

多传感融合的飞机数字化测量技术

Aircraft Digital Measuring Technology of Multi-Sensor Fusion

长春理工大学机电工程学院 林雪竹 曹国华
长春理工大学光电测控技术研究所 李丽娟 朱运东 杨 昕



林雪竹

机械电子专业博士研究生。现为长春理工大学空天院光电测控技术研究所研究实习员,主要从事光学精密测量、逆向工程等方面的研究。参与863等国家项目,完成多个型号飞行器的数字化测量及辅助装配任务。

飞机测量属于大尺寸测量,测量目标分布在飞机四周,多传感融合的飞机数字化测量协同多种数字化测量技术的优势共同完成飞机测量任务。这种集多种先进技术于一体的测量技术,避免了单个测量设备在测量效率及测量精度上的局限性,克服

飞机测量属于大尺寸测量,测量目标分布在飞机四周,多传感融合的飞机数字化测量协同多种数字化测量技术的优势共同完成飞机测量任务。

测量范围大与测量精度低的矛盾,是飞机数字化制造的未来发展趋势。

飞机数字化测量工作站建立

根据飞机各部件、全机外形尺寸及数字化测量任务要求,需要建立基于 iGPS、激光雷达及激光跟踪仪测量系统的飞机数字化测量工作站。已知 iGPS 测量系统,属于接触式测量,包括激光发射器和探测器,其优势在于无需转站即可实现静态测量及动态跟踪,测量效率高,有效测量区域内各向测量不确定度小于 $0.25\text{mm}/\text{m}(2\sigma)^{[1]}$;激光跟踪仪测量系统属于接触式测量,借助合作目标(目标靶镜)可以实现高精度的静态测量及动态跟踪,测量不确定度为 $0.01\text{mm}/\text{m}(2\sigma)$,但对于大范围测量需要进行转站,较为耗时;激光雷达测量系统的优势在于其属于非接触测量,同时可高精度完成静态测量,

测量不确定度为 $0.01\text{mm}/\text{m}(2\sigma)^{[2]}$,但由于遮挡和角度的问题对于大范围测量同样需进行转站,并且无法实现动态跟踪测量。采用以上 3 种测量设备可以避免单种测量仪器的在测量效率及测量精度上的局限性,如果仅采用多台激光跟踪仪进行组网测量,这种测量方式为接触式测量,由于飞机局部待测位置无法实现接触式测量,所以仍需增加非接触测量技术进行测量。综合以上测量系统的仪器特征及各测量优势,根据飞机测量任务具体要求,采用以 iGPS 测量网络及激光雷达、激光跟踪仪测量系统的多个测站共同组建的测量网络作为飞机数字化测量工作站^[3],如图 1 所示。

多传感融合的测量网络构建

由于 iGPS 测量网络、激光雷达、激光跟踪仪测量系统各站的测量数

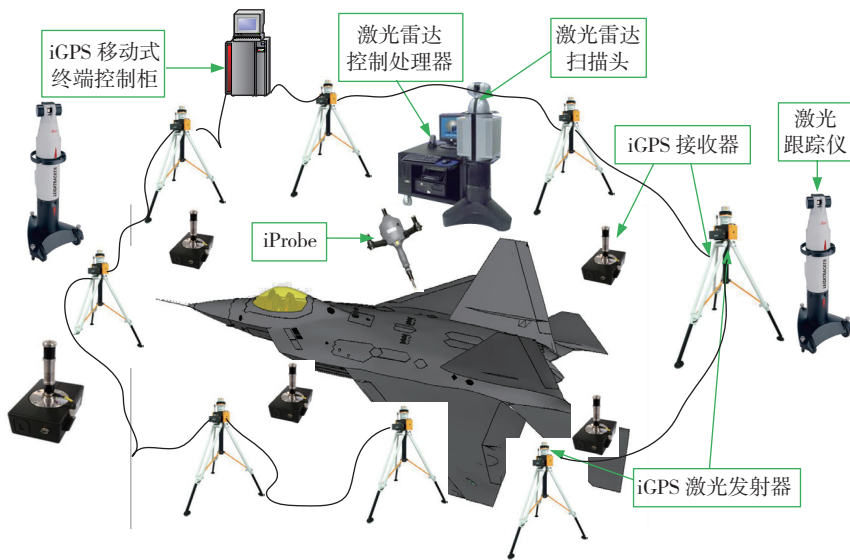


图1 工作站示意图

据均在设备的自身坐标系下,工作站测量网络构建的实质就是实现激光雷达、激光跟踪仪测量系统多站的测量数据高精度融合,并与iGPS测量系统进行坐标统一,从而使各测站坐标系下的测量数据转换到测量网络坐标系下,实现飞机数字化测量工作站网络构建。

