

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209773

微米级电容式静力水准器设计及标定研究*

马娜^{1,2}, 金伟其¹, 董岚², 王铜², 何振强²

(1. 北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室 北京 100081; 2. 散裂中子源科学中心 东莞 523803)

摘要: 基于当前高能同步辐射光源(HEPS)装置的沉降监测需求, 课题组设计关键参数和结构, 研制了国内首个微米级单极板电容式静力水准器样机。本文重点研究该水准器的标定和精度验证, 针对传统的标准量块和位移台标定法存在标定精度低、机械加工要求高等问题, 创新性采用单水准器直接标定法和多段拟合参数获取方案, 实现10 mm量程的微米级标定; 同时提出采用激光反馈干涉仪联合纳米级位移台直接监测液位变化, 实现单水准器的全量程精度验证, 精度3 μm ; 通过重载位移台进行了7 m距离的两点监测系统的精度验证, 在10 mm量程内相对高程监测精度可达5 μm 。结果表明样机精度符合设计要求, 可为我国大型装置的高精度高程向监测提供可靠手段。

关键词: 微米级; 电容式水准器; 单水准器标定; 精度验证

中图分类号: TL53 TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.40

Development and calibration of micron capacitive hydrostatic level sensor

Ma Na^{1,2}, Jin Weiqi¹, Dong Lan², Wang Tong², He Zhenqiang²

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Beijing University of Technology, Beijing 100081, China; 2. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China)

Abstract: Based on the current settlement monitoring requirements of high energy photon source (HEPS), the research group designs the key parameters and structure, and develops the first micron monopolar plate capacitive hydrostatic level sensor prototype in China. This article focuses on the calibration and accuracy verification of the level sensor. To address the problems of low calibration accuracy and high machining requirements of the traditional standard block and translation stages calibration method, the single level sensor direct calibration method and multi-segment fitting parameter acquisition scheme are innovatively adopted to realize the micron calibration within 10 mm range. Meanwhile, the laser feedback interferometer combines with nano translation stages is proposed to directly monitor the change of liquid level to realize the full range accuracy verification of single level sensor. And the accuracy is 3 μm . The accuracy of the two-point monitoring system with 7 m distance is evaluated by the heavy-duty translation stages. The relative monitoring accuracy of height can reach 5 μm in the range of 10mm. Results show that the accuracy of the prototype meets the design requirements, which can provide a reliable means for high-precision height monitoring of large-scale devices in China.

Keywords: micron scale; capacitive level sensor; single level sensor calibration; accuracy verification

0 引言

随着基础科学研究的深入发展, 加速器设备高精度准直和运行稳定性的要求越来越高。高能同步辐射光源(high energy photon source, HEPS)是我国在建的第四代同步辐射光源, 装置由直线加速器(长度50 m)、增强器

(周长430 m)、储存环(周长1360 m)和90多条光束线站组成, 建成后将成为世界上发射度最低、亮度最高的光源, 也是目前国内准直精度要求最高的加速器装置, 其地基高程向的稳定性要求每年10 m范围内不低于10 μm 。因此, 如何在大尺度范围内满足微米级的高程向监测是当前准直工作亟待解决的问题。

收稿日期: 2022-05-12 Received Date: 2022-05-12

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12075246)资助

静水水准系统 (hydrostatic leveling system, HLS)^[1] 是一种将多个液位监测传感器相连, 基于系统内液体因势能总是寻找水平的原理, 获得测量点和基准点间高程变化量的装置是一种大尺度、高精度的高程变形监测手段。它具有自动化、实时监测和安装灵活等优点, 广泛应用于大坝、核电站、桥梁等大型建筑的变形监测。

