



·粒子束及加速器技术·

## 静力水准系统用于基准高差测量的研究<sup>\*</sup>

李 笑<sup>1</sup>, 何晓业<sup>1</sup>, 王 巍<sup>1</sup>, 程竹兵<sup>1</sup>, 高 廷<sup>1,2</sup>, 罗 涛<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230026; 2. 中国航空工业集团公司  
北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘 要:** 为了拓展静力水准系统(HLS)在粒子加速器准直测量工作中的应用,开展了针对 HLS 系统用于多点间基于水平面的基准高差测量的实现方法的研究。基于传感器工作原理,设计并搭建了一套由双频激光干涉仪、高精度位移平台、HLS 传感器等组成的比对系统,利用该系统控制多传感器在同一坐标系下观测同一液位。通过比对获得多传感器间基于底部坐标系的零位高度差,实现了多个传感器坐标系间相对于水平面的高差值测量,并验证了高差测量精度优于 5  $\mu\text{m}$ 。除此之外,通过在 HLS 传感器上方安装靶座,使用三坐标测量机(CMM)严格标定各传感器电极板至靶球球心的距离,实现了多靶球球心位置基于水平面的高差值测量,并验证了其测量精度优于 30  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 精密测量;精密仪器;静力水准系统;加速器准直;高差测量

中图分类号: TL505

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220195

## Research on measurement method of altitude difference using hydrostatic leveling system

Li Xiao<sup>1</sup>, He Xiaoye<sup>1</sup>, Wang Wei<sup>1</sup>, Cheng Zhubing<sup>1</sup>, Gao Ting<sup>1,2</sup>, Luo Tao<sup>1</sup>

(1. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;  
2. Changcheng Institute of Metrology & Measurement of AVIC, Beijing 100095, China)

**Abstract:** As the precise sensor system for monitoring the relative difference in height among multiple points, the hydrostatic leveling system (HLS) is widely used in particle accelerators. At present, the HLS system is mainly used for the measurement of relative altitude changes. To expand the application of HLS system in accelerator alignment, the research on the issue of HLS system for altitude difference measurement based on the horizontal plane between multiple points is carried out. Firstly, the measurement principle of capacitive HLS sensor is introduced briefly. Based on the working principle of the sensor, a comparison system composed of dual-frequency laser interferometer, high-precision Z stage, HLS sensors and others is designed and manufactured. The system is used to control multiple sensors to observe the same liquid level in the same coordinate system. The zero-position difference between multiple sensors based on the sensor coordinate system are obtained by comparison, and the absolute height difference measurement with respect to a hydrostatic surface between the multi-sensor coordinate systems is realized, and it is verified that the measurement accuracy is better than 5  $\mu\text{m}$ . In addition, by installing the target holder above the HLS sensor, and using the coordinate measuring machine (CMM) to strictly calibrate the distance between the sensor surface to the center of the target of each sensor, the absolute height difference measurement of the position of the multi-target centers with respect to the hydrostatic surface is realized, and its measurement accuracy is better than 30  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** precise measurement, precision instrument, hydrostatic leveling system, accelerator alignment, altitude difference measurement

\* 收稿日期:2022-06-09; 修订日期:2022-07-27

基金项目:合肥大科学中心协同创新培育基金 20 年(2020HSC-CIP007)

联系方式:李 笑, lx520@mail.ustc.edu.cn。

通信作者:何晓业, xyhe@ustc.edu.cn;

王 巍, wangwei0829@ustc.edu.cn。

近年来,以自由电子激光(FEL)和衍射极限储存环为代表的第4代同步辐射光源逐步兴起,相较于3代光源,其工程规模显著增大,准直精度要求也更为严格。例如,合肥先进光源储存环周长约480 m,北京高能光源储存环周长达1400 m,它们均提出储存环相邻单元之间的准直误差小于50 μm的精度要求<sup>[1-3]</sup>。要在大尺度空间范围内实现如此高的准直精度,加速器准直测量一般采用激光跟踪仪测量准直控制网,并通过平差计算获得高精度的三维控制网数据,以实现加速器关键元部件基于全局坐标系下的准直安装及位移监测<sup>[4]</sup>。在加速器控制网测量中,激光跟踪仪通过自由设站、转站搭接的方式进行多站测量,随测站数增加存在严重的误差累积现象,特别是高程方向上的误差累计尤为明显,其测量精度已无法满足四代光源的准直精度需求<sup>[5-8]</sup>。

