

水利隧洞施工期围岩变形多源数据融合监测与预警

付欢 刘夕奇

珠江水利委员会珠江水利科学研究院 广东 广州 510611

摘要: 本文聚焦水利隧洞施工期围岩变形监测与预警问题,阐述了多源数据融合监测的重要性。分析了水利隧洞施工期围岩变形的特点及影响因素,介绍了多源数据融合监测所采用的技术手段,包括传统监测方法与新型传感器技术等。详细探讨了多源数据融合的算法与模型,通过案例分析展示了多源数据融合监测在实际工程中的应用效果,并构建了基于多源数据融合的围岩变形预警体系。研究表明,多源数据融合监测能够提高围岩变形监测的准确性和可靠性,为水利隧洞施工安全提供有力保障。

关键词: 水利隧洞; 施工期; 围岩变形; 多源数据融合; 监测与预警

引言

水利隧洞施工安全至关重要,围岩变形是影响安全的关键因素。因隧洞地质条件复杂,受地应力、地下水等因素影响,围岩变形具不确定性、复杂性和动态性。传统单一监测方法难全面准确反映变形情况,易遗漏信息,给施工安全埋下隐患。多源数据融合监测技术可整合分析不同监测手段的数据,发挥各方法优势,提高数据准确性与可靠性,为围岩变形预警提供全面准确信息,开展相关研究意义重大。

1 水利隧洞施工期围岩变形特点及影响因素

1.1 围岩变形特点

一是时空变异性。水利隧洞施工动态推进,围岩应力状态随时间和施工变化,在时空上变异性明显。不同位置围岩变形差异大,同一位置在不同施工阶段的变形速度和量也有别。二是非线性特征。围岩变形是复杂非线性过程,受多种因素相互作用影响,应力-应变关系通常呈非线性,预测分析难度大^[1]。三是突发性。某些情况下,围岩变形可能突然加剧,引发隧洞失稳等事故,多与地质构造、地下水有关,难以提前精准预测。

1.2 影响因素

围岩变形受多因素影响:①地质条件:岩石类型、结构等不同,变形特性差异大,软弱破碎岩体更易变形破坏。②地应力:是初始应力源,隧洞开挖应力改变,地应力超围岩强度就会引发变形破坏,其大小方向影响显著。③地下水:会降低围岩强度、增加自重、产生水压力,渗流还致软化泥化,加剧变形。④施工方法:不同方法对围岩扰动不同,如爆破损伤大,盾构法扰动小。⑤支护措施:合理支护可控制变形,支护时机和参数影响效果。

2 多源数据融合监测技术手段

2.1 传统监测方法

①收敛计监测:收敛计是一种常用的测量隧洞围岩收敛变形的仪器。通过在隧洞周边设置测点,定期测量测点之间的距离变化,从而得到围岩的收敛变形数据。收敛计监测具有操作简单、成本低等优点,但测量精度受人和环境因素影响较大。②多点位移计监测:多点位移计用于测量围岩内部不同深度的位移变化。将多点位移计安装在隧洞围岩中,通过测量各测点的位移,可以了解围岩内部的变形情况。多点位移计监测能够提供围岩深部的变形信息,但对于安装工艺要求较高^[2]。③应力计监测:应力计用于测量围岩的应力变化。通过在围岩中安装应力计,可以实时监测围岩的应力状态,为分析围岩变形提供重要依据。应力计监测能够直接反映围岩的受力情况,但应力计的安装和保护难度较大。

2.2 新型传感器技术

①光纤光栅传感器:光纤光栅传感器是一种基于光纤光栅技术的新型传感器,具有精度高、抗干扰能力强、耐腐蚀等优点。它可以同时测量温度和应变等多个物理量,能够实现对围岩变形的分布式监测。将光纤光栅传感器布置在隧洞围岩中,可以实时获取围岩的应变和温度变化信息,为围岩变形分析提供丰富的数据支持。②激光扫描技术:激光扫描技术是一种非接触式的测量方法,能够快速、准确地获取隧洞表面的三维坐标信息。通过定期对隧洞进行激光扫描,可以得到隧洞表面的变形数据。激光扫描技术具有测量速度快、精度高、数据量大等优点,能够全面反映隧洞表面的变形情况。③微震监测技术:微震监测技术是通过监测围岩破裂产生的微震信号来分析围岩的稳定性和变形情况。在隧洞周围布置微震传感器,实时监测微震事件的发生时间、位置和能量等信息。通过对微震数据的分析,可以

