

全站仪中间法在桥面高程监测中的应用及精度分析

张帆¹, 姬小祥², 周桂梅³

(1. 福建省高速技术咨询有限公司, 福州 350100; 2. 河南交院工程技术有限公司, 郑州 451460;

3. 福建省交通规划设计院, 福州 350004)

摘要:基于现场测量条件,对比分析了在桥面高程测量过程中,采用几何水准法和全站仪测量的可行性和存在的问题。通过对全站仪中间法测量过程中误差指标进行计算,分析了在不同测量条件下,全站仪中间法可能达到的水准测量精度,以及要达到该测量精度时需要的测量条件。结合桥梁桥面高程监测的布点要求和现场条件,计算了采用0.5"级全站仪进行中间法对跨径为50 m、80 m和200 m的桥梁进行高程监测时可达到的精度。认为采用全站仪中间法,有条件满足桥面高程监测的精度要求,提出了采用全站仪进行桥面高程测量时的布点形式,为桥面高程测量中的应用提供一定的借鉴。

关键词:全站仪中间法;水准测量;桥面高程

中图分类号:U446.2

文献标志码:A

引言

为进一步加强高速公路运营桥梁安全管理,分析判断桥梁可能发生的病害,根据《公路桥涵养护规范》(JTG H11-2004)等规范的相关规定,需在运营桥梁上布设永久性控制监测点,对桥梁桥面高程、墩(台)身高程、墩(台)身倾斜度等项目进行永久性控制监测^[1]。且在《工程测量规范》(GB 50026-2007)中提出,特大型桥梁桥面高程监测等级不宜低于二等,大型桥梁桥面高程监测等级不宜低于三等,中小型桥梁桥面高程监测等级不宜低于四等^[2]。

目前,进行精密水准测量一般均采用几何水准方法。但由于运营高速公路桥梁要满足正常通车要求,测量无法完全封闭桥梁进行,导致监测过程易受到行车干扰,监测结果无法达到精度等级要求。因此,为达到特大型桥梁桥面高程监测精度要求,需采用有别于传统水准测量的测量方法。随着高精度全站仪的出现,基于其较高的测距精度和测角精度,全站仪中间法逐步被应用

于较高等级的水准测量中。但目前的研究主要集中在全站仪中间法在三等、四等水准测量中的应用,本文将基于对中间法三角高程测量方法、条件以及其测量精度的分析,探讨其在桥梁桥面高程监测中应用的可行性。

1 全站仪中间法

全站仪由于其较高的测距和测角精度,在工程测量中的应用较为普遍。但由于测量过程需采用钢尺按斜量法或平量法获得仪器高和目标高,对其精度影响约为2~3 mm^[3]。因此,在采用全站仪进行高程测量的过程中,为充分发挥全站仪较高的测距和测角精度,就必须提高测量仪器高和目标高的精度,或者采用新的测量方法,取消对仪器高和目标高的量取。

1.1 全站仪中间法高差计算

全站仪中间法高程测量作为三角高程测量的一种,通过在待测两点中间安置全站仪,求出两点的高差^[4]。

如图1所示,在已知高程点A和待测高程点B上分别安置观测棱镜,在点A、B间选择与两点均通视的O点

收稿日期:2016-07-11

作者简介:张帆(1988-),男,甘肃民勤人,助理工程师,硕士,主要从事桥梁动态监测,桥梁永久性控制监测等方面的研究,(E-mail) zhang-fan_gansu@163.com

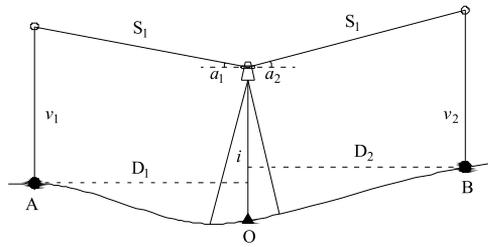


图 1 全站仪中间法三角高程测量原理

安置全站仪,则 O、A 两点的高差 h_1 为:

$$h_1 = S_1 \cdot \sin\alpha_1 + c_1 - r_1 + i - v_1 \quad (1)$$

式中: S_1 、 α_1 分别为 O 点至 A 点的斜距和竖直角, c_1 、 r_1 分别为 O 点至 A 点的地球曲率改正数和大气折光系数改正数, i 为仪器高, v_1 为 A 点的棱镜高^[5]。

