

# iGPS测量系统与激光跟踪仪 在某飞机大部件数字化 装配中的对比应用

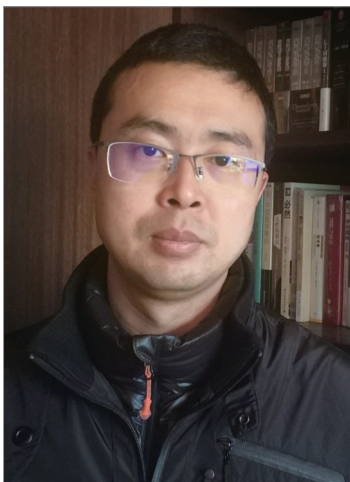
范 斌,季青松,李明飞,谢百玲,封璞佳,王 波

(中航飞机股份有限公司汉中分公司,汉中 723213)

**[摘要]** 数字化检测技术是现代飞机数字化制造的重要保证手段。目前激光跟踪仪是航空制造行业内广泛应用的主要数字化测量系统,而 iGPS 测量系统则是新兴的大空间尺寸测量系统。着重介绍了中航飞机公司采用两种数字化测量系统进行的工艺对比试验和工程应用验证的情况,并通过对比结果对两种测量系统的优劣进行初步分析。分析认为 iGPS 测量系统相对激光跟踪仪有一定优势,但组网精度和测量精度略低,其受工程发射器数量及产品结构、数字化装配系统的布局限制,测量精度会进一步受到影响。iGPS 更适用于对测量精度相对要求较低、测量范围较大、测量效率有一定要求的数字化测量环境。

**关键词:** 数字化装配;数字化检测技术;iGPS 测量系统;大空间测量;精度对比;误差分析

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.05.057



范 斌

高级工程师,主要从事飞机部件装配技术研究工作。

飞机装配在部件装配及总装的各个环节都需要进行严格的检测,任

何一个环节的误差都会对后续的装配产生不利的影 响<sup>[1]</sup>。随着社会需求、市场竞争以及相关科学技术的不断发展,飞机装配技术不断向更高水平推动和发展<sup>[2]</sup>。通过采用数字化检测技术及检测装备,准确检测装配件的外形准确度、空间位姿,快速获得检测结果,进行偏差分析与评估<sup>[3]</sup>,保证飞机产品的精准、快速装配,是提高飞机产品装配效率和质量的关键<sup>[4]</sup>。数字化检测是现代飞机数字化装配的基础工作<sup>[5]</sup>,是连接飞机设计与制造的桥梁,保证飞机产品质量的重要技术。现阶段国内航空企业部件数字化装配时均采用激光跟踪仪进行数字化检测。

激光跟踪仪是一种成熟、稳定的数字化测量系统,由于其测量范围

大、测量精度高、测量稳定性好<sup>[6]</sup>,最大测量范围可达 120m,10m 范围内测量精度在  $\pm 15\mu\text{m}$  以内,测量数据数字化、可读性好,可以直接显示、加工和处理<sup>[5]</sup>,早已广泛应用在工装制造和产品数字化装配和检测过程中。但目前,在大空间测量使用过程中,激光跟踪仪一般需要转站测量,转站过程较为复杂,转站后对测量精度有一定影响,同时随着测量距离的增大激光存在衰减,测量精度随着测量距离增加而降 低达  $6\mu\text{m}/\text{m}$ 。

因此,iGPS 测量系统作为一种超越传统测量手段的大尺寸空间测量系统<sup>[7]</sup>,为操作人员在大尺寸的三维空间定位和测量难点提供一种全新的解决方案<sup>[8]</sup>。相较激光跟踪仪测量,iGPS 测量具有大尺寸空间测

量、多目标点测量、实时连续测量的优点,同时,同一测量场内各测量目标点的测量精度唯一<sup>[9]</sup>,设备理论精度可达0.25mm,特别适用于大型飞机部件数字化制造中的数字化检测。美国波音公司从1998年开始应用iGPS测量技术,在波音747、F/A18、777、787等飞机的总装对接中,都应用了iGPS技术。前期,仅国内个别航空企业将其应用于整机水平测量,尚未进入部件数字化装配中。

