

文章编号: 1671-7449(2024)04-0387-08

# 大直径孔轴线快速测量方法

孙筱, 余厚云\*, 唐景杰

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 针对航空制造现场的大直径孔轴线测量难题, 提出一种基于光电检测技术和准直激光的孔轴线测量方法。首先, 使测头在被测孔内稳定支撑, 以单模光纤激光器发出的准直光束作为测量基准, 测头前端的PSD传感器测量准直激光光斑坐标, 以确定测头相对位置, 同时, 通过倾角传感器数据修正装夹姿态误差; 然后, 以激光测距传感器在电机驱动下旋转并测量孔轮廓点的距离, 结合电机内部角度编码器的数据, 计算出被测孔在当前截面上的中心坐标, 移动测头依次测量多个截面; 最后, 根据所有截面的中心, 评定出被测孔的轴线。实验结果表明, 本系统轴线测量重复性误差小于0.01 mm, 满足一般大直径孔轴线测量要求。

**关键词:** 大直径孔; 轴线测量; 激光测距; 光电位置探测器; 非接触测量

**中图分类号:** TH161.13

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2024050

**引用格式:** 孙筱, 余厚云, 唐景杰. 大直径孔轴线快速测量方法[J]. 测试技术学报, 2024, 38(4): 387-394.

SUN Xiao, YU Houyun, TANG Jingjie. Research on rapid measuring methods for large-diameter hole axis [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(4): 387-394.

## Research on Rapid Measuring Methods for Large-Diameter Hole Axis

SUN Xiao, YU Houyun\*, TANG Jingjie

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

**Abstract:** To address the challenge of measuring the axis of large-diameter holes in the aerospace manufacturing field, we propose a hole-axis measurement method based on photoelectric detection technology and collimated lasers. Firstly, the probe is stably supported inside the hole to be measured, using the collimated beam emitted by the single-mode fiber laser as the measurement reference. The PSD sensor at the front end of the probe measures the coordinates of the collimated laser spot to determine the relative position of the probe, while the inclination sensor data corrects the clamping posture error. Then, the laser distance measuring sensor rotates under the motor drive and measures the distance to the hole contour points. Combined with the data from the internal angle encoder of the motor, the center coordinates of the measured hole on the current section are calculated. By moving the probe and measuring multiple sections in succession, the axis of the measured hole is determined based on the centers of all sections. Experimental results show that the repeatability error of axis measurement of this system is less than 0.01 mm, meeting the requirements for measuring the axis of general large-diameter holes.

**收稿日期:** 2023-10-16

**基金项目:** 直升机传动技术国家级重点实验室基金资助项目(HTL-0-21G10); 南京航空航天大学“实验技术与开发”重点资助项目(2020050500057871)

**作者简介:** 孙筱(1999-), 男, 硕士生, 主要从事机械工程测量、光电检测技术研究。E-mail: xxiao913@nuaa.edu.cn.

\* **通信作者:** 余厚云(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事机械工程测量、光电检测技术等研究。E-mail: meehyyu@nuaa.edu.cn.

**Key words:** large diameter hole; axis measurement; laser ranging; photoelectric position detector; non-contact measurement

## 0 引言

在航空制造行业中,精确测量大直径孔的轴线是一个重要但又极具挑战性的任务。孔的精确度直接影响到组件的装配质量、飞机的性能以及安全性<sup>[1-2]</sup>。本文研究航天发动机的大直径轴承座孔系如图1所示,测量参数为孔系轴线,孔径范围167~193 mm、深度20~30 mm,孔系跨度1.1 m。孔轴线测量目的在于指导其装配保证安装精度要求,并为后续孔系同轴度、位置度的评定提供基础。

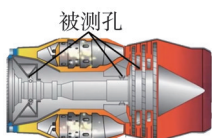


图1 航天发动机部分结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of aerospace engine partial structure

传统接触式测量方法,例如三坐标测量仪<sup>[3]</sup>、测量臂<sup>[4]</sup>和圆柱度仪等,测量设备成本较高,一般在实验室使用,不适用航天发动机中大直径孔系轴线现场测量,更不能实时指导零件装配。而对于非接触式测量方法,例如机器视觉、光学测量等相关现代化技术<sup>[5-6]</sup>,虽然测量效率高、过程简洁,且测量精度也在逐步提高,但航天发动机中的大直径孔系在其内部,并需要现场测量,故现有方法难以试用。

基于这一背景,结合光电检测技术和准直激光<sup>[7]</sup>,提出并设计了一个创新的大直径孔轴线测量系统。此系统不仅能有效解决大直径孔的轴线测量问题,还提高了测量的精度和效率。系统的核心在于利用激光优良的准直特性,提出以准直激光束作为测量基准,设计专用工装在孔内快速稳定支撑,通过非接触式激光测距方法获得孔的轮廓点坐标并拟合截面中心,结合基准激光的位置信息,最后测量出孔系轴线。该方法测量柔性好、测量精度和效率高、操作方便,适用于航空制造现场的大直径孔系测量。