根据 c_1 、 r_1 的计算公式,设 K_1 为 O 至 A 点的大气折光系数, R 为地球半径,则 h_1 可以表达为:

$$h_1 = S_1 \cdot \sin\alpha_1 + c_1 - r_1 + i - v_1 = S_1 \cdot \sin\alpha_1 + \frac{1 - K_1}{2R} \cdot S_1^2 \cdot \cos^2\alpha_1 + i - v_1$$

同理可得 O、B 两点的高差 h_2 为:

$$h_2 = S_2 \cdot \sin\alpha_2 + c_2 - r_2 + i - v_2 = S_2 \cdot \sin\alpha_2 + \frac{1 - K_2}{2R} \cdot S_2^2 \cdot \cos^2\alpha_2 + i - v_2$$

式中: S_2 、 α_2 分别为 O 点至 B 点的斜距和竖直角, c_2 、 r_2 分别为 O 点至 B 点的地球曲率改正数和大气折光系数改正数, i 为仪器高, v_2 为 B 点的棱镜高, R 为地球半径。此时可得 A、B 两点的高差 h 为:

$$h = h_2 - h_1 = S_2 \cdot \sin\alpha_2 - S_1 \cdot \sin\alpha_1 + \frac{1 - K_2}{2R} \cdot S_2^2 \cdot \cos^2\alpha_2 - \frac{1 - K_1}{2R} \cdot S_1^2 \cdot \cos^2\alpha_1 + v_2 - v_1 \quad (2)$$

1.2 全站仪中间法误差分析^[6-8]

根据式(2)可知,采用中间法对未知点进行测量,其精度主要受测量斜距 S_1 和 S_2 、竖直角 α_1 和 α_2 、待测点处的棱镜高 v_1 和 v_2 以及大气折光系数 K_1 和 K_2 的影响,与全站仪的仪器高无关。其中,地球曲率计算误差在斜距 S 较大的情况下会对三角高程测量的精度产生一定的影响;大气折光系数计算误差根据经验一般为 1 mm ~ 3 mm;仪器高、标标高的量取误差可达 1 mm ~ 2 mm;仪器瞄准目标的误差可达 1 mm ~ 2 mm^[9-10]。

2 全站仪中间法精度分析

2.1 全站仪中间高差中误差计算

根据分析可知,A、B 两点的高差测量中虽然取消了对仪器高度和目标高度的量取,但仍存在地球曲率计算

误差,大气折光系数计算误差,对中误差,瞄准误差,测角、测距误差等误差。因此需进一步探讨全站仪中间法的测量精度,分析该种测量方法可以达到水准测量精度等级。

在实际操作中,为了进一步减小由于人工读数及仪器自身存在的系统误差,固定在待测点 A、B 两点上安置的棱镜高度,使两点处的棱镜高满足: $v_1 = v_2$ 。此时,根据式(2)及图 1 所示几何关系,A、B 两点处的高差 h_{AB} 可以表示为:

$$h_{AB} = S_2 \cdot \sin\alpha_2 - S_1 \cdot \sin\alpha_1 + \frac{1 - K_2}{2R} \cdot D_2^2 - \frac{1 - K_1}{2R} \cdot D_1^2 \quad (3)$$

其中, D_1 、 D_2 分别为 O 点至 A、B 两点的水平距离。

在测量过程中由于无法进行无穷多测观测,对式(3)进行中误差计算。先将式(3)全微分,得:

$$dh_{AB} = \sin\alpha_2 \cdot dS_2 - \sin\alpha_1 \cdot dS_1 + S_2 \cdot \cos\alpha_2 \cdot \frac{d\alpha_2}{\rho} - S_1 \cdot \cos\alpha_1 \cdot \frac{d\alpha_1}{\rho} + \frac{1}{2R} \cdot D_1^2 \cdot dK_1 - \frac{1}{2R} \cdot D_2^2 \cdot dK_2 = (\sin\alpha_2 \cdot dS_2 - \sin\alpha_1 \cdot dS_1) + (D_2 \cdot d\alpha_2 - D_1 \cdot d\alpha_1) \cdot \frac{1}{\rho} + \frac{1}{2R} \cdot (D_1^2 \cdot dK_1 - D_2^2 \cdot dK_2) \quad (4)$$

