

文章编号 1004-924X(2012)07-1485-07

飞机数字化测量网络布站设计

周娜^{1*}, 安志勇¹, 李丽娟¹, 朱运²

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130000;

2. 中国航空工业集团 长春航空液压控制有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要:考虑大尺寸、高精度要求的飞机或特殊机型飞行器需要采用多仪器组合测量网络来完成数字化测量任务, 本文对测量网络进行了最优布站设计。介绍了传统的飞机调平理论, 提出了飞机数字化调平变换算法, 并建立了其不确定度模型。通过不确定度分析和误差依赖性仿真得出飞机各基准点不确定度和水平点位置对测量不确定度的影响。结合由激光雷达、iGPS组成的飞机数字化测量网络的测量特性, 提出了飞机数字化测量网络的最优布站设计方案。对某机型飞机水平测量实验验证表明, 经布站优化设计后的测量结果精度为 0.402 mm, 提高了约 20%。结果显示提出的布站设计方案有效、可行, 其分析方法为寻找高准确度、高效率的飞机数字化测量的布站设计提供了参考依据。

关键词:飞机数字化测量; 测量网络; 最优布站; 激光雷达; iGPS; 不确定度模型;

中图分类号: V262.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122007.1485

Design of multi-station network arrangement for aircraft digital measurement

ZHOU Na^{1*}, AN Zhi-yong¹, LI Li-juan¹, ZHU Yun²

(1. *Institute of Photoelectric Measurement and Control Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China*; 2. *Changchun Company of Hydraulic Test, Aviation Industry Corporation of China, Changchun 130052, China*)

* *Corresponding author, E-mail: znjojo@126.com*

Abstract: As some aircrafts with large sizes, high accuracy or special structures need multi-instrument combination measurement networks to complete its digital measurement, this paper researched the optimal arrangement design of measurement networks. The traditional aircraft leveling theory was introduced firstly. A aircraft digital leveling algorithm was put forward, and its uncertainty model was established. Then, the effect of the accuracy of level benchmark points and the location of level points on the measuring accuracy was studied through the uncertainty analysis and error dependence simulation. Based on the measurement characteristics of the aircraft digital measurement network consisted of a laser radar and an iGPS, the optimal multi-station arrangement design of aircraft digital measurement network was put forward. Experimental results of aircraft leveling measurement show that the measurement accuracy of optimal multi-station arrangement design is 0.402 mm, which has improved by 20%. The optimal arrangement design is feasibility and effectiveness, and proposed analysis method

收稿日期: 2012-02-16; 修订日期: 2012-05-17.

基金项目: 吉林省科技厅重大项目(No. 20106010)

provides reference basis for researching the multi-station arrangement design for aircraft digital measurement efficiency and accurately.

Key words: aircraft digital measurement; measurement network; optimal multi-station arrangement; laser radar; iGPS; uncertainty model;

1 引言

随着科学技术与飞机制造业的飞速发展,数字化测量技术以其高精度、高效率、工作量小等优势在飞机外形测量领域应用越来越广。一些光学三维大尺寸形貌测量技术日益成熟,其相关的仪器设备如激光跟踪仪、三维视觉测量系统、iGPS、激光雷达等测量系统^[1-6]已应用在国内外飞机制造工业的许多领域。对于一些尺寸大、精度要求高的飞机或特殊机型飞行器,我国传统的测量手段已无法满足其要求,数字化测量技术是其不二之选。尤其是采用多数字化测量仪器组合的方式,其不仅可以克服测量范围大与测量精度低的矛盾^[9],获得更准确的测量结果,而且可满足多功能的要求,大大提高了系统的可扩展性及应用范围。

为了满足大范围、高精度、多功能等测量要求,本课题采用由激光雷达和 iGPS 2 种设备组合的多测站网络来完成水平测量、系统校准等飞机数字化测量项目。由于激光雷达和 iGPS 都属于方位无源定位系统,各自的测量精度由设备的布站位置、布站模式决定。当测量任务由 2 个测量设备组成多测站网络共同完成时,如何进行测量网络各测站对飞机测量区域的任务分配,是测量前需解决的问题。所以,飞机数字化测量网络的布站方式由测量网络中各测站的飞机测量区域分配及各测站的布站位置、布站模式决定。由于以往没有飞机数字化测量质量评价的依据,传统的网络布站设计通常是根据被测目标的分布情况、测量仪器的测量精度、测量范围等特性寻找一种较方便测量的布站方案,其只能对测量结果进行测前的定性估计,无法作为测量质量控制的依据。

