

基于精密测距和方向线偏移法的基坑水平位移监测

赵鹏飞¹, 潘国荣^{1,2}, 谷川¹

(1. 同济大学测量与国土信息工程系, 上海 200092; 2. 现代工程测量国家测绘局重点实验室, 上海 200092)

摘要: 本文介绍了方向线偏移法的测量基坑水平位移基本原理。在文中提出了一种利用精密测距测量工作基点位移的方法, 并且针对某特殊形状的基坑, 提出一种结合方向线偏移法和精密测距的联合改进方法。最后分析了该方法的精度, 并用实际数据说明了该方法的可行性和优势。

关键词: 方向线偏移法; 精密测距; 基坑水平位移监测; 联合方法; 精度分析

中图分类号: P258

文献标识码: B

Monitoring of foundation horizontal displacement based on deflection of direction method and precise distance measurement

Zhao Pengfei¹, Pan Guorong^{1,2}, Gu Chuan¹

(1. Department of Surveying and Geomatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Modern Engineering Surveying, SBSM, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the precise distance measurement, this paper introduces the principle of the deflection of direction method and a new way to survey the operating control point. The improved new method which combines the deflection of direction with the precise distance measurement is to monitor a special shaped foundation pit. Besides, the precision of the combined method is analyzed and some actual data used to illustrate the advantage and feasibility of the proposed method.

Key words: deflection of direction method; precise distance measurement; monitoring of foundation horizontal displacement; combined method; precision analysis

0 引言

基坑水平位移监测是基坑监测工作的重要部分。在上海市基坑监测规范^[1]中, 介绍了多种水平位移监测方法, 如方向线偏移法、前方交汇法、极坐标法、视准线法等。这些方法各有各的优势和不足之处, 但是不论哪一种方法, 整个工作的前提是确保工作基点不发生位移或者工作基点水平位移能够精密的测量出来。在一般形状的基坑中, 通常是把工作基点设置在稳定位置上, 并且认为其是不动的。

但有一些特殊形状的基坑就不能简单认为工作基点是不动的, 需要精确测量工作基点的位移, 例如图1所示的基坑。该基坑为特殊“8”字形, 基坑深度50m, X方向最宽处为82m, Y方向最宽处为59m。基坑周围设置了20个水平位移监测点。工作基点P设置于变形体的中央位置的横梁之上, 随着基坑的挖掘, 工作基点难免会产生水平位移, 显然这时候是绝对不能忽略工作基点位移。

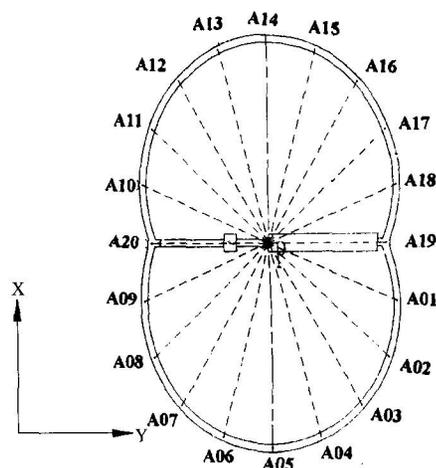


图1 基坑示意图

由于该基坑的发散形状, 只要测定了工作基点的精确位移, 然后在工作基点上放置测距仪或全站

收稿日期: 2008-10-31

作者简介: 赵鹏飞 (1985-), 男 (汉族), 陕西安康人, 硕士。

仪，通过测量监测点到工作基点的距离差，再加上工作基点位置的改正值，各点位移就可以测定出来。

1 方向线偏移法原理

方向线偏移法也叫做单站改正法或反演小角法，这种方法只需设站一次加改正来完成所有观测点水平位移的测量，其原理如图 2 所示。

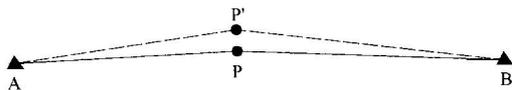


图 2 方向线偏移法示意图

图中 P 点为工作基点，P' 点为发生位移后的工作基点，A、B 两点为选定的基准点。APB 连线尽量控制在一条直线上。在进行监测时，测量 $\angle AP'B$ ，再根据上次已测出的 $\angle APB$ ，得到两者的差值，角度变化量 $\Delta\alpha = \angle APB - \angle AP'B$ 。