20 世纪 80 年代末 HLS 逐渐应用于加速器装置的监测。1989 年欧洲同步辐射装置 (European synchrotron radiation facility, ESRF) 首次将 HLS 用于高程变形监测^[2], 随后 CERN、瑞士光源、费米实验室、日本 Spring-8 等实验室也陆续引入该手段解决装置的高精度高程变形监测^[3-6]。当前, HLS 在国外加速器装置的应用比较广泛, 系统中水准器标称精度普遍在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 。国内加速器装置采用 HLS 技术较晚, BEPCII 首次将 HLS 用于谱仪屏蔽设备造成的地基高程变形监测^[7], 2007 年上海光源将国产 CCD 式水准器应用到同步环设备监测中^[8], 水准器精度达到了 $0.01\ \text{mm}$, 但由于应用范围有限, 该类型水准器现已停产。目前国内市场上现有的水准器体积大、精度低, 主要用于大型建筑和重要工程设施的变形监测, 精度指标无法满足第四代同步辐射光源的高程变形监测需求。据调研, 国外微米级精度的水准器价格高昂, 且后期维护困难; 国内市场上多数水准器测量精度一般在 $0.1\sim 0.5\ \text{mm}$ 左右, 远不能满足粒子加速器装置的监测需求。基于以上问题和项目需求, 课题组研制一种非接触电容式的静力水准器。本文介绍单极板电容式水准器的监测原理、关键参数及结构设计, 重点研究高精度的单水准器直接标定方案、直接监测液位的单水准器精度测试方案和系统的精度验证方案, 结果验证所研制的电容式静力水准器样机满足设计和高精度监测要求, 能为后续 HPES 地基的高程向沉降变形提供可靠的监测手段。

1 水准器结构设计

1.1 监测原理及关键参数

HLS 监测系统由监测点位的 水准器、系统内液体、管、液管、箱、数据传输和终端设备组成, 监测原理图 1 所示。图 1 中, 3 个 水准器组成 一个监测系统, 1#为基准监测点位, 2#和 3#为变形监测点位, ΔH^2 , ΔH^3 就是监测点位相对 1#的 程变化量, 可由不同的液位稳定时刻, 水准器读数计算获得。

HLS 高精度监测的核心是静力水准器, 其监测精度直接决定系统精度, 其实现主要依赖传感器对液位变化的精确测量。按测量液位的方式不同, 静力水准器可分为接触式和非接触式两种。接触式水准器是在液体中放置浮子, 通过浮子的移动量反映液位变化; 非接触式静力水准器主要有超声波式、激光式和单极板电容式 3 种, 其

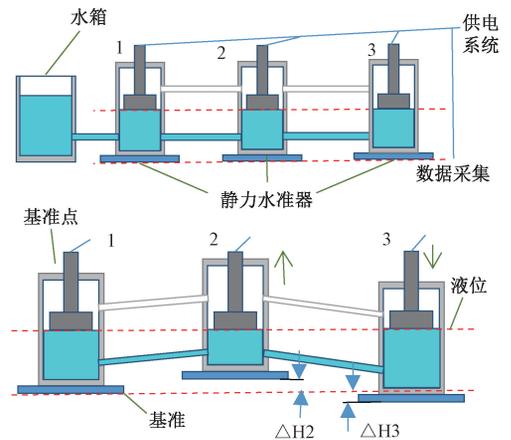


图 1 HLS 系统的构成和监测原理

Fig. 1 Composition and monitoring principle of HLS

中, 超声波和激光式水准器是通过液位放置的反射片获得液位变化量, 单极板电容式水准器则将液面作为电容的动极板, 液位变化引起单极板电容的容值变化, 由此计算出液位变化量, 基本原理如图 2 所示。

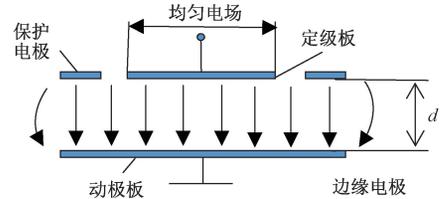


图 2 单极板电容器原理

Fig. 2 Principle of monopolar plate capacitor

理想条件下电容量 C 可表为:

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{d} \quad (1)$$

式中: S 为极板面积; d 为极板间距; ε_0 为真空的介电常数; ε_r 为极板间介质的相对介电常数。

电容式水准器不再使用浮子, 也无需液面反射片, 其将液面作为电极板, 通过电容值变化反映液位变化, 可达到很高的测量精度。结合 HEPS 的监测需求、国外同类 HLS 的监测精度和国内现有单极板电容传感器的精度, 本课题研制的单极板电容式水准器关键参数表 1 所示。

