

利用平静液面反射激光进行平面联系测量的研究

Research on the Connection Surveying of Plane Using the Laser Reflected from the Calm Liquid Surface

韩国卿¹ 桂朋¹ 赵越²

Guoqing Han¹ Peng Gui¹ Yue Zhao²

1. 中铁大桥局第七工程有限公司 中国·湖北 武汉 430050

2. 长安大学公路学院 中国·陕西 西安 710064

1. The 7th Engineering Co., Ltd., MBEC, Wuhan, Hubei, 430050, China

2. Highway College of Chang'an University, Xi'an, Shaanxi, 710064, China

摘要: 为实现地下结构与地面结构高精度平面联系测量, 基于激光投点技术提出了一种利用平静液面反射激光进行平面联系测量的方法。该方法利用液态金属表面的镜面反射作用, 将其中心部分作为水平镜面反射面, 通过水平镜面入射激光和反射激光重合得到垂直于水平镜面的竖直激光线; 从而通过在不同高度上获取竖直激光的投点, 将平面坐标在不同高度进行传递。通过在武汉地铁8号线洪小区间竖井的投点试验对所提出方法精度进行了验证。为了避开大气折光对光路的影响, 试验采用不同波长的激光进行大气折光验证。试验结果表明, 该方法测量精度较高, 且不受投点仪轴系误差影响, 能够准确检测到支撑设施因环境变化引起的仪器倾斜, 适用于城市狭小竖井、精度要求比较高的矿井、城市高层建筑的平面坐标传递。

Abstract: In order to realize high-precision plane connection measurement between underground structure and ground structure, a method of plane connection measurement using reflected laser from calm liquid surface is proposed based on laser projection technology. In this method, the central part of the liquid metal surface is taken as the horizontal mirror reflecting surface, and the vertical laser line perpendicular to the horizontal mirror is obtained by the coincidence of the incident laser and the reflected laser of the horizontal mirror; thus, the plane coordinates are transferred at different heights by acquiring the vertical laser projection points at different heights. The precision of the proposed method is verified by the test of the vertical shaft between the flood zones of Wuhan Metro Line 8. In order to avoid the influence of atmospheric refraction on the optical path, the experiment uses different wavelengths of laser to verify atmospheric refraction. The test results show that this method has high measurement accuracy and is not affected by the axis system error of the point projector, it can accurately detect the instrument tilt caused by the environmental change of the supporting facilities, it is suitable for the plane coordinate transmission of the narrow vertical shafts in cities, mines with high accuracy requirements and high-rise buildings in cities.

关键词: 液态金属; 联系测量; 平静液面; 水平面; 旁折光

Keywords: liquid metal; contact measurement; calm the liquid level; level; side refraction

DOI: 10.12346/etr.v4i12.7441

1 引言

在工程施工中, 为了解决地下结构与地面结构相对关系的测量问题, 需要把地面坐标、方位和高程传递到地下, 通常称此项工作为联系测量。一般的联系测量包括平面联系测

量和高程联系测量两部分, 其中平面联系测量常用的方法有联系三角形法、联系四边形法、铅垂仪陀螺经纬仪联合定向法^[1-2]、导线定向测量法等。联系三角形法、联系四边形法需要悬挂垂球, 不可避免地受到垂球的摆幅和摆动周期的影

【作者简介】韩国卿(1983-), 男, 中国河南范县人, 本科, 高级工程师, 从事工程测量、施工监测研究。

响。铅垂仪陀螺经纬仪联合定向法投点则会到投点仪轴系加工误差和脚架变形的影响。导线定向测量法需要合适的长深比,使用范围有限。

近年来,随着光学设备的发展,基于激光投点技术的联系测量因其具有精度高、占用井筒时间短、工艺简单的特点^[3-4],越来越受到测量人员的关注。但现有研究主要集中在投点仪器投射精度,受到仪器加工精度的制约,此方面的研究遇到瓶颈,为了突破仪器加工精度的瓶颈,论文提出了一种利用平静液面反射激光进行平面联系测量方法,利用液态金属表面中心部分的水平镜面,通过反射激光与入射激光的重合,来获取一条垂直于水平面的竖直激光线,利用液体的自水平特性来削弱系统误差带来的影响。