## 1 系统总体方案

测量系统的三维模型及实物如图2所示,主要包括位置敏感探测器(Position Sensitive detec-

tor, PSD)、气动夹爪支撑主体、超声电机、倾角传感器、激光测距传感器、滤光片、处理电路以及连接件等部件。气动夹爪在孔内涨紧为测头提供稳固的测量平台,并通过其尾部安装的倾角传感器测量自身空间姿态;超声电机安装在气动夹爪前端,并保证其旋转轴与三爪卡盘自定心轴线同轴;电机输出轴通过连接件安装PSD、激光测距传感器并提供旋转运动,从而采集孔截面信息。其中PSD感知准直激光束投射在其光敏面上的光斑中心坐标<sup>[8]</sup>,用于确定测头与测量基准之间的相对位置。利用超声电机驱动激光测距传感器转动一周,实现对孔截面轮廓上的点云数据参数的采集,结合电机内部角度编码器的数据,计算出孔在当前截面上的中心与多功能测头之间的位置关系,进而求出孔截面中心与基准激光的位置关系。移动测头,依次测量多个截面,并通过测头尾部的倾角传感器测得测头的滚动角度来统一坐标系。最后,根据所有截面的中心,评定出被测孔的轴线。

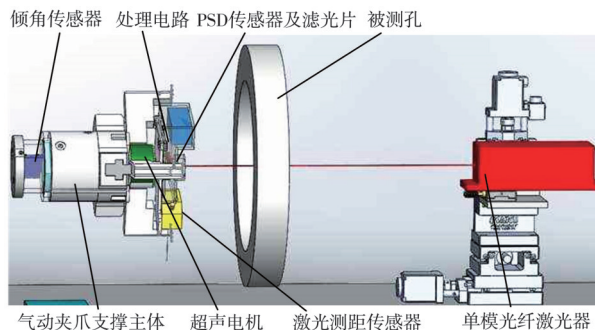


图2 测量系统总体结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the structure of the measurement system

本测量系统主要涉及被测孔截面中心的测量,由于装夹模块的定心精度不高以及在轴向移动时发生滚动角变化,因此,各个截面PSD测得的点坐标数据需要拟合得到旋转中心,并统一到依据准直光束建立的系统坐标下,进行轴线拟合。基于测量系统的组成,建立了PSD坐标系、测头坐标系和系统坐标系,如图3所示。

PSD坐标系以PSD传感器的中心为坐标系的原点 $o$ ,以超声波电机内绝对式角度编码器读数为 $0^\circ$ 时PSD传感器的 $x, y$ 轴为PSD坐标系的 $x, y$ 轴,再利用右手法则确定 $z$ 轴正方向。测头坐标系以电机旋转轴线与PSD光敏面的交点为原点,

其  $x, y$  轴分别与 PSD 坐标系的  $x, y$  轴平行。其中, 通过安装夹具, 使激光测距传感器激光束旋转平面与超声波电机输出轴轴线垂直, 且 PSD 传感器光敏面与激光测距传感器发射的激光束旋转平面重合, 即测头坐标系与 PSD 坐标系  $xoy$  面重合。因此, 测头坐标系  $xoy$  面与 PSD 坐标系  $xoy$  面重合且 3 个坐标轴正方向都互相平行, 两个坐标系之间只存在平移关系。系统坐标系以准直激光束为  $Z$  轴, 以准直激光束与测头坐标系  $xoy$  面交点为原点,  $X$  轴与 PSD 坐标系的  $x$  轴在系统坐标系  $XOY$  面的投影平行, 再利用右手法则确定  $Y$  轴正方向。在初始测量位置处, 倾角传感器测得的初始旋转角为  $\alpha_0$ 。

