

LTD500 激光跟踪测量系统原理及应用

李广云

(解放军信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

摘要:激光跟踪测量系统是瑞士徕卡公司生产的高精度工业测量仪器,它具有测量精度高、实时快速、动态测量、便于移动等优点。在航空航天、汽车制造、电子工业、高能粒子加速器工程以及大尺寸计量等行业中,均有广泛应用。随着我国上述行业测试计量技术的迅速发展,这类仪器已开始大量引进,如在沈飞、西飞、上飞及一些研究所已应用于生产实践。本文主要介绍激光跟踪仪的原理、校准方法及应用情况。

关键词:工业测量系统;激光跟踪仪;误差校准;应用

中图分类号:P225.2

文献标识码:B

文章编号:1006-7949(2001)04-0003-06

The Principle and Application of the LTD500 Laser Tracker System

LI Guang-yun

(Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Laser tracker is an apparatus for industry measurement. It has the advantages of high precision, real-time, dynamic and easy to be moved etc. It has been widely used in aviation, space, aeroplane, automobile and electronical industry and testing departments. With the fast development of testing technology in China, laser tracker has been used in some factories. But according to the knowledge of surveying, laser tracker is a new instrument, so it's necessary to study on its principle. In this paper, we discuss the principle, calibration method and application of laser tracker system.

Key words: Industrial measuring systems; Laser tracker; Error testing; Application

激光跟踪测量系统(Laser Tracker System)是工业测量系统中最新的一种产品,其典型的系统为Leica公司于1990年推出的第一代产品SMART310及其最新产品LTD500。SMART310硬件采用美国专利生产的激光跟踪仪,软件是在DOS下开发完成的,1993年又推出了SMART310的二代产品。激光跟踪仪的新产品是Leica公司于1996年推出的LT500/LTD500,其中LTD500采用了Leica专利的高精度绝对测距仪,测量速度更快、更为方便。而激光跟踪仪的软件采用Leica统一工业测量系统平台Axyz。Axyz是在Win95/8下开发的一个综合性工业测量系统,它包括经纬仪测量模块、全站仪测量模块、激光跟踪仪测量模块(LTM)和数字摄影测量模块。Axyz/LTM是其中的激光跟踪仪测量部分,软件界面较SMART310

友好,功能更多,操作更为方便。2000年Leica又推出了经济型的激光跟踪仪LT300。由于激光跟踪测量系统的快速、动态、高精度的特点,因此已被广泛应用于航天、航空、汽车、造船、机械制造、核工业等精密工业测量领域。最近几年应用领域更为扩大,国外其他公司也相继推出了激光跟踪仪的产品,如美国SMX和API公司。

激光跟踪仪(见图1~图3)在我国的应用始于1996年,沈飞集团在国内第一次引进了SMART310激光跟踪测量系统,对测量专业来讲,激光跟踪测量系统还是一个新鲜事物,因此有必要对它的基本原理和测量方法作一些研究。本文仅对LTD500激光跟踪测量系统的原理、仪器校准方法、测量精度及应用等作一些分析和讨论。

收稿日期:2001-10-10

作者简介:李广云(1965-),男,解放军信息工程大学测绘学院教授、博士生导师。……,详见本期《测绘人物谱》专栏。

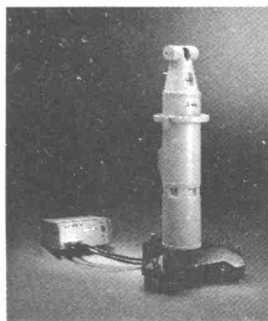


图1 LTD500 跟踪仪



图2 LT300 跟踪仪

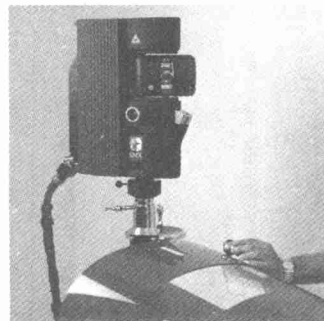


图3 SMX4500 激光跟踪仪

1 LTD500 激光跟踪测量系统的原理及测量精度

1.1 系统组成及原理

不同厂家生产的激光跟踪测量系统基本上都是由激光跟踪头、控制器、用户计算机、反射器及测量附件等组成。以 LTD500 跟踪仪为例,图 4 为激光跟踪头,图 5 为跟踪仪控制器,图 6 为测量目标的反射器附件。