论文通过联系测量模型设计、测量精度预估、现场试验对比,对此种方法的投点精度进行了验证。

2 测量模型设计

模型为了尽可能减小控制网的影响,井上和井下所有的投射点的测量分别使用同一个基准点和后视点,每个投射点与设站点距离相似,并且每个点位间距离的计算采用相同的方法。为了减少测量所用时间,需在竖井内设置三个垂准系统。

2.1 控制网网形设计

本次实验在武汉地铁8号线洪小区间竖井进行,该竖井长26.8m,开挖深度30m,竖井内部净宽11.5m×17.5m。

为保证近井点的稳定和精度,方案将近井点布设在距离井口边缘2~5m的位置,近井点的后视点距离近井点大于300m,近井点及后视点采用强制对中墩,其平面坐标采用二等导线测出。为保证投射点之间的距离具有可比性,将投射点布设在近井点对面的三个边的中部附近^[5],如图1所示。

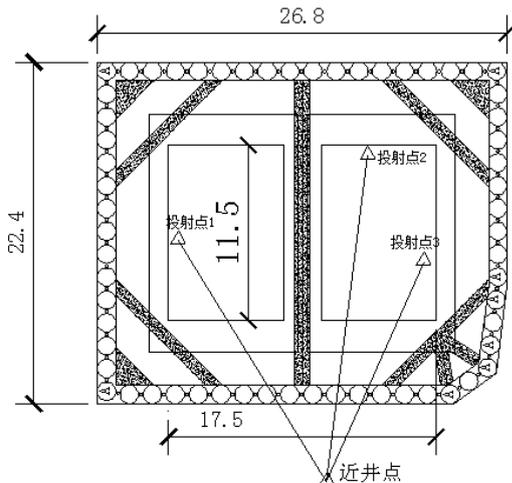


图1 洪小区间竖井控制点布置图 单位(m)

为了便于在竖井底部测量三个投射点间的距离,还需要在竖井底部三个投射点的中央位置布设一个检查点。

2.2 垂准系统设计

因为在传统的激光投点法中,存在着项重要的系统误差:竖直度偏差,其与联系测量高差成正比,主要构成为投点仪器的轴系误差(如M371466型投点仪的垂直度为 $1/(1 \times 10^4)$)和水平气泡的误差和投点仪支撑结构的缓慢变形引起激光投点竖直度偏差^[6]。

为了解决此问题,新方案采用坑底反射盒里的水银液面提供一个绝对的水平面,通过投点仪器发射的激光来获取垂直于水银液面的重力线,从而将井口投射点引入坑底。因为只把水平气泡和仪器整平系统当做参考,而使用平静的液体平面作为标准水平面的参考面,当液面的口径为100mm时,液面面型误差可以达到PV值 $\lambda/3000$ ($\lambda=632.8\text{nm}$),换算后垂直度可达 $1/(2.1 \times 10^9)$,且液面水平度不随支撑结构缓慢变化而改变。考虑到大气折光也将会对光路产生弯曲,虽然大气对竖直光的折射非常微弱,由于大气中压强、温度、相对湿度和二氧化碳含量的不同,导致大气折射率场并不均匀,所以也要排除这些偶然因素对激光的竖直度的影响。为了保证实验结果的精度,必须选择能验证大气折光的实验器材。为了尽量减少光斑大小对测量误差的影响,激光发射器应当具备:光斑大小可调、光斑扩散大小有限;为了验证大气折光的影响,根据不同波长的光折射率不同的原理^[7],需要可激光发射器能发射两种颜色的光束。经过研究我们确定采用JZY-41型激光指向仪。

