

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.01.01

垂准仪的量值溯源与传递问题

李灿

(宜昌市计量测试所, 湖北 宜昌 443005)

摘要: 具体论述了垂准仪量值溯源与传递中存在的实际问题, 包括: 缺少高准确度的垂准仪校准装置、垂准仪自身的重力线传感器存在误差、激光垂准仪的准确度难以保证。详细分析了重力线与铅垂线之间的关系, 解释了不同地理位置铅垂线不一样的原因。阐述了解决垂准仪量值溯源与传递问题的思路。

关键词: 垂准仪; 重力线; 属性; 主客方; 对靶; 系统误差

中图分类号: TB92; TH761

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)01-0001-04

The Problem of Measurement Traceability and Transmission of the Plumb Aligner

LI Can

(The Institute of Metrology and Measurement of Yichang, Yichang 443005, China)

Abstract: The practical problems in tracing and transferring the value of the vertical collimator are discussed in detail, including the lack of high accuracy calibration device for the vertical collimator, the error of gravity line sensor of the vertical collimator itself, and the difficulty of ensuring the accuracy of the laser vertical collimator. The relationship between gravity line and plumb line is analyzed in detail, and the reasons why plumb line is different in different geographical positions are explained. The idea to solve the problem of traceability and transmission of the value of the vertical collimator is expounded.

Key words: plumb aligner; gravity line; attribute; host and visitor; toward-target; systematic error

0 引言

在垂准仪问世之前, 最直观、最准确的垂直准线计量器具当属垂球。在垂准仪已广泛应用的今天, 垂球仍在广泛使用。在高度为 50 ~ 100 m 的高层建筑物测量中, 虽然垂球重达 10 ~ 20 kg^[1-2], 但其可靠性令人信服, 尤其是在建筑物的变形观测中。为什么最简单的垂直准线计量器具——垂球, 这个唯一的未被纳入国家法定计量器具管理体系的垂直准线计量器具、唯一的集工作计量器具和标准计量器具为一体的垂直准线计量器具, 往往能完胜一般被认为是后来居上的垂准仪呢? 垂准仪的问题出在哪里? 为什么还有离不开钢丝和垂体的现代版垂球不断出现呢?

1 实际问题

准确度是评价垂直准线计量器具优劣的最高标准。自从 2002 年垂准仪被纳入国家法定计量器具管理体系^[3]以来, 一直没有一个统一认可的法定的校准垂准仪这杆“秤”的“砝码”。作为工作计量器具, 不能缺失与垂准仪配套的标准计量器具, 不能缺失与之匹配的规范科学的量值溯源与传递标准。其实, 关于这个问

题一直众说纷纭。

1.1 观点一

用于垂准仪校准的“砝码”从未缺席, 而且准确度不低, 因为无论是室外法还是室内法, 都可以有性能胜过平面反射镜的三角棱镜参与, 特别是室内法, 还可以用性能胜过双平行光管水平准线的双摆位水平准线作为垂直转换准线。

姑且认定三角棱镜和双摆位水平准线都几乎完美, 但在校准“竖轴与望远镜视准轴(或激光光轴)的同轴度”这个最重要的项目时, 垂准仪的脚螺旋不得被旋转(产生倾斜误差), 因为三角棱镜和双摆位水平准线都不具备三维对靶能力, 仪器的安平状态难以保证。

如此倾斜校准, 整平使用, 与一步到位的垂球准线相比, 这个“砝码”有原理误差(方法误差)。还有, 水平准线位于二维平面上, 而垂直准线须定位于三维空间中, 不具备三自由度对靶能力的“砝码”传递的铅垂线量值应该还包含这一项原理误差(调整误差)。

通常用于垂准仪校准的三角棱镜是一种 W II - 90° 型平面棱镜, 只含有一个主截面。它除了 4 个工作面之外, 还有 2 个非工作面, 在正常情况下, 有用的光

线不会与这两个非工作面发生作用^[4]。这种五角棱镜的使命是保证光轴转角恒等于 90°，前提条件之一是相关光线均位于两反射面的公共垂直面内^[5]。进而言之，反射棱镜，无论是平面棱镜还是 K II - ψ - φ 型空间棱镜^[6]，被用作动态光学元件时的动态范围都是受到严格限制的，这是五角棱镜不具备三维对靶能力的主要原因。

