

# 内外分区空间统一精度场建立方法研究\*

俞慈君<sup>1,2</sup>, 罗涛<sup>1</sup>, 李江雄<sup>1</sup>, 樊新田<sup>2</sup>, 乔明杰<sup>2</sup>

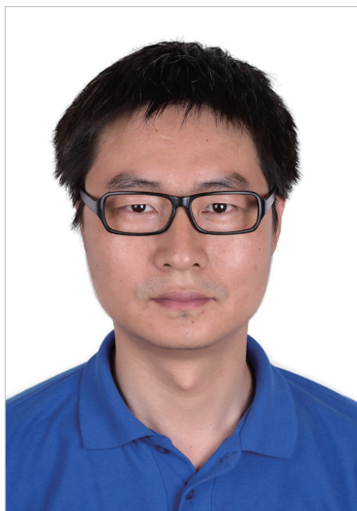
(1. 浙江大学机械工程学院, 浙江省先进制造技术重点研究实验室, 杭州 310027;

2. 航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089)

**[摘要]** 针对内外分区空间内结构和设备安装的数字化测量需求, 研究内外参考点之间的关联技术, 构建与外测量精度场相统一的内测量精度场。对于内外空间不同的开口数, 利用多测点定位法、二测点和水平仪单站位定位法、二测点和水平仪双站位定位法等方法建立内精度场, 实现与外精度场的统一。以某型设备为例进行试验表明, 利用内外精度场测量同一检测点进行比较, 测量的最大不一致误差为 0.14 mm, 证明构建模式可行、简单、可靠。

**关键词:** 数字化测量; 精度场; 激光跟踪仪; 转站; 定位法

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2017.14.016



俞慈君

博士, 现为浙江大学先进技术研究院副研究员, 主要从事大范围高精度测量理论及其应用技术研究。近年来, 作为主要科研人员先后参加了多项飞机数字化装配重大课题。

在大型机械产品的制造和装配过程中, 经常需要测量部件之间的相对位置<sup>[1]</sup>。在内外分区空间测量中, 部件常会处于不同的测量区域, 在区域内建立精确的测量基准并实现快速现场测量难度很大。这一需求大都是通过大尺寸多角度测量设备建立统一的精度场来解决。大尺寸多角度测量常用仪器主要有激光跟踪仪<sup>[2]</sup>、激光雷达及 IGPS<sup>[3]</sup>等。提高测量精度一直以来是测量领域研究的热点, 目前在某些方面已取得了丰硕的研究成果。张春富等<sup>[4]</sup>针对空间大尺寸测量移站坐标转换, 提出最小二乘坐标转换数学模型和基于模式搜索的参数求解方法。耿娜等<sup>[5]</sup>提出基于刚体运动理论的坐标系匹配算法。周娜等<sup>[6]</sup>对测量网络进行最优布站设计, 介绍了传统的飞机调平理论, 提出飞机数字化调平变换算法。张于<sup>[7]</sup>提出一种基于统一空间测量网络软件平台的大尺寸测量方法, 可将测量过程中所有仪器集成起

来。Mitchell 等<sup>[8]</sup>提出了多激光跟踪仪协同工作来提高测量精度的方法, 以各测量设备的测量协方差矩阵和 Jacobian 矩阵为依据, 按照矩阵加权线性最小方差准则融合不同设备的测量数据。Meid 等<sup>[9]</sup>提出动态加权的方法, 其原理是根据测量不确定度对每个参考点的测量点分配不同的权重系数来提高转站精度。然而, 针对一些工程实际问题, 比如内外分区空间统一精度场构建方法研究, 目前鲜见相关文献资料报道。

工程实际中, 对于具有内外分区空间的产品和设备, 如航天器、潜水艇等, 测量时需保证内外分区空间内外部件的相对位置。为此, 本文提出一种内外统一精度场建立方法。激光跟踪仪在内外分区空间内通过有限的开口, 测量外部基准, 建立与外部精度场统一的内部精度场。

## 测量原理

激光跟踪仪测量到的初始值都

\* 基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51521064); 国家自然科学基金项目(51505422); 民用飞机专项科研项目(MJ-2015-G-081)。