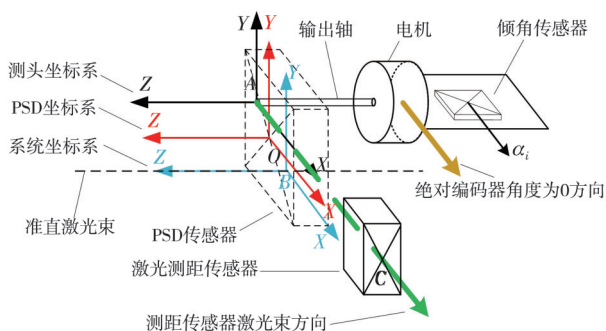


图 3 系统测量坐标系示意图  
Fig. 3 Illustration of the measurement coordinate system

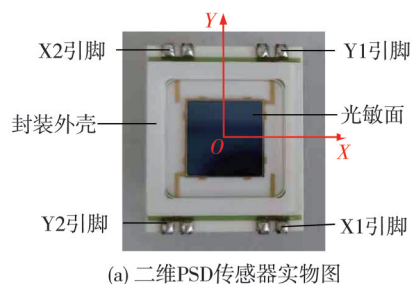
## 2 轴线测量原理

### 2.1 PSD 测量准直激光光斑位置

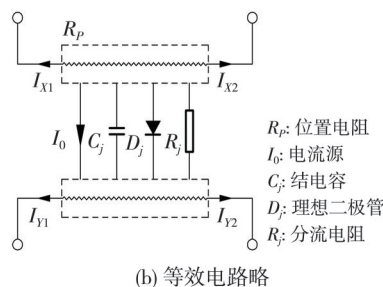
在测量孔系同轴度的过程中, 当多功能测头在孔内稳定支撑后, 测头前端的 PSD 感知到准直激光束投射在光敏面上的光斑坐标<sup>[9]</sup>。本系统采用 SiTek 的 S2-0003 型二维传感器检测准直激光束位置信息, 实物图如图 4(a) 所示, 中间  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  黑色矩形区域为光敏面, 在封装外壳的 4 个边角有两对输出电极  $X_1, X_2$  和  $Y_1, Y_2$ , 用于输出光电流信号, 其等效电路原理图<sup>[10]</sup>如图 4(b) 所示, 当入射光束照射到光敏面上时, 其光量中心的  $x, y$  坐标可根据转换公式(1)计算得出。

$$\begin{cases} x = \frac{L_x}{2} * \frac{I_{x2} - I_{x1}}{I_{x2} + I_{x1}}, \\ y = \frac{L_y}{2} * \frac{I_{y2} - I_{y1}}{I_{y2} + I_{y1}}, \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $I_{x1}, I_{x2}, I_{y1}, I_{y2}$  为入射光束产生的输出光电流, 大小一般为 mA 级;  $L_x$  和  $L_y$  分别指对应坐标方向上光敏面的长度, 大小均为  $10\text{ mm}$ 。



(a) 二维 PSD 传感器实物图



(b) 等效电路略

图 4 二维 PSD 传感器结构示意图

Fig. 4 PSD sensor structure diagram

由于 PSD 的输出量是与光斑位置相关的 4 路电流信号 ( $X_1, X_2, Y_1, Y_2$ ), 其量值较小, 一般仅为 mA 级, 没有合适的设备对其精确测量, 需要使用处理电路进行放大处理。PSD 信号处理电路采用电流-电压转换放大电路<sup>[11]</sup>, 共分为两级放大电路。先利用一级放大电路将电流信号放大转换为电压信号, 4 路放大后的输出电压信号分别为 AMPX1, AMPX2, AMPY1 和 AMPY2。且为有效降低电路噪声, 提高测量精度, 设计电阻和电容并联构成低通滤波器, 一级放大电路的计算过程如下:

根据“虚短虚断”原理可知, AMPX1 计算过程为

$$AMPX1 = \frac{U1 + X1 * R3 - \frac{U1}{R17 + R18} * R18}{R6} * \left( R25 - \frac{U1}{R17 + R18} * R18 \right), \quad (2)$$

式中:  $X_1$  为 PSD 一路电流信号;  $U_1$  为输入电压;  $R_3, R_6, R_{17}, R_{18}, R_{25}$  为对应电阻。设计  $R_3 = R_6 = R_{17} = R_{18} = R_{25} = 10\text{ K}\Omega$ , 代入得到:

$$AMPX1 = 10 * X1, \quad (3)$$

式中:  $X_1$  为 PSD 一路电流信号。

同理可得 AMPX2, AMPY1, AMPY2。

需要注意的是, 式(3)中的电流均以 mA 为单位, 基本无法满足准确采集的条件。为满足数据采集的准确性, 需设计二级运算放大电路。

首先, 经过转换放大后的电压信号需要再通

过二级放大电路中的加法器与减法器,对4路放大后的电压信号进行运算,输出2路和电压SUMX, SUMY以及2路差电压DIFFX, DIFFY分别对应式(1)中分母与分子;最后,再将SUMX, SUMY, DIFFX, DIFFY接入AD转换器的输入端,经模数转换后交由单片机处理,从而获得当前光斑的位置坐标。则SUMX和DIFFX计算过程分别为

$$\frac{SUMX}{R9} = \frac{AMPX1}{R7+R8} + \frac{AMPX2}{R13+R14}, \quad (4)$$

$$DIFFX = \left(1 + \frac{R33}{R31+R32}\right) \left(\frac{R27}{R21+R22+R27}\right) \cdot AMPX2 - \frac{R33}{R31+R32} AMPX1, \quad (5)$$

设计  $R7=R13=R31=R21=10\text{ k}\Omega$ ,  $R8=R14=R32=R22=20\text{ k}\Omega$ ,  $R9=R33=R27=30\text{ k}\Omega$ , 并代入可得

$$\begin{cases} SUMX = AMPX1 + AMPX2, \\ DIFFX = AMPX2 - AMPX1. \end{cases} \quad (6)$$