为了实现测量网络的最优布站设计,保证测量质量,本文提出了飞机数字调平算法,并建立了飞机调平变换的不确定度模型,为飞机数字化测量质量评价提供了数学依据。通过不确定度分析和误差依赖性仿真得出了飞机各基准点不确定度和水平点位置对测量不确定度的影响,为测量网络布站提供了定量性的参考依据。结合由激光雷

达和 iGPS 组成的飞机数字化测量网络的测量特性,提出了飞机数字化测量的最优布站设计方案,并将其应用于某飞机水平测量实验中。

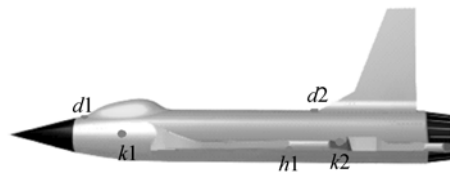
2 传统调平理论

已知某型飞机传统水平测量法调平要求为:飞机俯仰方向基准点 k_1, k_2 , 偏航方向基准点 d_1, d_2 ; 翻滚方向基准点 h_1, h_2 , 其位置分布如图 1 (a)、(b) 所示。调平的判定条件为: $Z_{h1} - Z_{h2} = \pm \sigma$,



(a) 飞机基准点位置俯视图

(a) Vertical view of aircraft with benchmark points



(b) 飞机基准点位置侧视图

(b) Side view of aircraft with benchmark points

图 1 飞机水平基准点位置分布图

Fig. 1 Locations of aircraft benchmark points

$Z_{k1} - Z_{k2} = F_k \pm \sigma, Z_{d1} - Z_{d2} = \pm \sigma, X_{d1} - X_{d2} = 0$, 其中, σ 为调平允许的最大偏差。

3 数字调平变换算法

3.1 数字调平变换数学模型

已知当前设备坐标系 $o-xyz$ 下, 水平基准点

的测量值为 $(x_i, y_i, z_i)^T, i = d_1, d_2, h_1, h_2, k_1, k_2$ 。在俯仰、翻滚、偏航各向的旋转角度,分别为 α, γ, θ 。由传统调平的判定条件可由式(1)计算得到飞机

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{2} \left[\arcsin \frac{z_{k1} - z_{k2}}{K} - \arcsin \frac{F_k}{K} + \arcsin \frac{(z_{d1} - z_{d2})}{D} \right] \\ \gamma = \arcsin \frac{(y_{h2} - y_{h1}) \sin \alpha + (z_{h1} - z_{h2}) \cos \alpha}{H} \\ \theta = \arcsin \frac{(x_{d1} - x_{d2}) \cos \gamma + [(y_{d1} - y_{d2}) \sin \alpha - (z_{d1} - z_{d2}) \cos \alpha] \sin \gamma}{D} \end{cases}, \quad (1)$$

其中:

$$H = \sqrt{(x_{h1} - x_{h2})^2 + (y_{h1} - y_{h2})^2 + (z_{h1} - z_{h2})^2},$$

$$K = \sqrt{(x_{k1} - x_{k2})^2 + (y_{k1} - y_{k2})^2 + (z_{k1} - z_{k2})^2},$$

$$D = \sqrt{(x_{d1} - x_{d2})^2 + (y_{d1} - y_{d2})^2 + (z_{d1} - z_{d2})^2}.$$

设当前设备坐标系 $oxyz$ 下,某水平点坐标为 $(x,$

$y, z)^T$,经飞机数字调平变换后,转换为水平基准坐标系下 $\mathbf{P} = (X, Y, Z)^T$,由式(2)给出。其中, \mathbf{R} 为设备坐标系到水平基准坐标系的 Z - Y - X 变换矩阵,由式(3)给出。

$$\mathbf{P} = (X, Y, Z)^T = \mathbf{R} \times (x, y, z)^T. \quad (2)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \gamma \cos \theta & \cos \alpha \sin \theta + \sin \alpha \sin \gamma \cos \theta & \sin \alpha \sin \theta - \cos \alpha \sin \gamma \cos \theta \\ -\cos \gamma \sin \theta & -\sin \alpha \sin \gamma \sin \theta + \cos \alpha \cos \theta & \sin \alpha \cos \theta + \cos \alpha \sin \gamma \sin \theta \\ \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma \end{pmatrix}. \quad (3)$$

