

# 复杂地质隧洞TBM施工风险智能预警系统开发

郭毅

江西淦盛建设工程有限公司 江西吉安 343000

**摘要：**随着我国基础设施建设的快速发展，隧洞工程在水利、交通等领域的应用越来越广泛。隧洞掘进机（Tunnel Boring Machine, TBM）因其高效、安全的特点，在复杂地质条件下的隧洞施工中得到了广泛应用。然而，TBM施工过程中面临着多种风险，如地质突变、机械故障、操作失误等，这些风险可能导致施工延误甚至安全事故。因此，开发一套针对复杂地质隧洞TBM施工的风险智能预警系统显得尤为重要。本文首先分析了TBM施工过程中可能遇到的风险因素，然后探讨了智能预警系统的设计原则和关键技术，最后提出了系统的实现方案，并通过案例分析验证了系统的有效性和实用性。

**关键词：**隧洞掘进机；施工风险；智能预警系统

## 引言

隧洞工程作为基础设施建设的重要组成部分，其施工技术的先进性直接关系到工程质量和施工安全。TBM施工技术以其自动化程度高、施工速度快、对环境影响小等优点，在国内外隧洞工程中得到了广泛应用。然而，TBM在复杂地质条件下的施工风险较高，如何有效预防和控制这些风险，保障施工安全和进度，是当前亟待解决的问题。

## 一、系统需求分析与关键技术选择

### （一）复杂地质TBM施工风险特征分析

在复杂地质条件下采用隧道掘进机（TBM）进行施工，会面临多种显著的风险。这些风险类型主要包括：开挖面失稳，这通常由不稳定的土层、含水地层或存在软弱夹层引起，其机制是地应力释放后围岩自身强度不足以维持平衡；盾构机姿态失控，多发生在地质软硬不均或存在倾斜岩层的区域，导致机器前进方向偏离设计轴线；开挖面涌水涌砂常见于富水砂层、溶洞或断裂带，由于水压和砂土在开挖扰动下侵入开挖空间；管片结构破损可能因盾构机推力不均、盾尾间隙过小或地质突变导致地层压力骤变；地表沉降过大通常与开挖面失稳、支护不及时或地质条件差有关。这些风险在复杂地质环境中多发、突发且强耦合，使得风险管理和控制变得困难<sup>[1]</sup>。

### （二）智能预警系统功能需求

为有效应对上述风险，智能预警系统需要具备一系列核心功能。首先，系统必须能够实时采集来自TBM本

体传感器（如扭矩、推力、转速、油压等）、地质勘察数据（如地质剖面、岩土参数）、以及施工过程中的监控量测数据（如地表沉降、收敛变形、孔隙水压等）。其次，系统需要建立稳定可靠的数据传输通道，确保各类数据能够及时、完整地传送到处理中心。数据处理功能则负责对原始数据进行清洗、格式转换、融合和存储，为后续分析提供基础。风险识别是系统核心，基于处理数据和特定算法识别风险征兆。预警功能根据识别结果，及时发布预警信息。辅助决策功能结合风险、进度和地质信息，提供应对建议。这些功能需确保实时、准确、可靠和易用，保障信息传递及时、预警可靠、系统稳定和操作便捷。

### （三）关键技术选择与依据

处理来自TBM传感器、地质勘察、监控量测等多源信息时，选择数据融合技术是关键。考虑到数据源的多样性、时序性和空间分布特性，可采用基于卡尔曼滤波或扩展卡尔曼滤波的多传感器数据融合技术，以及基于证据理论的数据融合方法。这些技术能够将不同类型、不同精度的信息进行有效整合，提高数据的整体质量和一致性，为后续的风险识别提供更全面、更可靠的输入。在智能分析技术方面，考虑到TBM施工环境的动态变化和复杂地质条件的不可预测性，以及现场对系统响应速度和计算资源的要求，选择轻量级的智能分析方法更为适宜。可以使用基于规则的方法，利用专家经验或历史数据设定判断规则，监测数据满足条件时判定风险。或者，采用基于阈值的统计方法，设定关键参数的安全阈值，超过即预警。还可以使用轻量级机器学习

模型，如决策树、朴素贝叶斯或简单神经网络，它们易于训练和部署，处理非线性关系，复杂度低于深度学习模型。这些方法计算量小，快速给出结果，适应复杂地质环境和TBM施工参数变化，满足现场实时监控和快速响应需求<sup>[2]</sup>。

