

基于层次分析法的城市沉降监测方案优选

李艳丽

江苏省测绘工程院, 江苏 南京
Email: 277374902@qq.com

收稿日期: 2021年2月4日; 录用日期: 2021年2月18日; 发布日期: 2021年2月26日

摘要

沉降监测能够及时有效地反映地面高程变化, 为城市快速发展提供重要的技术保障和决策建议。然而, 城市沉降监测方案的选择往往受预算和区域等因素的影响, 传统的方案选择随意性大且主观性强, 难以达到观测精度和经济成本之间的平衡。针对上述问题, 本文提出了基于层次分析法的城市沉降监测方案优选策略, 通过判断矩阵构建、一致性检验以及影响因子权重计算, 采用定性与定量相结合的决策分析方法对某城市地面沉降观测方案进行了综合评价。实验结果表明, 利用GPS进行地面沉降监测的方案要优于传统水准测量, GPS沉降观测在满足精度的同时, 有效节约了人力、时间和经济成本, 相关成果可以为其他测绘工程方案选择提供借鉴。

关键词

层次分析, 沉降监测, 方案优选, 综合评价

An Optimal Selection Method of Urban Subsidence Monitoring Based on AHP

Yanli Li

Jiangsu Province Surveying & Mapping Engineering Institute, Nanjing Jiangsu
Email: 277374902@qq.com

Received: Feb. 4th, 2021; accepted: Feb. 18th, 2021; published: Feb. 26th, 2021

Abstract

Subsidence monitoring can effectively reflect the changes of ground elevation in time and provide important technical support and decision-making suggestions for the rapid development of cities. However, the selection of urban subsidence monitoring is often affected by factors such as budget,

region, etc., the traditional method is arbitrary and subjective, and difficult to balance the observation accuracy and economic cost. To solve the above problems, this paper proposes an optimal selection method of urban subsidence monitoring based on AHP. Through the construction of judgment matrix, consistency test and weight calculation of influence factors, the qualitative and quantitative decision analysis method is used to comprehensively evaluate the land subsidence observation scheme in a specific city. The experimental results show that the scheme of using GPS to monitor the land subsidence in this city is better than the traditional leveling. The GPS observation can meet the accuracy and effectively save manpower, time and economic costs. The relevant results can provide reference for the selection of other surveying and mapping projects.

Keywords

AHP, Subsidence Monitoring, Optimal Selection, Comprehensive Evaluation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会经济的不断发展,城市化的脚步逐渐加快,城镇人口数量日益增多,人们对于城市物质资源需求量也急剧增加,最典型的就是城市地下水的过度开采导致地表发生不同程度的沉降,严重影响着城市的可持续发展,可见,做好城市地表的沉降监测对地区的稳定发展意义重大[1] [2]。

目前来讲,城市地面沉降观测应用比较广泛的方法有传统水准测量和 GPS 静态监测,上述两种方法的优缺点也是显而易见的[3] [4] [5]。传统水准测量用于沉降观测具有测量精度高、观测设备便宜、内业数据处理简单等优点,但在大范围城市地面沉降监测中外业工作量大且耗费人力物力[6] [7] [8]。GPS 监测具有自动化程度高、全天候监测等优点但仪器相对昂贵且卫星信号受外界因素干扰较大[9] [10] [11] [12]。一项优秀的沉降监测方案,不仅要在技术上安全可靠,还需要考虑经济和环境等诸多要素,这其中既有可以定量分析的要素,同时一些要素难以定量分析,所以需要根据专家实践理论和个人经验结合给出合理的选择。然而,现有通过专家定性分析的方式进行沉降观测方案选择随意性大且主观性强,难以以为决策者提供科学参考。

因此,本文提出了基于层次分析法的城市沉降监测方案优选方法,给出不同方案中监测工作的影响因素,并根据专家经验知识构建城市地面沉降监测层次结构模型以及相应的判断矩阵,最后以 MATLAB 为解算工具对结果进行一致性检验,得到不同城市地面沉降监测方案的权重,并成为最终方案优选的决策依据。

