doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.05.013

基于超高精度激光追踪原理的海水潮位计量检测技术的研究

朱丽萍，胡　波*，于小焱
（国家海洋标准计量中心，天津 300112）

摘　要：为了提高验潮仪检定装置的技术指标，本文提出了一种基于超高精度激光追踪原理的潮位计量检测装置。新装置指标可提高至 U=0.86 mm，k=2，极大地满足《测量仪器特性评定》JJF1094-2002 对计量标准装置的技术指标要求。通过 0 ～ 8 000 mm 水位范围试验结果表明，两种原理的检测装置测得数据差值绝对值的曲线基本一致；在 8 000 mm 水位点出现最大值，分别为 1.292 mm 和 1.883 mm，主要原因是当前装置该水位点数据读取受外界强光线的影响；新检测装置不仅精度更高，而且不会受外界环境影响，能够更好地满足高精度潮位仪的检测需求。本文对提升验潮仪计量检测技术和确保海洋潮位数据的准确可靠，进而对完善我国海洋预报、海洋综合管理等方面具有重要的理论和现实意义。

关键词：潮位仪；激光追踪技术；验潮仪检定装置；计量标准装置

中图分类号：P7；TB92　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1003-2029（2020）05-0086-06

气候变暖和海平面上升会对人类社会造成严重影响。近年来，世界范围内各国政府、社会团体和科学界关注着海平面上升及其对海岸带造成的影响。1989 年，美国科学院院长 Frank Press 指出：“海岸带管理应当考虑将来海平面上升”[1]。目前，据政府间气候变化委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）提供的数据显示，未来 100 年，全球海平面上升率的最佳估计值分别为：1990—2030 年，4.5 mm/a；2031—2070 年，6.5 mm/a。国家测绘总局对过去数十年来的数据估计显示，我国海平面平均上升率约为 1.4 mm/a，各地相对海平面差别很大[2]。

潮汐是重要的海洋物理要素之一，海平面上升直接关系着潮汐观测数据[3]。验潮仪（水位计）则主要用于海洋、河流和湖泊湖位（水位）的测量，根据测量原理的不同，可分为浮子式、压力式和声学式 3 种[4]。为了提高我国海洋潮位观测水平，需要开展验潮仪（水位计）的计量检测技术研究，研制符合要求的计量标准器和装置。海洋潮位计量标准设备是我国海洋潮位量值的传递源头，其技术指标的大小直接影响我国海洋潮位数据的准确性，对海洋预报、工程建设等涉海业务的科学发展带来严重影响，且具有重要意义。

经实地调研，国外验潮仪（浮子式）多采用固定水尺法，通过对比试验对潮位仪进行校准。我国验潮仪则主要在实验室内，通过验潮仪检定装置进行标定。装置主要由检定水塔、贮水池、电荷耦合器件（Charge Couple Device，CCD）摄

收稿日期：2020-04-02
基金项目：国家重点研发计划资助项目（2017YFC0306503）
作者简介：朱丽萍（1986-），女，硕士，工程师，主要从事波潮气象计量检测技术研究。E-mail: zhulipingouc2010@163.com
通讯作者：胡波（1982-），男，本科，高级工程师，主要从事海水温盐深计量检测技术研究。E-mail: hubo@ncosm.org.cn

像头、因瓦标准尺、控制系统等组成。因瓦标准尺作为主标准器，通过 CCD 摄像头读取当前水位对应因瓦标准尺刻度作为水位标准值。目前，我国已建验潮仪检定装置共 4 家单位，包括国家海洋标准计量中心和 3 个分站（北海标准计量中心、东海标准计量中心和南海标准计量中心），4 家单位检定装置的主标准器及检定装置的技术指标一致。国家海洋标准计量中心于 1996 年获得授权并开展相关计量检定业务，3 个分站目前还未获得授权，未开展相关业务。

受多个因素的影响，验潮仪检定装置在技术指标和硬件配置等方面存在一定的不足。研制一种精度高、测量结果不受外界环境影响的技术 / 检测装置是当前的迫切需求。基于上述要求，激光追踪测距技术的高精度、断光路再续、自动追踪等特点能够满足上述要求。因此，本文提出一种基于超高精度激光追踪技术的潮位仪检测新装置。利用该检测装置能够极大地消除环境、设备和实验人员带来的影响，并将技术指标由 U=2 mm，k=2[5]（U 为扩展不确定度，k 为包含因子）提高至 U=0.86 mm，k=2，以更好地满足未来验潮仪（水位计）检测技术的发展需求。

