

文章编号:1004-4116(2023)04-0074-05

# 基于多传感器估值融合理论的地质灾害 变形监测方法研究

黄明坚

(广东省佛山地质局,广东 佛山 528000)

**摘要:**在开展地质灾害变形监测的过程中,由于传感器采集数据结果会受到客观环境的影响而出现异常情况,导致对变形情况的监测结果与实际情况存在较大误差,为此,提出基于多传感器估值融合理论的地质灾害变形监测方法研究。在对多传感器数据进行预处理阶段,引入了估值融合理论,具体采用的融合算法为最小误差均方差法,利用其对传感器采集数据结果中的异常值进行校正。在变形监测阶段,充分利用了多个数据源(传感器)对同一目标进行观测时的特征构成,结合观测特征、实时状态数据与发展函数三者之间的关系,实现对地质灾害变形情况的有效监测。在测试结果中,设计方法能够获取某地铁隧道水平方向上和垂直方向上的位移结果,具有较高的可靠性和精度。

**关键词:**多传感器;估值融合理论;地质灾害变形;最小误差均方差法;发展函数;

**中图分类号:**P642

**文献标志码:**A

受地质条件自身构成复杂的属性特征影响,导致地质灾害出现的情况具有明显的多样性特征,在此基础上,对地质情况进行精准监测成为了降低地质灾害负面作用范围的重要基础<sup>[1]</sup>。在具体的实施过程中,为了能够实现为目标地质环境状态的全面研究与分析,需要布置在多个传感器,不仅如此,结合具体的监测目标,也需要对传感器的种类进行差异化处理<sup>[2]</sup>。利用这样的方式,最大限度保障对地质动态变形的情况监测结果具有较高的实时性和准确性动态变形监测<sup>[3]</sup>。但是值得注意的是,虽然多源传感器与单一传感器相比使得数据分析结果的全面化程度和精确化程度均得到了有效提升,但是由于在具体的监测过程中,各个传感器的监测目标具有唯一性<sup>[4]</sup>,虽然多传感器间良好的数据互补性在一定程度上缓解了由此带来的负面影响,但是监测范围对于整体地质状态分析的限制仍然不容忽视。这种仅仅显示区域独立特征的数据采集结果<sup>[5]</sup>,对于地质状态监测结果的削弱作用也成为了地质灾害变形分析阶段面临的最主要的难题。除此之外,在利用多传感器对目标地质范围的状态数据进行监测时,受

其并行性的影响,一旦某单一传感器出现较大的数据采集误差时,由此带来的数据失真问题将会对整体监测结果造成不良影响<sup>[7]</sup>。

王姝等<sup>[6]</sup>说明了差异信息量的含义和多源数据融合方法,利用信息熵和散度分别获取证据的重要性和可信度,通过可信度对证据差异度进行优化,求得差异信息量,进行决策,从而实现数据融合。孙群等<sup>[7]</sup>研究了多源地理空间数据一致性处理技术,其为生产和更新地理空间数据的主要方法。分析数据不一致性的原因,并从多方面进行阐述,由此实施地理空间数据一致性处理。然而上述方法对于多源数据的处理存在较大误差。本文提出了一种基于多传感器估值融合理论的地质灾害变形监测方法,利用多传感器采集结果之间的关系以及多传感器位置之间的关系,利用其他近似的传感器数据对异常数据采集结果进行填补处理,在此基础上实现对地质灾害整体动态数据的精准监测。

## 1 地质灾害变形监测方法设计

收稿日期:2023-04-26

作者简介:黄明坚(1990~),男,汉族,广东清远人,学士(测绘工程专业),工程师,主要研究方向:工程测量、大地测量、变形监测等。

E-mail:qiangben6904224746@163.com

### 1.1 基于估值融合传感器数据预处理

在利用多个传感器对目标地质环境的状态进行监测时,由于监测结果是以点的形式存在的,而实际的监测要求是对地质灾害整体进行监测<sup>[8-9]</sup>,这就导致仅仅对各监测点的数据信息进行分析是远远不够的。为此,本文在对多传感器数据进行预处理阶段,引入了估值融合理论。具体采用的融合算法为最小误差均方差法<sup>[10]</sup>。以此为基础,传感器采集结果的最小误差均方差计算方式可以表示为

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum (x_{i,j} - \bar{x}_{i,j})^2}{(n-1)}} \quad (1)$$