同理可得SUMY, DIFFY。

结合式(1),最终光量中心的 $x, y$ 坐标可计算为

$$\begin{cases} x = \frac{L_x}{2} \cdot \frac{DIFFX}{SUMX}, \\ y = \frac{L_y}{2} \cdot \frac{DIFFY}{SUMY}, \end{cases} \quad (7)$$

式中: $L_x$ 和 $L_y$ 分别指对应坐标方向上光敏面的长度,大小均为10 mm;DIFFX, DIFFY表示放大运算后的差电压;SUMX, SUMY表示放大运算后的和电压。

## 2.2 被测孔截面中心坐标拟合

在测量任意截面 $i$ 时,以准直激光束作为测量基准,测头稳定装夹于孔内静止不动,驱动超声电机旋转,并采集PSD传感器、激光测距传感器和角度编码器的数据,直至一周。则最终PSD传感器测得准直激光束在当前测量截面的光斑轨迹坐标为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ,激光测距传感器和角度编码器测得孔内截面信息为 $(d_1, \theta_1), (d_2, \theta_2), \dots, (d_n, \theta_n)$ ,其中 $(x_1, y_1)$ 与 $(d_1, \theta_1)$ 为一组对应值。

在实际测量过程中,PSD传感器和激光测距传感器的测量的轨迹数据中总会包含部分误差较大的数据,尤其是激光测距传感器在采集截面圆数据的过程中,起支撑作用气动夹爪的卡爪会挡

住部分孔截面,造成误差,实际采集的孔截面数据如图5所示。

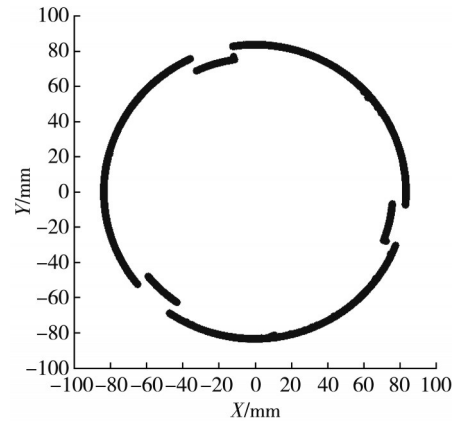


图5 激光测距传感器采集孔截面实际数据

Fig. 5 Actual hole cross-section data chart

同时在实际测量过程中,PSD传感器和激光测距传感器测量的圆轨迹数据中总会包含部分误差较大的数据。

为解决上述问题,本系统将随机抽样一致性算法(RANSAC)<sup>[12]</sup>和最小二乘算法<sup>[13]</sup>结合,提出了基于最小二乘的RANSAC圆拟合改进算法,通过随机抽取样本点进行拟合并标记误差点的方法构建了误差点检测和剔除机制。该方法能够很好地剔除误差点,极大地降低了测量中的随机误差,并提升了拟合速度,提高了圆截面拟合算法的抗干扰能力。

由此,可得到拟合PSD传感器测得的准直激光束光斑轨迹坐标,得到在PSD坐标系下的旋转中心坐标为 $A_i(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai})$ ,  $z_{Ai}=0$ ,则 $A_i$ 为截面 $i$ 处测头坐标系原点,即超声电机输出轴与PSD坐标系 $xoy$ 面的交点;同时,取角度编码器为 $0^\circ$ 时PSD测得的坐标作为当前截面准直激光束光斑在PSD坐标系下的坐标 $B_i(x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi})$ ,  $z_{Bi}=0$ 。拟合激光测距传感器和角度编码器测得孔内截面信息 $(d_1, \theta_1), (d_2, \theta_2), \dots, (d_n, \theta_n)$ ,得到在测头坐标系下孔截面中心坐标 $C_i(x_{Ci}, y_{Ci}, z_{Ci})$ ,  $z_{Ci}=0$ 。另一方面,由于轴线测量测头作为一个整体,因此,PSD坐标系与测头坐标系的相对位置关系固定,则PSD坐标系下的点到测头坐标系的转换矩阵始终为 $T$ 。且在本系统中,PSD坐标系与测头坐标系的 $xyz$ 轴正方向互相平行且彼此 $xoy$ 面重合,则

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{Ai} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{Ai} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{Ai} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中:  $x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}$  为在 PSD 坐标系下的旋转中心坐标为  $A_i$  的各坐标值。

将准直激光束在当前测量截面的 PSD 坐标系下的坐标  $B_i(x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi})$  转换到测头坐标系下, 得到准直激光束光斑在测头坐标系下坐标  $D_i(x_{Di}, y_{Di}, z_{Di})$ 。

$$\begin{bmatrix} x_{Di} \\ y_{Di} \\ z_{Di} \\ 1 \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} x_{Bi} \\ y_{Bi} \\ z_{Bi} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中:  $T$  为式(8)给出的坐标变换矩阵。

