

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.045

飞行器外形面孔垂直度检测技术研究

杨必毅^{1,2}, 齐振超¹, 韩开丞², 韩利亚²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092)

摘要:针对飞行器结构装配过程中孔的垂直度测量存在效率低、工具精度低等问题,从大规模、快速生产和低成本的实际需求出发,结合机械电子技术、接触式测量方法和最小二乘拟合方法提出孔垂直度轴线偏差测量法,设计表面孔垂直度快速检测仪,并对其测量结果开展测量不确定度评定、测量系统分析和对比实验测试。结果表明:测量结果分散性较小;测量系统稳定可靠;与三坐标测量机相比,在 95% 的置信区间,两种设备测量差值为 0.021 2°。

关键词:飞行器外形面;孔垂直度检测;轴线偏差测量法;测量系统分析;测量不确定度评定

中图分类号:V262 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)01-0218-09

Research of Verticality Detection Technology for Aircraft Surface

YANG Biyi^{1,2}, QI Zhenchao¹, HAN Kaicheng², HAN Liya²(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. AVIC Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

Abstract:To address the low efficiency and poor tool accuracy in the verticality measurement of holes in the process of aircraft structure assembly, by combining mechanical and electronic technology, contact measurement method and least square fitting method, proposes the measurement method of hole perpendicularity axis deviation in the light of actual needs of large-scale, rapid production and low cost. The surface perpendicularity rapid detector is designed, and the measurement uncertainty evaluation, measurement system analysis and comparative experimental test on the measurement results are carried out. The results show that the dispersion of measurement results is small, the measuring system is stable and reliable, and the difference between the two devices is 0.021 2 degrees with a 95% confidence interval in comparison with the CMM.

Keywords:aerocraft profile; hole verticality detection; axis deviation measurement method; measurement system analysis; evaluation of measurement uncertainty

0 引言

铆接和螺栓连接是飞行器结构装配的主要连接方式。一般而言,在飞行器结构装配过程中,所需铆钉的数量为 100~200 万件,所需螺栓的数量为 6 万~20 万件^[1]。铆钉和螺栓安装前,需要预制大量不同尺寸、不同精度的连接孔;在制孔过程中,如果连接孔与工件表面的垂直度偏差较大,连接件会发生倾斜,飞行器外表面的一致性将大打折扣,进而影响飞行器的隐身性能^[2]。提高飞行器外表面孔垂直度水平,已成为该制造领域的热点。在航空航天领域,孔垂直度检测是一个难点,检测难题不解决,提升孔垂直度水平将无从谈起。

目前,国内外航空制造商在机体结构装配过程中,外形面上的连接孔主要由操作者使用风动工具,依靠操作经验手工制出,孔垂直度由操作者

技能水平保证^[3]。待连接孔加工完毕后,再由检验人员使用塞尺检查标准件端面与外形面的间隙值,然后间接计算出孔中心轴线与安装面的夹角,进而换算出孔的垂直度。该检测方法属于“事后验尸”,检测效率低且精度无法保证。

毕运波等^[4]将三维测量向二维测量转换,并提出了一种基于视觉测量的沉头孔垂直度自动化检测方法,该方法所得沉头孔垂直度的平均视觉测量误差约为 0.03°。杨超等^[5]设计了一种基于双相机对称测量法的螺纹孔垂直度自动检测系统,该系统测量精度能够达到 0.100 mm。田正芳等^[6]利用三坐标测量机对汽车减速器壳体孔轴线垂直度进行测量,并提出了垂直度检测与评价的合理方案。以上 3 种方案在一定程度上解决了孔垂直度测量难题,但是均不能实现大规模和快速检测。如:视觉测量方案测量精度低,成本高,数

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB1707403);江苏省自然科学基金资助项目(BK20202007)

第一作者简介:杨必毅(1988—),男,重庆人,工程师,硕士,研究方向为飞机装配与检测技术,1073455461@qq.com。

据后处理难度大,对测量人员的技能水平要求较高;三坐标测量方案检测效率低,成本高,检测设备对场地要求高,不能满足大规模的检测需求。

在此背景下,如何实现孔垂直度的快速检测,已成为航空航天领域需要研究解决的一个难题。本文提出了孔垂直度轴线偏差测量法,并设计了一款适应当前飞行器结构装配工况的孔垂直度检测工具。该工具主要采用机械电子技术来着力解决企业飞行器制造过程中对结构件的连接孔垂直度准确、高效测量的问题。

1 外形面孔垂直度检测方案

垂直度是一个重要的几何量,研究对象主要包括线对线、线对面、面对线、面对面^[7]等。外形面孔垂直度主要是研究孔轴线与曲面法平面的角度关系^[8]。假设孔的实际轴线为 L_2 ,理论轴线为 L_3 ,实际轴线在待测孔法平面的投影线为 L_5 ,实际轴线 L_2 与理论轴线 L_3 之间的夹角 α 称为偏差角,投影线 L_5 与理论轴线 L_3 之间的夹角 β 称为待测角。用 β 表征外形面待测孔的垂直度,孔垂直度测量示意如图1所示。