1 测量系统原理

(1) iGPS 测量网络系统原理。

iGPS的核心是激光发射器,每个发射器发出2束扇形光束,从上面看大约呈 90° 水平角。2个激光扇面与水平面之间约为 $\pm 30^\circ$ 的夹角,每个激光束相对于纵轴倾斜约为 30° 。当发射器的旋转激光头绕其轴线旋转,这2个光束在整个测量区域内扫描。每个发射器有一个独立的转速,允许接收“跟踪”特定的发射器的信号。第3个发射光信号是在每个发射器的初始位置。这是作为接收器的一个脉冲信号,和发射器的正前方夹角 $\pm 145^\circ$ 。水平角和俯仰角的激光测量范围加上距离构成了发射器的测量空间范围。只有方位角和俯仰角2个元素不足以计算接收器的空间位置,还需要有另外一个激光发射器才可以利用三角形原理计算得到,此计算原理与经纬仪相同。

(2) 激光雷达测量系统原理。

激光雷达是个球形测量系统,发射的激光频率是 200THz ,波长为 155nm 。通过镜面点测系统测量2个角度即水平角和俯仰角,这一方式类似于激光跟踪仪的测角原理;采用类似于微波雷达测距原理方式进行距离测量,是一种非接触性的测距设备,其精度可与激光干涉仪相比。通过球形坐标系和笛卡尔坐标系的转换得出被测点的 X 、 Y 、 Z 坐标^[4]。激光雷达对于角度的测量是采用绝对式光电轴角编码器测量被测目标的方位角和俯仰角信息。

(3) 激光跟踪测量系统原理。

激光跟踪测量系统是由激光干涉系统与圆光栅码盘测角技术结合后发展起来的。基本测量原理是激光跟踪目标反射器,通过自身的测角系统(水平测角、垂直测角),及激光绝对测距系统来确定空间点(目标反射器的空间位置)的坐标,再通过仪器自身的校准参数和气象补偿参数对测量过程中产生的误差进行补偿,从而得到空间点的坐标。目标靶镜是合作目标,它与被测物相连。靶镜从理论上分析可以是反射镜、角锥镜或猫眼镜,而实际采用的多是猫眼镜。激光系统包括激光测量系统和

跟踪系统。激光测量系统是一台激光测距仪,它用光干涉法精确测出激光系统与目标靶镜之间的距离 L ;激光跟踪系统可以精确地控制角度,在它的内、外回转轴上均装有测量转角的编码器,从而可以测出俯仰角 q_A 和偏摆角 j_A 。

2 基于坐标系最优方位估计的多站网络融合

为了减小激光雷达及激光跟踪仪测量系统多次转站引入的误差,需在数据处理阶段采用多站网络融合法获得激光雷达及激光跟踪仪的测站最优方位估计、转站公共点的最佳估计位置及测量不确定度。以激光雷达坐标系最优方位估计的多站网络融合为例进行分析,激光雷达测量系统在各个测站坐标系下对转站公共点进行了测量,设 M_j ($j=1,2,\dots,n$)为激光雷达测量系统在各测站的笛卡尔坐标系,测量网络的转站公共点共 n 个,第 i 个转站公共点 P_i 在 M_j ($j=1,2,\dots,n$)下转站公共点测量值的集合为 A_j ($j=1,2,\dots,n$)。

不妨设 A_0 为 M_0 下所有转站公共点最优估计位置的集合,由于坐标转换属于刚性转换,所以 M_j ($j=1,2,\dots,m$)在 M_0 下的方位估计,即为公共目标点集合 A_j ($j=1,2,\dots,m$)到 A_0 对齐的坐标转换矩阵(图2)。

多站网络融合就是通过对多站转站公共点的测量值进行模式搜索式坐标转换,基于不确定度域的粗大误剔除等数据处理,求解各测站自身坐标系到测量网络统一坐标系的最优坐标转换,从而获得各测站最优方位估计、转站公共点的最佳估计位置及其不确定度,多站网络融合法流程如图3所示。