在国内航空企业中,中航飞机公司首次在A型机部件数字化装配过程中,面向大部件数字化装配系统应用iGPS测量系统,开展iGPS检测技术相应工艺试验,并应用于多个大部件的数字化总装配和对接。本文拟从iGPS测量系统与激光跟踪仪在工艺试验、工程应用等方面的对比,并通过对比结果对两种测量系统的优劣进行了初步分析。

## iGPS 测量系统简介

### 1 iGPS测量系统原理

该系统主要利用三边测量原理建立三维坐标体系来进行测量<sup>[5]</sup>。其中的测量探测器根据激光发射器投射光线的时延特征参数,计算探测器相对于发射器的方位和俯仰角,将模拟信号转换成数字信号并发送给接收处理器系统,采用光束法平差原理实现各发射器之间的系统标定,然后采用类似于角度空间前方交会的原理解算空间点位坐标及其他位置信息。

### 2 iGPS测量系统构成

iGPS测量系统由激光发射器、测量探测器、传感器(3D智能靶镜)、接收处理器系统软件<sup>[10]</sup>等构成。

## 数字化测量的规划

在数字化装配过程中,根据产品数字化装配工艺要求,针对产品结构特点以及数字化装配系统结构情况,考虑到产品装配误差要求,在产品或

相关联的工装上选取适当位置和数量的目标点作为评判产品位姿的重要依据,通过对其的监控,与上道工序的偏差值反馈给数控系统进行微调,如此迭代,以达到最终装配精度要求,因此数字化测量规划有着极为重要的作用。

做好数字化测量的关键不仅取决于数字化测量设备自身精度的高低,还与产品数字化装配的工艺性、测量点的设置、测量设备的布置、基准点的布局、测量方法的选择、工作环境的控制等有密切关系。因此,在规划iGPS测量系统与激光跟踪仪的对比检测试验和工程应用时,选取了同架机的同一产品和数字化装配系统,在满足各自设备自身要求的前提下,数字化测量的规划尽量将两者测量场的构建、测量点的设置、基准点的布局等关键要素进行了统一。

### 1 测量场的构建

构建高精度、大尺寸的数字化测量场主要是规划数字测量设备的空间架构,其是构建整个数字化测量场的基础。iGPS测量设备精度与其发射器数量有关<sup>[11]</sup>,3个激光发射器相对2个提高50%,4个激光发射器相对3个激光发射器提高30%,5个激光发射器相对4个激光发射器提高10%~15%。因此,在规划iGPS测量设备布站时,应确保测量目标在测量全过程中可至少接收4~5个激光发射器。在前机身总装数字化装配平台上,构建的26m×16m×8m箱式测量场中,规划布置了9个激光发射器、前后5台激光跟踪仪。

### 2 测量点的布置

测量点布置原则:选取被测产品表面上测量设备目视可达的目标点,其设置基础稳固可靠,可代表被测产品的位姿。根据被测产品被测特征点(测量目标)的分布位置特点,从而制定合适的测量计划。因此,测量点布置需同时满足iGPS和激光跟踪仪两种测量系统的测量要求。在

前机身部件总装配的6个组件产品外表面上各选取了4个测量目标点,目标点设置在保型架与产品连接处,共计24个测量点。

### 3 基准点的布局原则

统一测量场中各测量目标的相互关系以及各测量目标与坐标系统的绝对关系,为后续数控定位、调姿系统提供基础数据,构建测量场坐标系时应与产品坐标系、数字化装配系统坐标系以及其他相应工装坐标系的基准相协调统一。因此,以全机坐标系构建数字化测量场坐标系,将激光跟踪仪和iGPS两种测量系统的基准点均按此构建统一。

## iGPS 测量系统工艺试验

结合产品实际特点,通过开展一系列iGPS测量系统的组网试验、试验件检测试验、对比精度(与激光跟踪仪对比)试验等工艺试验研究,对iGPS测量系统的接收器布置、发射器布局、测量场组网、检测流程、检测精度等技术要求和参数进行验证。

### 1 组网试验

#### 1.1 构建测量场

使用6个激光发射器建立一个12m×7m的iGPS测量场,并使用激光跟踪仪分别对动态跟踪测量工具进行赋值;分别设置发射器的6种不同布置方式,使用标准杆进行组网系统标定。

#### 1.2 试验过程

测量场分别采用逆时针和顺时针两种方式进行标准杆组网标定;在激光发射器高低位置不同的布置方式下,对12个测量点分别采用激光跟踪仪(Leica AT901)与iGPS同时进行3次测量以平均测量误差,记录接收器的数据,并进行分析评估;每隔1h检查一次整个测量系统的精度。