是测量点相对于仪器的位置,要获得测量点在装配坐标系下的测量值,必须要确定测量仪器在装配坐标系下的位置,然后通过坐标转换计算,把测量仪器坐标下的原始测量值转换为装配坐标系下的坐标值。确定测量仪器在装配坐标系下的位置称为仪器定位或转站。激光跟踪仪测量布置在现场地面或固定在工装上的 ERS 点,将实际测量值与理论值匹配运算获得测量坐标系在装配坐标系下的位置和姿态参数,将测量坐标系转换为装配坐标系。

如图 1 所示,转站参数用  $(\alpha, \beta, \gamma, x, y, z)$  来表示,其中  $(\alpha, \beta, \gamma)$  表示  $ZXY$  欧拉角,为测量坐标系相对于装配坐标系的旋转变换序列,  $(x, y, z)$  为测量坐标系相对于装配坐标系的平移量。则平移矩阵  $T$  和旋转矩阵  $R$  可表示如下<sup>[10]</sup>:

$$T = (x, y, z)^T$$

$$R = \begin{pmatrix} c\gamma c\beta c\alpha - s\gamma s\alpha & & \\ s\gamma c\beta c\alpha + c\gamma s\beta & & \\ -s\beta c\alpha & & \\ -c\gamma c\beta s\alpha - s\gamma c\beta & c\gamma s\alpha & \\ -s\gamma c\beta s\alpha + c\gamma c\beta & s\gamma s\beta & \\ s\beta s\alpha & c\beta & \end{pmatrix}$$

式中,  $s\theta = \sin\theta$ ,  $c\theta = \cos\theta$ 。

设第  $i$  个 ERS 点在装配坐标系下的理论值为  $p_{Ai}$ , 测量值为  $p_{Mi}$ , 对于不在同一直线上的  $N (N>3)$  个 ERS 点可构成理论值矩阵和测量值矩阵, 为求得测量值矩阵和理论值矩阵之间最佳旋转转换矩阵  $R$  和平移转换矩阵  $T$ , 构建这  $N$  个 ERS 点关于距离误差的最小二乘目标函数如下:

$$\Sigma^2 = \sum_{i=1}^N \|p_{Ai} - (RP_{Mi} + T)\|^2 \quad (1)$$

计算转换参数矩阵  $R$  和  $T$  的方法有很多,其中较常见的有 SVD 分解法,这里不再赘述。这里第  $i$  个 ERS 点在装配坐标系下的坐标  $p_{Mi}'$  以及该点的转站误差  $e_i$  分别可表示为:

$$p_{Mi}' = RP_{Mi} + T \quad (2)$$

$$e_i = p_{Mi}' - p_{Ai} \quad (3)$$

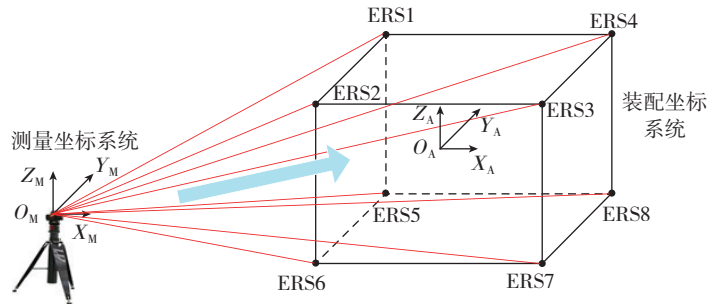


图1 激光跟踪仪转站示意图

Fig.1 Coordinate transformation in station movement of laser tracker

### 测量精度场模型

#### 1 外精度场模型

外精度场即通过激光跟踪仪构建装配坐标系,并标定外部 ERS 点在该坐标系下的坐标值。

如图 2 所示,在外部布置若干个 ERS 点,其中 TB1 和 TB2 布置在运动方向上。且设定其中点  $M$  在装配坐标系下的坐标为  $(x_M, y_M, z_M)$ , 装配坐标系的  $Z$  方向垂直于大地水平面。通过大地水平面、TB1、TB2 在大地水平面上的投影可构建出一个装配坐标系,设定原点为点  $M$  在大地水平面上的投影。测量并计算出该坐标系下外部 ERS 点 ERS1~ERS4 的坐标值  $p_{M1} \sim p_{M4}$ , 把  $N (N>3)$  次测量取平均值的结果作为这些 ERS 点的理论值  $p_{Ai}$ , 具体可表示为