图中 j 为激光雷达测站号, $j=1,2,\dots,m$; A_j 为测站 j 下转站公共点的测量样本集合; A_0 为转站公共点的最优估计值的集合。

其主要思想是:

(1) 保证单站的最优方位估计,

从而获得各测站融合后的最优方位估计;

(2) 求转站公共点的最佳估计位置及其不确定度;

(3) 使用不确定度作为剔除粗大误差测量样本的依据。

3 iGPS 系统组网标定

iGPS 系统是基于三角定位法测量技术、由多个激光发射器组成的,所以对发射器的方位标定是进行空间点坐标测量的前提。在实际测量

中,考虑测量精度、测量场范围、测量场内的遮挡等问题, iGPS 系统需采用多个(大于 2 个)发射器进行组网。由于 iGPS 发射器测得角度值都在自身坐标系下,所以在测量开始前需对组网发射器的 6 个自由度精确信息进行标定,可以采用参考点组网标定或自由组网标定,使所有发射器统一到同一个坐标系下。

(1) 参考点组网。

参考点组网方式是预先在测量

场内布设若干接收器,这些接收器在全局坐标系内的位置是已知的,每个发射器通过观察这些位置已知的接收器就可以计算出在该全局坐标系内自身的 6 个自由度方位。这些已知位置的接收器被称为参考点,利用参考点的距离残差最小二乘法可以求解计算出在全局坐标系内发射器的方位,并且参考点的数量越多、分布越广,系统的稳定性就越好,发射器的标定精度也就越高。

(2) 自由式组网。

自由式组网的前提是发射器的位置保持稳定不变,标定工具为标准杆,标准杆为一个矢量杆,杆的两头安有 iGPS 的接收器,2 个接收器之间的长度是已知的。自由式组网标定法的标定数据为标准杆的矢量数据。使用标准杆在 iGPS 的测量空间采集标准杆数据,通过标准杆的矢量长度残差的最小二乘法作为目标函数,求发射器的方位。对采集的数据进行分析处理,通过优化计算发射器到标准杆上接收器的方位的交叉算法,可以优化计算出在同一坐标系内每一个发射器的方位。当发射器的位置重新标定后,采集点被重新计算,得出的位置估计也相应变化,所以标定的计算过程需迭代,直至标定精度满足要求。

