

文章编号 1004-924X(2013)09-2354-10

空间测量定位网络的典型布局

熊 芝^{1*}, 郝继贵², 薛 彬², 赵子越²

(1. 湖北工业大学 机械工程学院, 湖北 武汉 430068;

2. 天津大学 精密测试技术国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:空间测量定位系统在多站协同作用下实现测量,测站布局对系统测量精度、测量范围及使用成本影响很大。本文从 wMPS 网络布局和定位误差的关系入手,重点研究了测站分布几何对定位误差的影响。首先,建立了系统的定位误差模型,分析了测站单向通讯几何约束以及测站数目对改善测量精度的影响;然后,设计了两到四测站的多种典型布局形式,分析了典型布局的误差分布特性;最后,利用实验室样机对典型布局的误差特性进行了验证。实验结果表明,O₄型布局整体测量精度最高,L₃型布局对 I₂型布局测量精度的增强幅度约为 40%,O₄型布局对 L₃型布局测量精度的提高幅度大部分处于 20%以内。本文的研究为全局测量网络优化提供了有效的理论支撑。

关键词:空间测量;网络式测量;测站布局;角度交汇;定位误差

中图分类号: TB92 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20132109. 2354

Typical deployments of workspace measurement and positioning system

XIONG Zhi^{1*}, ZHU Ji-gui², XUE Bin², ZHAO Zi-yue²

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: xiongzhi0611@163.com

Abstract: Workspace measurement and positioning system works at multi-station in a synergistic effect and how to deploy the stations has a significant impact on the measurement range, accuracy, and the use-cost. This paper explores the effect of the geometry of station distribution on position errors based on the relation between the wMPS network deployment and position errors. Firstly, a positioning error model was established, the station one-way communication constraints were analyzed, and the improvement of increasing the number of stations on measurement accuracy was analyzed. Then, typical deployments of two to four stations were designed and the error distribution characteristics were studied. Finally, the error characteristics of typical deployments were verified based on the latest prototype in a lab. Experiment results show that O₄ typical deployment has the highest accuracy, the measuring accuracy from the L₃ typical deployment is higher by 40% than that of the I₂ deployment. Moreover, O₄ typical deployment has 20% improvement on measuring accuracy than that of

收稿日期: 2013-04-03; **修订日期:** 2013-05-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51305130); 湖北工业大学博士启动金资助项目(No. BSQD12123); 国家科技支撑计划资助项目(No. 2011BAF13B04)

the L_3 typical deployment. The research work provides an effective theoretical support for global measurement network optimization.

Key words: workspace measurement; network measurement; station deployment; angle intersection; positioning error

1 引言

在大型工程测量中,被测对象不仅几何尺寸大、相对测量精度要求高(优于 10^{-5}),而且待测关键点数量多,多个测量任务并存,且受外界环境影响大,这些使得三坐标测量机、激光跟踪仪等传统单站测量设备的应用存在较大局限性^[1]。网络式多站测量系统具有平衡测量范围、测量精度及测量效率三者间矛盾的巨大潜力,为大型装备制造过程中的精密测量提供了有力的技术支持,是大尺寸测量领域的研究热点及重要发展方向^[2]。

网络式多站坐标测量系统在多测站的共同作用下实现坐标测量,因此单测站的性能以及各测站之间的协同作用是影响系统整体性能的2个关键方面。多测站的协同作用不仅依赖于单测站的测量模型、多测站的交汇模型,而且和测站空间几何分布具有密切关系。此外,随着测站数目的增多,系统使用成本也在逐渐增加,为了将成本控制合理的范围,选择合适的测站数目也是工程实践中面临的问题。研究测站部署对系统定位误差的影响,优化测站网络结构,为提高系统定位精度、降低成本提供理论支撑,同时为工程实践提供布站指导,是网络式多站坐标测量系统共同面临的问题。

wMPS(Workspace Measurement and Positioning System)是一种新型的网络式多站测量系统,该系统测量量程在理论上可无限扩展,且可实现被测空间多点实时并行测量。国外对该系统研究最早的是美国 Arcsecond 公司(已并入 Nikon)^[3],称之为室内 GPS 或 iGPS。其组成主要包括发射器、接收探测器、比例尺、无线接收电子元器件及计算机控制中心。英国 Bath 大学和德国 Karlsruhe 大学大地测量研究所对 iGPS 进行了大量的性能评估试验和动态跟踪应用研究^[4-5]。国内部分高校^[6](如天津大学、西安交

通大学、解放军信息工程大学)和研究机构也对该系统进行了大量的理论研究和样机实验。此外,国内航空制造业正在积极探索其具体应用模式。

在 wMPS 布局优化研究方面,2009 年德国卡尔斯鲁尔理工学院的 Claudia Depenthal^[7]等人对 iGPS 系统四发射站组成的布局进行了研究。实验中采用 Box 布局和 C 布局,设计了 17 个标准点,并和 API 激光跟踪仪的测量结果进行对比。结果表明,和 Box 型布局相比较,C 型布局的误差分布更不均匀。2010 年德国亚琛工业大学机床与制造工程研究所的 Robert Schmitt 和 Nikon Metrology(原 Metris)公司的 Demeester 等^[8]人对 iGPS 在机器人定位跟踪时的几种典型布局进行了仿真分析,主要考虑了时间 t 的测量误差(10 ns 的正态分布)和 0.1 mm 的发射站位置标定误差(系统误差),并在实验中和激光跟踪仪的测量结果进行对比。实验结果表明,标准型的测量性能最好。

