

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.03.007

自动钻铆装备的激光测量系统法向误差研究

沈 烨¹, 田 威¹, 李 波¹, 廖文和¹, 殷 飞²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 航空工业陕西飞机工业有限责任公司, 汉中 723200)

摘要: 飞机装配中铆接部位的孔垂直度直接影响铆钉的连接质量和疲劳寿命, 进而影响飞机的力学性能。为了保证飞机铆接垂直度要求, 必须分析自动钻铆系统法向误差的影响因素。首先, 确定了倾角误差、数学模型的线性误差与法向误差的关系。其次, 给出了激光位移传感器安装参数的选取规律, 并研究了其对位姿标定的影响。最后, 实验验证了安装参数优化后的实际效果。研究结果可为法向测量装置的设计与分析提供理论指导, 对于提升自动钻铆系统的法向精度, 进而保证孔垂直度要求具有重要意义。

关键词: 飞机装配; 自动钻铆; 法向测量; 误差分析; 布局优化

中图分类号: V262.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)03-0411-08

Research on Normal Error of Laser Measuring System for Automatic Drilling and Riveting Equipment

SHEN Ye¹, TIAN Wei¹, LI Bo¹, LIAO Wenhe¹, YIN Fei²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Aviation Industry Shaanxi Aircraft Industry Co. Ltd., Hanzhong 723200, China)

Abstract: The joint quality and fatigue life of rivets can be directly impacted by the verticality of holes at riveting parts in aircraft assembly. Then, it can further affect the mechanical properties of the aircraft. To improve the verticality of holes, factors influencing the normal accuracy of automatic drilling and riveting systems need to be analyzed. First, the relationship among the inclination error, the linear error of the mathematical model, and the normal error is determined. Then, the selection rules of the installation parameters of the laser displacement sensor are given, and the influences towards the pose calibration are studied. Finally, an experiment is designed to show real performance after optimizing the laser installation parameters. The research results can provide theoretical guidance for the design and analysis of the normal measuring device, and have a certain significance for improving the normal precision and the verticality of the hole in the automatic drilling and riveting system.

Key words: aircraft assembly; automatic drilling and riveting; normal direction measurement; error analysis; layout optimization

随着中国 C919 大飞机和四代机等新型号飞机研制进程的加快, 航空制造业对于飞机制造的质量、效率等方面提出了更高的要求。同时, 随着“工业 4.0”与“智能制造 2025”的提出与推进, 实现飞

机制造的数字化、柔性化和智能化已经成为当前航空制造业发展的必然趋势^[1-3]。工业机器人和数控机床等自动钻铆系统作为飞机数字化制造的核心装备, 在飞机装配中发挥了越来越重要的作用。

基金项目: 国家自然科学基金 (52005254); 江苏省自然科学基金 (BK20190417); 国家重点研发计划 (2018YFB1306800)。

收稿日期: 2021-03-17; **修订日期:** 2021-07-19

通信作者: 田威, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: tw_nj@nuaa.edu.cn。

引用格式: 沈烨, 田威, 李波, 等. 自动钻铆装备的激光测量系统法向误差研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(3): 411-418. SHEN Ye, TIAN Wei, LI Bo, et al. Research on normal error of laser measuring system for automatic drilling and riveting equipment[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(3): 411-418.

铆接是飞机装配使用最多的连接方式,工艺要求严格,孔垂直度是最为关键的技术指标之一。由于自动钻铆系统通过测量拟合出的理论平面法向量与实际制孔部位法向量存在偏差,因此系统的法向精度直接影响孔垂直度,进而影响铆接的质量和寿命。飞机蒙皮、壁板多为曲面,对法向的高精度测量提出了挑战。为了能够准确测量钻孔部位的法向,国内外学者做了大量研究工作,基于激光位移传感器的法向测量技术^[4-6]和结构光视觉测量技术^[7-9]是目前研究较多的两种法向测量方法。Tian等^[10]采用4个激光位移传感器对钻孔区域进行测量并拟合出平面,以平面法向近似代替钻孔部位曲面的法向,并给出了法向调整的数学模型,但其获取理论模型所需参数的过程较为繁琐,需反复更新公式验证效果,工程应用中耗时较长。李永超^[11]也将制孔部位周边曲面近似为平面处理,采用最小二乘法标定了激光位移传感器在刀具坐标系下的位姿,利用激光测距传感器测量计算了法向偏差以调整机器人的位姿,但未考虑激光位移传感器本身的测量误差对法向误差的影响。Rao等^[12]采用结构光投影技术进行曲面的法向测量,提高了大曲率曲面的法向精度和鲁棒性,但其计算与分析复杂,工程应用性较差。Lee等^[13]采用多光束激光探头与电荷耦合器件(Charge coupled device, CCD)相机相结合的方法在三轴平台上测量自由曲面的位置和法向,能够感知曲面的大部分信息,计算出较为准确的法向;其工作原理同基于激光位移传感器的法向测量技术相似,但该方法的目的仅是测量曲面的法向,未给刀具的安装留下空间,加之其测量精度与平台的刚度有关,难以应用到机器人自动钻铆技术中。