2. 方法

2.1. 城市地面沉降监测层次结构模型

层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)首先将目标层转化为不同的层次结构,利用数学矩阵分析并求解评价指标[13] [14] [15] [16]。本文根据大面积沉降监测的基本步骤,从测量精度、方案预算、选点布网、测量误差和数据处理五个方面逐一分析沉降监测的影响因素,构建了以层次结构模型为基础的城市沉降监测方案,如图 1 所示。

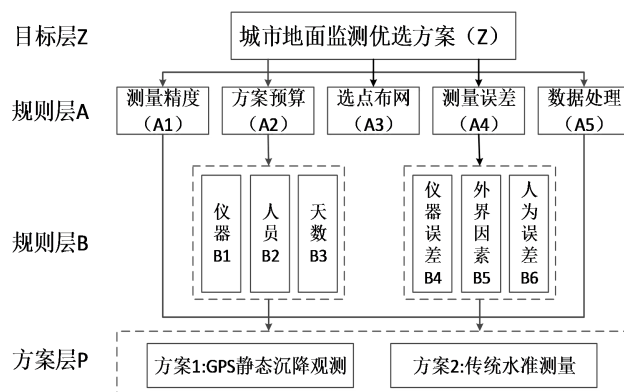


Figure 1. Urban settlement monitoring scheme structure hierarchy diagram

图 1. 城市沉降监测方案结构层次图

规则层 A 主要包括 5 个因素。其中，测量精度是进行沉降观测方案选择的关键影响因素；方案预算所涉及的经济成本是影响整个沉降监测工程的重要因素，主要包括测量仪器、测量人员和工作天数等，所以方案设计时同样需要把经济和节约成本考虑进去；数据处理会影响整个监测方案的时间，不同方案的数据处理差异较大，在本文中主要考虑基线解算和平差计算；选点布网对于 GPS 监测和水准测量的要求不一致，所以也纳入考虑范围；测量误差与测量精度类似，同样是方案选择的重要影响因素。

由于大面积沉降监测方案相对复杂，所以本文将原有的规则层分支得到一个子准则层 B，通过更多影响因素的加入可以得到更加准确客观的分析结果。其中，方案预算可以分为仪器成本的投入，人员的数量以及完成整个沉降监测方案所需要的天数；测量的误差大体归位三类，即三个影响因子：仪器本身误差，各种外界因素引起的误差和人为产生的误差。

2.2. 基于专家经验构建判断矩阵

当确定目标层、规则层和决策层之间的隶属关系后，则需要针对目标构建判断矩阵。在判断矩阵构造过程中，为了使得影响因子进行定量化表示，本文基于专家经验的基础上，本文参考 1~9 尺度标度法对影响因子进行两两比较[16] [17]，如表 1 所示。其中 1 表示两因子具有同等重要性，3、5、7、9 分别表示两因子中前者比后者稍微、明显、强烈、极端重要，余下数字则表示为中间值。

Table 1. Meaning of scale 1~9

表 1. 1~9 尺度标度含义

序号	含义	赋值
1	i, j 两个元素同等重要	1
2	i 元素比 j 元素稍重要	3
3	i 元素比 j 元素明显重要	5
4	i 元素比 j 元素强烈重要	7
5	i 元素比 j 元素极端重要	9
6	j 元素比 i 元素稍重要	1/3
7	j 元素比 i 元素明显重要	1/5
8	j 元素比 i 元素强烈重要	1/7
9	j 元素比 i 元素极端重要	1/9

由此可以得到判断矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

2.3. 层次单排序及一致性检验

权值 w 代表层次单排序中影响程度大小, 分别记作: w_1, w_2, \dots, w_n , 具体解算过程如下:

首先, 将判断矩阵 A 中的影响因子按列进行归一化处理, 如公式(1)所示:

$$a_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (1)$$

其中, a_{ij} 表示归一化后的向量, a_{ij} 表示判断矩阵中的元素。其次, 将归一化的 a_{ij} 按行相加得到新的 w_i 向量, 如公式(2)所示:

$$w_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (2)$$

然后, 将新得到的 w_i 向量进行归一化处理可得到 w_i , 如公式(3)所示:

$$w_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (3)$$

式中, w_i 即为所求的特征向量, 在此基础上采用公式(4)计算最大特征根 λ_{\max} 。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{[Aw]_i}{nw_i} \quad (4)$$

