

# 数字化测量与气垫技术在飞机大部件装配中的应用

## Application of Digital Measurement and Air-Cushion Technology in Aircraft Major Part Assembly

北京航空精密机械研究所 吴晓峰 张亮亮 高伟光

**[摘要]** 介绍了数字化测量技术和气垫技术的功能、特点,以及他们在国内外飞机装配中的应用情况。

**关键词:** iGPS 激光跟踪仪 气垫技术

**[ABSTRACT]** Function, characteristic, system composition of digital measurement and air-cushion technology are introduced. Application in aircraft assembly both at home and abroad is also presented.

**Keywords:** iGPS Laser tracker Air-cushion technology

在航空制造领域,国外公司大量采用先进的数字化测量技术、数控技术和气垫运输技术,使飞机装配工作效率和质量提高到很高的水平,已从传统专用的固定工装发展到适用多机种、批量装配、高效先进的柔性装配阶段。发展数字化测量及大部件运输定位技术是解决飞机总装工艺、装配方案问题的基础。其中,数字化技术需要使用 iGPS 测量技术和激光跟踪仪技术,而大部件运输则依靠气垫运输技术。

## 1 数字化测量技术

在自动化装配中都要采用数字化测量系统来辅助定位和移动,从现行应用上看,数字化测量技术主要包括 iGPS 测量系统和激光跟踪测量技术 2 种。

### 1.1 iGPS 测量技术

#### 1.1.1 技术介绍

在工业测量领域,根据 GPS 全球定位系统的原理,开发出了基于区域 GPS 技术的三维测量技术,即 iGPS (indoorGPS) 系统。它是一种具有高精度、高可靠性和高效率的测量系统,主要用于解决大尺寸空间的测量与定位问题。

#### 1.1.2 iGPS 测量系统的 3 大特点

(1) 测量误差达到一定值后就不再随着测量范围的增大而增大。

(2) 允许多名技术人员手持传感器独立而并行地进行测量。

(3) 可在一个坐标系内,完成坐标测量、跟踪测量、准直定位、监视装配等任务。

#### 1.1.3 iGPS 系统构成

iGPS 系统主要由以下 5 部分组成:

(1) 发射器: 标准的 iGPS 系统含有 4 个计量型发射器,用于高精度的计量应用。

(2) 传感器(3D 智能靶镜): iGPS 系统支持各种不同结构的传感器,同时与 3 个发射器在线通信,这些传感器将自动串行地把精确的 3D 坐标值传送给用户。

(3) 手持探头: iGPS 系统在工作区域内可以同时支持无数量限制的传感器。

(4) 系统软件: 每套 iGPS 系统都配有基于位置的服务器和手持式无线客户软件,包括计量软件包。

(5) 接收器电路: iGPS 系统要求每个传感器都要连接到一个放大器和信号处理接收器电路板上。

#### 1.1.4 误差分析

iGPS 在设置和校准过程中将会带来误差,这是因为校准和设置测量不仅包含着与发射器校正有关的误差,而且也包含着与测量有关的正常误差,所以要均匀、合理地采点才能使设置误差最小化。通过分析可知,在整个测量范围内,线性误差是一个常量,而其余误差均与方位角、仰角或测量过程有关。

在发射器校准过程中,要确定以下关键参数并为以后所使用: 扇束角 1 和 2; 扇束同心误差和 2 个扇束之间的角旋转距离。

其他误差源:

光束换向与时间/温度: 发射器头中的光学系统会随温度变化有轻微的漂移。试验证明,它会造成 0.25" 的测量不确定度,主要影响水平角的测量精度。

旋转头摆动与时间/温度: 试验证明,它会造成 1" 的测量不确定度,主要影响垂直角的测量精度。

光束对称性: 它会造成 1" 的测量不确定度,主要影响水平角的测量精度。

旋转噪声: 它会造成 5" 的测量不确定度,可以通过平均的方式降低噪声。

在接收器校准过程中,要确定每个检测器的边界分量,例如圆柱体的实际直径和安装面到检测器面的偏移。这些误差是属线性误差。例如,对于 1cm 的圆柱检测器而言,其标准不确定度误差约为 30  $\mu$ m。

检测器圆柱对称性：由于柱面的不平滑性，会造成约为  $30\mu\text{m}$  的不确定度误差。

放大器：会造成约为  $0.25'' \sim 0.5''$  的不确定度误差。

采样时钟：会造成约为  $0.82''$  的不确定度误差。

### 1.2 激光跟踪仪技术

激光跟踪仪是以激光干涉仪、绝对测距仪为测距手段、以绕 2 个轴转动的角度编码器为测角手段的移动式坐标测量机。激光跟踪仪系统包括反射镜、角度编码器、电机、位置探测器、分光镜、干涉镜、绝对距离探测器等，可轻松实现目标的静态坐标测量和动态轨迹跟踪，是一种高精度、高分辨率、大范围、智能化动态测量仪器。