尽管结构光视觉测量技术能够较为精确拟合曲面并计算出曲面法向,但由于需要处理大量点云信息,计算效率较低,难以应用于实际工程。因此目前的自动钻铆系统普遍采用的还是基于激光位移传感器的法向测量技术。采用激光位移传感器测量曲面法向,其法向误差受多种因素的影响,包括以平面法向近似替代曲面法向的原理性误差、激光位移传感器的位姿标定误差、激光位移传感器自身的测量误差和待测区域的表面质量等。其中影响激光位移传感器测量精度的因素又主要有景深误差^[14]、倾角误差^[15]、表面颜色^[16]和表面粗糙度^[17]等,孙彬等^[14]研究了景深和倾角对测量精度的影响,并得出了量化的误差模型;雷斯聪等^[18-19]针对基于激光位移传感器的法向测量技术,分析了以平面法向近似替代复杂曲面孔位法向时存在原理性误差的问题。Mentin等^[20]从传

感器和激光二极管的定位不确定性入手,采用粒子群算法确定光源位置,降低了系统的总体测量误差。

为了优化法向测量模块的安装布局、提高法向精度,分析了激光位移传感器的测量精度对法向误差的影响,并在此基础上研究激光位移传感器的安装位置、安装角度、测量距离和法向调整角度对法向误差的影响程度。本文的主要工作如下:

(1)定量分析了传感器测量误差对孔位法向误差、位姿标定误差的影响,根据倾角误差产生的原理,构造了测量误差模型。

(2)分析了位姿标定误差并得出了误差分布规律。

1 激光法向测量技术

1.1 制孔部位法向测量原理

基于激光位移传感器的法向测量原理如图1所示,在刀尖点建立了刀具坐标系 $OXYZ$,坐标系原点与刀尖点重合, Z 轴与刀具轴线重合,刀具的进给方向为 Z 轴正方向。 $M_i(i=1, 2, 3, 4)$ 为4个激光位移传感器的测量零点, $N_i(i=1, 2, 3, 4)$ 为激光束在钻孔表面的投射点, $M_iN_i(i=1, 2, 3, 4)$ 为激光束方向, G 为待钻孔位置, \vec{GP} 为孔位法向, θ 为孔位法向与刀具轴线的夹角。

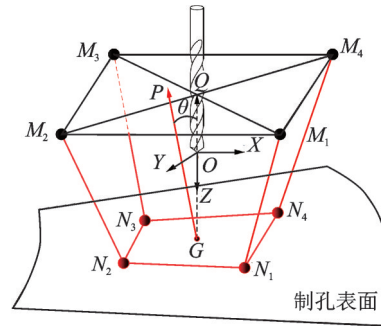


图1 法向测量示意图

Fig.1 Schematic of normal direction measurement

采用平面模板法标定激光位移传感器的位姿,经过标定后,激光位移传感器的测量零点 $M_i(i=1, 2, 3, 4)$ 在刀具坐标系 $OXYZ$ 下的坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,激光束方向 $M_iN_i(i=1, 2, 3, 4)$ 的单位矢量为 (a_i, b_i, c_i) 。利用4个激光位移传感器测得的数值 $d_i(i=1, 2, 3, 4)$ 即可得到投射点 N_i 在刀具坐标系 $OXYZ$ 下的坐标 $(x_i + d_i a_i, y_i + d_i b_i, z_i + d_i c_i)$ 。采用特征值法可利用4个投射点 N_i 拟合出一个平面,并得出平面的法向量。当制孔部位

曲率较大,且激光投射区域较小时,可用拟合出的平面法向量近似代替制孔部位法向量。根据拟合的平面方程,可确定制孔部位单位法向量为 (a, b, c) 。

1.2 激光位移传感器测量误差分析

法向误差受多个因素的影响,本节主要分析激光位移传感器测量误差对法向误差的影响。假设待测量的制孔表面为理想的平面,激光位移传感器的标定没有误差,制孔表面的表面质量良好。激光位移传感器采用激光三角法测量原理,如图 2(a)所示。测量距离 D 为

$$D = \frac{Ls \sin \theta}{L_1 \sin \omega - s \sin(\omega + \theta)} \quad (1)$$

式中: s 为相机靶面(即 CCD 光敏面)上光斑的位移, L 为参考点 Z_0 的成像物距, L_1 为 Z_0 点的成像像距, ω 为入射光 AZ_0 与反射光 Z_0O 的夹角, θ 为反射光 Z_0O 与 CCD 光敏面的夹角。 L, L_1, ω, θ 均为系统的结构参数。

