

# 基于线结构光的飞机蒙皮对缝阶差与间隙检验技术分析

伊楠

(沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

**摘要** 随着飞机设计和制造技术的飞速发展, 蒙皮对缝的相关数据测量成为飞机装配过程检验中的关键技术之一。在飞机装配中, 由于蒙皮对缝不齐会造成零件间隙大、配合尺寸精度差等问题。因此, 在蒙皮装配制造过程中需要对蒙皮对缝进行检测, 并且结合检测结果装配相关零部件, 以保证零件的装配精度和零件之间相互位置关系的科学性, 同时在某些飞机产品中更好的对缝精度代表着更高的飞机隐身性。本文主要分析了基于线结构光的飞机蒙皮对缝阶差与间隙测量技术, 旨在对实际工作起到参考作用, 进一步提高飞机制造行业的发展水平。

**关键词** 线结构光; 飞机蒙皮; 对缝阶差与间隙; 测量技术

中图分类号: V22

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2023)04-0013-03

随着飞机制造技术的不断进步, 飞机蒙皮对接检验检测技术也越来越受到重视。目前很多飞机装配制造过程中都采用了蒙皮对接工艺, 为了保证对缝质量, 需要使用高精度的测量方法来检测对接面的对缝阶差与间隙值。针对传统的接触式测量方法, 在实际工作中存在着效率低、结果不精确等问题, 并且还容易受到环境和操作人员等因素的影响。随着计算机技术、图像处理技术等快速发展, 三维线结构光测量技术被广泛应用于工业领域中。该方法具有高精度、高效率、非接触等优点, 可以满足飞机蒙皮对缝阶差与间隙进行高精度检测的要求。本文提出一种基于线结构光的飞机蒙皮对接对缝阶差与间隙测量方案, 并通过仿真和试验验证了该方案在飞机装配制造检验中具有较高价值。

## 1 对接面测量原理

### 1.1 线结构光传感器

线结构光传感器是一种光斑大小固定的数字光栅, 不同类型的线结构光传感器适用于不同的测量场合。常用的基于液晶光条成像技术的线阵激光器的主要特征是: (1) 光斑大小固定; (2) 受外界干扰少; (3) 造价低廉; (4) 稳定性好, 适用于各种环境。使用该技术的基本原理是: 在一定尺寸范围内, 激光与液晶光条之间形成一个固定大小的光斑, 且随着条纹间距变小, 光斑中心位置将会发生移动。通过对一定尺寸范围内中心点进行移动, 可以获得光斑中心点在三维空间中的分布状况。于是就可以通过测量图像中中心

点到另外一个中心点的距离来计算物体表面三维形状特征。使用该技术也可实现对缝面几何形状以及大小尺寸(如距离、角度等因素)的测量<sup>[1]</sup>。

### 1.2 特征点提取与匹配算法

基于线结构光技术的蒙皮对缝面三维数据采集过程中, 最关键的就是特征点提取和匹配算法。特征点提取是指将一幅图像中对应于待测物体的某一个特征区域提取出来。在整个图像信息中, 利用梯度信息来提取出与待测物体对应的特征点, 最后得到一个关于待测物体轮廓曲线的特征值。当几何参数作为待测物体轮廓曲线的特征值时, 就可以直接通过特征值表获得对应于待测物面的两条曲线; 对于其他参数, 需要通过平面拟合与特征值计算相结合的方式获得。上述特征点提取与匹配算法主要包括: 一是对图像进行灰度化处理; 二是对图像进行滤波去噪; 三是采用 Sobel 算子提取特征点。这些步骤中每一步都有很多目的不同但又相互联系的步骤。其中, 灰度处理是为了获得待测物体轮廓曲线对应于该结构光传感器光斑中心位置之间像素值的变化范围; 滤波去噪是为了滤除干扰信息从而提取出结构光传感器光斑中心位置; Sobel 算子提取特征点则是为了得到特征点的方向信息。

## 2 测量方案

### 2.1 三维测量

根据飞机蒙皮对接面的结构特点, 确定采用非接触式测量技术, 将线结构光传感器安装在蒙皮对接面

上,通过相机采集被测物体表面的三维坐标信息。在设计时,采用两台相机同时采集,一台负责采集被测物体表面的二维坐标信息,另一台负责采集被测物体表面的三维坐标信息。根据测量原理,两个相机可分别独立工作。首先通过相机获取待测量面的二维坐标信息。待测面上各点对应的二维坐标可以由线结构光传感器获取到。由于蒙皮对接面上各点分布不均匀且易受制造误差、测量误差等因素影响,所以需要将所有待测点上的二维坐标信息都在相机中进行采集;然后通过提取线结构光传感器产生的条纹中心与其对应位置的条纹中心间的距离差,求出该距离差对位移误差及旋转误差因素贡献值;最后通过求出该贡献值对位移误差和旋转误差进行修正。在此过程中采用多传感器融合算法以提高测量精度。由于实际对接面在不同位置时具有不同形状,所以需要使用不同形状、尺寸及特征的测量点来进行三维数据采集<sup>[2]</sup>。