本文考虑采用静力水准系统(HLS)为控制网平差提供高程方向上的距离约束,以抑制激光跟踪仪测量控制网时在高程方向上的误差累积。目前,静力水准系统用于长期实时监测若干不同位置之间的相对高程变化量,在大科学装置如粒子加速器中有着广泛的应用,并可实现5 μm的测量精度<sup>[9-11]</sup>。然而,由于测量零位的液位深度未知,现有的HLS系统能且仅能用于相对测量,即观测各传感器内液位的相对变化量,无法用于多点间基于水平面的高差值测量。

为实现HLS系统在监测高程位移量的同时,能够测量多点间基于水平面的高差值,为激光跟踪仪等测量仪器在高程方向提供高精度的距离约束。本文首先基于电容式HLS传感器的数据采集及处理过程,简要介绍其测量原理。然后依据HLS传感器测量原理,提出并验证两种实现基准高差测量的方法,经验证两种方法均可实现优于30 μm的基准高差测量精度。

### 1 静力水准测量原理

HLS系统是根据液体总是寻求等势面的水平原理,监测若干不同位置之间相对高程变化量的精密仪器系统<sup>[12]</sup>。HLS传感器作为静力水准系统的一个测量单元,其核心功能是测量静力水准传感器内的液面位置变化。目前在静力水准传感器分为:电感式、光电式、超声波和电容式等<sup>[13]</sup>。其中电容式静力水准传感器的核心技术是电容技术,其在测量精度、反应频率、自动化程度方面远高于其他测量方法,适合于各种狭小空间和恶劣环境。电容式传感器的输出量为上电极板至液位的距离,其测量原理如图1所示<sup>[14]</sup>。图中 $C_1$ 、 $C_2$ 分别表示两极板间只有空气或水单个介质时的电容值, $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 分别表示两介质的介电常数, $D_1$ 为上极板至液面的距离, $D_2$ 为水深。传感器所测电容值 $C$ 可由 $C_1$ 、 $C_2$ 表示,即

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (1)$$

其中:

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 A_1}{D_1} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_2 A_2}{D_2} \quad (3)$$

式中: $A_1$ 、 $A_2$ 均表示极板正对面积,将式(2)、式(3)代入式(1)可得

$$D_1 = \frac{\epsilon_1 A_1}{(1-k)C} - \frac{k}{(1-k)} D \quad (4)$$

其中:

$$k = \frac{\epsilon_1 A_1}{\epsilon_2 A_2}, \quad k \ll 1 \quad (5)$$

简化式(4)后可得

$$D_1 = \frac{\alpha}{C} + \beta \quad (6)$$

式中:比例因子 $\alpha$ 和偏离量 $\beta$ 为常数,经严格标定后,可以得到液位高度和电容的关系曲线。但由于传感器零位对应的液位深度未知,现有的HLS系统能且仅能用于相对测量,即观测不同位置间的相对高程变化量,无法用于多点间基于水平面的高差值测量。

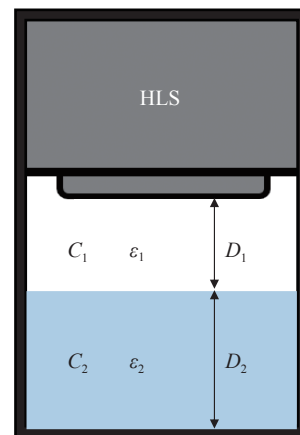


Fig. 1 Measurement principle of capacitive HLS sensor

图1 电容式HLS传感器测量原理

## 2 基于底部坐标系的基准高差测量

### 2.1 实验系统概述

为使得 HLS 系统可用于测量多传感器坐标系间的基准高差,搭建如图 2 所示平台,用于获取一组传感器在同一坐标系下观测同一液位时的测量值。如图 3 所示,令  $d_n$  表示编号为  $n$  的传感器测量液位相对于零位的距离,即测量值与零位读数的差值。由于各传感器测量液位相对于坐标系的距离  $a$  始终不变,则两传感器基于底部坐标系的零位差与所对应  $d$  的差值互为相反数。结合 HLS 传感器测量原理,在实际工程应用中,假设  $n$  号传感器读数为  $l_n$ ,坐标系高程为  $h_n$ ,则任意两传感器坐标系间的基准高差值

