

隧道建设地质灾害预报关键技术研究

魏晔堃¹ 谢杰^{1*} 陈敦理² 程曦²

1. 四川沿江宜金高速公路有限公司; 2. 招商局重庆公路工程检测中心有限公司

摘要: 隧道工程的建设具有复杂性和不可预见性, 为减少和降低安全风险, 需要对复杂地质条件下隧道建设地质灾害进行预报。针对当前隧道建设地质灾害预报存在的问题, 构建一种基于大数据技术的隧道建设地质灾害知识库(数据库), 将传统地质灾害预报技术与新型人工智能技术相结合。基于地质分析-物探探查-人工智能集成预测技术, 实现对隧道建设地质现状评估、异常诊断、趋势预测等。有效解决完全依赖专家经验、仪器监测信息的约束, 提高隧道建设地质灾害预报准确度和精度。

关键词: 隧道建设; 地质灾害预报; 人工智能集成预测技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.02.026

近年来我国公路隧道发展迅速, 为减少和降低公路隧道建设安全风险, 需对复杂地质条件下的隧道进行相关地质预报。隧道工程的基本特点是投资大、技术复杂、涉及工程面广、使用周期长、如果发生事故后果比较严重, 往往会造成较大的社会影响和人身财产损失。隧道施工中的地质灾害预报对减少隧道施工的盲目性, 实现安全快速施工具有重要作用。

一、隧道建设地质灾害预报必要性分析

在隧道建设中, 常遇到地质条件复杂的区域, 尤其是隧址穿越空洞区、断层构造带、岩溶发育地区以及瓦斯浓度高的危险地段。若事先未能探明这些不良地质发育与分布情况, 施工时往往会造成塌方、突泥涌水、瓦斯爆炸等严重事故。通过隧道建设地质灾害预报, 能及时探明掌子面前方存在的不良地质情况, 如不良地质体的赋存位置、类型及其可能造成的风险等。可以防止隧道发生坍塌、涌水、突泥和瓦斯爆炸等可能发生的地质灾害。同时通过超前地质预报, 可以掌握掌子面前方短距离范围内的地质构造条件、围岩级别类型, 为施工单位正确选择开挖断面、施工方法、支护参数类型等提供较为科学的依据。综上, 在提高施工效率、减少施工周期、安全科学施工、降低施工事故损失等方面, 隧道建设地质灾害预报具有显著的经济、社会效益。

二、国内外现状及发展趋势分析

隧道施工过程中围岩受开挖卸荷和局部不良地质条件影响, 存在着突泥、涌水、塌方等地质灾害的危险。因此对隧道施工全过程中的地质灾害进行预报预测, 提前做好应对方案, 对保障隧道施工具有重要意义。

超前地质预报方法较多, 主要可分为传统的洞内外地质调查法、掌子面超前钻孔直接预报法和较先进的地球物理探测法3大类。地球物理探测法进行超前地质预报最早起源于前苏联, 根据地震波传播理论而采用的垂直地震剖面法现又称视速度法(TVSP)^[1]。20世纪70年代, 电磁波探测技术应用在短距离的隧道超前地质预报工作中。到20世纪末, TSP(Tunnel Seismic Prediction)隧道地震波反射预报系统面世, 凭借较强的抗干扰能力、较快的资料解释及对隧道施工影响较小等优势得到广泛应用, 是目前隧道超前预报领域中比较先进的技术^[2]。

近年来, 科学技术的发展不断促进着超前地质预报领域仪器设备和理论的更新。如利用物体发射出的红外线能量大小的差异而开发的红外探水法^[3]; 使用极小偏移距地震波激发—接收系统的陆地声纳法; 普通掌子面地质编录结合计算机图形图像技术发展而来的掌子面地质信息数字图像编录识别技术等。这些新技术的大量应用使隧道地质超前预报工作得到了长足的进步^[4]。

基于不同的物性参数的物探预报方法原理各不相同, 但其结果均存在多解性的, 且受到各种条件的制约, 各种方法均存在相应的局限性, 单一的预测方法准确率较低。人们已逐渐提出了能融合多方面信息的隧道地质灾害风险评估模型: 如周建春^[5]等针对复杂环境和大断面山岭隧道施工, 提出采用地震散射波场和瞬变电磁波场对复杂自然条件下大断面隧道施工进行超前地质预报综合探测的技术关键点和现场实施工作流程, 从而为复杂环境的大断面山岭隧道施工安全提供科学依据和可靠保证; 原小帅等^[6]建立了基于量化指标的层次分析法进行综合预报, 并在紫荆山隧道断层预报中进行实际应用。近年来, 人工智能算法广泛应用于各个领域, 其中也包括隧道地质情况的预测。Sousa^[7]利用贝叶斯网络能够将领域知识与数据结合起来, 预测隧道施工前的地质情况, 结果地质预测模型与实测地质吻合较好, 该