激光跟踪仪实际上是一台激光干涉测距和自动跟踪的全站仪,它的结构原理如图 7 所示。一般激光跟踪仪由以下五个部分组成:

1) 角度测量部分 包括水平度盘、垂直度盘、步进马达及读数系统,类似于电子经纬仪的角度测量装置,但动态性能好。

2) 距离测量部分 包括单频激光干涉法距离测量装置(IFM)、鸟巢(Birdbath)、绝对距离测量装置(ADM)和反射器等。干涉测距是利用光学干涉法原理,通过测量干涉条纹的变化来测量距离的变化量,所以激光跟踪仪的 IFM 只能测量相对距离。如需要测量跟踪头中心到空间点的绝对距离,必须给出一个基准距离。传感器单元上有一个固定点叫做鸟巢(Home Point 或 Birdbath),跟踪头中心到鸟巢的距离(基准距离)是已知的,当反射器从鸟巢内开始移动,IFM 测量出反射器移动的相对距离,再

加上基准距离就得到绝对距离。如果激光束被打断,则必须重新回到基点以重新初始化 IFM(叫 go home),这会给实际工作带来诸多不便。因此,LT500 上增加了一个新的功能叫做绝对距离测量(ADM),ADM 可自动地重新初始化 IFM,但它只能用于静态点的测量,即不能用于跟踪测量。绝对距离测量 ADM 是根据斐索(Fizeau)原理(用齿轮挡光测量光速),通过测定反射光的光强最小来判断光所经过路径的时间,从而计算出绝对距离(和 ME500 激光测距仪的原理相同)。

3) 跟踪控制部分 主要由位置检测器(PSD)来完成。反射器反射回的光经过分光镜时,有一部分光进入位置检测器,当反射器移动时,这一部分光将会在位置检测器上产生一个偏移值,根据偏移值,位置检测器就会控制马达转动直到偏移值为零,从而达到跟踪的目的。因此当反射器在空间运动时,激光跟踪头能一直跟踪反射器。

4) 激光跟踪仪控制器部分 包括控制器、电源、电缆等,该部分用于向激光跟踪仪供电和进行数据交换。激光跟踪仪在进行测量时将与计算机之间进行大量的数据交换,而且要求很高的数据传输速度,因此计算机与激光跟踪仪间需通过控制器采用局域网(LAN)形式传输数据。实际上控制器是一台工控机。

5) 支撑部分 包括外壳、连接圆筒和三角底



图4 激光跟踪头

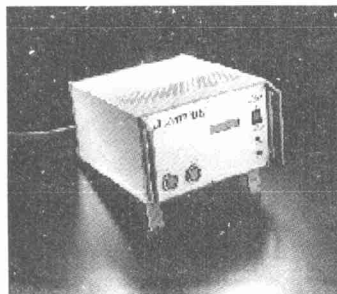


图5 激光跟踪仪控制器

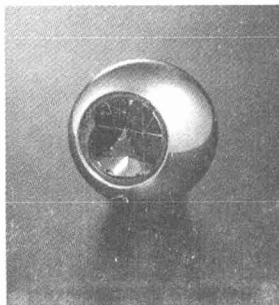


图6 CCR 球型反射器

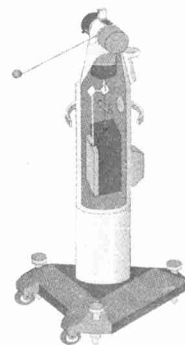


图7 激光跟踪仪原理结构图



图8 数字温度气压计



图9 掌上机遥控器



图10 带 CCD 的跟踪头

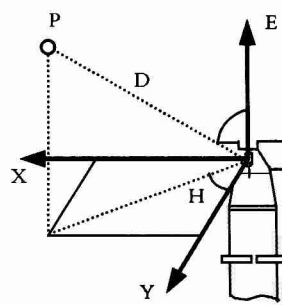


图11 激光跟踪仪坐标测量原理

座等,用于固定跟踪仪和调整其高度。三角底座带有轮子,可方便在室内移动激光跟踪仪。

激光跟踪仪的反射器一般有猫眼反射器、角隅反射器(CCR)和工具球反射器(TBR)等几种类型。与测距仪不同的是,反射器采用球型结构,因此测量点到测量面的距离是固定的。此外,反射器的精度非常高,每个反射器在出厂前都要进行严格的检验,容许误差一般为 $\pm 0.010 \sim 0.025 \text{ mm}$ 。