式中: $(\sin\alpha_2 \cdot dS_2 - \sin\alpha_1 \cdot dS_1)$ 为测距 S 引起的误差, $(D_2 \cdot d\alpha_2 - D_1 \cdot d\alpha_1) \cdot \frac{1}{\rho}$ 为测角 α 引起的误差,其中 ρ 为将观测得到的竖向角的误差按角秒表示的系数,一般取 $206\,256''$, $\frac{1}{2R} \cdot (D_1^2 \cdot dK_1 - D_2^2 \cdot dK_2)$ 为大气折光系数 K 引起的误差^[11]。

由于 S 、 α 、 K 在测量过程中均为独立变量,设其各自的中误差为 m_s 、 m_α 、 m_K ,则根据误差传播定律,A、B 两点高差 h_{AB} 的中误差为:

$$m_{h_{AB}} = (\sin^2\alpha_2 \cdot m_{s_2}^2 + \sin^2\alpha_1 \cdot m_{s_1}^2) + (D_2^2 \cdot m_{\alpha_2}^2 + D_1^2 \cdot m_{\alpha_1}^2) \cdot \frac{1}{\rho^2} + \frac{1}{4R^2} \cdot (D_1^4 \cdot m_{K_1}^2 + D_2^4 \cdot m_{K_2}^2) \quad (5)$$

2.2 全站仪中间高差中误差计算相关参数分析^[7-8]

根据式(5)可知,A、B 两点高差 h_{AB} 的中误差计算中主要包括测距中误差 m_s ,测角中误差 m_α ,大气折光系数中误差 m_K 三个中误差参数,以及斜距 S 和竖直角测量值 α 。因此,在计算 h_{AB} 的中误差时,需对三个参数

进行分析。

2.2.1 测距中误差 m_s [12]

当在一次测量中使用同一台仪器,认为在对A点和B点观测过程中可成立: $m_{S_1} = m_{S_2} = m_s$ 。

2.2.2 测角中误差 m_α [13]

测角中误差来源于仪器误差 $m_{仪}$ 和观测误差 $m_{观}$, 且满足 $m_\alpha = \pm \sqrt{m_{仪}^2 + m_{观}^2}$ 。

(1) 仪器误差 $m_{仪}$

仪器误差 $m_{仪}$ 属于系统误差, 主要为仪器度盘划分误差 $m_{分}$, 即有 $m_{仪} = m_{分}$ 。

若在测量中使用仪器精度为 0.5" 级全站仪, 可取 $m_{仪} = 0.5''$ 。

(2) 观测误差 $m_{观}$

观测误差主要包括照准误差 $m_{照}$, 目标偏心误差 $m_{目}$, 读数误差 $m_{读}$, 且满足:

$$m_{观} = \pm \sqrt{m_{照}^2 + m_{目}^2 + m_{读}^2}$$

其中, 照准误差 $m_{照}$ 与全站仪望远镜的放大倍数 V 及人眼瞄准的判断能力 P 有关, 可用 $m_{照} = \pm \frac{P''}{V}$ 。一般情况下, $P = 60, V = 30$, 则 $m_{照} = \pm 2$ 。

目标偏心误差 $m_{目}$ 是指因对中杆偏离垂线方向引起的竖直角测量误差。对于 0.5" 级全站仪可取 $m_{目} = 0$ 。

读数误差 $m_{读}$ 同为仪器自身的系统误差。对于全站仪可取 $m_{读} = \pm 0.4''$ 。

根据 $m_\alpha = \pm \sqrt{m_{仪}^2 + m_{观}^2}$ 及上述分析, 可得测角中误差 $m_\alpha = \pm 2.1''$ 。

2.2.3 大气折光系数中误差 m_k [14]

虽然以站点 O 对 $A、B$ 两点的测量在同一地点进行, 且在较短时间内完成, 观测条件基本相同。但折光系数的大小主要取决于空气的密度, 空气密度是随时间而变化的, 所以某个时刻或某段时间内的系数值仍存在误差的。研究表明, 折光系数误差一般为 $\pm 0.03 \sim \pm 0.05$, 因此可取 $m_k = 0.04$ 。