在对 iGPS 或 wMPS 网络布局优化研究中,目前存在两个主要问题:一是作为一种新型的分布式坐标测量系统,其误差理论的研究还未成熟,需建立一种标准的误差评定体系(如三坐标测量机的 ISO 10360 标准和激光跟踪仪的 ASME B89 标准)对其误差进行分析和评定,是定量布局优化目标的重要前提;二是优化手段的选择,上述研究方法中,只是对 4 站和 6 站特定布局的误差进行了对比实验验证,当面临更多测站组网测量时不具有一般扩展性。伴随着 wMPS 具体应用模式的探索,其网络布局优化的研究是一项艰巨而充满挑战的任务。

本文从 wMPS 网络布局和定位误差的关系入手,重点研究了 wMPS 测站分布几何对定位误差的影响,建立了定位误差模型。分析测站数目的增加对精度改善作用的影响表明:当测站数目大于 4 时,精度改善作用不再明显,因此将 2~4 个测站组成的网络作为独立典型网络进行研究,

分析了小型网络典型布局及其误差特性,以期为后期全局优化奠定理论基础。

2 wMPS 定位误差模型

图 1 所示为 wMPS 系统工作示意图。wMPS 系统主要由 3 部分组成:发射站、接收器和任务计算机。发射站发射旋转激光平面,接收器将光平面产生的光脉冲转化为对应时间信号,并通过一定方式发送给任务计算机。任务计算机接收到多个测站时间信息后便可进行坐标解算^[9-10]。

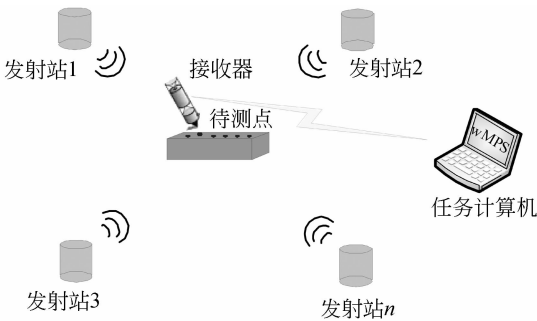


图 1 wMPS 测量系统组成

Fig. 1 System components of wMPS

wMPS 系统单站基本功能是测角^[11]。在发射站局部坐标系下,时间信息和水平角及垂直角可建立一一对应的函数关系,因此在每个发射站局部坐标系下,直接观测量时间可转化为间接观测量方位角。故整个系统可看作是基于角度交汇原理的网络式坐标测量系统,如图 2 所示。

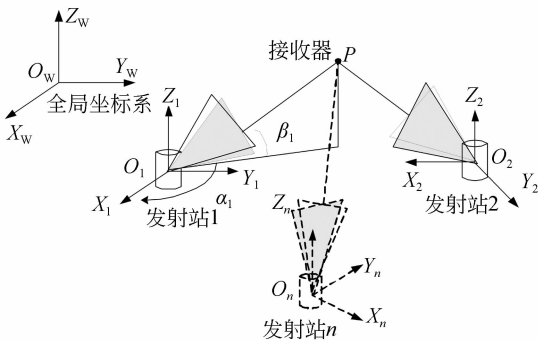


图 2 wMPS 测量系统交汇测量原理图

Fig. 2 Intersection measurement principle of wMPS

令: $T_n = (x_n, y_n, z_n)$, $n = 1, 2, \dots, N$, 表示第 n 个发射站坐标原点坐标, $P = (x_T, y_T, z_T)$ 表示待测点坐标, R_n 是被测点在第 n 个发射站坐标系下的水平投影距离坐标原点的距离。对于每个发射站的每次角度测量,均有下列式子成立:

$$\begin{cases} \alpha_n = \arctan\left(\frac{y_T - y_n}{x_T - x_n}\right) \\ \beta_n = \arctan\left(\frac{z_T - z_n}{R_n}\right) \\ R_n = \sqrt{(x_T - x_n)^2 + (y_T - y_n)^2} \end{cases} \quad (1)$$

从式(1)可以看出,在角度交汇模型下,wMPS 系统定位误差源有全局标定误差(即发射站坐标原点标定误差)、测站相对于被测点几何分布、水平角和垂直角测量误差以及矢量棒标定误差等。由于全局标定误差和矢量棒标定误差属于系统误差,可通过后续测量过程给予补偿,因此本文在 wMPS 实验室样机平台上,对其测角精度进行校准后,着重分析了测站分布对系统定位误差中随机误差的影响。

在对测角不确定度进行校准的过程中,影响测角精度的误差源主要有发射站内参标定误差、发射站旋转稳定性以及时间测量误差^[12]。通过分析各误差项的影响,对单站测角不确定度进行估计,并采用高精度手动分度台作为角度基准,利用多面棱体和平行光管调整同轴度,对系统单站的水平测角不确定度进行了检定,结果表明该系统水平测角不确定度为 $\pm 2.4''$ (置信概率为 99.73%)^[13]。

