

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.04.05

经纬仪与激光测距仪组合系统的 误差分析及标定方法

罗明成^{1,2}, 王铜^{1,2}, 董岚^{1,2}, 罗涛^{1,2}, 梁静^{1,2}, 李波^{1,2}, 柯志勇^{1,2}, 何振强^{1,2}, 马娜^{1,2}

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 东莞中子科学中心, 广东 东莞 523803)

摘 要: 通过将 μ -base 激光测距仪固定在经纬仪上形成一套组合测量系统, 并对组合测量系统中测距仪与经纬仪的相对位置进行了精确标定, 将激光测距仪测量得到的距离转换为经纬仪仪器中心到目标的距离, 再结合经纬仪测量的目标角度值, 形成一种适用于大尺寸、超高精度测量要求的三维测量系统。通过对组合系统的测距误差进行分析, 提出了一套高精度的标定方法, 使得经纬仪中心至目标点的距离测量误差为 $\pm 16.9 \mu\text{m}$ 。并对组合系统在此标定误差下的测点误差进行了分析, 结果表明组合系统点位测量误差小于激光跟踪仪。因此, 理论上本文提出的经纬仪与激光测距仪组合测量系统能够满足工业领域中尺寸、超高精度测量的要求。

关键词: 经纬仪; 激光测距仪; 距离测量; 标定; 精度分析

中图分类号: TB921

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)04-0020-06

Research on the Error Analysis and Calibration Method of the Theodolite and Laser Ranger Combination System

LUO Mingcheng^{1,2}, WANG Tong^{1,2*}, DONG Lan^{1,2}, LUO Tao^{1,2}, LIANG Jing^{1,2},
LI Bo^{1,2}, KE Zhiyong^{1,2}, HE Zhenqiang^{1,2}, MA Na^{1,2}

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100049, China;

2. Dongguan Neutron Science Center, Dongguan 523803, China)

Abstract: In this paper, we put forward a new combination measurement system by fixing the μ -base laser ranger on the theodolite. For this combined measurement system, the relative position between the ranger and the theodolite was precisely calibrated, and finally realized the distance converting, of which the starting point changed from the laser ranger to the theodolite. Combined with the angle value measured by the theodolite, it forms a three-dimensional measuring system which could be able to meet the requirements of the large-scale and ultra-high precision measurement. Through the analysis of the accuracy of the combination system, a high precision calibration method was proposed, which makes the distance measurement error of the theodolite to the target point could reach $\pm 16.9 \mu\text{m}$. The error of the measurement system was analyzed. the results have shown that the measurement error of the combination system was better than that of the laser tracker. Therefore, the combination of theodolite and laser ranger mentioned above provided a solution to the challenge of large scale and ultra-high precision measurement in the industrial field.

Key words: theodolite; laser ranger; distance measurement; calibration; accuracy analysis

0 引言

激光跟踪仪具有测量效率高、测距精度高等优点, 目前工业中大尺寸高精度的三维测量通常采用激光跟踪仪系统^[1-6]。Leica AT403 激光跟踪仪绝对测距误差为 $\pm 10 \mu\text{m}$, 测角误差为 $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$, 其坐标测量误差主要受测角误差影响, 而测角误差与测量距离有关, 随着距离增大, 激光跟踪仪对靶球中心自动识别探测的精度降低。因此, 随着测量距离增加, 激光跟踪仪系统点位相对误差也随之增大^[7-9]。此外, 激

光跟踪仪测量对环境要求高, 恶劣环境下其有效测量距离进一步减小, 再加上系统价格昂贵, 限制了激光跟踪仪的大规模应用。在国家大科学装置中国散裂中子源的二级隧道网测量过程中, 为了加强网形结构和提高网点精度, 需要对控制网进行大跨度的高精度测角和测距, 因此, 本文提出将经纬仪高精度测角以及激光测距仪高精度测距优势结合起来, 形成一套大尺寸高精度的测量系统。在全站仪推出前, 一些经纬仪为了实现测距, 将激光测距仪安装在经纬仪立柱顶部,

