

未来工厂的数字化测量世界*

Digital Measurement World for Future Factory

北京航空制造工程研究所 邹方 尚可



邹方

工学硕士,自然科学研究员,具有多年从事数控系统研制和应用工作的经验。曾获部级科学技术进步二、三等奖;主持开发了我国首台具有完全自主知识产权的“柔性多点拉形模具”,并申请国防发明专利6项;目前承担了多项国防基础科研和总装的“飞机柔性装配技术”课题,开展该领域的系统控制与集成技术的研究。

传统上,小零件可以采用千分表、游标卡尺等测具进行外形测量,大型的飞机数控加工零件则需要搬运到三坐标测量机床上进行测量。在飞机的制造、装配中,每一个环节

数字化测量技术已从后台走向前台,从单一走向综合,得到了前所未有的重视测量技术包括模拟测量和数字化测量。三维激光跟踪仪已经在飞机工厂的零件检测、飞机部装和总装中发挥巨大作用,不仅保证了测量精度,而且大大提高了工作效率。室内 iGPS 与扫描激光雷达的问世,为未来工厂的测量世界开辟了一片广阔的蓝天。

都离不开测量,没有数字化的测量,飞机的制造和装配就寸步难行。数字化测量已经成为飞机制造装配过程中最重要的手段。

数字化测量技术已从后台走向前台,从单一走向综合,得到了前所未有的重视测量技术包括模拟测量和数字化测量。三维激光跟踪仪已经在飞机工厂的零件检测、飞机部装和总装中发挥巨大作用,不仅保证了测量精度,而且大大提高了工作效率。室内 iGPS 与扫描激光雷达的问世,为未来工厂的测量世界开辟了一片广阔的蓝天。国内飞机制造企业相继采购了多台三维激光测量跟踪仪,取得了很好的应用效果。

在传统的飞机制造过程中,大部件精确对接和装配通常要依靠固定装配型架和工人的技能。随着测量

技术的飞速发展和进步,激光跟踪测量技术给飞机大部件的自动化对接提供了强有力的支持,但是由于现场环境等的种种原因,使得对接过程中部件的测量和监测存在困难。最近,室内 iGPS 系统和扫描激光雷达技术的结合,为大尺寸复杂结构的对接和装配提供了一种新的途径。

数字化测量的基本架构

1 基本构成

对于一个工厂从产品制造、装配、检测到物流运输的全过程来说,实现测量环境的便利性、高速性、精准性、实时性是对其测量系统提出的基本要求。对于一个完善的测量系统来说,既要兼顾大、中、小尺寸的零件或部件的要求,又要考虑经济性和投资的回报率,因而必须综合几种

* 总装“十一五”预研项目柔性装配技术

测量技术的优势,构建成一个全方位的、包含如下技术的数字化测量系统:

- 室内 iGPS;
- 激光测量雷达;
- 三维测量激光跟踪仪;
- 其他机构,如简易的测量臂、扫描仪等。

测量系统中,配置室内 iGPS 可以满足大尺寸和全覆盖的需要;布置激光雷达可以满足部件外形测绘和检测的需要;引进三维激光跟踪仪可以满足装配型架调整和工业机器人全位置反馈的需求。

根据未来工厂的制造和装配需求,其测量系统要实现零件的关键几何尺寸测量和零件几何外形的检查,还要满足对工装的形状的要求。工厂里可能会有装配机器人、自动牵引小车、飞机部件对接系统,完成飞机部件的装配。此外,还应对装配部件的外形进行评估,并对对接进行全过程的跟踪和监视。

2 测量数据处理平台

上述这样一个庞大的数字化测量系统需要一个统一的测量处理平台,以适应未来车间大范围测量和制造的需要,满足全局对大尺寸和跟踪的要求。测量处理平台具有如下特点:

- 快速进行系统配置和参考坐标系的建立;
- 全时在线进行精确的零件监视;
- 获取大量高精度的测量数据,及时提供自动化装配系统和物流运输系统;
- 不依赖作业区域,保证全范围测量精度的一致;
- 可靠、快速地实现测量转站,消除了外部的误差积累和测量的不确定性;
- 可以同时使用多种工具、多项零件和多个测量探头,这种并行模式能实现实时测量数据的连续采集。

