

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.01.03

基准转换标准器在多系统集成中的应用

乔磊, 孙安斌, 王继虎, 曹铁泽

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 使用经纬仪、激光跟踪仪进行协同测量时需要针对不同测量系统的测量基准进行基准转换, 传统基准转换手段较为繁琐耗时。针对此问题, 设计了一种新型便携式基准转换标准器, 该标准器由基准转换组件、转向组件和三脚架组成, 通过基准板上的测量靶点及立方镜构建坐标系, 实现基准转换。经验证: 该标准器在不同姿态下的平均位置偏差小于 0.01 mm, 利用基准转换标准器验证了经纬仪系统定位孔中心点的测量偏差均小于 0.06 mm, 立方镜法矢量的平均绝对偏差小于 0.0043°。结果表明, 该标准器操作方便快捷, 能够满足不同工况下经纬仪与激光跟踪仪协同测试的基准转换需求, 具有应用推广价值。

关键词: 激光跟踪仪; 经纬仪; 基准转换; 多系统协同

中图分类号: TB92

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)01-0017-05

Application of Datum Conversion Standard Board in Multi-system Integration Measurement

QIAO Lei, SUN Anbin, WANG Jihu, CAO Tieze

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: When using theodolite and laser tracker for collaborative measurement, it is necessary to convert the measurement datum of different measurement systems. The traditional method of datum conversion is cumbersome and time-consuming. To solve this problem, this paper proposes a new portable reference conversion standard board, which is composed of a reference conversion component, a steering component and a tripod. The reference conversion is realized through the coordinate system constructed by the measuring target on the reference plate and the cubic mirror. When the laser tracker is used to verify that the average position deviation of the standard board in different attitudes, the result is less than 0.01 mm. The reference conversion standard board is used to verify that the measurement deviation of the center point of the positioning hole of the theodolite system is less than 0.06 mm, and the average absolute deviation of the normal vector of the cube mirror is less than 0.0043°. It is shown that the operation of the standard board is convenient and fast, which can meet the requirements of datum conversion of theodolite and laser tracker collaborative testing under various working conditions, and has the value of application and promotion.

Key words: laser tracker; theodolite; datum conversion; multi system cooperation

0 引言

经纬仪和激光跟踪仪广泛应用于航空、航天、船舶等领域^[1-2], 尤其是在航天总装精测领域, 需要利用包括经纬仪、激光跟踪仪在内的多种测量设备进行协同测量^[3]。由于测量系统不同, 其测量基准也不同, 因此在实际测量过程中, 需要对不同测量系统下的测量基准进行基准转换对齐, 从而保证整体的测量精度。

目前常用的基准转换方法包括两种: 方法一、通过激光跟踪仪和经纬仪对现场布置的多个公共靶点进行测量, 获得公共靶标点在激光跟踪仪坐标系下的三维坐标以及在经纬仪坐标系下的方位角, 之后计算得出经纬仪与激光跟踪仪坐标系之间的相

对位置关系^[4-5]; 方法二、利用电子经纬仪、激光跟踪仪同时测量同一个多边形分布的靶座阵球心^[6], 得到坐标值后通过平移旋转实现基准转换。两种方法的操作流程都较为复杂, 难以实现快捷转换。

针对传统基准转换手段较为繁琐耗时的问题, 本文提出了一种新型便携式基准转换标准器。该标准器能够便捷地实现立方镜光学基准与跟踪仪靶标固定点位组成的机械坐标系的转换, 满足经纬仪与激光跟踪仪的基准转换需求。

1 多系统基准转换工作原理

1.1 激光跟踪仪测量原理

激光跟踪仪测量系统主要由激光干涉测距系统与

角度编码器测角系统两部分构成。根据激光干涉测量得到距离, 根据跟踪仪水平轴与垂直轴处两个角度编码器测得角度, 计算得出被测点位的空间坐标。激光跟踪仪坐标测量原理如图 1 所示^[7]。