根据式(1),若 m_i 表示第 n 个发射站的第 i 次水平角和垂直角的测量,则有^[14]:

$$m_i = f_i(T_1, T_2, \dots, T_n, P) = m_{mi} + \epsilon_{mi} \quad (2)$$

其中: m_{mi} 表示被测量的真值, ϵ_{mi} 表示测量误差,由于水平角误差不受被测点空间位置变化的影响为某一恒定值,垂直角误差受被测点空间位置的影响,和被测点垂直角有关。假设各测量值的测量误差 ϵ_i 独立同分布。用 (x_{TR}, y_{TR}, z_{TR}) 表示被测目标真实位置 (x_T, y_T, z_T) 的估计,因此:

$$\begin{cases} x_T = x_{TR} + \delta_x \\ y_T = y_{TR} + \delta_y \\ z_T = z_{TR} + \delta_z \end{cases} \quad (3)$$

将 f_i 函数经泰勒级数展开并去掉所有非线性分量后,得方位角误差传播矩阵 H 为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \left[-\frac{(y_T - y_n)}{R_n^2} \quad \frac{(x_T - x_n)}{R_n^2} \quad 0 \right]_{N \times 3} \\ \left[-\frac{(x_T - x_n)(z_T - z_n)}{R_n r_n^2} \quad -\frac{(y_T - y_n)(z_T - z_n)}{R_n r_n^2} \quad \frac{R_n}{r_n^2} \right]_{N \times 3} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

其中: r_n 为被测点到第 n 个发射站原点距离, R_n 为被测点水平投影到第 n 个发射站原点距离。此时对应的方位角测量误差协方差矩阵 $\delta \mathbf{M}$ 为:

$$\delta \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \text{diag}(\sigma_{\alpha}^2)_{N \times N} & \\ & \text{diag}(\sigma_{\beta}^2)_{N \times N} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: σ_{α} 和 σ_{β} 分别表示水平角和垂直角测量标准差。根据协方差矩阵进行加权处理^[15-16],得定位估计协方差矩阵 \mathbf{D} 为:

$$\mathbf{D} = (\mathbf{H}^T \delta \mathbf{M}^{-1} \mathbf{H})^{-1}. \quad (6)$$

由于 wMPS 测角为不等精度测量,设水平角测量标准差为单位权的测得值标准差,则 N 个发射站的权矩阵 \mathbf{P}_T 可表示为:

$$\mathbf{P}_T = \text{diag}(P_{ii}), P_{ii} = \frac{1/\sigma_{ii}^2}{\sum_{i=1}^N 1/\sigma_{ii}^2}. \quad (7)$$

其中: $\sigma_0^2 = P_{ii} \sigma_{ii}^2$, σ_{ii} 与水平角和垂直角测量标准差的关系如下式所示:

$$\sigma_{ii}^2 = \begin{cases} \sigma_{\alpha}^2 & (i = 1, 2, \dots, N) \\ \sigma_{\beta}^2 & (i = N + 1, N + 2, \dots, 2N) \end{cases}. \quad (8)$$

此时定位估计协方差矩阵 \mathbf{D} 为:

$$\mathbf{D} = (\mathbf{H}^T \mathbf{P}_T \mathbf{H})^{-1} \sigma_0^2. \quad (9)$$

从协方差矩阵组成可以看出, \mathbf{H} 矩阵反应的是发射站位置和被测点之间的相互位置关系, \mathbf{P} 矩阵和 σ_0^2 综合反应了各测站测角精度。

3 系统特性分析

3.1 单站几何通讯模型

wMPS 系统中,发射站和接收器的单向通讯功能保证了多个接收器能同时收到多个发射站的扫描光信息,是实现多任务并行测量的前提。设发射站 2 个光平面倾角分别为 Φ_1 和 Φ_2 ,令 $\Phi_{\max} = \max(\Phi_1, \Phi_2)$,则以 Z 轴为对称轴,锥角为 $2\Phi_{\max}$ 的上下 2 个倒立圆锥为发射站激光平面的扫描盲区。接收器距离发射站远近不同,同步光脉冲和扫描光脉冲的脉宽会发生变化,为了正确识别并区分光脉冲信号,通常选择优化的脉宽阈值对光脉冲信号进

行滤波,因此接收器将工作在有限的距离范围内。设接收器的有效工作距离范围为 $[LR_{\min}, LR_{\max}]$,图 3 所示阴影部分为单站有效扫描区域,该区域满足的约束条件有 2 个,一是光平面的扫描区域,二是接收器的有效工作距离。