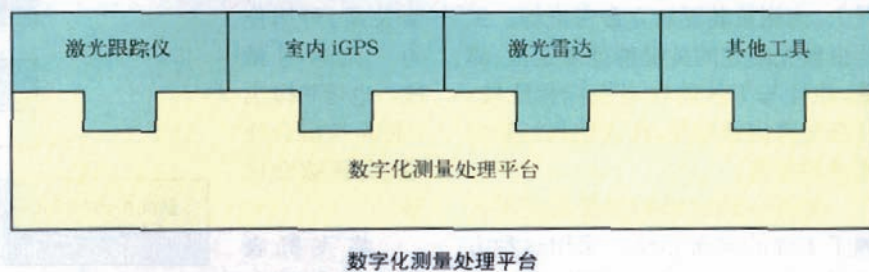
先进的数字化测量技术

1 室内 iGPS

根据地球卫星导航的 GPS 测量原理,在 21 世纪初人们提出了基于区域 GPS 技术的三维测量理念,进而开发出了一种具有高精度、高可靠性和高效率的室内 iGPS (Indoor GPS) 系统,主要用于解决大尺寸空间的测量与定位问题。

iGPS 是一种大尺寸模块化跟踪系统,能对工厂分布的多个目标进行高精度定位,用于制造与装配的全过程。它主要适用于航空制造领域,但也适用于汽车和其他制造业,因为这些领域都需要定位和跟踪。

iGPS 由发射器、传感器、接收处理器、系统软件等四大部分组成,发射器通过旋转激光发射出红外激光信号,光敏传感器接收光信号,通过光脉冲到达的时间计算出位置(通过



接收器得到角度和高度),通过多个发射器计算出接收器的 X 、 Y 、 Z 三个坐标位置。iGPS 的优点有:

(1) 能在整个工作空间内自由布置。在大尺寸工作空间内, iGPS 可随意进行测量。由于布局的可重构性, iGPS 可按测量对象的形状和尺寸与工作空间实现最优布置,其工作范围为 $2 \sim 300\text{m}$ 。

(2) 添加用户却不增加额外的费用。独有的多用户特性,使得 iGPS 的构架一经确定,无限量的 iGPS 工具和传感器都可以在作业空间内工作。像传统的卫星导航 GPS 一样,增加用户是简单而廉价的。

(3) 降低固定工装费用。在零

件、部件和柔性工装上增加 iGPS 传感器,可自动进行对接、校准等一般装配,实现了更大的制造柔性,提高了生产力。

(4) 无需测量转站。iGPS 的构架一经确定,用户就很容易在测量目标的 360° 测量空间内收集数据。

(5) 全时监视装配过程。利用 iGPS 的多传感器特性,可以持续自动监视型架、零件、部件和基础结构,并实现传感器的一天 24h 监视当容差出现时, iGPS 系统会及时警告,取代原来的偏差等待。

2 激光测量雷达

激光雷达是一种球坐标系的测量系统,它产生一束聚焦的红外激光投向被测目标,此时在被测目标上会产生大量的发射光束,将入射激光返回雷达所经历的时间与复制的入射激光通过内置的已知长度的光纤所用的时间进行比对,得出被测目标与

激光雷达的距离。被测目标的方位角和仰角分别由反射镜和旋转头获取。最后,将获得的球坐标转换成直角坐标,即可获得被测目标的 X 、 Y 、 Z 坐标。

激光雷达具有对半径大到 60m 的大体积目标进行自动化、非接触的测量能力,是新一代的测量装置。测量大尺寸几何外形不需要照相测量的圆形靶点贴片,也不需要激光跟踪仪安装的猫眼反射镜或探头。

在质量控制领域,激光雷达可用于部件检查、进货过程和最终质量保证,由于该设备可直接测量工件表面,也可用于测量槽、小孔及其他难以测量的区域。该系统可对飞机、卫

星、汽车及重机械的装备进行静态和动态测量,同时也可用于监控建筑、隧道和桥梁的变形,并对其表面进行精确测量。其特性包括:

- 高精度,低成本,单人操作;
- 超大范围(60m)非接触测量;
- 可快速安装,实现便携移动式现场测量;
- 可采用镜面装置,实现隐藏区域的测量;
- 激光线扫描和单点测量 CMM (坐标测量机) 2 种模式;
- 多台激光雷达装置可建立统一的测量坐标系;
- 能实现快速数据采集,每秒可达上千个点;

测量辅助装配

典型的部件准直系统采用在工件型架上安装一个测量装置的方式。目标球放置在工装上预先确定的位置上,为测量装置建立参考坐标。工件由预先给定的关键特征来定位、测量,并且与工件的参考坐标相比较,从而计算出移动量,使这些目标达到要求的位置。