$$p_{Ai} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_{Mj} \quad (4)$$

测量时,即使不能测量到 TB 点,不测量水平面,也可以通过测量已经

标定的 ERS 点确定激光跟踪仪在装配坐标系下的位置。

#### 2 内精度场模型构建

针对内外分区空间不同的开口数量采用 3 种不同的方法建立统一的内测量精度场。

(1) 方法 1: 多测点定位法。

当从内到外的开口  $N (N>3)$  较多时,可采用多测点定位法构建内精度场,其原理如图 3 所示。

激光跟踪仪放置在内部,通过开口测量不在一条直线上的  $N (N>3)$  个已标定好的外部 ERS 点,计算激光跟踪仪在装配坐标系下的位置,这样便可以测量标定内部 ERS 点 (ERS5~ERS8)。测量并计算出该坐标系下内部 ERS 点 ERS5~ERS8 的坐标值  $p_{M5} \sim p_{M8}$ , 把  $N (N>3)$  次测量取平均值的结果作为这些 ERS 点的理论值  $p_{Ai}$ , 具体可表示为

$$p_{Ai} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_{Mj} \quad (5)$$

如果在内部激光跟踪仪需要移

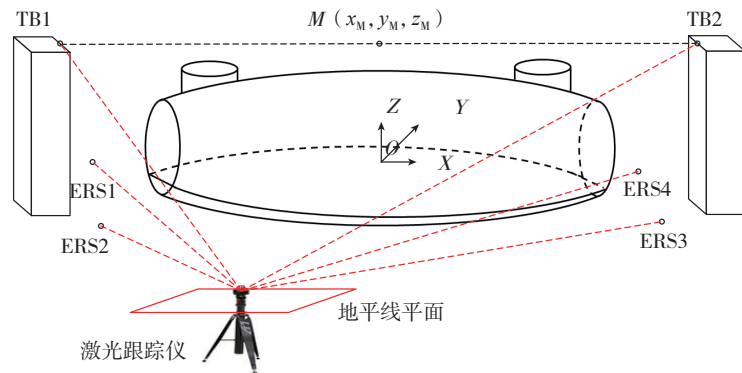


图2 外精度场构建原理

Fig.2 Construction principle of external accuracy field

动到其他位置测量,而这些位置不能测量到外部 ERS 点(ERS1~ERS4)时,就可以通过测量 ERS5~ERS8 定位内部激光跟踪仪,实现内部任意位置的测量。

(2)方法 2:二测点和水平仪单站定位法。

该方法采用在内部使用与构建外精度场相同的方法,使内精度场与外精度场一致,即在内部找到一个站位,可透过两个开口测量外部的两个 TB 点。再利用电子水平仪确定内部精度场的水平方向,从而构建内部坐标系。其后可测量标定内部 ERS 点(ERS5~ERS8)的坐标值,从而完成内部基本测量精度场的构建,其原理图如图 4 所示。

该方法的缺点是必须要在内部找到一个能同时测量到航向基准点 TB1 和 TB2 的跟踪仪站位。优点是,该方法与外部精度场构建方式一致,因此不存在二次转站误差。

(3)方法 3:二测点和水平仪双站定位法。

如果内外分区空间只有一个开口,或无法找到一个站位能同时测量到外部基准点 TB1 和 TB2,可采用二测点和水平仪双站定位法标定内部 ERS 点,其原理如图 5 所示。

首先在 A 站位测量内部 ERS 点(ERS5~ERS8),并透过开口测量 TB1,然后把激光跟踪仪移动到 B 站位,并测量水平面和 TB2,并再次测量内部 ERS 点(ERS5~ERS8),以本次测量的内部 ERS 点为理论值,把 A 站位测量到的 TB1 坐标值转换到 B 站位,再利用方法 2 二测点和水平仪单站定位法构建装配坐标系并计算内部 ERS 点(ERS5~ERS8)的理论值。该方法利用 2 个测量站位,解决了单开口精确构建内部精度场的难题。

