

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802301

# 飞机壁板类组件的数字化组合测量方法研究

王巍 王诚鑫 孔今天 海拉尔

(沈阳航空航天大学 航空宇航学院 沈阳 110136)

**摘要:** 面对现代飞机装配制造过程中一些壁板类组件的测量任务,单一的数字化测量设备已经不能满足测量要求,因此,对基于激光跟踪仪与关节臂测量机的组合测量技术进行研究。首先,对组合测量系统进行构建,之后对组合测量系统的测量流程进行制定和对测量数据处理过程进行分析,并得到偏差矢量表和偏差分布色谱图,最后将该组合测量技术方案应用到某型机身壁板组件外形曲面的测量任务中。通过实例分析,该方案有效可行,具备一定的应用价值。

**关键词:** 壁板类组件;数字化测量设备;激光跟踪仪;关节臂测量机;组合测量技术;外形曲面

**中图分类号:** TN247      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 420.40

## Research on the digital combination measurement method of aircraft wall panel components

Wang Wei Wang Chengxin Kong Lingtian Helal Ahmed

(Aerospace College, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** In the face of the measurement task of the contour surface of some mural panel components in the process of modern aircraft assembly and manufacturing, the single digital measurement equipment can no longer meet the measurement requirements. Therefore, the combined measurement technology based on laser tracker and articular arm measuring machine is studied in this paper. Firstly, the combined measurement system was built, and then the measurement process of the combined measurement system was developed and analyzed, and the deviation vector diagram and deviation distribution chromatogram were obtained. Finally, the combined measurement technology scheme was applied to the measurement task of the contour surface of a certain type of fuselage wall panel component. Through case analysis, the scheme is effective and feasible, and has certain application value.

**Keywords:** wallboard; digital measurement equipment; laser tracker; joint arm measuring machine; combined measurement technique; surface appearance

## 0 引言

在飞机现代化装配制造中,数字化测量技术已经得到普遍应用,如经纬仪测量系统、全站仪测量系统、摄影测量系统等。对飞机的零部件的装配制造过程进行跟踪测量,是保证飞机装配制造质量的主要手段。在飞机的实际生产过程中,会针对不同的测量条件,测量环境以及测量零部件类型,使用不同的数字化测量设备。

近几年,在飞机装配制造领域,将多种数字化测量设备组合使用完成飞机装配制造中较为复杂的测量任务,体现出了显著的优势,并且国内外许多专家对组合测量技术进行了深入的研究,如于浩等<sup>[1]</sup>研究了基于组合测量的大尺度产品的柔性检测技术;李五朋等<sup>[2]</sup>利用激光跟踪仪、照相

测量仪、以及关节臂测量机实现了对飞机大部件装配外形的测量;罗明成等<sup>[3]</sup>将经纬仪与激光测距仪相结合,设计出误差分析与标定方法。但是对飞机壁板类组件的组合测量方法研究较少,因此,本文对壁板类组件的组合测量方法进行研究。

各种数字化测量设备在测量范围、测量精度、测量速度等性能上有很大不同,基于多种数字化测量设备的组合测量技术可以实现各种测量设备的性能互补与优化配置,使测量结果达到最优。

本文根据飞机壁板类组件外形公差要求,对数字化测量设备进行选取,通过构建组合测量系统,设计组合测量流程以及对组合测量数据进行处理,来提高飞机壁板类组件的检测质量与效率。

## 1 壁板类组件组合测量工艺分析

现代飞机壁板组件的外形曲面,大多数为双曲度自由曲面,采用基于激光跟踪仪和关节臂测量机的组合测量系统,主要是利用了关节臂测量机的优势,一是关节臂测量机可以自由移动,二是它具有非接触式扫描测量的功能<sup>[4]</sup>,使得检测效率大幅度提高。但是关节臂测量机的测量范围较小,无法独立完成飞机壁板这种大型组件的测量任务,因此需要将壁板类组件划分成不同的测量区间,应用关节臂测量机的扫描功能对所划分的各个测量区域进行扫描,获取点云数据,在获取全部点云数据后,对点云进行处理。之后再通过激光跟踪仪建立的飞机坐标系,对所获取的全部点云数据进行拼接。在拼接的过程中所应用到的公共点全部属于壁板类组件的骨架,公共点的选取质量影响着整个点云的拼接精度。