由角度变化量，得出 P 点水平位移量 e 的公式

$$e = \frac{PA \cdot PB}{PA + PB} \cdot \frac{\Delta\alpha}{\rho} \quad (1)$$

式 (1) 中， PA 、 PB 分别为 P 点到 A 点、B 点的距离， $\rho = 206265$ 。

但方向线偏移法只能求出某一个方向的位移，并且一次能测定一个点的水平位移，在这种情况下，文献^[3]提出了一种改进的方向线偏移法，该方法能够测量两个正交方向的水平位移。原理如图 3 所示。

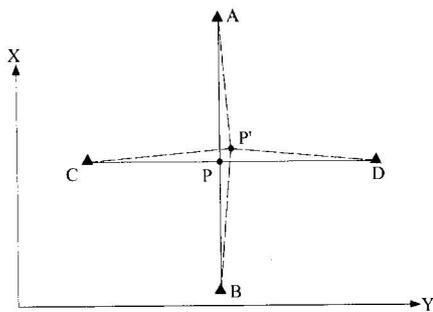


图 3 改进的方向线偏移法原理

基准点 A、B、C、D 位于工作基点 P 的四周，CD 尽量平行于坐标系的 Y 轴，AB 尽量平行于坐标系的 X 轴，坐标系可以自己设定。并且类似于改进前的方向线偏移法原理，尽量保持 APB 和 CPD 的直线性，且使连线 APB 和连线 CPD 正交。

并且 $\Delta\alpha = \angle APB - \angle AP'B$ ， $\Delta\beta = \angle CPD - \angle CP'D$ ，则 P 点在 X 方向和 Y 方向的位移值为

$$\Delta X = \frac{PC \cdot PD}{PC + PD} \cdot \frac{\Delta\beta}{\rho} \quad (2)$$

$$\Delta Y = \frac{PA \cdot PB}{PA + PB} \cdot \frac{\Delta\alpha}{\rho} \quad (3)$$

式 (2)、(3) 中， PA 、 PB 、 PC 、 PD 分别为 P 点到基准点 A、B、C、D 的距离， $\rho = 206265$ 。利用 X 方向和 Y 方向的位移值 ΔX 、 ΔY ，即可获得 P 点发生位移后的位置，从而进行其他点的监测工作。

2 利用精密测距测量工作基点位置

在以往的工程实例中，利用测距来监测基坑水平位移的情况并不多，这主要因为仪器的测距精度不高，无法达到精度要求。但是测距法相对简单，而且随着仪器测距精度的提高，该方法也不失为一种可行的办法。所以本文提出一种基于精密测距测量工作基点水平位移的方法，基准点的布置与改进的方向线偏移法相同，工作基点位于中央位置，四个基准点分布于工作基点周围，且两组连线正交。

如图 4 所示，假设 P 点向东北方向发生位移， ΔX 、 ΔY 分别为 X、Y 方向上的水平位移。

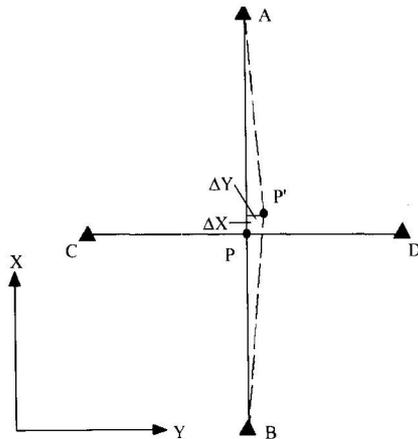


图 4 工作基点水平位移示意图

在 X 方向上，用 ΔX_1 、 ΔX_2 分别表示用 AP 和 PB 测距计算的水平位移，再进行加权平均。则 P 点 X 方向的位移量可用公式 (4) 表示，若位移方向改变，则公式中正负号关系可能改变，这里只介绍这种情况下的位移公式。工作基点在 X 方向位移：

