DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2015.04.003

# 大距离孔系同轴度测量装置专用校准系统研究\*

龚 醒,赵转萍\*,王 波

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**针对大距离孔系同轴度测量装置精度校准的问题,对同轴度误差来源、多孔系工件同轴度测量方法、误差计算模型方面进行 了研究,对孔系同轴度测量装置校准系统的原理与组成进行了归纳,建立了校准系统的结构与控制模型,提出了一种专用校准方法, 通过提供一组轴线位置变动量已知的标准孔系模拟装置,将同轴度测量装置测得值与标准值相比较,以此得出了被校准装置的测量 误差。该校准系统由自行设计的三维精密运动平台与标准环规组成,采用光栅尺作为系统定位元件,采用TMS320F2812作为系统的 主控芯片,并提出了基于最小二乘原理的同轴度最小区域算法。研究结果表明:该校准系统分辨率达到1μm,系统不确定度达到 8.12μm,能够快速、有效地校准大距离孔系同轴度测量装置的精度误差。

关键词:校准;同轴度;精密运动平台;最小区域法 中图分类号:TH7;TP23 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)04-0453-06

## Calibration system of coaxiality measurement device about big distance of porous parts

GONG Xing, ZHAO Zhuan-ping, WANG Bo

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the precision calibration problems of coaxiality measurement device about big distance of porous parts, the coaxiality error sources, measurement methods for porous parts, error calculation models were researched, the principle and constitution of calibration system were summarized, the calibration system structure and control model were established. A special coaxiality method was proposed to provide a group of standard porous parts simulator whose coaxiality is known. The actual value acquired by the coaxiality measurement device was compared with the standard value to get the measurement error. This calibration system consisted of three-dimensional precision motion platform and ring gauge, the grating ruler was selected to measure the displacement, and TMS320F2812 was selected as the system control chip, the minimal region algorithm based on the least square principle was proposed to calculate the coaxiality of standard porous parts. The results indicate that this system resolution can reach 1 µm and the uncertainty can reach 8.12 µm, and it can effectively calibrate the precision error of coaxiality measurement device.

Key words: calibration; coaxiality; precision motion platform; minimal region algorithm

0 引 言

大距离孔系同轴度测量装置是一套专门用于超 长阵列孔系工件同轴度测量的设备<sup>[1]</sup>,该类工件长度 范围<2 500 mm、孔径范围>20 mm、孔间距>20 mm。 目前,对于同轴度测量装置的校准而言,研究人员基 本是采用第三方来检测同一工件的参数值,以此来比 对所校准的设备是否合格。徐斌<sup>[2]</sup>在同轴度校准中运 用了轴向、径向双表组合测量法与双径向表组合测量

收稿日期: 2014-12-04

**基金项目:**国防科技工业技术基础科研项目(J152012C001) 作者简介: 龚 醒(1989-),男,江苏淮安人,主要从事计算机辅助测控方面的研究. E-mail:gngxing@sina.com 通信联系人: 赵转萍,女,副教授. E-mail:meezpzhao@nuaa.edu.cn

法,该方法虽然提高了校准精度,但是操作繁琐,不宜 执行。张辉<sup>[3]</sup>采用三坐标测量机来校准同轴度装置, 一定程度上实现了自动化,然而三坐标测量机测头尺 寸太大,只能测量工件靠近两端的和间距较大的有限 几个孔,不能有效地反映被校准设备的真实准确度且 其精度指标无法计算出来。

鉴于大距离孔系同轴度测量装置很好地解决了 超长孔系同轴度误差测量的难题,并实现了孔系零件 几何量检测过程的高精度自动化,因此迫切需要通过 相应的校准设备来保证其测量值的准确性。

本研究拟采用专用设备校准法,即提供一组轴线 位置变动量已知的标准孔系模拟装置,将标准量值与 同轴度测量装置测得值作比较,以此得出所校准同轴 度测量装置的精度误差,并研发一套专用于大距离孔 系同轴度测量装置自动精密校准系统。