在直角坐标系、圆柱坐标系和球坐标系中，唯有球坐标系是只要求 1 个长度量和 2 个角度量的，而激光跟踪仪正是基于球坐标系的空间坐标测量机。

## 2 气垫运输技术

随大型飞机柔性装配的生产组织，如何能够使这些大部件在生产线工位间，以及装配型架上灵活移动是摆在我们面前的主要问题。起步晚，但起点高，结合国外大型飞机的装配实践，气垫技术是解决此问题的一种比较好的途径。

### 2.1 气垫的特点

- (1) 摩擦系数小。只有  $1\% \sim 6\%$ <sup>[1]</sup>，所需驱动力小。
- (2) 全方位的万向移动，实现精确定位。
- (3) 负载能力能够组合增加。
- (4) 具有根据地面状况进行气垫气压自动调节的能力。
- (5) 气垫抬升高度 ( $\leq 50\text{mm}$ )，安全性高。

基于以上特点，气垫技术在重载荷，大体积物体灵活精确移动方面具有领先优势，摆脱对传统起重运输设备如轨道、天车等的依赖。

### 2.2 系统组成

气垫搬运装置的概念应包括气垫搬运装置本身及该装置的工作环境。气垫装置由支撑悬浮的气垫单元(见图 1)和驱动行走单元(见图 2)组成，气垫单元又包括自适应控制器、支承块、气囊等。驱动行走单元是根据负载的大小而配置的特定装置，该装置提供驱动力和转向能力，可通过有线或者无线进行操作。工作环境是指比较光滑的工作地面。此外，气垫装置工作时需要压缩空气，这可利用工厂内部的压缩空气系统，也可以使用单独的空气压缩机。

自动定位：根据有线操作单元设定的参数或无线发射的数据控制气垫运输装备的定位运行；或者运行过程中检测到信号后控制气垫运输装备的定位运行，使运输装备具有防碰撞的能力，其控制原理如图 3 所示。

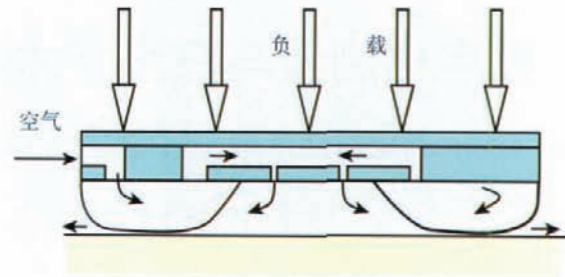


图1 气垫单元的结构

Fig.1 Structure of air-cushion unit

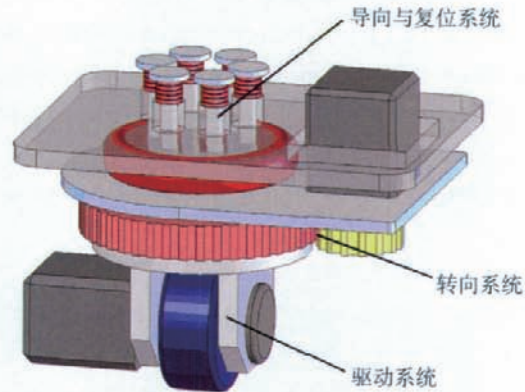


图2 驱动行走单元结构示意图

Fig.2 Structure of air-cushion drive unit

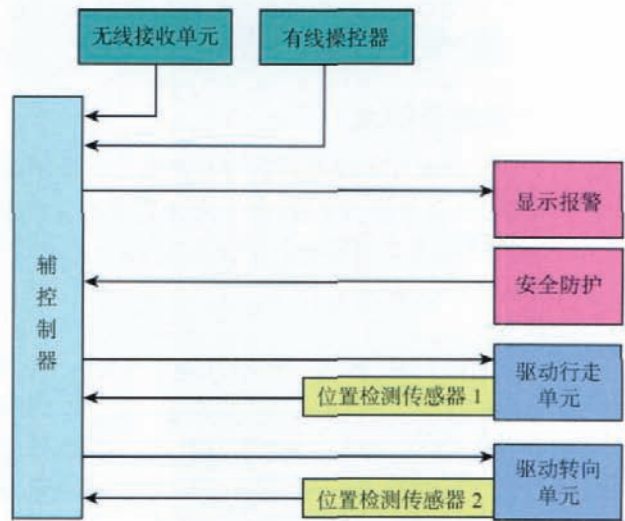


图3 自动定位控制原理图

Fig.3 Principle of automatic positioning control

气垫单元气压的调节：根据动态高度传感器检测地面坡度的变化，通过调节高频响气流比例调节阀，控制系统对多组气垫单元进行同步控制，提高运输装备运行的平稳性和安全性，减少噪声，如图 4 所示。

