

# 城市测量垂直角观测误差研究

杨晓明, 宋 玮, 周建业, 马开锋

(华北水利水电学院 河南 郑州 450011)

## Study on Vertical Angle Observation Error in Urban Surveying

YANG Xiaoming, SONG Wei, ZHOU Jianye, MA Kaifeng

**摘要:** 在城市实施精密三角高程测量,其精度主要取决于垂直角测角精度。因城市环境特殊,需要对垂直角观测误差进行深入的研究。大量试验研究表明,观测垂直角使用觇标照准比直接照准棱镜中心测角精度要高;借助脚架竖立单杆棱镜比借助扶尺杆手扶竖立单杆棱镜测角精度要高;垂直角的测角精度有随照准高度降低而降低的趋势;垂直角观测晴天比阴天精度低,夏天比春天精度低,中午比其他时间段精度低;在炎热的夏天观测垂直角,当视线与强吸热体(如汽车、水泥地面)接近时精度明显降低;在夏天中午近地面大气垂直折光系数为负值,视线向上弯曲,使观测的垂直角减小。

**关键词:** 城市测量; 照准误差; 垂直角观测误差; 近地面观测; 大气垂直折光

### 一、引言

城市建设离不开精密高程测量,测距三角高程测量将成为其主要方法。采用一定的技术措施后,在山区和丘陵地区测距三角高程测量可以代替二等甚至一等水准测量<sup>[1-4]</sup>,而在城市能否代替则主要取决于垂直角测角精度。因此,有必要针对城市的特殊环境,对垂直角观测误差进行深入的研究。

### 二、照准目标类型的选取

受城市人流、车辆的影响,在城市进行三角高程测量时,观测照准的棱镜高应在2 m以上。对于2 m高的棱镜,观测时若倾斜 $1^\circ$ ,就会带来0.3 mm的高差误差。因此,观测时应使单杆棱镜处于铅直状态,并用水平丝照准棱镜中心或觇板中心。对于距离测量只需照准棱镜的大致中心,但对于垂直角观测必须照准棱镜的几何中心或固定标志线(如觇板三角标志线,如图1所示)。要将单杆棱镜立稳、立直,还必须借助脚架、竹杆(扶尺杆)等使圆水准器气泡居中。竖立单杆棱镜观测垂直角可分为4种情况:

- 1) 借助扶尺杆手扶竖立单杆棱镜,把棱镜中心作为照准标志。
- 2) 借助扶尺杆手扶竖立单杆棱镜,把觇板横线(三角标志线)作为照准标志。
- 3) 借助仪器脚架竖立单杆棱镜,把棱镜中心作为照准标志。

- 4) 借助仪器脚架竖立单杆棱镜,把觇板横线作为照准标志,如图1所示。



图1 借助仪器脚架竖立棱镜

笔者分别对4种照准类型在不同视距(约200 m、400 m、600 m、800 m)进行了垂直角观测试验,以检验统计不同照准目标不同立尺条件的照准误差。试验条件:使用2"级徕卡TPS1202全站仪观测(后同);晴天,风力2~4级,一天温差较大(约 $10^\circ$ ),成像较清晰(中午目标有轻微抖动);每组数据观测8测回。试验统计结果(如表1所示)表明:使用觇标照准比直接照准棱镜中心测角精度要高,借助脚架竖立单杆棱镜比借助扶尺杆手扶竖立单杆棱镜测角精度要高。借助扶尺杆手扶竖立单杆

收稿日期: 2011-11-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41101373); 河南省科技成果鉴定项目(201111118)

作者简介: 杨晓明(1957—),男,河南固始人,副教授,主要从事大地测量、数字测图的科研与教学工作。

棱镜作业员易疲劳,在有风天气会使垂直角观测产生较大的误差。作业时应借助脚架竖立单杆棱镜,并采用觇板作为照准目标。

表1 不同类型照准目标的照准误差精度统计(″)

照准类型	200 m	400 m	600 m	800 m	平均中误差
1	7.61	5.46	3.81	4.61	±5.37
2	4.88	2.25	5.52	3.67	±4.08
3	3.43	4.11	4.89	2.37	±3.70
4	1.30	2.01	2.21	1.51	±1.76

注:1为手扶照准棱镜中心;2为手扶照准觇板;3为借助脚架,照准棱镜中心;4为借助脚架照准觇板。

### 三、不同视距对垂直角观测的影响

使用2″级全站仪,针对10段不同视距(50~600 m),各观测8测回垂直角。观测时气象条件基本相同(不包含中午成像抖动情况),照准2.0 m以上高度并带觇板的棱镜。试验结果(如表2所示)表明:在600 m范围内,只要成像清晰,垂直角的测角误差与视距没有明显的关系。在一般的观测条件下,使用2″级全站仪,一测回垂直角测角中误差精度可达到±1.3″。