1　验潮计量检测技术

目前，实验室所使用的验潮仪检定装置由国家海洋标准计量中心研制，1996 年通过国家计量标准考核，成为社会公用计量标准。该验潮装置广泛地服务于各涉海部门和机构，为新制造和使用中的浮子式验潮仪（水位计）、压力式验潮仪（水位计）和声学式验潮仪（水位计）提供检定和校准服务。

1. 1　验潮仪检定装置简介

验潮仪检定装置由高 9 m、直径 1 m 的检定水塔、室外贮水池、CCD 摄像头、因瓦标准尺、控制系统等组成，验潮仪检定装置构成示意图（图 1）。

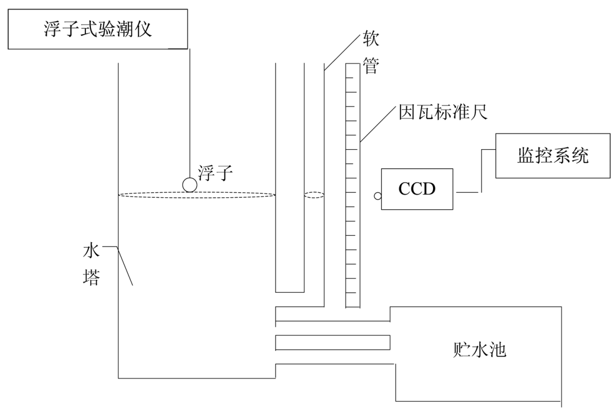

图 1　验潮仪检定装置构成示意图

检定过程中，通过控制系统对电动执行器及水泵进行控制，使水塔内复现 0 ～ 8 000 mm 水位差。进水泵将水从室外贮水池压入水塔内，在水塔底部连接透明软管，利用连通器原理，透明软管内水位与水塔内水位始终保持一致，在透明软管旁边垂直放置一个带有刻度的因瓦标准尺。实验人员通过 CCD 摄像头读取与透明软管内水位对应的因瓦标准尺刻度作为标准水位值，同时读取被检浮子式验潮仪（水位计）测得值，经数据处理，两者进行比较，从而实现对浮子式验潮仪（水位计）的整机检定[6]。

1. 2　验潮仪装置优缺点

当前所使用验潮仪检定装置的优点是能够通过 CCD 摄像头直观地读取 / 观测标准水位值，便于对被检仪器进行检定，但也存在一定的不足影响数据质量。

（1）技术指标方面的不足。验潮仪检定装置的技术指标（示值误差评定的不确定度结果）为：高度测量范围 0 ～ 8 000 mm，扩展不确定度 U=2 mm，k=2。根据标准《浮子式验潮仪》（JJG 587-2016），浮子式验潮仪检定结果准确度等级符合 1 级时，最大允许误差（Maximum Permissible Errors，MPE）为 ±3 mm。上述两个结果不能严格遵守《测量仪器特性评定》（JJF 1094-2002）中“示值误差评定的测量不确定度对符合性评定的影响可忽略不计的要求：$U \leq 1/3$MPE”的要求。因此如果严格遵守《测量仪器特性评定》（JJF 1094-2002）的规定，就必须提高验潮仪检定装置的技术指标即示值误差评定的不确定度结果。在被测

仪器重复性不改变的情况下，需要通过提高标准器的技术指标即减小标准器带来的不确定度分量，达到提高验潮仪检定装置技术指标的目的。

（2）验潮仪标准水位值读取受外界光线强度影响大。通过 CCD 摄像头读取标准水位值时，需要借助室外光线，但光线太强或太弱均会导致成像效果模糊不清，影响读取效果，即中午光线最强或傍晚光线最弱时影响较大。

（3）透明软管影响读数效果。软管内水质为与外界大气相通的自来水，软管内壁易滋生微生物，导致透明度下降，影响摄像头中的成像效果。为保证透明度，只能频繁更换水质和软管，不能解决根本问题。