$$h_i - h_j = (l_i - l_j) + (d_i - d_j) \quad (7)$$

为保证实验过程中系统稳定,系统整体安装在大理石平台上,避免各固定部件之间产生相对位移。该实验系统可分为两个模块,分别用于基准传感器的重复性精度验证及不同传感器间的零位差比对。

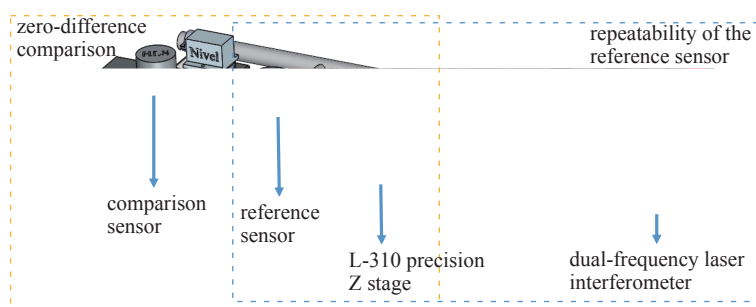


Fig. 2 The zero-difference comparison platform

图 2 零位差比对平台

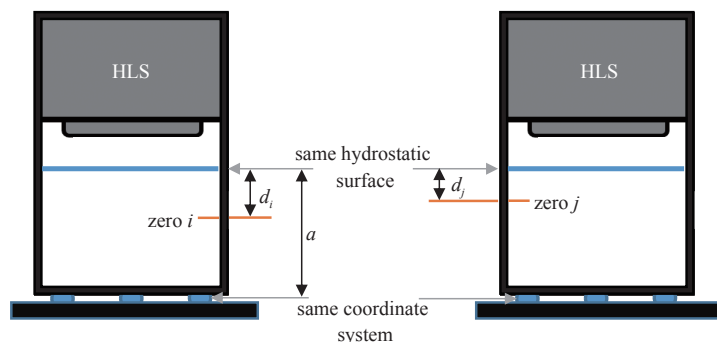


Fig. 3 Schematic diagram of zero-difference comparison

图 3 零位差比对原理示意图

### 2.2 重复性标定

为确保不同 HLS 传感器测量液位的一致性,设置图 2 中所示的基准 HLS 传感器,通过其恢复零位读数严格控制液位高。为验证该方案的可靠性,设计图 2 中所示基准传感器重复性标定平台,标定基准传感器在零点位置的测量重复性精度。用于标定的实验系统,由激光干涉仪、高精度位移平台、HLS 传感器等组成。本系统使用的激光干涉仪是由 Renishaw 公司生产的 XL-80 激光干涉仪,可以实现  $\pm 0.5$  ppm 的线性测量精度;位移台是 PI 的 L-310.023212 精密  $z$  轴位移台,行程 26 mm,分辨率 50 nm;HLS 传感器测量值为上极板至液位距离,其量程 5 mm,量程范围内传感器读数为 5000~10000,单位为  $\mu\text{m}$ ,取 7500 为测量零位。

该实验首先通过调节位移台使基准传感器读数接近 7500,首次测量时将激光干涉仪置零。高分辨率的位移台足以支持干涉仪读数产生位移后精准回零,使每次测量液位都恢复初始位置。测量结果如图 4 所示,12 次重复测量标准偏差为  $0.66 \mu\text{m}$ ,精度满足需求,可用后续零位差比对实验。