#### 1.3 结果分析

组网成功,确定的检测流程可用。测量场标定误差对比数据如表1所示。

(1)在同一测量场内,iGPS相对激光跟踪仪的测量场标定误差约在0.3~0.6mm,最大为0.6582mm,可见iGPS的建场精度略差于激光跟踪仪。

(2)在测量场构建时,发射器布置时高度趋于一致的数量越多,iGPS相对激光跟踪仪的测量场标定误差越小,可见发射器布置方式对测量场标定精度略有影响。

(3)在6种测量场构建中,通过激光跟踪仪与iGPS的对比检测发现,顺时针组网标定测量误差值的最大值与最小值相差0.1648mm,逆时针组网标定测量误差值的最大值与最小值相差0.3796mm,可见在iGPS组网标定时顺时针的稳定性要略高于逆时针组网。

## 2 试验件检测及精度对比试验

选取某型机前机身数字化总装配系统作为试验平台,使用iGPS测量设备、激光跟踪仪对试验件(5.4m×3.15m)进行数控调姿,对iGPS测量技术的可靠性及可行性进行验证,并通过试验比对,验证iGPS系统检测精度是否可以满足工程应用要求。

### 2.1 构建测量场

(1)依托某型机前机身总装数字化装配平台,结合部件数字化装配需求,构建了适用于激光跟踪仪和iGPS测量系统两种数字化测量设备的飞机测量坐标系。

(2)构建的箱式测量场从测量空间上,完全覆盖整个装配部件,箱式测量场为26m×16m×8m,见图1。

(3)从部件上选取的测量目标点同时适用于激光跟踪仪和iGPS测量系统两种数字化设备的测量。

(4)经过仿真验证,构建的测量场符合iGPS测量系统建场的技术规范要求,符合激光跟踪仪测量要求,满足数字化装配过程中的数字化检测要求。

### 2.2 试验过程

iGPS、激光跟踪仪系统分别完

成组网、建站;分别采用两种测量系统对试验件的测量目标进行对比测量;调姿系统依据iGPS测量数据调整试验件姿态,直至测量目标符合设计要求;分别测量调姿前期、调姿中期、调姿结束状态下试验件的测量目标。

### 2.3 试验结果

(1)多点实时测量。

实现了多测量点实时连续测量。

(2)姿态调整合格。

根据以上试验结果可知,数据X、Y、Z均 $< \pm 0.2\text{mm}$ ,满足试验要求,姿态合格的结果,判定试验件调姿成功。

(3)对比精度合格。

在整个试验过程中,共进行3次测量精度对比试验,分别为调姿前期、调姿中期和调姿结束认定姿态符合要求,除第1次不能满足精度对比要求外(iGPS相对激光跟踪仪最大偏差为0.282mm),第2次与第3次都满足对比精度 $< \pm 0.2\text{mm}$ 的试验要求。

(4)iGPS测量场布置符合设计要求。

iGPS测量场布置直接影响整个试验能否进行,前期通过电脑仿真模拟与现场试验,得出现有最优iGPS布场方案。通过本次试验件的验证,

表1 组网试验数据  
Table 1 Networking test data

序号	发射器布置方式	测量场标定方式	测量场标定误差值/mm	iGPS系统相对激光跟踪仪的测量场标定差异值/mm
1	同高 1500mm	顺时针	0.3911	0.0418
		逆时针	0.3493	
2	前后低中间高	顺时针	0.2834	-0.0672
		逆时针	0.3506	
3	前后高中间低	顺时针	0.4482	-0.0565
		逆时针	0.5047	
4	3高3低	顺时针	0.3140	-0.3442
		逆时针	0.6582	
5	前、中高后低	顺时针	0.3090	0.0304
		逆时针	0.2786	
6	同高 1610mm	顺时针	0.3343	0.0033
		逆时针	0.331	

