

地铁深基坑与盾构区间施工安全风险的制度化识别框架

程战利

中铁隧道股份有限公司 河南 郑州 450000

摘要：中国城市化加速，地铁建设规模持续扩大。但地铁工程有“深、大、近、险”特点，深基坑和盾构区间施工因地质复杂、环境敏感、工艺特殊，是安全事故高发环节。传统风险识别方法依赖专家经验或临时性措施，存在系统性不足、动态响应滞后等缺陷，难满足现代大型地下工程对本质安全的要求。本文旨在构建面向地铁深基坑与盾构区间施工的安全风险制度化识别框架，该框架以系统工程理论为基础，融合风险管理PDCA循环理念，通过建立标准化风险清单库等，将风险识别变为主动、系统、嵌入企业日常运营的制度性安排。研究剖析了核心风险源及其耦合特征，阐述了标准体系、流程机制、组织文化与技术平台四大核心支柱，为提升地铁工程本质安全水平提供理论参考与实践路径。

关键词：地铁工程；深基坑；盾构区间；安全风险；风险识别；制度化

引言

21世纪以来，我国城市轨道交通建设蓬勃发展。地铁施工需穿越复杂地质环境，与城市生命线系统紧密交互，其中车站深基坑开挖与隧道盾构掘进是关键且高风险工序。深基坑深度常超20米，稳定性关乎周边安全；盾构施工是“盲操作”，面临多种技术挑战。这两类工程风险隐蔽、突发，且多因素耦合、多灾害链式演化。当前，施工安全风险管理在风险识别环节存在短板，多数依赖专家评审会等形式，存在碎片化、静态化、孤岛化弊端，宝贵经验随项目结束流失。因此，需将风险识别从“事件驱动”被动响应升级为“制度驱动”主动预防。本文提出的“地铁深基坑与盾构区间施工安全风险的制度化识别框架”，正是为解决上述痛点，提供系统性解决方案。

1 地铁深基坑与盾构区间施工的核心风险源分析

要构建有效的制度化识别框架，首先必须深刻理解两类工程的核心风险构成。它们既有共性，也各有侧重。

1.1 深基坑施工的核心风险源

深基坑的风险主要源于土体-支护-水-环境四者之间的力学平衡被打破。(1)地质与水文风险：这是最根本的风险源。包括不良地质体（如流砂、淤泥质土、承压水层）、地下水位突变、降雨入渗等。特别是承压水突涌，能在极短时间内导致基坑底部隆起、管涌，进而引发灾难性坍塌。(2)支护结构风险：围护结构（如地下连续墙、钻孔灌注桩）的设计强度不足、施工质量缺陷（如墙体接缝渗漏、混凝土强度不达标）、支撑体系（钢支撑或混凝土支撑）失稳或预应力损失过大等，都会直接削弱基坑的整体稳定性^[1]。(3)时空效应风险：

基坑开挖是一个动态过程，遵循“分层、分段、对称、限时”的原则。若施工组织不当，如开挖速度过快、暴露时间过长、支撑架设不及时，会导致土体应力释放过快，引发过大变形甚至失稳。(4)周边环境风险：基坑紧邻既有建筑、重要管线（如燃气、高压电缆）、交通主干道时，其变形控制标准极为严格。任何超出预警值的位移都可能对这些敏感目标造成不可逆的损害，甚至引发次生灾害。

1.2 盾构区间施工的核心风险源

盾构施工的风险则更多体现在掘进过程中的动态扰动与设备可靠性上。(1)地质适应性风险：盾构机型与实际地质条件不匹配是重大隐患。例如，在复合地层（上软下硬）中掘进，易导致刀盘磨损不均、姿态失控；在高水压砂卵石地层中，易发生喷涌和刀具损坏。(2)地表与地层变形风险：盾构掘进会扰动周围土体，引起地表沉降和深层土体位移。若控制不当，沉降槽范围内的建筑物、管线将面临开裂、断裂的风险。尤其在穿越河流、湖泊下方时，还存在击穿河床、引发透水事故的极端风险。(3)始发与接收风险：盾构机在始发井和接收井的进出洞作业是高风险环节。洞门密封失效、端头加固体强度不足或均匀性差，极易导致大量水土涌入，酿成重大事故。(4)设备与操作风险：盾构机是集机械、液压、电气、传感于一体的复杂系统，其可靠性至关重要。主轴承损坏、螺旋机卡死、注浆系统堵塞等设备故障，以及操作人员误判、参数设置错误等人为失误，都可能导致掘进中断甚至安全事故。(5)联络通道施工风险：在两条平行隧道之间开挖联络通道，通常采用冻结法或矿山法。此过程相当于在已建成的隧道内部