这种组合式经纬仪为了将测距仪测量的距离转换为经纬仪中心到目标的距离,测量反射目标均是采用上下竖置的圆棱镜,两个圆棱镜的距离等于测距仪到经纬仪仪器中心的距离,因此,测距仪对上面圆棱镜的测量距离就等于经纬仪仪器中心到下面圆棱镜的测量距离。但是这种测量方式要求测点周围空间大、上下靶标严格竖置,导致测量很不方便。因此,本文提出一种新的方法来实现经纬仪的高精度测距。

1 经纬仪与激光测距仪组合系统

通过一个可精密调整的球形座工装,将激光测距仪固定在经纬仪的立柱上,装配成经纬仪与激光测距仪组合测量系统。测距时,将激光测距仪对准靶球目标,测得测距仪至靶球目标的距离,同时将经纬仪也瞄准靶球目标,测得经纬仪至靶球目标的天顶距,最终通过计算即可得到经纬仪至靶球目标的距离,完成大尺寸高精度的测量任务。

1.1 经纬仪介绍

组合系统中,选用 Leica 研发的 TM6100A 电子经纬仪,其具有如下优势:①采用新型直接驱动技术,抗干扰能力强、稳定性高、可靠性好;②具有新型操作面板,简化了使用流程,易操作且测量效率高;③具有新型微调把手,使得困难位置的测量更加容易,且由于这一新技术结构中没有齿轮,运行噪声比传统经纬仪小;④采用新型电池设计理念,维护成本低且能耗少;⑤测量精度高,其一测回水平方向和竖直角标称测量误差为 $\pm 0.5''$ 。

1.2 激光测距仪介绍

目前市面上的独立式绝对测量仪为 Leica 的 μ -base 激光测距仪,它采用绝对测距技术,基于相位法测距原理,通过测距频率和带宽提高测距精度,全量程测距误差为 $\pm 10 \mu\text{m}$ ^[10-11]。

μ -base 激光测距仪主要由主机、球形精密机械连接装置、通信接口盒、电源适配器以及软件组成,如图 1 所示。

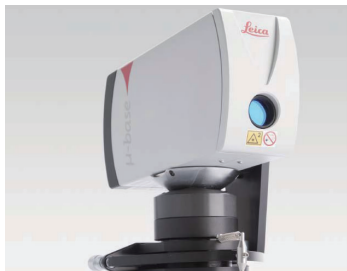


图 1 μ -base 激光测距仪

如下好处:①球形结构的球心作为测距仪的外基准代表了测距仪的测距基点;②球形结构通过与球形安装座配合使用,实现测距仪多角度测距时,测距中心的空间位置始终保持不变。

1.3 经纬仪与激光测距仪组合系统距离测量

为了将激光测距仪加装在经纬仪上,设计一个可精密调整的球形安装座工装。将经纬仪的把手卸下,通过螺丝将工装固定安装在经纬仪的立柱上。测量时,将激光测距仪安装在球形安装座上,激光测距仪瞄准靶球目标,获得测距仪至靶球目标的距离 s ,同时,经纬仪也瞄准靶球目标,获得经纬仪至靶球目标的天顶距 θ ,最终通过计算即可得到经纬仪至靶球目标的距离 l 。激光测距仪与经纬仪的几何位置模型如图 2 所示。其中, O 为经纬仪的仪器中心位置, O_1 为测距仪的仪器中心位置, O_2 为测距仪仪器中心在经纬仪竖轴上的投影点, P 为目标靶球的位置。 OO_2 为测距仪到经纬仪的仪器中心距 h , O_1O_2 为测距仪偏离经纬仪竖轴的轴心偏差 t ,这两者可以通过机械标定的方法精确确定。 O_1P 为测距仪测得至靶球目标的距离 s , $\angle O_2OP$ 为经纬仪测得的天顶距 θ , OP 为经纬仪至靶球目标的距离 l 。