3.2 不确定度模型

对式(1)进行误差传递分析可得俯仰、翻滚、偏航方向的旋转角不确定度 $\sigma_\alpha, \sigma_\gamma, \sigma_\theta$,由式(4)给出。对式(2)进行误差传递分析可知,数字调平变换算法中的变量为 $\alpha, \gamma, \theta, x, y, z$,对式(2)求偏导可得 $\frac{\partial P}{\partial j}, j = \alpha, \gamma, \theta, x, y, z$,由式(5)、(6)、(7)、(8)

给出,其中, $D_{N_j} = \frac{\partial N}{\partial j}, N = X, Y, Z, j = \alpha, \gamma, \theta, x, y, z$ 。设水平点 p 各向测量标准偏差为 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$,将 $D_{N_j} (N = X, Y, Z; j = \alpha, \gamma, \theta, x, y, z), \sigma_\alpha, \sigma_\gamma, \sigma_\theta, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 带入式(9),可得调平变换后的各方向测量不确定度 $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ 。

$$\begin{cases} \sigma_\alpha^2 = \frac{1}{4} \left[\frac{\sigma_{z_{k1}}^2 + \sigma_{z_{k2}}^2}{K^2 - (z_{k1} - z_{k2})^2} + \frac{\sigma_{z_{d1}}^2 + \sigma_{z_{d2}}^2}{K^2 - (z_{d1} - z_{d2})^2} \right] \\ \sigma_\gamma^2 = \frac{\cos^2 \alpha (\sigma_{y_{h1}}^2 + \sigma_{y_{h2}}^2) + \sin^2 \alpha (\sigma_{y_{h1}}^2 + \sigma_{y_{h2}}^2) + [(y_{h1} - y_{h2}) \cos \alpha + (z_{h1} - z_{h2}) \sin \alpha]^2 \sigma_\alpha^2}{H^2 - (z'_{h1} - z'_{h2})^2} \\ \sigma_\theta^2 = \frac{[\sin \gamma \cos \alpha (y_{d1} - y_{d2}) + \sin \gamma \sin \alpha (z_{d1} - z_{d2})]^2 \sigma_\alpha^2 + [-\sin \gamma (x_{d1} - x_{d2}) + \cos \gamma \sin \alpha (y_{d1} - y_{d2})]^2 \sigma_\gamma^2 + [\cos \gamma \cos \alpha (z_{d1} - z_{d2})]^2 \sigma_\theta^2 + \cos^2 \gamma [(\sigma_{x_{d1}}^2 + \sigma_{x_{d2}}^2) + \sin^2 \gamma \sin^2 \alpha (\sigma_{y_{d1}}^2 + \sigma_{y_{d2}}^2) + \sin \gamma \cos \alpha (\sigma_{z_{h1}}^2 + \sigma_{z_{h2}}^2)]}{D^2 - (z''_{d1} - z''_{d2})^2} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \alpha} = \begin{pmatrix} D_{X\alpha} \\ D_{Y\alpha} \\ D_{Z\alpha} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y(-\sin \theta \sin \alpha + \cos \theta \sin \gamma \cos \alpha) + z(\sin \theta \cos \alpha + \cos \theta \sin \gamma \sin \alpha) \\ y(-\cos \theta \sin \alpha - \sin \theta \sin \gamma \cos \alpha) + z(\cos \theta \cos \alpha + \sin \theta \sin \gamma \sin \alpha) \\ -y \cos \gamma \cos \alpha - z \cos \gamma \sin \alpha \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \gamma} = \begin{pmatrix} D_{X\gamma} \\ D_{Y\gamma} \\ D_{Z\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y \cos \theta \cos \gamma \sin \alpha - x \cos \theta \sin \gamma - z \cos \theta \cos \gamma \cos \alpha \\ x \sin \theta \sin \alpha - y \sin \theta \cos \gamma \sin \alpha + z \sin \theta \cos \gamma \cos \alpha \\ x \cos \gamma + y \sin \gamma \sin \alpha - z \sin \gamma \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = \begin{pmatrix} D_{X\theta} \\ D_{Y\theta} \\ D_{Z\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y(\cos \theta \cos \alpha - \sin \theta \sin \gamma \sin \alpha) - x \sin \theta \cos \gamma + z(\cos \theta \sin \alpha + \sin \theta \sin \gamma \cos \alpha) \\ y(-\sin \theta \cos \alpha - \cos \theta \sin \gamma \sin \alpha) - x \cos \theta \cos \gamma + z(-\sin \theta \sin \alpha + \cos \theta \sin \gamma \cos \alpha) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} & \frac{\partial P}{\partial y} & \frac{\partial P}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{Xx} & D_{Xy} & D_{Xz} \\ D_{Yx} & D_{Yy} & D_{Yz} \\ D_{Zx} & D_{Zy} & D_{Zz} \end{pmatrix} = \mathbf{R}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} \sigma_X = \sqrt{\sum_{j=\alpha, \gamma, \theta, x, y, z} [(D_{Xj} \sigma_j)^2]} \\ \sigma_Y = \sqrt{\sum_{j=\alpha, \gamma, \theta, x, y, z} [(D_{Yj} \sigma_j)^2]} \\ \sigma_Z = \sqrt{\sum_{j=\alpha, \gamma, \theta, x, y, z} [(D_{Zj} \sigma_j)^2]} \end{cases} \quad (9)$$

