

水工隧洞围岩稳定性动态预测与支护方案研究

李乐华

抚州鹏程工程质量检测有限公司 江西抚州 344000

摘要：水工隧洞围岩稳定性是影响隧道建设与运营安全的重要因素之一，随着工程规模与施工环境的复杂化，传统的预测与支护方法面临较大挑战。基于现代技术手段，本文提出了一种创新的动态预测方法，结合数值模拟、地质勘探数据及现场监测信息，建立了水工隧洞围岩稳定性的动态预测模型。该模型能够实时反映围岩变化，并为支护设计提供依据，优化了支护方案的选择和实施。研究表明，该方法在复杂环境下具备较高的预测精度，能有效提升隧道工程的安全性与经济性。

关键词：水工隧洞；围岩稳定性；动态预测；支护方案；数值模拟

引言

随着水工隧洞建设的深入发展，围岩稳定性问题日益成为工程安全保障的关键。传统的围岩稳定性预测方法主要依赖静态分析，难以应对实际施工过程中的复杂变化。隧道施工过程中，围岩受多种因素影响，具有高度的动态性和复杂性。为了应对这一挑战，采用先进的动态预测技术显得尤为重要。该技术能够根据现场实时数据进行调整，提高预测的精度与可靠性。在支护方案的选择上，动态预测方法不仅能反映围岩的实时状态，还能根据预测结果优化支护结构设计，确保施工过程中的安全性与稳定性。

一、围岩稳定性问题及其对水工隧洞工程的影响

（一）水工隧洞围岩稳定性的重要性

水工隧洞的建设通常涉及较复杂的地质条件和多变的地下水环境，因此围岩的稳定性直接影响到隧道施工的安全性及经济性。围岩稳定性不仅决定了隧道的开挖难度，还关系到后期的运营安全。在水工隧洞的设计与施工过程中，围岩稳定性问题贯穿始终，若稳定性不足，容易引发塌方、渗漏等安全事故，影响隧道的结构完整性和使用寿命^[1]。围岩稳定性对水工隧洞工程来说具有至关重要的作用，必须在设计初期和施工过程中予以充分考虑，确保工程的顺利进行。

（二）围岩稳定性影响因素的分析

围岩稳定性受多个因素的综合影响，其中最主要的

因素包括岩层的力学性质、地质构造特征、地下水条件以及施工技术等。岩层的强度、硬度、韧性等性质直接影响到围岩的承载能力和变形特性。地质构造，如断层、裂隙的分布和走向，也对围岩稳定性有显著影响，特别是在复杂的构造环境中，岩层的脆弱性往往增加。地下水的渗透性和水位变化同样是围岩稳定性的重要影响因素，水压力的波动可能导致围岩结构的变化。施工过程中产生的扰动，如爆破、开挖等，也会改变围岩的应力分布，从而影响其稳定性。

（三）围岩稳定性失效的常见原因及其后果

围岩稳定性失效的原因多种多样，常见的因素包括岩体的应力集中、地下水渗透、施工过程中产生的扰动等。岩体的应力集中可能由于地质构造复杂，造成局部区域的应力过大，从而导致围岩破裂。地下水渗透则会通过水压的变化影响围岩的稳定，长期渗水甚至会导致岩层软化、降低其强度，进一步增加围岩失稳的风险。施工过程中若采取不合理的开挖方法或支护措施，可能导致围岩在短期内出现变形或塌方。围岩失效后，最直接的后果是隧道塌方、渗漏，甚至引发严重的安全事故，对施工人员和隧道设备造成威胁，同时也增加了后期的修复和加固成本，影响工程进度和经济效益。

二、现有围岩稳定性预测方法的局限性

（一）传统静态预测方法的不足

传统的静态预测方法主要依赖于地质勘探数据和一系列静态力学模型来评估围岩的稳定性。这些方法通常基于假设围岩在施工过程中不发生显著变化的前提下进行计算，未能考虑地下水变化、施工扰动和长期应力积累等动态因素。这使得预测结果往往偏离实际情况，特

作者简介：李乐华（1989.10-），男，汉族，江西抚州人，本科，工程师，研究方向：水利工程质量检测工作。

别是在复杂地质条件下，静态模型难以反映围岩的实时变化^[2]。静态方法大多依赖简化的假设，忽略了实际施工过程中多因素交互的影响，导致在某些极端情况下，围岩失稳的风险被低估。静态方法的可靠性较差，无法满足现代隧道工程对精确预测的需求。