方法可以系统地评估和减轻与隧道相关的固有风险。Mohammadi^[8]等将半经验法线性和非线性回归法，最终通过编程具有反向传播的多层感知（MLP）训练算法，这几种算法进行尼亚耶什地铁隧道的岩石的最大沉降预测，实验结果表明MLP模型明显优于其他算法，对于地表最大沉降的预测提供了一个较好的方法。

总体来说，超前地质预报技术从早期的靠地质观察，经验判断发展到了多种预报方法优化结合、地球物理多参数联合反演，由定性到定量判断的新阶段，但要想达到业界预期的效果，仍需要进行大量的科学研究和实践。

三、隧道建设地质灾害预报关键技术讨论

基于隧道建设地质灾害预报的复杂性，多解性及不确定性，笔者提出一种“理论研究→技术研究→工程应用”的地质灾害超前地质预报技术。首先从机理上揭示典型地质灾害形成因素、作用机理、演变规律等，然后利用理论成果来研究隧道建设地质灾害预报关键技术，最后将理论和技术成果应用于工程建设。预报思路如图1所示。

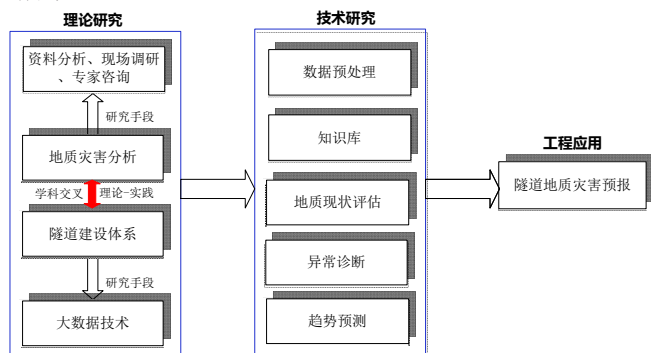


图1 隧道建设灾害地质预报思路图

（一）理论研究

基于资料分析、现场调研、模拟分析、专家咨询等研究手段，开展典型地质灾害的全因素分析、主因素识别、外环境变化情况下的演变趋势、复杂地质结构下的灾害分布规律等；利用大数据技术实现多源隧道建设信息融合、异构信息集成等，构建一套完整的隧道建设地质灾害形成及演变知识体系，为隧道地质灾害预报、预警、维护及安全控制技术提供参考依据。

1) 知识库建立：隧道建设主要面临的地质灾害包括突水突泥、岩爆、岩土体变形位移滑塌、瓦斯及其他有害气体涌出突出等。收集和查阅历史隧道工程的地质分析信息、物探结果、灾害识别及判定、专家结论等，对已经发生的灾害案例信息采用公式、文字、图像、视

频、声音等方式进行结构化和有序化处理，形成信息间互相联系的知识片集，采用人工智能算法融合广泛收集的专家经验，形成隧道地质灾害知识库，为风险辨识、识别、评估和预警提供有力的支持。

2) 地质灾害机制研究：充分解析知识库，利用数值分析、模型试验、案例分析等手段研究揭示隧道建设地质灾害发生机理、分布及其演变规律。基于智能算法（如流形学习、独立主成分分析、贝叶斯网络等），对地质、物探、环境等多源信息进行有机融合，找出反映隧道地质风险的直接或间接指标，以相关致因理论为基础建立地质灾害形成的一对一、多对一、一对多的逻辑联系。最后构建风险识别规则、推理机制及算法，实现风险识别的智能化。

（二）技术研究

在理论研究的基础上，利用隧道开挖前及开挖过程中的地质分析和物探信息，研究隧道地质灾害超前预报和动态预报关键技术。通过对监测数据预处理及分析，结合隧道建设地质灾害知识库，利用智能算法实现对隧道建设地质现状评估、异常诊断、趋势预测等，以有效解决完全依赖专家经验、仪器监测信息的约束，提高隧道建设地质灾害预报准确度和精度。

1) 地质灾害超前预报：针对隧道地质复杂性和多变性，依据长短结合、上下对照、定量和定性相结合的方法来提高隧道前方围岩的准确性。根据前期工程经验，隧道开挖前采用地质分析和物探集成方法对地质灾害进行超前探测和预报。采用资料查阅、现场调研等方式开展地质调查。物探以地震波法（TGP或TSP）技术为主，根据不同地质情况，综合应用红外探测、地质雷达、小型轻便的矿井防爆型瞬变电磁仪或高分辨直流电法等技术，进行地质探测预报。首先利用智能算法，对探测信号进行滤波、去噪、特征提取、强化学习等处理（小波变换、模态分解、粒子滤波、图像分割等技术），提高有效信息的表征度；然后根据知识库和地质灾害机制分析成果，结合地质分析结果，建立探测信号与地质灾害（断层、岩溶、涌水突泥、瓦斯或其他有害气体等）的状态评估、异常诊断、趋势预测等智能模型（神经网络、支持向量机、模糊系统等智能算法）。