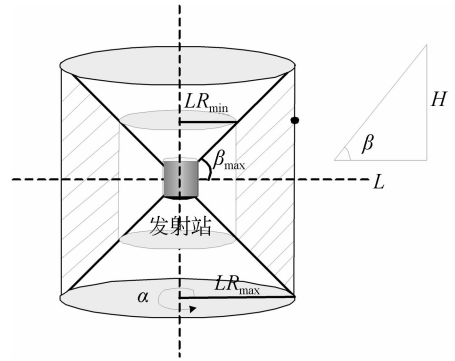


图 3 wMPS 单向通讯模型约束

Fig. 3 One-way communication model of wMPS

对于水平面区域 $\beta=0$,始终处于光平面扫描区域内,因此只需要径向距离 L 在 $[LR_{\min}, LR_{\max}]$ 之间即可。而对于有一定高度 H 的平面区域,发射站能测量的方位角范围以及被测点径向约束可表示为:

$$\begin{cases} \alpha \in [0, 2\pi] \\ \beta = \arctan(H/L) \in [-(\pi/2 - \Phi_{\max}), (\pi/2 - \Phi_{\max})] \\ L \in [LR_{\min}, LR_{\max}] \end{cases}. \quad (10)$$

3.2 测站数目对精度的影响

在网络式测量系统中,测站数目越多,则约束越多,对测量精度有一定的增强作用。在以半径为 d 的圆周上均匀分布 8 个发射站,圆周上 $1''$ 对应的弧长误差作为基准误差,即 $\sigma_0 = d \times 1''$,中间矩形区域为测量区域, N 个站的组合为 $1-N$ 号发射站,分别对 2~8 个发射站组合进行分析。将测量区域中所有点定位误差的最大值作为布局优劣的评价准则,得到 7 种组合对应的最大误差如图 4 所示。

从图中可以看出,发射站数从 2 增加到 3 时,精度提高幅度最大,约为 44%。发射站数从 3 增

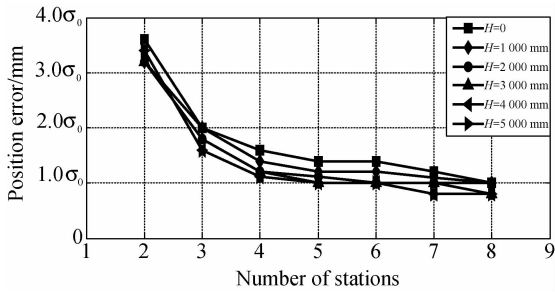


图 4 定位误差随测站数目增大的变化趋势

Fig. 4 Position error changes with station number increases

加到 4 时,精度提高了 20%。随着发射站数目的继续增加对精度的改善作用越来越小,却增加了系统的成本。因此在典型布局的研究中,将 2~4 个测站组成的小型网络作为研究对象。

4 典型布局及误差特性

4.1 布站方式

对于 2~4 测站,根据空间几何点的相关位置关系,针对被测区域位于测站同侧或异侧的情况(同侧指测站的连线环绕被测区域的圆周小于被测区域外接圆的半圆。若大于半圆周,则称为异侧),设计了以下几种典型布局,如表 1 所示。

表 1 2~4 测站典型布局一览表

Tab.1 Typical deployments of two to four stations

测站数目	2		3			4	
布局名称	I_2	I_3	A_3	L_3	C_3	C_4	O_4

假设被测区域为方形,布站区域为被测区域的外接圆,I 型布局表示所有测站位于一条直线上,C 型布局表示所有测站均匀分布在外接圆半周上,A 型或 O 型表示所有测站均匀分布在外接圆整周上,L 型表示三测站呈直角分布。典型布局名称最后的数字则表示测站的数目。图 5 是 2~4 测站组成的小型典型网络布局图。 d 表示被测区域边长, θ 表示 C 型分布时各测站之间的相对偏转角度。由于 L_3 型和 C_3 型在 $\theta=45^\circ$ 时形式一致,只是绕着被测区域的中心旋转了 45° ,这 2 种布局的误差分布实质上没有区别,因此当作一种典型布局。