因此当前孔截面中心  $E_i$  在系统坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{Ei} \\ y_{Ei} \\ z_{Ei} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{Ci} \\ y_{Ci} \\ z_{Ci} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{Di} \\ y_{Di} \\ z_{Di} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中:  $x_{Ci}, y_{Ci}, z_{Ci}$  为测头坐标系下孔截面中心坐标  $C_i$  的各坐标值;  $x_{Di}, y_{Di}, z_{Di}$  为准直激光束光斑在测头坐标系下坐标  $D_i$  的各坐标值。

当切换测量截面时, 气动夹爪松开再重新装夹, 此时测头可能会存在滚动角变化, 设任意测量截面  $i$  处倾角传感器测得的旋转角为  $\alpha_i$ , 激光测距模块的激光位移传感器测得装夹模块距离  $t_i$ , 即测头存在绕  $Z$  轴的旋转角  $\Delta\alpha$  和沿  $Z$  轴的平移, 其中  $\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_0$ 。则转换后当前孔截面中心坐标记为  $E'_i(X_{Ei}, Y_{Ei}, Z_{Ei})$ , 则

$$T' = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i - \alpha_0) & \sin(\alpha_i - \alpha_0) & 0 \\ -\sin(\alpha_i - \alpha_0) & \cos(\alpha_i - \alpha_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中:  $\alpha_i$  为任意测量截面  $i$  处倾角传感器测得的旋转角值;  $\alpha_0$  为倾角传感器初始状态反馈的旋转角的值。

$$\begin{bmatrix} X_{Ei} \\ Y_{Ei} \\ Z_{Ei} \end{bmatrix} = T' \begin{bmatrix} x_{Ei} \\ y_{Ei} \\ z_{Ei} + t_i \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中:  $T'$  为式(11)提供的变换矩阵;  $t_i$  为激光位移传感器测得装夹模块的距离。

### 2.3 被测孔轴线拟合

本系统以所有测量的截面中心点依据最小二乘原理拟合得到的最小二乘中线作为被测孔的测量轴线。假定设最小二乘中线经过坐标系中的一点  $O_0(x_0, y_0, 0)$ , 其最小二乘法的直线参数方程为

$$\begin{cases} x = x_0 + pz, \\ y = y_0 + qz, \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $x_0, y_0, p, q$  为最小二乘中线的特征参数。

式(13)中最小二乘中线的系数  $(x_0, y_0, p, q)$

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n z_i^2 \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i z_i \sum_{i=1}^n z_i}{n^* \sum_{i=1}^n z_i^2 - (\sum_{i=1}^n z_i)^2}, \\ y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n z_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n y_i z_i \sum_{i=1}^n z_i}{n^* \sum_{i=1}^n z_i^2 - (\sum_{i=1}^n z_i)^2}, \\ p = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i z_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n z_i}{n^* \sum_{i=1}^n z_i^2 - (\sum_{i=1}^n z_i)^2}, \\ q = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i z_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n z_i}{n^* \sum_{i=1}^n z_i^2 - (\sum_{i=1}^n z_i)^2}, \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $n$  为测量的孔截面中心点的个数,  $(x_i, y_i, z_i)$  为第  $i$  个孔截面中心的空间坐标。

得到直线方程参数  $(x_0, y_0, p, q)$  的具体数值后, 代入式(13)即可得到被测孔轴线的参数方程。

## 3 实验与分析

### 3.1 系统参数标定实验

依照上述设计原理, 设计并搭建大直径孔轴线测量系统, 测量系统实物如图 6 所示。

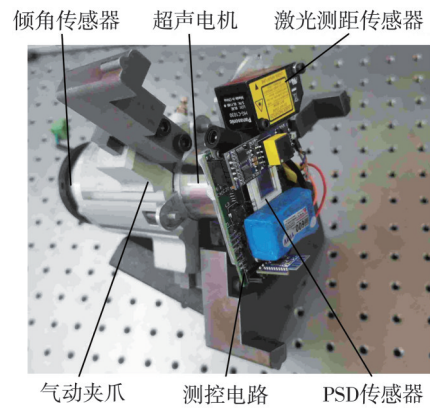


图6 测量系统实物图

Fig. 6 Probe structure diagram

依据 2.2 节中被测孔截面中心坐标测量原理, 在理想情况下, 测量系统的激光测距传感器发射的激光应该经过旋转中心。但实际情况下, 需考虑模块的装配误差, 即传感器的安装位置必然会存在一定的偏差。如图 7 所示, 其中  $O_2$  为旋转中心,  $O_1$  为半径为  $R$  的孔截面中心,  $A$  为激光位移传感器的激光发射点,  $AD$  为激光位移传感器发射的激光线,  $O_1O_2 = d$ ,  $AO_2 = r$ ,  $O_2$  到  $AD$  的距离为  $e$ 。