表 1 单极板电容式水准器关键参数

Table 1 Key parameters of the monopolar plate capacitor level sensor

测量精度/ μm	分辨率/ μm	传输距离/ m	采样率/ Hz
± 5	± 0.5	$> 1\ 000$	$< 3\ 000$

1.2 水准器结构

HLS 系统通常按其液管和气管是否分离可分为全充式和半充式两种结构^[9-10]。其中,半充式结构的液、气管合并为一个液管,系统安装中必须保证系统液管保持同一高度;全充式结构的液、气管分离,系统安装中水准器液管不高于液管接口。考虑 HEPS 现场的安装和温度条件,研制的单极板电容式静力水准器采用全充式结构,具体结构如图 3 所示。

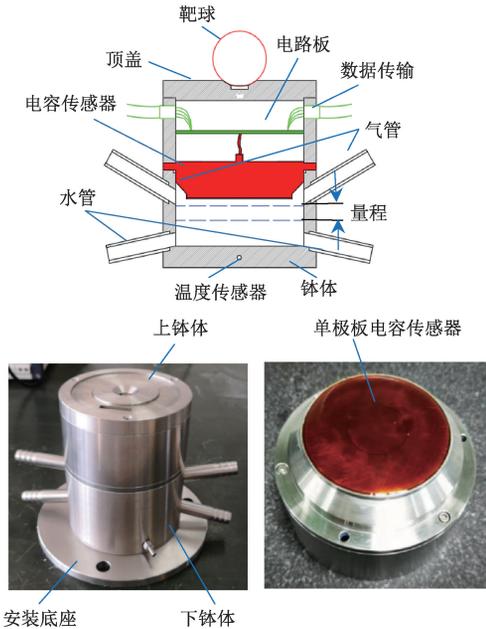


图 3 单极板电容式水准器

Fig. 3 monopolar plate capacitor level sensor

外部结构主要由上钵体、下钵体、顶盖 3 部分组成。上钵体内装有电容传感器和高精度信号处理系统,其中,传感器电极板正对液面,上、下钵体精密配合,确保重复拆装不影响安装定位精度;信号处理系统通过 485 通讯线缆,实现传感器数据的远距离稳定传输。水准器下钵体液管、气管分开设计,液管无需保持同一高度,极大降低安装难度;液管略微倾斜向下,便于系统内液体的快速流动,并防止气泡产生;顶盖设计了跟踪仪靶球放置基准座,该点位既是 HLS 监测点位,也是隧道固定水准点位,可作为隧道高程网和设备调整的基准;考虑到各水准器所处环境温度差异会对液体体积和气压均产生一定影响,下钵体底部还设计有温度传感器,实时采集环境温度值用于数据修正。通过以上设计,课题组联合天津大学已完成两台单极板电容式水准器样机的研制。

2 水准器标定方法

电容式水准器采集的原始数据是对应不同液位高度的传感器电压值,我们还需对其进行精密标定,计算变换

参数,获得全程不同电压值下对应的液位高度值。水准器因结构和精度指标不同,标定方法有所不同^[11-13]。

2.1 间接标定法

传统的 HLS 标定主要有标准量块法和位移台法^[7,14]。

1) 标准量块法:将待标定水准器与另一个未封闭的下钵体串连,注入液体,待液位稳定后向未封闭钵体中添加标准量块,液位随之上升,通过量块体积和钵体直径计算液位变化值,完成水准器标定。该方法存在以下缺点:标定时下钵体未封闭,量块加入产生的液面晃动需较长时间稳定,造成液体蒸发较多;标准量块表面会沾带液体,标定中只能加入,因此只能进行单向标定;钵体及量块存在加工误差。这些均对微米级测量精度的实现产生影响。