$$\begin{cases} \Delta X_1 = PA - P'A \cdot \cos \zeta_1 \\ \Delta X_2 = P'B \cdot \cos \zeta_2 - PB \\ \Delta X = \frac{\frac{1}{m_{AP}^2} \cdot \Delta X_1 + \frac{1}{m_{BP}^2} \cdot \Delta X_2}{\frac{1}{m_{AP}^2} + \frac{1}{m_{BP}^2}} \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 中， m_{AP} 、 m_{BP} 分别为 PA、PB 边的测量

精度。 ζ_1 、 ζ_2 分别为 $\angle P'AB$ 和角 $\angle P'BA$ 。在实际情况中， ζ_1 、 ζ_2 非常小，完全可以忽略。所以公式可以简化如下：

$$\begin{cases} \Delta X_1 = PA - P'A \\ \Delta X_2 = P'B - PB \\ \Delta X = \frac{m_{BP}^2 \cdot \Delta X_1 + m_{AP}^2 \cdot \Delta X_2}{m_{BP}^2 + m_{AP}^2} \end{cases} \quad (5)$$

同理，类似有 Y 方向的位移公式：

$$\begin{cases} \Delta Y_1 = PD - P'D \\ \Delta Y_2 = P'C - PC \\ \Delta Y = \frac{m_{DP}^2 \cdot \Delta X_1 + m_{CP}^2 \cdot \Delta X_2}{m_{DP}^2 + m_{CP}^2} \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) 中， m_{PC} 、 m_{PD} 分别为 PC、PD 的测量精度。

3 结合方向线偏移法和精密测距的联合方法

在该基坑工程水平位移监测工作中，关键就是精确测定工作基点的位移。本文提出了一种结合方向线偏移法和精密测距的联合方法测量工作基点水平位移的方法，可以参见图 1，基准点布置参见图 3。

结合公式 (2) (4)，对方向线偏移法和精密测距所得到的工作基点位移进行加权平均，得 X 方向水平位移计算公式：

$$\Delta X_0 = P_5 \cdot \Delta X' + P_6 \cdot \Delta X'' \quad (7)$$

式 (7) 中 $\Delta X'$ 、 $\Delta X''$ 分别为方向线偏移法和精密测距测量工作基点 X 方向位移的值；其中 P_5 和 P_6 分别为方向线偏移法和精密测距测量工作基点 X 方向位移的权，可以取 $P_5 = m_3^2 / (m_1^2 + m_3^2)$ ， $P_6 = m_1^2 / (m_1^2 + m_3^2)$ ，其中 m_1 、 m_3 分别为方向线偏移法在 X 方向上的精度和精密测距在 X 方向上的精度，具体计算公式见式 (11)、(12)。

同理有 Y 方向水平位移：

$$\Delta Y_0 = P_7 \cdot \Delta Y' + P_8 \cdot \Delta Y'' \quad (8)$$

式 (8) 中 $\Delta Y'$ 、 $\Delta Y''$ 分别为方向线偏移法和精密测距测量工作基点 Y 方向位移的值； P_7 和 P_8 分别为方向线偏移法和精密测距测量工作基点 Y 方向位移的权；类似可以取 $P_7 = m_4^2 / (m_2^2 + m_4^2)$ ， $P_8 = m_2^2 / (m_2^2 + m_4^2)$ ，其中 m_2 、 m_4 分别为方向线偏移法在 Y 方向上的精度和精密测距在 Y 方向上的精度，具体公式见式 (11)、(12)。