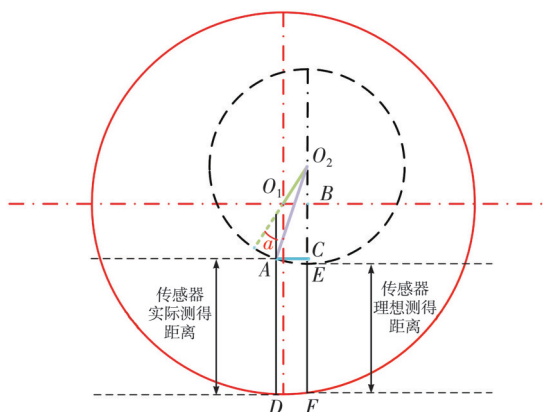


图7 激光测距传感器实际测量状态示意图

Fig. 7 Illustration of laser ranging measurement states

此时, 激光测距传感器测得实际值为

$$D = \sqrt{R^2 - (d - e \times \sin a)^2} - \sqrt{r^2 - d^2} + e \times \cos a. \quad (15)$$

而理想值应为

$$EF = \sqrt{R^2 - (e \sin a)^2} - r + e \cos a. \quad (16)$$

因此, 激光测距传感器的安装误差会导致测量得到的距离值偏离实际值, 影响最终的轴线测量。因此, 需要通过高精度的标准件对传感器的安装位置进行标定, 获得激光测距传感器激光出射点到旋转中心的距离  $r$  和旋转中心到发射激光线的垂直距离  $e$ 。

本系统采用直径为 166.998 0 mm 的标准环规进行标定。如图 8 所示, 将标准环规固定在光学平台上, 然后将测头装夹在标准环规内, 采集截面信息。

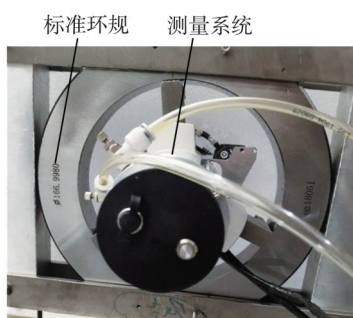


图8 系统标定实验图

Fig. 8 Experimental diagram for system calibration

由于传感器都有误差, 重复 10 次标定试验, 每次实验结果取平均值后作为标定结果, 并采取迭代法计算出参数  $e$  和  $r$ 。实验标定结果如表 1 所示。

根据表 1 可得, 标定所得的多功能测头模块激光测距传感器的旋转半径  $r$  和偏移距离  $e$  分别为 51.506 9 mm 与 0.019 5 mm。

表1 标定实验结果

Tab. 1 Calibration experimental results

名称	$r/\text{mm}$	$e/\text{mm}$
1	51.514	0.016
2	51.512	0.017
3	51.511	0.019
4	51.507	0.023
5	51.502	0.010
6	51.505	0.027
7	51.501	0.021
8	51.500	0.027
9	51.513	0.017
10	51.504	0.019
平均值	51.506 9	0.019 5

### 3.2 圆拟合算法验证实验与分析

采用基于随机抽样一致性(RANSAC)的最小二乘圆拟合算法拟合截面中心坐标。RANSAC 随机抽样一致性算法是一种参数估计法。本文根据 RANSAC 算法的基本思想, 利用 RANSAC 算法改进了直接最小二乘拟合圆的方法, 算法流程如图 9 所示。

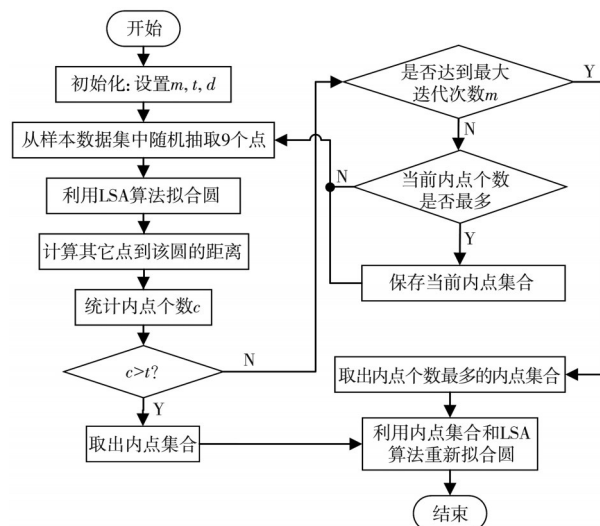


图9 圆拟合改进算法流程图

Fig. 9 Improved algorithm flowchart for circle fitting

为研究基于最小二乘 RANSAC 算法拟合圆的优化效果, 采用标定环规的光斑轨迹坐标的实验数据, 通过在原始数据基础上添加随机误差为  $\pm 0.05$ ,  $\pm 0.1$ ,  $\pm 0.15$ ,  $\pm 0.2$ ,  $\pm 0.25$  mm 的误差点, 设置距离阈值为 0.02 mm。分别采用两种算法得到拟合结果, 数据如表 2 所示。

由表 2 可以明显对比出, 基于最小二乘的 RANSAC 圆拟合改进算法可以根据距离阈值很好地将大于阈值的外点剔除, 从而提高圆拟合的精度。本文的验证实验中, 当距离阈值设为 0.02 mm, 随机误差值从  $\pm 0.05 \sim \pm 0.5$  mm 时,