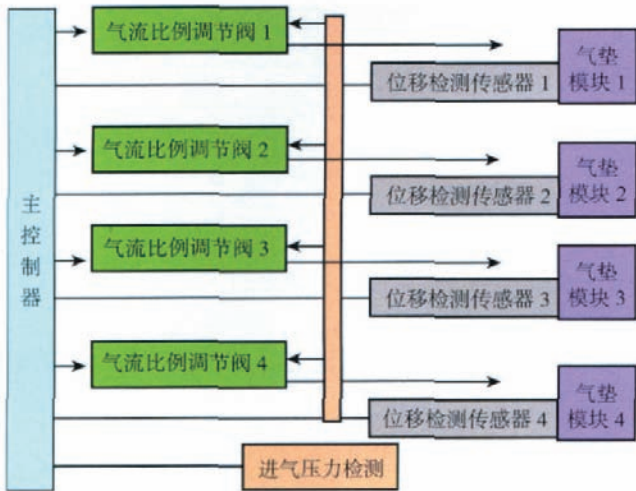


图4 气体压力自动调节控制原理图

Fig.4 Principle of automatic adjustment and control of air pressure

运输装备运动方向的调节：直线运动时，根据导引带或方向偏摆传感器检测的信号，调整转向驱动机构，从而调节运输装备的行走方向。

气垫单元的组合形式<sup>[2]</sup>：根据气垫的基本工作条件、工件底盘形状、重心位置，并使每个气垫单元承载基本相同的原理，组合气垫单元。一般气囊排列形式为3点式和双列式（见图5）。

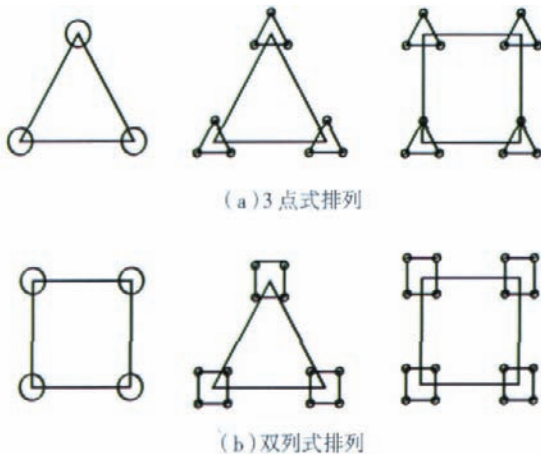


图5 气垫单元组合形式

Fig.5 Combining form of air-cushion unit

气垫对地面的要求：气垫搬运装置对地面的要求不高，但是为保证形成均匀气膜，减少磨损，对地面要求清洁、坚实、平整、无明显裂缝，对有细小轻微裂缝经简单处理即可。目前，新厂房一般都采用了环氧树脂地面，比较适合气垫运行。

### 3 数字化测量技术与气垫技术在飞机装配中的应用

波音和空中客车公司，其飞机装配工艺与设备产生

了根本变化，其中 iGPS 在飞机装配中得到了广泛的应用。iGPS 系统能够建立一个尺寸的空间坐标系，该坐标系一旦建立，所有的测量任务，如坐标测量、跟踪测量、准直定位和监视装配等都能够在这个坐标系下完成。

将飞机装配由传统的型架改为多维运动的装配单元，采用先进的控制技术与测量技术，通过装配单元的群控和精确定位实现了飞机的柔性装配，极大地提高了飞机的装配效率，而这些装配单元的水平位置移动、位置旋转等的移动均由气垫运输系统实现。

#### 3.1 iGPS 的应用<sup>[3]</sup>

波音从 1998 年开始研究 iGPS 测量技术，该系统已应用于从波音 747 到波音 F/A18、波音 777 等飞机整机的装配线中。

#### 3.2 激光跟踪仪技术在飞机大部件对接中的应用

激光跟踪仪是大尺寸测量的首选设备，在飞机装配过程中的应用也越来越广泛。

我国的支线飞机 ARJ21 首次大规模地使用了数字化三维设计和激光跟踪仪，利用 CATIA 软件，建立整机的三维数字化模型，每个零件在飞机坐标系下都有 1 个三维坐标，激光跟踪仪的激光照射到被测点上，仪器接收反射回的激光束，通过编码器计算，给出被测点的三维坐标，得出当前被测点的位置与理论位置的偏差。