由上述可知，监测点的水平位移可以有两次测量的距离差加上工作基点位移改正得出。

所以，如图 5 所示，监测点 i 的水平位移 Δi 可表示为

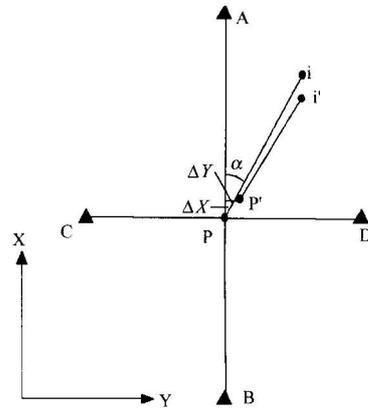


图 5 监测点水平位移示意图

$$\Delta i = \Delta D \pm \Delta X_0 \cdot \cos \alpha \pm \Delta Y_0 \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

其中 $\Delta D = D_{\text{上次}} - D_{\text{本次}}$ ，即工作基点到监测点的距离差。 ΔX_0 、 ΔY_0 为工作基点 P 在 X 方向和 Y 方向的位移， α 为工作基点与 i 点连线的方位角， α 在监测过程中变化很小，所以只需要第一次测量即可。

公式 (9) 中的两个正负号选择参见表 1 (假设工作基点开始位于原点，表 1 的第一列表示工作基点向哪个象限发生位移)。

公式 (9) 正负号说明

表 1

	第一个正负号	第二个正负号
第一象限	-	-
第二象限	+	-
第三象限	+	+
第四象限	-	+

4 精度分析

首先对工作基点 P 进行分析。根据误差传播定理，得 P 点误差公式：

$$\begin{cases} m_{\Delta x_0} = \pm \sqrt{P_5^2 \cdot m_1^2 + P_6^2 \cdot m_3^2} \\ m_{\Delta y_0} = \pm \sqrt{P_7^2 \cdot m_2^2 + P_8^2 \cdot m_4^2} \\ m_0 = \pm \sqrt{m_{\Delta x_0}^2 + m_{\Delta y_0}^2} \end{cases} \quad (10)$$

式 (10) $m_{\Delta x_0}$ 和 $m_{\Delta y_0}$ 为工作基点 X 方向和 Y 方向的偏移量中误差，其余参数意义可参见前面公式。根据误差理论分析，在方向线偏移法中，测距误差对点位精度的影响很小，精度主要取决于测角精度，而且通常认为边长是不变的，所以只考虑测角引起的误差。 m_1 、 m_2 计算公式为

$$\begin{cases} m_1 = \pm \sqrt{2} \cdot \frac{PC \cdot PD}{PC + PD} \cdot \frac{m_\beta}{\rho} \\ m_2 = \pm \sqrt{2} \cdot \frac{PA \cdot PB}{PA + PB} \cdot \frac{m_\beta}{\rho} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中 m_β 为仪器测角精度。

精密测距引起的误差 m_3 、 m_4 计算公式为

$$\begin{cases} m_3 = \pm \sqrt{(m_a + PA \cdot m_b)^2 + (m_a + PB \cdot m_b)^2} \\ m_4 = \pm \sqrt{(m_a + PC \cdot m_b)^2 + (m_a + PD \cdot m_b)^2} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中 m_a 为仪器测距固定误差, m_b 为仪器测距比例误差。

监测点 i 水平位移的误差来自两个方面, 一是工作基点的点位误差, 二是在工作基点上观测所产生的测距误差。所以, i 点误差根据下式计算

$$m_i = \pm \sqrt{m_d^2 + \cos^2 \alpha \cdot m_{\Delta,0}^2 + \sin^2 \alpha \cdot m_{\Delta,0}^2} \quad (13)$$

式中 m_i 为监测点 i 水平位移的中误差, m_d 为在工作基点设站测距的误差。

工程采用高精度索佳全站仪 NET1200 型, 测角精度标称 $\pm 1''$, 反射片测量模式下标称测距精度为“ $\pm (0.6\text{mm} + 2\text{ppm} \times D)$ ”。在测量工作基点位移时, 为了达到精度要求, 测角时采用两测回, 同时测距也测两次。