1.2 观点二

不需要把垂准仪纳入国家法定计量管理体系，使用者自己就可以解决量值溯源与传递问题，因为重力线无处不在，垂准仪本身有重力线传感器。

在对建筑物的铅垂度要求不高的年代或场合，这种做法虽被勉强认可，但是，这种做法实际上是在 1/30000 ~ 1/40000 铅垂准确度范围内凑合^[7]——靶标中心与垂准仪视准轴没有也无法严格地共处于同一条铅垂线上，这是承担超高层建筑测量任务的使用者难以回避的，是在铅垂准确度 $\geq 1/200000$ 时不能容许的。若以垂准仪为主方，坐等靶标（客方）来对准，两人操作，校准高度最低为 10 m，很难避免错位。就算此时完全对准或取平均值，仪器本身不能完全消除的误差之一——长水准器轴与竖轴的垂直度误差，也会一直影响到同轴度测量。10 m 校准高度的铅垂准确度也很难与 50 ~ 100 m 校准高度的垂球的准确度相比，以短替长，只会使竖轴与望远镜视准轴（或激光光轴）的夹角更大。校准高度上升到 10 m 以上时，影响对靶的室内外因素就更多，靶标不换用平行光管，或没有对平行光管的三维动态调姿对靶能力，同轴度也难以提高，而且现场一般也不具备平行光管使用能力。若主客方换位，则垂准仪势必倾斜，同轴度会更低。

垂球有缺陷，但人们知道它的不足在哪里，和不知道校准问题出在哪里的垂准仪相比，可靠性更高。垂准仪优于垂球的前提条件是规范科学的量值溯源与传递，若置众多的原理误差于不顾或不知，结果只能是后来居下。

1.3 观点三

激光垂准仪整平后，旋转一周，取其光斑轨迹中心即得铅垂线，自检自校完成，不必纳入国家法定计量管理体系。不深入透彻地分析，这个观点似乎没错，其实不然。对于光学 + 激光一体化的垂准仪而言，激光部分的铅垂准确度依赖于纯光机部分的达标并被绑定。例如，望远镜调焦运行误差若不达标，投射到不同高度上的激光聚焦点就不能被认为是共在一条铅垂线上。

对于激光自动安平垂准仪而言，其核心——自动安平补偿器若不能给出正确的补偿量，现场使用者是察觉不出其系统误差的，即不能识别虚假精度（必须用专门的仪器设备加以检校），因此测量准确度难以保证，即取其光斑轨迹中心得到的不一定是铅垂线。

“过补偿”或“欠补偿”所引起的误差就是补偿器的系统误差，这种误差与垂准仪的倾斜角成正比^[8]。还有，对于用作超高层建筑测量任务的激光自动安平垂准仪而言，若没有防地磁结构，还得考虑补偿器的磁致误差^[9]。

由此可知，激光垂准仪虽有一目了然、方便快捷等优点，但并不一定时时处处都在最准确的行列，其聚焦光斑大、发散、漂移，对环境敏感和人眼对靶分辨力有限等诸多问题都不可忽视，定期进行计量检定更是必不可少。

2 理论问题

众所周知，垂准仪是以重力线 GL (gravity line) 为基准、给出铅垂线 PL (plumb line) 的光学仪器。既然如此，垂准仪的量值溯源与传递为什么至今难以统一呢？

2.1 问题一

GL 和 PL 之间是一种传承依附关系吗？应该是，GL 是理想像（真值），PL 是有“像差（误差）”的实际像（实际值），何以见得？看问题二。

2.2 问题二

GL 和 PL 这两个名词指示的是同一事物吗？概念阐述清楚后，接着往下分析才有意义。

地球空间任意一质点，都受到地球引力和由于地球自转所产生的离心力的作用；此外，它还受到其它天体（主要是月亮和太阳）的吸引。不过，月亮的引力大约是地球引力的 10^{-7} ，太阳的更小，一般可以忽略不计。故地球的重力矢量 \mathbf{g} 等于其引力矢量 \mathbf{F} 及离心力矢量 \mathbf{P} 的矢量和

$$\mathbf{g} = \mathbf{F} + \mathbf{P} \quad (1)$$

重力 \mathbf{g} 的方向线就是大地重力线。离心力 \mathbf{P} 在赤道达最大值，但其数值 $< |\mathbf{F}| / 200$ ，所以在 $|\mathbf{F}| \gg |\mathbf{P}|$ 的情况下，在一般应用中，可以认为 $\mathbf{g} \approx \mathbf{F}$ ^[10]。

《测量学》把与特定重力等位面——大地水准面正交（垂直）的直线称为铅垂线，认定其就是重力 \mathbf{g} 的方向线，即重力线^[11]。换言之，铅垂线 = 重力线，这不准确，在计量学领域不能被认可。