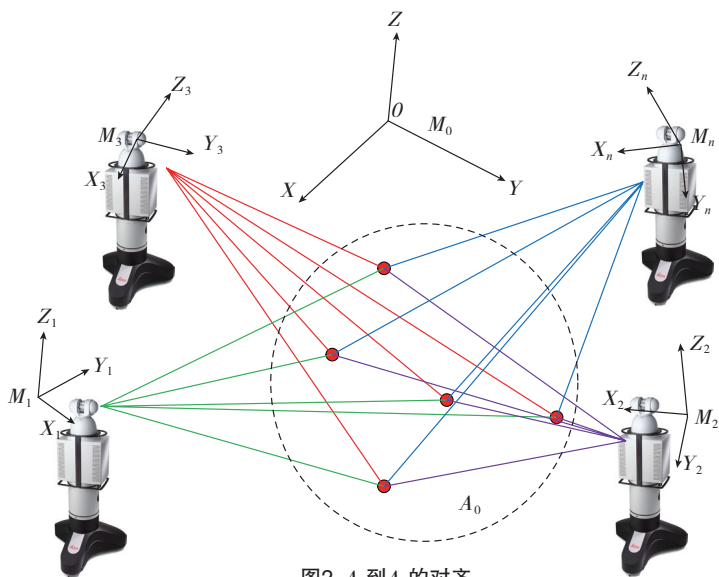


图2 A_j 到 A_0 的对齐

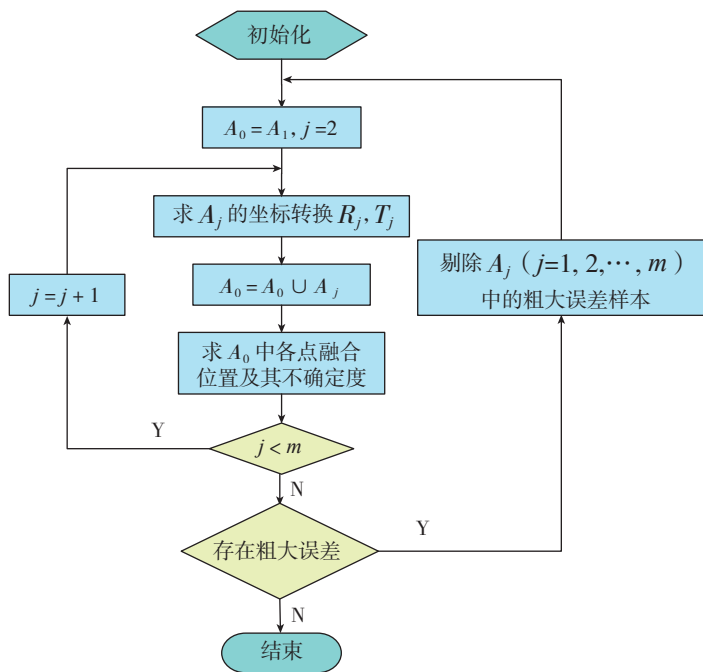


图3 多站网络融合法流程图

4 iGPS 和激光雷达、激光跟踪仪测量系统数据融合

iGPS 与激光雷达、激光跟踪仪测量网络采用不等精度标量点对齐法进行数据融合,如图 4 所示。iGPS、激光雷达及激光跟踪仪测量系统同时测量测量场中的多个(3 个以上)公共目标点,通过坐标变换,建立测量网络。在测量场内均匀固定 12.7mm 的工具球基座若干,基座上工具球的球心为被测公共目标点,使用激光雷达测量;移走工具球,放入激光跟踪仪的合作目标——目标靶镜,使用激光跟踪仪进行跟踪测量;最后移走目标靶镜,使用 iGPS 测量

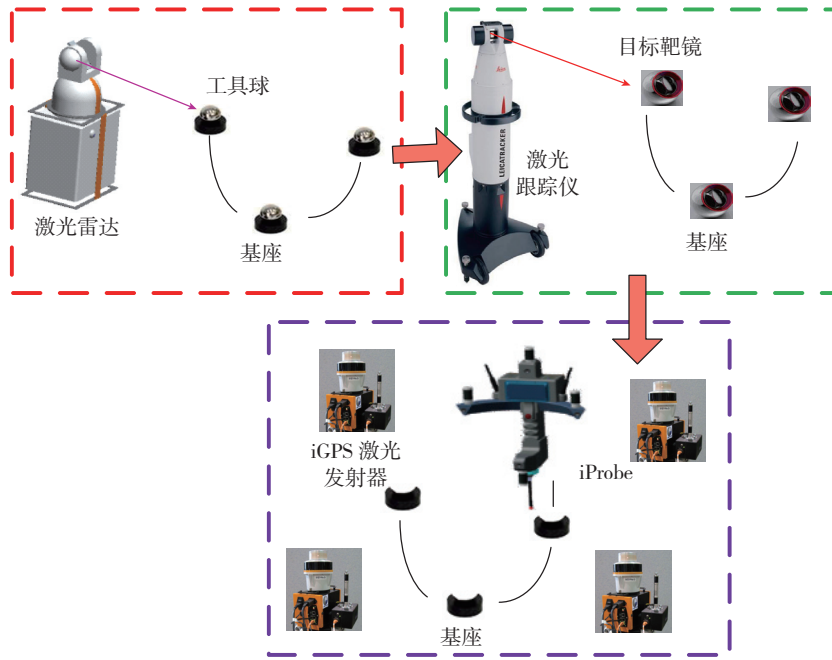


图4 公共目标点测量

头为 12.7mm 无线探针 iProbe 进行测量。

将 iGPS 系统坐标系作为测量网络坐标系 F , 其下测得公共点集合为 A_F ; M 为激光雷达多站网络测量坐标系, 其下测得公共点集合为 A_M ; N 为激光跟踪仪多站网络测量坐标系, 其下测得公共点集合为 A_N 。设 M 到 F 的坐标的转换旋转矩阵为 R , 平移向量为 T ; N 到 F 的坐标的转换旋转矩阵为 R' , 平移向量为 T' ; 则坐标转换的最小二乘函数分别为 f 和 f' ,

$$f = \|A_F - (A_M \cdot R + T)\|^2 = \min, \quad (1)$$

$$f' = \|A_F - (A_N \cdot R' + T')\|^2 = \min, \quad (2)$$

此方法即简单又高效, 可在测量任务的任何阶段完成。

测量网络布站优化

采用多传感融合的飞机数字化测量工作站对飞机进行测量, 测量数据信息量大, 可完成较传统水平测量更多的测量任务, 为了获得更高效、更准确的测量结果, 需对数字测量工作站进行布站优化。结合 iGPS、激