进行一次微型深基坑开挖，同样面临涌水、涌沙和结构失稳的风险。

1.3 风险的耦合与演化特征

值得注意的是，深基坑与盾构区间并非孤立存在。车站基坑往往是盾构始发/接收的基地，两者在空间上紧密衔接，在施工时序上相互影响。例如，基坑施工引起的地层扰动会改变盾构始发区域的地质条件；反之，盾构近距离侧穿或下穿基坑围护结构，也会对其稳定性构成威胁。这种交叉影响使得风险呈现出显著的耦合性和链式演化特征，单一维度的风险识别难以奏效，必须采用系统性的视角。

2 制度化识别框架的构建

针对上述风险特征和现有管理短板，本文提出一个由四大支柱构成的制度化识别框架，旨在将风险识别活动内化为企业的一种稳定能力。

2.1 支柱一：标准化的风险清单库

应着手建立一个全面覆盖、分类明晰、内容详实的企业级（或行业级）《地铁深基坑与盾构施工安全风险清单库》。

2.1.1 结构设计

清单库需采用科学合理的结构，以“风险类别—风险子项—风险描述—典型诱因—潜在后果—历史案例—初步控制措施建议”为框架进行构建。以“深基坑”这一大类为例，可进一步细分为“围护结构”“降水与排水”“开挖与支撑”“监测与预警”等多个子类。在“围护结构”子类下，又可具体列出诸如“围护结构渗漏”“围护结构变形过大”等风险子项，并对每个子项进行详细的风险描述，分析其典型诱因，如地质条件变化、施工工艺不当等，阐述可能引发的潜在后果，如周边建筑物沉降、地下管线破坏等，同时列举相关的历史案例以供参考，最后给出初步的控制措施建议，如加强监测频率、优化施工工艺等。

2.1.2 动态维护

需建立定期（如每季度）和触发式（如发生新类型事故后）的更新机制。企业应设立专门的知识管理小组，该小组肩负着收集、分析内外部事故案例、技术通报、科研成果等重要职责^[2]。通过对这些信息的深入分析，知识管理小组能够及时掌握行业动态和最新风险信息，并据此对清单库进行增删改查操作，确保清单库始终保持时效性和准确性。

2.1.3 分级管理

为了实现对风险的差异化管控，提高管理效率，需根据风险发生的可能性和后果严重程度，对清单中的风

险项进行科学分级。例如，可将风险分为 I 级重大风险、II 级较大风险、III 级一般风险等不同级别。对于 I 级重大风险，应给予高度重视，制定严格、详细的管控措施，并安排专人进行跟踪监控；对于 II 级较大风险，需采取相应的管控手段，定期进行检查和评估；对于 III 级一般风险，则可进行常规管理，但也不能掉以轻心。通过分级管理，能够合理分配管理资源，将有限的资源集中用于管控高风险项，从而有效降低整体风险水平。

2.2 支柱二：规范化的流程机制

2.2.1 全周期覆盖

将风险识别贯穿于工程全生命周期，形成“策划—实施—检查—改进”（PDCA）的闭环。策划阶段在项目投标、方案设计、施工组织设计编制阶段，强制使用风险清单库进行系统性筛查，形成《初始风险登记册》。实施阶段建立“日巡查、周研判、月评估”的常态化识别机制。每日班前会结合当日作业内容进行风险提示；每周由项目技术负责人牵头，对照施工进度和监测数据，对风险清单进行动态核对与补充；每月召开风险评估例会，邀请内外部专家对重大风险进行再评估。检查阶段将风险识别的执行情况纳入安全绩效考核。通过内审、外审等方式，检查各项目是否按制度要求开展了风险识别活动，识别是否全面、准确。改进阶段根据检查结果和实际发生的未遂事件、险兆事件，反向修正风险清单库和识别流程，实现持续优化。

2.2.2 多方法融合

制度化并不意味着僵化，在规范流程的基础上，应鼓励综合运用多种识别方法。例如，JSA（作业安全分析）适用于对具体作业活动的风险识别，通过对作业步骤的详细分解，分析每个步骤可能存在的风险，并制定相应的控制措施；HAZOP（危险与可操作性分析）则侧重于对系统工艺过程的风险分析，通过引导词激发对工艺参数偏差的思考，识别潜在的危险和可操作性问题；FMEA（失效模式与影响分析）主要用于分析产品或过程中可能出现的失效模式及其对系统的影响，提前采取预防措施^[3]。针对不同的场景和需求，选择最合适的工具进行风险识别，能够提高识别的准确性和全面性。

2.3 支柱三：常态化的组织与文化保障

2.3.1 明确责任主体

建立清晰的风险识别责任矩阵（RACI），明确各岗位在风险识别工作中的职责。项目经理作为第一责任人，对整个项目的风险识别工作负总责，需统筹协调各方资源，确保风险识别工作的顺利开展；总工程师负责技术层面的风险识别与评估，凭借其专业知识和经验，