为了使液面有较大的反射率,宜采用液态金属来做反射面,鉴于常温液态金属汞具有一定毒性,且容易氧化,宜采用低毒液态金属GALINSTAN合金,其熔点为 -19°C 。再考虑到液体表面张力的存在,其液面的边缘是一个曲面,其反射角处处不同,为了避免使激光落在曲面上,还需找出在液面上激光入射角与反射角固定的区域,即当入射光与反射光重合后,移动液面入射光斑与反射光斑不发生分离的区域,即液面的水平镜面区域。又考虑到测量过程全站仪精度的影响,本次测量采用0.5秒级的徕卡TS30全站仪^[8]。

具体实施时将激光指向仪安装在“Z”字形支架上,使用基座将激光指向仪固定,并使其发射端开口向下,在基座下方放置一块玻璃,让激光穿过玻璃照射放在容器内的液态金属表面,通过基座调节激光指向仪的竖直度,让发射光斑和反射光斑重合,移动液态金属,静置一段时间重新观察光斑是否分离,若移动三次后光斑未发生分离,则认为三处反射光斑范围内液面为水平面。然后切换激光指向仪发射激光的颜色,若此时光斑未发生分离,则认为大气折光的影响可以忽略不计,如图2所示。

然后使用柯达灰板捕获光斑,并在柯达灰板上标记光斑中心,测量井口3个光斑中心与全站仪的距离及各光斑中心之间的夹角,完成后撤去柯达灰板。接着将柯达灰板放置竖井底部,同样使用柯达灰板获取各测点光斑中心,并测量光斑中心与全站仪的距离及各光斑中心之间的夹角^[9-10]。测量

完毕后，撤去柯达灰板和液态金属，然后将光斑点标记在地面上。基坑底部的全站仪设站点坐标及投射点坐标可以采用采集的数据通过科傻平差获得。最后将光斑标记在地面上，投点精度则通过上下投射点的间距之差进行计算。

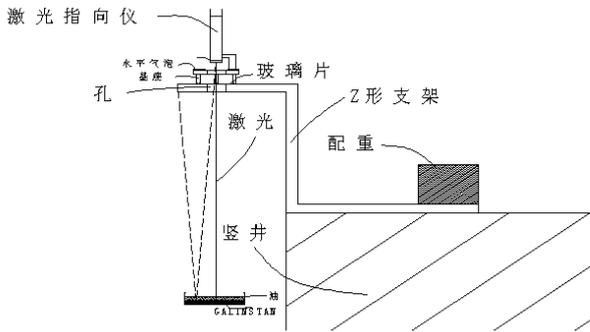


图 2 垂准系统布置图 单位 (m)

3 联系测量精度分析

3.1 精度估算

由图 1 可以看出，在近井点架设全站仪 TS30，用三维坐标法对投射点进行测量，此时误差主要由测距和测角误差

产生，此时投射点坐标精度应为：

$$m_x^2 = m_s^2 \sin^2 Z \cos^2 \alpha + S^2 \cos^2 Z \cos^2 \alpha \left(\frac{m_z^2}{\rho^2} \right) + S^2 \sin^2 Z \sin^2 \alpha \left(\frac{m_\alpha^2}{\rho^2} \right)$$

$$m_y^2 = m_s^2 \sin^2 Z \sin^2 \alpha + S^2 \cos^2 Z \sin^2 \alpha \left(\frac{m_z^2}{\rho^2} \right) + S^2 \sin^2 Z \cos^2 \alpha \left(\frac{m_\alpha^2}{\rho^2} \right) \quad (1)$$

$$m_H^2 = m_s^2 \cos^2 Z + S^2 \sin^2 Z \left(\frac{m_z^2}{\rho^2} \right)$$

不难看出投射点平面坐标中误差为：

$$m_p^2 = m_s^2 \sin^2 Z + S^2 \cos^2 Z \left(\frac{m_z^2}{\rho^2} \right) + S^2 \sin^2 Z \left(\frac{m_\alpha^2}{\rho^2} \right) \quad (2)$$