## 2.2 数据处理

目前,对缝测量方法主要有接触式与非接触式两大类。非接触式对缝测量方法主要有激光测距法和线结构光法。前者利用激光对物体表面进行扫描,通过CCD相机获取图像并计算光在物体表面的光程;后者采用线结构光传感器测量光束到达工件表面后的衍射及光在物体表面的反射特性,利用数字图像处理技术进行图像处理来实现对缝面轮廓及形状参数的精确测量。激光测距法虽然测量精度较高,但是扫描过程中会受到激光光束的干扰,导致在误差累积的过程中对缝面轮廓信息被削弱。此外,激光测距法需要实时显示对缝轮廓、待测对象在投影过程中发生运动等现象,降低了对缝精度。

本文所述线结构光法针对上述问题提出了一种数据处理方法,主要包括数据预处理、三维重建及阶差计算。该方法在不需要激光器输出信号的前提下通过软件实现对缝面轮廓的测量,并以光条中心点为基准对对缝面轮廓进行提取及评价,最后采用阶差计算出待测对象间的对缝间隙及对缝阶差。

## 3 对缝阶差与间隙的测量方法

对缝阶差和间隙测量主要是利用线结构光传感器对接面进行检测,通过测量被测区域表面的条纹密度来判断被测对象是否发生位移。由于采用线结构光传感器进行检测,只需要被测物体表面一小部分即可,因此采用单站结构光传感器就可以完成对被测物的测

量工作。使用线结构光传感器对接面进行检测时,首先需要进行光源位置的选择,可以利用光源直接照射在被测物体上反射出条纹来确定被测物体的位置,也可以通过红外灯或激光指示灯对投射到被测物体上的条纹进行位置确定。当需要进行横向测量时,则利用相机沿水平方向拍摄一条由线结构光传感器获取的条纹来确定被测物点在横向方向上的位置<sup>[3]</sup>。

在实际测量中,可采用单站结构光传感器完成对缝对象的检测工作。以某型号飞机蒙皮对接面为例,可选取两种不同结构的对缝面进行试验验证。其中,相机水平方向拍摄三幅不同角度的条纹图。通过分析可以得到:当被测对象发生位移时,其对应条纹将出现变化。为了验证该结论是否正确,计算两个对缝对象的阶差和间隙值,比较计算的结果和实际测量结果,若一致则符合该型号飞机蒙皮对接面的测量要求。该系统在对测量对象的阶差和间隙测量过程中采用单站结构光传感器进行检测,可以代替三坐标测量机中的3台甚至更多设备,可以节省大量设备和时间成本。

## 4 对缝阶差与间隙的提取、计算及误差分析

使用单相机三维测量技术时,获取的图像可能存在噪声、光照不均匀等情况,使得图像中存在大量干扰信息,影响对缝阶差与间隙的提取。采用双相机三维测量技术时,对测量精度要求更高。双相机三维测量技术通常是在两台相机中分别放置一个摄像机,可以对多个区域的观测同时进行图像拼接;同时,每个摄像机都有独立的数字图像传感器来获取目标物体的轮廓数据,因此每个摄像机可以获得各自不同角度的图像,从而有效减少了图像中干扰信息对检测结果的影响。此外,由于采用线结构光技术进行测量时使用了较高分辨率的投影仪和高对比度的色片,因此其可以获取较大范围的数据区域,从而提高测量效率和精度<sup>[4]</sup>。

### 4.1 提取对缝信息

通过分析该系统的对缝图像,可以提取出对缝信息并计算出对缝间隙。由于该系统是两个相互垂直的线结构光传感器,因此其获取的图像并不是完全等效于两个平行的点,而是两个夹角为 $0^\circ$ 的等效平行点。由于无法在图像中获取到三条对缝,因此其对三条对缝提取结果造成了影响。因此通过设置两组非垂直的线结构光传感器,可以获取到三条对缝。利用该方法进行检测时,对中心线、相邻边和斜距等参数进行了调整,以确保提取出的对缝信息具有足够精度。

