

文章编号 1004-924X(2013)08-1957-09

## 经济型大尺寸激光自动坐标测量系统

时光,张福民\*,曲兴华

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

**摘要:**利用手持式激光测距仪和二轴转台,设计了一种经济型大尺寸激光三维自动测量系统,用于船舶等大型工件的现场测量。介绍了系统的测量原理和主要组成部分,系统无需合作目标,在计算机的控制下自动对目标进行测量来获得相对系统的三维坐标数据。分析了系统的主要误差对测量结果的影响,完成了主要误差的提取实验。最后,利用激光跟踪仪对系统测试水平两点间的距离的测量精度进行了评定,并对船分段模型进行了测量实验。实验表明,该系统对水平放置物体的两点间距离的测量精度达到了1.73 mm,对船分段模型的平行平面之间的距离测量精度达到了1.5 mm。由于系统构成简单,硬件成本较低,测量精度较高,测量速度大约为1 point/s,非常适用于船分段的测量。

**关键词:**激光坐标测量系统;激光测距;坐标测量;二轴转台;误差提取

中图分类号:TH721;TB92 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20132108.1957

## Economical type large-scale laser automatic coordinate measuring system

SHI Guang, ZHANG Fu-min\*, QU Xing-hua

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

\* Corresponding author, E-mail: zhangfumini@tju.edu.cn

**Abstract:** An economical type large-scale laser coordinate automatic measuring system based on a portable laser rangefinder and a biaxial-turning-table was presented to measure large work pieces, such as ship bodies in the fields. The measurement principle and the main components of the system were introduced. Under the control of a computer, this system could complete automatic scanning measurement without a cooperative target, and also could get the relative coordinate data to the system of the target. The effects of main errors of the system on the measurement results were analyzed, and some experiments were performed to extract and calculate the main errors of this system. Finally, the laser tracker was used to evaluate the measurement accuracy of the distance between two points and to measure a ship body model. From the measuring experiments, it points out that the measurement accuracy of the distance between two points is better than 1.73 mm in 10 meters, and that of the distance between two parallel planes of the ship body model is better than 1.5 mm. These results indicate that the system is suitable for ship body automatic measurement because of its simple construction, low cost, high precision and a higher measuring speed(1 point/s).

收稿日期:2013-01-14;修订日期:2013-02-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51275350);天津市自然科学基金资助项目(No. 12JCYBJC11000)

**Key words:** laser coordinate measuring system; laser rangefinder; coordinate measurement; biaxial-turning-table; error separation; coordinate metrology

## 1 引言

大空间范围的坐标测量一直是精密测量技术的热点和难点。近些年,随着现代工业的不断发展,在汽车、航天、船舶和国防等领域,对大尺寸几何量测量的需求越来越多<sup>[1-2]</sup>。目前,常用的大尺寸测量系统主要有:三坐标测量机,电子经纬仪测量系统、全站仪测量系统、数字近景摄影测量系统和激光跟踪测量系统等<sup>[3-4]</sup>。这些测量系统都有一定的局限性,如三坐标测量机对测量环境要求高,不便携,测量范围小<sup>[5]</sup>,不适用于工业现场测量;电子经纬仪测量系统由多台经纬仪组合而成,需要人工瞄准,坐标解算复杂<sup>[6]</sup>,测量效率低;全站仪测量系统的操作较电子经纬仪测量系统方便,单台即可进行测量,但只能进行单点测量,不能满足许多场合对测量效率的要求<sup>[7]</sup>;数字近景摄影测量系统的算法复杂,同样存在效率低下的问题<sup>[8]</sup>,在进行大空间范围测量时,系统的测量精度会急剧下降,而且系统成本高;激光跟踪仪测量系统在工作时需要测量人员手持逆反射器,严格意义上属于接触式测量,逆反射器与被测目标接触时会对目标表面产生影响。若被测目标对测量人员构成危害则会严重影响测量进度。为了克服上述传统测量方式的局限性,国内外在大尺寸坐标测量领域开展了大量研究,如多传感器融合的组合式测量系统<sup>[9]</sup>,室内测量定位系统<sup>[10]</sup>,激光雷达测量系统<sup>[11-12]</sup>等新型的测量系统。

在进行船的分段组装时,需要控制部分重要特征面相互之间的位置关系,以保证拼装后整体的几何尺寸、形状、相互位置精度<sup>[13-14]</sup>。传统的船分段的测量方法效率低下,会严重影响生产效率;而激光跟踪仪和激光雷达等先进测量技术的成本又太高。本文针对船分段组装现场测量,利用手持式测距仪和二轴转台组合,设计了一种经济型大尺寸三维自动测量系统。该系统无需合作目标,仅需一名测量人员即可完成船分段肋板的自动扫描测量,测量速度可达 1 point/s。该系统使用方便,测量效率高,可以节省人力和工时,成本较低,10 m 内测量精度可以高于 2 mm。