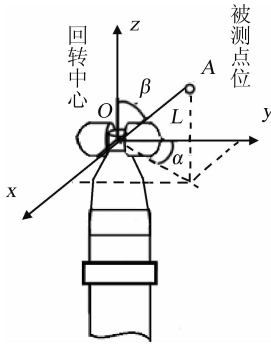


图 1 激光跟踪仪坐标测量原理图

以激光跟踪仪回转中心作为坐标原点 O , 激光干涉测距值为 S , 由编码器测得的水平角为 α , 垂直角为 β , 因此可以得到被测目标点 $A(x_A, y_A, z_A)$ ^[8-9] 的空间坐标为

$$\begin{aligned} x_A &= S \times \sin\beta \times \sin\alpha \\ y_A &= S \times \sin\beta \times \cos\alpha \\ z_A &= S \times \cos\beta \end{aligned} \quad (1)$$

1.2 经纬仪测量原理

经纬仪测量系统主要由两台或两台以上的经纬仪、计算机及距离标定尺组成。采用交会测量法对被测目标进行测量, 使两台经纬仪同时瞄准被测目标点, 以其中一台经纬仪的三轴中心为原点建立坐标系, 两台经纬仪三轴中心的连线为 x 轴, 右手法定位为 y 轴, 铅垂方向为 z 轴, 然后记录两台经纬仪此时显示的两个俯仰角 (γ_1, γ_2) 和两个水平角 (δ_1, δ_2), 以及两台经纬仪的高差 h_{12} 和水平距离值 b_{12} , 计算得出被测目标点的空间坐标。经纬仪测量原理图如图 2 所示^[10-13]。

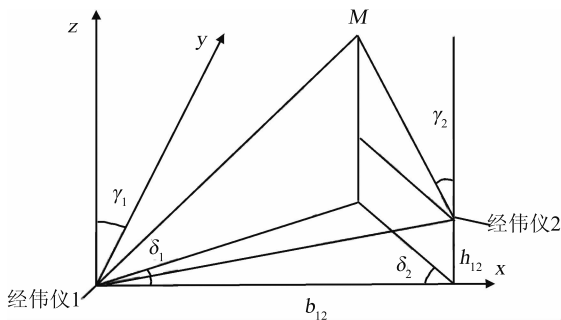


图 2 经纬仪测量原理图

被测目标点 $M(x_M, y_M, z_M)$ 空间坐标的计算公式为

$$\begin{aligned} x_M &= \frac{b_{12} \times \cos\delta_1 \times \sin\delta_2}{\sin(\delta_1 + \delta_2)} \\ y_M &= \frac{b_{12} \times \sin\delta_1 \times \sin\delta_2}{\sin(\delta_1 + \delta_2)} \\ z_M &= 0.5 \times \left[\frac{(\sin\delta_1 \times \cot\gamma_2 + \sin\delta_2 \times \cot\gamma_1)}{\sin(\delta_1 + \delta_2)} + h_{12} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

1.3 基准转换工作原理

当利用经纬仪和激光跟踪仪进行协同测量时, 采用已知空间位置关系的基准转换标准器实现不同测量系统的坐标系转换。采用三坐标测量机测得同一基准转换标准器基准平面上激光跟踪仪测量靶点、经纬仪测量目标立方镜的空间坐标及各平面的法矢量方向, 从而将测量靶点位置与立方镜法矢量方向定义在同一个坐标系下, 便于之后进行基准转换。

如图 3 所示, 采用激光跟踪仪和经纬仪分别对基准转换标准器上的跟踪目标靶点和立方镜进行测量, 分别得到激光跟踪仪坐标系 E 和经纬仪坐标系 F 下的测量结果。通过跟踪目标靶点和立方镜的位置关系, 即可确定基准转换标准器的坐标系 G 。