## 二、智能预警系统架构与功能设计

### (一) 系统总体架构设计

本智能预警系统采用分层架构设计，具体划分为数据层、处理层、分析层和应用层。数据层负责接收和存储来自TBM本体传感器、地质勘察报告、外部监控量测点以及相关管理系统（如地质信息系统）的原始数据。处理层对数据层获取的原始数据进行清洗、格式转换、时间同步和初步整合，确保数据的质量和一致性，并将处理后的数据提供给上层使用。分析层基于处理层提供的数据，运用选定的数据融合技术和智能分析算法，提取风险特征，识别潜在风险状态，生成风险分析结果。应用层则负责将分析层的结果以可视化界面展示给用户，并提供预警发布、信息查询、辅助决策支持等功能。各层之间通过定义良好的接口进行通信。数据流向主要是自下而上：原始数据进入数据层，经过处理层加工后传递给分析层进行处理，最终分析结果和应用功能通过应用层呈现给用户。同时，应用层接收用户的操作指令，可能反馈给分析层或处理层进行调整。系统设计强调模块化，将不同功能划分为独立模块，降低耦合度，便于单独开发、测试、维护和升级。同时，架构预留了扩展接口和标准协议支持，允许未来接入新的数据源或增加新的分析功能，确保系统的可扩展性<sup>[3]</sup>。

### (二) 核心功能模块设计

数据采集与集成模块负责接入多种数据源。对于TBM本体传感器，通过工业总线（如CAN总线、Profinet）或无线网络（如Wi-Fi、4G/5G）直接读取掘进参数（如推力、扭矩、转速）、姿态参数（如水平、垂直偏差）、盾尾间隙等数据。地质勘察数据通过接口导入钻孔、物探、地质图等信息。监控数据通过采集仪通信接口获取地表沉降、建筑变形、地下水位等监测值。该模块处理数据源格式差异、时间戳不一致等问题，进行数据对齐和校验，统一存储至数据库供后续使用。风险特征提取与识别模块处理海量时序数据，提取关键风险指标，如开挖面压力波动率等，并利用轻量级智能方法判断风险状态。基于规则的方法将指标与阈值比对，而基于智能逻辑的方法则使用轻量级模型计算风险等级。预警发布与联动模块根据风险严重程度分级预警信息，并

通过多种方式发送给相关人员。该模块还设计了与TBM操作系统的联动接口，能在紧急情况下发送控制指令建议，辅助决策。

### (三) 关键接口设计

系统与TBM设备、地质信息系统、监控量测系统等外部系统的接口设计遵循标准化、可靠性和安全性的原则。与TBM设备的接口主要通过工业网络协议（如Modbus TCP, OPC UA）或专用数据接口实现，确保能够稳定、实时地获取TBM运行参数和状态信息，同时保证数据传输的准确性。与地质信息系统的接口通常采用数据库接口或文件交换格式（如Shapefile, KML），以便导入详细的地质剖面、地层参数和不良地质体分布信息，为风险识别提供地质背景支持。与监控量测系统的接口则根据量测设备的不同，可能采用现场总线协议、无线传输协议或人工录入辅助接口，确保能够获取到地表及结构变形、孔隙水压力等关键监控数据。所有接口设计都考虑了数据格式的兼容性转换、通信链路的冗余备份以及必要的加密措施，以保障系统间数据交互的顺畅、稳定和安全<sup>[4]</sup>。

## 三、系统实现与功能阐述

### (一) 系统开发平台与环境

本智能预警系统的开发主要采用了Java语言作为后端开发基础，结合Spring Boot框架进行快速应用构建和依赖管理。前端界面则使用了Vue.js框架，以实现用户界面的动态交互和响应式展示。数据库方面，选用了MySQL关系型数据库来存储结构化的配置信息、历史数据和用户数据，同时引入了Elasticsearch来支持海量实时监测数据的快速检索和分析。开发过程中还集成了Redis作为缓存层，提升数据访问效率。硬件环境方面，系统部署在配置了多核处理器、充足内存和高速固态硬盘的服务器上，以保障数据处理和并发访问的性能需求。服务器通过网络与TBM现场的数据采集节点、监控量测设备以及相关信息系统连接。

### (二) 核心功能实现

数据采集与集成功能的实现，首先是通过开发定制化的数据接口程序，按照预定的通信协议（如Modbus TCP、MQTT）与TBM的各种传感器、地质勘察数据源、监控量测点进行对接，定时或实时拉取原始数据。获取的原始数据包含多种格式和单位，因此在接入后立即进行标准化处理，统一时间戳，将不同量纲的物理量转换成系统内部定义的标准格式。标准化后的数据被写入实时数据库进行短期存储，同时根据数据的重要性的分析