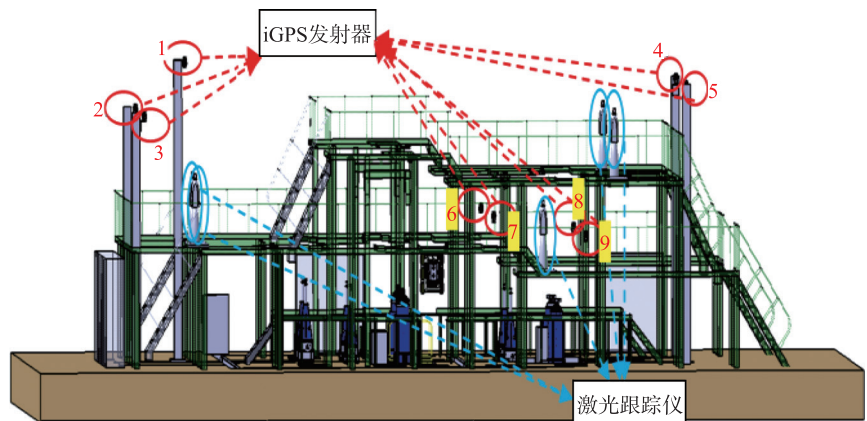


图1 飞机部件数字化装配测量系统构建示意

Fig.1 Construction of digital assembly measurement system for aircraft components

测量场布置合理, iGPS 组网、测量均顺利进行。

#### 2.4 试验件精度对比试验分析

通过 iGPS 测量系统组网试验, 并依托前机身数字化装配平台, 采用激光跟踪仪和 iGPS 测量系统分别在 3 个状态对试验件进行测量, 并指导数控系统进行调姿, 其测量结果和调姿结果证明:

(1) iGPS 测量系统可以实现自由组网式和基准点建站式两种组网方式。

(2) iGPS 测量系统可以用于飞机数字化装配过程中的数字化测量。

(3) iGPS 测量系统相对激光跟踪仪的对比测量精度可以达到 0.2mm/10m。

第一次对比测量不能满足精度要求, 分析原因为, 首次测量时, 试验件为自由状态, 试验件位置与理论位置偏高 200~300mm, 测量点处于 iGPS 可探测, 但测量角度接近临界位置, 所以 iGPS 此时测量精度与激光跟踪仪对比较差。

### 工程应用

在前期工艺试验成果基础上, 结合型号研制进程, 选取某型机前机身部件开展工程应用验证。

#### 1 工程应用验证过程

在某型机前机身数字化装配平台上, 前机身 6 个组件各选取 4 个测量目标点分别采用激光跟踪仪、iGPS 测量系统进行对比测量, 从而进行部件数字化总装配的工程应用验证。通过测量软件获取飞机测量点的实际坐标并与飞机设计坐标系下的实测值(前道工序)进行对比, 通过数控调姿控制系统完成调姿操作。

具体过程如下:

(1) iGPS 及激光跟踪仪的测量场建场、标定。

(2) 进行各组件初始位姿测量, 比对初始位姿与理论目标位姿, 将数

据传递至数控调姿系统, 按照调姿规则进行调姿路径规划。

数控调姿系统进行调姿, 直至完成调姿。

调姿到位后, 进行测量检验。

#### 2 验证结果分析

针对组件的数字化调姿过程进行测量, 测量数据包含 iGPS、激光跟踪仪实测值与前道工序实测值数据对比, 以及激光跟踪仪与 iGPS 测量数据对比。调姿结束后, 经激光跟踪仪和 iGPS 测量系统对其装配结果进行测量。

(1) 激光跟踪仪对产品的位姿评价。

采用激光跟踪仪测量 6 个组件上设置的目标点, 虽有 30 组数据相对理论值偏差超过  $\pm 0.2\text{mm}$ , 最大偏差 0.49535mm, 如图 2 所示。其测量点误差均在设计允许公差(HB/Z 23《飞机气动外缘工程》中规定大型飞机机身类部件 I 区外形公差为  $\pm 1.5\text{mm}$ , II 区外形公差为  $\pm 2\text{mm}$ ) 范围之内, 因此, 产品调姿合格, 满足使用要求。

(2) iGPS 对产品的位姿评价。

采用 iGPS 测量系统测量 6 组件上设置的目标点, 共有 40 组数据相对理论值偏差超过  $\pm 0.2\text{mm}$ , 最大偏差 0.83593mm, 如图 3 所示。