判断围岩的破裂程度和发展趋势,为围岩变形预警提供重要依据。

3 多源数据融合算法与模型

3.1 数据预处理

由于不同监测手段获取的数据在格式、精度、量纲等方面存在差异,因此在进行数据融合之前,需要对原始数据进行预处理。数据预处理主要包括数据清洗、数据归一化、数据插值等步骤。数据清洗的目的是去除数据中的噪声和异常值,例如,通过设置合理的阈值,将超出正常范围的数据点视为异常值并予以剔除。数据归一化是将不同量纲的数据转换为统一量纲的数据,以便于后续的分析 and 处理。常用的归一化方法有最小-最大归一化和Z-score归一化等。最小-最大归一化是将数据线性地映射到[0,1]区间,公式为: $x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$, 其中x为原始数据, x_{min} 和 x_{max} 分别为数据的最小值和最大值, x_{norm} 为归一化后的数据。数据插值是用于填补缺失数据,提高数据的完整性和连续性。常用的插值方法有线性插值、样条插值等。例如,当某个时间点的监测数据缺失时,可以根据相邻时间点的监测数据采用线性插值方法进行估算。

3.2 数据融合算法

3.2.1 加权平均法

加权平均法是一种简单常用的数据融合方法。该方法根据不同监测数据的可靠性和重要性,为每个数据源分配一个权重,然后将加权后的数据进行平均,得到融合后的结果。设共有n个数据源,第i个数据源的数据为 x_i ,权重为 w_i ,则融合后的结果X为: $X = \sum_{i=1}^n w_i x_i$, 其中 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。加权平均法的优点是计算简单,易于实现,但权重的确定往往具有一定的主观性,通常需要根据经验或通过实验来确定。

3.2.2 卡尔曼滤波法

卡尔曼滤波法是一种基于递推算法的最优估计方法,适用于动态系统的数据融合。该方法通过建立系统的状态方程和观测方程,利用前一时刻的状态估计值和当前时刻的观测值,递推计算出当前时刻的状态估计值^[3]。在水利隧洞围岩变形监测中,可以将围岩变形看作一个动态系统,状态变量可以包括围岩的位移、速度等,观测变量为各种监测手段获取的数据。卡尔曼滤波法能够有效地处理含有噪声的数据,提高数据融合的精度和可靠性。其基本步骤包括预测步骤和更新步骤,通过不断地迭代计算,实现对系统状态的最优估计。

3.2.3 神经网络法

神经网络法是一种模拟人类神经系统结构和功能的计算模型,具有强大的非线性映射能力和自适应学习能力。通过构建合适的神经网络模型,将多源监测数据作为输入,输出融合后的结果。常用的神经网络模型有BP神经网络、径向基函数(RBF)神经网络等。以BP神经网络为例,它由输入层、隐藏层和输出层组成,通过不断调整神经元之间的连接权重,使得网络的输出尽可能接近实际值。神经网络法能够自动学习数据之间的复杂关系,适用于处理复杂的非线性数据融合问题。在水利隧洞围岩变形监测中,可以利用神经网络法对多源监测数据进行融合,挖掘数据背后的潜在规律,提高监测数据的准确性和可靠性^[4]。

3.3 数据融合模型

基于上述数据融合算法,可以构建水利隧洞施工期围岩变形多源数据融合模型。该模型以多源监测数据为输入,经过数据预处理后,采用合适的融合算法进行融合处理,得到围岩变形的综合估计值。同时,模型还可以结合围岩变形的影响因素和变形机制,对围岩变形的发展趋势进行预测和分析。例如,将收敛计、多点位移计、光纤光栅传感器等监测数据输入到数据融合模型中,经过加权平均法或卡尔曼滤波法等算法处理后,得到围岩变形的综合估计值,并根据历史数据和地质条件等信息,采用时间序列分析方法或神经网络预测方法对围岩变形的未来发展趋势进行预测。

4 案例分析

4.1 工程概况

某水利隧洞工程全长5.6km,隧洞断面为圆形,直径为8m。隧洞所处地质条件复杂,岩性主要为砂岩和泥岩,存在多条断层和节理裂隙。在隧洞施工过程中,采用多源数据融合监测技术对围岩变形进行实时监测。

4.2 监测方案

①监测仪器布置:在隧洞周边设置收敛计测点,每隔10m设置一组,每组3个测点;在隧洞关键部位安装多点位移计,每个断面安装3个多点位移计;在围岩中安装应力计,监测围岩的应力变化;同时,布置光纤光栅传感器、激光扫描设备和微震传感器,实现对围岩变形的全方位监测。②监测频率:在隧洞开挖初期,监测频率为每天1-2次;随着施工的推进,根据围岩变形情况适当调整监测频率,当围岩变形较大时,增加监测频率至每小时1次。