经以上分析可知,经过数字调平变换后的测量不确定度 $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ 与变量 $x, y, z, x_i, y_i, z_i (i=h_1, h_2, k_1, k_2, d_1, d_2)$ 及各变量不确定度有关。

4 基准点对不确定度的影响仿真分析

式(9)可变换为式(10),其中 $N=X, Y, Z$ 。

$$\sigma_N^2 = \sigma_{NP}^2 + \sigma_{NR}^2 = \sum_{j=x, y, z} (D_{Nj} \sigma_j)^2 + \sum_{j=\alpha, \gamma, \theta} (D_{Nj} \sigma_j)^2. \quad (10)$$

由式(10)可知,测量不确定度由 2 部分组成, σ_{NP} 与被测水平点的不确定度有关,被测点的位置、布站不同,其大小也不同。 σ_{NR} 属于调平变换不确定度中相对稳定的部分,与各基准点的测量不确定度有关,各基准点不确定度对测量不确定度的影响程度由 D_{Nj} 给出,其可作为分析依据。

4.1 仿真条件

设某型飞机在基准坐标系下的测量范围为 $X \in (-10\ 000, 10\ 000), Y \in (0, 35\ 000), Z \in (-1500, 2500)$, 单位为 mm。基准点理论坐标为:

$$d_1 = (-0.022, 9\ 120.048, 1\ 347.283)^T$$

$$d_2 = (0.082, 32\ 444.986, 1\ 224.559)^T$$

$$k_1 = (1\ 995.663, 10\ 821.002, -629.996)^T$$

$$k_2 = (1\ 592.066, 32\ 445.017, -354)^T$$

$$h_1 = (7\ 787.98, 28\ 259.933, -505.794)^T$$

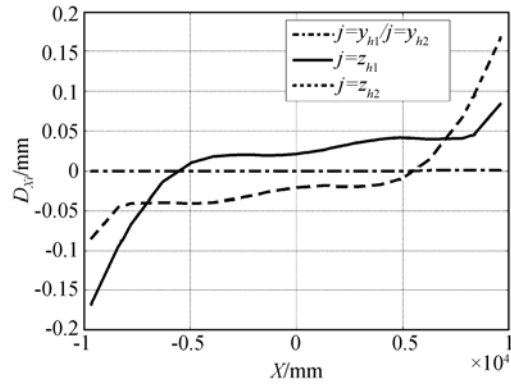
$$h_2 = (-7\ 787.967, 28\ 260.034, -505.856)^T$$

沿 $N(X, Y, Z)$ 轴方向, $D_{Nj} (j=x_i, y_i, z_i, i=h_1, h_2, k_1, k_2, d_1, d_2)$ 仿真结果如图 2 所示。