（4）主标准器易生锈，更换成本高。主标准器因瓦标准尺是铟钢材质，长期暴露于潮湿环境易生锈，影响读取数据的清晰度。3 个分站地处近海，主标准器生锈情况更为严重。更换主标准器定制工期长、费用高。

2　基于激光追踪技术的验潮计量检测技术

2.1 激光追踪技术简介

激光跟踪测量技术是一种集合激光干涉测距技术、光电探测技术、精密机械技术、计算机及控制技术等各种先进技术的高精度、大尺寸、球坐标测量技术，具有测量范围广、精度高、实时快速等优点[7-8]。表 1 为美国自动精密工程公司（Automated Precision Inc.，API）第四代激光追踪仪技术指标。

表 1 美国 API 公司第四代激光追踪仪主要技术指标

序号	技术参数	技术指标
1	空间测量精度（双激光）	10 μm +5 μm/m
2	空间测量精度（单激光）	15 μm +5 μm/m
3	长度分辨力	0.5 μm
4	最大跟踪速度	6.0 m·s^{-1}
5	测量距离（半径）	大于 20 m
6	采样速率	1 000 点 /s

由表 1 可见，激光追踪仪各项技术指标较高，其中长度分辨率达到 0.5 μm，是因瓦标准尺分辨率 1 mm 的 2×10^3 倍，最大追踪速度和采样速率也能更好地实现远程精准测量。

2.2 激光追踪技术原理

激光追踪技术是通过靶镜反射、跟踪反射激光束，实现对空间运动目标的跟踪测量。激光追踪技术测量原理见图 2。

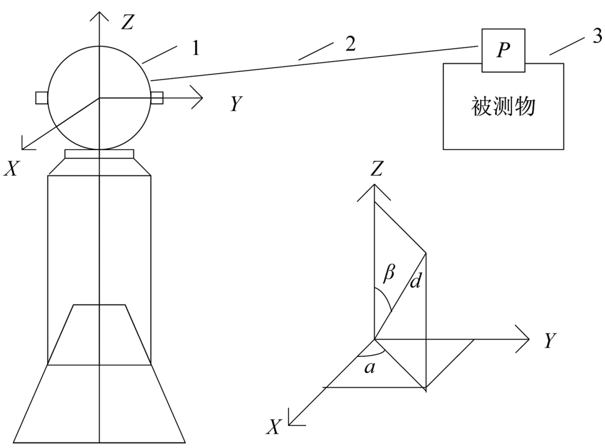

图 2 激光追踪技术测量原理

激光跟踪仪 1 投射激光束 2 至靶镜 3，靶镜 3 将其光束按原路反射回跟踪仪。激光追踪仪通过激光干涉仪及 2 个角度编码器测得被测目标的空间距离、水平角和垂直角，然后按球坐标测量原理得到空间点的三维坐标 x, y, z[9]。因此，只要靶镜接触或沿着被测目标移动即可获得被测目标的空间坐标。被测目标的空间坐标由公式（1）～（3）给出 [10-11]：

$$x=d\sin\beta\cos\alpha \tag{1}$$

$$y=xd\sin\beta\sin\alpha \tag{2}$$

$$z=d\cos\beta \tag{3}$$

式中：d 为被测目标的空间距离；α，β 为被测目标水平方位角和垂直方位角。

2.3 基于激光追踪技术的验潮计量检测装置

激光追踪技术具有高精度、断光再续、自动追踪等特点，基于上述特点将激光追踪仪作为验潮仪检定装置的主要计量标准器，经理论分析与实验验证能够实现对浮子式验潮仪（水位计）的计量检定。基于激光追踪原理的潮位检测新装置构成示意图见图 3。

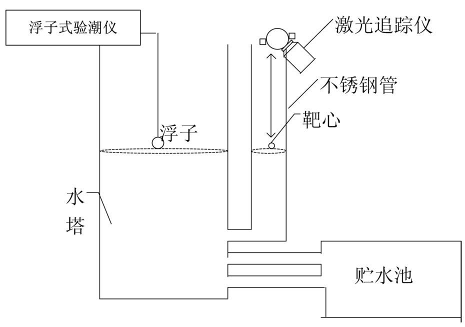

图 3 基于激光追踪原理的潮位检测新装置构成示意图

在水塔底部连接一个不锈钢管，与水塔组成连通器。不锈钢管直径不少于 20 cm，用于放置固定靶镜的浮体。通过控制系统对电动执行器及水泵进行控制，使水塔内复现 0 ～ 8 000 mm 水位差。进水泵将水从贮水池压入水塔内，水面稳定后，激光追踪仪测算当前水位值作为标准水位值，读取被检浮子式验潮仪（水位计）水位值，实现整机检定。