对施工过程中的技术风险进行深入分析和判断；安全总监负责监督执行，对风险识别工作的落实情况进行全程跟踪和检查，确保各项措施得到有效执行；一线班组长和工人则是现场风险信息的第一发现者和报告者，他们在日常作业中能够第一时间察觉身边的风险变化，应及时将相关信息向上级报告。通过签订安全生产责任书，将责任层层压实，形成全员参与、各负其责的风险识别工作格局。

2.3.2 赋能一线员工

一线员工是风险识别的重要力量，但由于其知识水平和技能有限，需要给予针对性的赋能。通过制作简明扼要的可视化工具，如风险告知卡、二维码链接的微课视频等，对一线工人进行培训。风险告知卡以直观的图文形式展示常见风险的特征、危害及防范措施，方便工人随时查阅；微课视频则通过生动形象的动画演示，向工人传授风险识别的方法和技巧。同时，建立便捷的“随手拍”上报渠道，鼓励一线员工在发现风险隐患时，及时通过手机拍照上传至管理系统，使风险信息能够快速传递到相关部门，以便及时采取措施进行处理。

2.3.3 培育安全文化

营造“人人都是安全员”“报告风险无责备”的良好组织氛围，是推动风险识别工作深入开展的关键。对主动发现并报告重大风险隐患的个人或团队给予表彰和奖励，通过物质奖励和精神激励相结合的方式，激发员工参与风险识别的积极性和主动性^[4]。将风险识别从“要我做”转变为“我要做”的自觉行动，使每一位员工都认识到自己在风险防控中的重要作用，形成全员参与、共同关注安全的良好文化氛围。

2.4 支柱四：智能化的技术平台支撑

2.4.1 BIM + GIS 集成平台

构建融合了地质模型、管线模型、建筑模型的 BIM + GIS 一体化平台，为风险识别提供了直观、全面的虚拟环境。在虚拟环境中，可以模拟基坑开挖或盾构掘进对周边环境的影响，提前“看到”潜在冲突点，如地下管线与施工区域的交叉、周边建筑物与基坑的相对位置关系等。通过对这些潜在冲突点的分析，能够提前制定相应的风险预识别和防范措施，避免在实际施工中出现安全事故。

2.4.2 物联网 (IoT) 与大数据

通过在施工现场部署自动化监测设备，如测斜仪、

水位计、沉降点传感器等，实时采集基坑及周边环境的变形、应力、水位等关键数据。利用大数据分析技术，对这些海量数据进行深入挖掘和分析，建立数据间的关联规则和预警阈值模型。一旦数据出现异常趋势，系统能够自动触发风险预警，及时通知相关人员采取措施进行处理。通过这种方式，实现了从“人找风险”到“风险找人”的转变，大大提高了风险识别的及时性和准确性。

2.4.3 知识图谱与 AI 辅助

利用自然语言处理 (NLP) 技术，从海量的历史事故报告、技术文献中抽取风险要素，构建“风险 - 原因 - 后果 - 措施”知识图谱。该知识图谱将各种风险信息进行了系统整合和关联，形成一个庞大的知识网络。当输入新的工程参数时，AI 系统能够自动在知识图谱中进行搜索和匹配，推荐相关的风险项和应对策略，为技术人员提供智能决策支持。这不仅节省了技术人员查找资料和分析问题的时间，还能提高决策的科学性和准确性。

3 结语

本文构建的“地铁深基坑与盾构区间施工安全风险的制度化识别框架”，以标准化、流程化、组织化、技术化四维联动，有效解决了传统风险识别碎片化、静态化、孤岛化的问题。其核心价值在于将风险识别从孤立技术活动升华为企业制度与文化中的核心能力，推动安全管理关口和重心前移。未来，数字孪生、人工智能等技术成熟将为框架深化提供空间，如构建“风险数字孪生体”实现仿真预测与自主管控，利用强化学习生成最优风险应对预案。但需注意，技术只是工具，制度有效运行关键在人。如何激发组织成员内生安全动力，防止制度在复杂现实中流于形式，将是制度化框架真正落地、发挥长效作用的关键。

参考文献

- [1]杨刚. 风险管理在地铁深基坑施工安全管理中的应用研究[J]. 价值工程,2022,41(34):7-9.
- [2]刘晓蕊. 地铁深基坑施工中影响工程安全的问题及对策[J]. 北方建筑,2024,9(3):53-56.
- [3]乔晓磊. 软土地区地铁车站长大深基坑施工安全控制技术研究[J]. 运输经理世界,2025(3):7-9.
- [4]赵建龙. 地铁车站深基坑工程施工技术与安全风险控制研究[J]. 砖瓦世界,2024(7):19-21.