其中 A 表示判断矩阵, n 表示矩阵的维数, 在此基础上, 利用公式(5)进行一致性检验指标 CI 计算。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

同时一致性指标 RI 的具体取值如表 2 所示。

Table 2. RI values

表 2. RI 取值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

如公式(6)所示, CR 表示一致性比率, 当它的值比 0.1 小时, 通常认为所构建的判断矩阵是合理的。

2.4. 层次总排序及一致性检验

层次总排序就是用来确定某层要素相对于总体目标重要性的过程。具体可采用公式(7)计算。

$$P_i = \sum_{j=1}^m a_j b_{ij} \quad (7)$$

其中 P_i 表示层次总排序的权重值, 具体来讲, 如公式(8)所示。

$$\begin{aligned}
 B_1 &: a_1 b_{11} + a_2 b_{12} + \cdots + a_m b_{1m} \\
 B_2 &: a_1 b_{21} + a_2 b_{22} + \cdots + a_m b_{2m} \\
 &\vdots \\
 B_n &: a_1 b_{n1} + a_2 b_{n2} + \cdots + a_m b_{nm}
 \end{aligned} \tag{8}$$

采用公式(9)来表示层次总排序的一致性比率 CR 。

$$CR = \frac{a_1 CI_1 + a_2 CI_2 + \cdots + a_m CI_m}{a_1 RI_1 + a_2 RI_2 + \cdots + a_m RI_m} \tag{9}$$

当 CR 值比 0.1 小时, 则说明层次总排序合理, 否则不合理。

3. 案例分析

本文以某城市地面沉降为案例进行监测方案优化选择实验, 分析确定了该城市地面沉降监测方案优选层次模型中各层的判断矩阵。如图 2 所示。

$$\begin{aligned}
 A - A &= \begin{bmatrix} 1 & 3 & 6 & 2 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 4 & \frac{1}{2} & 3 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{5} & 2 \\ \frac{1}{2} & 2 & 5 & 1 & 4 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 2 & \frac{1}{4} & 1 \end{bmatrix} & B_1 - B_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 4 & 5 \\ \frac{1}{4} & 1 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} & B_1 - B_5 &= \begin{bmatrix} 1 & 4 & 5 \\ \frac{1}{4} & 1 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \\
 A_1 - P &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} & A_3 - P &= \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} & A_5 - P &= \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \\
 B_1 - P &= \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{9} \\ 9 & 1 \end{bmatrix} & B_2 - P &= \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} & B_3 - P &= \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \\
 B_4 - P &= \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} & B_5 - P &= \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{4} \\ 4 & 1 \end{bmatrix} & B_6 - P &= \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Figure 2. The monitoring scheme selects the judgment matrix of each level