内部 ERS 点(ERS5~ERS8)的标定值携带了内部测量精度场的精度信息,只有准确标定这些 ERS 点,

才能保证内部精度场的高精度,而根据测量的阿贝误差原理,采用这种方法 ERS 点的布置需要满足包容原则,即:标定 ERS5~ERS8 时,使用的外部 ERS 点须包容 ERS5~ERS8 这些测量点,在使用内部 ERS 点测量内部其他测量点时,选用的内部 ERS 点需要包容测量目标点。这就需要内外分区空间在各个方向都有开口才能保证内部精度场的高精度和内

部外精度场的一致性。

## 试验验证

### 1 试验内容

为验证本文方法,搭建试验平台,该系统主要由内外分区空间模拟件 1 个、激光跟踪仪 Leica AT901 及其配套设备(包括主机、气象站以及若干测量靶座、靶球)、温度传感器(精度  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ )、电脑(装有激光跟踪

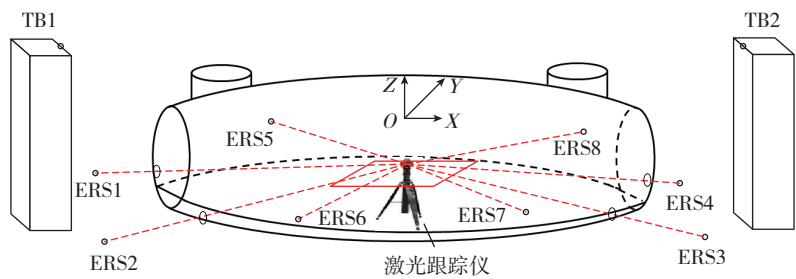


图3 多测点定位法构建内部精度场原理  
Fig.3 Construction principle of internal accuracy field with multipoint positioning method

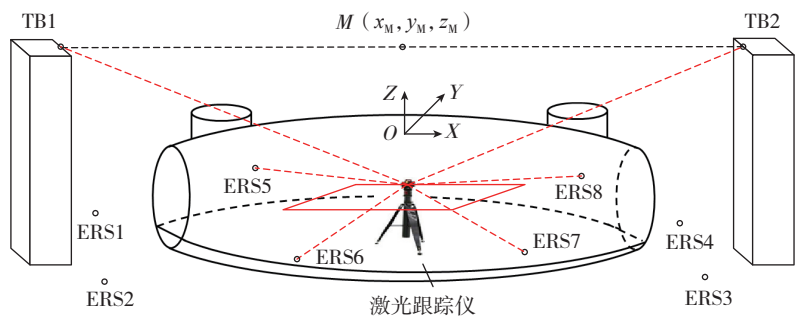


图4 二测点和水平仪单站定位法构建内部精度场原理图  
Fig.4 Construction principle of internal accuracy field with two points and level single station positioning method

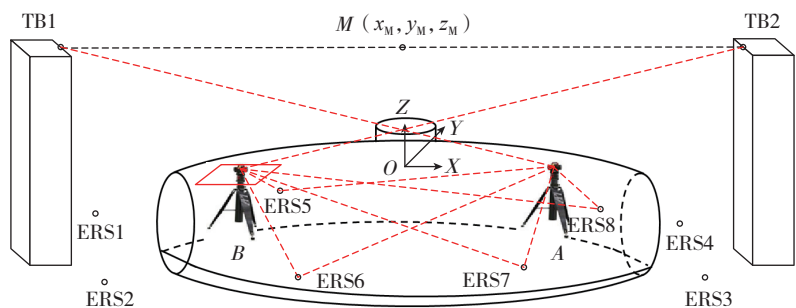


图5 二测点和水平仪双站定位法构建内部精度场原理图  
Fig.5 Construction principle of internal accuracy field with two points and level double stations positioning method

系统测量软件)等组成,如图6所示。

将激光跟踪仪调水平,使用电子水平仪测量水平面,测量内外公用的固定测量点TB1和TB2。在本试验中,TB1、TB2被固定在外部试验件上,在实际应用中,该测量点应该被固定在外部的固定工装上。以TB1和TB2投影到水平面上的直线作为装配坐标系的X轴。水平面法向为装配坐标系的Z轴,TB1和TB2的中点M在水平面上的投影M'为装配坐标系原点,构建坐标系。设M点在装配坐标系下的位置为(3000,0,5000)。测量舱外ERS点ERS1~ERS43遍,记录其在装配坐标系下的测量值如表1所示。