2) 位移台法:两台水准器相连,待标定水准器安装于固定台,另一台水准器安装于精密位移台,位移台的精密运行使得系统内液位高度发生改变。液体总体积不变的前提下系统内的液位变化量可通过位移台移动量计算获得,即若位移台上升 1 mm,则待标定水准器液位应升高 0.5 mm,位移台上水准器液位应降低 0.5 mm。该方法要求位移台的运动精度至少达到亚微米才能实现微米级的标定,同时对水准器的加工精度也要求较高。上海光源采用的 CCD 式静力水准器标定就是基于位移台法。

上述两种标定方法是水准器与另一钵体相联通,根据液体的重新分布或者液体体积的变化推算液位变化量,均为间接标定法。此类方法必须采用多水准器配合,且精度受钵体机械加工精度影响很大。例如待标定水准器钵体的设计半径为 50 mm,由于加工误差使其中一个钵体半径为 50.05 mm,则由直径偏差引起的液位误差在 8 mm 量程处将达到 4 μm (如图 4 所示),这在微米级水准器的标定中不可忽视。但若所有的机械加工均保持高精度,则加工和检测成本也相应增加。因此,本文提出了一种单水准器直接标定方法,不改变液位高度,直接垂向移动水准器上钵体,采用激光干涉仪精密测量上钵体位移量,实现微米级水准器的标定。

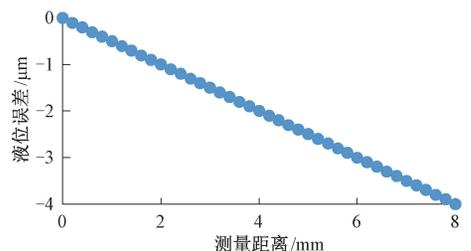


图 4 钵体直径分别为 50 和 50.5 mm 引起的液位偏差
Fig. 4 The difference in pot diameter is 50 and 50.5 mm resulting in liquid level deviation

2.2 直接标定法

标定方案所需仪器主要有激光干涉仪及光学组件、手动垂直位移台、光学平台等。标定工装如图5所示：
 1) 水准器固定于光学平台上，其上、下两钵体紧密配合，但不用螺栓连接；
 2) 手动垂直位移台固定于光学平台，并设计工装以固定水准器上钵体和干涉仪光学组件；
 3) 激光干涉仪固定于光学平台。

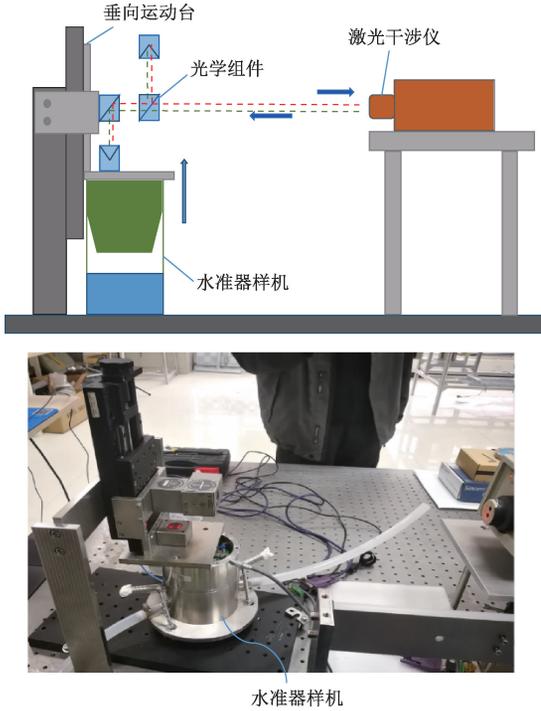


图5 单极板电容式水准器标定

Fig. 5 Calibration of monopolar plate capacitor level sensor

标定初始时刻，下钵体液位距离电容电极板5 mm左右(水准器设计的最小量程与电容电极板的距离为5 mm)，激光干涉仪通过光学组件监测水准器上钵体的垂直位移量；手动位移台带动水准器上钵体向上运动，每上升约0.3 mm，分别记录水准器读数和激光干涉仪读数，直至完成12 mm量程的数据获取(标定的实际量程大于水准器的设计的10 mm量程)。