### 2.3 零位差比对

基于上节验证结果,基准 HLS 传感器配合高精度位移平台可严格控制液位高。除此之外,还需保证实验过程中所有比对传感器坐标系与基准传感器坐标系相对位置关系一致。为此,如图 2 中所示,采用 15 mm 厚的结构钢板作为传感器支撑板,并在支撑板中间安装 Nivel 高精度双轴倾斜仪。如图 5 所示,由徕卡公司提供的 Nivel 系列倾斜仪是一种基于光电原理的双轴高精度倾角传感器,用于同时测量倾角和倾角方向,具有防水、防尘等优点,能够在  $-20\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内稳定工作。Nivel210 系列双轴倾斜仪在  $\pm 1.51\text{ mrad}$  的测量区间内,在平面两个相互垂直方向上的测角分辨率为  $0.001\text{ mrad}$ ,精度为  $\pm 0.0047\text{ mrad}$ <sup>[15]</sup>,可用于实时监测支撑板变形并进行坐标系位置关系修正,修正公式为式(8)。除此之外,通过如图 6 所示方法建立静力水准传感器坐标系,3 个 6.35 mm 的陶瓷靶球采用点、线、面的定位模式,可以建立唯一的传感器坐标系,以保证比对传感器逐一更换,而传感器坐标系始终保持不变<sup>[16]</sup>。

$$\gamma = 0.32 \times \theta \text{ (mm)} \quad (8)$$

式中:  $\gamma$  为修正值, 0.32 为基准传感器与比对传感器间的中心距离,单位为 m;  $\theta$  为倾斜仪读数,单位为 mrad。

实验过程中,支撑板位置固定,逐一更换比对传感器,利用高精度位移平台调节钵体高,待基准传感器的读数稳定在 7500,此时记录比对传感器读数及倾斜仪读数,为保证结果可靠性,每个 HLS 传感器重复测量 3 遍取平均, HLS 传感器测量结果如表 1 所示。倾斜仪读数、倾角修正后的 HLS 传感器测量值以及图 3 中所示  $d$  值见表 2。

### 2.4 基准高差测量精度评定

在以上比对过的传感器中,随机选取 7 对 HLS 传感器测量两固定坐标系间的高差值。以三坐标测量机(CMM)测量值为标准值,其测量精度优于  $3\text{ }\mu\text{m}$ 。测量结果如图 7 所示,修正前数据为 7 组 HLS 传感器测量两固定坐标系时的读数差值。然后基于表 2 及式(7),进行零位差补偿,获得各组修正后的基准高差测量值。令  $\delta_0$  为修正前各组 HLS 传感器读数差值与标准值之间的偏差。令  $\delta$  为修正后的各组 HLS 传感器所测基准高差值与标准值之间的偏差。7 次测量对应  $\delta_0$  绝对值最大值为  $10.59\text{ }\mu\text{m}$ , 绝对值平均值为  $4.89\text{ }\mu\text{m}$ 。  $\delta$  绝对值最大值为  $2.41\text{ }\mu\text{m}$ , 绝对值平均值为  $0.78\text{ }\mu\text{m}$ 。