（二）现有数值模拟技术的应用与挑战

数值模拟技术在围岩稳定性预测中已被广泛应用，能够较为全面地考虑复杂地质条件和不同施工阶段的影响。现有的数值模拟技术仍然面临许多挑战。模型的精度受到输入数据质量的限制，尤其是在不完善的地质勘探数据和地下水条件下，模拟结果可能存在较大误差。模拟过程中对材料非线性、应力-应变关系以及岩体破坏机制的描述仍然不够完善，难以真实反映围岩在极端条件下的行为。

（三）基于数据驱动的预测方法的局限性分析

基于数据驱动的预测方法，如机器学习和人工智能技术，近年来在围岩稳定性预测中获得了较多应用。该方法能够通过对大量历史数据进行学习，自动发现数据中的规律和特征，从而进行稳定性预测。这类方法的局限性也不容忽视。数据质量的差异和数据不完整性可能影响模型的准确性，尤其是在某些特定环境下，缺乏足够的训练数据来支撑模型的有效学习。数据驱动方法虽然能够处理大量复杂的变量，但在面对复杂的非线性关系和系统的变化时，其预测能力仍然受到限制。这些方法往往依赖于大量的历史案例，缺乏对新型工程条件或突发事件的有效适应能力。数据驱动的预测方法在特定情况下可能无法提供理想的预测效果。

三、动态预测方法的创新设计与实现

（一）动态预测模型的构建思路与原理

动态预测模型的构建需要基于对围岩稳定性进行实时监测和分析，以适应施工过程中围岩状况的变化。这类模型将岩体的力学特性、地质条件、施工活动等因素纳入考虑，并通过数值模拟与数据融合的方法，动态更新围岩的稳定性评估。与传统静态预测方法不同，动态模型通过实时获取施工现场的数据，能够反映围岩应力、位移等的即时变化，进而调整预测结果^[3]。该模型的核心在于它能够实时响应地下水变化、外部荷载以及施工过程中引起的扰动因素，通过时序数据的叠加分析来修正围岩稳定性的估计。

（二）动态数据集成与实时监测技术的应用

动态预测模型的成功实施离不开数据的高效集成与实时监测技术的支持。围岩稳定性预测依赖于多种数据

源，包括地质勘探数据、施工监测数据、地面和地下水文数据等，这些数据需通过现代化的集成平台进行统一管理和实时更新。实时监测技术，特别是传感器和物联网技术的发展，为围岩稳定性监测提供了极大的支持。通过在隧道及围岩中布设各种传感器，可以实时获取岩体的应力、变形、地下水压力等关键参数，并通过数据采集系统进行快速传输。这些实时数据的采集与处理形成了动态预测系统的基础，使得模型可以根据现场环境变化动态调整预测结果，从而为工程决策提供科学依据，及时调整支护方案和施工方法，避免突发的安全事故发生。

（三）基于动态预测的围岩稳定性评估方法

基于动态预测的围岩稳定性评估方法结合了数值模拟与实时监测数据，为围岩稳定性提供了更加精确和及时的评估。在实际应用中，该评估方法依赖于对多维数据的动态分析与模型的实时更新，能够考虑到围岩在不同施工阶段和不同环境条件下的变化。通过将实时监测数据输入到动态预测模型中，模型可以根据当前围岩的力学状态、应力分布以及外部因素的变化，对围岩稳定性进行评估并输出实时风险预警。这种方法不仅能动态调整围岩稳定性评估结果，还能够在施工过程中及时发现潜在问题，提出针对性的支护优化建议。通过动态预测和评估方法的结合，可以大幅提高围岩稳定性的预测精度，优化支护方案，最大程度地减少工程风险。

四、动态预测方法在支护方案设计中的应用

（一）动态预测与支护设计的耦合关系

动态预测方法与支护设计的耦合关系在围岩稳定性评估中起到重要作用。传统支护设计通常基于静态假设，未能实时响应围岩状态的变化。而动态预测方法能够根据实时监测数据不断调整支护设计，确保支护方案的科学性与实用性。通过结合围岩的实时应力和变形数据，动态预测提供了对围岩变化趋势的即时反馈，使得支护方案能够在施工过程中进行灵活调整^[4]。这种耦合关系不仅提高了支护结构的适应性，还能够有效避免过度支护或不足支护现象，从而优化工程成本与施工周期，提升整体施工效率和安全性。

（二）支护方案优化的关键技术实现路径

支护方案优化的关键技术主要涉及基于动态预测的实时数据分析与智能决策系统的结合。在实施过程中，需构建与围岩稳定性相关的数值模型，并与实时监测数据相结合，实时监控围岩的应力状态和变形情况。利用优化算法对支护方案进行调整，确保支护设计的合理性与经济性。通过引入人工智能和机器学习技术，支护方

案的优化可以实现自动化决策，根据围岩的动态变化，自动推荐最适合的支护结构与材料。这一路径的实现大大提高了支护设计的响应速度，减少了人工干预，保证了支护方案在复杂工程环境中的适应性和有效性。