## 2 基于关节臂测量机与激光跟踪仪的组合测量系统构建

在各种数字化测量设备中,关节臂测量机与摄影测量机由于外形较小、便于携带,能够与其他设备进行组合测量

任务。本文对关节臂测量机与激光跟踪仪的组合测量技术进行研究。

如表 1 所示,激光跟踪仪测量范围广、稳定性高,但是在测量方式上仅适用于单点测量,无法实现大范围局部测量<sup>[5]</sup>;而关节臂测量机空间可达性较好,既可以实现单点测量,又能够对范围区域进行扫描测量,但受到机体限制,使得测量范围较小。考虑到激光跟踪仪只能实现单点测量,无法实现对于飞机零部件外形曲面的测量,而关节臂测量机具有扫描功能,可以对曲面进行扫描测量,此外,扫描测量比单点测量效率更高,因此二者的结合使用可以既精确又高效地完成机身壁板组件外形曲面的测量任务。在测量精度方面,关节臂测量机测量精度为  $17 \mu\text{m}$ ,激光跟踪仪测量精度为  $(15 \mu\text{m} \pm 6 \mu\text{m})/\text{m}$ ,根据组合测量不确定度合成法,基于激光跟踪仪与关节臂测量机的组合测量的测量精度为  $[389 + (15 + 6L)^2]^{1/2} \mu\text{m}$ 。在测量效率方面,激光跟踪仪单设备测量,平均 5 点/s,但在使用激光跟踪仪与关节臂测量机组合测量系统后,通过关节臂测量机的扫描功能,可以实现 30 000 点/s 的测量效率。并且扫描测量属于非接触式测量,可以避免测量过程中对被测部件曲面的损坏。

表 1 组合测量设备性能分析

测量性能	关节臂测量机 (Romer7725)	激光跟踪仪 (AT901-B)	关节臂测量机 & 激光跟踪仪 (Romer7725 & AT901-B)
测量范围	较小	大	中等
稳定性	中等	高	高
空间可达性	高	中等	高
测量方式	单点测量/扫描测量	单点测量	扫描测量
测量精度	$17 \mu\text{m}$	$(15 \mu\text{m} \pm 6 \mu\text{m})/\text{m}$	$[389 + (15 + 6L)^2]^{1/2} \mu\text{m}$

该组合测量系统,通过微软件基础类库(microsoft foundation classes, MFC)建立壁板类组件组合测量工具集<sup>[6]</sup>,可以将关节臂设备、激光跟踪仪设备、已知关节臂测量机对应的测量软件 Geomagic control 和激光跟踪仪对应的测量软件 SA(spatial analyzer)等进行连接,来实现公共点的测量与壁板组件的点云采集,之后将数据进行存储和处理,最后得出偏差矢量图和偏差分布色谱图。

根据组合测量系统的功能,可以将组合测量系统分为数字化测量设备、数据处理软件和控制平台 3 部分<sup>[7]</sup>,如图 1 所示。数字化测量设备主要有激光跟踪仪与关节臂测量机。激光跟踪仪主要对测量区域的公共测量点靶球进行测量,并获得公共点靶球坐标数据。关节臂测量机主要对测量区域和测量公共点的靶球进行扫描测量,并获得点云数据。

数据处理软件主要分为激光跟踪仪的数据处理和关节臂测量机的数据处理。激光跟踪仪的数据处理,主要是对两种数字化测量设备的坐标系进行统一,并对实测数据



图 1 基于关节臂测量机与激光跟踪仪组合测量系统工作流程

与理论数据进行分析比较,得出偏差分析结果<sup>[8]</sup>。关节臂测量机的数据处理主要对扫描得到的测量区域点云数据和公共点靶球点云数据进行去噪声、去除分离点等处理,并将靶球点云进行球特征拟合,求出公共点靶球坐标。