4.2 结果分析

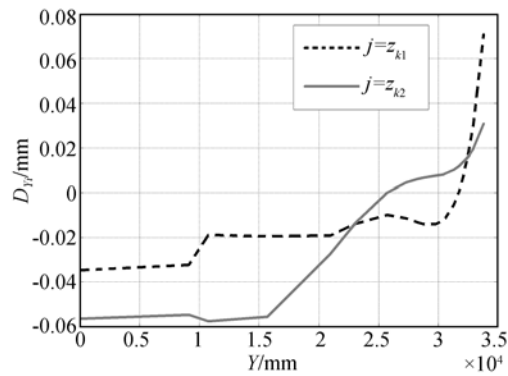
由图 2(a)、(b)、(c)可知,各基准点对测量不确定度的影响主要来源于各基准点的 Z 方向不确定度,基准点 d_1, k_1 在整个测量范围内对不确定度的影响都很大;基准点 d_1, k_2, h_1, h_2 的影响

随测量点的位置有所不同,当测量点的理论位置的 $z > 0$ 时,其影响很大。



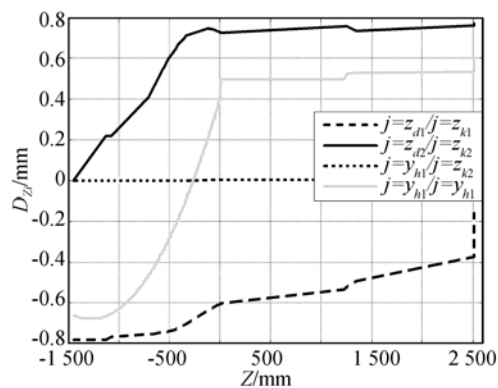
(a) D_{Xj} 在 X 方向的仿真曲线

(a) Simulation curves for D_{Xj} in X direction



(b) D_{Yj} 在 Y 方向的仿真曲线

(b) Simulation curves for D_{Yj} in Y direction



(c) D_{Zj} 在 Z 方向的仿真曲线

(c) Simulation curves for D_{Zj} in Z direction

图 2 D_{Nj} 在 N 方向的仿真曲线

Fig. 2 Simulation curves for D_{Nj} in N directions

5 布站设计

已知 2 个设备的特点为:

(1)iGPS:由多发射器组成网络进行测量,有效测量区域内各向测量不确定度一致为 $0.25\text{ mm}(2\sigma)^{[8]}$;接触式测量;测量效率高;无需转站。

(2)激光雷达:测量不确定度为 $10\ \mu\text{m}/\text{m}(2\sigma)^{[7]}$;非接触式测量;可进行高精度形面扫描;单站测量效率高;大范围测量需转站,转站的时间消耗大。

5.1 飞机测量区域分配

依据 4.2 的分析结果及 2 个测量仪器的测量特性,飞机测量区域 2 个仪器的测量分配原则为

(1)iGPS 测量飞机下表面所有特征点。

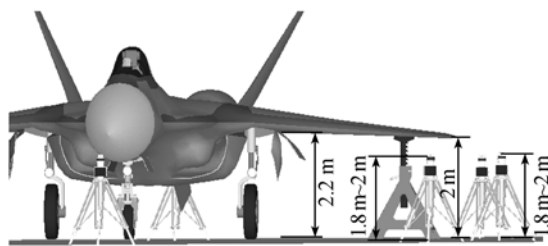
(2)激光雷达测量精度要求高的点:基准点 d_1, k_1 、理论位置 $z > 0$ 的点,包括基准点 d_2 、飞机上表面、垂尾上的点;人不容易接触到的部位或需扫描形面的测量目标。

5.2 布站设计

某型飞机测量范围: $35\text{ m} \times 20\text{ m} \times 4\text{ m}$,依据以上测量区域的分配原则及飞机测量目标位置状态,布站设计为:

(1)iGPS 布站:发射器环绕飞机放置,水平方向离飞机 2 m 远,布设高度可选 $1.5 \sim 2\text{ m}$ 高低错落放置,具体如图 3 所示。