（三）动态预测在复杂环境下的实际应用案例

在复杂环境下，动态预测方法的应用能够显著提升支护设计的精度和实用性。在山区水工隧洞工程中，围岩受复杂地质构造、强烈地震活动及地下水流动的影响，传统的支护设计难以应对这些变化。通过实时监测数据与动态预测模型相结合，围岩稳定性可以在多变的环境下进行实时评估。在某实际工程案例中，利用动态预测技术，实时采集围岩的应力、位移、地下水位等数据，并与支护设计模型融合，成功优化了支护方案，避免了因施工扰动导致的围岩失稳，确保了隧道的长期稳定性与安全性。这一案例展示了动态预测方法在复杂环境中的应用潜力和实际效果。

五、动态预测技术对水工隧洞工程施工安全与效率的提升作用

（一）提升施工安全性的机制分析

动态预测技术在水工隧洞工程施工过程中，能够有效提升施工安全性。该技术通过实时监测围岩的应力、变形以及地下水等多种因素的变化，提供精确的动态预测信息。这使得工程人员能够及时了解围岩的变化趋势，预测可能出现的安全隐患，如塌方、涌水等问题，从而采取相应的防护措施。动态预测方法还可以实时调整支护方案，减少围岩突发性失稳的风险^[5]。当围岩状态出现不稳定迹象时，支护结构能够及时加固，避免事故发生。通过这种动态的、安全风险评估，施工过程中的安全性得到了大幅提升，保障了施工人员的生命安全和设备的稳定运行。

（二）对工程进度与成本的优化作用

动态预测技术对工程进度和成本的优化具有重要意义。在传统的隧道施工中，往往需要大量的预防性支护和反复调整，导致工程进度延误，且额外的支护材料和设备增加了成本。而利用动态预测技术，可以根据围岩的实时变化对施工方案进行及时调整，避免过度支护或者支护不足的情况，进而提高施工效率和减少不必要的支出。实时监控与预测的结合，使得工程人员能够更精准地评估围岩状态和支护需求，从而优化资源配置。通过减少不必要的施工环节和加固支护，工程的进度得以加快，整体施工周期也得以缩短，极大地降低了工程的

总成本，提升了项目的经济效益。

（三）动态预测方法对工程长期稳定性的保障

动态预测方法不仅有助于短期施工过程的安全与效率，还在保障水工隧洞工程的长期稳定性方面发挥着重要作用。在隧道施工完成后，围岩的稳定性将受到长期环境变化的影响，如地下水流动、温度变化以及岩层的逐渐沉降等因素。动态预测方法通过持续监测这些因素的变化，能够及时预警潜在的风险，如围岩变形、裂隙扩展等问题，从而为后期的维护与加固提供数据支持。随着监测数据的积累，动态预测模型将逐渐优化，使得隧道长期稳定性评估更加精准，为后期的运营与维修提供科学依据。通过这种长期的动态监测和评估，隧道的运营安全和稳定性得到持续保障，最大限度地延长了工程的使用寿命，避免了因突发性失稳带来的高昂修复费用。

结语

随着水工隧洞建设规模的扩大和地质条件的复杂化，围岩稳定性问题日益突出。传统的静态预测方法无法有效应对复杂环境中的变化，而现有的数值模拟和数据驱动方法虽有所进展，但仍面临精度、效率和适应性等方面的挑战。未来围岩稳定性预测应更加注重动态分析与实时监测技术的结合，提升预测模型的可靠性与精确度。通过综合运用多种技术手段，结合先进的数据分析方法，能够更全面地评估围岩的稳定性，并为支护方案的优化提供科学依据。只有在技术不断创新和完善的基础上，才能进一步提高隧道工程的安全性及施工效率。

参考文献

- [1]程丽荣.水工隧洞钢筋混凝土衬砌结构计算方法初探[J].地下水, 2025, 47(04): 296-299.
- [2]李永华.溶洞性顶板巷道围岩稳定性控制技术分析[J].低碳世界, 2025, 15(07): 37-39.
- [3]杨逢杰, 蒋军, 杨健, 等.基于水荷载增量过程的深埋高外水水工隧洞混凝土衬砌受力特性研究[J/OL].昆明理工大学学报(自然科学版), 1-12[2025-08-02].
- [4]张佳伟, 钱昊成, 李金斗, 等.深部软岩巷道围岩稳定性评价合理指标选择[J].建井技术, 2025, 46(04): 105-110+92.
- [5]杨建强, 周阳, 张鑫鹏, 等.地质雷达在水工隧洞工程超前地质预报中的应用[J].人民珠江, 2025, 46(S1): 40-42.