1 校准系统工作原理

大距离孔系同轴度测量装置基本原理是利用激 光与位置传感器(Position Sensitive Device, PSD)测出 工件孔心坐标,然后采用同轴度最小二乘法计算出被 测工件的同轴度误差<sup>[4]</sup>。

PSD属于光电位置传感器,具有两个相互垂直且 独立的光敏层,用来测量工件中每个孔心的二维坐标 值,其数学模型如图1所示。



图1 PSD位置传感器数学模型

坐标原点O取光敏面的几何中心, X 轴正方向设 为  $X_1$  指向  $X_2$ , Y 轴正方向设为  $Y_1$  指向  $Y_2$ ,  $令 L_x \ L_y$ 分别为  $X \ Y$  方向上的光敏面边长, 可得出光敏面上 A 光点坐标(X, Y)值:

$$\begin{cases} X = \frac{L_x}{2} \cdot \frac{X_2 - X_1}{X_2 + X_1} \\ Y = \frac{L_y}{2} \cdot \frac{Y_2 - Y_1}{Y_2 + Y_1} \end{cases}$$
(1)

式中: $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y_1$ ,  $Y_2$ —PSD端输出的4个电压信号。

校准系统数学模型如图2所示。运动平台的原点 *O*<sub>pt</sub>取为环规初始位置中心点,笔者将模拟工件的轴线 设为 *Z*轴,由近端孔指向远端孔,以PSD横向光敏面 所在的方向为X轴,其正方向同PSD中X轴正方向, 根据右手定则建立平台坐标系为 $O_{\mu}$ -XYZ。工件坐 标系设与平台坐标系 $O_{\mu}$ -XYZ平行,原点 $O_{\mu}$ 设为平 台X轴与Y轴行程中点且距平台Z轴起始点20mm 处,由此建立模拟工件的坐标系为 $O_{\mu}$ -XYZ。系统规 定近端孔与远端孔在工件坐标系 $O_{\mu}$ -XYZ下的XY轴 坐标值为(0,0),通过激光准直使激光线与Z轴重合。



图2 校准系统数学模型(坐标单位:mm)

校准时,先让环规运动到起始孔位置 $O_0$ 处,待测头捕捉完第一个孔的孔心坐标后,再让环规沿Z向移动固定间距 $\Delta Z_i$ ,并分别沿XY向移动标准小位移量 $(\Delta X_i, \Delta Y_i)$ 到位置 $O_i$ ,依次测量完n个孔心坐标后,即可得出该组孔系的同轴度误差测得值,再与标准值相比较,以此来得出被校准同轴度测量装置的测量误差。孔系模拟装置精度指标如表1所示。

表1 模拟孔系工件相关参数及性能指标

内径/mm	间距/mm	孔数	孔心变动量/mm	不确定度/mm
≥20	≥20	≥3	径向≪4 轴向≥20	≤±0.01

## 2 校准系统结构设计

校准系统需设计出合理的空间精密运动平台来满 足 XYZ 三轴位移的进给。由于孔系工件轴长≪2.5 m, 而孔心径向偏移量≪4 mm,同轴度测量装置分辨率为 0.001 mm,且测量示值误差≪±0.02 mm。因此运动平 台不仅要满足系统对各轴量程的柔性需求,同时还要 满足分辨率与精度的要求。三维精密平台精度要求 如表2所示。

表2 三维精密运动平台指标

Z轴行程/m	XY轴行程/mm	分辨率/μm	不确定度/mm
≥2.5	≥4	≤1	≤±0.01

校准系统组成包括环规、V型块、二维滚珠丝杠直 线机构以及气浮直线平台(示意图如图3所示)。其中, 环规与V型块用于模拟单孔工件,并且装夹于滚珠丝杠 机构的滑座上。二维滚珠丝杠直线机构用来提供孔心 XY 轴坐标偏移量,气浮直线平台用来模拟孔心 Z 轴坐 标的偏移量,且滚珠丝杠机构装于气浮平台的运动基 座上<sup>[5]</sup>。