另外一种方式的测量系统不依赖于工件的参考系统。采用这种方式时,其中一个部件被跟踪,并且建立一个参考系统,对接部件的跟踪和测量以这个关键部件为基准。

这些系统的主要优势是能够将实时的数据与 CAD 模型比较,并且生成自动驱动连接部件的移动控制指令。

1 传统测量系统的局限性

现有测量系统主要的局限性在于目标跟踪能力,包括可视性误差和与目标转接件的误差。

(1) 目标可视性误差。

- 工装夹具和支架阻碍了视线;
- 工件的构造特征隐藏了目标的视野;
- 许多连接特征需采用延展转接后才能测量。

(2) 转接件产生误差。

- 目标转接件在制造和标定时就耗用了大部分对接过程的允差;
- 转接件特征误差增加了整个系统的误差;
- 转接件设计和制造非常复杂、昂贵;
- 每一次连接特征及定位都不一样。

2 激光雷达和 iGPS 结合的辅助装配该系统把具有强大能力的表面激光测绘雷达系统与快速并行离散点测量系统相结合。其技术关键是把一个复杂的对接特征或者表面的数据与一些在对接过程中用到的分离的目标联系在一起。激光雷达能够测绘出这些分离的特征或者对接的整个分离面,以此来分析出最合适的方案。尽管表面特征不是对接分离面的一个部分,但与之有重要关系,可作为一个参考量度。也可将以上 2 种系统混合使用,发挥综合优势。

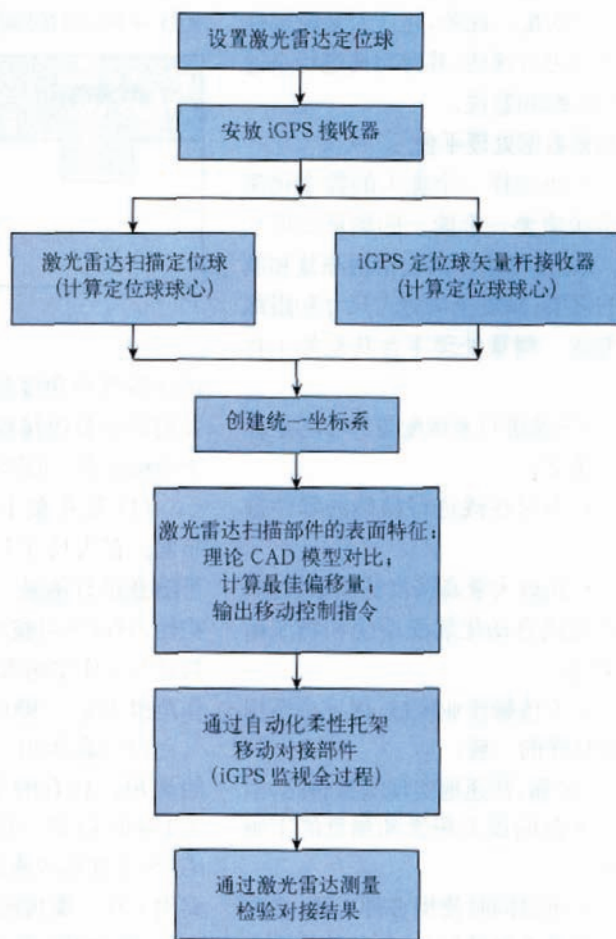
将飞机表面测绘数据与 iGPS 目标联系起来是非常重要的,特别是当表面特征在对接过程中不可见的情况下更是如此。通过使用被这 2 个系统同时测量到的定位球,2 个独立的测量系统可以绑定在一个统一的坐标系中。这些定位球提供了这 2 种系统都适用

的精确计算点的方法,并且可用于建立参考坐标系。

这种方法可忽略在对接过程中关键对接特性必须可见的要求。另外,这个测量装置不再是对接工装的一部分,并且可忽略复杂的目标转接器补偿的要求。

(1) 测量辅助装配的系统优势。

- 由于目标与表面测绘数据之间的关联性, iGPS 目标可以放置在飞机部件的任何位置。
- 在装配之前完成对对接特征的测绘: 可以缩短对接定位时间; 虚拟对接可以发现对接过程中潜在的威胁; 可以作为将来检测过程的一部分; 部件供应商将测绘关键特征与 iGPS 的目标进行关联,也可以提高其行业竞争力。
- iGPS 目标在对接过程中可视



飞机大部件对接测量辅助装配流程

性:对接过程中具有可监测性;可以判断是否对接成功;目标定位的更大柔性使视线障碍降低到最小。

- 在主要部件装载到装配工具之前,就有了对接分离面的最佳可视性。

- iGPS 接收器独立运行,并且多接收器可以同时运行。

- 测绘以高密度点云形式提供了更多数据,为复杂分离面拟合进行更精准的分析。

(2) 3 个检验标准。

iGPS 和激光雷达辅助装配技术为飞机大尺寸装配提供了多种实现途径,下面从 3 个方面进一步说明这种技术在飞机装配领域的应用。

- 以飞机动力学外形特征作为主要的检验标准。

为了使飞机达到最佳的空气动力学性能,飞机重要的表面要采用激光雷达扫描方法并将结果输入测量软件中。依据作用力最小的原则,系统计算出一个“最佳匹配”。这个运算法则的参数是建立在空气动力学需求之上的。