表2 不同视距垂直角观测误差统计

视距/m	52	94	125	164	209	264	310	434	453	558	平均中误差
测角中误差/(″)	±1.68	±1.00	±1.25	±1.75	±1.01	±0.77	±1.52	±1.39	±1.24	±1.10	±1.32

### 四、不同照准高度对垂直角观测的影响

受近地面热辐射的影响,照准高度(视线高度)对垂直角测角精度有一定的影响,为此笔者作了大量观测试验并进行了分析。

#### 1. 春天(温差不大的天气)的影响

在春天晴天成像比较清晰、棱镜杆竖立稳定的

情况下,对24条边(距离为229~438 m)按棱镜高分别为2.0 m、1.7 m、1.3 m的照准高度各测4个测回,观测统计数据(如表3所示)表明:垂直角测角精度有随照准高度降低而降低的趋势;同时也表明视线高度在1.3 m以上,垂直角观测都能得到比较高的精度(<1.4″)。

表3 不同照准高度垂直角观测误差统计(春天 晴天 温差不大)

距离/m	436	438	437	438	229	229	436	438	436	438	437	438
视线高度/m	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.7	1.7	1.7	1.7
测角中误差/(″)	±1.04	±1.19	±0.76	±0.45	±0.97	±0.69	±0.72	±0.69	±1.59	±1.53	±1.03	±1.43
距离/m	229	229	236	236	437	438	437	438	229	229	236	236
视线高度/m	1.7	1.7	1.7	1.7	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
测角中误差/(″)	±1.13	±1.38	±1.17	±1.57	±1.37	±1.01	±1.99	±1.21	±1.44	±1.48	±1.42	±1.56
视线高2 m:平均中误差±0.81″;视线高1.7 m:平均中误差±1.35″;视线高1.3 m:平均中误差±1.44″												

#### 2. 夏天(温差大的天气)的影响

夏天温度高,地面吸热量大,导致近地面空气对流强烈,致使棱镜成像抖动。选择水泥路面,在最高温度36°的情况下对不同棱镜高度(中间有障碍物)进行垂直角观测(6~7测回),试验统计结果(如表4所示)为:视线高1.0 m时,平均中误差为±2.2″;视线高0.6 m时,平均中误差为±2.73″;视

线高低于0.6 m时:平均中误差为±3.52″。从表4可以看出,在炎热的夏天晴天的中午(12:00—15:00)观测,垂直角的测角精度很差,应停止垂直角观测;再则,视线高度在1 m以下,垂直角观测误差比较大,且随着照准目标高度的降低,垂直角测角精度也降低。

表4 不同照准高度垂直角观测误差统计(夏天 晴天 温差大)

距离/m	466	466	313	313	466	466	313	313	466	466	313	313
视线高度/m	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.2	0.2
观测时刻	13:18	17:26	12:10	15:45	13:33	17:00	12:26	16:05	12:47	16:05	14:16	16:37
测角中误差/(″)	±2.54	±1.84	±2.60	±1.83	±2.87	±2.26	±3.91	±1.88	±3.99	±0.85	±6.85	±2.39
中午12:00—15:00:平均中误差±3.79″;下午15:00—18:00:平均中误差±1.84″												

### 3. 汽车(强吸热体)对测角的影响

在城市进行测量,汽车对垂直角观测影响很大(汽车顶吸热、汽车尾气散热)。笔者作了视线通过汽车(2辆)上方的垂直角观测(8测回)试验,试验统计数据(如表5所示)表明:在炎热的夏天,当视线通过汽车上方0.4 m以下时,对垂直角观测影响

很大,且随着视线与汽车的接近垂直角观测精度明显降低;当视线通过很多辆汽车上方观测垂直角时,垂直角观测精度还要低于上述试验结果。另外,中午(11:30—15:00)观测误差明显增大,平均中误差为 $\pm 2.41''$ 。

表5 汽车上方不同照准高度垂直角观测误差统计(夏天 晴天 温差大)