当传感器入射光束与测量面不垂直时,就会产生倾角误差^[14]。当测量面倾角为 β 时,如图 2(b)所示,将会引起激光光斑质心在线阵 CCD 上的偏移,偏移量 Δs 可表示为

$$\Delta s = \frac{DL_1 R^2 \cos \omega}{L^3} \left(1 + \frac{2D \cos \omega}{L} \right) [\tan \omega - \tan(\omega - \beta)] \quad (2)$$

式中 R 为聚光透镜的半径。

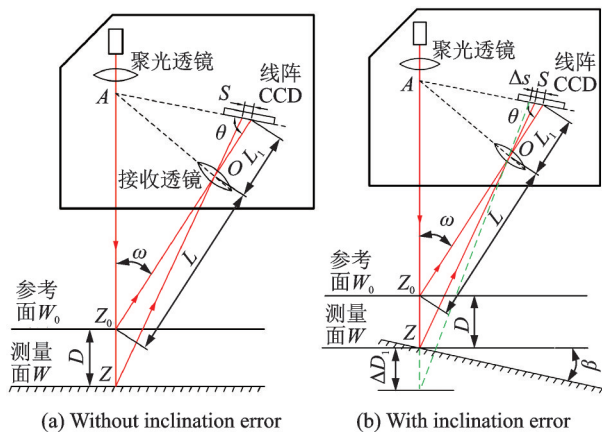


图 2 激光三角测量原理图

Fig.2 Schematic of laser triangulation method

为了保证被测对象点可以清晰地聚焦到线阵 CCD 上,该激光束应该满足 Scheimpflug 条件^[19]

$$L_1 \tan \theta = L \tan \omega \quad (3)$$

同时, L 与 L_1 应满足高斯成像定理

$$\frac{1}{L} + \frac{1}{L_1} = \frac{1}{f} \quad (4)$$

式中 f 为聚光透镜的焦距。

令 $s = \Delta s$, 可得到由于测量面倾斜引起的距离测量误差

$$\Delta D_1 = \frac{L \Delta s \sin \theta}{L_1 \sin \omega - \Delta s \sin(\omega + \theta)} \quad (5)$$

整理可得到距离测量误差 ΔD_1 满足

$$\Delta D_1 = F(L, f, \omega, R, D, \beta) \quad (6)$$

相同型号的激光位移传感器具有相同的光路参数,即 L, f, ω, R 参数为定值,即

$$\Delta D_1 = F(D, \beta) \quad (7)$$

激光位移传感器的结构决定了其本身也存在线性误差 $\Delta D_2, \Delta D_2$ 随着测量距离的增大而增大,对于同一型号的可调节量程的激光位移传感器, ΔD_2 随着量程的增大而增大,并且满足一定的函数关系。综合考虑以上两种因素,激光位移传感器的测量误差 ΔD 为

$$\Delta D = \Delta D_1 + \Delta D_2 \quad (8)$$

式中:当测量平面的法向相对激光入射光束顺时针转动时, ΔD_1 取正值;反之, ΔD_1 取负值。

1.3 激光位移传感器的布局分析

由于传感器入射光束与测量面不垂直时会产生倾角误差,4个传感器的安装布局也会影响测量精度,从而影响法向精度。在实际应用中,由于钻铆末端压力脚的存在,4个传感器只能分布在压力脚四周,因而有4种安装布局方式,如图3所示。分析每种布局的合理性,需要考虑以下因素:

(1) 尽可能使激光光束与刀具轴线平行,并使4束激光聚集在小区域内,以减小由于以平面法向近似替代复杂曲面孔位法向时存在的原理性误差。

(2) 避免在安装时引入倾角误差,如图4所示, $OXYZ$ 为固连在激光位移传感器上的坐标系,基于三角法测量原理的传感器,其自身的构造决定了在测量表面时,当被测面法向与 X 轴垂直时,激光位移传感器对该方向的倾斜不敏感,即认为不存