2) 地质灾害动态预报：在开挖过程中，地质灾害会严重影响到施工安全、进度和质量。所以，在隧道施工过程中不仅要进行超前探测和预报，还应该加强对已开挖段的监控测量和深度探测预报。在开挖过程中，对

地表沉降量、围岩收敛变形量、施工支护应力、拱顶下沉量等开展连续监测。根据日常监测量，结合地质灾害形成机制和知识库，利用人工智能技术建立灾害与其影响变量之间的分类和回归映射，构建基于日常监测和超前探测的动态预报模型，为开挖过程（隧道已开挖段）的地质灾害预警及防护提供信息支持。

（三）工程应用

通过理论研究、技术研究，解析地质灾害成因、演变机制、分布规律等，构建不同地质环境下隧道建设地质灾害知识库，研发地质灾害超前预报、动态预报等关键技术，并进行工程应用。实现隧道建设典型地质灾害（断层、岩溶、涌水突泥、瓦斯或其他有害气体等）精准预报。隧道建设地质灾害预报技术路线图见图2。

构建知识体系

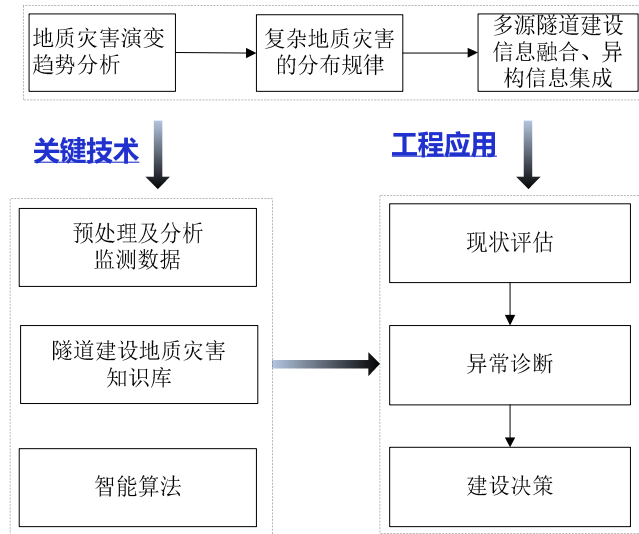


图2 隧道建设地质灾害预报技术路线图

四、结束语

隧道建设地质灾害预报随着科学技术的发展日新月异，各种新技术新方法层出不穷，目前多数隧道建设地质灾害评估、诱因识别、演变趋势等知识不完备，无法全面获得灾害形成机制，故需对地质灾害发生机理进行分析与建模。本文针对这一问题，建立基于大数据技术的隧道建设地质灾害知识库（数据库）。本着“先预测，再施工”的基本原则，开展隧道建设地质预报研究。多源信息（地质勘察、物探、常规监测等）的耦合影响和冗余信息干扰，给地质灾害精准预报带来挑战。本文针对这一问题，将传统地质灾害预报技术与新型人工智能技术相结合，提出一种基于地质分析-物探探查-人工智能集成预测技术，用于超前预报和动态预报。最

终实现隧道建设地质灾害预报的精准化，智能化。

参考文献

[1]周黎明, 尹建民, 侯炳绅, 等. 弹性波反射法在地质超前预报中的应用分析[J]. 长江科学院院报, 2000, 25(1): 61-63.

[2]肖书安, G. Sattel, Vereina. 隧道工程中的地质超前预报测量[J]. 广东公路交通, 1998, 54(增): 115-120.

[3]汪成兵, 丁文其, 由广明. 隧道超前地质预报技术及应用[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(1): 120-122.

[4]Inazakit, Isahaih, Kawamuras, et al. Stepwise application of horizontal seismic profiling for tunnel prediction ahead of the face[J]. The Leading Edge, 1999, 18: 1429-1431.

[5]周建春, 李卫民, 魏琴, 等. 复杂环境大断面隧道施工超前地质预报技术与工程应用[J]. 中外公路, 2016(4): 238-241.

[6]原小帅, 张庆松, 许振浩, 等. 基于层次分析法的隧道综合地质预报优化[J]. 工程地质学报, 2011, 19(3): 346-351.

[7]Sousa R L, Einstein H H. Risk analysis during tunnel construction using Bayesian Networks: Porto Metro case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2012, 27(1): 86-100.

[8]Mohammadi S D, Naseri F, Alipoor S. Development of artificial neural networks and multiple regression models for the NATM tunnelling-induced settlement in Niayesh subway tunnel, Tehran[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(3): 827-843.

作者简介：魏晔堃，男，汉族，出生于1989年5月，四川青神人，2011年毕业于成都理工大学工程技术学院，工程管理专业，本科，中级工程师，主要从事公路工程安全、质量管理及相关方法研究工作。

通讯作者：谢杰，男，汉族，出生于1996年8月，四川自贡人，2022年毕业于长安大学公路学院，交通运输专业，硕士研究生，初级工程师，主要从事公路工程安全、质量管理及相关方法研究工作。