2.3 全站仪中间高差中误差计算

根据全站仪测量的特点及上述分析, 认为在一次测量过程中, m_{k_2} 的计算参数满足:

$$m_{S_1}^2 = m_{S_2}^2 = m_s^2, m_{\alpha_1}^2 = m_{\alpha_2}^2 = m_\alpha^2, m_{k_1}^2 = m_{k_2}^2 = m_k^2$$

同时, 在采用中间法测量的过程中, 为了尽量提高测量精度, 在选取观测站点时应尽量满足:

(1) 站点 O 与待测点 A 点、 B 点形成的竖直角宜基本相同, 且不宜大于 20° 即, $\alpha_1 = \alpha_2$ 。

(2) O 点至 $A、B$ 两点的水平距离宜相等, 即 $D_1 =$

D_2 ; 结合条件(1)可得: $S_1 = S_2$ 。

则此时 $A、B$ 两点高差的中误差 $m_{h_{AB}}$ 可表示为:

$$m_{k_2} = 2\sin^2\alpha \cdot m_s^2 + 2D^2 \cdot \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} + \frac{1}{2R^2} \cdot D^4 \cdot m_k^2 \quad (6)$$

由式(6)可得, $m_{h_{AB}}$ 的变化随水平距离 D 及竖直角 α 的改变而变化, 且呈正相关。为进一步分析中间法测量的精度, 当采用测角精度为 0.5", 测距精度为 0.6 mm + 1 ppm 的全站仪进行中间法测量时, 不同水平距离 D 及竖直角 α 对应的每测站高差均值中误差 $\overline{m_{h_{AB}}}$ 的计算结果见表 1, 换算成每千米高差中误差 $m_{km}^{h_w}$ 的计算结果见表 2。

表 1 0.5"级全站仪中间法每测站高差均值中误差

水平距离 D/mm	竖直角 $\alpha/^\circ$						
	1	3	5	7	10	15	20
10 000	0.10	0.11	0.11	0.13	0.15	0.19	0.23
20 000	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23	0.26	0.29
30 000	0.31	0.31	0.31	0.31	0.32	0.34	0.37
40 000	0.41	0.41	0.41	0.41	0.42	0.44	0.46
50 000	0.51	0.51	0.51	0.51	0.52	0.53	0.55
60 000	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.63	0.65
70 000	0.71	0.71	0.71	0.72	0.72	0.73	0.74
80 000	0.81	0.82	0.82	0.82	0.82	0.83	0.84
90 000	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.93	0.94
100 000	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.04
200 000	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.05	2.05

注: $\overline{m_{h_{AB}}}$ 为按往返测回取平均值时每测站高差均值的中误差, $\overline{m_{h_{AB}}} = \frac{m_{h_{AB}}}{\sqrt{2}}$ 。

表 2 0.5"级全站仪中间法每千米高差中误差

水平距离 D/mm	竖直角 $\alpha/^\circ$						
	1	3	5	7	10	15	20
10 000	0.72	0.75	0.81	0.89	1.03	1.31	1.62
20 000	1.02	1.03	1.05	1.08	1.14	1.28	1.45
30 000	1.26	1.27	1.28	1.30	1.33	1.41	1.52
40 000	1.47	1.47	1.48	1.49	1.52	1.57	1.65
50 000	1.61	1.61	1.62	1.63	1.64	1.68	1.74
60 000	1.83	1.84	1.84	1.85	1.86	1.89	1.94
70 000	2.02	2.02	2.02	2.03	2.04	2.06	2.10
80 000	2.16	2.16	2.16	2.16	2.17	2.20	2.22
90 000	2.25	2.25	2.25	2.25	2.26	2.28	2.30
100 000	2.28	2.28	2.28	2.28	2.29	2.30	2.32
200 000	3.53	3.53	3.53	3.54	3.54	3.54	3.55

注: $m_{km}^{h_w}$ 为每千米高差中误差, $m_{km}^{h_w} = \frac{m_{h_{AB}}}{\sqrt{n}}$, 其中, n 为每公里的测站数。

根据《国家一、二等水准测量规范》(GB/T 12897 - 2006) 及《国家三、四等水准测量规范》(GB/T 12898 - 2009) 的规定, 二等水准测量每千米水准测量的偶然中误差 M_Δ 不应大于 1.0 mm, 全中误差 M_w 不应大于