其中, $\sigma_i$ 表示*i*传感器采集地质环境数据信息的最小误差均方差参数, $x_{i,j}$ 表示*i*传感器在*j*次采集过程中,获取的地质环境数据信息, $\bar{x}_{i,j}$ 表示*i*传感器在*j*次采集过程中,获取地质环境数据信息的均值, $n$ 表示数据规模。结合式(1)的计算结果,对传感器采集到的地质环境数据信息进行校正处理。地质灾害变形监测需要采用预处理后的传感器数据进行监测。因此,本文利用 $\sigma_i$ 对传感器数据进行预处理。由于传感器采集的地质环境数据信息类型不同,无法对不同类型数据统一实行预处理步骤。为此,将其转化为无量纲数据。使用Z-score标准化公式将地质环境数据信息 $x_{i,j}$ 转化为其对应的标准值 $y_{i,j}$ ,具体公式为:

$$y_{i,j} = \frac{(x_{i,j} - \mu)}{\delta} \quad (2)$$

其中, $\mu$ 和 $\delta$ 分别为 $x_{i,j}$ 的平均值和标准差。

由此进行预处理,具体的处理方式可以表示为

$$\begin{cases} y_{i,j} - y_{i,j-1} \leq \sigma_i & \text{保留原数据} \\ y_{i,j} - y_{i,j-1} > \sigma_i & \text{修正原数据} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $y_{i,j}$ 和 $y_{i,j-1}$ 表示连续时间段内*i*传感器采集的地质环境数据信息标准值。结合式(3)可以看出,当二者的差值小于或等于最小误差均方差参数时,保留原始数据;当二者的差值大于最小误差均方差参数时,需要对原始数据进行修正处理,具体的修正结果可以表示为

$$x'_{i,j} = x_{i,j-1} + \sigma_i \quad (4)$$

其中, $x'_{i,j}$ 表示修正处理后的地质环境数据信息。

按照上述所示,利用最小误差均方差法实现对

传感器数据的融合处理,以此保障后续监测结果的准确性。

### 1.2 地质灾害变形监测

结合1.1部分处理后的传感器数据信息,本文对于地质灾害变形情况的监测主要利用了地质变形的观测特征。当*m*个数据源(传感器)对同一目标进行观测时,对应的特征方程可以表示为

$$z(k) = x(k) + v(k) \quad (5)$$

其中, $z(k)$ 表示观测地质灾害的特征函数, $x(k)$ 表示来自传感器的地质灾害状态数据, $v(k)$ 表示地质灾害的发展函数。结合式(4)可以看出,地质灾害的特征函数主要受实时地质灾害状态数据和发展函数影响,利用已有的数据信息,二者均为已知参量,其中,发展函数可以表示为

$$v(k) = \frac{m\sigma_i}{n} \quad (6)$$

其中, $\Delta\sigma_i$ 表示传感器采集数据最小误差均方差的波动参数。以此为基础,以任意传感器采集点为中心,其周围的地质变形情况可以表示为

$$y(i) = \sum d_i z_i(k) \quad (7)$$

其中, $y(i)$ 表示以*i*传感器采集点为核心的地质灾害变形情况, $d_i$ 表示各传感器与目标位置之间的距离, $z_i(k)$ 表示各传感器采集到的地质灾害的特征函数,利用这样的方式,通过对不同位置传感器数据的融合,确定非监测基点的地质状态信息。

按照上述所示的方式,实现对地质灾害变形情况的有效监测,确保监测结果的准确性和可靠性。

## 2 工程实例

在地质灾害变形监测中,选择佛山市顺德区某地铁隧道工程作为研究对象。地铁隧道工程是一项复杂而庞大的工程项目,涉及到大量的土木工程和地下施工活动。在地质灾害频发的佛山地区,地铁隧道工程面临着来自滑坡、地面沉降等多种地质灾害的威胁。研究对象的地质构造主要由长江南缘构造、琼粤块体接触构造和顺德断裂构造等组成。这些构造在地质演化过程中造成了地层的断裂、抬升和错位,形成了复杂的地下构造和岩石层。岩石类型方面,研究对象存在花岗岩、麻粒岩、片麻岩等,部分岩石较为脆弱易破裂。研究对象地下水资源丰富,地下

水位较高,河流、湖泊和水系发达,有多条河流穿过,其中最重要的是北江和杨梅河。通过多传感器的监测数据建立动态监测网,并运用估值融合理论对各种数据进行统一处理。通过确定不同传感器数据的权重和可靠性等因素获取更加准确和综合的地质灾害变形监测结果。