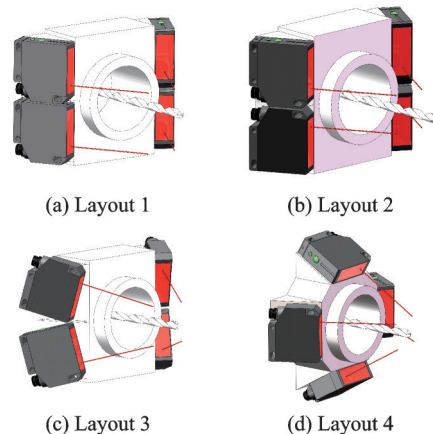


图 3 激光位移传感器的 4 种布局方式

Fig.3 Four kinds of layout of laser displacement sensors

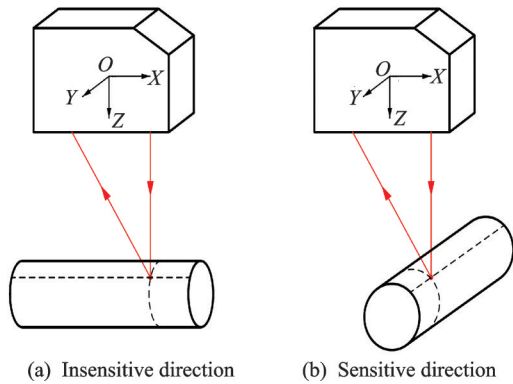


图4 倾角误差的敏感方向

Fig.4 Sensitive direction of inclination error

在倾斜误差,而当被测面法向与Y轴垂直时,激光位移传感器对该方向的倾斜敏感,测量存在倾斜误差。

(3) 由于4个激光位移传感器位置集中,应避免相互干扰。如图5所示,点B为其他激光传感器的投射光斑,对于该传感器的测量可能会造成干扰,当点B与接收透镜的中心O的连线与线段ZZ₀存在交点C时,会造成测量干扰,且点B距离线段ZZ₀越近,干扰值越大,因此,在安装布局时,应避免这种情况。

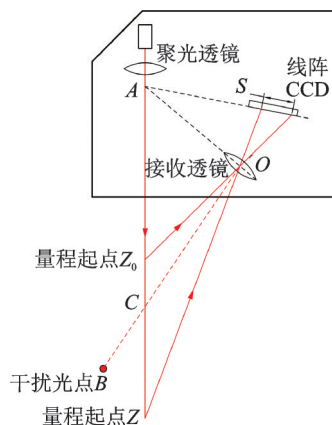


图5 激光干扰示意图

Fig.5 Diagram of laser disturbing

对于布局方式1,同侧的两束激光距离较远,光斑无法汇聚在较小区域内。而对于布局方式2、3、4,激光光斑都能在小范围内汇聚。但对于布局方式1、2、3,当激光光斑较集中时,均会存在相互干扰。尤其对于布局方式3,在安装布局时就引入了倾角误差。综合以上分析,最合理的布局是方式4:4个传感器沿着刀具轴向圆周阵列分布,能使4个光斑均匀分布在孔位周围的小区域内;4个传感器的安装倾斜角都是非敏感方向,不会在安装时引入倾角误差;4束激光相互之间不共面,相互之间不存在干扰情况。

2 法向误差仿真分析

2.1 测量误差模型

实验采用的是Baumer激光位移传感器,型号为OADM_12I6460_S35A。激光位移传感器出厂时,默认的测量范围为满量程(16~120 mm),可根据实际需求,设置合理的测量范围,以最大限度地提高测量分辨率。设置不同的测量范围,激光位移传感器的线性误差也不同,并且随着测量距离的增大而增大。法向找正实际应用中,由于法向调整角度相对较小(通常 $<10^\circ$),4个传感器的数值不会相差很大,因此根据该型号传感器固有的线性误差特性,当测量范围为50 mm,测量距离为 $30 \text{ mm} \leq D < 80 \text{ mm}$ 时,线性误差 ΔD_2 近似满足以下函数关系

$$\begin{cases} \Delta D_2 = 72 \mu\text{m} & 30 \text{ mm} \leq D < 42 \text{ mm} \\ \Delta D_2 = 1.6308d + 3.5077 \mu\text{m} & 42 \text{ mm} \leq D < 68 \text{ mm} \\ \Delta D_2 = 4.0538d - 161.2615 \mu\text{m} & 68 \text{ mm} \leq D < 80 \text{ mm} \end{cases} \quad (9)$$

实际测量噪声可由随机函数生成

$$\Delta D'_2 = 2\Delta D_2 [\text{rand}(1,1) - 0.5] \quad (10)$$

式中:rand(1,1)可生成(0,1)范围内的随机数,由此生成 $(-\Delta D_2, \Delta D_2)$ 范围内的随机数,以此模拟激光位移传感器测量的线性误差。

该型号激光位移传感器的光路参数为: $R=3 \text{ mm}$, $L=30 \text{ mm}$, $\omega=35^\circ$, $f=8 \text{ mm}$,由式(7),当测量距离D和被测面倾角 β 变化时,可计算出相应的倾角误差 ΔD_1 。