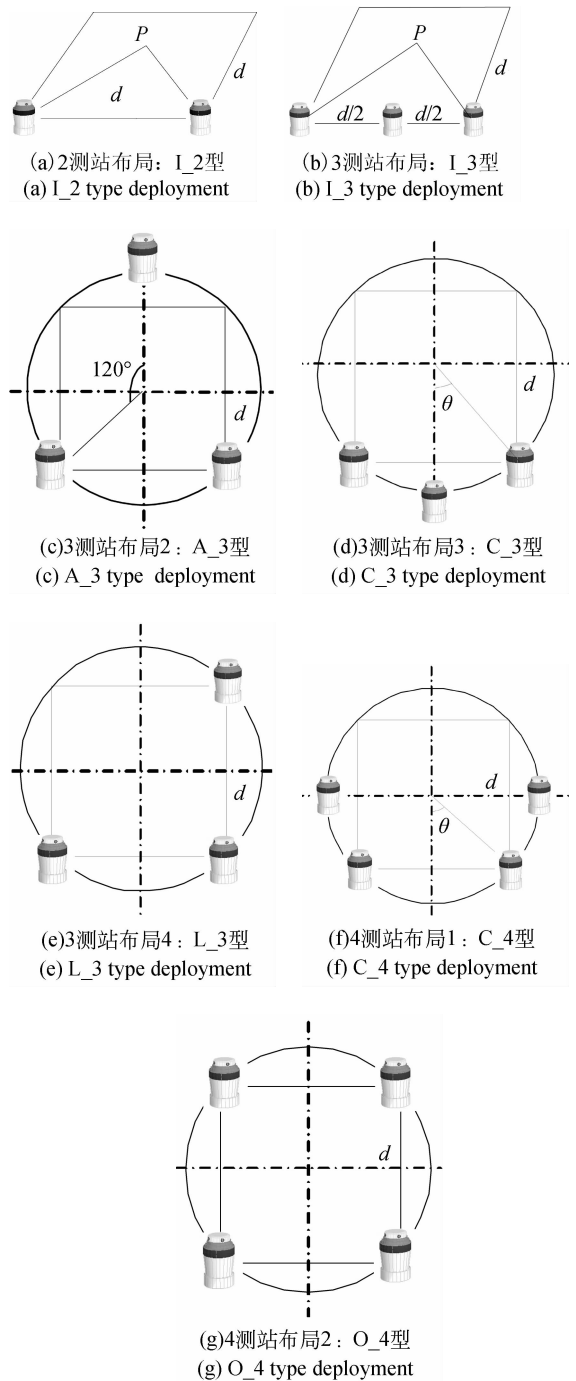


图 5 2~4 测站典型布站方式

Fig. 5 Typical deployments of two to four stations

4.2 典型布局误差特性分析

采用上述定位误差模型,对水平面子域 $M = \{(X,Y,Z) | X=[0, 10\ 000\ \text{mm}], Y=[0, 10\ 000\ \text{mm}], Z=0\}$ 的误差分布及大小进行分析。设两站间距 $d=10\ 000\ \text{mm}$, $\Phi_1=\Phi_2=45^\circ$,通过校准实验,水平旋转角不确定度 $\sigma_\theta=3''$,对表 1 所列典型布局误差特性进行了分析,结果如图 6 所示。

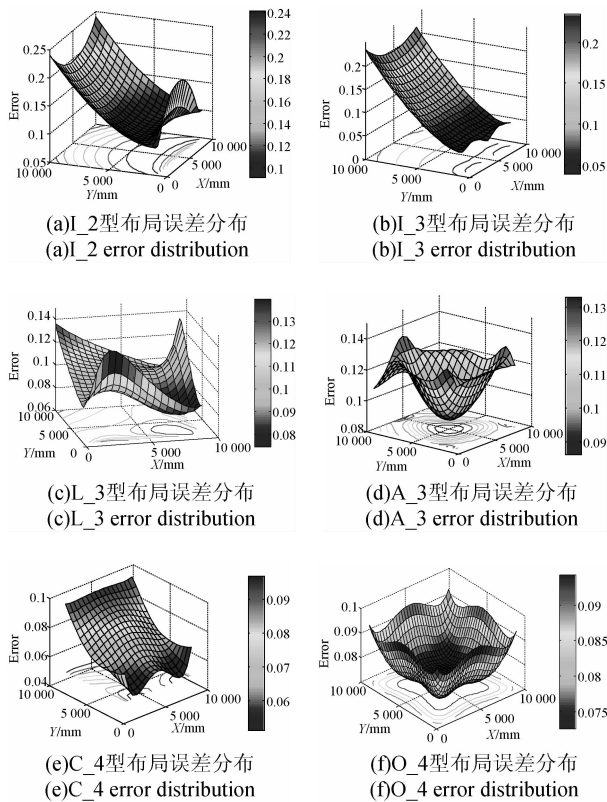


图 6 典型布局误差分布

Fig. 6 Error distribution of typical deployments

需要说明的是对于 C₃ 和 C₄ 型布局,通过改变 θ 值的大小统计被测区域平均定位误差。发现随着 θ 的增大,被测区域的定位误差逐渐减小,且减小趋势逐渐变缓。对于 C₃ 型布局, θ 取 90° ,此时的布局和 L₃ 型布局一样,因此在分析误差分布的时候,只分析 3 测站的 I₃ 型、L₃ 型以及 A₃ 型布局。对于 C₄ 型布局, θ 取 30° 。

对于 I₂ 型布局,定位精度较高的区域位于交汇角为 90° 的周围。被测点随着 X 的增大,误差等值线为抛物线形状,顶点在发射站连线的中垂线上,即随着 X 的增大误差先减小再增大,误差最小值点出现在中垂线上。当被测点位于两站连线附近时,误差较大,随着 Y 的增大,在交汇角小于 90° 的区域,误差增大趋势明显。

I₃ 型布局误差最小区域约为矩形形状,在 90° 交汇角区域下方。距离发射站连线较远的区域,其误差的大小及分布特性与两站系统相似。由于接收器存在最小工作距,该布站方式没有突出优势。L₃ 型误差分布呈 V 型,误差最小区域集中在三站的几何中心,最大值集中在左下角和右下角 2 个区域。在上半圆区域,误差的变化较均匀,对比两

站系统有很大改善。而 A₃ 型布局的误差最小区域集中在三角形几何中心,且以该中心向外以一定的梯度辐射,相对两站系统整体精度也有较大提高。

对于 4 测站组成的典型布局,C₄ 型误差分布也呈 V 型,误差最小区域集中在四站的几何中心,整体误差的分布更加均匀,对比三站系统最大定位误差得到控制。而 O₄ 型布局的误差最小区域集中在四边形的几何中心,在整个区域具有很好的对称性,等值线是和布站中心同心的矩形,对比三站系统和四站系统,可以看出四站系统的误差在整个区域较均匀,梯度较小。