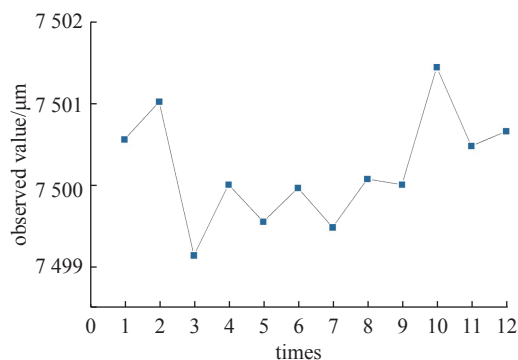


Fig. 4 Repeatability of the reference sensor

图 4 基准传感器重复精度

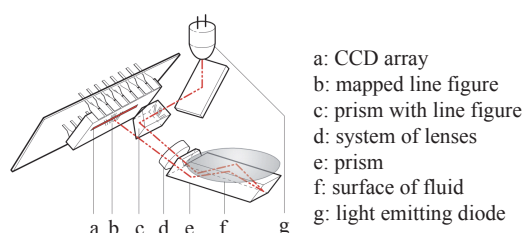


Fig. 5 Principle of operation of a Nivel sensor

图 5 Nivel 传感器测量原理

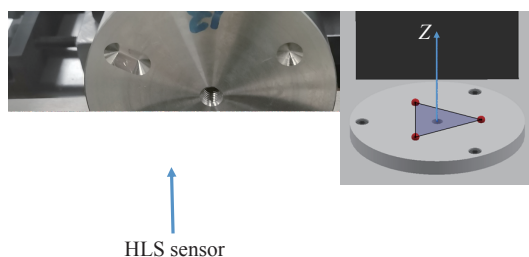


Fig. 6 Construction of the HLS coordinate system

图 6 HLS 传感器坐标系建立

表 1 HLS 传感器读数

Table 1 Values of the HLS sensors reading

sensor numbers	sensor readings/ $\mu\text{m}$			
	first reading	second reading	third reading	average
33	7527.2	7527.1	7525.3	7526.5
36	7527.0	7526.0	7525.7	7526.2
32	7536.5	7536.0	7536.9	7536.5
38	7532.8	7533.0	7533.1	7533.0
44	7528.4	7528.2	7529.3	7528.6

表 2 倾斜仪读数及  $d$  值  
Table 2 Values of the tilt and  $d$

sensor numbers	tilt/mrad	correction/ $\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$
33	0.000	7526.5	-26.5
36	0.000	7526.2	-26.2
32	0.001	7536.2	-36.2
38	0.004	7531.7	-31.7
44	0.001	7528.3	-28.3

### 3 基于上方靶球的基准高差测量

#### 3.1 距离标定

如图 8 所示, 传感器顶部设置靶球座, 可放置 38.1 mm 的激光跟踪仪靶球。我们希望 HLS 传感器能够提供从靶球中心到被测液面的距离, 从而静力水准系统便可用于测量多靶球中心点间的基准高差。HLS 传感器经过标定后可通过电容-距离拟合曲线测量上极板与液面间的距离  $D$ 。因此, 为了能够测量  $L$  值, 使用 CMM 标定传感器上极板到靶球中心的距离  $H$ , 测量偏差小于  $3 \mu\text{m}$ 。标定结果如表 3 所示。

#### 3.2 基准高差测量精度

如图 9(a) 中所示, 将 Nivel 倾斜仪放置在一个平面度优于  $10 \mu\text{m}$  的平面上, 通过  $10 \mu\text{m}$  和  $5 \mu\text{m}$  的垫片严格调水平后, 建立一个 CMM 可测的水平面-平面 H。然后, 将标定后的 5 台传感器放置在 CMM 的大理石平台上, 采用半充满方式连接, 以消除气压差异对传感器测量的影响<sup>[17]</sup>。大理石平台倾斜角为  $0.2 \text{ mrad}$ , 该角度偏差对 HLS 传感器测量  $L$  值的影响可根据式(9)计算,  $0.2 \text{ mrad}$  的非垂直角  $\beta$  将在从靶球中心到水面的垂直距离上产生远小于  $1 \mu\text{m}$  的误差  $\varepsilon$ <sup>[18]</sup>。

$$\varepsilon = (D + H) \cdot (1 - \cos\beta) \quad (9)$$

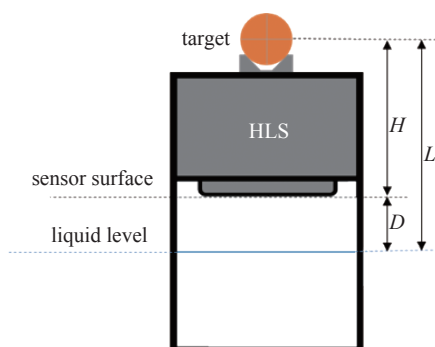


Fig. 8 Calibration of the value of  $H$

图 8  $H$  值标定

连接完成后, 如图 9(b) 中所示, CMM 测量传感器上方靶球中心至平面 H 的距离, 待液面稳定后, 记录 5 台传感器测量值, 即图 8 中所示  $D$  值, 测量结果如下表 4 所示。令  $\delta$  为任意两台 HLS 传感器所测距离  $L$  的差值与对应 CMM 所测靶球中心坐标在水平方向上的差值间的偏差。任意取 7 组测量组合, 它们对应的  $\delta$  值如图 10 所示, 最大绝对值为  $30.7 \mu\text{m}$ , 绝对值平均值为  $14.6 \mu\text{m}$ 。