图3 校准系统气浮直线平台

#### 2.1 校准系统 Z 轴位移进给机构

对于 Z 轴进给机构来说,量程需≥2.5 m,并且 Z 轴运动基座支撑 XY 轴进给系统,因此 Z 轴进给机构 要满足大量程、小直线度要求。

Z 轴位移进给机构采用气浮直线平台,使其在大 行程运动下仍能保持精确定位与较好的直线度,量程 设定为2.6 m。气浮底座采用大理石平台,驱动元件 选用直线电机<sup>[6]</sup>,定位元件采用光栅尺组成全闭环反 馈,最终 Z 轴进给机构可实现进给分辨率1 μm,直线 度±3 μm/2.6 m,定位精度±10 μm/2.6 m。

#### 2.2 校准系统 XY 轴位移进给机构

校准系统二维滚珠丝杠直线机构如图4所示。校准系统 XY 轴位移进给机构直接提供孔心在径向截面上的二维偏移量,行程需≥4 mm,由于 XY 轴坐标值在同轴度误差计算中起到决定性作用,因此 XY 轴进给机构应满足小行程、高定位精度要求。



#### 图4 校准系统二维滚珠丝杠直线机构

XY 轴位移进给系统采用二维滚珠丝杠直线平台, 行程均为10 mm。滚珠丝杠副选用南工艺的FFZD内循 环浮动式,其导程为4 mm,直线导轨副选用南工艺生产 的GGC9BA微型滚动导轨副,驱动元件选用步进电机,定 位元件采用光栅尺组成全闭环反馈。整体设计轻便,方 便装于气浮基座上,且 XY 轴位移分辨率均为0.25 μm, 定位精度为±1 μm/10 mm,直线度为±1.5 μm/10 mm, Y 轴相对于 X 轴垂直度为±1 μm/10 mm。

## 3 校准系统测控模块设计

校准系统测控模块是由上位机控制终端与下位 机控制器共同组成。上位机基于 Visual C++语言编 写,其数据管理层基于 SQL Server 数据库系统搭建。 下位机控制器以TI公司的TMS320F2812为主控芯片, 上、下位机采用RS232串口通信<sup>[7-8]</sup>。

校准系统控制流程图如图5所示,系统首先设定 好工件孔径、孔数及孔间距,调用孔心坐标生成算法 获得孔系坐标值。初始化运动平台处于工件坐标系 的原点  $O_{si}$ 处,执行激光自准直操作使激光线与工件 坐标系  $O_{si}$ -XYZ 的 Z 轴重合。上位机不断地通过串 口将孔心位置坐标值逐一发送到下位机中,以控制运 动平台将环规进给到目标位置。待同轴度测量装置 采集完所有孔心坐标后,系统调用同轴度最小区域法 计算出孔系同轴度标准值,再将其与实测值相比较, 以此来评定被校准装置的测量误差。





#### 3.1 基于DSP芯片的下位机控制模块设计

校准系统下位机是以TMS320F2812芯片为核心的控制器,主要完成与上位机的通信、控制并驱动电机以及采集光栅尺与限位开关信号。

XY 轴进给控制系统如图 6 所示, XY 轴进给系统 均采用森创 35 系列两相混合步进电机作为其驱动元 件,电机驱动器采用乐创 DMD402A 型步进电机细分 驱动器。DSP2812 通过引脚发送脉冲数来控制电机 的转动角度与速度,其分辨率设置为 1.35 '/pulse。 DSP2812 中的两个正交信号采集单元 QEP1、QEP2 分 别用来采集 XY 轴直线光栅尺输出信号,以此来反馈 XY 轴位置值,限位开关采用OMRON 671 NPN型光电 传感器,输出的阶跃信号分别由 DSP2812 外部中断1 和2的下降沿来采集。