距离/m	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445
视线高度/m	0.62	0.62	0.62	0.62	0.36	0.36	0.36	0.36	0.22	0.22	0.22	0.22
观测时刻	11:00	13:30	16:30	18:00	11:30	13:50	16:50	18:20	11:50	14:20	17:25	18:50
测角中误差/( $''$ )	$\pm 1.05$	$\pm 1.51$	$\pm 1.50$	$\pm 1.47$	$\pm 2.12$	$\pm 1.72$	$\pm 1.25$	$\pm 1.66$	$\pm 3.95$	$\pm 2.73$	$\pm 1.60$	$\pm 2.75$
视线高0.62 m: 平均中误差 $\pm 1.38''$ ; 视线高0.36 m: 平均中误差 $\pm 1.69''$ ; 视线高0.22 m: 平均中误差 $\pm 2.76''$												
中午(11:30—15:00点): 平均中误差 $\pm 2.41''$												

综上所述,可得出以下结论:垂直角的测角精度有随照准高度降低而降低的趋势;垂直角观测时视线高度在1.0 m以上可得到比较高精度;在炎热的夏天观测垂直角时,当视线与强吸热体(如汽车、水泥地面)接近时精度明显降低;中午(11:30—15:00)观测精度最低。在城市近地面观测垂直角中午是最不利的时间段<sup>[7-8]</sup>,这与传统的“中午前后(10:00—16:00)观测垂直角最为有利”的结论正好相反。一般情况下在城市进行垂直角观测时,应安置仪器高在1.7 m以上(可借助塑料方凳观测),棱镜高在2.0 m以上;夏天晴天的中午(11:30—15:00)应停止垂直角观测。

天有微风的天气垂直角观测精度次之,晴天无风的天气垂直角观测精度较差;由于大气折光系数的变化与温度变化有关,中午前后(10:00—16:00)观测垂直角最为有利<sup>[1,4-5]</sup>。这些结论是否适用于城市测量,为此笔者进行了大量的试验研究。

## 五、不同气象条件对测角的影响

### 1. 春天(温差不大的天气)一天的影响

传统理论认为:阴天垂直角观测精度最高,晴

天有微风的天气垂直角观测精度次之,晴天无风的天气垂直角观测精度较差;由于大气折光系数的变化与温度变化有关,中午前后(10:00—16:00)观测垂直角最为有利<sup>[1,4-5]</sup>。这些结论是否适用于城市测量,为此笔者进行了大量的试验研究。

### 1. 春天(温差不大的天气)一天的影响

在春天晴天选取A(309 m)、B(347 m)2个目标,全天每隔1 h观测一组垂直角数据(6测回)。观测A目标时天气无风,全天温差较大;观测B目标时天气微风,全天温差小。试验统计结果(如表6所示)表明:当一天的温差不大,视线离地面较高的条件下,各时间段的垂直角观测精度基本一致,没有明显的差别。使用2''级全站仪观测,垂直角一测回平均测角中误差为 $\pm 1.29''$ 。

表6 春天晴天不同时段垂直角观测精度统计

观测时刻	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	平均	气象条件
A(309 m)	1.36	1.44	1.79	1.66	1.16	1.14	1.04	1.74	1.58	1.43	无风,温差较大
B(437 m)	0.99	0.96	0.70	1.26	1.14	1.53	1.31	1.18	1.21	1.14	微风,温差小
平均中误差	$\pm 1.18$	$\pm 1.20$	$\pm 1.24$	$\pm 1.46$	$\pm 1.15$	$\pm 1.34$	$\pm 1.18$	$\pm 1.46$	$\pm 1.40$	$\pm 1.29$	

### 2. 阴天一天的影响

夏天阴天同一天对两个目标进行垂直角观测(6测回),试验统计结果(如表7所示)表明,阴天观测时成像清晰稳定,垂直角观测精度高。使用2''

级全站仪观测,在照准目标高在2 m以上时,垂直角一测回测角中误差平均为 $\pm 0.91''$ 。由表6、表7还可以看出,在成像清晰(600 m以内)的条件下,垂直角观测远目标比近目标观测精度高。

表7 夏天阴天不同时段垂直角观测误差统计(微风 温差不大 6测回)

观测时刻	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
C(306 m)	1.22	1.31	1.42	1.09	0.69	1.36	1.03	0.68	1.43	0.55	1.2
D(452 m)	0.98	1.0	0.75	0.71	0.63	0.9	0.75	0.78	0.77	1.0	0.62
平均中误差	$\pm 1.10$	$\pm 1.16$	$\pm 1.08$	$\pm 0.90$	$\pm 0.66$	$\pm 1.13$	$\pm 0.89$	$\pm 0.73$	$\pm 1.10$	$\pm 0.78$	$\pm 0.91$