传感器测量并非线性关系，为实现高精度拟合，通常采用多项式拟合处理获得的标定数据^[15]，本文三次多项式进行拟合：

$$d = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D \quad (2)$$

式中： A 、 B 、 C 和 D 为拟合参数； x 为水准器获取的电压值； d 为激光干涉仪读数。

激光干涉仪读数为位移标准值，多项式拟合获得位移拟合值，通过拟合残差分析标定参数的可靠性。传统的水准器通常全量程采用一套标定参数就能满足测量需

求，而对于大量程、高精度传感器的标定，全量程采用一套标定参数并不能实现高精度测量，因此本文采用分段拟合方式，具体的将全量程分为1段、2段和3段，分别获得标定参数。标定数据分段中尽可能的确保每段具有足够的多余观测量，且残差大小分布均匀。

1#和2#两个水准器样机得到的拟合值与标准值的残差分别如图6和7所示，残差的统计量如表2所示。可见对于12 mm量程范围，1段拟合残差较大，最大值达到25 μm ；2段拟合残差最大值8.4 μm ，残差标准值3 μm 之内；3段拟合残差均在1 μm 之内。可见对于12 mm量程是十分有必要采用分段拟合方式，实现高可靠性、高精度的标定参数的获取。本文的水准器样机的标定参数最终采用3段拟合的方式获得。

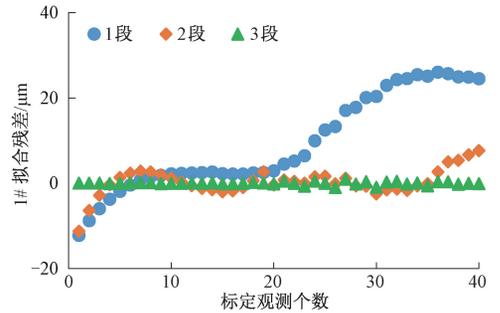


图6 1#水准器标定拟合残差

Fig. 6 Residual of calibration of 1# level sensor

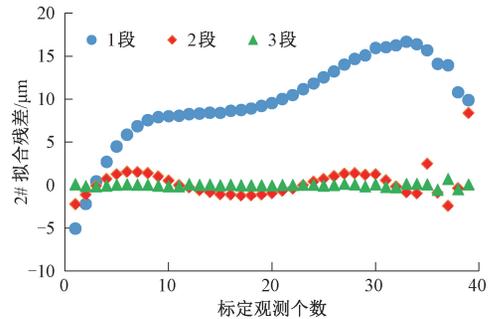


图7 2#水准器标定拟合残差

Fig. 7 Residual of calibration of 2# level sensor

表2 水准器样机标定拟合残差精度统计

Table 2 Accuracy statistics of residual error in the level sensor prototype

拟合残差	1#水准器测量序列			2#水准器测量序列		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
最大正残差	26.04	7.63	0.93	16.68	8.40	0.74
最小负残差	-8.79	-6.42	-0.99	-5.04	-2.40	-0.52
残差标准值	14.61	2.69	0.36	10.97	1.75	0.19

3 精度验证

3.1 水准器精度验证

液体的流体属性使得液位变化极难精密测量,目前还未有直接监测液位变化进行标定后单水准的测量精度验证。本文则采用德国 AUTOCUBE 公司的激光反馈干涉仪直接监测液位变化,实现单水准器全量程测量精度验证。

AUTOCUBE 激光反馈干涉仪可通过多路光纤将激光引出到聚焦探头,实现微反射物质的位移监测,因此在液面无反射装置的情况下可实现液位变化监测。多次实验表明在良好的接光情况下其对水面变化的监测量程仅约 1.5 mm,无法实现全量程精度验证,因此为尽可能的避免引入仪器误差,采用 PI 公司的 N-565 型号纳米级位移台(单向重复精度 ± 5 nm)辅助反馈干涉仪进行全量程精度验证。验证方案如图 8 所示:标定后的水准器和一个监测钵体串连,干涉仪探头由纳米级位移台安装于钵体上方,测量前调整光路,使得干涉仪接收光最强。当监测钵体液位变化时,由联通器原理可知,水准器和监测钵体内液位高度的变化量总相等。比较水准器和激光反馈干涉仪的监测值,完成单水准器测量精度验证。