此方法与第二章所述方法相比较, 效率高但精度低。导

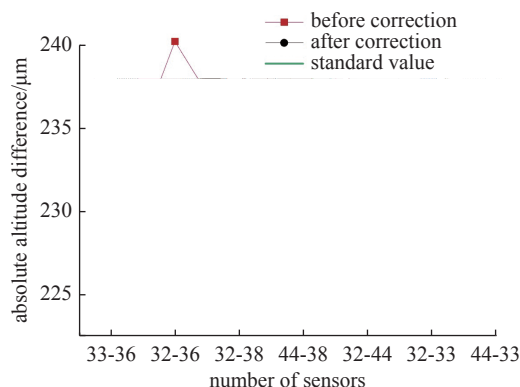


Fig. 7 Absolute altitude difference measurement results between sensor coordinate systems

图 7 传感器坐标系间绝对高差测量结果

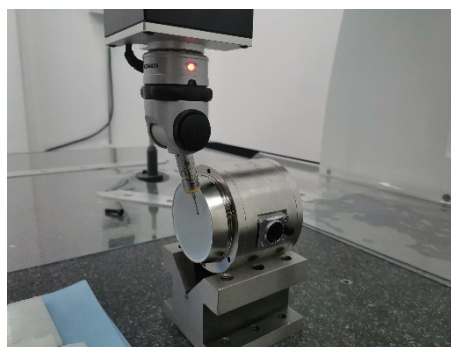


表 3  $H$  标定值

Table 3 Calibration value of  $H$

numbers	$H/\mu\text{m}$
32	109668.96
33	109615.64
38	109401.21
41	109414.31
44	109439.87



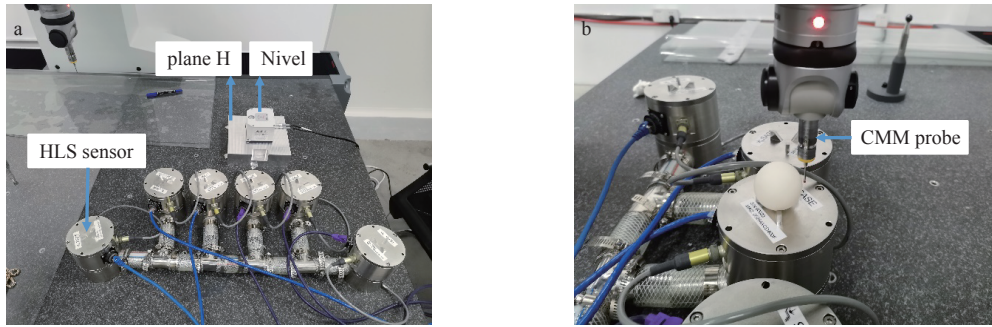


Fig. 9 Height difference measurement results between target centers

图9 靶球中心基准高差测量

致其测量精度低的主要原因有两个: (1) 标定过程涉及到传感器机械机构的拆装, 引入较大误差源; (2) 在量程范围内, HLS 传感器测量液位高变化量的精度比测量上级板至液面距离的精度高。但此方法标定过程不涉及反复调节液位, 且 CMM 测量便捷, 因此其效率较高。

#### 4 结论

本文基于电容式 HLS 传感器测量原理, 设计并搭建了一套比对平台。通过基准 HLS 传感器控制液位高, 机械结构控制传感器坐标系位置, 平台可用于获取一组传感器在同一坐标系下观测同一液位时的测量值, 并由此计算多传感器间的零位差。经标定实验验证, 基准 HLS 传感器重复性精度小于  $1 \mu\text{m}$ , 满足液位恢复的精度需求。基于比对结果, 选取 7 对 HLS 传感器测量两固定坐标系间基于水平面的基准高差, 以 CMM 测量值为标准值计算测量偏差。结果显示, 偏差绝对值最大值为  $2.41 \mu\text{m}$ , 绝对值平均值为  $0.78 \mu\text{m}$ 。标定结果表明, 经零位差补偿后的 HLS 传感器能够测量多坐标系间的基准高差值, 且精度测量优于  $5 \mu\text{m}$ , 验证了该方法的可行性。