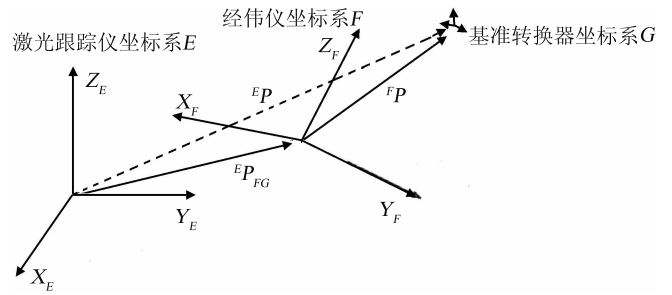


图 3 基准转换原理图

分别计算基准转换标准器坐标系 G 与激光跟踪仪坐标系 E 、经纬仪坐标系 F 的关系为

$$G P = E P \times E P + G P_{E0} \quad (3)$$

$$G P = F P \times F P + G P_{F0} \quad (4)$$

式中: $G P, E P, F P$ 分别为基准转换标准器坐标系, 激光跟踪仪坐标系, 经纬仪坐标系下同一位置的列向量; $G P, F P$ 分别为基准转换标准器坐标系在激光跟踪仪坐标系, 经纬仪坐标系下的姿态矩阵; $G P_{E0}, G P_{F0}$ 分别为基准转换标准器坐标系在激光跟踪仪坐标系, 经纬仪坐标系下原点的位置向量。计算可得

$${}^E P = \frac{{}^G P \times {}^F P + {}^G P_{F0} - {}^G P_{E0}}{{}^G P} = \frac{{}^G P}{{}^G P} \times {}^F P + \frac{{}^G P_{F0} - {}^G P_{E0}}{{}^G P} \quad (5)$$

根据式(5)即可得出激光跟踪仪坐标系、经纬仪坐标系之间的相对转换关系。将其中一个坐标系测得的任意点坐标按照上述关系进行相应的坐标系基准转换即可实现激光跟踪仪与经纬仪的联合测量功能^[9]。

2 多系统基准转换标准器结构设计

多系统集成基准转换标准器如图4所示,其主要由基准转换组件、转向组件和三脚架组成。基准转换组件用于安装机械基准与光学基准,其主要由基准立方镜、立方镜安装座、定位销座、碳纤维基板、背部销孔背盖组成,如图5所示。转向组件安装在通用三脚架上,用于支撑碳纤维基板组件,并实现标准器俯仰角度 $0^\circ \sim 90^\circ$ 可调。

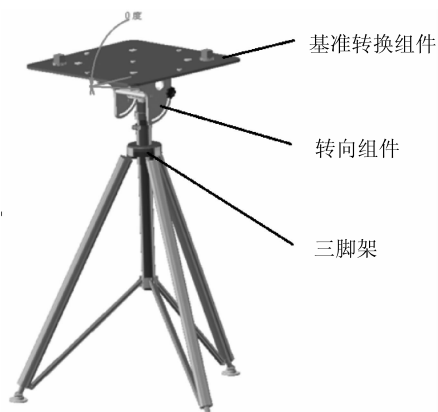


图4 基准转换标准器结构图

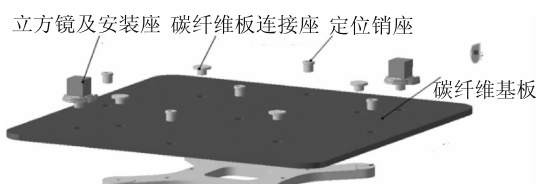


图5 基准转换组件结构分解图

碳纤维基板上给出了用于建立激光跟踪仪使用的机械坐标系的标准尺寸,板上有5个基准孔位,可与激光跟踪仪或经纬仪的反射目标的标准靶座适配。通过三坐标法测得反射目标在标准板坐标系下的中心坐标值,实现机械坐标系的建立。

碳纤维基板采用T300材料一体成型制造,其大小为 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。标准板的支撑点位置是经过仿真优化设计选定的,所选定的4个支撑点对碳