- 以对接特征分离面作为主要的检验标准。

通过对复杂的对接分离面进行扫描和分析,确定对接面的位置偏差。采用一个例行程序来计算出最佳匹配,补偿对接部件之间的位置偏差,以达到预期的对接效果。

- 综合以对接特征与飞机动力学外形作为检验标准。

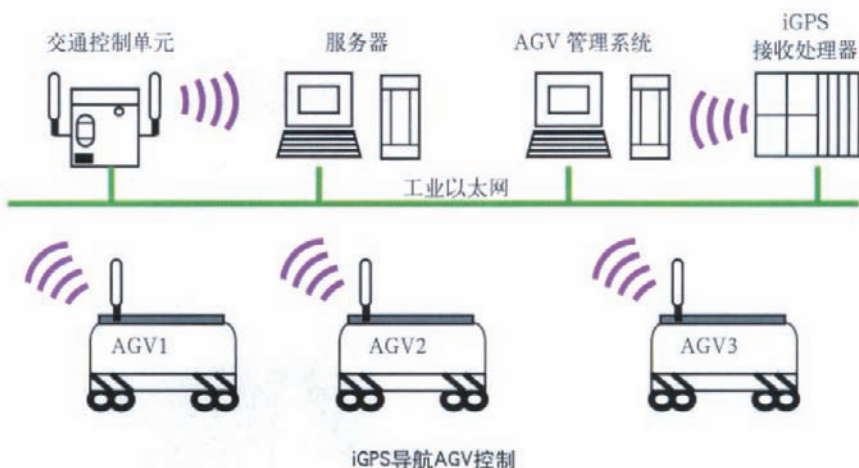
将上述 2 种方法综合平衡。由于飞机对接过程中存在一定的灵活性和随意性,在保持对接分离面符合要求的前提下,进行飞机气动力学性能优化。此时,飞机表面和对接特征都要经过扫描和分析处理。

高精度制孔工业机器人

1 航空制造中机器人的定位精度要求

航空制造中,制孔时会产生一种

反作用力。当使用机器人制孔时,这些力可能施加在操纵器的每个连接处和关节上,所以,钻头末端的 6 个自由度会受到干扰。克服这些作用力的一种方法是在钻孔之前预先夹紧机器人到工件上,使其更加牢固。



这样保护机器人 TCP (工具中心点) 与工件接触部位,减少钻孔时的反作用力。

2 基于激光跟踪仪的机器人制孔

机器人定位通常利用其常规的关节编码器,采用控制和执行系统相结合的方法。除了这种测量技术外,TCP 定位系统使用激光跟踪系统独立跟踪三坐标(X, Y, Z) 和 3 个方向(I, J, K)。在制孔末端执行器上安装了 3 个的“猫眼”反射镜。第 4 个反射镜用于验证 TCP 的坐标转换。作为瞬时定位的参考系,这 3 个反射镜中的任何一个都能跟踪。

钻孔 TCP 的粗定位(精度 $\pm 0.20\text{mm}$) 由工业机器人本身实现,TCP 最后精准定位由激光跟踪仪来完成。

基于 iGPS 导航的自动牵引运输车 (AGV)

在飞机装配中,尤其是部装和总装过程中,机身段要运送到装配站。不同的装配车间,从装配车间运到试飞场,都需要大量牵引运输车进行频繁的穿梭作业。

物流系统将几个 AGV 小车部署为定向的一个车群,保证有效无差错地行驶。对一个固定导轨系统来说,改变运输路径或新的路径,实现起来很困难。智能导航技术提供了先进柔性精准的方法。iGPS 室内定

位系统就是这样一个导航系统,通过中央控制系统进行交通控制和传输路径规划,控制停泊位置和电池充电站。

iGPS 处理控制单元作为运输处理的一部分,其中的交通指导控制单元保证了交通规则可视化,尤其在交叉、过道门和交汇处,其作用显得特别重要。运输路径分为块区,在任一时刻只能被一辆车占用。要避免进入的保留区域和死锁区。

结束语

未来工厂的测量系统迈入全数字化是必由之路。数字化测量也从被动走向主动,从单一走向多样,从点到面,扩展到空间,进而构建一个测量数字化的网络,愈来愈便利和系统化。测量系统正朝着数字化、网络化、柔性化、精密化方向发展,从离线走入在线和实时,形成全时、全程的全天候检测态势。数字测量系统与控制的结合,与物流的结合,与逆向检测结合,为未来工厂的大尺寸测量提供了一种先进的、全新的解决方案。(责编 淡蓝)