由表1可知,外部ERS点在装配坐标系下3遍测量值最大偏差为0.04mm,满足实际精度要求。

将激光跟踪仪放置到内部测量位置,透过开口测量已标定好的外部ERS点ERS1~ERS4,通过测量系统的仪器定位算法,计算仪器在装配坐标系下的位置。测量标定内部ERS(ERS5~ERS8)点,重复测量3遍,并取平均值,得到内部ERS点的标定值,如表2所示。

二测点和水平仪单站定位法构建内部测量精度场的过程与构建舱外测量精度场的过程一致。激光跟踪仪调水平,使用电子水平仪测量

水平面,测量通过开口测量内外公用的固定测量点TB1和TB2。通过与外部测量精度场构建相同的方式,在测量软件中构建装配坐标系。重复测量舱内ERS点(ERS5~ERS8)3遍,并取平均值,作为舱内ERS点的标定值,如表3所示。

在A站位测量内部ERS点(ERS5~ERS8)和TB1,把激光跟踪

仪移动到B站位并调水平,测量内部ERS点(ERS5~ERS8)和TB2;并把A站位测量的TB1转换到B站位下。构建装配坐标系,并获得装配坐标系下内部ERS点(ERS5~ERS8)的坐标值。测量3遍,并取平均值,作为内部ERS点的标定值,如表4所示。

由表2、表3以及表4可知,标定内部ERS时,测量的稳定性误差

表1 外部ERS点测量平均值及最大测量偏差

点	测量理论值			最大绝对测量偏差		
	x	y	z	dx	dy	dz
ERS1	2021.43	-1560.37	3483.62	0.02	0.02	0.01
ERS2	1771.01	1498.50	3498.39	0.03	0.04	0.03
ERS3	5348.94	1849.68	3587.31	0.03	0.03	0.05
ERS4	5445.20	-1574.49	3545.40	0.00	0.01	0.05

表2 多测点定位法标定内部ERS点平均值及最大测量偏差

点	测量理论值			最大绝对测量偏差		
	x	y	z	dx	dy	dz
ERS5	484.85	-942.59	4477.67	0.01	0.02	0.05
ERS6	436.95	917.72	4487.41	0.01	0.04	0.05
ERS7	7563.59	1143.83	4499.35	0.01	0.02	0.01
ERS8	7613.02	-722.20	4488.23	0.00	0.01	0.00

表3 二测点和水平仪单站定位法标定内部ERS点平均值及最大测量偏差

点	测量理论值			最大绝对测量偏差		
	x	y	z	dx	dy	dz
ERS5	484.83	-942.54	4477.71	0.01	0.02	0.03
ERS6	436.92	917.77	4487.46	0.00	0.02	0.02
ERS7	7563.56	1143.89	4499.39	0.01	0.02	0.03
ERS8	7613.00	-722.17	4488.27	0.02	0.01	0.04

表4 二测点和水平仪双站定位法标定内部ERS点平均值及最大测量偏差

点	测量理论值			最大绝对测量偏差		
	x	y	z	dx	dy	dz
ERS5	484.88	-942.53	4477.75	0.01	0.02	0.03
ERS6	436.96	917.78	4487.47	0.01	0.01	0.05
ERS7	7563.62	1143.12	4500.98	0.00	0.01	0.10
ERS8	7612.99	-722.20	4488.29	0.00	0.02	0.06

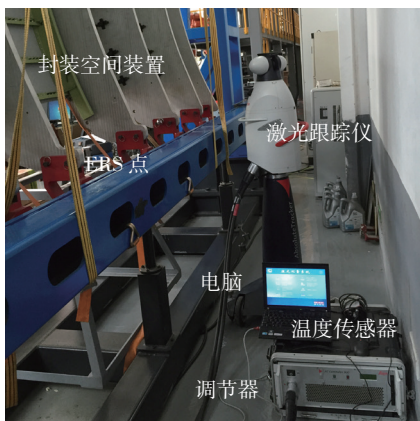


图6 内外分区空间试验系统

Fig.6 Measurement experimental system of the internal and external regional space

最大为 0.10mm, 同样满足实际精度需要, 可以应用。

## 2 内外精度场一致性检验

本试验用于比较不同精度场构建方法在测量精度上的差别。一致性检验的原理与多测点定位法的方法一致。找几个测量点  $P1\sim P4$  使激光跟踪仪在内外都能测量到。