椭圆拟合改进算法得到的中心坐标误差仅在 2 μm 以内。

表 2 两种圆拟合算法拟合结果

Tab. 2 The fitting results of two circle fitting algorithms

误差值/mm	最小二乘基本拟合算法		基于最小二乘的 RANSAC 圆拟合改进算法	
	X 坐标/mm	Y 坐标/mm	X 坐标/mm	Y 坐标/mm
±0.05	1.001 9	1.002 2	1.000 4	1.000 7
±0.1	0.996 0	1.001 7	1.000 5	1.000 2
±0.15	1.000 8	1.002 9	0.999 1	1.000 8
±0.2	1.007 1	0.997 8	1.000 7	1.000 0
±0.25	0.983 7	1.003 5	0.999 3	1.000 6

### 3.3 孔轴线测量实验与分析

根据上述测量原理和测量系统坐标系的建立,本系统拟定的基本测量流程如图 10 所示。

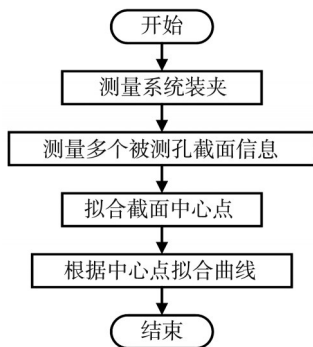


图 10 孔轴线测量流程图

Fig. 10 Flow chart of hole axis measurement

实际实验平台如图 11 所示,将标准环规作为被测孔零件,单模光纤激光器作为测量基准固定在光学平台上。

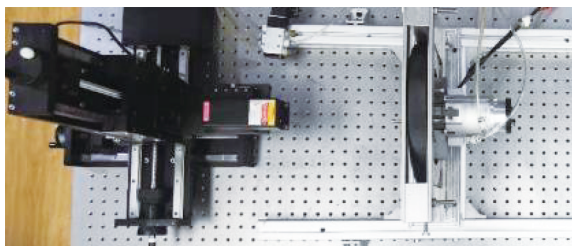


图 11 孔轴线测量重复性实验图

Fig. 11 Repeatability experiment for hole axis measurement

将测头稳定装夹于孔内,依次测量 4 个截面,并利用上述截面数据处理方法计算每个孔截面的中心坐标,并拟合 4 个孔截面中心点得到被测孔的测量轴线。重复进行 10 组测量试验,得到测量孔轴线结果如表 3 所示。

表 3 中  $x_0, y_0, z_0$  为直线经过的基点的坐标,  $p, q, l$  为直线方向向量。根据表 3 中数据,其中基点

坐标  $x_0, y_0$  的极差分别为 0.006 8 mm, 0.009 4mm, 标准差分别为 0.002 2mm, 0.003 0 mm; 特征参数  $p, q$  的极差皆小于 0.001, 标准差分别为 0.000 8、0.001 0。从数据可得,测量的轴线重复性误差小于 0.01 mm。

表 3 10 组孔轴线测量重复性实验结果

Tab. 3 Measurement repeatability experiment results

组号	基准轴线方程参数					
	$x_0$ /mm	$y_0$ /mm	$z_0$ /mm	$p$	$q$	$l$
第 1 组	0.807	-0.986	61.0	0.006 9	-0.015 8	1
第 2 组	0.807	-0.988	61.0	0.006 7	-0.014 9	1
第 3 组	0.810	-0.989	61.0	0.006 2	-0.014 9	1
第 4 组	0.807	-0.995	61.0	0.006 6	-0.015 4	1
第 5 组	0.805	-0.991	61.0	0.006 5	-0.014 8	1
第 6 组	0.805	-0.994	61.0	0.007 1	-0.015 6	1
第 7 组	0.811	-0.991	61.0	0.007 1	-0.015 8	1
第 8 组	0.809	-0.996	61.0	0.007 0	-0.015 7	1
第 9 组	0.806	-0.990	61.0	0.006 4	-0.015 0	1
第 10 组	0.808	-0.992	61.0	0.006 9	-0.015 6	1
极差	0.006 8	0.009 4	0	<0.001	<0.001	0
标准差	0.002 2	0.003 0	0	0.000 8	0.001 0	0