图6 XY 轴进给控制系统

Z 轴进给控制系统如图 7 所示。Z 轴驱动元件采 用北京慧摩森 SM 系列无铁芯直线电机,驱动器采用 以色列 Elmo智能伺服驱动器,可通过 RS232 串口进行 内部编程,且自带光栅尺信号接口。Z 轴进给系统分 辨率设为1 μm/pulse,DSP2812 通过引脚发送脉冲数 来控制直线电机位移进给量与速度,通过外部中断13 来采集 Z 轴限位开关输出信号。



图7 Z 轴进给控制系统

#### 3.2 基于Visual C++的上位机控制模块设计

校准系统上位机可划分为三大层次:应用层、算 法层、数据层。操作人员通过应用层来执行整个校准 过程,包括用户管理、设备管理、校准准备、开始校准; 算法层负责系统的数值计算,包括工件孔心坐标的生 成、同轴度最小区域法以及被校准设备误差评定算 法;数据层负责系统的数据管理,包括存储、查询、删 除以及校准结果的打印输出。

4 同轴度最小区域算法

本研究采用自行设计的最小区域法来计算模拟

多孔系工件的同轴度误差,该算法以同轴度最小二乘 法为基础<sup>[9]</sup>。最小区域直线平移图如图8所示,设空 间中工件各孔心位置为{O<sub>0</sub>,...,O<sub>n</sub>},经最小二乘法处 理后得到最小二乘中心线 L<sub>0</sub>,然后采用最小区域思想 在空间中平移直线 L<sub>0</sub>,直到找到使同轴度误差最小的 中心线 L<sub>0</sub>



图8 最小区域直线平移图

 $O_0$  点为起始孔心点,  $O_a$  点为孔系中距  $L_0$  最远点, 设其距离为  $D_a$ ,此时同轴度  $\phi f = 2D_a$ 。以  $O_a$  点作  $L_0$ 的垂线与  $L_0$  交于点  $P_0$ ,则  $D_a$  就等于向量  $O_a P_0$  的 模。将  $L_0$  沿着向量  $O_a P_0$  平移到得到直线  $L_1$ ,平移距 离设为 r。此时,以  $L_1$  作为中心轴线来计算同轴度, 则  $O_a$  与直线  $L_1$  的距离即为( $D_a - r$ )。

经过大量的实验分析,可得到由最小二乘法计算 出的中心线 L<sub>0</sub>与孔系中各孔心点的分布规律,设孔心 O<sub>b</sub>点与直线 L<sub>0</sub>的距离仅次于 O<sub>a</sub>点,那么点 O<sub>a</sub>与点 O<sub>b</sub> 必定分布在直线 L<sub>0</sub>的两侧,即在将直线 L<sub>0</sub>向点 O<sub>a</sub> 平 移的过程中,点 O<sub>b</sub> 必定在以与其相当的距离减小程度 增加其与平移后直线 L<sub>1</sub>的距离,而孔系中其余的点与 直线 L<sub>1</sub>的距离始终小于点 O<sub>a</sub>和点 O<sub>b</sub>与直线 L<sub>1</sub>的距



离。因此,在迭代运算过程中,只需关心 $O_a$ 和 $O_b$ 与直 线 $L_1$ 的距离即可。该校准系统中最小区域法的最终 目的就是找到直线 $L_1$ 的一个合适的位置,使其与 $O_a$ 的距离 $D'_a$ 达到最小且仍大于其与 $O_b$ 的距离 $D'_b$ ,最 后输出的同轴度误差即为 $\phi f = 2D'_a$ 。经验证,该最小 区域法运算快速,迭代次数小于10,且有效改善同轴 度的计算误差。算法流程图如图9、图10所示。