4.3 数据融合与结果分析

①数据预处理:对采集到的多源监测数据进行清

洗、归一化和插值处理，去除噪声和异常值，提高数据的质量和可用性。②数据融合：采用卡尔曼滤波法对多源监测数据进行融合处理，得到围岩变形的综合估计值。将融合后的数据与单一监测数据进行对比分析，结果表明，多源数据融合后的监测结果更加准确、可靠，能够更全面地反映围岩的变形情况。③变形趋势预测：基于融合后的监测数据，采用时间序列分析方法对围岩变形的发展趋势进行预测。预测结果表明，在后续施工过程中，围岩变形将继续增大，但变形速率逐渐减缓，隧洞整体处于稳定状态。

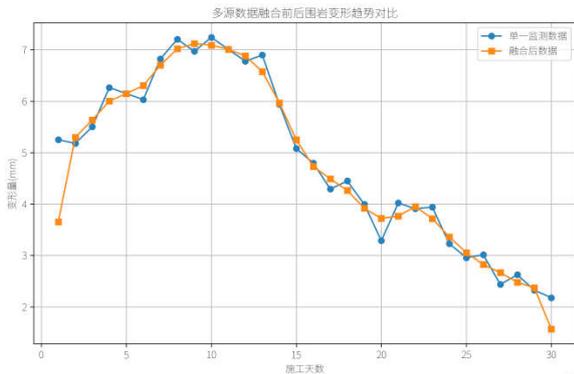


图1：围岩变形趋势对比图（融合前后数据对比）

5 基于多源数据融合的围岩变形预警体系构建

5.1 预警指标确定

根据水利隧洞施工期围岩变形的特点和影响因素，确定围岩变形预警指标，如围岩收敛变形速率、围岩内部位移速率、围岩应力变化率等。同时，结合工程实际情况和经验，确定各预警指标的阈值。例如，当围岩收敛变形速率连续3天超过2mm/d时，发出蓝色预警；当围岩内部位移速率连续2天超过3mm/d时，发出黄色预警等。

5.2 预警等级划分

表1：预警等级划分

预警等级	颜色	应对措施
蓝色预警	一般	加强监测频率，密切关注围岩变形情况
黄色预警	较重	对围岩进行加固处理，如增加锚杆数量、喷射混凝土等
橙色预警	严重	暂停施工，组织专家进行评估和论证，制定详细的处理方案
红色预警	特别严重	立即撤离施工人员，采取紧急抢险措施，确保人员安全

5.3 预警模型建立

基于多源数据融合结果和预警指标，建立围岩变形预警模型。当监测数据超过预警阈值时，预警模型自动发出预警信号，并根据预警等级提供相应的应对措施建议。预警模型可以采用专家系统、模糊综合评价等方法建立，综合考虑多种因素的影响，提高预警的准确性和可靠性。

5.4 预警系统实现

开发基于多源数据融合的围岩变形预警系统，实现数据的实时采集、传输、处理和分析，以及预警信息的及时发布。预警系统采用可视化界面，方便工程管理人员实时掌握围岩变形情况和预警信息，及时采取相应的措施保障施工安全。预警系统还可以与施工管理系统、地质预报系统等进行集成，实现信息的共享和协同工作，提高水利隧洞施工的安全管理水平。

6 结语

水利隧洞施工期围岩变形具时空变异性等特点，受多种因素影响；多源数据融合监测技术整合优势，能提高监测准确性与可靠性，为分析提供全面准确信息；案例分析显示其在实际工程中应用效果良好，能为围岩变形预警提供可靠依据；基于该技术构建的预警体系可为施工安全提供保障。展望未来，需进一步研究融合算法和模型，加强新型传感器研发应用，深入研究围岩变形机制规律以建立准确预测模型，完善预警体系并加强与其他系统集成，提高施工安全管理水平。

参考文献

- [1]李怀国,黄铭,刘雪山,等.隧洞施工期围岩变形监测确定性模型研究[J].水科学与工程技术,2025,(03):71-75.
- [2]曹善凯.基于机器视觉的隧道围岩变形监测及预警研究[D].东北电力大学,2025.
- [3]陈梦雷,李晨阳,罗群.灌溉河段大断面分洪输水隧洞围岩变形监测分析[J].湖南水利水电,2025,(02):77-79+116.
- [4]董山川.隧道围岩变形自动监测系统在施工中的应用[J].工程质量,2025,43(02):72-75.