每 1 000 mm 作为一个检定点，第一个检定点为 200 mm 附近。当水面缓慢上升至检定点，稳定 2 min，激光追踪仪测量靶镜空间坐标并计算得到水位值，再移动靶镜位置 2 次。取 3 次靶镜不同位置测算的平均值作为当前水位标准值；同时读取一次浮子式验潮仪的测量值作为仪器示值（被测值）。打开水阀及进水泵，水位上升至 1 200 mm 点附近，依照上述方法，直至完成 0 ～ 8 000 mm 水位上升过程和下降过程的检测。为减小测量误差，每次移动靶镜位置，至少稳定 2 min 再测量。

3　基于激光追踪原理的验潮仪计量检定装置不确定度评定

3. 1 测量模型

$$\Delta h=h_x-h_s \tag{4}$$

式中：Δh 为 被检验潮仪（水位计）的水位示值误差；h_x 为被检验潮仪（水位计）的水位示值；h_s 为 验潮仪检定装置的标准水位值。由于 h_x 和 h_s 互不相关，则：

$$u_c^2=c_x^2u^2(h_x)+c_s^2u^2(h_s)=u^2(h_x)+u^2(h_s) \tag{5}$$

3. 2 分量计算

基于激光追踪技术的验潮仪检测新装置误差来源：一是被检仪器测量重复性引入，二是计量标准设备引入。计量标准设备引入误差主要是激光追踪仪测量不确定度带来的。

3. 2. 1　被检验潮仪（水位计）　测量重复性引入的标准不确定度分量 $u(h_x)$ 以浮子式验潮仪（水位计）SCA11-3A 为例。潮位升高至 4 000 mm 校准点，标准水位值达到稳定后，读取被校验潮仪（水位计）示值 10 次，利用贝塞尔公式获得实验标准差，具体数据见表 2。

表 2 浮子式验潮仪重复性测量数据

标准值 /mm	仪器示值 /mm				
4 000	4 010	4 010	4 009	4 010	4 010
	4 009	4 010	4 010	4 010	4 010

由表 2 可知，计算 4 000 mm 水位平均值：
$\overline{m}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}m_i=4\,009.8\ mm$

水位测量重复性：

$$s=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(m_i-\overline{m})^2}{n-1}}=0.42\text{ mm} \tag{6}$$

根据贝塞尔公式，计算测量重复性引入的标准不确定度为 $u(h_x)$=0.42 mm。

当被校仪器重复性引入的不确度分量大于其分辨力引入的不确定分量时，应该用重复性引入的不确定分量代替分辨力分量，即二者取其较大者。被检的仪器带数字显示装置，分辨力为 1 mm，其分辨力引入的标准不确定度分量为 0.29 mm，小于 0.42 mm，所以取重复性引入的不确度分量 0.42 mm。

3. 2. 2　计量标准设备引入的标准不确定度分量 $u(h_s)$ 以测量半径为 80 m、单聚光动态测量的激光追踪仪作为主标准器，根据中国计量科学研究院提供的校准证书显示最大允许误差为 15 μm +5 μm/m，当取长度为 10 m 时，标准不确定度分量为

$$u(h_s)=(15\mu\text{m}+5\mu\text{m}\times 10)/\sqrt{3}=37.5\mu\text{m}=0.037\,5\text{mm} \tag{7}$$

3. 3　合成不确定度

$$u_c=\sqrt{u(h_x)^2+(h_s)^2}=\sqrt{0.42^2+0.0375^2}\text{ mm}\approx 0.43\text{mm} \tag{8}$$

取包含因子 $k=2$，则扩展不确定度为

$$U=ku_c=2\times 0.43\text{ mm}=0.86\text{ mm},\ k=2 \tag{9}$$

综上，以超高精度的激光追踪仪作为主标准器，验潮仪检测新装置的扩展不确定度 U=0.86 mm，k=2 满足《测量仪器特性评定》（JJF 1094-2002）对计量标准装置 $U\leqslant 1/3$ MPE 的要求，能够对高精