## 2 系统原理

系统的测距单元选用脉冲式激光测距仪,它采用的是脉冲测距法,工作原理基于公式:

$$D = c \cdot t / 2, \quad (1)$$

其中: $D$ 为被测距离; $c$ 为光速, $c \approx 3 \times 10^8$  m/s; $t$ 为激光从发射到被测目标返回发射端的往返时间。脉冲式激光测距仪同时向待测目标和参考目标发射两束脉冲激光,两束脉冲激光经漫反射返回测距仪,由光敏元件产生两个脉冲信号。经过电路和软件的处理,得到这两个脉冲的时间差,从而求出待测目标的距离。

将测距仪安装在二轴转台上,令测距仪的光轴方向与转台两个转轴同时垂直,测距仪的基准点位于转台两轴的交点上。以激光测距仪的测量基准点为原点  $O$  建立球坐标系  $(r, \theta, \phi)$ ,测距仪的测距结果为距离  $r$ ,转台的两个转轴的转角分别为俯仰角  $\theta$  和方位角  $\phi$ 。计算机同时从转台控制器和测距仪控制系统读取转台的两个角度值和测距结果  $r$ ,并对它们发送控制命令,从而实现对测距仪和转台的控制。该测量系统的基本工作原理如图 1 所示。

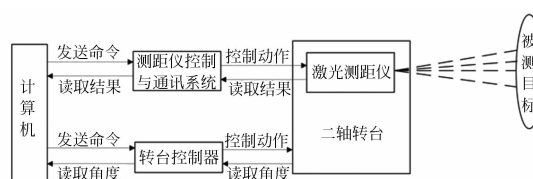


图 1 大尺寸激光三维自动测量系统原理图

Fig. 1 Principle of large-scale laser automatic coordinate measuring system

测量以后得到球坐标系的 3 个参数  $(r, \theta, \phi)$ ,由坐标转换公式(2)转换为直角坐标系的坐标值  $(x, y, z)$ 。

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi \\ y = r \cdot \cos \theta \cdot \sin \phi \\ z = r \cdot \sin \theta \end{cases}, \quad (2)$$

其中: $r \in [0, \infty)$ ,  $\theta \in [0, \pi]$ ,  $\phi \in [0, 2\pi)$ 。

### 3 测量系统组成

该测量系统主要包括 5 部分:激光测距仪,测距仪控制与通讯电路,二轴转台,转台控制器,计算机。

#### 3.1 激光测距仪

系统的测距单元选用的是 Leica DISTO D3 手持式激光测距仪。该测距仪的量程为 0.05~100 m,10 m 之内测量精度可以达到 1 mm,10~30 m 的测量精度约为  $\pm 0.025$  mm/m。该测距仪无需合作目标,测量精度较高,可以满足船分段组装的测量要求。

#### 3.2 测距仪控制与通讯系统

Leica DISTO D3 手持式激光测距仪没有集成通讯模块,因此本文设计了测距仪控制与通讯系统。该系统从测距仪液晶部分读取测距信息,并通过串口发送至计算机,同时接收计算机发送的命令,并对测距仪进行控制。该系统主要由 3 部分组成:测距仪读取部分,测距仪控制部分和串口通讯部分。电路系统的处理器采用了德州仪器公司生产的 DSP 芯片 TMS320F2812。

测距仪液晶的接收信号为串行信号,由 DSP2812 的 SPI 模块 (Serial Peripheral Interface) 连接其相应的接口和测距仪的液晶输出接口,即可方便地利用测距仪的液晶信号读取测距仪的测距结果。

测距仪的键盘为矩阵键盘,共有 10 根连线与测距仪的电路相连。在测量过程中,仅控制测距键和清除键两个按键即可完成对测距仪的基本控制。利用 3 路 2 通道数字控制模拟开关 CD4053BC,将 4 根信号线与该芯片的相应管脚相连,由 DSP 的 IO 接口控制其数字控制输入端,以实现测距仪的控制。

采用 DSP2812 内部的 SCI 模块进行与计算机的通讯。向计算机发送测距仪的测量结果,并且接收计算机发来的命令。外部芯片采用德州仪器公司的 MAX3232 进行电平转换,以实现 DSP 与计算机的串口通讯。