纤维基板平面度的影响小于 0.01 mm 。碳纤维孔位图如图6所示,其中, $P_0 \sim P_4$ 为五个定位销套,用于激光跟踪仪建立坐标系; C_1, C_2 为安装2个基准立方镜的定位销套,用于经纬仪建立光学坐标系。

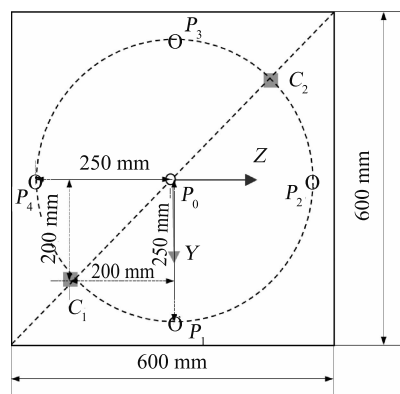


图6 碳纤维基板孔位分布图

3 多系统基准转换标准器结构分析及实验

3.1 支点位置选择

由于机械基准与光学基准的销套和立方镜座均安装在碳纤维基板上,碳纤维板的变形直接影响定位销套的共面度,因此需对支点位置进行分析及优化。

如图7所示,优化的目标是使定位销套的共面度误差最小,此碳纤维板是对称的,故只需要使 P_1 点和 P_0 点的相对变形量最小即可保证整个共面度误差最小。定义 P_0 点和 P_1 点的变形量分别为 U_{P0}, U_{P1} ,令共面度误差为 $U_{abj} = U_{P0} - U_{P1}$,优化的目标为使 U_{abj} 最小。

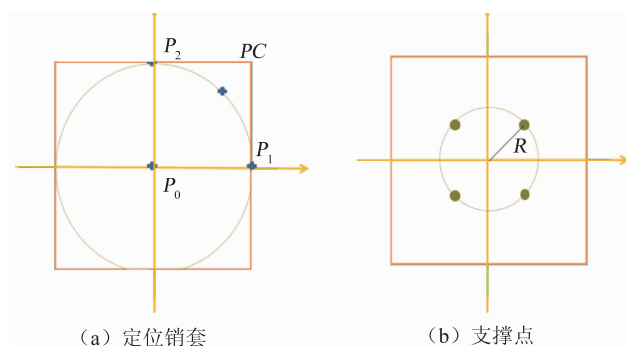


图7 定位销套及支撑点位置图

在铺层方式固定后,碳纤维基板的变形量只受支撑点支撑范围的影响,本设计采用四点支撑,以图6所示的支撑半径为变量进行受力变形分析。水平状态下,受力后定位销套位置的变形最大,故只对水平状

态进行分析, 结果如图 8 所示。

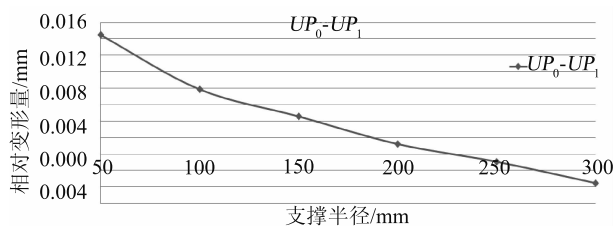


图 8 碳纤维板定位销套相对变形量与支撑点半径关系图

通过图 8 的分析结果可知, 碳纤维板定位销套的相对变形量 U_{ab} 随支撑点直径的增加而减少, 在支撑半径为 220 mm 左右时相对变形量达到最小, 之后开始反向增加。而基准立方镜安装在直径为 500 mm 的斜对角位置, 为防止位置干涉, 选取支撑直径为 420 mm 的四个对角点为作为支撑点与碳纤维基板支撑板连接。

3.2 基准转换标准器稳定性实验

为验证基准转换标准器的稳定性, 采用激光跟踪仪在距标准器 2 ~ 3 m 范围内, 对基准转换标准器水平、45°倾斜、垂直状态下的 5 个定位孔 ($P_0 \sim P_4$) 的空间坐标进行测量, 并与水平标定的数据进行比对以分析其稳定性, 测量结果如表 1 所示。