### 3. 夏天(温差大的天气)一天的影响

在夏天晴天温差较大的条件下,同一天对一目标进行垂直角观测,试验统计结果(如表8所示)表明:垂直角一测回平均测角中误差达 $\pm 1.43''$ ,中午

(11:00—15:00)测角中误差高达 $\pm 2.6''$ 。这表明在夏天晴天(温差较大的天气)观测,垂直角观测精度明显比阴天观测的低;在炎热的夏天中午(11:00—15:00)成像不稳定,不适合进行垂直角观测。

表8 夏天晴天不同时段垂直角观测误差统计(微风,温差较大,8测回) (")

观测时刻	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
$E(313\text{ m})$	0.82	1.19	1.69	2.24	1.90	2.25	2.08	1.62	1.79	1.34	0.94

综合上述可得出以下结论:垂直角观测晴天比阴天精度低;夏天(温差大的天气)比春天(温差小的天气)精度低;夏天(温差大的天气)中午精度最低。另外,垂直角观测远目标比近目标观测精度高;在城市观测垂直角中午是最不利的时段。

### 六、近地面大气垂直折光的影响

大气垂直折光(下面简称大气折光)是由大气层上下密度不均匀造成,并受地形、地表性质、视线高度的影响,随温度变化而变化。很多教科书<sup>[5]</sup>及学者<sup>[2-3]</sup>认为:大气垂直折光系数为 $k = 0.07 \sim 0.16$ 。这对于在山区进行三角高程测量适用,但对于在城市进行的三角高程测量,该结论基本不适用。城市的地表(以水泥、柏油为主)吸热快,使近地面温度升高,致使下部的空气密度较上部的空气密度小,这种情况下大气折光系数为负值<sup>[9-10]</sup>。由于近地面大气上下对流强烈,大气折光系数大而不稳定。

另外,在山区进行对向法三角高程测量,由于往返测视线路径基本相同,若往返测的温度差别不大时,可以认为往返测时大气折光系数基本相同,通过往返测高差取平均削弱大气折光的影响。在城市进行中间法三角高程测量<sup>[2-3,6]</sup>时,前后视线受地形、地表性质、视线高度等影响,前后视的大气折

光系数通常不相同,因此不能用前后视距离差相等来消除其影响。很多学者认为中间法测量可消除大气折光的影响<sup>[7-8]</sup>,其实不然。只有在前后视地形、地表性质等观测条件相同的情况下,前后视大气折光系数基本相同,进而消除其影响。

笔者选取水泥地面、露天停车场作为试验场地,在精确测定的8个点的相对高程基础上,分别在夏天晴天、阴天不同时间段、不同视线高度、不同场地进行单向三角高程测量,用比较法计算大气垂直折光系数 $k$ 。计算公式如下

$$k = (h_2 - h_1) \frac{2R}{D^2} \quad (1)$$

$$h_2 = D \tan \alpha + i - v + \frac{D^2}{2R} \quad (2)$$

式中 $D$ 、 $\alpha$ 分别为仪器至棱镜的平距和垂直角; $i$ 、 $v$ 分别为仪器高和棱镜高; $R$ 为平均地球半径; $h_1$ 为精密水准测量的高差; $h_2$ 为不计气差的三角高程测量的高差。

笔者使用2"级全站仪在已知高程点上针对不同情况进行了一系列试验,试验统计的部分结果如图2所示。试验结果与传统的结论 $k = 0.07 \sim 0.16$ 完全不同(需要说明的是,图2仅反映不同条件下大气垂直折光系数 $k$ 值的变化情况, $k$ 值本身不够准确)。

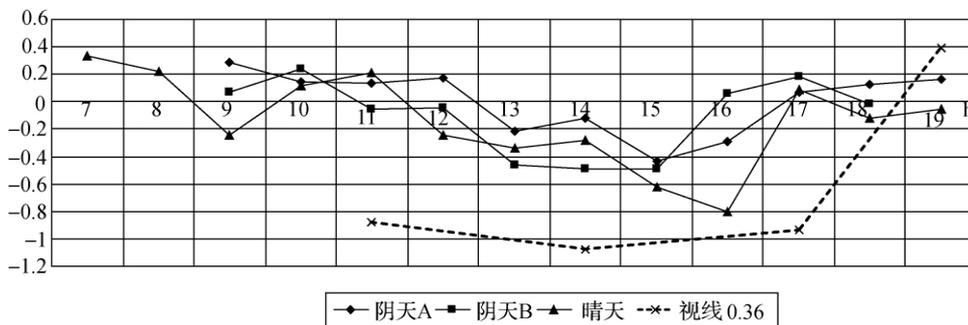


图2 近地面大气垂直折光系数 $k$ 变化图

大量试验表明:近地面大气垂直折光系数在夏天一天中变化很大,且离地面越近变化量越大,对

高差的影响量可能要超过地球弯曲差的影响。在 10:00 之前,大气折光系数可能为正值,视线向下弯曲,使观测的垂直角(高差)增大;在 11:00~16:00 期间,大气折光系数可能为负值,视线向上弯曲,使观测的垂直角(高差)减小;17:00 之后,大气折光系数可能逐渐转为正值。炎热的夏天中午应避免观测垂直角。观测时仪器和觇标尽量设置高一些(如仪器高 $\geq 1.7$  m,觇标高 $\geq 2.0$  m),以减弱近地面大气垂直折光的影响。