为了提高激光跟踪仪的测量效率和全自动化程度,激光跟踪仪还有一些专用的附件等可供选择,如数字温度、气压传感器用来自动进行气象元素测定和修正;遥控器用于在镜站的操作和控制,通过无线 MODEM 实现在镜站的坐标显示,非常方便放样等工作;带 CCD 相机的取景器,可以通过监视器寻找测量目标;选倾斜传感器 Nivel20 可以将仪器整平到铅垂线方向等,如图 8~图 10 所示。

LTD500 激光跟踪仪坐标测量原理可用图 11 简单表示:对于放置在空间的反射器,跟踪仪可同时测量出水平角 H_z 、垂直角 V_t 和斜距 D ,用这三个观测值,按极坐标测量原理就可得到空间点的三维坐标 X 、 Y 、 Z 来。

1.2 激光跟踪系统的软件功能

激光跟踪测量系统的软件和硬件一样非常重要,是系统的重要组成部分。软件主要有仪器控制、坐标测量、系统校准、分析计算等功能。测量方式不仅可以测量静态,而且还可以对动态目标进行连续跟踪测量,对目标进行连续采样、格网采样和进行表面测量等。由于跟踪仪测量数据非常多,测量结果可以用坐标方式或图形方式显示,计算功能具有和 CAD 设计数据比较分析的功能。

1) 静态目标测量 静态目标测量可分为单点平均测量、球面拟合测量和隐藏点测量等。单点平均测量将设定的测量次数的测量结果取平均值作为最后的结果;球面拟合测量在球面测一系列点,

用球面拟合的方法求球心的坐标;隐藏点测量是通过隐藏杆测量来计算得到隐藏点坐标。可以设定单次测量的时间间隔,对球面拟合测量也可设定取样间隔和球面半径是否已知。

2) 动态目标测量 跟踪动态目标测量是激光跟踪测量系统较其它工业测量系统所特有的。它可以按时间或距离来连续采样;可以进行空间三维格网的采样;可以在指定下的球体或三维空间内测量;还可以对某一物体表面进行表面测量的数字化,取样的时间和距离间隔均可自由设定。

3) 测量结果显示 可以在测量过程中或从测量结果的数据库中显示测量结果,达到可视化的效果。可以选择坐标显示模式即只显示测量坐标,或选择图形显示模式,将测量点以图形方式显示在屏幕上,并可对显示的图形进行旋转、平移以及选择不同的视点。

4) 分析计算功能 激光跟踪测量系统的分析计算功能为 $Axyz$ 的 CDM, 可以用轴对准和最小二乘转换来生成新的坐标系,并进行缩放、旋转、平移等运算;可以进行各种几何参数测量,拟合各种规则形状,如直线、平面、球面、抛物面等;还可计算点线距离、点面距离,或与设计 CAD 数据进行比较等;可以从外部文件输入数据,或将测量结果以 ASCII 文件或 DXF 文件输出。另外还具有搬站功能,只要新设站与原设站间有三个以上的公共点,系统即可迅速完成搬站后的坐标系转换工作。

1.3 系统测量精度

激光跟踪仪的测量精度主要取决于它的角度和距离测量精度及测量环境的影响。根据 LTD500 激光跟踪仪的技术参数,它的角度测量分辨率为 $0.14''$,静态角度测量误差(比照经纬仪测角精度检验方法得到的结果)为 $\pm 1''$ 左右,但动态测量的精度可能会稍低一些。干涉法距离测量的分辨率为 $1.26 \mu\text{m}$ (2 倍波长),其精度主要受到温度和气压测量精度和变化及大气条件均匀性的影响。如果大

气条件均匀性好,那么温度测量精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,对干涉法测距的精度影响为 $\pm 1\text{ppm}$;气压测量精度为 $\pm 1\text{mbar}$,对测距的精度影响为 $\pm 1\text{ppm}$;湿度变化对测距精度的影响相对要小一些。同时,干涉法距离测量的精度还受到基准距离校准精度的影响,因为基准距离校准误差将会成为干涉测距的系统误差。绝对对测距仪(ADM)的精度比一般测距仪的精度要高,测量的绝对精度能达到 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