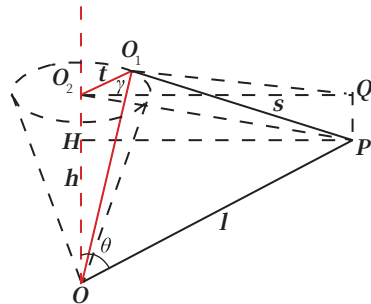


图 2 经纬仪与激光测距仪组合系统测距方法

过 P 作 $PH \perp OO_2$ 交 OO_2 于 H ; 再过 P 点作 PH 的垂线, 过 O_2 点作 PH 的平行线, 两条线交于 Q 点。 $\angle O_1O_2Q$ 为测距仪中心与经纬仪轴线构成的平面偏离经纬仪测量平面的夹角 γ 。从图 2 中可以看出 $PH = O_2Q = l \sin \theta$, $OH = l \cos \theta$, 则 $PQ = O_2H = h - l \cos \theta$ 。对于直角三角形 $\triangle O_1QP$, $O_1Q = \sqrt{s^2 - (h - l \cos \theta)^2}$ 。在 $\triangle O_1O_2Q$ 中 $O_1Q = \sqrt{(O_2Q)^2 + O_1O_2^2 - 2O_2Q \times O_1O_2 \times \cos \gamma}$, 上式代入 PQ , O_2Q , O_1O_2 的值, 得到

$$s^2 - (h - l \cos \theta)^2 = (l \sin \theta)^2 + t^2 - 2lt \sin \theta \cos \gamma \quad (1)$$

那么经纬仪中心至目标的距离 l 为

$$l = h \cos \theta + t \sin \theta \cos \gamma + \sqrt{(h \cos \theta + t \sin \theta \cos \gamma)^2 + s^2 - h^2 - t^2} \quad (2)$$

2 组合系统测距精度分析

通过机械标定的方法,可以精确得到仪器轴心距 h

μ -base 激光测距仪主机下部设计为球形结构,有

和测距仪偏离经纬仪竖轴的轴心偏差 t 。根据仪器实际外形尺寸并为了方便分析,本文取 $h = 300\text{ mm}$, $t = 0\text{ mm}$ 。另外 $\mu\text{-base}$ 激光测距仪最佳俯仰测量范围为 $\pm 25^\circ$,所以在后面分析中 θ 取值范围为 $60^\circ \sim 120^\circ$ 。

经纬仪测角误差为 $\pm 0.5''$,但在实际测量中要满足 $0.5''$ 的最大允许误差需要进行多测回观测。因此,增大测角误差,分析当角度测量值变化 $1''$ 时角度测量误差带来的测距误差。表 1 分析了当 s 一定, $\gamma \in (0, 2\pi)$, θ 在不同角度下变化 $1''$ 时, l 的变化量。从表 1 中可以看出,当 θ 变化 $1''$ 时,经纬仪到测点的距离值 l 变化量最大仅为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$,远小于测距仪测距误差。故增加测角误差后,经纬仪角度测量误差引起的测距误差仍然很小,组合系统依然能够同时测得高精度的角度值与距离值。

表 1 θ 变化 $1''$ 时 l 的变化量

s/m	θ	$\Delta l/\mu\text{m}$
2	$60^\circ \pm 1''$	1.4
	$75^\circ \pm 1''$	1.5
	$90^\circ \pm 1''$	1.5
	$105^\circ \pm 1''$	1.3
	$120^\circ \pm 1''$	1.2
20	$60^\circ \pm 1''$	1.3
	$75^\circ \pm 1''$	1.4
	$90^\circ \pm 1''$	1.5
	$105^\circ \pm 1''$	1.4
	$120^\circ \pm 1''$	1.3
40	$60^\circ \pm 1''$	1.3
	$75^\circ \pm 1''$	1.4
	$90^\circ \pm 1''$	1.5
	$105^\circ \pm 1''$	1.4
	$120^\circ \pm 1''$	1.3
60	$60^\circ \pm 1''$	1.3
	$75^\circ \pm 1''$	1.4
	$90^\circ \pm 1''$	1.5
	$105^\circ \pm 1''$	1.4
	$120^\circ \pm 1''$	1.3
80	$60^\circ \pm 1''$	1.3
	$75^\circ \pm 1''$	1.4
	$90^\circ \pm 1''$	1.5
	$105^\circ \pm 1''$	1.4
	$120^\circ \pm 1''$	1.3
100	$60^\circ \pm 1''$	1.3
	$75^\circ \pm 1''$	1.4
	$90^\circ \pm 1''$	1.5
	$105^\circ \pm 1''$	1.4
	$120^\circ \pm 1''$	1.3