根据线性误差 ΔD_2 与距离D的关系,可在仿真中为测量距离D添加线性误差的模拟值 $\Delta D'_2$ 。同时,由D和 β 可计算出相应的倾角误差 ΔD_1 ,则实际测量值 D_1 为

$$D_1 = D + \Delta D_1 + \Delta D'_2 \quad (11)$$

2.2 制孔表面法向误差

当测量数值有误差时,会造成法向误差,如图6所示。假设制孔表面为理想平面,当激光位移传感器无位姿标定误差,且测量无误差时,由其读数计算得到的法向 \overrightarrow{GP} 即为制孔表面的真实法向。当测量存在误差 ΔD 时,由其读数计算得到的激光投射点为 $N_i (i=1, 2, 3, 4)$ 经平面拟合得到的法向为 $\overrightarrow{GP'}$, $\overrightarrow{GP'}$ 与 \overrightarrow{GP} 的夹角 ϵ 即为法向误差。法向误差 ϵ 不仅跟激光位移传感器的测量误差 ΔD 有关,还跟4个激光位移传感器的标定精度、安装位置、安装角度以及测量距离和法向调整角有关。现假定传感器标定无误差而测量存在误差,通过仿真分析安装位置、安装角度、测量距离以及法向调整角对法向误差 ϵ 的影响。

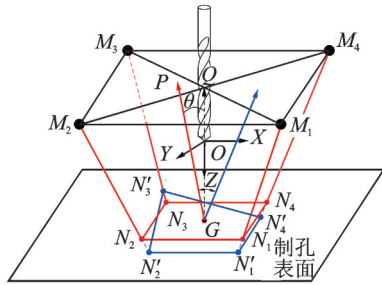


图 6 测量误差造成的法向误差

Fig.6 Normal error caused by measurement error

2.3 仿真结果与分析

2.3.1 测量距离对法向误差的影响

当聚焦为 30 mm,安装角度为 0°时,对于每个测量距离,计算 100 组数据,得出法向误差平均值,仿真结果如图 7 所示。

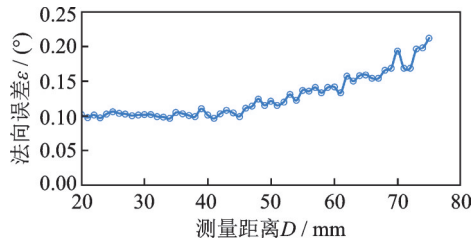


图 7 法向误差随测量距离的变化曲线

Fig.7 Curves of normal error with measured distance

由图 7 可以看出,当测量距离 $D < 50$ mm 时,法向误差无明显变化;当 $D > 50$ mm 时,法向误差随着测量距离的增加而增加。因此理想的测量距离为 50 mm 以内。

2.3.2 聚焦边长对法向误差的影响

当测量距离 D 分别为 40 mm、50 mm、60 mm,安装角度为 0°时,对于每个聚焦边长,计算 100 组数据,得出法向误差平均值,仿真结果如图 8 所示。

由图 8 可知,当聚焦边长 B 在 0~20 mm 内时,法向误差随着 B 的减小急剧增大。当 $B > 40$ mm 时,法向误差随着 B 的增大缓慢减小,即在这个区

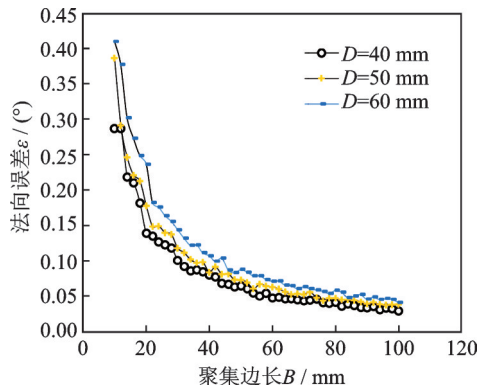


图 8 法向误差随聚焦边长的变化曲线

Fig.8 Curves of normal error with focusing edge length

域内可以认为聚焦边长对法向误差没有影响。但为了尽量减小由于以平面代替曲面的原理性误差,应尽可能缩小聚焦区域边长,因此,将聚焦边长设置为 20~40 mm 比较合理。

2.3.3 安装角度对法向误差的影响

当聚焦为 30 mm,测量距离为 50 mm 时,对于每个安装角度,计算 100 组数据,得出法向误差平均值,仿真结果如图 9 所示。

可以看出,随着安装角度的增大,法向误差缓慢减小,因此,适当增大安装角度有利于减小法向误差,且有利于 4 个激光光斑在较小的测量距离时就能够汇聚。将安装角度设置为 40°~60° 比较合理。

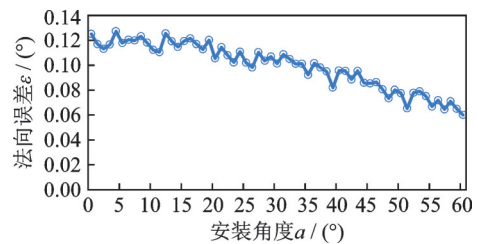


图 9 法向误差随安装角度的变化曲线

Fig.9 Curves of normal error with installation angle

2.3.4 法向调整角度对法向误差的影响

孔位法向与刀具轴线的初始夹角就是法向需要调整的角度,法向调整角度的大小也是影响激光位移传感器的测量精度的因素,因此也会影响法向误差。现研究法向调整角度对法向误差的影响。