光雷达、激光跟踪仪测量系统的测量特性在测量目标、测量设备精度以及测量观测站数目固定后, 提出飞机数字化测量工作站布站优化方案

1 激光雷达及激光跟踪仪布站优化

设飞机所在空间区域为 M , 以某激光雷达为例, 其测站分配的测量点的点数为 n , 目标点 i 的测量距离为 R_i , θ_{Ai} 为水平角, θ_{Ei} 为俯仰角, 测量三维各向测量不确定度为 σ_{xi} 、 σ_{yi} 、 σ_{zi} 。已知测量设备的有效测量范围: 单站测量距离为 $d_1 \sim d_2$, 水平角为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 俯仰角为 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 。假设测量设备为水平放置, 且可不考虑其方向角。激光雷达及激光跟踪仪的单站布站优化即求取满足约束条件的使多个测量点空间合成不确定度的平方和最小的空间位置 $(x, y, z)^T$, 其数学描述为:

$$\begin{cases} f(x, y, z) = e(x, y, z, \theta_{E1}, R_1, \dots, \theta_{En}, R_n) \\ = \sum_{i=1}^n (\sigma_{xi}^2 + \sigma_{yi}^2 + \sigma_{zi}^2) = \min \\ -45^\circ \leq \theta_{Ei} \leq 45^\circ \\ d_1 \leq R_i \leq d_2 \end{cases} \quad (3)$$

2 iGPS 布站优化

设飞机所在空间区域为 M , 设某区域的 n 个测量点可被 m

个 iGPS 发射器同时观测到, 在 j ($j=1, 2, \dots, m$) 号发射器坐标系下, 目标点 i ($i=1, 2, \dots, n$) 的距离为 R_{ij} , 水平角为 A_{ij} , 俯仰角为 E_{ij} 。点 i 经 m 个发射器交会测量得到三维各向测量不确定度为 σ_{xi}^{Δ} , σ_{yi}^{Δ} , σ_{zi}^{Δ} 。已知发射器有效测量距离 $2m < R_{ij} < 32m$; 有效俯仰角为 $-25^\circ < E_{ij} < 25^\circ$, 任意 2 发射器的交会角有效测量范围为: $40^\circ < \phi_{ij_1 j_2} < 140^\circ$, ($j_1=1, 2, \dots, m$, $j_2=1, 2, \dots, m$)。假设发射器水平放置, 不考虑其方向角。iGPS 网络布站优化即求取满足约束条件的使多个测量点空间合成不确定度的平方和最小的各发射器的位置 $(x_1, y_1, z_1)^T, (x_2, y_2, z_2)^T, \dots, (x_m, y_m, z_m)^T$, 其数学描述为:

$$\begin{cases} f(x_1, y_1, z_1, \dots, x_m, y_m, z_m) \\ = \sum_{i=1}^n (\sigma_{xi}^{\Delta 2} + \sigma_{yi}^{\Delta 2} + \sigma_{zi}^{\Delta 2}) = \min \\ 2m < R_{ij} < 32m \\ -25^\circ < E_{ij} < 25^\circ \\ 40^\circ < \phi_{ij_1 j_2} < 140^\circ \end{cases} \quad (4)$$

结束语

本文根据目前飞机数字化测量发展现状, 针对未来发展需要, 详细介绍了基于 iGPS、激光雷达及激光跟踪仪多传感融合的飞机数字化测量技术。集多种数字测量技术优势于一体, 避免单种测量技术在测量效率及精度的局限性, 克服测量范围大与测量精度低的矛盾, 更是飞机数字化制造的未来发展趋势。

参考文献

- [1] Metris Company. iGPS User Guide. 2010:12-19.
- [2] Metris Company. MV224-260 UserGuide. 2005:15-18.
- [3] 林雪竹. 大飞机数字化水平测量系统及关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学. 2011.
- [4] 何秉高, 李丽娟, 安志勇, 等. 基于激光雷达的 CATIA 造型技术研究. 长春理工大学学报(自然科学版), 2009(10): 25-35.

(责编 亦非)