在对仪器轴心距 h 和测距仪偏离经纬仪竖轴的轴心偏差 t 进行精确标定时,为了指导标定过程,对 h 和 t 的标定精度进行了分析。

首先,对 t 的标定精度进行分析。由式(2)看出,当 $\gamma = 0^\circ$ 时, t 的变化引起 l 的变化最大,因此,取 $\gamma = 0^\circ$,分析当 s 和 θ 一定, t 变化 0.01 mm 时, l 的变化量,如表 2 所示。可以看出 l 的变化量大致关于 $\theta = 90^\circ$ 对称,在 $\theta = 90^\circ$ 时, l 变化值最大。此外,表 2 还可以看出 l 的最大变化量与 t 的变化量相等,为减小组合系统距离测量误差, t 的标定精度应该尽可能高。测距仪测量误差为 $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$,故轴心偏差的标定误差应不大于 0.01 mm 。

表 2 t 变化 0.01 mm 时 l 的变化量

s/m	$\theta/(\text{ }^\circ)$	$\Delta l/\mu\text{m}$
2	60	9.3
	75	10.0
	90	10.0
	105	9.3
	120	8.0
20	60	8.7
	75	9.7
	90	10.0
	105	9.6
	120	8.6
40	60	8.7
	75	9.7
	90	10.0
	105	9.6
	120	8.6
60	60	8.7
	75	9.7
	90	10.0
	105	9.6
	120	8.6
80	60	8.7
	75	9.7
	90	10.0
	105	9.6
	120	8.6
100	60	8.7
	75	9.7
	90	10.0
	105	9.7
	120	8.6

然后,对 h 的标定精度进行分析。取 $h = 300\text{ mm}$, $t = 0\text{ mm}$,此时 l 的值与 γ 无关,表 3 分析了在相同测

量距离 s 和天顶距 θ 下, h 变化 0.01 mm 对 l 值的影响。表 3 中可以明显看出在不同的天顶距 θ 值下, l 的变化量为 10 μm , 在 $\theta=90^\circ$ 时 l 变化量最小。测距仪测量误差为 $\pm 10\ \mu\text{m}$, 故仪器中心距 h 的标定误差应不大于 0.01 mm。

表 3 h 变化 0.01 mm 时 l 的变化量		
s/m	$\theta/(\text{^\circ})$	$\Delta l/\mu\text{m}$
2	60	3.9
	75	1.2
	90	-1.5
	105	-4.0
	120	-6.1
20	60	4.9
	75	2.4
	90	-0.2
	105	-2.7
	120	-5.1
40	60	4.9
	75	2.5
	90	-0.1
	105	-2.6
	120	-5.1
60	60	5.0
	75	2.5
	90	-0.1
	105	-2.6
	120	-5.0
80	60	5.0
	75	2.6
	90	0
	105	-2.6
	120	-5.0
100	60	5.0
	75	2.6
	90	0
	105	-2.6
	120	-5.0

结合表 2 与表 3 的数据可以发现, 在大于 20 m 的测量范围下, h 和 t 变化导致 l 的变化量受测量距离 s 的影响很小, 但受 θ 的影响较大。表 4 列出了当 $s=50\text{ m}$, $\gamma=0^\circ$, 在不同的天顶距 θ 下, 当 h 与 t 均变化 0.01 mm 时, l 的变化量。

表 4 可以看出, 在轴心距 h 和偏心距 t 的标定误差为 $\pm 0.01\text{ mm}$ 时, 标定误差引入的测距误差最大值在 $\theta=60^\circ$ 时取得, 为 13.6 μm 。考虑测距仪的测距误差, 此时组合系统测距误差为 $\pm 16.9\ \mu\text{m}$ 。

表 4 h 与 t 均变化 0.01 mm 时 l 的变化量	
θ	$\Delta l/\mu\text{m}$
60°	13.6
75°	12.2
90°	9.9
105°	7.0
120°	3.6