初始验证方案中,液位变化通过直接向监测钵体内抽、注水实现,反馈干涉仪直接监测钵体内液位变化(图 8 所示)。测试中发现抽、注水引起的液位波动较大,干涉仪极易断光,导致测量出现粗差。因此,在改进方案中,监测钵体内的液位变化采用间接方式实现,专设一个抽、注水钵体与监测钵体相联,使其监测和抽注水区域分开,并且在实验中尽量使用针头匀速抽、注水,减少系统内液位晃动。

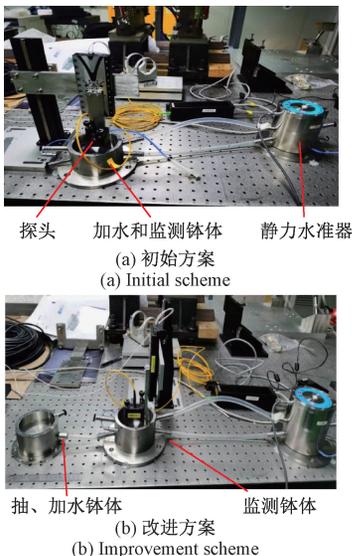


图 8 水准器精度验证方案

Fig. 8 Accuracy verification scheme of the level sensor

首先对反馈干涉仪联合纳米级位移台对液位变化量的实际监测精度进行验证。方法如下:钵体内液体稳定,反馈干涉仪探头位于监测量程内,然后位移台移动一个固定值,分别记录干涉仪运动前后两次测量值,得到距离变化值,与位移台移动值比较,实现两手段联合方案的监测精度分析。实验表明,干涉仪测量值和位移台位移量的偏差只有一个点位超过 $1 \mu\text{m}$ (如图 9 所示),表明位移台和反馈干涉仪联合测量精度可达到 $1 \mu\text{m}$,完全可以实现液位变化微米级监测。

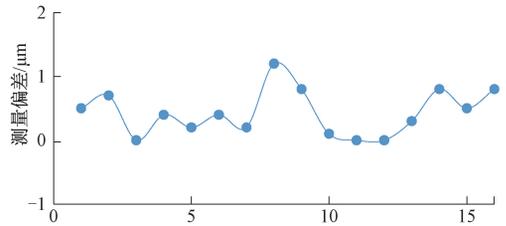


图 9 纳米位移台和反馈干涉仪精度校核

Fig. 9 Accuracy verification of nano translation stages and feedback interferometer

此后,验证单水准器测量精度。实验中,水准器全量程共采集了 34 个测量点位,分别对 1#、2#水准器的测量值与干涉仪和位移台联合测量的液位变化值进行比较,结果如图 10 所示。1#水准仪全量程仅有一个点位偏差超过 $7 \mu\text{m}$,分析认为可能存在仪器噪声,后期需剔除,1#和 2#水准器其他测量点位的偏差值均在 $4 \mu\text{m}$ 之内;1#水准器偏差的标准值 $0.5 \mu\text{m}$,2#水准器偏差的标准值 $0.3 \mu\text{m}$,剔除纳米位移台和反馈干涉仪联合测量误差,可见单极板电容式水准器对液位变化的测量精度可达到 $3 \mu\text{m}$,优于设计指标。

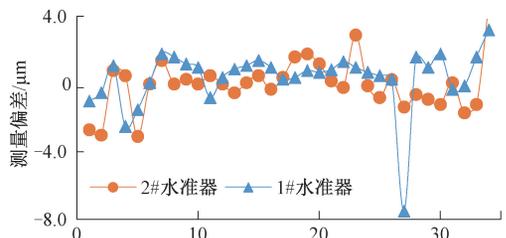


图 10 单水准器精度验证结果

Fig. 10 Accuracy verification results of the single level sensor

3.2 系统的精度验证

静力水准系统的整体监测精度与单水准器的长时间自稳定性、多水准器的测量一致性直接相关,为验证系统监测精度,通过本课题研制的位移台测试 HLS 系统的测量精度。

位移台行程 120 mm,重复定位精度 $3 \mu\text{m}$,分辨率 $1 \mu\text{m}$,承重 35 kg。如图 11 所示,将两台水准器分别固定