除此之外, 本文提出在传感器上方安装靶座, 并利用 CMM 严格标定各传感器电极板至靶球球心的距离, 实现多靶球中心点间基于水平面的高差测量。在 CMM 大理石台上搭建标定平台, 测量靶球球心基准高差的传感器测量值与 CMM 测量值间的偏差。标定结果显示, 偏差绝对值最大值为  $30.7 \mu\text{m}$ , 绝对值平均值为  $14.6 \mu\text{m}$ 。此方法与上述方法相比较, 精度低但效率较高。

综上, 以上两种方法均满足为激光跟踪仪控制网测量平差提供高程约束的精度需求, 可为抑制加速器控制网三维平差时的高程误差累积提供可靠的条件约束。后续拟在加速器隧道中布设静力水准网, 在公共靶点的高程方向与激光跟踪仪联合测量, 并利用第一测站激光跟踪仪所测基准 HLS 传感器靶点在全局坐标系下的位置以及 HLS 系统所测各基准高差值, 计算各公共点在全局坐标系下的高程值, 并将此测值作为强基准参与光束法平差, 以抑制高程方向的误差累积。

#### 参考文献:

- [1] 王铜, 周维虎, 董岚, 等. 粒子加速器中激光跟踪仪控制网测量精度研究[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021: 1-14(2021-11-09)[2022-06-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20211108.1835.004.html>. (Wang Tong, Zhou Weihu, Dong Lan, et al. Research on the accuracy of control network measured by laser tracker in particle accelerator[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021: 1-14(2021-11-09)[2022-06-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20211108.1835.004.html>)
- [2] 张海艇, 何晓业, 王巍, 等. 基于合肥先进光源的准直参考网络机械系统设计及其仿真分析[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 084003. (Zhang Haiting, He

表 4 CMM 及 HLS 传感器测量值

Table 4 Measurement values of CMM and HLS sensors

sensor numbers	values/ $\mu\text{m}$	
	target center-plane $H$	$D$
32	94064.34	9005.33
33	94012.28	9012.24
38	93795.38	9013.84
41	93832.26	9011.95
44	93834.94	9019.77