#### 3.3 机械转台系统

机械转台部分由两个单轴精密转台组合而成,传动比为 180:1,分辨率为  $0.00125^\circ$ ,重复定位精度为  $0.005^\circ$ ,最大转速为  $20$  ( $^\circ$ )/s,径向跳动

和端面跳动均为  $15 \mu\text{m}$ ,驱动电机采用的是步距为  $1.8^\circ$  的步进电机。两个转台的轴线正交,轴线的相交度为 0.25 mm。转台控制器可以控制转台的速度,加速度和转角,利用 RS232 接口与计算机通讯,并且支持 Visual C++ 编程,以实现转台的自动控制。图 2 为大尺寸激光三维测距系统的实物图。

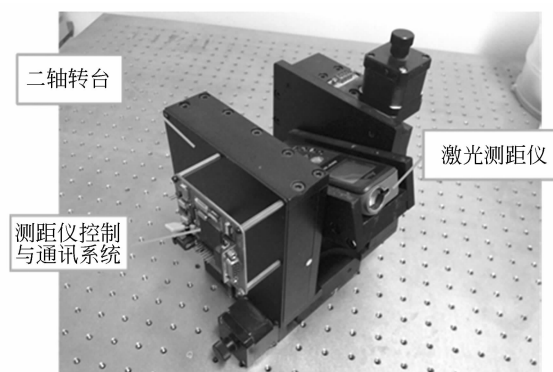


图 2 大尺寸激光三维测距系统实物照片

Fig. 2 Photo of large-scale laser coordinate measuring system

#### 3.4 系统运行时序

测量时,系统每到一个测量点,首先停止转台,延时 100 ms 待转台稳定后,测量二轴转台的两个角度值,同时向测距仪发送测量命令,在接收到测距仪的测量结果后,将距离值和两个角度值作为这个测量点的测量数据;然后再进行下一点的测量。对于漫反射性能较好的目标,测量速度大约为 1 point/s。

### 4 系统标定

#### 4.1 激光扫描系统误差分析

球坐标测量系统中,角度测量误差会随着距离的增加而增大,这对系统最终的测量精度的影响非常大,因此角度误差的补偿是十分必要的。角度测量误差主要由系统机械部分的安装误差引起,它包括光轴和水平轴的垂直度误差,光轴和竖直轴的垂直度误差,水平轴和竖直轴的垂直度误差,水平轴与竖直轴不相交的误差等。

##### 4.1.1 光轴和水平轴垂直度误差的影响

光轴和水平轴垂直度误差对水平角读数的影响如图 3 所示。图中,X 轴、Y 轴和 Z 轴分别表示

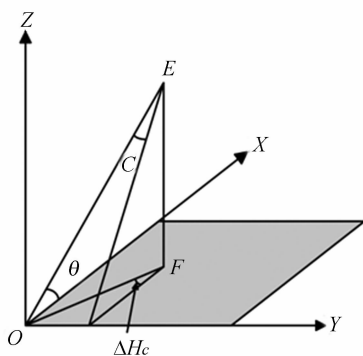


图 3 光轴和水平轴垂直度误差的影响

Fig. 3 Impact of squareness error between optical axis and horizontal axis

光轴,水平轴和竖直轴。假设水平轴 Y 和竖直轴 Z 严格垂直,面 XOZ 为光轴和竖直轴在理想情况下所构成的平面。激光测距仪的安装误差会使光轴 OE 和 XOZ 面出现夹角 C。角 C 会引入水平角读数误差  $\Delta H_c$ 。由图中三角形关系可得:

$$\sin C = \sin \Delta H_c \cdot \sin \angle EOZ. \quad (3)$$

由于角 C 和  $\Delta H_c$  很小,所以可以认为  $\sin \angle EOZ \approx \cos \theta$ ,  $\sin C \approx C$ ,  $\sin \Delta H_c \approx \Delta H_c$ 。公式(3)简化为:

$$\Delta H_c = C / \cos \theta. \quad (4)$$

#### 4.1.2 水平轴和竖直轴垂直度误差的影响

水平轴和竖直轴垂直度误差对水平角读数的影响如图 4 所示。假设光轴 X 和水平轴 Y 的垂直度误差为零,面 XOY 为光轴和水平轴所在的平面。

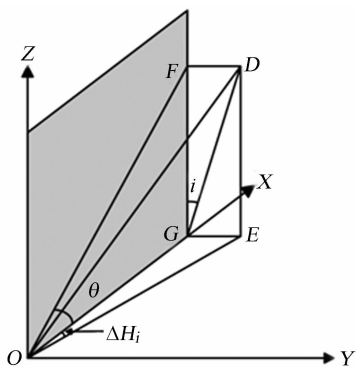


图 4 水平轴和竖直轴垂直度误差的影响

Fig. 4 Impact of squareness error between horizontal axis and vertical axis

由于转台在组装时不能保证两转轴理想垂直,两转轴会出现夹角  $i$ ,  $i$  会引入水平角读数误

差  $\Delta H_i$ 。由图中的三角型关系可以得到:

$$\tan i = \tan \Delta H_i \cdot \cot \theta. \quad (5)$$

由于角  $i$  和  $\Delta H_i$  非常小,公式(5)简化为:

$$\Delta H_i = i \cdot \tan \theta. \quad (6)$$

水平角度数误差由上述两个误差组成:

$$\Delta H = \Delta H_c + \Delta H_i = C / \cos \theta + i \cdot \tan \theta. \quad (7)$$

光轴 X 和竖直轴 Z 的垂直度误差引入俯仰角读数误差  $\Delta V_i$ ,  $\Delta V_i = i$ 。由于该误差很小且数值固定,因此可以忽略不计。而  $\Delta H_c$  和  $\Delta H_i$  随着俯仰角的增加而增大,并且可以证明  $\Delta H_c$  和  $\Delta H_i$  在俯仰角小于  $60^\circ$  时的值较小,为线性增长。

光轴和水平轴的垂直度误差不影响俯仰角的读数。图 4 中,假设竖直轴 Z 和水平轴 Y 严格垂直,光轴与水平轴的垂直度误差为  $\Delta H_i$ ,光轴由 OX 偏移到了 OE。在测量时,光轴 X 围绕水平轴旋转了  $\theta$ ,光轴由理想位置 OF 变为 OD。由于四边形 DEGF 为矩形,因此  $\angle DOE = \angle FOG = \theta$ ,俯仰角的读数误差为零。由此可知,光轴和水平轴的垂直度误差不影响俯仰角的读数。同样地,由于  $\angle DOF = \angle EOG = \Delta H_i$ ,可得光轴和竖直轴的垂直度误差不影响水平角的读数。

#### 4.1.3 水平轴与竖直轴不相交误差的影响

水平轴与竖直轴的不相交误差对水平面内点的测量影响分析如图 5 所示,俯视转台, O 点为竖直轴,点划线为水平轴。在理想情况下,水平轴、竖直轴和测距仪光轴相交于 O 点。在初始位置,假设水平轴、竖直轴和光轴相互垂直且光轴刚好通过竖直轴,光轴与水平轴交点为测距仪的测距基准。在实际情况下,由于水平轴和竖直轴存在 0.25 mm 的不相交误差,光轴与水平轴交点由 O

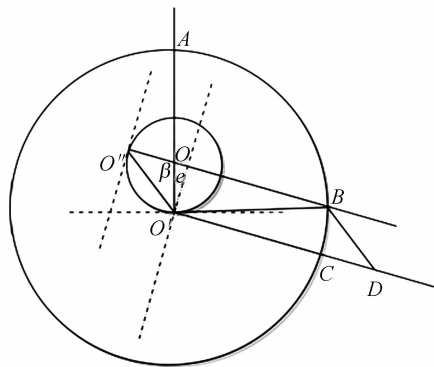


图 5 两转轴不相交的误差带来的影响

Fig. 5 Impact of disjoint error between horizontal axis and vertical axis

点移动到了  $O'$ ,且  $OO' = e = 0.25 \text{ mm}$ 。A 为测距仪在初始位置时测得的点。以  $O'$  为极点,  $O'A$  为极轴建立极坐标系。由此可知, 竖直轴转动的过程中, 测距仪的测距基准将在以  $O$  为圆心, 偏心距为半径的圆轨迹上运动。所以当电机转过  $\beta$  角时, 测距仪测距的基准位置变为  $O''$ , 对应  $\angle O'OO'' = \beta$ 。假设此时激光入射到被测目标 B 点处, 由于在安装后测距仪相对两轴的位置将固定不变, 所以  $O'A$  和  $O''B$  都通过圆心  $O$ , 这样 B 点位置可以确定, 此时测距仪测得的距离为  $\rho_B$ 。根据 B 点对应的转角  $\beta$  和距离  $\rho_B$ , 在以  $O'$  为极点,  $O'A$  为极轴的极坐标系下可确定一点 D。由系统测量原理可知, 实际上在数据分析处理的过程中认为点 D 才是被测圆上的目标点, 而不是点 B。由此验证了水平轴与竖直轴不相交的误差对测量的影响。由公式(8)和(9)可以计算得到 BD 的距离和  $\angle BO'D$ , 计算可以得到  $BD \leq 2e = 0.5 \text{ mm}$ 。

$$BD = O'O'' = \sqrt{2e^2 - 2e^2 \cos \beta}, \quad (8)$$

$$\angle BO'D = \arcsin\left(\sin\left(90^\circ - \frac{\beta}{2}\right) \cdot \frac{BD}{\sqrt{BD^2 + \rho_B^2 - 2 \cdot BD \cdot \rho_B \cdot \cos\left(90^\circ - \frac{\beta}{2}\right)}}\right). \quad (9)$$