3 组合系统测距标定方法

结合上述精度分析, 确定 h 和 t 的标定误差均为 $\pm 0.01\text{ mm}$ 。本文提出了一套具体的标定方法, 可使 h 和 t 的标定误差在 0.01 mm 以内。

轴心偏差 t 的标定方法为: 将经纬仪架设在三坐标机的大理石平台上并调平, 在经纬仪竖直旋转轴外壳上固定一个标准锥窝基准件。旋转经纬仪, 使经纬仪绕竖轴旋转, 每旋转一个角度, 三坐标机测头测量一次锥窝的位置, 从而测量出经纬仪竖轴的位置。再将与激光测距仪球形结构等直径的圆球安置于经纬仪顶部的球形安装座上, 也采用三坐标机测量出球心的位置, 根据球心位置与数轴位置的偏差调整球形安装座位置, 使圆球与经纬仪竖轴同轴, 此时, 球形安装座的调整完成。为了检验调整精度, 将测距仪放置于球形安装座上, 在墙上固定一个靶球目标, 经纬仪水平方向 360° 转动, 每转动一个位置, 测距仪对靶球目标进行一次距离测量, 采用三坐标机将测距仪调整到经纬仪竖轴上进行检验。标定所使用的三坐标机可以选用计量级三坐标机 Leitz, 其测量精度可以达到 1 μm , 故使用此方法在测距仪中心(标准球球心)处同轴度能达到 5 μm , 能够满足轴心偏差 t 的标定误差不大于 0.01 mm 的要求。

轴心偏差标定完成后进行仪器中心距 h 的标定。中心距标定方法与轴心偏差标定方法类似, 将经纬仪架设在三坐标机的大理石平台上调平, 在经纬仪水平旋转轴外壳上固定一个标准锥窝基准件, 旋转经纬仪, 使经纬仪瞄准部绕横轴旋转, 每旋转一个角度, 三坐标机测头测量锥窝的位置, 从而测量出经纬仪横轴的位置。然后采用三坐标机对球形安装座上的圆球进行测量, 得到球心的位置。最终计算出球心到横轴的距离, 此标定方法也能够满足仪器中心距 h 的标定误差不大于 0.01 mm 的要求。

综合上述对轴心偏差及中心距的标定方法, 最终可以得到测距仪与经纬仪组合系统的轴心偏差的误差为 $\pm 0.01\text{ mm}$, 仪器中心距误差为 $\pm 0.01\text{ mm}$ 。

4 组合系统点位测量精度分析

三维直角坐标系下被测目标的点位坐标为

$$\begin{cases} x = l \sin \theta \cos \varphi \\ y = l \sin \theta \sin \varphi \\ z = l \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

$$l = h \cos \theta + \sqrt{s^2 - h^2 \sin^2 \theta} \quad (4)$$

则被测目标的测量误差为

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = a^2 \sin^2 \theta \cos^2 \varphi \cdot \sigma_h^2 + \left(\frac{s}{N} \sin \theta \cos \varphi\right)^2 \cdot \sigma_s^2 + b^2 \cos^2 \varphi \frac{\sigma_\theta^2}{\rho^2} + \sin^2 \theta \sin^2 \varphi \frac{l^2}{\rho^2} \sigma_\varphi^2 \\ \sigma_y^2 = a^2 \sin^2 \theta \sin^2 \varphi \cdot \sigma_h^2 + \left(\frac{s}{N} \sin \theta \sin \varphi\right)^2 \cdot \sigma_s^2 + b^2 \sin^2 \varphi \frac{\sigma_\theta^2}{\rho^2} + \sin^2 \theta \cos^2 \varphi \frac{l^2}{\rho^2} \sigma_\varphi^2 \\ \sigma_z^2 = a^2 \cos^2 \theta \cdot \sigma_h^2 + \left(\frac{s}{N} \cos \theta\right)^2 \cdot \sigma_s^2 + b_2^2 \frac{\sigma_\theta^2}{\rho^2} \end{cases} \quad (5)$$