在测量范围内,激光跟踪测量系统综合精度(坐标测量精度)为:重复坐标测量精度达到 $\pm 5\text{ppm}$ (即 $5\mu\text{m}/\text{m}$);绝对坐标测量精度达到 $\pm 10\text{ppm}$ (即 $10\mu\text{m}/\text{m}$)。当然系统精度还取决于工作场地和环境的稳定性,一般要求在室内较稳定的工作条件下进行。

2 激光跟踪仪的校准方法

2.1 系统误差校准的基本概念

激光跟踪仪实际上和全站仪是类似的测量仪器,跟踪头的激光束、旋转镜、旋转轴和经纬仪一样,构成激光跟踪仪的三个轴,三轴中心是测量坐标系的原点,这三轴的结构关系是非常复杂的。在理想状态下,它们应保持相互正交的要求,但实际上由于机械加工、安装调整误差和电子零点误差等影响,轴系间不可能完全满足理想的设计要求,因而存在着系统误差。

根据其物理意义,可将激光跟踪仪角度测量所有的系统误差分为15类,共有15个校准参数。它们分别是:水平轴倾斜误差*i*、旋转镜倾斜误差*c*、激光束倾斜误差*lx*和*ly*、水平轴偏移误差*e*、旋转镜偏移误差*f*、激光束偏移误差*Ox*和*Oy*、平行玻璃板偏移误差*O2x*和*O2y*、垂直度盘指标差*j*、水平度盘偏心差*Ex*和*Ey*、垂直度盘偏心差*Kx*和*Ky*;测距系统误差有基距误差*C*(测距零点误差),共计16项误差。这16个误差参数均有准确的数学模型对其进行改正。类似于经纬仪/全站仪的检验,这16个系统误差参数可通过双面测量、球形杆测量和基距测量程序计算得到。

由于激光跟踪仪的系统误差检验项目多,因此在系统软件中设计了专门的仪器校准程序。用户按照该校准程序可在测量现场对仪器进行系统误差测定,检测后的各种误差参数均存在于用户计算机中,测量时这些参数将自动传到跟踪仪控制器中,控制器对各观测值(水平角、垂直角和斜距)进行修正,从而消除或减弱系统误差的影响。实际上激光

跟踪仪在出厂前,厂家是给出一组校准后的参数供用户使用,但这些参数并不是不变的,和经纬仪/全站仪一样,当经过长途运输、重新安装、环境变化较大或间隔较长时间才使用时,用户应自行进行检测。

激光跟踪仪的校准方法有些和全站仪相同,如双面测量确定垂直度盘指标差、视准轴误差;高低点确定水平轴倾斜误差等。但也有一些特殊的方法,如采用球形杆装置(图12)来校准仪器的其他参数等。球形杆装置为一马达控制的旋转杆装置,在马达的带动下,球形杆的端点在空间划出一个标准的圆,端点上安置有激光跟踪仪反射器,理想情况下,跟踪仪对反射器轨迹的测量结果也应该是一个圆,据此可进行误差修正和检查。基准距离校准方法和测距仪基本相同,如图13所示。下面我们主要讨论基距检测方法。



图12 球形杆校准装置

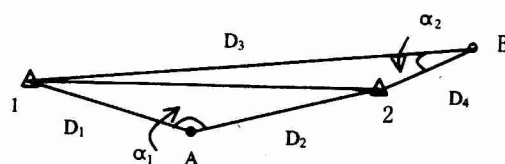


图13 基准距离校准方法及观测值

2.2 基准距离校准方法

基准距离是激光跟踪仪的一个重要参数(一般设为*C*)，它是干涉测距的基准距离,通常校准的是基距的变化值,因此校准精度会直接影响到IFM甚至ADM的测距精度。通常,在仪器进行搬运或原地工作一段时间后,均需要对此参数进行校准,校准方法如下:

如图13所示,在较好的工作环境中选取两个稳定点1、2,两点相距3~4m,其高度基本与跟踪头同高,在两个位置A、B设站,分别观测1、2两点,根据所得观测值可以解算出基准距离*C*的值。