若将  $O$  点看作是水平轴, 同理可以得出水平轴与竖直轴的不相交误差对竖直面内点测量的影响。

### 4.2 激光扫描系统误差测量

#### 4.2.1 测距基准与水平轴垂直轴交点重合误差测量

测距基准与水平轴垂直轴交点的重合误差测量方法如图 6 所示。放置两个半透明的目标, 利用一束激光, 在两个目标上分辨确定位于同一直线上的 A, B 两点, 并测出 A, B 两点的距离为 AB。将转台放置在两个目标的中间, 然后利用水平仪调整转台水平, 测距仪的光点刚好投射在 A 点, 测得距离 OA, 令转台竖直旋转  $180^\circ$ , 测距仪光点投射在 B 点, 测得距离 OB。由公式(10)计算得出测距仪的测距基准与竖直轴的距离误差为  $D'$ 。

$$D' = \frac{AB - OA - OB}{2}. \quad (10)$$

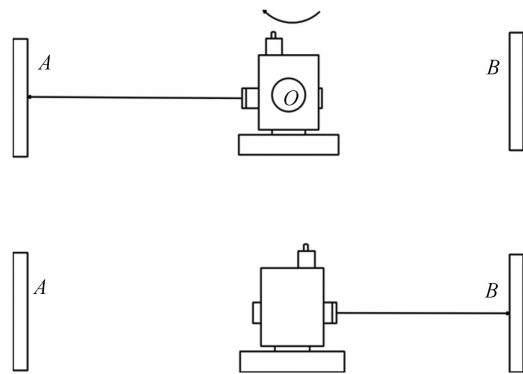


图 6 测距零位与水平垂直轴交点重合误差测量方法  
Fig. 6 Method for measurement of coincidence error between distance reference and intersection of horizontal axis and vertical axis

#### 4.2.2 垂直度误差的测量

由于光轴和水平轴的垂直度误差和转台两轴的垂直度误差对水平角读数的影响较大, 因此对这两项误差进行了测量。利用激光的准直性将角度的变化转化为其对应边长度的变化, 并通过增加角两边的长度, 将小角度变化放大, 以便于测量角度的变化。在测量中, 二轴转台的水平轴 X 和垂直轴 Y 的角度由安装在电机中的编码器读取。

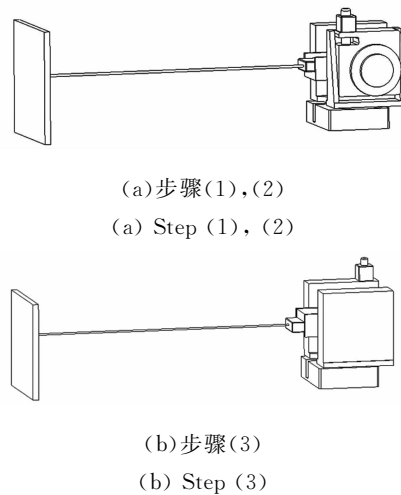


图 7 光轴和水平轴误差测量方法

Fig. 7 Measuring method of squareness error between optical axis and horizontal axis

光轴与水平轴垂直度误差  $C$  的测量步骤如图 8 所示: (1) 固定转台, 在距转台 10 m 处固定一个白色砧板作为测量目标, 水平轴 X 和垂直轴 Y 都回零点时打开测距仪激光, 让激光打到目标上一个定点 1。(2) 将 X 轴与 Y 轴分别旋转  $180^\circ$ ,