5 实验结果及分析

本文研究的 wMPS 是在实验室自主研发的基础上发展起来的测量系统,其最新硬件配置如图 7 所示。



图 7 wMPS 最新样机配置

Fig. 7 Prototype configuration of wMPS

考虑实验室测试环境的限制以及典型布局的分布,共设计了 4 种布局的实验:I₂ 型、I₃ 型和 L₃ 型以及 O₄ 型。实验布局分别如图 8、图 9、图 10 和图 11 所示。

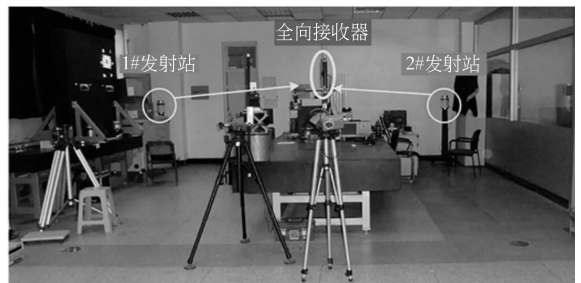


图 8 I₂ 型实验布局

Fig. 8 Experiment layout of I₂ typical deployment

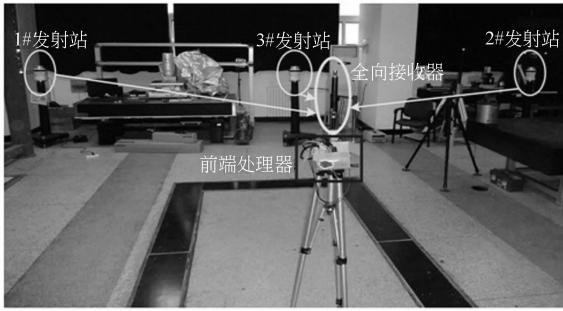


图 9 I₃ 型实验布局

Fig. 9 Experiment layout of I₃ typical deployment



图 10 L₃ 型实验布局

Fig. 10 Experiment layout of L₃ typical deployment

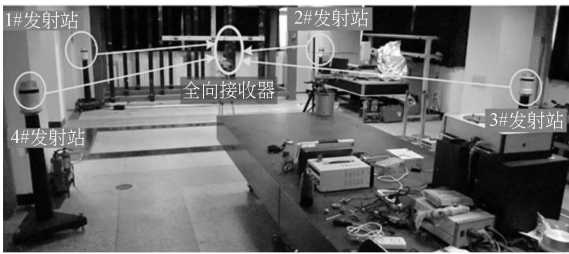


图 11 O₄ 型实验布局

Fig. 11 Experiment layout of O₄ typical deployment

5.1 I₂ 型布局

实验布局如图 8 所示。由于接收器工作距离及实验室空间大小的限制,在距离发射站连线[5 m, 10 m]的区域进行测量,建立新坐标系,以 1 号发射站为全局坐标系原点,1 号发射站指向 2 号发射站投影为 X 轴正向,Z 轴竖直向上,Y 轴由右手定则确定。沿着 Y 轴大约每隔 1 m 对 5 个位置进行 100 次重复测量统计随机误差分布。结果如图 12 所示。

从图 12 中可以看出,在距离两站连线较远位置,水平面处测点误差长轴沿着 Y 轴方向,且随着距离的增大误差也明显增大,与前面理论分析结果吻合。

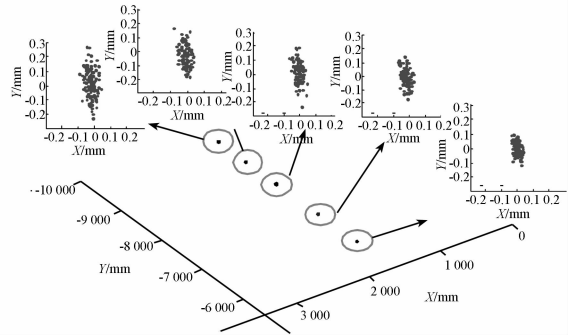


图 12 Y 轴方向被测点定位误差分布图

Fig. 12 Error distribution of Y-axis for I₂ deployment

5.2 I₃ 型布局

和 I₂ 型布局测试方式相同,在 1、2 号测站的基础上增加 3 号站,在 3 测站均能扫描的空间对 18 个点进行了测试,每个固定位置重复测量 100 次,同时用不同的测站组合对其进行对比测量。实验布局如图 9 所示,对比测量结果如图 13 所示。