当焦距为 30 mm,安装角度为 0°,测量距离为 28 mm 时,改变法向调整角度的大小,计算 100 组数据,得出法向误差平均值,仿真结果如图 10 所示。

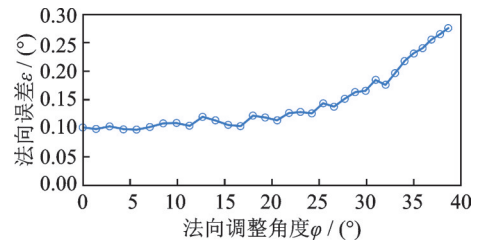


图 10 法向误差随法向调整角度的变化曲线

Fig.10 Curves of normal error with normal adjustment angle

由图 10 可以看出,当法向调整角度小于 20° 时,法向误差无明显变化;当法向调整角度大于 25° 时,法向误差随着法向调整角度的增大而明显增大。因此,在做工艺过程的离线轨迹编程时,应根据理论数模信息粗略计算好孔位法向,并在制孔时

控制末端的位置和姿态,将刀具轴线与孔位法向的角度控制在 20° 以内。

2.3.5 参数优化后的法向误差

由于法向测量采用拟合平面法向近似替代曲面法向的方法,该方法本身就存在原理性误差,但只要曲面曲率较大,且选取的区域足够小,采用这种近似替代的方法也能较准确地测量出曲面的法向。因此,理论上应尽可能使激光聚焦在一个尽量小的区域内,但由于测量线性误差的存在,聚焦区域越小,测量误差对法向误差的影响越大,需综合考虑这两个因素的影响,合理选择聚焦区域大小。通过以上分析计算,给出一组优化后的参数:激光位移传感器的安装间距为 70 mm ,安装角度为 45° ,测量距离为 40 mm ,法向调整角度为 0° ,如图11所示。计算100组数据,仿真结果如图12所示,法向误差平均值为 0.073° ,最大值为 0.157° ,此时聚焦区域边长 $B = 30\text{ mm}$,是比较理想的情况。

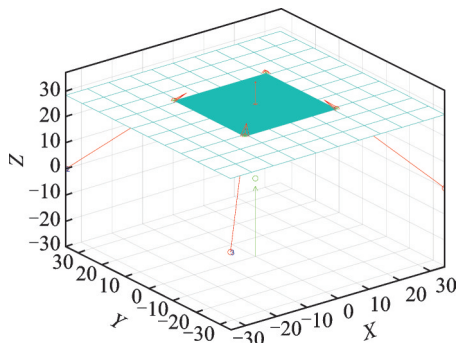


图11 参数优化后的法向测量示意图

Fig.11 Schematic of normal measurement after parameter optimization

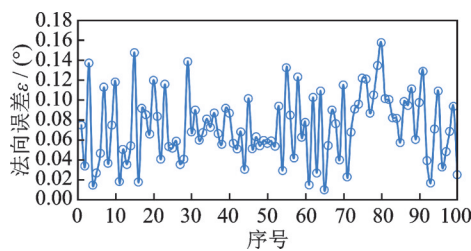


图12 参数优化后的法向误差

Fig.12 Normal measurement error after parameter optimization

3 激光位移传感器位姿标定误差仿真分析

前面章节对于法向误差的分析都是建立在没有激光位移传感器位姿标定误差的基础之上的,然而在实际应用中,位姿标定误差是必然存在的,标定误差主要受测量误差等因素的影响。

3.1 位姿标定原理

对激光位移传感器的标定,实际上就是确定激光位移传感器的测量零点在刀具坐标系下的位置,以及激光束在刀具坐标系中的方向。位姿标定是利用已知参数的基准平面来标定的。将基准平面固定,法向测量模块的4束激光投射到基准平面上,利用激光跟踪仪可以测量出该基准平面在刀具坐标系下的方程,将末端的位姿调整到不同的状态,测量出刀具坐标系在激光跟踪仪坐标系下的位姿,通过坐标变换可以得到基准平面在刀具坐标系下的位姿,并且记录激光位移传感器的读数。由于激光在基准平面上的投射点满足基准平面方程,而投射点的位置可以由激光位移传感器的位姿和读数计算出来,利用最小二乘法,解算6组或6组以上的数据,可以得出激光位移传感器在刀具坐标系下的位姿,即完成了位姿标定。

3.2 仿真结果与分析

现分析激光位移传感器自身的测量误差对位姿标定的影响,仿真步骤如下:

- (1) 给定激光位移传感器的理论安装位姿(安装间距 70 mm ,安装角度 45°)。
- (2) 给定100组基准平面方程。
- (3) 求出激光位移传感器的理论读数。
- (4) 根据测量误差模型,给理论读数添加测量误差,得到仿真的实际读数。
- (5) 根据100组基准平面方程与实际读数,计算出激光位移传感器的实际安装位姿。
- (6) 比较理论安装位姿与实际安装位姿的差值,即是位姿标定的误差。