这时光斑位置为点 2, 旋转方式如图 7 所示。(3) 此时, 点 1 与点 2 水平方向的距离  $D_s$  为光轴与水平轴 X 垂直度误差 C 的函数。光轴与水平轴 X 的垂直度误差为:

$$C = \frac{1}{2} \arcsin(D_s / 10\ 000) \quad (11)$$

水平轴与垂直轴垂直度误差  $i$  的测量步骤如图 8 所示:(1)使 X 轴旋转到一个角度( $\alpha=0^\circ$ ), Y 轴为 0, 打开测距仪, 激光打在目标上点 1。(2)将 X, Y 轴分别旋转  $180^\circ$ , 这时光斑位置为 2, 测距仪测得距离为  $D_1$ 。此时点 1 点 2 在水平方向的差值为  $d_1$ 。(3)旋转 X 轴到另外一个角度( $\beta=20^\circ$ ), Y 轴为 0, 打开测距仪, 激光打在目标上点 3。(4)将 Y 轴旋转  $180^\circ$ , X 轴旋转  $140^\circ$ , 这时光点位置为点 4, 测距仪测得距离为  $D_2$ , 此时点 3 点 4 在水平方向的差值为  $d_2$ 。

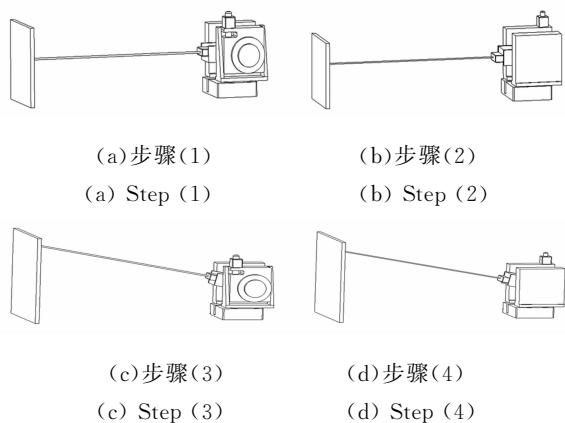


图 8 水平轴与垂直轴误差测量方法

Fig. 8 Calibration experiment of squareness error between horizontal axis and vertical axis

经过公式推导可以得到垂直轴与水平轴的垂直度误差为:

$$i = \frac{1}{2} \left( \arcsin(d_2/D_2) - \frac{\arcsin(d_1/D_1)}{\cos 20^\circ} \right) \cot 20^\circ \quad (12)$$

测量结果如表 1 所示。

表 1 系统误差标定结果

Tab. 1 Results of system error calibration experiments

$D_1/\text{mm}$	$d_1/\text{mm}$	$D_2/\text{mm}$	$d_2/\text{mm}$	$i/(')$	$c/(')$
6 008.9	1.3	7 188.4	8.0	4.84	22.31
6 026.2	1.4	7 188.7	8.6	4.82	23.96
6 026.5	1.3	7 188.5	9.0	4.83	22.25
6 026.7	1.3	7 181.5	8.5	4.51	22.25

### 4.3 系统测量精度标定

激光测距仪的投射光点为指示光, 投射在被测目标上为一个矩形光斑, 在确定真正的测量点位置时存在误差。在标定精度时, 必须尽量减小由光斑面积带来的测量误差。

以两组平行平面为测量目标, 可以减小光斑面积带来的测量误差, 并且这两组平行平面相互垂直, 两个平行平面的相对位置固定不变。首先测量与地面垂直的两个平行平面, 在两个平面上各做一个标记点, 这两个标记点的连线应大致与两个平面垂直。使用扫描系统对这两点进行多次测量, 并使用 FARO 公司生产的激光跟踪仪测量这两点的距离进行标定。然后, 以同样的方法测量与地面平行的两个平行平面。

图 9 为实验原理图,  $a$  为扫描系统与待测两点连线的距离,  $b$  为待测两面的距离,  $c$  为由于光斑面积引起的定位误差。设  $b=5\ 000\ \text{mm}$ ,  $c=10\ \text{mm}$ , 由勾股定理可得,  $d=5\ 000.01$ 。  $\Delta=d-b=0.01\ \text{mm}$ , 误差可以忽略。由此可知, 由于光斑位置无法准确确定, 引入的误差可减小至被忽略的程度。测量误差主要由测距仪的测距误差和转台的自身误差组成。

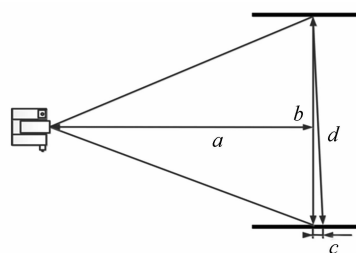


图 9 误差校准实验原理

Fig. 9 Principle of precision calibration experiment

在距离转台 10 m 处的平行于地面的平面上, 做两个标记点 A, B, 多次测量这两点的距离, 再用跟踪仪测量这两点的距离作为比较值。同理, 在距离转台 10 m 处的垂直于地面的一组平行平面标记两点 C 和 D, 重复同样的步骤。实验结果如表 2 所示。

表 2 系统误差标定结果

Tab.2 Results of precision calibration (mm)