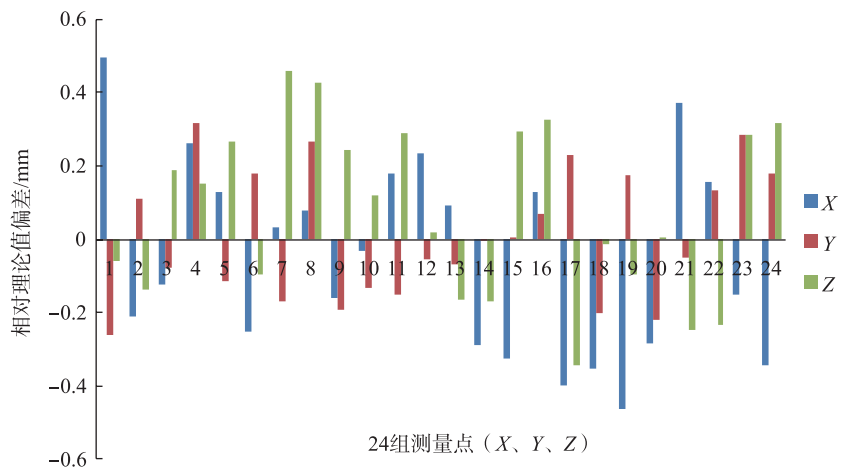


图2 激光跟踪仪测量与理论值的偏差统计

Fig.2 Deviation statistics between measurement and theoretical value of laser tracker

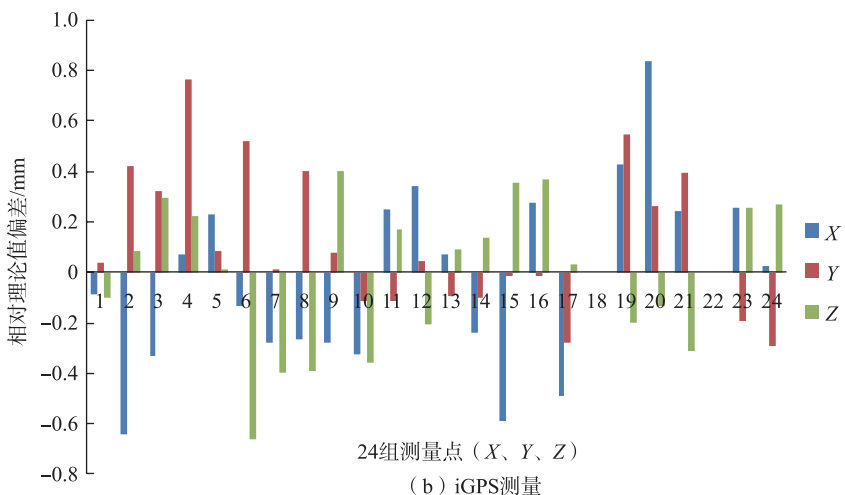


图3 iGPS测量与理论值的偏差统计

Fig.3 Deviation statistics between measurement and theoretical value of iGPS

其测量点误差均在设计允许公差范围之内,因此,产品调姿合格,满足使用要求。

(3) iGPS 相对激光跟踪仪测量偏差情况。

在 6 个测量组件 24 个测量点的 X、Y、Z 3 个方向共 72 组测量数据中, iGPS 相对激光跟踪仪测量有 31 组测量数据偏差值超过  $\pm 0.2\text{mm}$ , 最大偏差  $1.11761\text{mm}$ , 如图 4 所示。表 2 为对超差原因统计结果。

### 3 误差原因分析

虽然在前期工艺对比试验中, iGPS 相对激光跟踪仪的测量精度偏差未大于  $0.2\text{mm}$ , 但在工程应用过程中, 采用激光跟踪仪和 iGPS 分别对目标点进行测量的超差统计结果来看, iGPS 测量超差情况多于激光跟踪仪, 其结果受多种因素影响。

(1) 对于工程中构建的前机身箱式测量场, 范围为  $26\text{m} \times 16\text{m} \times 8\text{m}$ ,

iGPS 测量系统理论测量精度 ( $0.25\text{mm}$ ) 略低于激光跟踪仪测量精度 ( $0.15\text{mm}$ )。

(2) 在进行测量场标定时, iGPS 的标定精度略差于激光跟踪仪, 导致两种测量工具构建的工装坐标系之间存在一定差异, 因而 iGPS 的测量超差也多于激光跟踪仪。