(2)激光雷达采用 3 个测站布站方案,具体布站方案如图 4 所示。

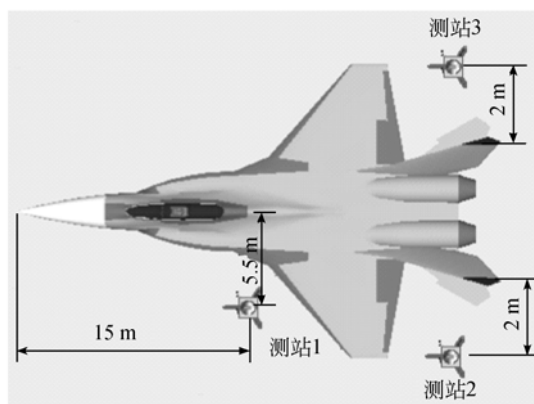


(b)iGPS 布站正视图

(b)Front view of iGPS multi-station arrangement

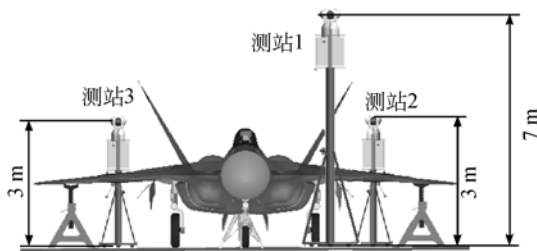
图 3 iGPS 布站示意图

Fig. 3 Views of iGPS multi-station arrangement



(a)激光雷达布站俯视图

(a)Vertical view of laser radar multi-station arrangement

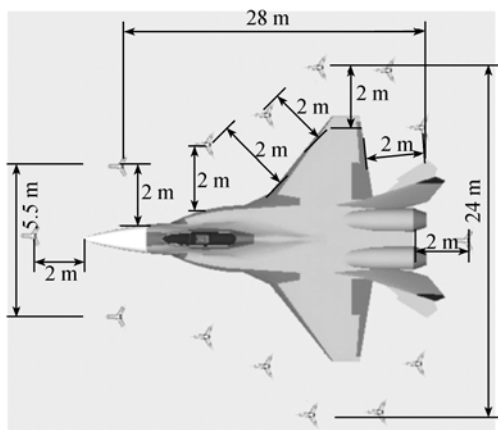


(b)激光雷达布站正视图

(b)Front view of laser radar multi-station arrangement

图 4 激光雷达布站示意图

Fig. 4 Views of laser radar multi-station arrangement



(a)Views of iGPS 布站俯视图

(a)Vertical view of iGPS multi-station arrangement

6 某型飞机水平测量布站比较实验

6.1 实验要求

某型飞机水平测量实验要求如下:

测量范围: $35\text{ m} \times 20\text{ m} \times 4\text{ m}$

水平点数为 57 个,除部分基准点外大部分水平点在飞机下表面;

测量不确定度小于 0.5 mm(2σ)。

6.2 实验过程

采用 4 种布站方式对某型飞机进行水平点测量比较实验。

6.3 实验结果及分析

(1)布站 s_1 ,所有点采用 iGPS 进行测量。

(2)布站 s_2 ,所有基准点采用激光雷达进行测量,测量距离为 4 m;除基准点外的水平点采用 iGPS 进行测量。

(3)布站 s_3 ,如图 3、4 所示。

(4)布站 s_4 ,所有点采用激光雷达进行测量。

表 1 4 布站测量比较统计表

Tab.1 Statistics comparison between 4 types of station arrangements

	2σ 标准偏差/mm				iGPS 网络发 射器数 量	激光雷 达 (LR) 测站数	测量时间/h			备注
	X	Y	Z	合成			LR	iGPS	合成	
s_1	0.224	0.322	0.493	0.630	14	0	0	1.5	1.5	非静态测量
s_2	0.221	0.260	0.370	0.503	14	5	2.5	1.3	3.8	静态测量
s_3	0.156	0.154	0.337	0.402	14	3	1.5	1	2.5	静态测量
s_4	0.060	0.110	0.146	0.192	0	9	10	0	10	静态测量

表 1 为测量结果的不确定度、测站数量、测量时间等情况的统计数据。从表 1 中可以看出:

(1)测量不确定度: $s_1 > s_2 > s_3 > s_4$ 。

(2)测量时间: $s_4 > s_2 > s_3 > s_1$;iGPS 测量时间相差不大;激光雷达测量时间随布站数的增加而增大。

(3) s_4 测量时间过长,飞机状态易发生改变,测量数据易不可信。 s_1 时间开销最小,但由于 iGPS 为接触式测量,对于飞机上一些位置隐蔽或不易接触的水平点,测量人员需到机身上进行测量,此时飞机无法保证静态状态,测量结果不可信。

(4) s_2 与 s_3 都属于采用两种设备共同进行测量的布站方案,其中, s_2 为传统布站方案的一种, s_3 为经不确定度影响仿真分析得到的优化的布站设计方案。 s_3 在测量时间上优于未经布站优化设计的 s_2 ,且精度提高了 20%。 s_3 满足测量精度要求,时间消耗也不大,是最佳布站方案。