对于不同类型的反射器,*C*的值是不一样的,

因此,对不同的反射器需要分别进行校准。实际上,C的值是跟踪头中心到鸟巢距离的变化部分与反射器常数之和,它是一个较小的值。

通过观测,可以得到仪器在位置A、B分别对1、2两点的空间距离、水平方向、垂直方向等12个观测值,利用8个水平和垂直方向观测值可以计算出图13中的空间角度 α_1 、 α_2 。

由于同一反射器,测量每一段距离都存在常数C,因此,在三角形A12、B12中,根据余弦定理有

$$\left. \begin{aligned} D^2 &= (D_1 + C)^2 + (D_2 + C)^2 - 2(D_1 + C)(D_2 + C)\cos\alpha_1 \\ D^2 &= (D_3 + C)^2 + (D_4 + C)^2 - 2(D_3 + C)(D_4 + C)\cos\alpha_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

合并方程组(1)的两式,并展开整理得

$$\alpha_1 c^2 + \alpha_2 c + \alpha_3 = 0 \quad (2)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= 2(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) \\ \alpha_2 &= 2[(D_1 + D_2)(\cos\alpha_1 - 1) - (D_3 + D_4)(\cos\alpha_2 - 1)] \\ \alpha_3 &= -D_1^2 - D_2^2 + D_3^2 + D_4^2 + 2(D_1 D_2 \cos\alpha_1 - D_3 D_4 \cos\alpha_2) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

对式(2)求解,就可以得到常数C的值。

可见基准距离的校准精度与测量的图形结构有关,尤其是当角度测量误差较大时,该误差对校准精度的影响与图形结构有密切的关系。为使校准精度高,仪器的设置和校准要求为:

- 1) 设置仪器应尽量使仪器与两稳定点1、2在同一直线上。
- 2) 仪器与测量点要尽可能同高,要满足 α_1 接近 180° , α_2 接近 0° 这一条件。

3) 由于反射器本身具有形状误差和光学偏心差,仪器从A站移动至B站时需要转动反射器;为减小反射器形状误差和光学偏心差对校准精度的影响,要求反射器在转动前后相对于激光跟踪仪的方向一致,例如,使反射器上的某一标志始终向上。

3 激光跟踪仪的应用

2001年9月,用LTD500激光跟踪仪对上海大众POLO汽车生产厂的Perceptron在线检测设备进行了校准测量,得到了非常满意的结果。现将本次测量工作情况作一介绍。

3.1 Perceptron 在线检测设备

为了检测汽车在制造过程的制造误差,Perceptron公司开发了一套基于CCD相机摄影测量原理的在线检测设备。由于CCD数码相机的测量

范围较小和车身形状的复杂性,因此通过二台相机是不可能完成整个车身的实时检测的。实际上Perceptron在线检测设备共有29个CCD传感器安装在设备的不同部位,测量边、角、孔等位置和特征,通过统一的图像处理来得到整个车身的外形,并和设计CAD模型进行比较,从而反馈给制造过程,以提高制造质量,节省浪费。系统如图14所示。

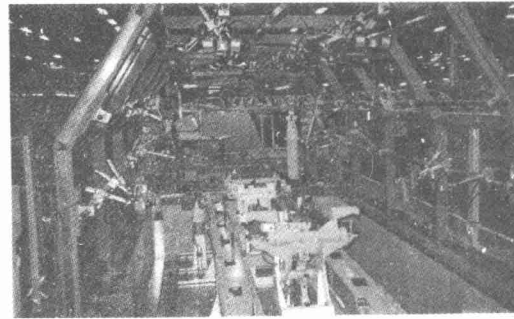


图14 Perceptron 车身在线检测设备

为了统一这29个CCD传感器在设计CAD坐标系下的坐标,设备在安装过程中需要对每个CCD传感器进行校准和定向,确定其工作坐标系与设计坐标系的转换参数,这项工作称为传感器校准。方法采用摄影测量的外定向法,具体做法是:用特制的测量标志放在CCD传感器的最佳测量位置,通过图象处理得到CCD传感器工作坐标系下的坐标,同时用工业测量系统确定标志点在设计坐标系下的坐标,输入到系统进行定向解算,一般在上、下、左、右放置4个点即可,CCD传感器及定向测量标志点如图15所示。