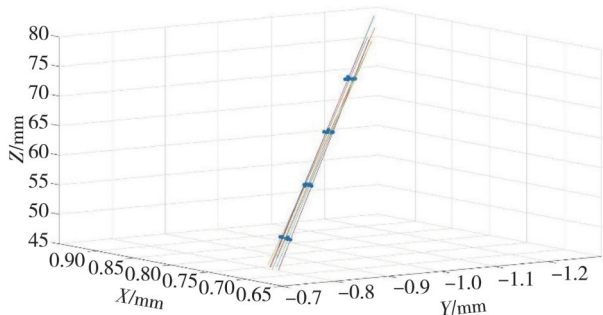


图 12 10 组孔轴线测量实验轴线示意图

Fig. 12 Schematic diagram of axis measurements for 10 sets of holes

## 4 结 语

1) 提出了一种基于光电检测的大直径孔轴线测量方法,开发了相应的测量装置并进行了实验验证。在以大直径环规为测量对象进行 10 组孔轴线测量实验中,系统测量轴线的重复性误差均小于 0.01 mm,说明本系统具有较高的重复性测量精度。能够满足在航空制造领域中直径孔系的轴线测量要求。相较于传统接触式测量方法,本文的测量方法能够满足制造及装配现场的快速原位测量。但是,由于测量系统以准直激光作为测量基准,对于希望同时测量具有复杂位置度孔系轴线的情况,尚未找到理想的测量方法;另外,由于系统结构限制亦不适用于非完整孔的轴线测量。

2) 设计的大直径孔轴线测量系统具备高度集成化、信息化等特点,且具备一定的柔性。本测量装置设计为嵌入式最小系统,数据传输采用蓝牙无线通讯,便于携带和拆装。同时测量装置可通过更换不同型号卡爪或激光测距传感器,适用多种规格孔的轴线现场测量。

#### 参考文献:

- [1] 张开富,史越,骆彬,等. 大型飞机装配中的高精度测量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 52-69.  
ZHANG Kaifu, SHI Yue, LUO Bin, et al. Research progress of high precision measurement technology in large aircraft assembly [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 52-69. (in Chinese)
- [2] CHEN M Q, XIA J Y, HUANG R Y, et al. Case-based reasoning system for aeroengine fault diagnosis enhanced with attitudinal choquet integral[J]. Applied Sciences, 2022, 12(11): 5696.
- [3] 胡成昕,刘心宇,刘广东. 三坐标测量机在航空航天飞行器零部件检测中的应用[J]. 机械工程师, 2022(9): 141-143.  
HU Chengxin, LIU Xinyu, LIU Guangdong. Application of CMM in the inspection of aerospace vehicle parts [J]. Mechanical Engineer, 2022(9): 141-143. (in Chinese).
- [4] 胡毅,黄炜,胡鹏浩,等. 自驱动关节臂坐标测量机模块化关节设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 2021-2029.  
HU Yi, HUANG Wei, HU Penghao, et al. Design of modular articulation in self-driven AACMM[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 2021-2019. (in Chinese).
- [5] 袁明辉,郭天太. 光电检测技术的发展趋势及应用前景[J]. 科技风, 2009(6): 77.  
YUAN Minghui, GUO Tiantai. The development trend and application prospects of photoelectric detection technology [J]. Technology Wind, 2009(6): 77. (in Chinese)
- [6] 邸志刚,沈萌萌,贾春荣,等. 激光测距技术研究现状及发展趋势[J]. 激光杂志, 2023, 44(8): 1-8.  
DI Zhigang, SHEN Mengmeng, JIA Chunrong, et al. Laser distance measurement technology research status and development trend [J]. Laser Journal, 2023, 44(8): 1-8. (in Chinese)
- [7] 赵凯,刘凤丽,郝永平,等. 基于PSD的激光位移传感器位置补偿[J]. 光电技术应用, 2022, 37(1): 74-78.  
ZHAO Kai, LIU Fengli, HAO Yongping, et al. Position compensation of laser displacement sensor based on PSD [J]. Electro-Optic Technology Application, 2022, 37(1): 74-78. (in Chinese)
- [8] 高艳玲,揭琳锋. 基于PSD的测距系统设计与实验研究[J]. 科技创新与生产力, 2022(11): 19-21.  
GAO Yanling, JIE Linfeng. Design and experimental research of distance measurement system based on PSD [J]. Sci-Tech Innovation and Productivity, 2022(11): 19-21. (in Chinese).
- [9] SHAN Y Y, QIN M, CHEN S Q. The design and experiment of a two-dimensional position sensitive detecting (PSD) sensor based on avalanche breakdown [J]. Key Engineering Materials, 2014, 609/610: 1094-1099.
- [10] MÄKYNEN A, RUOTSALAINEN T, RAHKONEN T, et al. CMOS-compatible position-sensitive devices (PSDs) based on photodetector arrays [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2003, 105(3): 261-270.
- [11] 肖福磊,葛兴国,陶忠祥. 一种基于双面型PSD的信号处理电路的设计[J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19(16): 182-183.  
XIAO Fulei, GE Xingguo, TAO Zhongxiang. A design of signal processing circuit based on the Duo-lateral PSD [J]. Journal of Library and Information Science, 2009, 19(16): 182-183. (in Chinese)
- [12] SALEHI B, JARAHIZADEH S, SARAFRAZ A. An improved RANSAC outlier rejection method for UAV-derived point cloud [J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4917.
- [13] PARK J I, PARK C H. Harmonic contribution assessment based on the random sample consensus and recursive least square methods [J]. Energies, 2022, 15(17): 6448.