7 结 论

为了实现测量网络的最优布站设计,保证测量质量,本文提出了飞机数字调平算法,并建立了飞机调平变换的不确定度模型,为飞机数字化测量质量评价提供了数学依据。通过不确定度分析和误差依赖性仿真得出飞机各基准点不确定度、水平点位置对测量不确定度的影响,为测量网络布站提供了定量性的参考依据。结合由激光雷达、iGPS 组成的飞机数字化测量网络的测量特性,提出了飞机数字化测量的最优布站设计方案,并将其应用于某飞机水平测量实验中。实验结果表明:此方案的测量精度为 0.402 mm,较未经布站优化的测量结果提高了约 20%。此分析方法及布站设计方案已应用到某型号飞机数字化测量实际工程中,结果显示布站设计及测量方法在一定程度上提高了测量的准确性,在实际工作中具有重要意义。

参考文献:

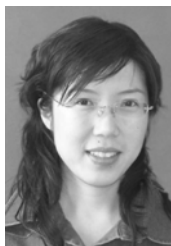
- [1] 何秉高. 基于激光雷达的飞行器水平测量技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2009: 2-7.
HE B G. The Research of Aircraft Horizontal

Measurement Technology Based on Laser Radar [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009: 2-7. (in Chinese)

- [2] 田庆国, 葛宝臻, 杜朴. 基于激光三维扫描的人体特征尺寸测量[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1):

- 84-88.
TIAH Q G, GE B ZH, DU P. Measurement of human figure size based on laser 3D scanning [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 3-5. (in Chinese)
- [3] 何秉高, 李丽娟, 安志勇, 等. 基于激光雷达的CATIA造型技术研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2009, 32(1): 14-17.
HE B G, LI L J, AN ZH Y, *et al.*. The research of CATIA modeling technology based on LASER RADAR[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 32(1): 14-17. (in Chinese)
- [4] 陈登海, 秦龙刚, 黄翔. 基于激光雷达的飞机水平测量[J]. 中国制造业信息化, 2009, 38(5): 78-79.
CHEN D H, QIN L G, HUANG X. Airplane level measurement based on laser radar[J]. *Manufacture Information Engineering of China*, 2009, 38(5): 78-79. (in Chinese)
- [5] 沈严, 李磊, 阮友田. 车载激光测绘技术[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 437-441.
SHEN Y, LI L, RUAN Y T. Mobile mapping technology by vehicle-borne lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 437-441. (in Chinese)
- [6] 李珊, 付秀华, 苏佳妮, 赵缙慰, 等. 激光雷达测距系统中滤光片的制备[J]. 红外与激光工程, 2010, 5(11): 853-856.
LI SH, FU X H, SU J N, *et al.*. Fabrication of filter film using in lidar ranging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 5(11): 853-856. (in Chinese)
- [7] *Metris Company. MV224-260 User Guide*[M]. USA: Metris Company, 2005: 15-18.
- [8] NIKON INSTRUMENT CO., LTD. *iGPS User Guide* [M]. Canada: NIKON INSTRUMENT CO., LTD., 2010: 12-19.
- [9] 张福民, 曲兴华, 叶声华. 面向对象的大尺寸测量不确定度分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2239-2243.
ZHANG F M, QU X H, YE SH H. Uncertainty estimation of large-scale measurement for special fitting task[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2239-2243. (in Chinese)
- [10] 张葆, 姚俊峰, 高利民. 机载GPS测量定位技术研究[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 172-178.
ZHANG B, RAO J F, GAO L M. Measuring orientation technology based on airborne GPS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 172-178. (in Chinese)

作者简介:



周娜(1982—),女,吉林长春人,博士研究生,2008年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光学精密测量、大尺寸光学测量方面的研究。E-mail: znjojo@126.com



安志勇(1943—),男,河北唐山人,教授,博士生导师,1966年于天津大学获得学士学位,主要从事光电测控技术、光学工程方面的研究。E-mail: an_zhiyong@126.com



李丽娟(1972—),女,河南南阳人,教授,博士生导师,1998年于沈阳理工大学获得硕士学位,2005年于长春理工大学获得博士学位,主要从事光电测控技术、数字化精密测量方面的研究。E-mail: custjuan@126.com