图10 同轴度最小区域算法流程图

### 5 校准系统不确定度与实验分析

#### 5.1 校准系统不确定度分析

校准的不确定度来源主要有:气浮平台直线度误 差引入的不确定度 u<sub>1</sub> 为±3 μm、X 轴位移进给机构直 线度误差引入的不确定度 u<sub>2</sub> 为±1.5 μm 且定位精度误 差引入的不确定度  $u_3$  为±1  $\mu$ m、Y 轴位移进给机构直 线度误差引入的不确定度  $u_4$  为±1.5  $\mu$ m 且定位精度 误差引入的不确定度  $u_5$  为±1  $\mu$ m、二维滚珠丝杠 XY 轴相互垂直度引入的不确定度  $u_6$  为±1  $\mu$ m。

不确定度分量彼此相互独立,因此合成标准不确 定度 $u_e = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} \approx 4.06 \mu m$ ,最终的 扩展不确定度 $U = k \cdot uc = 8.12 \mu m (k = 2)$ <sup>[10]</sup>。由以上数 据可知,扩展不确定度值满足该校准系统不确定度要 求值 $\leq \pm 0.01 \text{ mm}$ 。

#### 5.2 校准实验分析

本研究拟提供一组坐标变动量已知的孔系,然 后分别将三坐标测量机测得值、同轴度测量装置测 得值与孔系标准值相比较,以此来评定该装置测量 误差。模拟孔系坐标如下(单位为mm): X = [0 0.505  $0.720 - 0.426 \ 0.602 \ 1.010 \ 0.642 \ -0.423 \ -1.213 \ 0$ ; Y = [0-1.321-1.011 0.012 0.634 0.902 1.231 0.213 0.002 0]; Z = [0 40 80 120 160 200 240 280 320 360],该组 孔系同轴度标准值  $\phi f = 1.185 \text{ mm}_{\odot}$  三坐标测量机测 得值如下: X<sub>1</sub> = [0 0.506 0.721 - 0.426 0.601 1.009 0.640 - 0.425 - 1.214 0;  $Y_1 = \begin{bmatrix} 0 - 1.322 - 1.012 & 0.013 \end{bmatrix}$  $0.633 \ 0.901 \ 1.229 \ 0.212 \ 0.002 \ 0.001$ ;  $Z_1 = [0 \ 40 \ 80$ 120 160 200 240 280 320 360]; *фf*<sub>1</sub>=1.180 mm<sub>o</sub> 同轴 度测量装置测得值如下: X<sub>2</sub> = [0 0.507 0.724 - 0.423 0.599 1.007 0.640 -0.426 -1.216 -0.002];  $Y_2 = [0]$ -1.322 -1.010 0.014 0.631 0.900 1.227 0.210 -0.001 -0.002];  $Z_2 = [0 40 80 120 160 200 240 280 320$ 360],同轴度测得值 of2=1.196 mm。

模拟孔系同轴度标准值与三坐标测量机测得值 之差  $\Delta_1 = \phi f_1 - \phi f = 1.180 - 1.185 = -0.005 \text{ mm}$ ,由于  $\Delta_1$ 的绝对值 5  $\mu$ m 小于校准系统的不确定度 8.12  $\mu$ m,可 判定该系统满足校准精度要求。孔系同轴度标准值 与同轴度测量装置的测得值之差  $\Delta_2 = \phi f_2 - \phi f =$ 1.196-1.185=0.011 mm,满足该同轴度测量装置示值 误差要求( $\leq 0.02 \text{ mm}$ ),因此,可判断该同轴度测量装 置满足测量精度要求。

## 6 结束语

本研究提出了一种同轴度测量装置的专用校准 方法,该方法采用三维精密运动平台与标准环规来模 (下转第463页)

本文引用格式:

龚 醒,赵转萍,王 波.大距离孔系同轴度测量装置专用校准系统研究[J]. 机电工程,2015,32(4):453-457,463.

GONG Xing, ZHAO Zhuan-ping, WANG Bo. Calibration system of coaxiality measurement device about big distance of porous parts[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(4):453-457, 463. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn