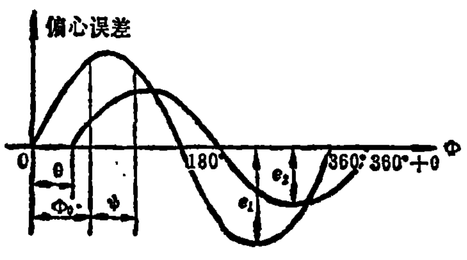


图 2 两基圆盘相位关系图

（三）、补偿“弹性蠕滑”产生的误差

两基圆盘在直线导尺上滚动时，基圆盘与导尺接触区内的弹性应变，将引起基圆盘相对导尺的微观“弹性蠕滑”。弹性蠕滑量为：

$$\Delta L_3 = (2\mu/3\pi r_b)[8pr_b(1-\nu^2)/\pi BE]^{1/2}s$$

式中，μ——滑动摩擦系数；

s——基圆展开弧长(m)；

p——基圆盘与导尺间压力（N）；

E——材料的弹性模量（N/m^2）；

r_b——基圆盘半径（m）；

ν——材料的泊松比；

B——盘的厚度；

ΔL_3——“弹性蠕滑”的作用误差。

（四）、补偿多项误差的数学模型

$$F_f = F_f' \pm \Delta L_1 \pm \Delta L_2 \pm \Delta L_3$$

式中，F_f——补偿后的齿形误差；

F_f'——没补偿的齿形误差。

（五）三次样条函数插值补偿法

上述的单项补偿模型是把各误差分离，按照比较理想的误差规律进行补偿，然后再综合起来；但实际情况千差万别，有些误差不好分离参杂在一起，实际测出的误差值与理论值有些差异。要想更精确的补偿误差，我们用三次样条函数建立误差补偿模型，更能接近真实误差曲线。

1．三次样条函数的建立

用专用的高精度仪器组成测试系统，测量出两基圆盘的偏心和不圆度的综合误差，计算两相邻点间的角度差值，根据端点条件求出方程中参数，并代入相应的表达式，求出三次样条表达式的系数；把得出的系数和角度差值代入三次样条表达式，分段求出三次样条函数。在每一段中再进行插值求出每个误差点的补偿值，代入测量的齿形误差进行补偿。按照上面步骤，用 BASIC 语言编制程序解出方程组，并绘制出综合误差曲线。

2．绘制的基圆盘偏心和不圆度综合误差曲线

以ϕ 118.401 基圆直径的基圆盘为例，把测试的综合误差离散点的值输给计算机进行曲线拟合，得到如图 3 所示曲线。其中，$KK=1$是一阶导数为零；$N_1=36$是测量 36 个点；$Z_1=5$是每小段内插入 5 个点作曲线。

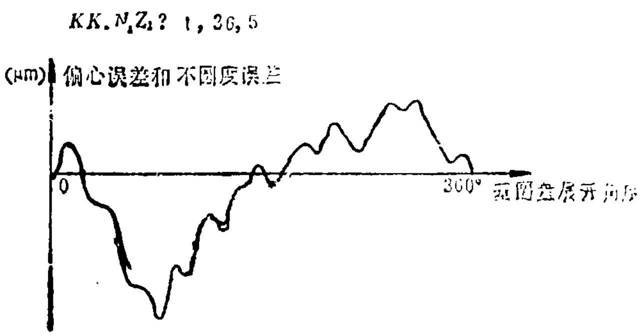


图 3 基圆盘偏心和不圆度综合误差曲线

3．偏心与不圆度误差产生的作用误差

$$L_{22} = \int_{\phi_2}^{\phi_1} P(\phi)\, d\phi$$

式中，$P(\phi)$——两基圆综合偏心的三次样条函数。

五、误差补偿后测量装置的不确定度

误差补偿后装置的测量精度主要取决于已经补偿的误差项目的残余误差和未修正的误差值的综合。我们以模数3.5、齿数36、压力角为20°的标准齿轮齿形测量为例，计算一下补偿前后的误差值，从而得出补偿前后装置的不确定度。

1，基圆盘直径尺寸误差

$$\Delta L_1 = \frac{1}{4}[\Delta D_1(\phi_2 - \phi_1) + \Delta D_2(\phi_4 - \phi_3)]$$

补偿前：$\Delta D_1 = 2.5\mu m$; $\Delta D_2 = 2.0\mu m$; $r_b = 59.2mm$; $\phi_s = 18°$　$\Delta L_1 = 0.353\mu m$

补偿后的残余误差：$\Delta D_1 = 0.8\mu m$

$\Delta D_2 = 0.8\mu m$

$\Delta L_1 = 0.126\mu m$

2. 基圆综合偏心误差

$$\Delta L_2 = \frac{1}{2}[e_1(\cos\phi_2 - \cos\phi_1) + e_2(\cos\phi_4 - \cos\phi_3)]$$

补偿前：$e_1 = 2\mu m$; $e_2 = 2\mu m$; $\phi_1 = 30°$; $\phi_2 = 45°$; $\phi_3 = 0°$; $\phi_4 = 18°$

$\Delta L_2 = 0.294\mu m$

补偿后的残余误差：

$e_1 = 0.5\mu m$

$e_2 = 0.5\mu m$

$\Delta L_2 = 0.06125\ \mu m$

3. "弹性蠕滑"误差

按道理说，如果公式的各参数给定值都是绝对准确，就没有残余误差了，但实际上公式中的接触宽度、摩擦系数等都是一个有误差的量，所以经过分析将有 $\Delta L_3 = 0.07\mu m$ 的残余误差。

按照公式：不确定度 $= \pm\sqrt{\sum_{i=1}^{17}\Delta L_i^2}$ 进行合成[4]，得出没补偿时装置的不确定度为 $\pm 0.7\mu m$；补偿后为 $\leq \pm 0.5\mu m$。能满足测量 1 级精度齿轮与 1 等精度样板的渐开线。

六、小结

1. 用微机软件，可以补偿测量装置中部件由于制造、安装等原因引起的系统误差，从而使测量系统的不确定度大幅度地下降。

2. 通过基圆盘尺寸的补偿软件，可使一对固定尺寸的基圆盘能够测量相近基圆尺寸的齿轮和样板。

3. 采用误差补偿技术，可以降低高精度元器件的加工精度，从而能够降低制造费用。

参考文献

〔1〕费业泰；仪器仪表学报，6 No.3，1985年

〔2〕李岳生，齐生旭；《样条函数方法》，科学出版社，1979年

〔3〕解燚烽、王立鼎；计量技术，1990年第5期

〔4〕王立博；硕士学位论文，长春光机所，1990年

Computer Compensation Errors Method for the Double-disk Involute Measurement Instrument

Tong Xiaodong　Wang Liding

Abstract

This paper studied the double-disk involute measure-

ment instrument and the computer compensation method for measuring errors, in which three sources of error is selected among many error sources for compensation. The uncertainty of the instrument is better ($\leqslant \pm 0.5\mu m$) than that used before ($\leqslant \pm 0.7\mu m$).