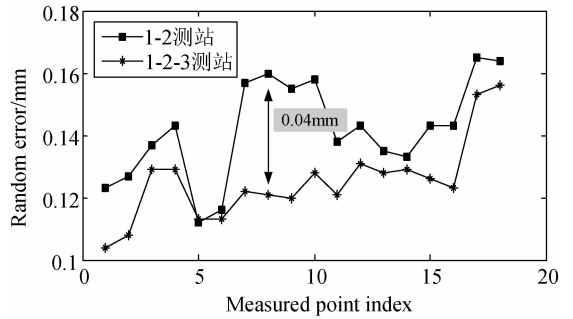


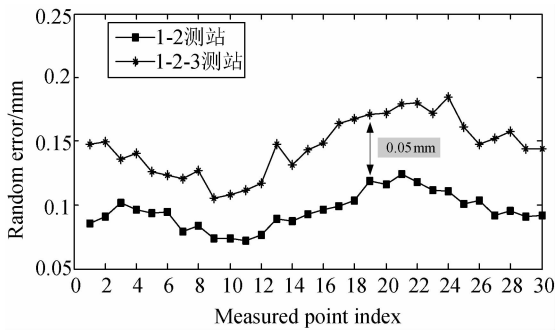
图 13 I₃ 和 I₂ 型布局测量性能对比

Fig. 13 Performance comparison of I₃ to I₂ deployment

从图 13 中可以看出,在所有被测点中,两站重复性误差比三站重复性误差略大,但是三站对两站的改善效果并不明显,只有少数几个点的误差减小程度在 0.03 mm 左右。利用 1、2 测站组合测得的整体平均误差为 0.14 mm,三站组合测得的整体平均位误差为 0.13 mm,实验结果表明三站共线的布站方式从控制系统测量精度的角度考虑并不可取。

5.3 L₃ 型布局

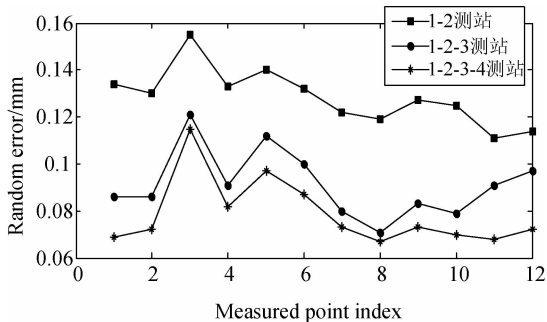
在实验室环境中,将 3 个发射站位置摆放如图 10 所示。在 3 测站均能扫描的空间对 30 个点进行了测试,每个固定位置重复测量 100 次,同时用不同的测站组合对其进行测量。

图 14 L₃和I₂型布局测量性能比对Fig. 14 Performance comparison of L₃ to I₂ deployment

从图 14 中我们可以看出,增加 3 号站后,重复性测量精度有较大提高,最大提高幅度为 0.07 mm,最小提高幅度为 0.03 mm,平均重复性误差较小了 0.05 mm,相比 I₃ 型布局,L₃ 型具有良好的改善测量性能的作用。

5.4 O₄型布局

4 发射站位置摆放如图 11 所示。在 4 测站均能扫描的空间对 12 个点进行了测试,每个固定位置重复测量 100 次,同时用不同的测站组合对其进行测量,统计其重复性随机误差,结果如图 15 所示。

图 15 O₄、L₃和I₂型布局测量性能比对Fig. 15 Performance comparison of three deployments: O₄, L₃ and I₂

从图 15 中可以看出,在不同的测站组合中,四站的整体测量性能最高。L₃ 型布局对 I₂ 型布局测量结果最大提高了 0.05 mm,增强幅度约为 40%。四站对三测站组合的测量结果提高幅度大部分处于 20% 以内。

6 结 论

本文对 wMPS 新型网络式测量系统的典型布局进行了研究。在定位误差模型的基础上,建立了 wMPS 单向通讯几何模型,分析了测站数目对测量精度的影响,研究了 2 至 4 个站小型网络几种典型布局及误差特性。

对于 2 测站组成的小型测量网络,布局为 I₂ 型。其水平面误差分布具有一定的规律:以交汇角 90° 为临界点,在距离发射站连线较远的位置,以 Y 轴波动为主导方向,在距离发射站连线较近的位置,以 X 轴波动为主导方向。

对于 3 测站组成的小型测量网络,布局形式主要有 I₃ 型、L₃ 型、C₃ 型和 A₃ 型。其中 L₃ 和 C₃ 型本质一样,只是相对测量区域的位置旋转了 45°。I₃ 型布局对测量精度的改善作用不大,实际布站时可不予考虑。L₃ 型、C₃ 型和 A₃ 型的误差最小区域主要集中布站围成的三角形的几何中心,这三种布局整体平均定位误差水平基本一致。

对于 4 测站组成的小型测量网络,布局形式主要有 C₄ 型和 O₄ 型。其定位误差的分布更加均匀,集中在测站的几何分布中心。

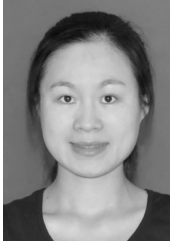
通过在实验室条件下的多种典型布局实验,结果表明 O₄ 型布局整体测量精度最高。L₃ 型布局对 I₂ 型布局测量精度的增强幅度约为 40%,O₄ 型布局对 L₃ 型布局测量精度的提高幅度大部分处于 20% 以内。

wMPS 测量系统布局优化问题随着组网测站数目的增加愈显复杂。由于测站数目大于 4 之后对精度的改善不再明显,因此对于一定区域的测量,用 2~4 测站的小型网络即可保证测量精度,再增加测站数目只会增加成本;其次当需要通过增加测站来扩展测量量程时,典型布局的构造能保证测量精度。因此将典型布局进行组合实现全局网络的优化是一种有效可行的方法,本文的研究工作将为后续全局网络优化提供可靠的理论依据和技术支撑。