(3) 受接收器所设置在产品的刚性或稳定性影响, 根据超差部位分析, 采用激光跟踪仪、iGPS 对左、右侧壁和地板等刚性相对较弱结构件上的目标点进行测量, 数据超差均较多。

(4) 在实际工程应用中, 受制于 iGPS 发射器数量限制, 以及产品外形和结构形式导致测量目标点的布置限制, 测量点虽理论上满足发射器数量以及测量极限角度要求, 但最终部分测量点的测量精度会有所降低。

(5) 受现场工作环境(如温度变

化、湿度、振动)等因素影响, 激光跟踪仪、iGPS 测量系统的测量结果产生一定偏差。

## 对比分析

试验件精度对比验证试验时, 相对激光跟踪仪的对比测量精度可以达到  $0.2\text{mm}/10\text{m}$ , 满足 iGPS 测量系统  $0.25\text{mm}$  的理论精度要求。但是在实际工程应用过程中, 激光跟踪仪测量值相对理论值绝大部分偏差在  $\pm 0.4\text{mm}$  以内; iGPS 测量值相对理论值绝大部分偏差在  $\pm 0.6\text{mm}$  以内, 且相对激光跟踪仪测量值绝大部分的偏差在  $\pm 0.5\text{mm}$  范围以内, 验证了 iGPS 相对激光跟踪仪测量精度略低, 体现了其受工程发射器数量及产品结构、数字化装配系统的布局限制, 测量精度会进一步受到影响。同时, 也在实际工程中表现出了 iGPS 相较激光跟踪仪, 在大空间测量中的多点、快速、实时连续测量以及无需转站测量的优点。

## 结论

在飞机大部件数字化装配方面, 中航飞机公司是国内首家对 iGPS 检测技术进行工程应用的航空企业, 借助 iGPS 系统多点实时测量等诸多优点, 无需转站的建网特点, 相较激光跟踪仪测量, 提高了大部件数字化装配过程中的数字化检测效率, 并保证了数字化测量过程中测量精度的稳定性。

通过工艺试验和工程应用, 反映出 iGPS 测量系统作为一种新兴的测量技术, 相对激光跟踪仪虽有一定优势, 但由于组网精度和测量精度略低, 目前其主要适用于对测量精度相对要求较低、测量范围较大、测量效率有一定要求的数字化测量环境。后续为更好地应用和推广新兴的 iGPS 检测技术, 需重点加强 iGPS 测量系统建场规划、影响测量精度因素等方面的工艺研究和摸索。

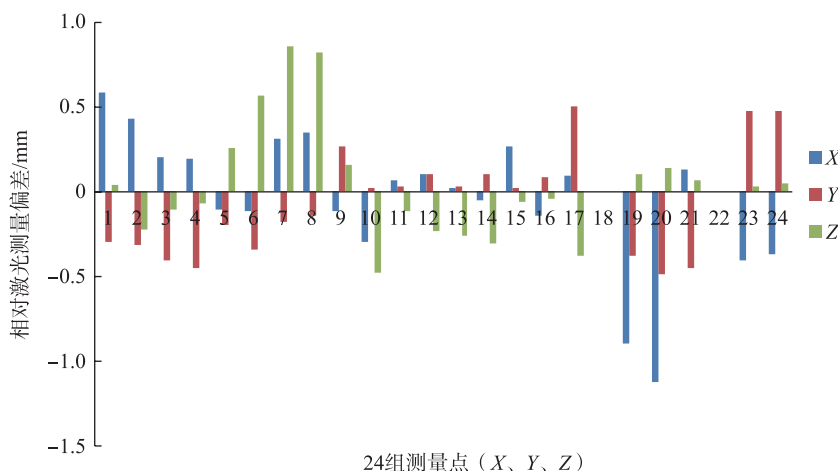


图4 iGPS相对激光跟踪仪的测量偏差统计

Fig.4 Measurement deviation statistics of iGPS to laser tracker

表2 超差原因统计

Table 2 Statistics of causes of excess difference

超差情况	超差原因	超差组数	其他
激光测量超差数据 13 组	仅激光测量超差	5	iGPS 相对激光偏差超过 $0.5\text{mm}$ 的为 1 组
	iGPS、激光测量均超差	8	iGPS 相对激光偏差超过 $0.5\text{mm}$ 的为 4 组
iGPS 测量超差数据 23 组	仅 iGPS 测量超差	15	iGPS 相对激光偏差超过 $0.5\text{mm}$ 的为 1 组
	iGPS、激光测量均超差	8	iGPS 相对激光偏差超过 $0.5\text{mm}$ 的为 4 组
iGPS、激光测量均不超差 3 组	两种测量误差累积	3	—