需求,定期批量存入关系型数据库的历史数据表中,用于后续分析和查询。风险识别逻辑的具体实现,是将第二部分选择的关键技术应用用于处理后的数据流。对于数据融合,开发了特定的算法模块,按照既定规则(如加权平均、卡尔曼滤波)将来自TBM传感器、地质信息和监控量测的多源数据进行融合,生成综合的状态参数。对于风险识别,实现了基于规则和阈值的判断引擎。该引擎内嵌了专家定义的风险判据,例如,当融合后的前方地质参数显示为高含水软土层,且TBM推力、扭矩、掘进速度等参数的组合值超出预设的安全阈值范围时,引擎会判定开挖面失稳风险增加。这些规则和阈值被配置在系统中,便于根据工程实际情况进行调整。预警发布流程的实现,首先是在风险识别引擎判定出风险状态后,系统根据风险的严重程度和类型,在预警信息中设定不同的优先级和级别。预设的报警方式包括系统界面的醒目提示、指定管理人员的手机短信通知、以及与项目管理系统对接的自动消息发送。阈值设定是流程中的关键环节,这些阈值基于历史数据、地质资料和工程经验进行初始配置,并在系统运行过程中允许授权人员进行调整和优化。当风险指标超过阈值时,系统自动触发相应的报警方式,将包含风险类型、位置、严重程度和建议措施在内的预警信息发送出去<sup>[5]</sup>。

### (三) 系统功能演示

系统界面上,实时施工状态通过多个图表和数值显示区域呈现,包括TBM当前的掘进速度、总推力、刀盘扭矩、开挖面压力、注浆压力等关键参数的实时数值和变化曲线。风险指标变化趋势则在一个专门的趋势图区域展示,该区域可以同时显示多个选定风险指标(如开挖面稳定性指数、盾构机姿态偏差值、管片沉降速率等)随时间的变化曲线,方便操作人员观察其动态演变。预警信息列表位于界面的显著位置,以列表形式清晰展示所有已触发的预警信息,包括预警发生的时间、风险类型、严重级别、影响区域以及系统自动生成的简要处理建议。操作人员可以通过系统界面进行基本配置,例如登录后进入配置菜单,可以查看和修改自身关注的实时参数显示布局,调整特定预警信息的推送方式(如选择接收短信或仅界面提示),以及根据最新的地质理解,微调某些风险识别的阈值参数。查看预警信息时,操作人员可以直接在预警列表中点击某条记录,系统会弹出详细信息窗口,展示该预警产生的具体参数条件、相关的实时和历史数据图表,并提供确认、忽略或标记已处

理等操作按钮。在模拟测试和部分实际工程应用测试中,系统展现出了基本功能的完备性,能够按照设计要求完成数据的实时采集与展示、风险状态的准确识别与判断、以及及时有效的预警信息发布,满足了复杂地质TBM施工风险监控的初步需求。

### 结语

从系统需求分析出发,充分考虑复杂地质TBM施工风险的特征,明确了智能预警系统的功能需求,并依据实际情况合理选择了关键技术。在系统架构与功能设计方面,精心规划了总体架构、核心功能模块以及关键接口,确保系统具备模块化和可扩展性。通过具体的系统实现与功能阐述,展示了系统在数据采集、风险识别、预警发布等核心功能上的有效实现。实际的模拟或测试结果表明,该智能预警系统基本功能完备,能够满足复杂地质隧洞TBM施工过程中对风险实时监测与预警的需求。此系统的开发不仅有助于提高施工安全性,减少因风险事件导致的损失,还能为TBM施工的科学决策提供有力支持。然而,该系统仍存在一定的优化空间。未来可进一步探索更先进的数据融合和智能分析技术,以提高系统对复杂地质环境和TBM施工动态变化的适应性。同时,加强系统与更多外部系统的深度集成,拓展系统的功能边界,为复杂地质隧洞TBM施工提供更全面、精准的风险预警服务。

### 参考文献

- [1] 杨继华,梁国辉,曹建锋,等.兰州市水源地建设工程输水隧洞TBM1施工段关键技术研究[J].现代隧道技术,2019(2):8.DOI:CNKI:SUN:XSDS.0.2019-02-002.
- [2] 杨继华,闫长斌.复杂地质条件下双护盾TBM掘进性能研究[J].人民黄河,2022(010):044.DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2022.10.026.
- [3] 冯欢欢,洪开荣,杨延栋,等.极端复杂地质条件下TBM隧道施工关键技术研究及应用[J].2022.
- [4] 司景钊,曾云川,刘建兵.复杂地质铁路隧道敞开放式TBM施工挑战及思考[J].隧道建设(中英文),2021.DOI:10.3973/j.issn.2096-4498.2021.03.012.
- [5] 冯欢欢,洪开荣,杨延栋,等.极端复杂地质条件下TBM隧道施工关键技术研究及应用[J].现代隧道技术,2022(001):059.DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2022.01.005.