2.0 mm;三等水准测量每千米水准测量的偶然中误差 M_{Δ} 不应大于 3.0 mm,全中误差 M_w 不应大于 6.0 mm;四等水准测量每千米水准测量的偶然中误差 M_{Δ} 不应大于 5.0 mm,全中误差 M_w 不应大于 10.0 mm^[15-16]。对比表 2 中计算求得的中误差值得:

(1) 当待观测两点 A、B 距离不大于 20 m,且全站仪的观测角相同且不大于 7°时,采用 0.5"级全站仪进行中间法测量精度可达到二等水准测量的精度。

(2) 当待观测两点 A、B 距离不大于 200 m,且全站仪的观测角相同且不大于 20°时,采用 0.5"级全站仪进行中间法测量精度可达到三等水准测量的精度。

(3) 当待观测两点 A、B 距离不大于 400 m,且全站仪的观测角相同且不大于 20°时,采用 0.5"级全站仪进行中间法测量精度可达到四等水准测量的精度。

3 中间法在桥梁桥面高程监测中的应用

3.1 桥面高程监测点布设

根据《公路桥涵养护规范》(JTG H11 - 2004)及《工程测量规范》(GB 50026 - 2007)的相关规定,桥梁桥面高程检测点应在桥墩和桥墩墩间,按跨中、L/4、支点等不少于五个位置(10 个点),均匀固定布设在桥面板上,且每孔应在点位间距以 10 ~ 50 m 为宜。

在实际工程中,为了更好的对桥面高程进行检测,桥面高程检测布点方式采用单孔跨径 $L \leq 80$ m 的桥梁每跨检测截面布设 5 个(每跨桥梁的支点、L/4、L/2、3L/4 处);单孔跨径 $L > 80$ m 的桥梁每跨检测截面布设 9 个(每跨桥梁的支点、L/8、L/4、3L/8、L/2、3L/4、5L/8、7L/8 处)。桥面高程检测点布设位置如图 2 所示。

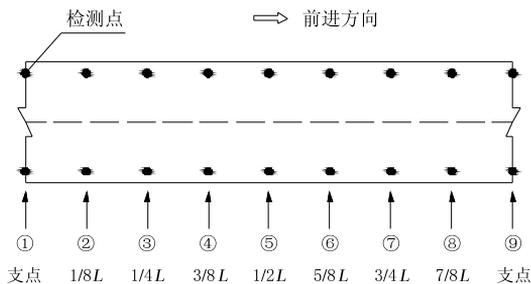


图 2 桥面高程检测点布设位置

3.2 桥面高程中间法测量的应用分析

根据桥面高程监测点的布设要求,以单孔跨径 $L = 50.00$ m, $L = 80.00$ m, $L = 200.00$ m 为例,分析中间法测量在桥面高程监测中的应用。

将分析跨径类型按布点要求进行布点,各类跨径的布点数量及监测点间距见表 3。

表 3 不同跨径桥面高程监测点数量及间距

单孔跨径/m	单侧布点数量/个	监测点间距/m
50.00	5	12.50
80.00	5	20.00
200.00	9	25.00

对比表 2 中计算求出的每千米高差中误差可得,若采用 0.5"级全站仪以中间法进行桥面高程监测,当桥梁单孔跨径 $L \leq 80.00$ m 时,其监测测量精度可达到二等水准测量的精度;当桥梁单孔跨径 $L \leq 200.00$ m 时,其监测测量精度可达到三等水准测量的精度。但要达到上述的测量精度需满足以下条件:

(1) 仪器站点至两个待观测点的距离应基本相同。

(2) 要达到二等水准测量精度时,全站仪的观测角相同且不大于 7°;要达到三等水准测量精度时,全站仪的观测角相同且不大于 20°。

根据桥面高程监测布点的实际情况,由于监测点为等距离分布,因此,仪器的架设可满足仪器站点至两个待观测点的距离相同。此外,对于一般桥梁而言,其纵坡一般不大于 4%,即其纵坡角度不会超过 4°。因此,在采用全站仪中间法进行桥面高程测量时,当待观测点处的棱镜等高时,可满足测量精度达到二等、三等的条件。

4 结论

基于对全站仪中间法测量的误差分析,主要得出以下结论:

(1) 当待观测两点 A、B 距离不大于 20 m,且全站仪的观测角相同且不大于 7°时,采用 0.5"级全站仪进行中间法测量精度可达到二等水准测量的精度。

(2) 当待观测两点 A、B 距离不大于 200 m,且全站仪的观测角相同且不大于 20°时,采用 0.5"级全站仪进行中间法测量精度可达到三等水准测量的精度。

(3) 当待观测两点 A、B 距离不大于 400 m,且全站仪的观测角相同且不大于 20°时,采用 0.5"级全站仪进行中间法测量精度可达到四等水准测量的精度。

(4) 通过计算得出,若采用 0.5"级全站仪以中间法进行桥面高程监测,有条件满足当桥梁单孔跨径 $L \leq 80.00$ m 时,其监测测量精度可达到二等水准测量的精度;当桥梁单孔跨径 $L \leq 200.00$ m 时,其监测测量精度可达到三等水准测量的精度。但文中分析未完全考虑桥面通车对测量精度的影响,因此在今后分析中,应基于更加全面的误差影响因素考虑,探究通车条件下桥面高程高精度测量方法。

参考文献:

- [1] JTG H11-2004,公路桥涵养护规范[S].
- [2] GB 50026-2007,工程测量规范[S].
- [3] 文学.全站仪三角高程测量应用综述[J].测绘与空间地理信息,2014,37(1):47-50.
- [4] 王建强,孟毅飞,邹嘉盛,等.全站仪中间法三角高程测量精度分析[J].东华理工大学学报:自然科学版,2014,37(3):303-306.
- [5] 汪耀武,方梅.全站仪三角高程测量代替三四等水准测量分析研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2014,38(6):1413-1416.
- [6] 杨勇,李世宝,赵金忠,等.全站仪似水准测量及其应用[J].地矿测绘,2013,29(1):27-29.
- [7] 纪志刚,郑磊,李丽君.高低双棱镜三角高程测量方法及精度分析[J].测绘地理信息,2016,41(2):29-31.
- [8] 王洪.全站仪自由设站法精度分析及应用研究[J].测绘与空间地理信息,2016,39(4):82-85.
- [9] 关延峰.精密二等水准测量质量控制研究[J].测绘与空间地理信息,2013,36(4):195-198.
- [10] 孔祥明.控制测量学[M].武汉:武汉大学出版社,2011.
- [11] 赖鸿斌,马德英,梅熙,等.山区二等三角高程测量方法的应用研究[J].铁道工程学报,2012(6):15-23.
- [12] 郑怀兵,张民侠,冯浩.一种全站仪精准量测立木直径的方法[J].北京林业大学学报,2014(6):36-40.
- [13] 胡菊英,朱良文,郭楠.全站仪自由设站法及其精度分析[J].测绘与空间地理信息,2014(11):179-181.
- [14] 李世平.全站仪中间法三角高程测量替代二等水准的精度分析[J].矿山测量,2015(5):37-40.
- [15] GB/T 12897-2006,国家一、二等水准测量规范[S].
- [16] GB/T 12898-2009,国家三、四等水准测量规范[S].

Application and Precision Analysis when Using Middle Method of Total Station in Bridge Deck Elevation Measure

ZHANG Fan¹, JI Xiaoxiang², ZHOU Guimei³

(1. Fujian Provincial Expressway Technology Consulting Co., Ltd., Fuzhou 350100, China;

2. He'nan Jiao Yuan Engineering Technology Co., Ltd., Zhengzhou 451460, China;

3. Fujian Communication Planning & Design Institute, Fuzhou 350004, China)

Abstract: Based on the field measuring conditions, the feasibility and the problems of geometric leveling method and middle method of total station were analyzed, when used in bridge deck elevation measure. Through calculated the error indexes of middle method of total station in different measuring conditions, the leveling precisions which could reached by using the method were found out, and the measuring conditions were put forward, which were needed in the measuring. Combined the stationing demands of bridge deck elevation measure, the measuring precisions were analyzed by using 0.5" midway method, when $L = 50$ m, $L = 80$ m, $L = 200$ m. Besides, it was put forward that when setting the station between the measuring points, the measuring conditions were enough to make sure the precision could meet the demands by using midway method. And a stationing form of the bridge deck elevation measure was put forward when using midway method, which offered reference for bridge deck elevation measure.

Key words: middle method of total station; leveling; bridge deck elevation