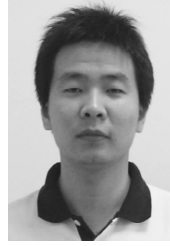
参考文献:

- [1] 黄桂平. 大尺寸三坐标测量方法与系统[J]. 宇航计测技术, 2007, 27(4): 1-7.
HUANG G P. Measurement methods of the large scale 3D coordinate and its system [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2007, 27 (4): 1-7. (in Chinese)
- [2] ESTLER W T, EDMUNDSON K L, PEGGS G N. Large-scale metrology - An update [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2002, 51 (2): 587-609.
- [3] MAUTZ R. Overview of current indoor positioning systems [J]. *Geodesy and Cartography*, 2009, 35 (1): 18-22.
- [4] MAISANO D A, JAMSHIDI J, FRANCESCHINI F, *et al.*. Indoor GPS : system functionality and initial performance evaluation [J]. *Int. J. Manufacturing Research*, 2008, 3(3): 335-349.
- [5] MUELANER J E, WANG Z, MARTIN O, *et al.*. Estimation of uncertainty in three-dimensional coordinate measurement by comparison with calibrated points [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010(21): 1-10.
- [6] 劳达宝, 杨学友, 郝继贵, 等. 扫描平面激光坐标测量系统校准方法的优化[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(4): 870-877.
LAO D B, YANG X Y, ZHU J G, *et al.*. Optimization of calibration method for scanning planar laser coordinate measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 870-877. (in Chinese)
- [7] DEPENTHAL C, SCHWENDEMANN J. IGPS-A new system for static and kinematic measurements [C]. *Proceedings of the 9th Conference on Optical 3D Measurement Techniques*, 2009: 1-10.
- [8] SCHMITT R, NISCH S, SCHONBERG A. Performance evaluation of iGPS for industrial applications [C]. *Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Zurich, Switzerland, 2010.
- [9] XIONG Z, ZHU J G, ZHAO Z Y. Workspace measuring and positioning system based on rotating laser planes [J]. *MECHANIKA*, 2012, 18(1): 94-98.
- [10] 王一, 刘常杰, 任永杰, 等. 通用机器人视觉检测系统的全局校准技术[J]. 光学 精密工程, 2009, 17 (12): 302-3033.
WANG Y, LIU C J, REN Y J, *et al.*. Global calibration of visual inspection system based on universal robots [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (12): 3028-3033. (in Chinese)
- [11] YANG L H, YANG X Y, ZHU J G, *et al.*. Novel method for spatial angle measurement based on rotating planar laser beams [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 23 (6): 758-764.
- [12] 耿磊, 郝继贵, 熊芝, 等. wMPS 测角不确定度研究 [J]. 光电工程, 2011, 38(10): 6-12.
GENG L, ZHU J G, XIONG Z, *et al.*. Research on angle measurement uncertainty of wMPS [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38 (10): 6-12. (in Chinese)
- [13] 熊芝, 郝继贵, 耿磊, 等. 空间测量定位系统测角不确定度分析及检定 [J]. 传感技术学报, 2012, 25 (2): 229-235.
XIONG Z, ZHU J G, GENG L, *et al.*. Verification of angle measuring uncertainty for workspace Measuring and Positioning System [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2012, 25 (2): 229-235. (in Chinese)
- [14] RICHARD A P. 电子战目标定位方法(屈晓旭, 罗勇等译)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
RICHARD A P. *Electronic Warfare Target Location Methods (translated by QU X X, LUO Y, et al.)* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [15] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
FEI Y T. *Error theory and data processing* [M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese)
- [16] 赵立荣, 朱玮, 曹永刚, 等. 基于构建最优函数提高飞机姿态测量精度[J]. 光学 精密工程, 2012, 20 (6): 1325-1333.
ZHAO L R, ZHU W, CAP Y G, *et al.*. Improvement of measurement precision of plane attitude by constructing optimization functions [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (6): 1325-1333. (in Chinese)

作者简介:



熊 芝(1985—),女,湖北荆州人,博士,讲师,2007年、2012年于天津大学分别获学士、博士学位,主要从事大尺寸测量、激光及光电检测技术方面的研究。E-mail: xiongzhi0611 @ 163. com



薛 彬(1986—),男,吉林通化人,2009年于天津大学获得学士学位,主要从事大尺寸空间测量技术、大部件装配技术、光电检测技术等方面的研究。E-mail: xuebinck05@tju. edu. cn



郝继贵(1970—),男,安徽无为,人,博士,教授,博士生导师,1991年、1994年于国防科技大学分别获得学士学位、硕士学位,1997年于天津大学获得博士学位。主要从事视觉检测技术研究。E-mail: jiguizhu@tju. edu. cn



赵子越(1988—),男,山东德州人,博士研究生,2010于天津大学获学士学位,主要从事大尺寸测量、激光及光电检测技术方面的研究。E-mail: maple1111@tju. edu. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)