仿真得到的位姿标定数据如表1所示。由表1

表1 传感器位姿标定误差

Table 1 Sensor pose calibration error

传感器位姿	各传感器理论值				各传感器实际值				各传感器误差值			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
X/mm	35	-35	-35	35	35.90	-33.80	-36.08	34.81	0.901	1.204	-1.083	-0.189
Y/mm	35	35	-35	-35	33.80	36.03	-33.82	-35.48	-1.197	1.038	1.179	-0.481
Z/mm	0	0	0	0	-0.013	0.040	0.029	-0.026	-0.014	0.040	0.029	-0.026
A/(°)	-0.5	0.5	0.5	-0.5	-0.530	0.462	0.536	-0.485	-0.030	-0.038	0.036	0.015
B/(°)	-0.5	-0.5	0.5	0.5	-0.461	-0.535	0.461	0.521	0.039	-0.035	-0.039	0.021
C/(°)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.707	0.706	0.706	0.708	0.000 4	-0.001 1	-0.000 7	0.000 6

分析标定误差数据可以发现,激光位移传感器位姿的6个参数中,Z、C误差较小,而其他参数误差偏大,且有一定的规律性。对于位置参数X和Y,4个传感器的实际位置相对于理论位置,整体绕着Z轴的同一个方向旋转;对于姿态参数A和B,也有相同的规律。这是由于激光位移传感器的中心对称布局造成的。

在选定了传感器布局方式以及安装位姿参数后,根据测量误差模型,对每个激光位移传感器进行测量误差补偿,可以提高位姿标定精度,从而提高制孔法向精度。

4 法向误差实验验证

为验证激光位移传感器安装参数优化的实际效果,搭建了法向测量实验平台,如图13所示。法向测量模块的4个激光位移传感器沿刀具轴线方向按照图3中的方式4均布安装在末端执行器的压力脚上,安装间距为70 mm,安装角度为45°,实验步骤如下:

(1)根据3.1节所述的位姿标定原理,利用激光跟踪仪标定出4个激光位移传感器在刀具坐标系下的位姿。

(2)将待测平面固定,控制机器人运动到待测面前方,使测量距离约为40 mm。

(3)将靶标球轻轻贴合在待测面上扫描出待测面点云,拟合出待测面的法向。

(4)将靶标座安装在刀柄上并放置靶标球,通过控制电主轴进给运动100 mm并转动1周,利用激光跟踪仪测量靶标球的位置,拟合出刀具轴线方向,测量出待测面法向与刀具轴线的夹角 θ 。

(5)记录激光位移传感器的示数,并通过位姿标定数据计算出待测面法向与刀具轴线的夹角 θ' ,从而得出法向误差 $\epsilon = |\theta - \theta'|$ 。

(6)控制机器人绕TCP点在5°范围内旋转一定的角度,重复步骤(4、5)。

(7)重复步骤(6)的操作,最终得到20个法向误差数据。

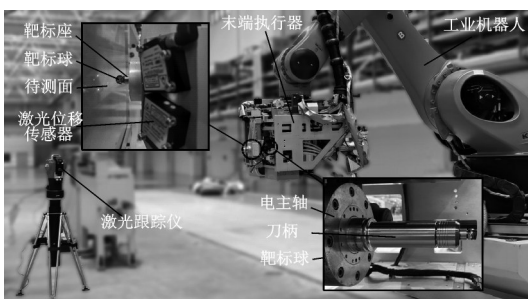


图13 实验平台

Fig.13 Experimental platform

测量得到的结果如图14所示,由图14可以看出法向误差平均值为0.116°,最大值为0.173°。

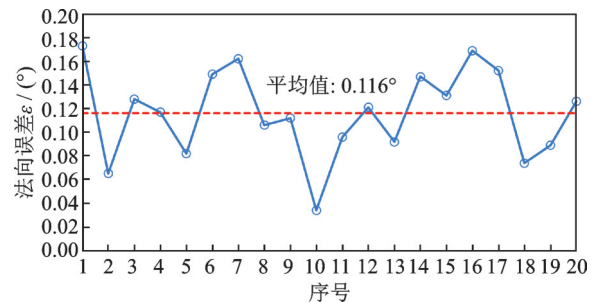


图14 法向误差结果

Fig.14 Results of normal error

5 结 论

(1)建立了测量误差模型,进行了激光位移传感器布局分析与优化,得出圆周阵列分布是最为合理的布局。

(2)仿真分析了测量误差对位姿标定误差的影响,得出了误差分布规律。

(3)通过仿真定量分析了测量误差对孔位法向误差的影响,并给出了一组优化后的布局参数。在该组参数下,法向误差仿真结果的平均值为0.073°,最大值为0.157°;实验结果的平均值为0.116°,最大值为0.173°。