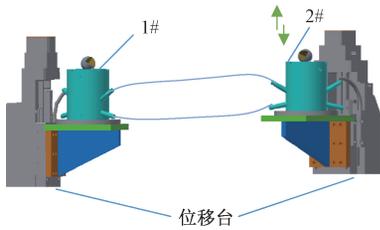


图 11 两点 HLS 的精度验证

Fig. 11 Accuracy verification of two-point HLS

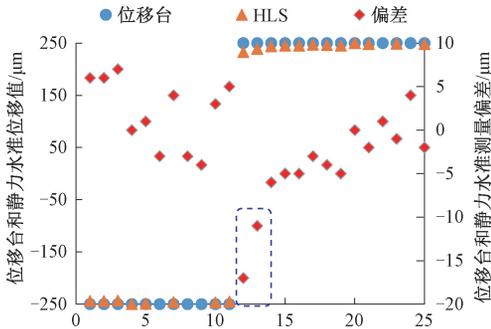


图 12 两点系统相对运动测试结果

Fig. 12 Test results of relative motion of the two-point system

于两个位移台上。测试中,1#仪器保持不动,位移台带动2#水准器垂向运动,待液位稳定后,同时记录位移台垂向值和水准仪的监测结果,对比二者偏差,检验两点 HLS 的监测精度。

实验结果如图 12 所示,测点 1~11 反映了位移台下下降运动,测点 12~25 反映位移台返程上升运动,位移台每次运动步长为 $250\ \mu\text{m}$ 。下降测试结果显示,位移台运动值与 HLS 获得的 2#水准器高度变化值的偏差在 3 个测点超过 $5\ \mu\text{m}$,最大偏差为 $7\ \mu\text{m}$,其他均在 $5\ \mu\text{m}$ 之内,该偏差同时也包含了位移台本身的运动误差;返程上升测试结果显示,初始时刻 2 个测量点位位移台与 HLS 获得的 2#水准器高程变化值的偏差较大,达到 $15\ \mu\text{m}$ 以上,多次测试发现是由位移台的回程误差所致,剔除回程误差,上升过程中只有一个监测点位的偏差是 $6\ \mu\text{m}$ 。剔除位移台运动和回程误差,整体分析可知,在相距 $7\ \text{m}$ 的相对高程变化监测中,该结构 HLS 在 $10\ \text{mm}$ 量程内精度可达到 $5\ \mu\text{m}$,符合预期的设计目标,完全能够满足高能光源地面稳定性监测。

4 结 论

基于高能光源的地基稳定性的高精度监测需求,课题组设计参数指标,研制出国内首个量程 $10\ \text{mm}$,精度 $3\ \mu\text{m}$ 的高精度单极板电容式静力水准器。针对该水准器,本文重点对其标定和精度验证进行研究,考虑到传统

的标准量块和位移台标定法存在标定精度低、机械加工要求高等问题,创新性采用单水准器直接标定法和多段拟合参数获取方案,实现了 $10\ \text{mm}$ 量程的微米级标定;同时创新性采用激光反馈干涉仪联合纳米级位移台直接监测液位变化,实现单水准器的全量程精度验证,精度 $3\ \mu\text{m}$;通过位移台进行了 $7\ \text{m}$ 距离的两点监测系统的精度验证,在 $10\ \text{mm}$ 量程内相对高程监测精度可达到 $5\ \mu\text{m}$,满足样机设计指标,后续还需进行多点位,长距离的系统测试,为 HEPS 高程向沉降变形提供可靠的监测手段,也为我国同类型装置的高精度高程向监测提供有益借鉴。