表 1 基准转换标准器三种状态下定位孔中心位置的一致性试验结果 mm

点号	单点位置偏差		
	水平状态	倾斜状态	垂直状态
ΔP_0	0.015	0.007	0.005
ΔP_1	0.006	0.002	0.007
ΔP_2	0.006	0.004	0.012
ΔP_3	0.006	0.002	0.007
ΔP_4	0.008	0.004	0.008

注: 单点位置偏差 $\Delta p = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$

从表 1 可以看出定位孔中心点在各种状态下的平均位置偏差为 0.007 mm, 小于激光跟踪仪在距标准器 2 ~ 3 m 范围内的坐标测量重复性 (0.01 mm), 证明标准器在各种状态下的变形量均满足使用要求。

3.3 经纬仪系统基准转换实验

用基准转换标准器对经纬仪的基准转换误差 (包括坐标转换误差和法矢量转换误差) 进行验证。分别利用经纬仪测量 5 个定位孔 ($P_0 \sim P_4$) 的空间坐标及两个立方镜各镜面的法矢量^[8], 定位孔及立方镜的位置如图

9 所示。其中, $P_0 \sim P_4$ 代表偏移量 $X = 12$ mm 的 0.5" 反射镜的中心坐标, C_1, C_2 代表立方镜。

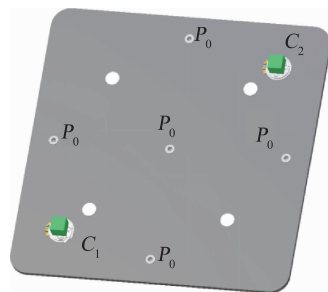


图 9 标准板定位孔位置示意图

基准器坐标系的定义如图 10 所示, 由 $P_0 \sim P_4$ 拟合成的圆心为原点, 定义拟合圆的法矢量方向为 X 轴, 以过原点且平行于 P_3 与 P_1 连线方向 (指向 P_1) 为 Y 方向。

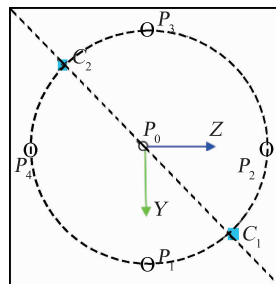


图 10 基准转换标准器坐标系的定义

使用带有自准直功能的高精度电子经纬仪^[7]进行基准转换实验, 经纬仪的布局如图 11 所示。

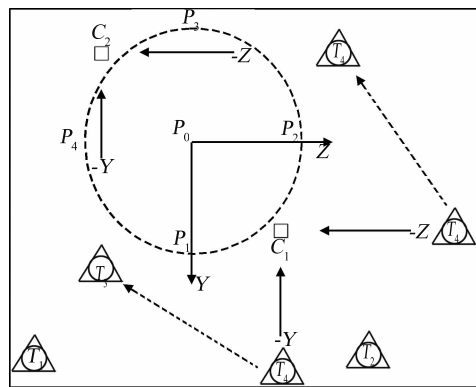


图 11 经纬仪测量标准器布局示意图

图 11 中 $T_1 \sim T_4$ 代表经纬仪的安置位置。由 T_1, T_2 两台经纬仪组成坐标测量系统, 使用偏移量 $X =$

12 mm 的目标座及 0.5" 的半球目标对各个定位孔进行测量, 测量结果与三坐标标定值的偏差如表 2 所示。

表 2 基准转换标准器水平放置定位孔中心 mm

点号	与标定值的偏差			
	ΔX	ΔY	ΔZ	Δ
P_0	0.024	0.048	-0.006	0.054
P_1	0.005	-0.005	-0.004	0.008
P_2	-0.005	0.020	-0.022	0.030
P_3	0.005	0.005	-0.004	0.008
P_4	-0.005	-0.052	0.022	0.057