## 七、结论

1) 垂直角的测角精度有随照准高度降低而降低的趋势。要绝对避免低视线(0.3 m 以下)观测。一般情况下视线应高于障碍物 1 m 以上,应通过尽可能地升高仪器和棱镜来提供高视线的观测条件(如:仪器高 $> 1.7$  m,棱镜高 $> 2.0$  m)。

2) 垂直角观测晴天比阴天精度低,夏天(温差大的天气)比春天(温差小的天气)精度低,中午(11:00—14:00)比其他时间段精度低;在成像清晰的条件下,近目标比远目标观测精度低;在炎热的夏天观测垂直角,当视线与强吸热体(如汽车、水泥地面)接近时精度明显降低。

3) 近地面大气垂直折光系数在夏天一天中变化很大,且离地面越近变化量越大,对高差的影响量可能要超过地球弯曲差的影响;炎热的夏天中午大气垂直折光系数较大且为负值,使观测的垂直角减小。夏天中午尽量避免垂直角观测。

4) 使用觇标照准比直接照准棱镜中心测角精

度要高,借助脚架竖立单杆棱镜比借助扶尺杆手扶竖立单杆棱镜测角精度要高。观测时应该借助脚架竖立单杆棱镜,并照准觇标测垂直角。

## 参考文献:

- [1] 张正禄,邓勇,罗长林,等.精密三角高程代替一等水准测量的研究[J].武汉大学学报:信息科学版,2006,31(1):5-8.
- [2] 张正禄,黎明,邓勇,等.等距等高电磁波测距三角高程测量及精度分析[J].现代测绘,2005,28(1):3-4,19.
- [3] 余代俊.全站仪中间法代替二等水准测量的精度分析与实验[J].测绘与空间地理信息,2006,29(5):117-120.
- [4] 晏红波,黄藤,邓标.智能全站仪精密三角高程测量替代二等水准测量[J].水电自动化与大坝监测,2007,31(4):43-44.
- [5] 孔祥元,梅是义.控制测量学[M].武汉:武汉大学出版社,2002.
- [6] 黄清宏.转点中间法全站仪三角高程测量的探讨[J].铁路踏勘,2007,33(4):33-35.
- [7] 钱政权.全站仪任意设站三角高程测量方法初探[J].铁道建筑技术,2009(11):111-113.
- [8] 谈道隆,蒋铁军,东海宇.气象条件对三角高程测量精度的影响[J].甘肃科技,2010,26(14):41-43.
- [9] 董绍英.大气垂直折光对低视线三角高程影响的探索[J].河南城建高专学报,1994,3(3-4):39-44.
- [10] 龙四春,袁帅华.大气折光系数修正与高精度三角高程测量[J].公路交通科技,2009,26(6):93-97.

## 中海达郑州分公司中标 50 台 RTK

[本报讯] 日前,中海达郑州分公司在河南省农村集体土地确权发证项目中成功中标 50 台 RTK。

2011 年 11 月,河南省全面启动了农村集体土地确权登记发证工作,范围覆盖河南省 159 个县(市、区)、1882 个乡镇、47 346 个行政村,发证项目要求年底前全部完成,因此需要大量仪器进行作业。

此次中标的 50 台 RTK 涵盖中海达 V8 及 V30 产品。这两款产品均利用 GSM 的数据链方式,可实现大范围作业,无需支付高昂的 CORS 费用。

作为国内最早研究 CORS 技术的厂家,中海达具有成熟专业的单机站、网络 CORS 系统硬件和软件核心技术,在全国已经建设了单机站近 200 个,并先后在河南南阳、广西桂林、海南海口、黑龙江穆稜等地建多个国际水平的网络 CORS 系统。

郑州分公司表示,此次成功销售 50 台 RTK,充分彰显了中海达产品在河南的影响力,中海达良好的产品性能、过硬的产品质量,以及优质的售后服务,给客户留下了良好的用户体验。

(本刊编辑部)