控制平台主要控制激光跟踪仪的测量方式,测量位置和采集频率,实时反馈关节臂测量机对被测零部件的扫描

情况。控制平台同时也是实测数据传入数据处理软件的承载平台。

### 3 基于关节臂测量机与激光跟踪仪的组合测量流程构建

组合测量系统测量演示如图 2 所示,关节臂测量机与激光跟踪仪的组合测量原理如图 3 所示,激光跟踪仪与关节臂测量机对设置的公共点进行测量,并将两台设备测量的公共点坐标值进行拟合,最后通过拟合将关节臂测量机的测量数据转换到激光跟踪仪所在的飞机坐标系中。

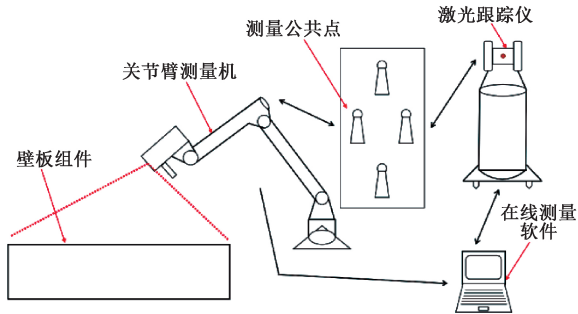


图 2 组合测量系统测量演示

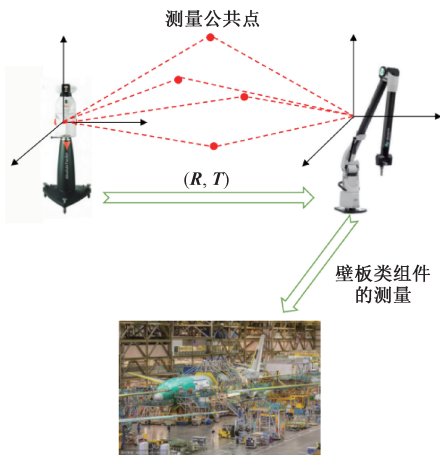


图 3 关节臂测量机与激光跟踪仪组合测量原理

基于关节臂测量机与激光跟踪仪的组合测量原理,为满足飞机部件复杂曲面的外形精度要求,现构建飞机部件复杂曲面组合测量。具体流程如图 4 所示。

1) 对被测壁板组件划分扫描测量区域,并在扫描测量区域设置至少 4 个非共线测量公共点。在飞机坐标系下,设置激光跟踪仪的测量站位,使激光跟踪仪在该站位下,对非共线测量公共点的靶球进行测量。然后,使用关节臂测量机对扫描测量区域和公共点靶球进行扫描测量。

2) 对关节臂测量机扫描得到的靶球点云数据进行球特征拟合,得出靶球坐标。将激光跟踪仪测得的公共点靶球坐标与关节臂测量机测得的公共点靶球坐标进行拟合,求出坐标转换关系<sup>[9-11]</sup>。

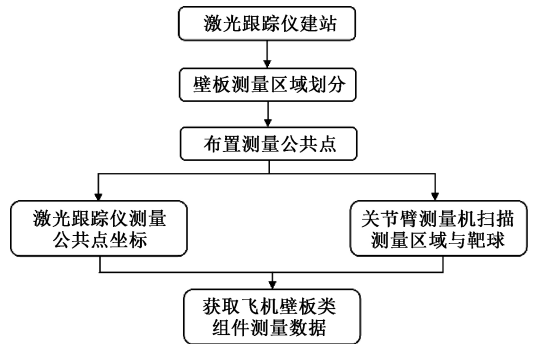


图 4 组合测量流程

3) 通过坐标转换,将关节臂测量机的测量数据转换到激光跟踪仪所在的飞机坐标系下。数据处理软件将测量数据与理论数据进行分析对比,得出偏差分布色谱图和偏差矢量表。

其中,坐标转换主要应用四元素法,给定一组测量公共点,设其在两个不同坐标系下的坐标数据为  $P = (p_i, i = 1, 2, \dots, n)$  和  $Q = (q_i, i = 1, 2, \dots, n)$ 。则两组数据关系为:

$$P = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} Q \quad (1)$$

式中:  $R$  和  $T$  为旋转矩阵和平移矩阵,设单位四元素  $W = [\omega_0, \omega_1, \omega_2, \omega_3]$ , 则矩阵  $R$  和  $T$  分别为:

$$\begin{cases} R = \begin{bmatrix} \omega_0 + \omega_1^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2 & 2(\omega_1\omega_2 - \omega_0\omega_3) & 2(\omega_1\omega_3 - \omega_0\omega_2) \\ 2(\omega_1\omega_2 + \omega_0\omega_3) & \omega_0 + \omega_2^2 - \omega_1^2 - \omega_3^2 & 2(\omega_2\omega_3 - \omega_0\omega_1) \\ 2(\omega_1\omega_3 - \omega_0\omega_2) & 2(\omega_2\omega_3 + \omega_0\omega_1) & \omega_0 + \omega_3^2 - \omega_1^2 - \omega_2^2 \end{bmatrix} \\ T = P - RQ \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可得坐标转换矩阵  $R$  和  $T$ 。

### 4 组合测量数据采集与处理

测量数据的采集是通过两部分进行的,一部分是测量公共点的坐标数据,另一部分是公共点靶球点云数据和被测区域的点云数据。激光跟踪仪主要对测量公共点靶球的坐标数据进行采集,并通过控制平台将公共点测量数据导入数据处理软件。关节臂测量机主要是通过扫描测量获取被测区域的点云数据与测量公共点靶球点云数据,并将靶球点云进行球特征拟合,求出靶球坐标。

数据处理流程,首先将原始数据导入数据处理软件,将球特征拟合得到的公共点靶球坐标与激光跟踪仪测得公共点靶球坐标进行拟合,通过公共点的坐标拟合,将关节臂扫描的零部件点云数据模型转换到激光跟踪仪所在飞机坐标系下。将测量得到的数据模型与理论数据模型进行对比分析,生成偏差分布色谱图和偏差矢量表,数据处理流程如图 5 所示。

根据偏差分布色谱图可以清晰地观察到被测零部件的偏差分布情况,根据偏差矢量表可以了解被测部件某些部位具体超差值,通过得到的偏差分布色谱图与偏差

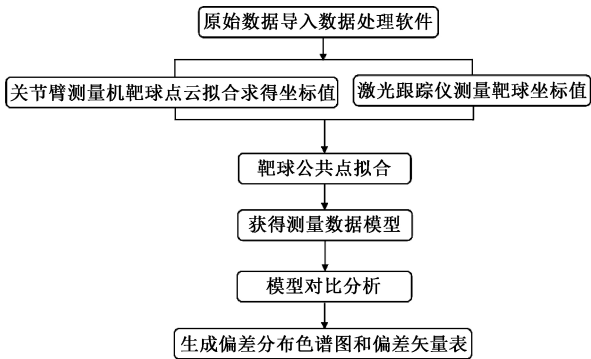


图 5 测量数据处理流程

3)将测量得到的数据模型与理论模型进行对比分析,得到壁板偏差分布色谱图<sup>[13]</sup>,如图 7 所示,壁板外形偏差矢量表<sup>[14]</sup>如图 8 所示,通过壁板偏差分布色谱图可以清晰地观察到壁板的偏差分布情况,通过壁板外形偏差矢量表,可以得到准确的超差值。