其中(1)(2)式中： m_x 、 m_y 、 m_H 为投射点的中误差分量， m_p 为投射点的点位中误差， S 为全站仪与投射点间的斜距、 Z 为全站仪天顶距、 α 为后视点与投射点间的一测回水平方向角。 m_s 、 m_z 、 m_α 为 S 、 Z 、 α 的中误差， $\rho=206265$ 。取 $m_s=0.9\text{mm}$ （TS30 测量柯达灰板的测距精度在 2~29m 范围内小于 0.9mm）， $m_z=0.5''$ ， $m_\alpha=2\sqrt{0.5''}$ 。

根据仪器参数和点位关系可推算各投射点中误差，如表 1 所示。

又因投点的垂直度可达 $1/(2.1 \times 10^9)$ ，所以我们认为投点误差可以忽略不计，因此投下的投射点综合推算误差应为 3.2mm。

表 1 投射点中误差推算结果

测点点号	m_{x1}	m_{y1}	m_{p1}	m_α	m_z	m_s	α	Z	S	m_{x2}	m_{y2}	m_{p2}
测点 1	2.5	1.8	3.1	0.5	0.5	0.9	148.4707	91.1219	18.6285	2.6	1.9	3.2
测点 2	2.5	1.8	3.1	0.5	0.5	0.9	187.1302	91.2231	21.6258	2.7	1.8	3.2
测点 3	2.5	1.8	3.1	0.5	0.5	0.9	203.8094	91.1678	15.7853	2.6	1.8	3.2

角度单位：°；距离单位：m；误差单位：mm。

3.2 精度验算

为验证实验结果的精度，可每次在竖井顶部、底部测量投射点并编号，为了减少设站和对中误差，使用全站仪设站后，在竖井顶部、底部必须一站测完所对应的测点的距离和夹角，如图 3 所示。

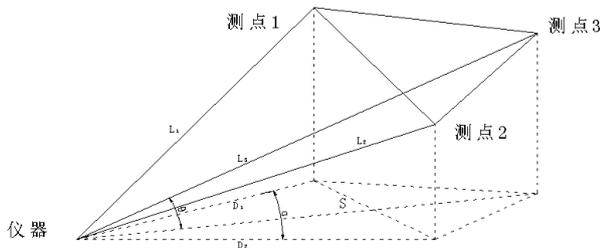


图 3 测点在水平面上的投影关系图

可以看出投射点与全站仪间的平距 D 为：

$$D=L\cos\theta \quad (3)$$

任意两投射点的平距 S 为：

$$S=\sqrt{D_1^2+D_2^2-2D_1D_2\cos\beta} \quad (4)$$

微分 (3) (4) 式，整理后得：

$$dD=\cos\theta dL+L\sin\theta d\theta \quad (5)$$

$$dS=\frac{[(D_2-D_1\cos\beta)dD_2+(D_1-D_2\cos\beta)dD_1-D_1D_2\sin\beta d\alpha]}{\sqrt{D_1^2+D_2^2-2D_1D_2\cos\beta}} \quad (6)$$

对 (5) (6) 式应用误差传播律得：

$$m_D=\sqrt{(m_L\cos\theta)^2+\left(\frac{Lm_\theta\sin\theta}{\rho}\right)^2} \quad (7)$$

$$m_S^2=\frac{[(D_2-D_1\cos\beta)^2m_2^2+(D_1-D_2\cos\beta)^2m_1^2-\frac{(D_1D_2)^2m_\beta^2\sin^2\beta}{\bar{n}^2}]}{D_1^2+D_2^2-2D_1D_2\cos\beta} \quad (8)$$

(3)~(8) 式中： L 为仪器与投射点斜距， θ 为仪器与投射点竖直角， β 为两投射点间的水平角， m_D 为仪器水平测距误差， m_θ 竖直角测角误差， m_β 水平角测角误差， D_1 、 D_2 为仪器与两个不同投射点的平距， m_1 、 m_2 为仪器与两个不同投射点的平距中误差。 m_s 为两个不同投射点间的