### 3 测试与分析

#### 3.1 测试环境

以地铁隧道工程为基础开展对比测试,选取连续 100 环的施工路段,在地质结构上选取区域具有上硬下软的特点,下部溶岩发育明显,具体数据信息如表 1 所示。

表 1 测试区域岩体分布情况统计表

Table 1 Statistics of rock mass distribution in the test area

序号	分布	参数
1	标高峰值/m	742.5
2	标高均值/m	545.5
3	长度/m	312.6
4	宽度/m	72.4
5	分布面积/m <sup>2</sup>	2.1*10 <sup>2</sup>
6	方量/m <sup>3</sup>	45.30*10 <sup>4</sup>

在对测试区域的地质灾害发展情况进行监测阶段,采用位移传感器进行监测。位移传感器通过测量物体在空间中的位置变化来确定其位移。将其安装在岩体的表面、裂缝或关键部位,并与数据采集系统连接,以实时监测位移变化并记录数据。位移传感器选择恒安矿用围岩移动传感器,如图 1 所示。



图 1 恒安矿用围岩移动传感器

Fig. 1 Mobile sensor monitoring displacement of wall rock

设置 6 个位移传感器数据采集点,具体安装位置如表 2 所示。

表 2 传感器安装位置表

Table 2 Sensor installation position

传感器编号	监测点	安装位置	用途
1	A	隧道左侧顶部	监测隧道顶部的变形情况
2	B	隧道右侧顶部	
3	C	隧道左侧底部	监测隧道底部的变形情况
4	D	隧道右侧底部	
5	E	隧道左侧墙面	监测隧道左侧墙面的变形情况
6	F	隧道右侧墙面	监测隧道右侧墙面的变形情况

#### 3.2 测试结果与分析

以 1 个月为周期进行为期半年(2022 年)的实地数据采集,以掌握地铁隧道工程特性依时性变化特征和变化趋势。其中,水平方向上的位移情况如表 3 所示。

表 3 各测点的水平位移监测值与融合值/mm

Table 3 Horizontal displacement monitoring values and fusion values for each test point

监测点	时 间					
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
A	0.01	0.35	0.44	0.51	0.74	0.94
B	0.02	0.44	0.58	0.72	0.85	0.96
C	0.01	0.14	0.38	0.53	0.71	0.98
D	0.01	1.22	2.99	3.07	3.55	3.97
E	0.00	0.36	0.57	0.61	0.84	0.99
F	0.02	0.23	0.48	0.69	0.88	0.97
融合值	0.02	0.49	0.5	1.07	1.35	1.97

结合表 3 所示的水平位移监测结果可以看出,监测点 D(隧道右侧底部)水平位移高于其它监测点,达到 3.97 mm,且其变化速度也是最大的。这可能是因为隧道右侧底部位于地质结构活动较为明显的断层附近,在地质构造受力的作用下岩层发生变形和位移,且隧道右侧底部的岩土材料具有较弱的抗剪强度,因此容易发生滑动变形。在地质力学作用下产生剪切力,使隧道右侧底部发生水平位移变化。因此,应加强对隧道右侧底部的监控。

在此基础上,对垂直方向上的监测结果进行分析,具体的位移情况如表 4 所示。

结合表 4 所示的垂直位移监测结果可以看出,监测点 E(隧道左侧墙面)1 月至 3 月间,垂直位移增大到 5.99 mm,4 月突然减小至 1.52 mm,5 月又

表3 各测点的垂直位移监测值与融合值/mm

Table 3 Vertical displacement monitoring values and fusion values of each test point

监测点	时 间					
	1月	2月	3月	4月	5月	6月
A	0.01	0.18	0.24	0.39	0.48	0.69
B	0.01	0.11	0.38	0.47	0.55	0.74
C	0.02	0.27	0.68	0.77	0.97	1.39
D	0.00	0.21	0.44	0.63	0.87	1.12
E	0.01	2.68	5.99	1.52	10.37	2.31
F	0.00	0.19	0.33	0.59	0.67	0.85
融合值	0.01	0.78	1.98	0.94	2.91	1.33