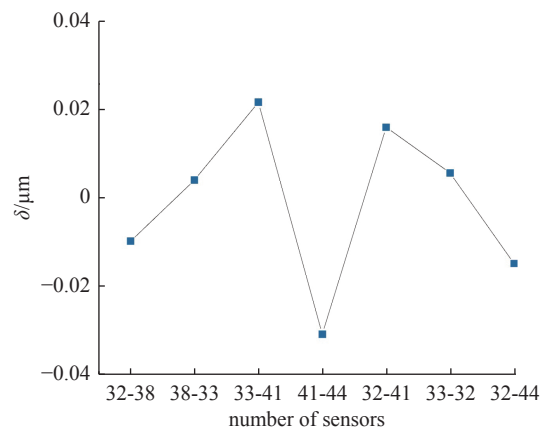


Fig. 10 Measurement errors of height difference between target centers

图 10 靶球中心基准高差测量偏差

- Xiaoye, Wang Wei, et al. Design and simulation analysis of mechanical system of reference network for alignment based on Hefei Advanced Lightsource Facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 084003)
- [3] 郭迎钢, 李宗春, 李广云, 等. 粒子加速器工程控制网研究进展与展望[J]. *测绘通报*, 2020(1): 136-141. (Guo Yinggang, Li Zongchun, Li Guangyun, et al. Progress and prospect of engineering control network for particle accelerator[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(1): 136-141)
- [4] 于成浩, 殷立新, 杜涵文, 等. 上海光源准直测量方案设计[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(7): 1167-1172. (Yu Chenghao, Yin Lixin, Du Hanwen, et al. Survey and alignment design of Shanghai synchrotron radiation facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(7): 1167-1172)
- [5] Wang Zhaoyi, Luo Tao, Wang Wei, et al. Fixing positions and orientations of laser trackers during bundle adjustment in multi-station measurements[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32: 035017.
- [6] 罗涛, 何晓业, 汪昭义, 等. 粒子加速器隧道准直测量中激光跟踪仪光束法平差的误差分析和应用研究[J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021: 1-13(2021-11-10)[2022-06-05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.13203/j.whugis20200718>. (Luo Tao, He Xiaoye, Wang Zhaoyi, et al. Error analysis and application research on laser tracker's bundle adjustment in the tunnel alignment measurement of particle accelerator[J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021: 1-13(2021-11-10)[2022-06-05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.13203/j.whugis20200718>)
- [7] 王小龙, 康玲, 董岚, 等. 加速器准直控制网数据处理误差累积研究[J]. *核技术*, 2021, 44(9): 23-31. (Wang Xiaolong, Kang Ling, Dong Lan, et al. Data processing error accumulation of accelerator alignment control network[J]. *Nuclear Techniques*, 2021, 44(9): 23-31)
- [8] 王铜, 董岚, 梁静, 等. 中国散裂中子源准直控制网数据处理方法[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 104002. (Wang Tong, Dong Lan, Liang Jing, et al. Adjustment method of control network for alignment in CSNS[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 104002)
- [9] Zhang Chao, Azumi N, Fukami K, et al. Magnet alignment monitoring system with eigenfrequency-based wire sag correction[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32: 075009.
- [10] Choi H J, Seo K W, Gil K H, et al. Use of the BINP HLS to measure vertical changes in the locations of the building and ground at the PAL-XFEL[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2016, 69(6): 998-1004.
- [11] 何晓业. 静力水准系统在大科学工程中的应用及发展趋势[J]. *核科学与工程*, 2006, 26(4): 332-336. (He Xiaoye. Application of hydrostatic leveling system in key scientific engineering and its developing tendency[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2006, 26(4): 332-336)
- [12] 张强, 何晓业, 唐郑, 等. 用于粒子加速器位置监测的静力水准系统与线位置探测器的比对研究[J]. *原子能科学技术*, 2017, 51(8): 1532-1536. (Zhang Qiang, He Xiaoye, Tang Zheng, et al. Comparison of hydrostatic leveling system and wire position sensor for position monitoring in particle accelerator[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2017, 51(8): 1532-1536)
- [13] 何晓业, 汪鹏, 许少峰, 等. 静力水准传感器中厚膜陶瓷电容传感器的研制[J]. *中国科技论文*, 2014, 9(1): 40-44. (He Xiaoye, Wang Peng, Xu Shaofeng, et al. Development of thick film ceramic capacitor in hydrostatic levelling sensor[J]. *China Science Paper*, 2014, 9(1): 40-44)
- [14] Volk J, Hansen S, Johnson T, et al. Hydrostatic level sensors as high precision ground motion instrumentation for Tevatron and other energy frontier accelerators[J]. *Journal of Instrumentation*, 2012, 7: P01004.
- [15] 胡现辉. 徠卡NIVEL200系列电子水平仪在桥梁变形监测中的应用[J]. *测绘通报*, 2007(6): 73-74. (Hu Xianhui. Application of leica NIVEL200 electronic level in bridge deformation monitoring[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2007(6): 73-74)
- [16] Li Xiao, He Xiaoye, Wang Zhaoyi, et al. Conceptual design and theoretical analysis of a system: The reference network of alignment[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 1011: 165582.
- [17] 何晓业, 黄开席, 陈森玉, 等. 压力和温度对静力水准系统精度影响分析[J]. *核技术*, 2006, 29(5): 321-325. (He Xiaoye, Huang Kaixi, Chen Senyu, et al. Analysis of influence of pressure and temperature on HLS[J]. *Nuclear Techniques*, 2006, 29(5): 321-325)
- [18] Touzé T. Feasibility of the CLIC metrological reference network[C]//International Workshop on Accelerators Alignment. 2010.