

基坑支护施工阶段安全风险动态识别与管控机制探讨

彭先洪

中国电建集团四川工程有限公司 四川 成都 610000

【摘要】基坑支护工程在城市建设中呈现多因素耦合作用下的高风险特征，施工阶段的工况变化频繁，使传统静态管理方式难以满足安全控制需求。围绕动态风险识别与管控机制的构建，通过分析当前数据化管理的发展趋势，揭示风险识别过程中存在的监测不足、信息滞后与协同不完善等关键薄弱环节。在实时监测技术和模型分析方法的支撑下，构建集数据感知、预测评估与响应联动为一体的动态管控路径，并通过工程场景的应用反馈其在早期预警、精准决策与协同处置方面的显著成效。结合智能化发展方向，提出监测体系升级、模型自学习及数字孪生平台构建等提升路径，为未来基坑支护安全管理提供可持续优化的技术支撑。

【关键词】基坑支护；施工安全；动态风险识别；监测预警；风险管理机制

DOI:10.12417/2705-0998.25.20.008

引言

基坑支护工程在城市建设密集区域中应用广泛，而其施工阶段常受地质条件、地下水位、周边建筑荷载及施工工序变化等多重因素影响，安全风险具有高度动态性。近年来，由于风险识别滞后与管控措施不及时导致的安全事故时有发生，凸显传统静态管理方法的局限性。随着监测技术和信息化手段的发展，将实时数据应用于施工阶段风险识别与响应已成为安全管理升级的重要方向。本研究旨在探索一种能够适应工况变化、基于监测信息持续更新的动态风险识别与管控机制，以提高基坑支护施工的安全可靠性，并为工程实践提供可操作的管理框架与技术支持。

1 基坑支护安全管理的数据化发展趋势

随着工程数字化进程加快，数据化手段逐渐成为支护施工安全保障的重要技术支柱。传统依赖人工观察与阶段性检测的管理模式，在响应速度和风险感知深度方面难以满足动态变化的工况需求，而传感监测技术、信息平台和智能分析工具的融入，使安全管理体系开始具备连续、自动、可追溯的特征。监测数据通过传感器网络实时采集，包括支护结构内力、变形、土体位移、地下水位、周边建筑沉降等关键指标，使风险变化的细微趋势得以被及时捕捉，为施工组织和风险控制提供更高精度的基础信息。

随着数据应用能力的提升，安全管理从结果判断逐步迈向过程预测。实时数据经过可视化平台汇总后，能够形成多维度、时序化的监测曲线，使管理人员在施工不同阶段洞察围护结构受力状态的变化规律，并识别与设计计算之间的偏差。结合数据模型的趋势分析，可对支护体系的抗变形能力、土体应力迁移路径以及水文地质环境变化进行动态研判，从而提前识别潜在失稳机制。数据化技术促使风险识别从“被动发现”走向“主动捕捉”，提高对异常工况的敏感度，支持管理者在风险演化早期制定“前置型”应对策略。

数据化发展也推动了信息集成的深化。支护施工涉及结构设计、监测单位、施工团队、监理机构等多角色协同，信息分散曾导致风险判断缺乏统一依据。通过构建数字化管理平台，各类数据资源可以在同一界面集中呈现，形成由监测数据、施工日志、设计参数与历史案例构成的综合数据库。数据的标准与共享机制使不同参与方能够基于一致的信息开展讨论，提高决策一致性与风险研判的科学性。平台化管理模式还支持对施工活动实施过程跟踪，使支护结构调整、开挖顺序变更及地下水调控等措施能够同步纳入风险评价体系，形成覆盖全周期的动态监控链条。

数据化安全管理的发展趋势还体现在智能处理能力的增强。随着数据量的持续增长，应用统计模型、有限元反演分析与机器学习算法成为识别异常与预测关键风险节点的重要手段。算法能够通过历史数据与实时数据的耦合，对支护系统的变形模式和应力响应进行推演，辅助判定危险状态的触发条件。智能分析方法的加入进一步提高了风险评估的自动化程度，降低了对管理人员经验的依赖，使安全控制体系更加稳定、精细和可量化。

2 施工阶段风险识别机制中的关键薄弱环节

施工阶段风险识别机制在基坑支护工程中往往存在信息滞后、判断依据不连续、响应链条不完整等薄弱环节，使动态风险难以得到及时有效的控制。支护结构在开挖过程中承受的荷载不断调整，土体应力场与地下水场持续变化，但部分工程仍依赖间隔式监测和人工巡视记录，这种方式难以捕捉变形速率突变、渗流路径改变等关键早期征兆，使风险识别存在明显的时间缺口。实时监测数据虽然在工程中逐步应用，但监测点布设不均、数据采集频率不足、监测量与实际风险特征不匹配等问题，使数据无法全面反映支护体系的真实状态，导致部分隐蔽风险在形成阶段未能被识别。