### 参考文献

- [1] 金正琪. 提高激光跟踪仪转站测量精度的技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
JIN Zhengqi. Research on improving measurement accuracy of laser tracker[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [2] 钟厚炜. 国内外飞机装配技术发展对比分析[J]. 科学与财富, 2014(9): 177.  
ZHONG Houwei. Comparative analysis on the development of aircraft assembly technology at home and abroad[J]. Science and Wealth, 2014(9): 177.
- [3] 王梅. 数字化测量技术在飞机外形检测方面的应用研究[J]. 航空制造技术, 2013, 56(20): 109-112.  
WANG Mei. Application of digital measurement in aircraft shape heck[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(20): 109-112.
- [4] 何胜强. 飞机数字化装配技术体系[J]. 航空制造技术, 2010, 53(23): 32-37.  
HE Shengqiang. Digital assembly technology system of aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(23): 32-37.
- [5] 邹爱丽. 数字化测量技术及系统在飞机装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2011, 54(21): 72-75.  
ZOU Aili. Application of digital measuring system in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology 2011, 54(21): 72-75.
- [6] 杜福洲, 王怀. 激光跟踪仪现场测点不确定度建模及试验分析[J]. 制造业自动化, 2013(3): 23-26.  
DU Fuzhou, WANG Huai. Modeling site measuring uncertainty of the laser tracker and experimental analysis[J]. Manufacturing Automation, 2013(3): 23-26.
- [7] 李薇. 数字化技术在飞机装配中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2004, 47(8): 24-29.  
LI Wei. Research on the application of digital technology in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004, 47(8): 24-29.
- [8] 陈登海. 基于室内GPS的飞机数字化水平测量技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.  
CHEN Denghai. Research on aircraft digital level measurement technology based on indoor GPS[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [9] 杜福洲, 陈哲涵, 唐晓青. iGPS测量场精度分析及其应用研究[J]. 航空学报, 2012, 33(9): 1737-1745.  
DU Fuzhou, CHEN Zhehan, TANG Xiaoqing. Precision analysis of iGPS measurement field and its application[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(9): 1737-1745.
- [10] 季青松, 牛润军. 面向大飞机总装自动化生产的数字化测量系统应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(1): 84-87.  
JI Qingsong, NIU Runjun. Application of digital measurement system for large aircraft assembly automation production[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(1): 84-87.
- [11] 郭洪杰, 王碧玲. iGPS测量系统实现关键技术及应用[J]. 航空制造技术, 2012, 55(11): 46-49.  
GUO Hongjie, WANG Biling. Key technology and application of iGPS measuring system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(11): 46-49.

通讯作者: 范斌, E-mail : fbair\_0916@163.com.

## iGPS and Laser Tracker Applications Comparison in Digital Assembly of Large Aircraft Parts

FAN Bin, JI Qingsong, LI Mingfei, XIE Bailing, FENG Pujia, WANG Bo  
(Hanzhong Aircraft Branch, AVIC Aircraft Co., Ltd., Hanzhong 723213, China)

**[ABSTRACT]** Digital detection technology is an important guarantee for modern aircraft digital manufacturing. At present, laser tracker is the main digital measurement system widely used in the aviation manufacturing industry, and the iGPS measurement system is a new large-size space measurement system. This paper focuses on Hanzhong Aircraft Branch, AVIC Aircraft Co., Ltd. using two kinds of digital measurement system for the process of comparative testing and engineering verification, at the same time, conducts a preliminary analysis of both measurement systems by comparing the results. It is concluded that the iGPS measurement system has some advantages over the laser tracker, but the networking accuracy and measuring accuracy are slightly lower, which is restricted by the number of engineering launchers and product structure, and the layout of the digital assembly system, and the measurement accuracy will be further affected. iGPS is more suitable for the digital measurement environment, where the accuracy of measurement is relatively low, the range of measurement is large, and the efficiency of measurement is required to some extent.

**Keywords:** Digital assembly; Digital detection technology; iGPS measurement system; Large space measurement; Accuracy comparison; Deviation analysis

(责编 铃兰)