其中,

$$N = \sqrt{(h \cos \theta)^2 + s^2 - h^2} \quad (6)$$

$$a = \cos \theta + \frac{2h \cos^2 \theta - h}{N} \quad (7)$$

$$b = \left(\frac{-h^2 \sin \theta \cos \theta}{N} - h \sin \theta \right) \sin \theta + l \cos \theta \quad (8)$$

$$b_2 = \left(\frac{-h^2 \sin \theta \cos \theta}{N} - h \sin \theta \right) \cos \theta - l \sin \theta \quad (9)$$

故被测目标的点位误差为

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} = \sqrt{a^2 \delta_s^2 + \left(\frac{s}{N}\right)^2 \delta_h^2 + (b^2 + b_2^2) \frac{\delta_\theta^2}{\rho^2} + \sin^2 \theta \frac{l^2}{\rho^2} \delta_\varphi^2} \quad (10)$$

令 $\sigma_s = 0.01 \text{ mm}$, $\sigma_h = 0.01 \text{ mm}$, $\sigma_\theta = \sigma_\varphi = 1''$, 分别在 s 为 20, 40, 60 m 时, 对比组合系统与激光跟踪仪在不同天顶距下的测量点位误差, 如图 3 所示。图中可看出在不同测量距离下 $\theta = 90^\circ$ 时测点误差均达到最大。

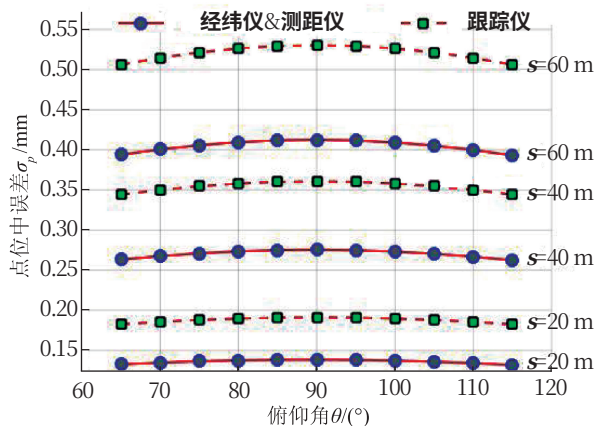


图3 系统测量点位中误差

在 $\theta = 90^\circ$ 时, 对不同的测量系统的测量距离与点位误差进行线性拟合, 拟合直线如图 4 所示。从图 4 可以看出激光跟踪仪测点中误差增长率高于组合系统, 根据拟合的直线方程, 可得到跟踪仪坐标测量误差为 $\pm 21.7 \mu\text{m} + 8.5 \mu\text{m/m}$, 经纬仪与激光测距仪的组合系统的坐标测量误差为 $\pm 1.9 \mu\text{m} + 6.8 \mu\text{m/m}$ 。由于本文并未完全考虑仪器组合过程中的误差源, 故实际测量中组合系统的测点精度会低于模拟值。但随着测量

上式中 l 由式(2)给出, 为简化分析, 令 $t = 0 \text{ mm}$, $\gamma = 0 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$, 式(2)可简化为

距离增加, 仪器组合所产生的误差可以忽略, 组合系统在长距离测量中的优势便能体现出来。

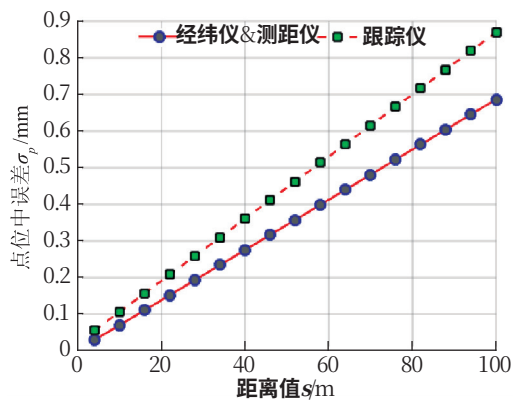


图4 测点误差随距离的拟合直线图

5 结论

本文从理论上分析了经纬仪和激光测距仪组合系统的测量误差, 并未对整个组合系统进行实际测量验证。在此只介绍验证方法: 将 AT403 激光跟踪仪当做经纬仪, 将测距仪加装在激光跟踪仪上, 激光测距仪和激光跟踪仪分别对目标测量获得距离, 将组合系统测得的距离与跟踪仪直接测量的距离进行对比, 验证本文所述标定方法的正确性以及组合系统的距离测量误差。利用经纬仪测角, 激光测距仪测距, 发挥仪器各自的优势, 使得组合系统能够测量得到被测点高精