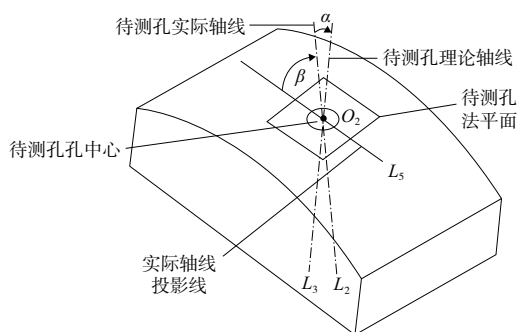


图1 孔垂直度测量示意

孔垂直度轴线偏差测量法是一种以机械电子技术、接触式测量方法和最小二乘拟合方法^[9]相结合的孔垂直度检测方法;依据孔垂直度轴线偏差测量法开发的表面孔垂直度快速检测仪(SHPQI)主要由探针、旋转衬套、齿轮组件、步进电机、数显百分表和单片机等通用组件组成,如图2所示。

2 孔垂直度计算

2.1 孔垂直度计算建模

构建曲面孔垂直度测量空间模型,如图3所示。

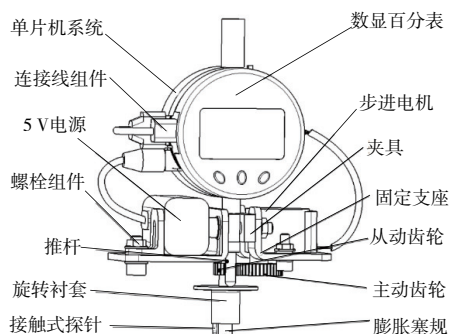


图2 检测工具结构图

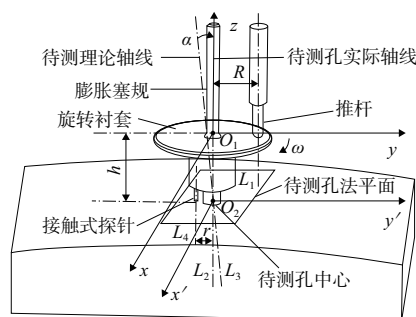


图3 垂直度测量空间模型

设轴线 L_3 和 L_2 的单位法向量分别为 $\mathbf{a}(a_1, a_2, a_3)$ 、 $\mathbf{b}(b_1, b_2, b_3)$,轴线 L_3 和 L_2 的夹角即为向量 $\mathbf{a}$ 和 $\mathbf{b}$ 的夹角,则轴线 L_3 和 L_2 的夹角 α 为

$$\alpha = \arccos \left(\frac{a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} \times \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2}} \right) \quad (1)$$

接触式探针在待测曲面上的运动轨迹在 $x'O_2y'$ 平面的投影为半径为 r 的圆,其轨迹如式(2)所示。

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (2)$$

旋转衬套和接触式探针的运动方向为顺时针。当步进电机转动一个小角度,旋转衬套和接触式探针就会相应转动一个小角度,接触式探针在待测曲面上就会采集一个坐标点,设采集点依次为 $P_i(i=0,1,\dots,n)$ 。

P_i 的坐标值如下:

$$\left[r \cos \left(\frac{Z_1}{Z_2} \Phi_i \right), r \sin \left(\frac{Z_1}{Z_2} \Phi_i \right), d_i \right] \quad (3)$$

式中: $i=0,1,2,\dots,n$; Z_1 、 Z_2 分别为表面孔垂直度快速检测仪(SHPQI)的主动齿轮和从动齿轮齿数; Φ_i 为步进电机转动的累计角度值; d_i 为 Φ_i 对应位置上百分表采集的位移值。当 $i=0$ 时, $\Phi_0=0$, $d_0=0$,此时接触式探针的轴线 L_4 位于 $x'O_1z$ 平面内,探针的接触点在直线 $x'O_2$ 上,还未开始运

动,表面孔垂直度快速检测仪(SHPQI)还未开始工作。

一般而言,飞行器外形面的曲率较小,外表面的制孔区域较小,在计算待测孔理论轴线的法向量时,可将待测孔附近的曲面当作一系列小平面的,然后从该平面系列中找出最佳小平面 γ 。因此,求取待测孔理论轴线 L_3 的法向量 $\mathbf{a}$,就转化为求最佳小平面 γ 的法向量,如图4所示的待测孔法向量计算原理。

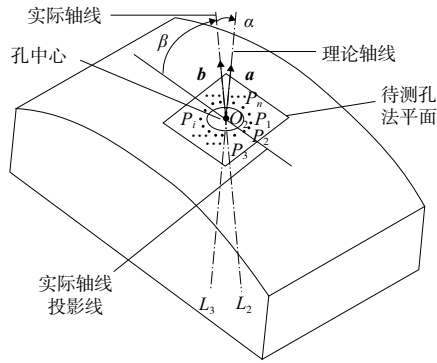


图4 待测孔法向量计算原理图

在空间坐标系 O_1xyz 中,设该系列小平面的方程如式(4)所示。

$$Ax+By+Cz+D=0 \quad (4)$$

在步进电机的带动下,接触式探针在待测曲面上共采集到 $n(n \geq 5)$ 个坐标点,并构建矩阵 $\mathbf{V}$ 如下:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} r \cos\left(\frac{Z_1}{Z_2} \Phi_1\right) & r \sin\left(\frac{Z_1}{Z_2} \Phi_1\right) & d_1 & 1 \\ r \cos\left(\frac{Z_1}{Z_2} \Phi_2\right) & r \sin\left(\frac{Z_1}{Z_2} \Phi_2\right) & d_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r \cos\left(\frac{Z_1}{Z_2} \Phi_i\right) & r \sin\left(\frac{Z_1}{Z_2} \Phi_i\right) & d_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r \cos\left(\frac{Z_1}{Z_2} \Phi_n\right) & r \sin\left(\frac{Z_1}{Z_2} \Phi_n\right) & d_n & 1 \end{bmatrix}_{n \times 4} \quad (5)$$