	A 与 B 的距离	C 与 D 的距离
1	5 943.65	5 938.72
2	5 943.76	5 938.60
3	5 944.5	5 938.68
4	5 944.46	5 938.47
5	5 944.29	5 938.31
6	5 944.24	5 938.32
7	5 943.50	5 938.25
8	5 943.80	5 938.70
9	5 944.22	5 938.65
10	5 944.29	5 938.84
11	5 944.03	5 938.65
12	5 943.99	5 939.06
13	5 944.32	5 938.72
14	5 944.25	5 938.60
15	5 943.78	5 938.81
16	5 943.87	5 938.7
17	5 944.46	5 939.11
18	5 944.55	5 938.62
19	5 943.81	5 938.70
20	5 943.83	5 938.60
21	5 943.77	5 938.66
22	5 943.96	5 938.02
平均值	5 944.06	5 938.62
方差	0.094	0.060
误差	-1.73	-1.76

4.4 船分段模型测量实验

将该大尺寸激光三维测量系统用于目标船分段的测量。首先制作了一个船分段的模型,对其各个面之间的距离进行了测量,并和激光跟踪仪的测量结果进行了比较,如图 10 所示。将该系统和激光跟踪仪置于距离船分段模型 10 m 处,对 14 个面分别进行测量,计算各个面之间的距离。表 3 给出了其中一组实验的结果。

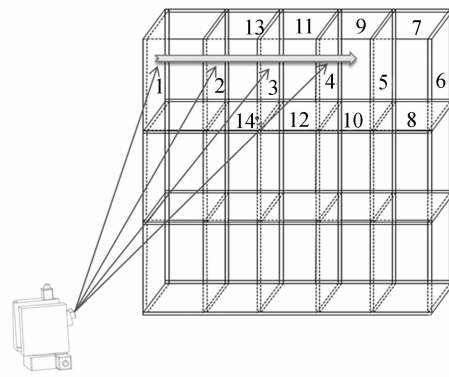


图 10 船分段模型测量实验

Fig.10 Measuring experiment of ship section model

表 3 船分段测量实验结果

Tab.3 Results of ship section model in measuring experiment

(mm)

	面 1 到面 2	面 2 到面 3	面 3 到面 4	面 4 到面 5	面 5 到面 6	面 7 到面 8	面 9 到面 10	面 11 到面 12	面 13 到面 14
本系统	975.97	993.71	975.74	995.61	975.69	-359.30	-361.10	-361.92	-360.83
跟踪仪	977.33	994.74	976.78	995.47	976.68	-359.39	-360.49	-361.75	-361.49
误差	-1.36	-1.03	-1.04	0.14	-0.98	0.088 7	-0.610 1	-0.173 1	0.661 3

4.5 实验结果讨论

从实验结果可以看出,系统对水平放置两点的测量精度达到了 1.73 mm,符合预期目标,对船分段模型的平行平面距离进行测量产生的误差均不超过 1.36 mm。多次实验得到的测量误差均

小于 1.5 mm,测量精度可以达到船分段测量的要求。在精度标定试验中,误差来源主要包括:步进电机的误差  $\Delta S$ ,转台的回程误差  $\Delta B$ ,转台的重复定位误差  $\Delta R$  和水平角的读数误差  $\Delta H$ 。总误差  $\Delta$  为:

$$\Delta = \sqrt{(d \cdot \sin \Delta S)^2 + (d \cdot \sin \Delta B)^2 + (d \cdot \sin \Delta R)^2 + (d \cdot \sin \Delta H)^2}, \quad (13)$$

其中: $d$  为系统距离测量点连线的距离。当  $d$  为 5 000 mm 时,代入测得的  $\Delta H$  和其它已知的误差值可以得到  $\Delta = \pm 1.61$  mm,实验结果与理论测量精度相符。在实验中,忽略了测距仪的测距误

差,最主要的误差来源是转台本身的误差和测距仪的安装误差。

在船分段模型的测量试验中,测量多个点,利用最小二乘法拟合平面来提高平行平面间距离的

测量精度。因此,通过拟合平面的方法测量两平面的距离可以提高船分段的测量精度。

## 5 结 论

本文利用 Leica 手持式激光测距仪和二轴转台组合,设计了一种经济型大尺寸三维自动测量系统,并通过系统误差提取实验,系统精度标定实验和船分段模型测量实验分析了主要的系统误差。其中,误差提取实验方法简单,可以直接分离出整个测量系统三轴的垂直度误差。精度标定实