度浮子式验潮仪（水位计）量值溯源提供更加可靠的保障。

3.4 两种测量原理的试验数据分析

2018 年 4 月和 2019 年 8 月实验室分别利用当前检定装置（因瓦标准尺作为主标准器）和新检测装置（激光追踪仪作为主标准器）对 0 ～ 8 000 mm 水位范围进行现场试验，得到水位上升过程的对比结果。2018 年对比结果见表 3，2019 年对比结果见表 4。表中 H_Y 为实验人员读取当前检定装置水位的平均值，H_J 为新检测装置测算水位的平均值。图 4 为两次对比数据差值绝对值随水位值的变化情况。

表 3 2018 年试验两套装置测得值对比结果

检测点 /mm	H_Y/mm	H_J/mm	H_Y-H_J/mm
0	0	0.000	0.000
1 000	995	995.087	-0.087
2 000	2 001	2 001.552	-0.552
3 000	3 004	3 003.638	0.362
4 000	4 001	4 000.416	0.584
5 000	5 004	5 003.792	0.208
6 000	6 003	6 003.292	-0.292
7 000	7 005	7 005.468	-0.468
8 000	7 953	7 954.292	-1.292

表 4 2019 年试验两套装置测得值对比结果

检测点 /mm	H_Y/mm	H_J/mm	H_Y-H_J/mm
0	0	0.000	0.000
1 000	1 001	1 001.657	0.657
2 000	2 002	2 002.738	0.738
3 000	3 002	3 002.989	0.989
4 000	4 007	4 007.153	0.153
6 000	6 004	6 003.451	-0.549
7 000	7 006	7 005.831	-0.169
8 000	7 903	7 904.834	1.834

注：1. 2019 年 5 000 mm 测量数据出现异常值，剔除。

2. 表中的检测点并非实际水位点，实际水位点在检测点附近。8 000 mm 测得值均偏小，是因该检测点水位太高接近水塔口，受装置机械构造影响，所以控制实际水位点略小于 8 000 mm。

表 3 和表 4 试验数据显示，随着水位的升高，除 8 000 mm 检测点外，其他检测点两者差值均小于 1 mm，说明两种原理的测量结果均能较好地显示当前的水位值。从显示分辨力方面看，新检测装置显示分辨力更高。当前检定装置的最小分辨力为 1 mm，水位数据只能精确至整毫米；新检测装置最小分辨力为 0.5 μm，经测算后，水位数据可精确至整微米，后者分辨力是前者 10^3 倍。结合技术指标方面看，前者扩展不确定度 U=2 mm，k=2，后者扩展不确定度 U=0.86 mm，k=2，后者测量精度是前者测量精度的 2 倍多。综上，新检测装置测算的数据能更加精确地反映当前的水位值。

图 4 是两种计量标准器数据差值绝对值随水位的变化情况。在 0 ～ 8 000 mm 水位范围，差值绝对值分别为 0.087 ～ 1.292 mm 和 0.153 ～ 1.834 mm，对比曲线基本一致。在 0 ～ 6 000 mm 水位范围内，差值绝对值均小于 1 mm，8 000 mm 水位点差值绝对值相对较大，分别为 1.292 mm 和 1.883 mm，经分析主要原因是两次试验进行至 8 000 mm 水位点时，接近正午时分，阳光较强，实验人员读取因瓦标准尺刻度值时，刻度图像模糊，影响读数效果，也再次验证当前装置读数质量受外界影响较大；新检测装置测量时，受水面稳定度的影响也要考虑，但基于实验过程中，水位上升过程缓慢，每次读数之前水面稳定时间至少达到 2 min，所以可认为水面稳定度对该点误差的影响非常小，可忽略。

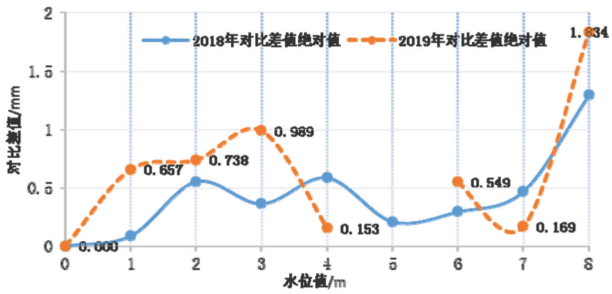

图 4 差值绝对值随水位值变化图

4 结 论

验潮仪检定装置的指标直接影响着潮位仪（水位计）的量值溯源结果。本文指出了当前检定装置在技术指标和硬件方面的不足。针对需求，创造性地提出了一种以激光追踪技术为主，结合当前检测装置配置的潮位计量检测新装置。相比当前装置的技术指标 U=2 mm，k=2，新检测装置指