图 2. 监测方案优选各层次判断矩阵

图 3 表示利用 MATLAB 计算得出的各个矩阵的最大特征值和特征向量结果。

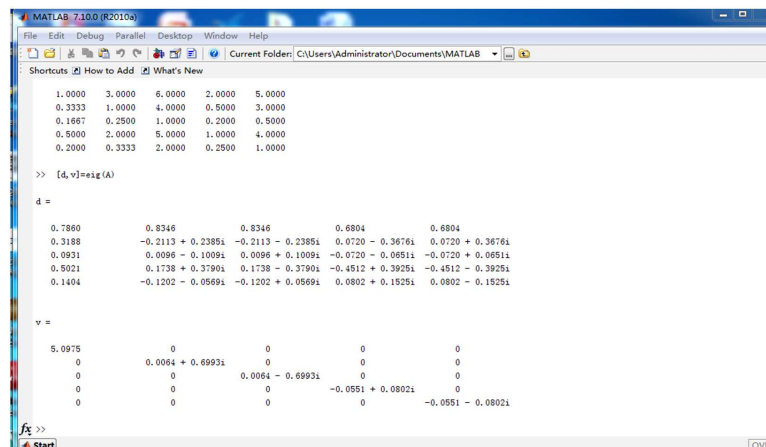


Figure 3. Matlab calculation results

图 3. MATLAB 计算结果

针对判断矩阵 $A-A$, 其中最大特征值 $\lambda_{\max} = 5.098$, 归一化特征向量为 $w = [0.427, 0.173, 0.05, 0.273, 0.076]$, 一致性指标为 $CI = 0.0245$, 一致性比率 $CR = 0.022 < 0.1$, 表明判断矩阵合理且结果通过一致性检验。同理, 可以求出其他矩阵的一致性比率。然后可以分别求出 P_1 对于目标层 Z 层的权值为 0.57, P_2 对于目标层 Z 层的权值为 0.43, 可以看出方案一 P_1 即利用 GPS 进行该城市的地面沉降监测要优于方案二 P_2 即水准测量, 所以选择方案一。

4. 结束语

本文采用了层次分析法进行城市沉降监测方案优选, 并以某城市地面沉降监测为例开展了案例分析, 结果表明在该城市采用 GPS 进行沉降监测更加科学合理, 其主要原因是 GPS 用于城市地面沉降监测不但可以扩大监测面积、降低监测成本还可以提高监测灵活性。同时可以看出, 采用层次分析法可以降低方案选择的难度和人主观因素的影响, 提高最终决策的客观性和科学性。

参考文献

- [1] 王建文. 精密水准测量技术在重点沉降区监测中的应用[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [2] 兰徽. 全站仪水准法在基坑沉降监测中的分析与应用[J]. 福建建材, 2020(8): 20-21+27.
- [3] 谢旭晖, 许锡文. 基于高精度水准测量的高层建筑沉降观测[J]. 江西建材, 2018(13): 41-42.
- [4] 王雷霆. 论精密水准测量在地面沉降监测中的应用[J]. 华北国土资源, 2013(2): 113-116.
- [5] 秦洪奎, 王平德. GPS 用于天津市地面沉降监测的研究[J]. 测绘信息与工程, 2012, 37(2): 20-21.
- [6] 徐自平. 数字水准仪在沉降观测中的应用[J]. 山西建筑, 2019, 45(22): 146-148.
- [7] 林立祥. 全站仪三角高程法在路面沉降观测中的应用[J]. 土工基础, 2019, 33(2): 215-219.
- [8] 王明月, 潘颖, 花阳. 大型商业建筑沉降观测方法浅析[J]. 现代测绘, 2015, 38(2): 23-25.
- [9] Chen, J., Yue, D., Liu, Z., et al. (2019) Experimental Research on Daily Deformation Monitoring of Bridge Using BDS/GPS. *Survey Review*, **51**, 472-482. <https://doi.org/10.1080/00396265.2018.1481699>
- [10] Tu, R., Liu, J., Lu, C., et al. (2017) Cooperating the BDS, GPS, GLONASS and Strong-Motion Observations for Real-Time Deformation Monitoring. *Geophysical Journal International*, **209**, 1408-1417. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx099>
- [11] 胡丛玮, 刘大杰. 基于 GPS 基准站网的 GPS 测量[J]. 现代测绘, 2003(1): 10-13.
- [12] 易长荣, 王淼, 徐冬. GPS 连续站监测天津市地面沉降的初步结果[J]. 现代测绘, 2009, 32(1): 31-33.
- [13] 朱庆, 陈凯峥, 谢潇, 等. 模糊层次分析与三维 GIS 集成的升压站选址方法[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 980-988.
- [14] 徐勇炜. 基于层次分析法的南陵县乡村旅游资源评价[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(24): 159-162.
- [15] 程寅, 陆凤, 范睿, 朱敏. 基于 AHP 构建城市生长地理适宜性表面模型研究[J]. 现代测绘, 2018, 41(6): 29-32.
- [16] 贾涛. 成兰铁路松潘段泥石流灾害风险评估[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [17] 刘厚成, 谷秀芝. 基于可拓层次分析法的泥石流危险性评价研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(3): 61-66.