测量外部 ERS 点 (ERS1~ERS4), 通过测量系统的仪器定位算法, 计算仪器在装配坐标系下的位置。测量内外一致性检验测量点  $P1\sim P4$ 。重复 3 遍得到检验测量点平均值及最大测量偏差, 如表 5 所示。

测量内部 ERS 点 (ERS5~ERS8) 和  $P1\sim P4$  共 3 遍。以不同舱内精度场构建方法标定的 ERS 点坐标为基准, 通过测量系统的仪器定位算法, 计算仪器在装配坐标系下的位置。测量内外一致性检验测量点  $P1\sim P4$ , 如表 6 所示。

将内外测量的一致性检验点相互比较, 通过分析, 计算之间的偏差, 如表 7 所示。内外测量精度场平均值偏差最大为 0.10mm, 6 遍测量相互之间最大的测量误差最大为 0.14mm, 说明这种模式建立的统一精度场可以满足实际需要。但是 3 种内精度场方法各有优劣: 方法 1 精确, 但要求更多开口, 跟踪仪放置位置受限较大; 方法 2、3 相对误差较大, 但在可接受的范围内; 方法 3 需要 2 个测量站位才能标定 ERS 点, 但是只需要一个开口。

## 结论

(1) 采用在两个外部运动方向定位点, 配合电子水平仪测量的水平面, 可准确构建内外测量精度场, 该精度场可通过适当布置的 ERS 点进行记录, 并通过测量这些 ERS 点进行恢复。由于内部外建立坐标系使用的基准一致, 可保持内部外测量精度场的一致性, 此方法从理论到实现都是可行的。

表5 外部测量一致性检测点平均值及最大测量偏差

点	测量理论值			最大绝对测量偏差		
	x	y	z	dx	dy	dz
P1	1427.88	873.13	2847.07	0.02	0.01	0.04
P2	1896.34	-332.54	2844.95	0.01	0.04	0.04
P3	5560.69	975.31	2845.05	0.02	0.04	0.03
P4	6550.20	-481.54	2846.80	0.01	0.02	0.04

表6 内部测量一致性检测点平均值及最大测量偏差

点	测量理论值			最大绝对测量偏差		
	x	y	z	dx	dy	dz
M1P1	1427.93	873.09	2847.06	0.01	0.02	0.04
M1P2	1896.37	-332.53	2844.96	0.01	0.01	0.01
M1P3	5560.66	975.35	2845.03	0.03	0.02	0.02
M1P4	6550.17	-481.54	2846.78	0.01	0.00	0.02
M2P1	1427.90	873.14	2847.11	0.00	0.01	0.02
M2P2	1896.36	-332.48	2844.99	0.01	0.01	0.01
M2P3	5560.62	975.41	2845.09	0.02	0.01	0.02
M2P4	6550.15	-481.47	2846.84	0.01	0.01	0.01
M3P1	1427.92	873.13	2847.12	0.02	0.03	0.04
M3P2	1896.38	-332.48	2845.01	0.02	0.03	0.02
M3P3	5560.65	975.39	2845.09	0.01	0.03	0.01
M3P4	6550.14	-481.52	2846.83	0.01	0.03	0.01

表7 内外测量一致性检测点平均值偏差及最大测量偏差

点	测量理论值			最大绝对测量偏差		
	x	y	z	dx	dy	dz
M1P1	0.05	0.04	0.01	0.06	0.05	0.09
M1P2	0.03	0.01	0.01	0.05	0.06	0.06
M1P3	0.03	0.04	0.02	0.07	0.09	0.06
M1P4	0.03	0.00	0.02	0.03	0.03	0.07
M2P1	0.02	0.01	0.04	0.04	0.03	0.07
M2P2	0.02	0.06	0.04	0.03	0.09	0.07
M2P3	0.07	0.10	0.04	0.10	0.14	0.08
M2P4	0.05	0.07	0.04	0.05	0.08	0.07
M3P1	0.04	0.00	0.05	0.06	0.05	0.11
M3P2	0.04	0.06	0.06	0.06	0.10	0.09
M3P3	0.04	0.08	0.04	0.06	0.13	0.07
M3P4	0.06	0.02	0.03	0.07	0.06	0.06