在识别机制中，数据解释能力不足也是重要瓶颈。监测指

标的变化往往具有多因素耦合特性，支护位移、内力变化、周边沉降或水位波动可能来源于不同工序，也可能由地质结构特征或施工扰动共同引起。若风险判定只依靠单一指标阈值或经验判断，容易出现误判或漏判，难以揭示风险演化的真实路径。此外，风险识别过程中对施工行为的动态影响考虑不足，某些工程未将开挖深度调整、支撑拆除节奏、降水措施变化等施工行为的扰动强度量化纳入风险评价，导致识别结果缺乏对施工过程的敏感性，使风险判定滞后于实际变化。

管理协同不足也是影响风险识别有效性的关键因素。施工阶段涉及多单位协作，监测数据、设计变更信息和现场工况记录若无法及时共享，将导致判断信息碎片化，影响风险识别的一致性和准确性。有些项目中监测单位、施工单位与监理之间沟通不畅，信息传递链条长，一旦出现异常信号无法快速传达到决策层，使风险处置错失最佳时机。部分工程缺乏对风险事件的历史数据整理与知识库建设，识别机制无法依托系统化案例经验进行比对分析，导致识别过程持续依赖个别工程人员的认知水平，使整体识别体系难以保持稳定的可靠性。

3 基于实时监测的动态管控路径构建

构建基于实时监测的动态管控路径，关键在于将监测数据、风险识别模型与现场施工决策形成高度耦合的闭环体系，使支护结构在变形、受力以及周边环境变化过程中保持可控状态。实时监测系统通过布设多类型传感器，对支护体系的位移、土压力、支撑内力、地下水位及周边沉降等关键指标进行连续采集，使数据具备时间序列完整性和变化趋势可追溯性。在监测体系的支撑下，数据平台可对关键参数进行实时比对、自动筛残和信号校验，确保进入风险识别机制的信息具有准确性和有效性，为后续管控决策提供可靠基础。

动态管控路径的核心在于将监测数据与风险评估模型实现深度融合。通过建立基坑变形预测模型、支护体系受力响应模型和地下水渗控模型，可对不同工况下的结构行为进行模拟和推演。模型接收实时数据输入后，可动态修正参数，形成“计算结果—现场数据”互校机制，使预测结果逐步逼近实际工况，从而提高风险研判的精准度。模型化分析能够捕捉土体应力重分布、支撑受力不均、渗流场变化等潜在风险源，使异常趋势在达到危险值前就被识别，形成提前预警的能力。通过设置多级预警阈值，管控体系可根据指标变化的速率和幅度自动触发响应措施，为施工组织提供及时指令。动态管控路径还依赖于对施工过程和风险状态的同步管理。支护施工中各项工序变动都会影响支护体系的安全稳定性，因此施工日志、工序调度、机械作业状态等信息应与监测数据同步纳入管控平台，使系统能够识别风险变化与施工行为之间的因果关系。平台根据实时监测和模型计算结果，输出针对性的调整建议，如改变开挖步距、优化支撑安装顺序、调整降水力度或实施加固措施等，通过动态策略匹配施工现场的实际需求。管理人员根据平台生成

的分析结论，可在短时间内做出风险响应，使管控过程具有高效性、连续性和前瞻性。

动态管控路径的整体性还体现于信息的闭环反馈。每一次风险响应措施的执行结果都会反映在监测数据的变化趋势中，平台通过对比响应前后的数据曲线，判断措施效果，并自动校正模型参数，使管控体系能够适应新工况条件。通过持续更新和反馈循环，管控路径逐渐形成自适应能力，使支护工程在多变施工环境中保持稳定的安全状态。

4 动态风险机制在工程场景中的应用成效

动态风险机制在工程场景中的应用，使基坑施工在复杂条件下的安全性与可控性得到显著提升。通过将监测数据与风险识别模型实时联动，支护系统在不同施工阶段的应力变化、变形趋向与水文条件能够被清晰呈现，为管理人员提供以数据为依据的决策支撑。大量工程实践表明，在动态机制支撑下，变形速率异常、支撑受力偏移、局部渗流增强等早期隐患能够提前显现，使风险处置从以往的事后应对转变为提前干预，大幅缩短了风险暴露期。监测预警的连续性与敏感性促进了支护工程实现对风险点的早发现、早判断与早控制，有效降低支护结构进入失稳阶段的概率。