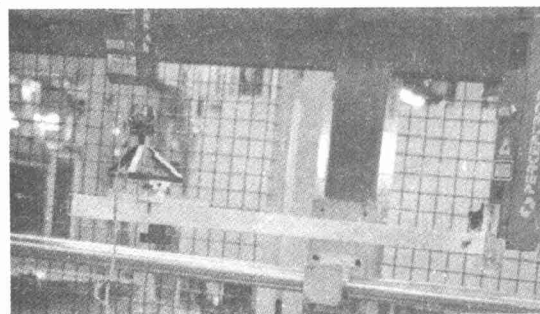


图15 CCD传感器的校准

由于有29个传感器,每个传感器的校准需要有4个高精度控制点,而且传感器的通视条件比较差,一般工业测量系统需要多次设站才能完成上述工作。显然,经纬仪测量系统不如激光跟踪测量系统方便,因此Perceptron在线检测设备的校准一般采用激光跟踪测量系统,并开发了专门的校准软件

TETRASTAR™ 和辅助测量设备。

3.2 激光跟踪测量系统坐标系的建立

CCD 传感器的校准需要提供在车身 CAD 设计坐标系下的坐标,因此激光跟踪测量系统建立后需要将测量坐标系转换到设计坐标系下。我们采用公共点坐标转换的方法。Perceptron 在线检测设备的底部导轨上有 15 个已知坐标的定位孔(左右导轨各 7 个),设备在出厂前用三坐标机精确测定了定位孔的坐标。但通过长途运输和安装,可能导致有局部变形,致使个别点的坐标会有变化。因此在测量前需要用跟踪仪检测已知控制点坐标的精度,找出坐标转换精度最高的几个点作为公共点。

通过测量和坐标转换计算,我们选择了 8 个点 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_6 、 P_7 、 P_8 、 P_9 来实现与设计坐标系转换,坐标转换精度为 0.17 mm,达到设计要求。当激光跟踪仪根据测量需要在不同位置重新设站后,均要测量这 8 个点以进行设计坐标转换。本次测量共设了三站,坐标转换精度均在 0.17mm 以内。

3.3 CCD 传感器的校准测量

激光跟踪仪测量坐标系建立后,即可测量 CCD 传感器定向点的坐标,通过串口连接电缆可将坐标数据传到 Perceptron 在线检测设备,或用手工作法输入。图 15 中,球型反射器中心的坐标(设计坐标系下)可由 LTD500 得到,CCD 相机可以得到反射器支座的坐标,通过计算可以得到反射器中心的坐标(CCD 传感器测量坐标系下)。因此,通过坐标转换可以得到其转换参数。一般要测量 4 个最佳点,求出转换参数,并评定转换精度。要求精度在 0.10mm 以内,否则需要分析原因,并重测。表 1 的

数据为第 23 个传感器的校准结果。

通过坐标转换得到该传感器的转换参数,并且坐标转换精度在 0.10mm 以内,达到设计要求,说

表 1 激光跟踪仪和 CCD 传感器标志点测量结果

点号	跟踪仪测量结果			CCD 测量结果		
	X	Y	Z	X	Y	Z
C89	-379.354	628.763	573.720	23.965	-14.994	-32.090
C90	-415.793	628.654	574.210	24.419	21.598	-31.521
C91	-417.183	602.597	502.333	23.813	20.993	45.095
C92	-376.079	603.541	503.978	23.293	-20.101	42.157

明该传感器已校准完毕。采用激光跟踪测量系统与常规经纬仪测量系统还有一个不同的是,它的测量结果与操作人员无关(它不需人眼瞄准),可自动跟踪反射装置,因此测量数据可以实现与 CCD 传感器的同步采集,在现场测量条件下可以大大提高公共点的坐标精度。

在上海大众 POLO 汽车生产厂,我们用二个工作日时间和 Perceptron 公司的技术人员一道完成了所有 29 个传感器的校准测量,测量结果精度高,完全满足设计要求。采用激光跟踪仪技术为这项校准工作节省了大量的时间,也减轻了测量工作的劳动强度,因此有很好的推广应用前景。

参考文献

- [1] 张正禄,吴栋材,杨仁.精密工程测量[M].北京:测绘出版社,1992.
- [2] 李广云.工业测量系统进展[M].北京:解放军出版社,2000.
- [3] 李广云.工业测量系统[M].北京:解放军出版社,1994.
- [4] 李广云.工业测量系统最新进展及应用[J].测绘工程,2001,(2).