平距中误差。

根据(8)式可以计算出竖井顶部、底部三个投射点相互之间的平距及其中误差,及不同位置测得平距之间的不符值的中误差 mm,如表2、表3所示。

表2 仪器与投射点间平距中误差计算结果

投射点 点号	L	θ	D	m_{θ}	M_L	m_D
测点1	18.6285	-1.1219	18.6249	0.5	0.9	0.9
测点2	21.6252	-1.2231	21.6209	0.5	0.9	0.9
测点3	15.7856	-1.1678	15.7820	0.5	0.9	0.9
测点1'	10.5261	-1.1287	10.5261	0.5	0.9	0.9
测点2'	5.3199	-1.1367	5.3199	0.5	0.9	0.9
测点3'	5.9665	-1.2310	5.9665	0.5	0.9	0.9

角度单位: °; 距离单位: m; 误差单位: mm。

表3 投射点间平距中误差及平距之间的不符值中误差的计算结果

投射点间平距	β	S	m_{β}	m_S	m_m
测点1-2	38.6595	13.6182	0.5	0.5	1.2
测点2-3	16.6792	7.9250	0.5	0.9	1.3
测点1-3	304.6613	16.1746	0.5	0.6	1.4
测点1-2	114.4514	13.6183	0.5	1.1	-
测点2-3	89.0113	7.9250	0.5	0.9	-
测点1-3	203.4628	16.1747	0.5	1.2	-

角度单位: °; 距离单位: m; 误差单位: mm。

不难看出,在不考虑投点偏差的情况下,竖井顶部、底部三个投射点平距之间的不符值的计算中误差在1~2mm。

3.3 精度分析

按照前面设计的方案,测量人员在竖井顶部和竖井底部同时架设徕卡 TS30 全站仪测量投射点,数据如表4所示。1~6组为竖井顶部测量投射点数据,7~12组为竖井底部测量投射点数据。为测量过程为保证数据稳定,每测完一组检查入射光斑与反射光斑的重合情况,每测1组耗时控制在30min,1~3和7~9组在上午进行,4~6和10~12在下午进行,测量结果如表4所示。

通过表4可以看出,测点1~2、测点1~3的距离精度优于计算精度,主要是因为计算精度时使用了最不利条件下的最大误差,而实际测量中情况要优于最不利情况,测点2~3的距离精度大于计算精度,说明在投点过程并非理想状态,仍然存在一定误差,根据误差传播定律可以计算出:

$$m_{\Delta s} = \sqrt{m_{1\text{测}}^2 + m_{2\text{测}}^2 + m_{\text{导}}^2} \quad (9)$$

式中: $m_{\Delta s}$ 为竖井上下两次测量距离不符值的误差, $m_{1\text{测}}$ 为在竖井顶部测量距离的误差, $m_{2\text{测}}$ 为在竖井底部测量距离的误差, $m_{\text{导}}$ 为投点误差。取 $m_{1\text{测}}=0.60\text{mm}$, 取 $m_{2\text{测}}=1.20\text{mm}$, $m_{\Delta s}=1.59\text{mm}$ 。