若 PA 、 PB 、 PC 、 PD 都为 200m (按规范要求, 基准点到工作基点的距离应大于基坑深度的 3 倍, 150m), 则 $m_0 = 0.49\text{mm}$; 又由于基坑最长测距距离不超过 41m, 若按 50m 来算, 当方向角 α 为 45° 时产生最大误差, 则 m_i 最大不超过 0.84mm。

根据基坑监测规程^[1]规定, 二级基坑水平位移测量精度应满足监测点坐标中误差不大于 3.0mm, 一级基坑水平位移测量精度应满足监测点坐标中误差不大于 1.0mm, 很明显, 该方法的精度远远高于二级基坑水平位移测量的精度要求, 甚至可以满足一级基坑水平位移测量的精度要求。

5 实例数据

这里列出该基坑监测工程的部分数据作为实例:

第一期观测数据: P 点: $AP = 190.110\text{m}$, $BP = 185.519\text{m}$, $CP = 191.015\text{m}$, $DP = 190.201\text{m}$; $\angle APB = 180^\circ 00' 02''$, $\angle CPD = 180^\circ 00' 05''$; A_{15} 点: $PA_{15} =$

39.621m , $\alpha_{15} = 16^\circ 01' 03''$; A_{16} 点: $PA_{16} = 37.788\text{m}$, $\alpha_{16} = 33^\circ 10' 07''$; A_{19} 点: $PA_{19} = 26.662\text{m}$, $\alpha_{19} = 89^\circ 59' 17''$ 。

第 n 期观测数据: P 点: $AP = 190.109\text{m}$, $BP = 185.517\text{m}$, $CP = 191.016\text{m}$, $DP = 190.199\text{m}$; $\angle APB = 180^\circ 00' 04''$, $\angle CPD = 180^\circ 00' 07''$; A_{15} 点: $PA_{15} = 39.633\text{m}$; A_{16} 点: $PA_{16} = 37.778\text{m}$; A_{19} 点: $PA_{19} = 26.656\text{m}$ 。

根据公式(7)和公式(8)计算工作基点 P 位移为: $\Delta X_0 = 1.9\text{mm}$, $\Delta Y_0 = 2.1\text{mm}$ 。进一步根据公式(9)计算各监测点位移: $\Delta A_{15} = 9.6\text{mm}$, $\Delta A_{16} = 9.3\text{mm}$, $\Delta A_{19} = 3.9\text{mm}$, 这里正号表示监测点沿径向向基坑中心位移。

6 结论

本文针对某特殊形状基坑提出的联合方法在实践中圆满地完成了水平位移监测任务。该方法充分利用了全站仪在一站上能够同时测量角度和距离的特点, 结合测角和测距确定工作基点位置, 大大提高了工作基点的观测精度; 同时, 工作量并没有明显增加, 所以该方法具有很强的可行性。

该方法适用于工作基点位于变形体中间, 且工作基点位移不能忽略的情况; 并且对于类似的、特殊形状的基坑监测, 可以起到很好的指导借鉴作用。

参 考 文 献

- [1] 基坑工程施工监测规范 (DG/TJ08-2001-2006). 上海市工程建设规范 [S].
- [2] 潘国荣, 王穗辉. 单站改正法在打桩区位移测量中的应用 [J]. 测绘通报, 1992, (5): 19~21.
- [3] 谷川, 潘国荣. 一种改进的水平位移监测方法 [J]. 铁道勘察, 2006, 32 (1): 8~10.
- [4] 潘国荣, 谷川. 改进的方向线偏移法测基坑水平位移 [J]. 工程勘察, 2008, (4): 49~50.
- [5] 李俊, 张小平. 某基坑位移、沉降和内力实测结果及预警值讨论 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (4): 1045~1052.
- [6] 陈龙飞, 金其坤. 工程测量 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1990.
- [7] 樊功瑜. 误差理论与测量平差 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1998.