(2) 对于内外空间不同的开口数,选择不同的构建方法,建立与外部精度场相统一的内精度场。通过内部、外部分别使用ERS点进行定位,并测量相同的检测点进行比较,获得不一致误差,从而确定其可行性。这种精度场构建方法已应用于某项国家重大工程,为工程的实施奠定了重要的基础。

### 参考文献

- [1] 黄鹏,王青,俞慈君,等.飞机航炮的数字化校准分析[J].光学精密工程,2013,21(12):3102-3110.
- HUANG Peng, WANG Qing, YU Cijun, et al. Accuracy analysis for digital boresighting of aircraft gun[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3102-3110.
- [2] BURGE J H, SU P, ZHAO C Y, et al. Use of a commercial laser tracker for optical alignment[C]//Proceeding of SPIE. 2007: 1-12.
- [3] ARUN K S, HUANG T S, BLOSTEIN S D. Least-squares fitting of two 3-D point sets[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1987, PAMI-9(5): 698-

700.

[4] 张春富,张军,唐文彦,等.一种基于模式搜索的大尺寸测量移站坐标转换方法[J].计测技术,2003,23(6):12-14.

ZHANG Chunfu, ZHANG Jun, TANG Wenyan, et al. A coordinate transformation method of moving the station of large scale measurement based on mode searching[J]. Metrology & Measurement Technology, 2003, 23(6): 12-14.

[5] 耿娜,郝继贵,劳达宝,等.基于刚体运动学的坐标系配准理论及算法[J].传感技术学报,2010,23(8):1088-1092.

GENG Na, ZHU Jigui, LAO Dabao, et al. Theory and algorithm of coordinate system registration based on rigid body kinematics[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(8): 1088-1092.

[6] 周娜,安志勇,李丽娟,等.飞机数字化测量网络布站设计[J].光学精密工程,2012,20(7):1485-1491.

ZHOU Na, AN Zhiyong, LI Lijuan, et al. Design of multi-station network arrangement for aircraft digital measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1485-1497.

[7] 张于.基于统一空间测量网络的

大尺寸测量方法[J].航天器环境工程,2011,28(3):277-281.

ZHANG Yu. Large-scale measurement based on unified spatial metrology network[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(3): 277-281.

[8] MITCHELL J P, SPENCE A D, HOANG M, et al. Sensor fusion of laser trackers for use in large-scale precision metrology[J]. SPIE, 2004, 5263(57): 57-65.

[9] MEID A, SANDWICH S. Dynamic weighting of laser tracker measurements for bundle adjustment[R]. Heerbrugg: Leica Geosystems.

[10] 俞慈君,杨宝旒,金涨军,等.基于三维热变形原理的转站误差补偿方法[J].浙江大学学报(工学版),2015,49(7):1208-1214,1231.

YU Cijun, YANG Baoliu, JIN Zhangjun, et al. Compensation method for registration error of laser tracker based on three-dimensional anisotropic thermal-deformation theory[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(7): 1208-1214, 1231.

通讯作者:俞慈君, E-mail: yuppy@zju.edu.cn.

## Research of Establishing Method for Unified Accuracy Field of Internal and External Regional Space

YU Cijun<sup>1</sup>, LUO Tao<sup>1</sup>, LI Jiangxiong<sup>1</sup>, FAN Xintian<sup>2</sup>, QIAO Mingjie<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of Zhejiang Province, College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China)

**[ABSTRACT]** For digital measurement demands of the structure and equipment installation in the internal and external regional space, the associate technology of inside and outside reference points is researched. The internal measurement accuracy field united with the external measurement accuracy field is constructed. With regard to different openings between inside and outside spaces, utilizing the multi-spotting method, two measurement points and a level single-station positioning method, two measuring points and a level two-station positioning method, internal precision field is established to achieve the unity with external precision field. In a certain type of equipment, for example, experiment results show that the inconsistent measurement error of the same checkpoint between inside and outside measurement accuracy fields is up to 0.14 mm, which proves that the build mode is feasible, simple and reliable.

**Keywords:** Digital measurement; Precision field; Laser tracker; Transfer station; Positioning method

(责编 海山)