度的角度值与距离值,理论上其测点误差接近甚至小于跟踪仪的。考虑到仪器组装误差,组合系统在短距离测量中误差会大于跟踪仪的,但是随着测量距离的增加,组装过程带来的误差可以忽略,再加上跟踪仪受环境影响较大,户外工作中有效测量距离缩短,故本系统在户外大尺寸测量中相较于激光跟踪仪有一定优势。此外该组合系统测量时需两次瞄准目标,相较于激光跟踪仪,其测量效率要低很多,适用于对测量精度要求非常高的户外大尺寸的工业测量领域。

参 考 文 献

- [1] Muralikrishnan Bala, Phillips Steve, Sawyer Daniel. Laser Trackers for Large - scale Dimensional Metrology: A Review [J]. Precision Engineering, 2016(44): 13 - 28.
- [2] 张春富,张军,唐文彦,等. 激光跟踪仪在大尺寸工件几何参数测量中的应用[J]. 工具技术, 2002, 36(5): 26 - 28.
- [3] 马骊群,王立鼎,靳书元,等. 工业大尺寸测量仪器的溯源现状及发展趋势[J]. 计测技术, 2006, 26(6): 1 - 5.
- [4] 马骊群,曹铁泽,王继虎,等. 便携式坐标测量系统在航空发动机关键部件检测中的应用[J]. 计测技术, 2008, 28(6): 9 - 12.
- [5] 王巍,黄宇,庄建平. 激光跟踪仪在飞机装配工装制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2004(12): 81 - 84.
- [6] 梁静,董岚,王铜,等. 激光跟踪仪在 CSNS 高频腔预准直中的应用[J]. 地理空间信息, 2017, 15(3): 12 - 13.
- [7] 范百兴,李广云,李佩臻,等. 利用激光干涉测距三维网的加权秩亏自由网平差[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(2): 222 - 226.
- [8] 范百兴. 激光跟踪仪高精度坐标测量技术研究[D]. 长沙: 解放军信息工程大学, 2013.
- [9] 董登峰,王博,李万红,等. 激光跟踪仪角度采集系统设计与误差修正研究[J]. 计测技术, 2014(5): 13 - 17.
- [10] 包欢,赵东明,王若璞,等. 高准确度基线检定仪器 μ - base 基线场测量试验[J]. 计量学报, 2014, 35(s1).
- [11] 肖华杰,邓向瑞,范百兴,等. 精密测距仪— μ - base 测距精度测试方法与分析[J]. 测绘科学与工程, 2016(2): 18 - 23.

收稿日期: 2018 - 01 - 31; 修回日期: 2018 - 04 - 10

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFA0402004); 国家自然科学基金资助项目(11605216, 11605215)

作 者 简 介

罗明成(1993 -), 男, 硕士研究生, 2015 年毕业于西华大学, 获理学学士学位; 现就读于中国科学院高能物理研究所, 主要研究方向为粒子加速器准直测量。



王铜(1987 -), 男, 工程师, 2008 年 7 月毕业于武汉大学, 获工学学士学位; 2010 年 7 月毕业于武汉大学大地测量学与测量工程系, 获工学硕士学位。主要研究方向为准直地面控制网及隧道控制网测量、加速器磁铁标定与安装等。



董岚(1962 -), 男, 研究员, 1984 年 7 月毕业于西安交通大学, 获理学学士学位, 现任中国散裂中子源加速器技术部准直组组长, 主要从事粒子加速器中准直设备的预制研究及加工测试工作。



梁静(1986 -), 女, 工程师, 2008 年 7 月毕业于武汉大学, 获工学学士学位; 2010 年 7 月毕业于武汉大学大地测量学与测量工程系, 获工学硕士学位。主要研究方向为准直地面控制网及隧道控制网测量、加速器磁铁标定与安装等。