将式(4)中系数 A, B, C, D 看作变量,并令向量 $\mathbf{K} = [A \ B \ C \ D]^T$,则式(4)转化为式(6):

$$\mathbf{VK} = 0 \quad (6)$$

显然式(6)为超定方程,求解如下:令 $S_i = \sum_{j=1}^4 v_{ij} \cdot k_j$,其中, $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3, 4; v_{ij}, k_j$ 分别是矩阵 $\mathbf{V}$ 和向量 $\mathbf{K}$ 对应位置的元素。按最

小二乘法原则,则式(6)的误差平方和为

$$Q = \sum_{i=1}^n S_i^2 = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^4 v_{ij} \cdot k_j \right]^2 \quad (7)$$

将 Q 看作 j 个自变量 k 的二次函数,显然函数 Q 是连续的;分别对 k_j 求偏导数,当误差平方和 Q 最小时,对应位置的偏导数如式(8)所示。

$$\frac{\partial Q}{\partial k_j} = 0, \quad (j=1, 2, 3, 4) \quad (8)$$

即

$$\frac{\partial Q}{\partial k_j} = 2 \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^4 v_{ij} \cdot v_{ij} \right) k_j = 0 \quad (9)$$

即

$$\mathbf{V}^T \mathbf{VK} = 0 \quad (10)$$

式中: $\mathbf{V}^T \mathbf{V}$ 为 4×4 方阵; $\mathbf{K}$ 为 4×1 向量。式(10)的正规方程如下:

$$\mathbf{V}^T \mathbf{V} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

即超定方程式(6)的最优近似解为 $\mathbf{K} = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]$ 。

则小平面 γ 的方程为

$$k_1 x + k_2 y + k_3 z + k_4 = 0 \quad (12)$$

待测孔理论轴线 L_3 的法向量,即被测孔的理论法向量 $\mathbf{a}$ 为

$$\mathbf{a} = (k_1, k_2, k_3) \quad (13)$$

在坐标系 O_1xyz 中,待测孔的实际轴线 L_2 的法向量 $\mathbf{b}$ 可取为

$$\mathbf{b} = (0, 0, 1) \quad (14)$$

根据式(1)、式(13)和式(14),可以计算出待测孔的垂直度偏差角 α ,如式(15)所示。

$$\alpha = \arccos\left(\frac{k_3}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2}}\right) \quad (15)$$

则该待测孔的垂直度待测角 β 为

$$\beta = 90^\circ - \arccos\left(\frac{k_3}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2}}\right) \quad (16)$$

2.2 孔垂直度计算模型修正

根据式(10)与矩阵 $\mathbf{V}$ 可知,式(16)的结果 β 中必定含有变量 r, Φ_i, Z_1, Z_2, d_i 。其中,位移 d_i 受工件表面粗糙度影响,如果待测工件表面太过粗糙,测量结果必定受到影响^[10];根据工程经验,该影响可忽略。此外,主动齿轮与从动齿轮的齿数 Z_1, Z_2 可以从齿轮中直接读出并用于计算,齿数 Z_1, Z_2 对结果没有影响;即仅有 r, Φ_i 对最终的

测量结果有较大影响。

1) 轴线 L_2 与轴线 L_4 的距离 r 修正

在实际测量过程中,由于微小间隙的存在,膨胀塞规轴线 L_2 与接触式探针轴线 L_4 距离 r 的实际值,必定会发生变化,进而影响测量结果。

令旋转衬套上端面与接触式探针的接触点之间的距离为 h ; 旋转衬套下端面与旋转衬套上端面的距离为 h_1 ; 旋转衬套与膨胀塞规的间隙为 J , 其中膨胀塞规与旋转衬套两侧的间隙分别为 J_1 、 J_2 , 其中 $J_1 + J_2 = J$; 膨胀塞规的半径为 r_0 , 旋转衬套理论上端面与实际端面的偏差角为 δ ; 并建立如图 5(a) 所示的点位偏差模型。

从图 5(a) 可以明显看出,工件表面所采集点的坐标值到膨胀塞规轴线 L_2 的实际距离 r' 比理论值 r 大,即

$$r' = r + \Delta r \quad (17)$$

式中 Δr 即为待修正参数。

从图 5(a) 中可以分析得出,由于旋转衬套与

膨胀塞规之间存在微小间隙 J , 导致轴线 L_2 和 L_4 出现偏转, 偏转角度为偏差角 δ , 即图 5(c) 中线段 FH 和 EK 的夹角为 δ 。

由于旋转衬套的旋转是小角度旋转, 将旋转衬套的中心点 D 近似当作旋转中心; 根据图 5(b) 有如下关系:

$$\angle ADB = \angle ADC_2 - \angle BDC_2 \quad (18)$$

$$\angle ADC_2 = \arcsin \frac{AC_1}{AD} \quad (19)$$

$$\angle BDC_2 = \arcsin \frac{BC_2}{BD} \quad (20)$$

则:

$$\angle ADB = \arcsin \frac{AC_1}{AD} - \arcsin \frac{BC_2}{BD} \quad (21)$$

由于 $AC_1 = r_0 + J_1$, $BC_2 = r_0$, 则

$$AD = BD = \sqrt{\left(\frac{h_1}{2}\right)^2 + (r_0 + J_1)^2} \quad (22)$$

即

$$\delta = \angle ADB = \arcsin \frac{r_0 + J_1}{\sqrt{\left(\frac{h_1}{2}\right)^2 + (r_0 + J_1)^2}} - \arcsin \frac{r_0}{\sqrt{\left(\frac{h_1}{2}\right)^2 + (r_0 + J_1)^2}} \quad (23)$$

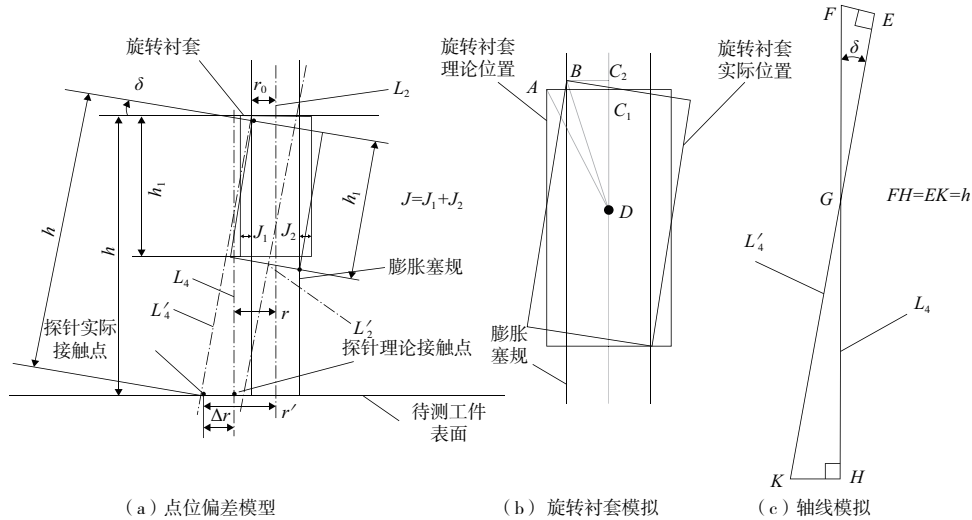


图 5 点位偏差模型

根据图 5(c) 有:

$$EG = FG \cdot \cos \delta \quad (24)$$

$$GK = \frac{KH}{\cos \delta} \quad (25)$$

$$FG + GH = h \quad (26)$$

$$EG + GK = h \quad (27)$$

$$KH = \Delta r \quad (28)$$

联立式(16)、式(22)—式(26), 可得

$$\Delta r = KH = \frac{h \sin \delta}{1 + \cos \delta} \quad (29)$$

一般而言, $J_1 = J_2 = 0.5J$; 显然, 偏差角 δ 与微小间隙为 J 成正相关, J 值越大, 偏差角 δ 越大, Δr 越大, 测量结果误差越大。 J 值的大小, 由膨胀塞规和旋转衬套的配合关系确定; 根据测量设备的

工作原理、孔轴配合原则和经济性原则,综合考虑,此处的配合选择 $\frac{H}{c}$,则轴线 L_2 与轴线 L_4 的距离 r 修正为

$$r' = r + \frac{h \sin \delta}{1 + \cos \delta} \quad (30)$$

式中偏差角 δ 由式(23)确定。

2) 步进电机实际输出角度 Φ_i 修正

由于步进电机和齿轮的制造原因,步进电机实际的旋转角度与理论值有一定误差,一般为5%^[11]。这会使得步进电机实际输出的角度 Φ_i 出现误差,进而对垂直度测量结果产生影响。

衬套的旋转角度通过步进电机驱动齿轮组件进行控制。在垂直度测量过程中,当步进电机接收到一个指定脉冲信号时,电机将按照设定方向转动一个固定的角度,电机转动的速度通过控制脉冲频率实现。

综合考虑,垂直度检测设备选取的电机型号为28BYJ-48;步进角度为 5.625° ;减速比为1:64。对电机进行拆解,重新计算步进电机的减速比,可

得到如下结果: $i = \frac{32}{9} \times \frac{22}{11} \times \frac{26}{9} \times \frac{31}{10} \approx 63.6839$ 。