标可提高至 U=0.86 mm，k=2，是前者的 2 倍多，能够更好地满足《测量仪器特性评定》（JJF 1094-2002）对计量标准装置的要求。

通过对比 2018 年和 2019 年两次现场试验对比结果显示，相比当前的检定装置，新检测装置能够更加精确地测算水塔内的水位值，且测算结果不受外界环境和人为因素的影响；水面稳定度的影响非常小，可忽略。所以，基于超高精度激光追踪原理的海水潮位计量检测技术能够提高技术指标，弥补硬件不足，更好地满足未来高精度验潮仪（水位计）量值溯源需求，对提升计量检测标准技术水平，提升我国海洋潮位监测数据的准确可靠性，具有重要意义。

参考文献：

[1] 任美锷 . 海平面研究的最近进展 [J]. 南京大学学报 : 自然科学版 ,2000,36(3):269-279.
[2] 刘杜娟 . 相对海平面上升对中国沿海地区的可能影响 [J]. 海洋预报 ,2004,21(2):21-28.
[3] 阮锐 . 潮汐测量与验潮技术的发展 [J]. 海洋技术 ,2001,20(3):68-71.
[4] 于惠莉 , 程绍华 , 胡波 , 等 . 验潮仪（水位计）检定实验的数据记录及处理程序简介 [J]. 计量技术 ,2016,(10):71-73.
[5] 朱丽萍 , 于建清 , 秦鑫培 , 等 . 验潮仪检定装置量值溯源技术的研究 [J]. 计量技术 ,2019,(7):49-51.
[6] 高占科 , 于惠莉 , 索利利 , 等 . 水位计（验潮仪）的检定和校准 [J]. 计量技术 ,2007,(7):53-55.
[7] OUYANG J F, Liang Z Y. Research of measuring accuracy of laser tracker system[C]// Proceedings of SPIE –The international Society for Optical Engineering,2006,6280-6286.
[8] OUYANG J F, Liu W L. Angular error calibration of laser track system[C]//Proceedings of SPIE - The international Society for Optical Engineering,2006,6344-6348.
[9] 欧阳健飞 , 刘万里 , 闫永刚 , 等 . 激光追踪仪坐标测量精度的研究 [J]. 红外与激光工程 ,2008(37):15-18.
[10] Liu W L. Misalignment error calibration of faro retro probe for laser tracker system[J]. Chinese Optics Letters,2007,5(5):281-283.
[11] 欧阳健飞 , 夏飞 , 刘万里 , 等 . 激光制导测量机器人系统运动学分析 [J]. 红外与激光工程 ,2008,37(1):79-81.

Study on the Seawater Tidal Measurement Technology Based on Ultra-high Precision Laser Tracking Principle

ZHU Li-ping, HU Bo, YU Xiao-yan
National Center of Ocean Standards and Metrology, Tianjin 300112*, China*

Abstract: In order to improve the technical index of tidal calibrating device, a calibrating device based on ultra-high precision laser tracking principle is put forward in a creative manner. The technical index of the new device can be improved to U=0.86 mm, k=2, which can meet Performance evaluation of measuring instrument (JJF1094-2002) for the measurement standard device. The results of test result of 0-8000 show that the absolute value curves of the differences measured by the two devices are the same basically, and the maximum values are 1.292 mm and 1.883 mm at 8000 mm, respectively. The main reason is that reading data are affected greatly by the external strongest light at 8000 mm in the current device. The new device not only has higher accuracy but also will not be affected by the external environment, can be better to meet the requirements of the high-precision tide gauge. The paper has great importance for improving the measurement and detection technology of the tidal gauge and ensuring accurate and reliable tide data, and also for improving our country marine forecasting and integrated ocean management and so on which has great theoretical and practical significance.

Key words: tidal gauge; laser tracking technology; tidal calibrating device; measurement standard device