同重力方向重合的线被认为是铅垂线，实际上通

过媒介——“铅垂”感知的线没有也不可能与重力线完全重合。没有重力线就没有铅垂线，但没有铅垂线可以有重力线，即重力线和铅垂线是有着主从关系的两条线。重力线通过铅垂线显现其作用，但铅垂线都是人造的，它们本质上都是重力传感器的铅垂线。长/圆水准器利用的是液体受重力作用后气泡居最高处的特性，而自动安平补偿器本质上都是重力摆。故无论是(金属)垂球铅垂线、水准器铅垂线还是补偿器铅垂线，都不可能使制造误差和使用误差归零，因此结论为：铅垂线不等于重力线，重力线是铅垂线的渐近线。

2.3 问题三

地球上不同位置处的铅垂线是否一样？否。考虑到地球的形状及重力场，地球上各点的重力不仅大小不相同，且重力线的方向彼此既不平行也不相交于一点，故大地水准面为不规则的封闭曲面(似球面)。因此，与大地水准面正交的重力线(铅垂线)是有地籍的。

引力 F 是由地球形状及其内部质量分布决定的。由于地球的质量分布不均匀，质量密集(例如高山或比较密集的矿藏)，必然“吸引”铅垂线；质量不足(亏损)(例如海洋，特别是海渊)，必然“推压”铅垂线，这就是地面上各点的铅垂线方向产生不规则变化的原因^[12]。

《测量学》的研究范围是不大的地球表面，以至于地球表面在这个范围内被认为是平面，即该范围内的铅垂线被认为是彼此平行的，换言之，该平面内的铅垂线可以相互代替(传递)。取地球平均半径 $R = 6371$ km，以最精密距离丈量的容许误差 10^{-6} 划界，计算得出结论：在半径为 11 km 的圆面积(380 km²) 范围内，可以把水准面当作水平面来看待^[13-14]。推而论之，超出这个范围的“传递铅垂线”，其与重力线的符合程度会越来越低。

简言之，《测量学》认为在不大的地球表面上，铅垂线都一样。《大地测量学》认为，在全球或相当大范围内的地球表面上，铅垂线各不相同。因为重力场属于《物理大地测量学》范畴，严格的《计量学》应该认定：铅垂线都是因地而异的。

3 解决问题的思路

21 世纪城市建筑的总体趋势是建设垂直型建筑物，没有最高，只有更高。相应地，垂准仪校准应该是没有最好，必须更好。然而，若对其量值溯源与传递问题的认知达不到相应高度，满足于对离散个体进行计数时的零误差，美好愿景的实现就会受到影响。

看清事物格局，抓住主要矛盾，找出本质上的数学物理模型才会使问题迎刃而解。计量就是将被测量与标准量进行比较。要确定垂准仪的铅垂指向误差并校正之，就要摆正被测量与标准量之间的主客方位置关系，遵循阿贝(Ernst Abbe)共线原则，并且使“秤”与“砝码”成动态一体化三维配置。这是解决垂准仪的量值溯源与传递问题的一把现实有效而又足够准确的“钥匙”，“顶杆式”垂准仪校准装置就是这方面的一个成功的例子^[15-16]，当然，它应该还有升级版。

重力线的自然属性和地域属性决定了垂准仪量值溯源与传递的方式方法。单论校准垂准仪这杆“秤”的“砝码”，综上所述，这个“砝码”不可能静止孤立地存在，至少在跨界式的新校准方法出现之前。长/圆水准器和自动安平补偿器，既是垂准仪的工作标准器，也可以是垂准仪计量校准装置的标准器。目前为止的研究成果表明，水平准线是独立量具，而垂直准线是从属量具。单论核心校准项目，按行政体系自上而下进行量值传递显然违背重力线的自然属性和地域属性，也没有必要舍近求远。但对于实现全部校准项目、满足社会公信认可度、引入第三方监督、保证工程质量安全等方面的考量而言，把垂准仪纳入国家长度(角度)计量体系，由专门机构和部门进行属地管理、定期进行全面校准，仍然是不可或缺的。

参 考 文 献

- [1] 李希灿, 齐建国. 测量学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [2] 蒋辉. 测量学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2018.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1081-2002 垂准仪校准规范[S]. 北京: 中国计量出版社, 2002.
- [4] 毛文炜. 光学工程基础(一)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [5] 北京工业学院光学教研室. 应用光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [6] 邱松发, 毛静华. 光学仪器装配与调整[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [7] 陈昌乐. 建筑施工测量[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [8] 切列米辛 M C. 自动安平水准仪(构造、检验及应用)[M]. 刘振骥, 译. 北京: 测绘出版社, 1983.
- [9] 李以赫, 戴慧堂. 自动安平水准仪的原理和检修[M]. 北京: 测绘出版社, 1985.
- [10] 孔祥元, 郭际明, 刘宗泉. 大地测量学基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001.
- [11] 付迎春, 李长辉, 胡华科, 等. 测量学[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