由上可知步进电机转动角度的误差为0.49%,则步进电机实际输出的角度 Φ_i 修正为

$$\Phi'_i = 0.9950 \Phi_i \quad (31)$$

3 系统集成

3.1 数显百分表通讯接口协议

选用的QFH-312A型号百分表自带1个Mini-USB数据输出接口,如图6所示。5个针脚输出3路信号,时钟信号CLK,数据信号DATA和地线GND。

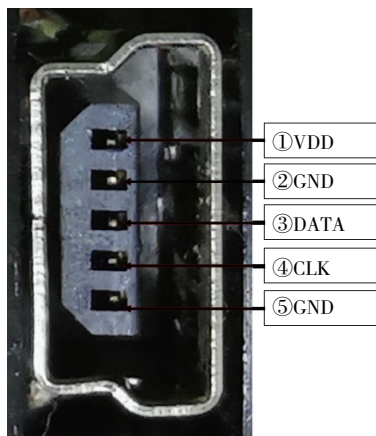


图6 数据接口示意图

CLK由28个窄脉冲组成的1组信号,宽度为5ms,每1s传递8个数据,每组数据信号间隔120ms。数显百分表的数据输出信号在CKL的下降沿有效,每组数据由28个数据位(bit)组成,首先传输数据低位。通过示波器调试,百分表的Mini-USB接口信号显示如图7所示(本刊为黑白印刷,相关疑问咨询作者)。

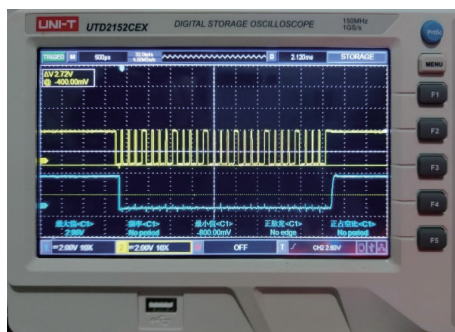


图7 USB信号示意图

3.2 单片机的选择与应用

工具的控制核心是STC12C5A16S2单片机。该型单片机是STC公司生产的新一代高速/低功耗/超强抗干扰的单片机,指令代码完全兼容传统8051单片机,但速度快8~12倍。片上集成60K的Flash程序存储空间,1280字节的SRAM,2个全双工串行通信接口为开发提供了便利。

3.3 单片机与数显百分表数据交换

单片机接收数显百分表数据主要通过外部中断0函数实现。当串口1的P3.1口输出指令驱动步进电机带动衬套旋转,P3.0接收角度数据 Φ_i 同时触发串口2的P1.2口接收百分表的位移数据,收到的数据以数组的形式进行存储。然后,单片机系统将采集到的数据式(32),通过式(11)、式(16)、式(30)和式(31),最终计算出待测孔的待测角 β ,进而表征待测孔的垂直度。

$$\begin{cases} x[n] = \left\{ r \cos\left(\frac{z_1}{z_2} \Phi_1\right), r \cos\left(\frac{z_1}{z_2} \Phi_2\right), \dots, r \cos\left(\frac{z_1}{z_2} \Phi_n\right) \right\} \\ y[n] = \left\{ r \sin\left(\frac{z_1}{z_2} \Phi_1\right), r \sin\left(\frac{z_1}{z_2} \Phi_2\right), \dots, r \sin\left(\frac{z_1}{z_2} \Phi_n\right) \right\} \\ z[n] = \{d_1, d_2, \dots, d_n\} \end{cases} \quad (32)$$

4 测量系统分析与不确定评定

4.1 测量系统分析

测量系统分析是检查以该测量设备为中心搭

建的测量系统是否可靠。测量系统是否可以接受,取决于测量系统的环境和目的,对于以分析过程为目的测量系统,接受准则如下^[12]:

- 1) 误差低于 10%, 测量系统可接受;
- 2) 误差在 10%~30% 之间, 考虑应用的重要性、测量装置的成本、维修的成本等可能是可接受的;
- 3) 误差超过 30%, 测量系统不可接受;
- 4) 过程能被测量系统区分级数 (distinct data categories, N_{DC}), $N_{DC} \geq 5$ 。

鉴于飞机结构装配中装配部位大部分是型面, 实验将结构简化, 用铆钉将 2 块带弧面的铝板铆接在一起模拟结构装配场景并按实际工况手工制出 10 个 $\Phi 6$ 的螺栓孔。运用 Minitab 创建量具 R&R 研究工作表, 并让 3 名检验人员使用便携式

测量工具按照表格设计的随机顺序分别对 10 个 $\Phi 6$ 孔的垂直度值进行测量, 如图 8 所示。

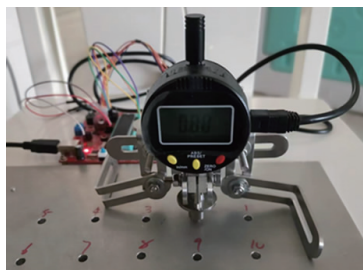


图 8 验证测量

对测量的结果进行测量系统分析, 如图 9 所示, 测量系统的精度与总过程偏差的百分比 (gauge repeatability & reproducibility, GR&R) 等于 20.82%, $N_{DC}=6$, 测量系统可以接受。