验解决了由于测距仪光斑面积较大难以直接确定测量点位置的问题;利用两组平行平面将光斑定位带来的误差减到最小,并证明了系统对水平两点间距离的测量精度达到了 1.73 mm、船分段模型测量实验与 FARO 激光跟踪仪的测量结果进行了比较,证明该系统的两平行平面间距离的测量精度高于 1.5 mm,符合预期目标。

整套系统结构组成简单,硬件成本小于 25 000 元,精度较高,自动扫描测量模式可以提高测量效率,测量速度大约为 1 point/s,非常适合用于船分段的测量。

## 参考文献:

- [1] 周森,郭永彩,高潮.用于大尺寸工件的动态长度测量系统[J].光学精密工程,2012,20(11):2472-2478.  
ZHOU S, GUO Y C, GAO CH. Dynamic length measuring system for large scale work pieces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11):2472-2478. (in Chinese)
- [2] 周虎,郝继贵,张滋黎,等.激光电子经纬仪动态跟踪引导系统的设计[J].光学精密工程,2011,19(11):2671-2678.  
ZHOU H, ZHU J G, ZHANG Z L, et al.. Application of bundle adjustment to accuracy evaluation of laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2671-2678. (in Chinese)
- [3] 李广云.非正交系坐标测量系统原理及进展[J].测绘信息工程,2003,28(1):4-10.  
Li G Y. Principle and developing trend of non-orthogonal coordinate systems [J]. *Journal of Geomatics*, 2003, 28(1):4-10. (in Chinese)
- [4] 黄桂平,钦桂勤.大尺寸三坐标测量方法与系统[J].宇航计测技术,2007,27(4):15-19.  
HUANG G P, QIN G Q. Measurement methods of the large scale 3D coordinate and its system [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2007, 27(4):15-19. (in Chinese)
- [5] 张国雄.三坐标测量机[M].天津:天津大学出版社,1999.  
ZHANG G X. *Coordinate Measuring Machine* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999. (in Chinese)
- [6] 张滋黎,郝继贵,耿娜,等.双经纬仪三维坐标测量系统设计[J].传感技术学报,2010,23(5):660-664.  
ZHANG Z L, ZHU J G, GENG N, et al.. The design of double theodolite 3D coordinate measurement system [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(5):660-664. (in Chinese)
- [7] 范百兴.高性能全站仪的研究及其在动态测量中的应用[D].郑州:解放军信息工程大学测绘学院,2004.  
FAN B X. High study on performance total station and its application in dynamic measurement [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2004. (in Chinese)
- [8] 甘晓川.数字近景摄影测量系统中相机校准和长度测量误差校准[D].北京:中国计量科学研究院,2012.  
GAN X CH. *Camera Calibration and Length Measurement Error Calibration in Digital Close-range Photogrammetry* [D]. Beijing: National Institute of Metrology, 2012. (in Chinese)
- [9] 张福民,曲兴华,叶声华.大尺寸测量中多传感器的融合[J].光学精密工程,2008,16(70):1236-1240.  
ZHANG F M, QU X H, YE SH H. Multiple sensor fusion in large scale measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(70):1236-1240. (in Chinese)
- [10] 耿磊.室内测量定位系统测角精度分析及补偿方法研究[D].天津:天津大学,2011.  
GENG L. *Research on angle measurement uncertainty and compensation method of indoor measurement positioning system* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] MOSQUEIRA G, APETZ J. Analysis of the indoor GPS system as feedback for the robotic alignment of fuselages using laser radar measurements as comparison [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, 28(6): 700-709.
- [13] 刘文艳,徐平.大型舰船分段自动合拢系统[J].仪器仪表用户,2004,11(5):13-15.
- LIU W Y, XU P. Automatic assembling system for large ship [J]. *Electronic Instrumentation Customer*, 2004,11(5):13-15. (in Chinese)
- [14] 张福民,曲兴华,叶声华.分段制造中大尺寸测量的关键算法研究[J].光电子·激光,2008,19(10):1368-1371.
- ZHANG F M, QU X H, YE SH H. Research on key algorithms for large scale measurement in subsection manufacture [J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2008, 19(10):1368-1371. (in Chinese)

## 作者简介:



时光(1986—),男,河南鹤壁人,博士研究生,2009年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事测试计量技术及仪器的研究。E-mail: theoshiguang@163.com



张福民(1982—),男,山东人,博士,讲师,2004年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2009年于天津大学获得博士学位,主要从事测试计量技术及仪器的研究。E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn

## 导师简介:



曲兴华(1956—),男,山东人,博士,教授,博士生导师,2003年于天津大学获得博士学位,主要从事测试计量技术及仪器的研究。E-mail: quxinghua@tju.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)