在 ARJ21 飞机的装配中利用激光跟踪仪实现数字化测量，检查机翼装配后的上反角等关键角度和位置，调整装配偏差。

在飞机部装和总装阶段，应用激光跟踪仪技术，可有效缩短装配周期，提高产品精度。

#### 3.3 气垫技术的应用

在国外，气垫运输技术有着广泛的应用，技术较为成熟。随着计算机与电子技术的飞速发展，气垫运输设备向自动控制、自动定位高性能方向发展，吨位也越来越大，已达到 1000t 级，采用遥控技术的气垫运输技术应用于核废料处理、放射性环境、易燃易爆环境。

近年来，气垫运输技术在气体流量自动调整、移动自动控制、运动平稳性控制方面有了进一步的发展，其应用范围进一步扩大，特别是在大飞机装配方面，在气垫运输设备上安装信号传感器，并通过与飞机装配厂房内的 iGPS 和激光跟踪仪组成的飞机装配测量坐标系统通信，实现了气垫运输与飞机装配对接系统控制的广泛应用。

在航空工业领域，美国 AeroGo 公司自 1967 年开始为波音提供气垫运输方式，开创气垫技术应用的先河。从此，气垫技术开始逐步得到重视和发展。

Solving 公司于 1977 年在芬兰创建，从最初的民用

气垫悬浮移动设备开始,逐步开发出迎合市场需求的各类工业气垫悬浮运输解决方案。英国皇家空军“鹞”式垂直起降战斗机支援服务中心采用了芬兰 Solving 公司所提供的悬浮移动设备进行战斗机的维修和组装。它可以非常方便地将分解开的机身和其他组件在 6 个测试检查车间内来回移动并最后组装。美国、德国、芬兰等国家的多家公司,吨位从 100t ~ 600t 组合气垫车都有涵盖。空客的飞机装配采用德国 DELU 公司生产的气垫运输设备(见图 6),其功能与波音采用的气垫运输设备相当。



图6 DELU公司生产的气垫运输设备  
Fig.6 Air-cushion transport of DELU

在国内,由于技术基础不同及应用程度的差异,应用状况及技术发展水平较低,目前绝大多数公司还是采用人工推动方式,但运输吨位较小,由于对气垫运输了解不多,生产工艺规划往往也采用一般的起吊方式。近些年来,也开始应用气垫车,对产品和装配型架进行厂房内移动定位。包括天津空客 A320 生产线(图 7)、商飞公司(图 8)、西安变压器公司和 ABB 变压器公司等。目前在国内变压器行业使用的大型气垫车,几乎全部是进口产品,价额比较昂贵。图 7 是空客天津飞机装配厂使用的气垫运输装配平台,该平台实际是一个工作站,



图7 天津空客A320装配  
Fig.7 Aircraft assembly of A320 in Tianjin



图8 商飞C919平尾装配台(制造中)  
Fig.8 Aircraft assembly of C919 in COMAC

上面集成了测量、气动、电控等功能,使得飞机装配效率大大提高,最终将达到每周装配一架的水平。

#### 4 结束语

我国大飞机制造起步较晚,与国外先进水平相比差距较大。但通过采用 iGPS、激光跟踪仪等先进精确测量、定位技术和气垫运输技术,可在较高的技术起点上提高我国大飞机装配技术水平,缩小与国外先进水平差距,提高工作效率,节约成本,是实现我国大飞机的柔性装配制造的重要组成部分。

#### 参 考 文 献

- [1] 高全. 机械工程手册(运输机械篇). 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [2] 杨桂云. 气垫悬浮技术在起重运输机械上的应用. 起重运输机械, 2008(6):41-44.
- [3] 郭洪杰. 大型飞机柔性装配技术. 航空制造技术, 2010(18):52-54.

(责编 飞翔)

(上接第 62 页)

#### 4 结束语

本文中所述蒙皮钻孔法向的测量和调整是采用位移传感器在线测量的方法实时调整刀具与蒙皮部件表面的法向偏差,保证蒙皮部件的钻孔质量。此方法便于实施,控制简单,并可以获得较高的钻孔法向精度,具有很广泛的应用领域,可以为从事此相关工作的科技人员提供一个选择。

**志谢:** 在本文写作过程中,有关杯形矫正装置(钻杯)方面的论述,卜泳同志给出了中肯的建议,在此表示感谢。文中图 4 (法向调整示意图)引用了 BA 公司相关技术资料中的图片,因无法在参考文献中列出,故在此注明,一并表示感谢。

(责编 飞翔)