动态机制在施工现场的应用也改善了管控措施的针对性与高效性。当监测系统捕捉到与模型预测不一致的变化趋势时，系统可自动生成偏差分析，为优化施工方案提供依据。例如，通过对位移与内力曲线的联合分析，可判断支撑体系是否存在受力不均或安装偏差，并及时调整施工节奏或增设临时支撑。降水系统中的水位波动信息通过动态机制分析后，可识别渗流通道变化趋势，使降水强度或井点布置能够在合理时机进行优化。动态机制对施工组织的辅助作用使管理行为更加科学化，减少了凭经验判断带来的不确定性，使风险控制措施真正做到与工程状态同步。工程场景中的应用成效还体现在风险响应流程的协同性增强。动态机制将监测单位、施工单位与监理机构的工作衔接在统一的风险管理平台上，使信息传递更加顺畅。异常信号一旦触发，不同参与方可在同一界面看到风险等级、影响范围、建议措施与责任分工，从而迅速形成协同响应，减少信息滞后带来的处置延误。在多团队参与的复杂基坑工程中，这种协同优势显得尤为重要，可显著提升工程整体的应急能力。

动态风险机制的实施还助力工程形成自学习能力。每一次风险事件的识别、干预与效果都被系统记录，形成可用于模型优化的宝贵数据。系统通过对大量实例的积累，可以不断增强对于风险模式的识别精度，使预测曲线越来越贴合真实工况。这种模型自适应能力使动态机制的应用效果随工程进展不断提升，实现从单次工程应用向可复制经验的沉淀，推动支护工程安全管理走向数字化、智能化与长周期优化的发展方向。

5 面向智能化方向的安全管控提升路径

随着传感技术与数据处理能力不断提升，基坑支护工程的监测手段将由定点、定类的传统布设向多维度、多参数的智能感知体系过渡，通过集成光纤监测、三维激光扫描、视频识别等技术，使支护结构与周边环境的状态获得更高精度的呈现。信息多源融合将显著增强系统对微小变形、沉降突变与渗流异常的捕捉能力，为风险识别提供更加丰富的参数基础。

智能化的发展还体现在风险模型的自主学习能力不断增强。传统风险评估多依赖固定阈值与人工经验，难以适应复杂工况变化。通过引入机器学习算法、土体行为演化模型与力学反演技术，风险识别过程能够在海量监测数据中提取规律，实现对结构变形模式和风险演化路径的自动判断。算法通过历史工程案例与实时数据的持续训练，可不断修正模型参数，使系统具备可靠性更高的预测能力，从而将安全管理从“规则驱动”转向“数据驱动”。自动化控制技术的应用为智能化管控提供了新的发展空间。未来支护工程的风险响应可实现部分自动化，例如通过智能控制模块调节降水系统、自动调整支撑预应力或启动加固设备，使应对措施能够在风险刚显现时迅速介入。

入，减少人工响应的延迟。智能化响应机制能够缩短决策链条，提高风险处置的及时性，使施工现场具备更强的适应能力。

在管理层面，智能化的管控路径将推动形成统一的数字孪生管理平台。平台通过虚拟与现实的动态映射，使支护结构的受力状态、施工工序和风险等级能够在数字空间中实时呈现，管理人员可借助虚拟场景进行风险推演、施工方案比选与应急演练。数字孪生技术使管理活动更加可视化、交互化和前瞻化，为复杂工程提供更高层次的安全决策支持。面向智能化的安全管控体系将逐步实现从监测自动化到分析智能化、再到响应自适应的全面升级，为基坑支护工程构建稳定、高效且具备持续优化能力的未来管理模式。

6 结语

动态风险识别与管控机制的构建推动基坑支护工程的安全管理迈向数据化、智能化方向。通过实时监测、模型分析与协同响应的深度融合，风险从隐蔽状态转向可感知、可预测与可干预，使施工过程具备更高的稳定性与可控性。随着智能技术的不断发展，安全管控体系将形成自适应提升能力，为复杂环境下的基坑工程提供更加可靠的支护与保障。

参考文献：

- [1] 周建成.城市基坑工程安全监测技术体系研究[J].岩土工程技术,2021,35(4):45-52.
- [2] 梁志辉.基坑支护施工风险机理与动态预警方法探讨[J].建筑安全,2020,36(6):72-78.
- [3] 孙昭霖.基于信息化监测的深基坑安全管理模式研究[J].建筑技术开发,2022,49(3):18-23.
- [4] 陈绍峰.深基坑工程施工阶段风险评估与控制策略[J].施工技术,2019,48(10):101-107.
- [5] 何永宸.城市复杂环境下基坑支护安全管控的实践与思考[J].土木工程与管理学报,2021,38(2):64-70.