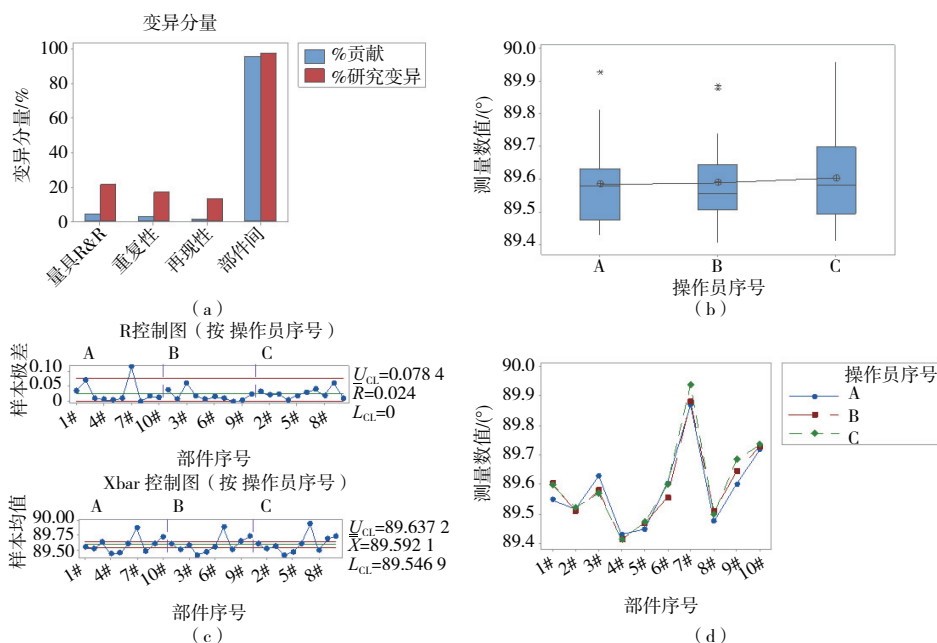


图 9 测量系统分析结果

4.2 测量不确定度评定

测量不确定度是衡量测量结果分散性的一个参数。测量不确定度分为 A 类评定和 B 类评定两种方式^[13], 在不确定度的评定中两种方式可以同时采用, 也可以独立采用, 只要评定过程不遗漏和不重复。A 类评定方式主要采用重复性测量的标准方差作为 A 类不确定度的来源, 该方式涵盖多项 B 类方法评定的不确定度分量。为简化操作步骤, 本次测量不确定度的评定采用 A 类进行评定, 其评定模型如下:

$$u_{xx} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \times g \quad (33)$$

式中: u_{xx} 为不确定度分量; S_x 为样本标准偏差; n 为测量次数; g 为安全因子。

根据方程式 (34) 制作曲面标块, 在曲面上制出孔垂直度为 90° 的 5# 和 6# 高锁螺栓 I、II、III 级孔。

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = 22\ 500 \\ -25 \leq x \leq 25 \\ -30 \leq y \leq 30 \end{cases} \quad (34)$$

使用功能测试样机对孔的垂直度进行测量, 如图 10 所示。对每个高锁螺栓孔的垂直度进行 5 次测量, 测量结果如表 1 所示。根据 JJF1130—2005《几何量测量设备校准中的不确定度评定指

南》,当测量次数为 5 时,安全因子 $g = 1.4$ 。由式(33)计算得出 u_{xx} 的最大值:

$$u_{xx} = \frac{0.007\ 861\ 298}{\sqrt{5}} \times 1.4 = 0.004\ 921\ 951\ 1 \quad (35)$$

表 1 孔垂直度测量结果

编号	直径/mm	测量值/(°)					平均值/(°)	标准偏差/(°)
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次		
5#(Ⅰ级)	3.968	89.847	89.857	89.843	89.840	89.837	89.845	0.007 758 866
5#(Ⅱ级)	4.365	89.953	89.960	89.949	89.948	89.941	89.950	0.006 978 539
5#(Ⅲ级)	4.762	89.891	89.894	89.900	89.908	89.907	89.903	0.007 582 875
6#(Ⅰ级)	5.159	89.919	89.909	89.903	89.909	89.898	89.907	0.007 861 298
6#(Ⅲ级)	5.556	89.856	89.868	89.861	89.874	89.864	89.867	0.006 841 053



图 10 垂直度测量

5 对比实验

5.1 实验对象

为验证表面孔垂直度快速检测仪(SHPQI)的测量准确度,将设计对比实验与当下主流的测量设备进行对比验证,以获取 SHPQI 的测量性能。由于三坐标测量机精确度高、重复性好和通用性强的特点,在航空航天业,常用于数控零件、结构件或部件的几何尺寸和形位公差等精密测量,其测量精度优于0.006 mm。实验将选取三坐标测量机与表面孔垂直度快速检测仪(SHPQI)进行对比实验。经过筛选,本实验所选取的测量设备如表 2 所示。

表 2 选取的测量设备

序号	测量设备名称	制造商	测量不确定度	测量系统是否可信
1	蔡司桥式三坐标	卡尔蔡司	(1.7+3L/1 000) μm	是
2	表面孔垂直度快速检测仪	自制	4.921 μm	是

5.2 实验方案

分别利用三坐标测量机和表面孔垂直度快速检测仪(SHPQI),依次对平板零件上 10 个公称直径为 6 mm 的孔进行垂直度检测。同一设备对每个孔测量 3 次,然后求取平均值作为测量结果;最后对两种测量工具的检测结果,进行双样本 T 检验和双方差检验,分析两组数据的结果有无明显差异。

5.3 实验结果

经过测量,两种测量设备的测量数据如表 3 所示。将三坐标机所测数据记为 D1,将表面孔垂直度快速检测仪(SHPQI)所测数据记为 D2;然后利用 Minitab 软件^[14]对数据 D1、D2 进行分析,结果如图 11 所示。