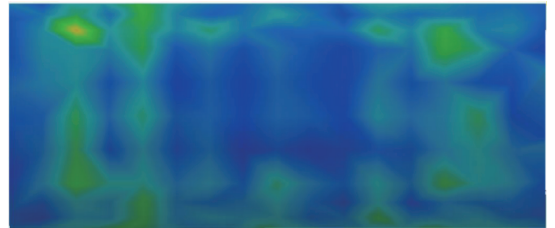


图 7 偏差分布色谱图

矢量表,可以对零部件实际装配过程中的误差补偿提供参考。

### 5 实例应用

现以飞机壁板组件外形曲面的测量为例,对组合测量方法进行应用,飞机壁板组件的外形曲面属于双曲面曲面,并且外形精度要求较高<sup>[12]</sup>,一般壁板类组件外形公差要求为±1.5 mm,激光跟踪仪的单个测量难以满足测量要求,而关节臂测量机由于测量范围的限制也无法独立完成壁板这种大型组件的测量,现应用基于激光跟踪仪与关节臂测量机的组合测量方案,对壁板外形曲面进行测量,具体测量方法如下:

1)对壁板划分扫描测量区域,所划分的测量区域大小取决于关节臂测量机的测量范围的大小,在测量区域内,布置至少 4 个非共线测量公共点。在飞机坐标系下,确定激光跟踪仪的站位,使激光跟踪仪在该站位下,能够准确的测量到公共点靶球的坐标位置。使用关节臂测量机对壁板测量区域以及测量公共点上的靶球进行扫描测量。

2)对关节臂测量机扫描得到的靶球点云进行球特征拟合,计算出靶球球心坐标。之后,将激光跟踪仪测得的公共点坐标与关节臂测量机通过球特征拟合求得的公共点坐标进行拟合,拟合结果如图 6 所示。通过公共点坐标拟合,将关节臂测量机坐标系下的测量数据转换到激光跟踪仪所在的飞机坐标系中。

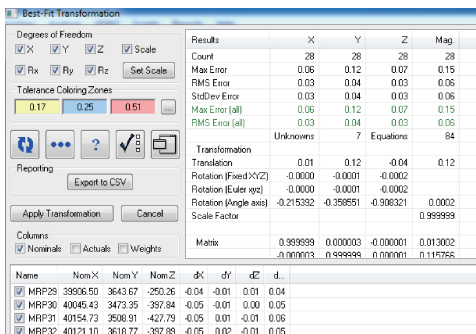


图 6 拟合结果

名称	类	开始	X1	Z1	结束	Y2	Z2	d1	d2	Delta	d1	Delta	偏差
HCHD1	26751.6340	-94.4364	6130.8273	26751.9550	-94.4364	6130.8273	0.4210	0.0000	0.0000	0.4210	0.0000	0.0000	0.4210
HCHD2	26775.4100	-265.9697	6119.7888	26775.6876	-265.9697	6119.7888	0.2776	0.0000	0.0000	0.2776	0.0000	0.0000	0.2776
HCHD3	26775.4100	-415.9211	6096.5523	26775.2761	-415.9211	6096.5523	-0.1339	-0.0000	0.0000	-0.1339	-0.0000	0.0000	-0.1339
HCHD4	26775.4100	-573.2483	6093.9143	26775.5716	-573.2483	6093.9143	0.1616	0.0000	0.0000	0.1616	0.0000	0.0000	0.1616
HCHD5	26752.6400	-725.1332	5996.8045	26751.9452	-725.1332	5996.8045	-0.2695	0.0000	0.0000	-0.2695	0.0000	0.0000	-0.2695
HCHD6	26803.6040	-871.3828	5925.2382	26802.9460	-871.1893	5925.6454	-0.6530	0.1945	0.4071	-0.6530	0.1945	0.4071	-0.7978
HCHD7	26803.6040	-1026.8228	5842.7038	26802.9626	-1026.8228	5842.7038	-0.9611	-0.0000	0.0000	-0.9611	-0.0000	0.0000	-0.9611
HCHD8	26801.0640	-1134.7730	5748.2280	26800.4883	-1134.7730	5748.2280	-0.5743	-0.0000	0.0000	-0.5743	-0.0000	0.0000	-0.5743
HCHD9	26801.0640	-1280.5433	5641.2912	26800.6056	-1280.5433	5641.2912	-0.4626	-0.0163	-0.0166	-0.4626	-0.0163	-0.0166	-0.4626