参考文献

- [1] 何晓业. 静力水准系统的发展及应用[D]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2010.
HE X Y. Latest developments and applications of hydrostatic levelling system [D]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2010.
- [2] MARTIN D, GATTA G, PERRET B, et al. The european synchrotron radiation facility hydrostatic leveling system-twelve years experience with a large scale hydrostatic leveling system [C]. Proceedings of the 7th International Workshop on Accelerator Alignment, Spring-8. 2002.
- [3] MARTIN D. Some reflections on the validation and analysis of HLS data [C]. Eighth International Workshop on Accelerator Alignment, 2004.
- [4] FREDDY B, WILLIAME C, MARK J. Consequences of perturbations of the gravity field on gps measurements. proceedings of the 7th international workshop on accelerator alignment [C]. Japan: SPring-8, 2002.
- [5] MEIER E, WEI F, RIVKIN L, et al. Long-term results of the hydrostatic levelling system at the swiss light source (sls). Proceedings of the 8th international workshop on accelerator alignment [C]. Geneva: CERN, 2004.
- [6] ZHANG C, FUKAMI K, MATSUI S. From the hls measurement for ground movement at the spring-8. proceedings of the 7th international workshop on accelerator alignment [C]. Japan: SPring-8, 2002.
- [7] 何晓业, 黄开席, 陈森玉, 等. CCD 静力水准系统的标定方法和拟合 [J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(3): 114-117.
HE X Y, HUANG K X, CHEN S Y, et al. Calibrating method and fitting of CCD HLS [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(3): 114-117.
- [8] HE X Y, WU J. Technological plan of HLS in

- SSRF[J]. Chinese Physics C, 2008, 32(z1):62-64.
- [9] ZHANG C, FUKAMI K, MATSUI S. Primary hydrokinetics study and experiment on the hydrostatic leveling system. proceedings of the 7th international workshop on accelerator alignment [C]. Japan: SPRing-8, 2002.
- [10] CHUPYRA A, KONDAUROV M. Sas family of hydrostatic level and tilt sensors for slow ground motion studies and precise alignment. proceedings of the 8th international workshop on accelerator alignment [C]. Geneva: CERN, 2004.
- [11] 汪鹏. 电容式非接触静力水准传感器的研制[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2013.
WNAG P. Development of non-contact capacitance hydrostatic levelling sensor [D]. Hefei: University of Scienceand Technology of China, 2013.
- [12] HERTY A. Micron precision calibration methods for alignment sensors in particle accelerators [M]. Nottingham Trent University (United Kingdom), 2009.
- [13] 张鑫. 电容式叶尖间隙测量信号处理技术研究[D]. 天津:天津大学, 2020.
ZHANG X. Research on signal processing technology of capacitive tip clearance measurement [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [14] 余剑锋. 静力水准仪标定方法的研究[J]. 山西电子技术, 2016(3):77-78.
XU J F. Study on the calibration method for static leveling instrument [J]. Shanxi Electronic Technology, 2016(3):77-78.
- [15] 何伟铭, 蒋超伟, 井原透, 等. 高精度传感器标定曲线的预测拟合[J]. 传感技术学报, 2013, (11): 1519-1524.
HE W M, JIANG CH W, JING Y T, et al. Predicting fitting of high precision sensor calibrating curve [J].

Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2013 (11): 1519-1524.

作者简介



马娜, 2009年于长安大学获得学士学位, 2012年于长安大学获得硕士学位, 现北京理工大学工程博士在读, 为散裂中子源科学中心工程师。主要研究方向为加速器高精度准直技术及数据处理。

E-mail: mana870518@163.com

Ma Na received her B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Chang'an University in 2009 and 2012, respectively. She is currently an engineer at Spallation Neutron Source Science Center, pursuing a PhD of engineering at Beijing University of Technology. Her research interest is high precision collimation technology and data processing for accelerator.



金伟其(通信作者), 1982年于北京工业大学获得工学学士学位, 1990年于北京理工大学获得工学博士学位。现为北京理工大学教授, 博士生导师, 光电成像技术与系统教育部重点实验室主任, 主要研究方向为夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器方面的研究。

E-mail: jinwq@bit.edu.cn

Jing Weiqi (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 1982, and received his Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 1990. He is currently a Ph. D. advisor at Beijing University of Technology and the director of the key laboratory of optoelectronic imaging technology and systems of ministry of education. His main research interests include night vision and infrared technology, photoelectric image processing and photoelectric detection and instrument.