表 3 测量数据

孔编号	D1/(°)	D2/(°)
1#	89.590	89.581
2#	89.588	89.551
3#	89.549	89.624
4#	89.480	89.428
5#	89.487	89.447
6#	89.540	89.608
7#	90.050	89.927
8#	89.503	89.475
9#	89.540	89.609
10#	89.847	89.712

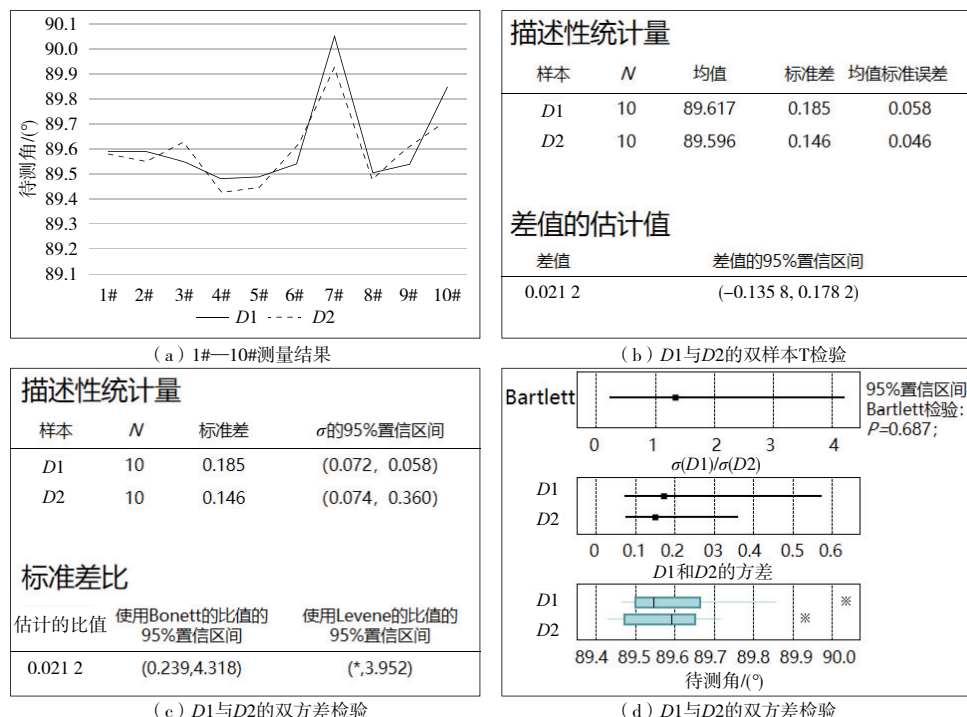


图 11 D1 与 D2 数据分析结果

从图 11(a) 中可见, $D1$ 与 $D2$ 的数据呈现交替伴随现象, $D2$ 相对 $D1$ 的跟随性较好, 说明两种检测工具对 1#—10# 孔进行垂直度检测时, 表面孔垂直度快速检测仪相对于三坐标测量机的测量跟随性较好, 说明表面孔垂直度快速检测仪未出现异常偏差情况, 测量结果较为合理。

从图 11(c) 和图 11(d) 可见, 在置信水平 95% 的条件下, 对 $D1$ 和 $D2$ 采用 Bartlett 检验^[15], 以检查两者数据的方差是否有显著差异, 检验结果为: Bartlett 检验: $P_{\text{Bartlett}} = 0.687 > 0.050$ 。说明 $D1$ 和 $D2$ 两组数据的方差没有明显变化; 即: 使用表面孔垂直度快速检测仪对 1#—10# 孔进行垂直度检测时, 测量结果的波动性与三坐标测量机的测量结果的波动性相当。

从图 11(b) 中可见, 对 $D1$ 和 $D2$ 进行描述性统计, 分别计算各自样本的均值、标准差和均值标准误差, 然后进行双样本 T 检验^[16], 以判定两组数据的均值是否有显著差异, 检验结果为: 在置信水平为 95% 的条件下, 两组数据均值的差值的置信区间为 $[-0.135\ 8, 0.178\ 2]$, 两者差值为 $0.021\ 2^\circ$ 。说明在测量需求或测量精确度劣于 $0.021\ 2^\circ$ 的测量场景下, 表面孔垂直度快速检测仪与三坐标测量机测量结果的差值没有显著差异。即, 在测量精确度劣于 $0.021\ 2^\circ$ 的测量场景下, 表面孔垂直度快速检测仪与三坐标测量机的测量结果差值与

测量波动性没有显著差异; 在置信水平为 95% 的条件下, 两种测量设备测量差值的置信区间为 $[-0.135\ 8, 0.178\ 2]$, 差值为 $0.021\ 2^\circ$ 。

6 结语

1) 表面孔垂直度快速检测仪 (SHPQI) 将机械电子技术、接触式检测方法和最小二乘拟合方法进行了结合, 利用接触式探针、旋转衬套、齿轮组件、步进电机、数显百分表和单片机等通用组件完成了垂直度检测设备的研发, 并进行了测量系统分析和对比实验。经验证, 表面孔垂直度快速检测仪 (SHPQI) 是一种能兼顾测量精确度、检测效率 and 低成本的便携式垂直度检测工具, 能够应用于大规模、快速生产和低成本模式下的垂直度检测。