## 4.2 误差分析

在基于线结构光三维测量技术进行飞机蒙皮对缝阶差与间隙测量时,为提高检测效率和精度,通常需要在被测物体上安装 2~3 个或更多的激光扫描器,并分别将其扫描至被测物体表面不同位置。这种情况下,会造成一定的测量误差,例如:被测物体表面存在光斑,使得在某一位置的激光扫描器无法获得准确的信息。为降低测量误差,需要通过减少相机与被测物体之间的相对位置进行计算。为减少这方面的误差,通常使用一组激光扫描器扫描多个位置。例如:每隔 5 个点(包括相邻两个点之间)设置一个激光点,那么当扫描 6~7 次后即可计算出全部 6~7 个激光扫描器的位姿信息。此方法可有效降低测量误差<sup>[5]</sup>。

## 5 实验结果及分析

为验证上述方法的有效性,在某型飞机蒙皮对接对缝面上进行了大量实验。实验中,使用固定传感器、固定相机位置来测量同一位置的对缝阶差和间隙,测量距离为 0.26m,传感器与相机之间的距离小于 0.4m 时,阶差误差小于 5  $\mu\text{m}$ ;当传感器与相机之间的距离大于 0.4m 时,测量结果精度较好。由此可见,该方法实现对缝测量和控制。将本文中的方法应用于某型飞机蒙皮对接对缝面上进行实验;使用线结构光传感器获取对缝面不同角度下的三维数据。通过分析数据可以看出:对缝表面边缘存在明显阶差变化较大;对于对接面不同位置,其间隙变化范围在 0mm~5mm 之间。这表明本文中的方法可以用于飞机蒙皮对接对缝质量的控制。在飞机蒙皮对接过程中,利用上述方法对对缝间存在阶差及间隙进行控制、检测可以提高飞机蒙皮对接质量。

### 5.1 线结构光三维测量系统

本文中的线结构光三维测量系统由线结构光相机、线结构光带以及线结构光投影仪三部分组成。系统的光源为激光器,采用了线性激光器;相机通过采集到的线状光源成像在 CCD 上,利用二维光学成像原理进行三维数据采集。使用结构光投影仪将线状光源投射到被测物体表面,同时投射平面上,投射平面与相机之间形成一个空间关系,摄像机将获取到的点云投影在被测物体表面。对于点云中的每一点进行三维重构计算。在得到点云数据后,通过控制摄像机焦点位置、线状光源投射方向等参数实现对测量对象的三维数据采集与重建。使用 CCD 相机进行图像采集,输出系统相关参数<sup>[6]</sup>。

### 5.2 测量精度及重复性实验

为验证本文中的测量方法的精度,将本文中使用的线状结构光传感器,应用于某型飞机蒙皮对接对缝面进行测量。利用该传感器同时采集对缝面不同位置数据。可以确定:对于同一位置不同角度测量,测得结果具有良好的重复性,说明本文中所提出的方法能实现对缝阶差和间隙的测量。利用上述方法测量得到一组数据后,由该组数据计算得到了蒙皮对接的对缝阶差和间隙值,并将该值与某型飞机蒙皮对接对缝面进行对比。由上述实验可知:应用本文中所提出的测量方法可以准确地获得对缝阶差和间隙值,其计算得到的数值与实际测量数据相一致<sup>[7]</sup>。

## 6 结语

通过实验,分析了测量误差来源,结果表明该测量方案具有较高的精度和实用性。目前,国内在飞机制造领域应用线结构光测量技术的企业并不多,而这方面的研究还处于起步阶段。本文所提出的线结构光测量方法,可实现对缝阶差与间隙的自动化、实时检测,实现了对缝质量检测的自动化和智能化。其检测方法具有以下优点:(1)可在飞机蒙皮对接过程中使用;(2)不需要环境照明,减少了对操作人员的视觉干扰;(3)自动化程度高,测量精度较高。未来可以尝试将该技术应用到飞机部件或整体的对缝质量检验。

## 参考文献:

- [1] 梁国伟.一种大型飞机蒙皮外形检测工装关键技术研究[J].现代机械,2019(05):19-23.
- [2] 毕超,张超,周鹏.飞机蒙皮铆钉孔的位置与法矢检测技术研究[J].中国测试,2022,48(06):32-38.
- [3] 龙俊米,刘胜兰.飞机蒙皮薄壁零件的虚拟装夹与检测方法[J].机械制造与自动化,2022,51(03):138-144.
- [4] 李红卫,戴佳佳,谢乾,等.基于散乱点云的飞机蒙皮缝隙识别算法[J].计算机工程与设计,2022,43(02):465-471.
- [5] 刘芳,夏桂锁,温志辉,等.飞机蒙皮缺陷检测的现状与展望[J].航空制造技术,2021,64(Z2):39-50.
- [6] 吴军,石改琴,卢帅员,等.采用无人机视觉的飞机蒙皮损伤智能检测方法[J].中国测试,2021,47(11):119-126.
- [7] 潘甜,王松涛,谢中敏,等.基于机器视觉的飞机蒙皮缺陷检测研究[J].装备制造技术,2021(10):91-94,99.