注: 偏差距离值 $\Delta = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$

利用 T_3 , T_4 两台经纬仪经准直及互瞄测量立方镜面的法矢量, 测量结果与三坐标测量机测得的法矢量进行比对, 结果如表 3 所示。

表 3 立方镜法矢量测量的一致性

立方镜	法矢量	与坐标轴的夹角/(°)		
		X 轴	Y 轴	Z 轴
C_1	$C_1 - X$ 轴	0.0032	-0.0006	-0.0061
	$C_1 - Y$ 轴	0.0009	0.0000	-0.0030
	$C_1 - Z$ 轴	0.0077	0.0033	0.0083
C_2	$C_2 - X$ 轴	0.0064	-0.0037	-0.0057
	$C_2 - Y$ 轴	0.0025	0.0010	-0.0022
	$C_2 - Z$ 轴	0.0074	0.0019	0.0076

通过测量结果可知, 使用经纬仪对标准器进行测量时, 定位孔中心点的测量偏差均小于 0.06 mm; 测量立方镜的三个坐标轴, 立方镜 C_1 的平均绝对偏差为 0.0034°, 立方镜 C_2 的平均绝对偏差为 0.0043°。以上测量结果小于经纬仪在距标准器 2 ~ 3 m 范围内的测量误差, 证明标准器满足使用要求。

4 总结

研制了一种应用于多系统协同测试环境下的便携式基准转换标准器, 解决了经纬仪、激光跟踪仪协同测量时传统基准转换手段较为繁琐耗时的问题。该装置将原有方法布置在多个位置的不同测量目标集成在同一基准转换标准器上, 相较原有测量转换方法具有

操作简单、移动便捷、工作效率高等优点。该装置在航天精测、航空检测、船舶测量等领域具有较高推广价值。未来需进一步研究其他测量设备之间的基准转换方法及装置, 以满足多系统测量情况下的多样化基准转换需求。

参 考 文 献

- [1] 于成浩, 柯明, 赵振堂. 提高激光跟踪仪测量精度的措施[J]. 测绘科学, 2007, 32(2): 54-56.
- [2] 韩先平. 舰载经纬仪船摇误差修正方法研究[J]. 光电技术应用, 2015, 30(1): 63-67.
- [3] 颜丙聪. 基于激光跟踪仪的某型号产品总装精测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [4] 隆昌宇. 机器人末端经纬仪坐标系快速标定方法: 201810203891.9[P]. 2018-08-17.
- [5] 任春珍. 激光跟踪仪测量基准立方镜中心点位置的精测方法: 201210022524.1[P]. 2012-07-18.
- [6] 张晓琳. 多仪器坐标统一化装置的校准方法: 201210022524.1[P]. 2012-07-18.
- [7] 尹寿宝. 总装精测提高激光跟踪仪转站精度的方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [8] 杨文彬. 激光跟踪仪与电子经纬仪在大尺寸工件测量中的比较[J]. 锅炉制造, 2008(6): 59-60.
- [9] 梁静, 王铜, 董岚. 基于长度标准装置提高激光跟踪仪测量精度的方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(3): 325-330.
- [10] 王晋疆, 金素坤, 邸旭, 等. 经纬仪测量系统在工业测量中的应用[J]. 光电工程, 2003, 30(1): 53-55.
- [11] 周闻青, 周维虎. 经纬仪横轴与竖轴垂直度误差分析与检定[J]. 计测技术, 2002(6): 55-56.
- [12] 张三福. 基于激光跟踪仪的精密控制网建立及其精度分析研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [13] 罗明成, 王铜, 董岚, 等. 经纬仪与激光测距仪组合系统的误差分析及标定方法[J]. 计测技术, 2018, 38(4): 20-25.

收稿日期: 2020-01-21

作者简介



乔磊(1989-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为大尺寸几何量方向相关机械设计。2011年毕业于北方工业大学机械设计制造及自动化专业, 获工学学士学位; 2014年毕业于北京科技大学机械工程专业, 获工学硕士学位。