图 8 偏差矢量表

由关节臂测量机和激光跟踪仪所构建的组合测量系统,通过关节臂测量机对壁板类组件外形曲面的精确扫描,以及激光跟踪仪测量公共点进行的坐标转换,来实现对飞机壁板类组件的测量任务,并且能够清晰地确定飞机壁板的超差位置与超差量。经验证,基于激光跟踪仪与关节臂测量机的数字化组合测量系统对于飞机壁板类组件的测量任务,有一定的实用性。

### 6 结 论

在现代化飞机装配制造中,面对复杂的测量任务,单一的数字化测量设备无法满足测量要求,需要多种测量设备进行组合测量。本文通过将关节臂测量机与激光跟踪仪进行组合测量,来实现飞机壁板类组件的检测任务,该组合测量方法实现了两种数字化测量设备的性能互补,很好地利用了激光跟踪仪测量范围广和关节臂测量机的扫描测量的性能。最终,将该组合测量方法应用到某型飞机壁板类组件的实际测量任务中,经检测,得到的偏差分布色谱图和偏差矢量表,可以清晰地看出该机型壁板组件的偏差分布和某些点的具体超差值,经实例检验,该方案具有一定的应用价值。在现代化飞机装配制造中,单一的测量设备的使用方法已经趋于完善,基于多种数字化测量设备的组合测量技术是今后飞机数字化测量的发展趋势。

### 参考文献

[1] 于浩,杜福州.基于组合测量的大尺度产品柔性检测技术[J/OL].计算机集成制造系统:1-19[2018-11-01].  
http://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.5946.TP.20180907.1014.006.html.

[2] 李五朋,田锡天,耿俊浩,等.飞机大部件装配外形数字



- 化组合测量方法[J].航空制造技术,2018,61(8):80-84.
- [3] 罗明成,王铜,董岚,等.经纬仪与激光测距仪组合系统的误差分析及标定方法[J].计测技术,2018,38(4):20-25.
- [4] 罗哉,刘晖,田焜,等.关节臂式坐标测量机测量力误差分析及补偿[J].仪器仪表学报,2017,38(5):1159-1167.
- [5] 张曦,陈五一.激光跟踪仪测量曲面的测量不确定度研究[J].计量学报,2006(2):107-112.
- [6] 杜浩.基于MFC的计算机集成技术开发原理[J].科教导刊(上旬刊),2013(8):183-184.
- [7] 全志民,唐文彦,刘建新,等.基于激光跟踪仪和坐标测量臂的工业测量系统[J].计量技术,2008(5):13-16.
- [8] 向民志,范百兴,李祥云,等.激光跟踪仪与机器人坐标系转换方法研究[J].航空制造技术,2018,61(Z1):98-101.
- [9] 王德元,唐文彦,张晓琳,等.基于标准器的大尺寸测量系统坐标统一化方法[J].仪器仪表学报,2015,36(8):1845-1852.
- [10] 张博,魏振忠,张广军.机器人坐标系与激光跟踪仪坐标系的快速转换方法[J].仪器仪表学报,2010,31(9):1986-1990.
- [11] 尹寿宝.总装精测提高激光跟踪仪转站精度的方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [12] 张荣宁,王志国,谭昌柏.飞机机身壁板件装配偏差分析建模[J].机械制造与自动化,2017,46(4):72-77.
- [13] 阳波,赖丽珍,陈金平,等.机翼壁板成型延展测量及数据处理分析[J].机械制造与自动化,2018,47(1):70-72.
- [14] 余剑峰,辛博,郑堂介.基于测量点自适应搜寻的法矢求解算法[J].计算机集成制造系统,2013,19(4):817-822.

### 作者简介

王巍,博士、教授,主要研究方向为飞行器数字化制造、飞机装配工装的通用性及模块化设计。  
E-mail:wwsh595@163.com