2) 在测量系统方面, 结果表明: 测量不确定度 $P_{\text{Bartlett}} = 0.687 > 0.050$, 测量结果可靠; 测量系统的精度与总过程偏差的百分比为 20.82%, 可区分级数 $N_{\text{DC}} = 6$, 测量系统稳定可接受。根据 1/3 测量方案可靠性评判原则, 一般的测量活动测量设备的示值允差应不大于公差 1/3。飞机的制孔垂直度误差要求误差不大于 1° , 工具测量示值允差小于被测对象误差的 1/3, 满足生产实际应用需求。

3) 在对比实验方面, 经过与三坐标测量机对

比,在测量精确度劣于 $0.021\ 2^\circ$ 的测量场景下,表面孔垂直度快速检测仪(SHPQI)与三坐标测量机的测量结果差值与测量波动性没有显著差异;在置信水平为 95% 的条件下,两种测量设备测量差值的置信区间为 $[-0.135\ 8, 0.178\ 2]$,差值为 $0.021\ 2^\circ$ 。

参考文献:

- [1] 张宏伟,徐春龙,武耀罡.飞机机身螺栓连接多钉载荷合理分配研究[J]. 计算机仿真,2019,36(6):83-86.
- [2] LI Y, WU Z, HUANG P L, et al. A new method for analyzing integrated stealth ability of penetration aircraft[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(2): 187-193.
- [3] 袁红璇.飞机结构件连接孔制造技术[J]. 航空制造技术,2007,50(1):96-99.
- [4] 毕运波,徐超,樊新田,等.基于视觉测量的沉头孔垂直度检测方法[J]. 浙江大学学报(工学版),2017,51(2):312-318.
- [5] 杨超,吴瑜娜.一种基于双相机对称测量法的螺纹孔垂直度自动检测系统[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版),2020,34(1):82-88.
- [6] 田正芳,陈胜迁,张世国.汽车减速器壳体垂直度公差检测与评价[J]. 机械制造,2021,59(11):72-75.
- [7] 党威武,李会荣,李慎安.异面间垂直度的检测装置设计与误差分析[J]. 自动化技术与应用,2020,39(8):

111-114.

- [8] 王建.连接孔垂直度误差对复合材料连接性能的影响[D]. 大连:大连理工大学,2016.
- [9] 庞静茹,谭景升,牛亦琰,等.基于最小二乘拟合波矢估计的角位移测量方法[J]. 光学技术,2022,48(5):589-596.
- [10] 蒋晓耕,孟祥冬,杨肖,等.表面粗糙度对激光位移传感器测量精度的影响和补偿[J]. 工具技术,2022,56(12):156-158.
- [11] 段长超,刘青正,韩震宇,等.双通道闭环步进电机控制器设计[J]. 机电工程,2020,37(8):977-982.
- [12] HAN K G, 测量系统分析(MSA)参考手册[Z]. 3版,[S.I.]:AIAG,2002.
- [13] JJF1059.1—2012 测量不确定度评定与表示[S].
- [14] 陈凡荣,佟毅,刘海滨,等.利用 Minitab 软件优化燃料乙醇生产发酵条件[J]. 酿酒科技,2020(4):65-69.
- [15] 王娅茹,唐明.基于 Bartlett 和多分类 F 检验侧信道泄露评估[J]. 通信学报,2021,42(12):35-43.
- [16] 刘甲明,李静,梁建山.利用 Minitab 软件进行钢管壁厚度的双样本 T 检验[J]. 山东冶金,2018,40(4):53-54,56.

收稿日期:2023-06-05

(上接第 205 页)

- [2] WANG J X. Fuzzy adaptive repetitive control for periodic disturbance with its application to high performance permanent magnet synchronous motor speed servo systems[J]. Entropy, 2016, 18(9):261.
- [3] PETROVIC V, ORTEGA R, STANKOVIC A M, et al. Design and implementation of an adaptive controller for torque ripple minimization in PM synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(5):871-880.
- [4] LI S H, YANG J, CHEN W H, et al. Generalized extended state observer based control for systems with mismatched uncertainties [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(12):4792-4802.
- [5] YANG C B, SONG B, XIE Y L, et al. Stable simultaneous inertia and disturbance torque identification for SPMSM drive systems subject to mismatched rotor flux linkage[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(2):2445-2462.
- [6] 付兴贺,顾胜东,何航,等.基于新型串联内模扩张状态观测器的 PMSM 齿槽转矩补偿控制方法[J]. 中国电机工程学报,2022,42(23):8729-8740.

- [7] ZHANG W J, CAO B W, NAN N, et al. An adaptive PID-type sliding mode learning compensation of torque ripple in PMSM position servo systems towards energy efficiency[J]. ISA Transactions, 2021, 110:258-270.
- [8] ZHANG W J, NAN N, YANG Y F, et al. Force ripple compensation in a PMLSM position servo system using periodic adaptive learning control[J]. ISA Transactions, 2019, 95:266-277.
- [9] ZHAO S, TAN K K. Adaptive feedforward compensation of force ripples in linear motors[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(9):1081-1092.
- [10] LI X J, WANG Y G. Sliding-mode control combined with improved adaptive feedforward for wafer scanner [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 103:105-116.
- [11] LU S W, TANG X Q, SONG B, et al. Identification and compensation of force ripple in PMSLM using a JITL technique[J]. Asian Journal of Control, 2015, 17(5):1559-1568.

收稿日期:2023-10-11