增至 10.37 mm,6月又迅速减小到 2.31 mm。根据大量的原始动态监测数据,发现其垂直位移呈现反复无规律的变化。这可能是因为监测点 E 所在位置的岩土材料稳定性较差,当受到周围地应力的影响或其他外力作用时引发岩土体垂直位移。经调研,3月时地铁隧道附近有施工活动,进而引发岩土体运动,导致监测点 E 的垂直位移表现出较大位移。5月时,季节性变化对岩土体产生了一定的影响,地下水对岩土体施加了一定的水压力,水压力变化导致岩土体的膨胀,进而增加监测点 E 的垂直位移。因此,应加强对隧道左侧墙面的监控。

综合上述两组测试结果可以得出结论,本文设计的基于多传感器估值融合理论的地质灾害变形监测方法可以实现对地质灾害整体变形情况的有效监测,对于实际的地质灾害防治和管控工作而言,具有良好的实际应用价值。

## 4 结论

在地质灾害监测的过程中,监测点的平面位移与垂直位移情况是最直观反映地质灾害整体发展态

势的参数。本文将估值理论引入到地质灾害监测数据的处理过程中,提出基于多传感器估值融合理论的地质灾害变形监测方法研究。

(1)用融合算法中的最小误差均方差法,对传感器采集地理环境数据信息进行预处理,结合观测特征、实时状态数据与发展函数,实现地质灾害变形监测。

(2)实验证明本方法能够在极大程度上提高对地质灾害平面位移与垂直位移情况监测结果的准确性,最大限度降低传感器数据采集阶段误差对于监测结果的影响。

## 参 考 文 献

- [1] 徐伟,铁永波,李江,等. 边坡雷达在重大突发滑坡应急监测中的应用研究[J/OL]. 沉积与特提斯地质,2023,03(013):1-13
- [2] 易邦进,吴帆,傅涛,等. SBAS/PS-InSAR 技术在复杂山区地质灾害探测中的对比研究——以云南省福贡县为例[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2022,40(06):54-61
- [3] 李罡焯,季永新,杨成. 喀斯特地质深基坑支护结构水平位移监测数据分析及模拟[J]. 绿色环保建材,2021(02):147-150
- [4] 刘邢巍,蔡华,蒲德祥,等. 基于 CORS 基准站的 GNSS 滑坡地质灾害监测数据处理策略分析[J]. 全球定位系统,2022,47(02):7-12
- [5] 叶雪松,武长城,张敏. 基于 GNSS 的地质灾害变形分析及数据去噪方法研究[J]. 经纬天地,2022(01):17-21
- [6] 王姝,任玉,关展旭,等. 基于差异信息量的多源数据融合方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2021,42(09):1246-1253
- [7] 孙群,温伯威,陈欣. 多源地理空间数据一致性处理研究进展[J]. 测绘学报,2022,51(07):1561-1574
- [8] 常娟娟,吴凯,卢亚杰,等. 基于视觉技术的岩土工程高边坡外观变形智能监测技术研究[J]. 四川建材,2021,47(08):71-72
- [9] 张鸿祥,刘平利,刘家橘,等. 郑汴新区地质灾害变形监测系统方案改进探讨[J]. 地理空间信息,2021,19(05):75-77+5
- [10] 韦洪昌,王德丰. 全站仪中间设站短距三角高程测量在地质滑坡变形监测中的应用[J]. 世界有色金属,2021(04):162-163+166



# DEFORMATION MONITORING METHOD OF GEOLOGICAL DISASTER BASED ON THE MULTI-SENSOR VALUATION FUSION THEORY

HUANG Ming-jian

*(Foshan Geological Bureau of Guangdong Province, Foshan 528000, China)*

**Abstract:** In the process of monitoring the deformation of geological disasters, because the data collected by sensors will be affected by the objective environment, there will be an abnormal situation, which will lead to a big error between the monitoring results of deformation and the actual situation. Therefore, a method of monitoring the deformation of geological disasters based on multi-sensor valuation fusion theory is proposed. In the preprocessing stage of multi-sensor data, the estimation fusion theory is introduced, and the specific fusion algorithm is the minimum error mean square deviation method, which is used to correct the abnormal values in the data collected by sensors. In the deformation monitoring stage, the characteristics of multiple data sources (sensors) when observing the same target are fully utilized, and the relationship among observation characteristics, real-time state data and development function is combined to realize effective monitoring of geological disaster deformation. In the test results, the design method can obtain the horizontal and vertical displacement results of a subway tunnel, which has high reliability and accuracy.

**Key words:** multi-sensor; valuation fusion theory; geological disaster deformation; minimum error mean variance method; anomalous value correction; observation characteristics; development function