(4)本文的结果可为自动钻铆系统法向找正模块的设计、标定以及使用提供理论依据,从而提高制孔法向精度,保证孔垂直度要求,提高铆接质量和疲劳寿命。

参考文献:

- [1] 陈雪梅,刘顺涛.飞机数字化装配技术发展与应用[J].航空制造技术,2014,445(1):58-65.
CHEN Xuemei, LIU Shuntao. Development and application of aircraft digital assembly technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 445(1): 58-65.
- [2] 郭洪杰.大型飞机柔性装配技术[J].航空制造技术,2010,491(18):52-54.
GUO Hongjie. Flexible assembly technology for large commercial aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 491(18): 52-54.
- [3] 韩志仁.大飞机数字化制造关键技术[J].航空制造技术,2016,497(S1):53-57.
HAN Zhiren. Key technology for digital manufacturing of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 497(S1): 53-57.
- [4] BI Y B, LI Y C, GU J W, et al. Robotic automatic drilling system[J]. Journal of Zhejiang University (En-

- gineering Science), 2014, 48(8): 1427-1433.
- [5] YUAN P J, WANG Q S, WANG T M, et al. Surface normal measurement in the end effector of a drilling robot for aviation[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong, China: IEEE, 2014: 4481-4486.
- [6] 杜兆才. 数字化钻铆的曲面法向测量方法[J]. 航空制造技术, 2011, 492(22): 108-111.
DU Zhaocai. Measurement method for evaluating normal direction of surface for digital drilling and riveting [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 492(22): 108-111.
- [7] JORDAN K, MORDOHAI P. A quantitative evaluation of surface normal estimation in point clouds[C]//Proceedings of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, IL, USA: IEEE, 2014: 4220-4226.
- [8] LEE R T, SHIOU F J. Calculation of the unit normal vector using the cross-curve moving mask method for probe radius compensation of a freeform surface measurement[J]. Measurement, 2010, 43(4): 469-478.
- [9] CAO J J, CHEN H, ZHANG J, et al. Normal estimation via shifted neighborhood for point cloud[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2018, 329: 57-67.
- [10] TIAN W, ZHOU W X, ZHOU W, et al. Auto-normalization algorithm for robotic precision drilling system in aircraft component assembly[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(2): 495-500.
- [11] 李永超. 飞机壁板机器人自动化制孔法向修正技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
LI Yongchao. Research on surface-normal adjustment in robotic drilling for aircraft panel assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [12] RAO G, YANG X D, XU J, et al. Normal direction measurement based on 3D point cloud in robotic drilling[C]//Proceedings of 2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Honolulu, HI, USA: IEEE, 2017: 1182-1187.
- [13] LEE R T, SHIOU F J. Multi-beam laser probe for measuring position and orientation of freeform surface [J]. Measurement, 2011, 44(1): 1-10.
- [14] 孙彬, 李兵. 一种量化的激光位移传感器倾角误差补偿模型[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 996-1004.
SUN Bin, LI Bing. A quantitative error compensation model of the inclination angle of the laser displacement sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 996-1004.
- [15] VUKASINOVIC N, MOZINA J, DUHOVNIK J. Correlation between incident angle, measurement distance, object colour and the number of acquired points at CNC laser scanning[J]. Strojniški Vestnik—Journal of Mechanical Engineering, 2012, 58(1): 23-28.
- [16] 王志乾, 刘兆蓉, 赵雁, 等. 变形测量系统中激光光斑中心精确定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(6): 485-489.
WANG Zhiqian, LIU Zhaorong, ZHAO Yan, et al. Precise center location algorithm for laser spot in distortion measuring system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2011, 25(6): 485-489.
- [17] 吴剑锋, 王文, 陈子辰. 激光三角法测量误差分析与精度提高研究[J]. 机电工程, 2003(5): 89-91.
WU Jianfeng, WANG Wen, CHEN Zichen. Study on the analysis for error in triangular laser measurement and the method of improving accuracy[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2003(5): 89-91.
- [18] 雷斯聪, 袁定新, 朱忠良, 等. 运载火箭蒙皮自动钻铆法向测量试验研究[J]. 航天制造技术, 2018, 208(2): 39-42.
LEI Sicong, YUAN Dingxin, ZHU Zhongliang, et al. Research on lapping rifle normal measurement of lunch vehicle skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 208(2): 39-42.
- [19] SUN J H, ZHANG J, LIU Z, et al. A vision measurement model of laser displacement sensor and its calibration method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(12): 1344-1352.
- [20] MENTIN C, PRIEWALD R, BRENNER E. Accurate light source position estimation for a laser triangulation measurement device using particle swarm optimization[J]. Measurement, 2018, 125: 406-414.

(编辑:陈珺)