代入(9)可得投点误差 $m_{\text{导}}=0.85\text{mm}$ 。可以看出其他不利条件对测量精度的影响远远大于投射的影响。

表4 投射点间距离的测量结果统计表

项目 组别	测点1-2	测点1-3	测点2-3	测点1-2	测点1-3	测点2-3	$\Delta 1-2$	$\Delta 1-3$	$\Delta 2-3$	$[\Delta \Delta] 1-2$	$[\Delta \Delta] 1-3$	$[\Delta \Delta] 2-3$
	1	13.6175	7.9244	16.1757	13.6173	7.9242	16.1776	0.20	0.20	-1.90	0.04	0.04
2	13.6184	7.9255	16.1737	13.6199	7.9269	16.1757	-1.50	-1.40	-2.00	2.25	1.96	4.00
3	13.6185	7.9253	16.1760	13.6191	7.9267	16.1789	-0.60	-1.40	-2.90	0.36	1.96	8.41
4	13.6183	7.9244	16.1758	13.6197	7.9239	16.1770	-1.40	0.50	-1.20	1.96	0.25	1.44
5	13.6182	7.9254	16.1742	13.6194	7.9273	16.1754	-1.20	-1.90	-1.20	1.44	3.61	1.44
6	13.6191	7.9257	16.1751	13.6202	7.9269	16.1766	-1.10	-1.20	-1.50	1.21	1.44	2.25
7	13.6174	7.9251	16.1757	13.6166	7.9263	16.1775	0.80	-1.20	-1.80	0.64	1.44	3.24
8	13.6181	7.9237	16.1759	13.6197	7.9225	16.1772	-1.60	1.20	-1.30	2.56	1.44	1.69
9	13.6180	7.9249	16.1757	13.6196	7.9234	16.1768	-1.60	1.50	-1.10	2.56	2.25	1.21
10	13.6183	7.9248	16.1743	13.6194	7.9263	16.1730	-1.10	-1.50	1.30	1.21	2.25	1.69
11	13.6174	7.9246	16.1757	13.6169	7.9233	16.1768	0.50	1.30	-1.10	0.25	1.69	1.21
12	13.6174	7.9246	16.1757	13.6185	7.9258	16.1772	-1.10	-1.20	-1.50	1.21	1.44	2.25
中误差										1.10	1.24	1.59

距离单位: m; 误差单位: mm。

4 结论

利用 GALINSTAN 合金静止时的液面，作为完全平行与水平面的反射面，通过确保入射液面的激光与反射激光重合，可以确保激光的竖直；通过变换激光的波长和激光在不同波长情况下折射率不同的原理，来判断坑内是否存在旁折光，测量时不受空气扰动影响，能够探测到旁折光的影响，从而避免在不合适的时间进行测量；通过研究在 30m 范围内使用液态金属进行联系测量的误差小于 1mm，且能满足抗风、抗震、且能侦测到旁折光影响，且不受仪器轴系加工制约。

该实验还发现 GALINSTAN 合金易被氧化，若只做 10m 内短距离投射，在现场可使用透光密闭腔体将其封闭，并将腔体内的空气抽出，灌入氦气，可以防止氧化。若做长距离投射，可在氧化薄膜形成后，使用硬纸板直接刮去氧化薄膜或在 GALINSTAN 上面加入透明的油。

参考文献

[1] 郑文华.地下工程测量[M].北京:煤炭工业出版社,2007.

- [2] 边大勇,卢小平,李永强,等.地铁盾构区间施工测量技术研究[J].测绘通报,2011(4):51-55.
- [3] 崔旭升,潘国荣,李法礼.双联系三角形法在竖井联系测量中的应用[J].大地测量与地球动力学,2010,30(2):156-159.
- [4] 刘静.利用全站仪对地铁联系三角形边长的测量方法研究[J].测绘通报,2015(S1):148-149+173.
- [5] 马全明.城市轨道交通工程精密施工测量技术的应用与研究[J].测绘通报,2010(11):41-45.
- [6] 梁希福,杨自齐,李伟.地铁铺轨基标测量的关键技术及质量控制[J].测绘科学,2010,35(1):104-106.
- [7] GB 50308—2008 城市轨道交通工程测量规范[S].
- [8] 丰勇.陀螺经纬仪在地下长导线测量中的应用[J].测绘通报,2013(S1):143-145.
- [9] 牛学军.城市地铁盾构施工测量若干问题的探讨[D].武汉:武汉大学,2005.
- [10] 王天应,徐亚明.超高层建筑动态特性监测方法研究[J].测绘通报,2017(4):89-92+144.