

# Research on tunnel radar monitoring and early warning system based on triz theory

Haoyang Li Zhenxia Yuan Weijian Liu Zhongkai Peng Biqi Yuan Lijuan Jiao

School of Intelligent Construction and Architectural Engineering, Zhongyuan Institute of Technology, Zhengzhou, Henan, 450007, China

## Abstract

This paper proposes the shortage of monitoring equipment in tunnel construction, Using this theory to further improve the application of tunnel radar safety early warning system, First, apply triz theory to study the tunnel monitoring system, Through the functional analysis, To of tunnel monitoring and early warning system, At the same time, various new methods to optimize tunnel monitoring and early warning, And then, through the technical contradictions, Physical contradiction, Analysis of similar means and the comparison of existing techniques, From the problems, Finally, using triz theory to solve the problem, Prothe innovative practice of each module, Improve the tunnel detection and early warning system based on tunnel radar, In order to provide new ideas for the monitoring and early warning of tunnel surrounding rock.

## Keywords

triz theory; SAR synthetic aperture radar; monitoring and early warning; tunnel radar

## 基于 triz 理论隧道雷达监测预警系统的研究

李昊阳 袁振霞 刘伟建 彭仲凯 袁碧琦 焦利娟

中原工学院智能建造与建筑工程学院, 中国·河南 郑州 450007

## 摘 要

本文基于triz理论技术提出现有隧道施工中监测设备的不足, 利用该理论进一步完善隧道雷达安全预警系统中的应用, 首先应用triz理论对隧道监测系统展开研究, 通过功能分析, 因果链构建隧道监测预警体系, 同时提出多种优化隧道监测预警的新方法, 再通过技术矛盾, 物理矛盾, 对同类手段的分析和现有技术对比, 从中发现问题, 最后利用triz理论解决问题, 提出各模块的创新实践, 完善基于隧道雷达的隧道检测预警体系, 以期对隧道围岩监测预警提供新思路。

## 关键词

triz理论; SAR合成孔径雷达; 监测预警; 隧道雷达

## 1 TRIZ 理论方法和问题处理流程

创新驱动, 方法先行。TRIZ 理论方法是以 Genrich · Altshuller 为首的苏联数十家科研团队对上百万份的专利文献进行系统的分析和整理, 并对其中具有数以万计的具有代表性的专利为重点进行归纳和总结, 建立了一套以技术系统进化原理为核心的、体系化的、实用性强的解决问题的理论<sup>[1]</sup>。TRIZ 被认为是目前最全面系统地论述发明创造、实现技术

创新的理论, 运用这一理论可以大大加快人们创造发明的进程, 进而得到高质量的创新产品<sup>[2]</sup>。创新问题解决的过程就是将实际问题转换表达为一个 TRIZ 标准问题, 然后利用 TRIZ 标准问题的解转化为实际的解决方案<sup>[3]</sup>。

### 1.1 TRIZ 理论在隧道监测中应用的尝试

项目团队将根据 TRIZ 理论研究过程, 对现有安全预警监测系统应用进行剖析。

### 1.2 问题提出

隧道施工面临地质条件复杂, 岩层变化大、地下水涌出等情况, 需科学评估并有效防控, 以保障施工安全与顺利进行。目前, 隧道监测使用的先进测量仪器存在成本高昂问题, 不适合在隧道复杂环境中工作; 传统测量技术工作量大, 难以对隧道进行有效控制等问题, 导致隧道施工现场出现围岩变形的情况, 对施工人员人身安全存在较大威胁。

### 1.3 问题分解

将隧道围岩监测问题按照 TRIZ 方法对问题进行分解,

【基金项目】国家级大学生创新训练计划支持项目(重点支持领域项目: 202410465001); 河南省“专创融合”特色示范课程(教办高〔2024〕2号); 河南省本科高校智慧教学专项研究项目(教高〔2023〕334号)。

【作者简介】李昊阳(2003-), 男, 中国新疆人, 在读本科生, 从事创新创业研究。

问题所在技术系统为：位移监测系统；  
该技术系统的功能为：收集位移信息；  
问题组件：监测对象和监测系统；  
终端受害组件：隧道，施工员；

系统组件：信息收集模块、信息处理模块、信息传输模块、信息反馈模块、供能模块；

超系统组件：隧道环境，操作人员；

实现该功能的约束有：提高测量精度、降低成本。

### 1.4 现有技术系统的工作原理

隧道位移信息由信息收集模块采集，传输至信息处理模块，最终由信息反馈模块呈现。

### 1.5 TRIZ 分析流程

见图 1。

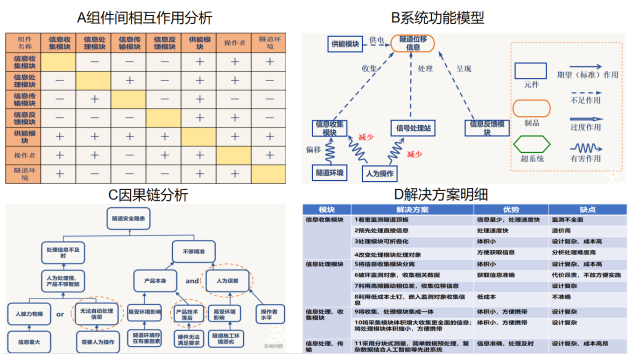


图 1 TRIZ 分析流程

经上述分析现有监测位移监测普遍痛点：达不到精度要求、信息处理不及时、造价高昂、受现场环境限制大、无法避免人为误差。

利用因果链分析问题关键点：无法自动处理信息，受人为误差影响大，产品本身技术落后。

理想解分析：

设计的最终目的是什么？

隧道围岩不发生坍塌

理想解是什么？

隧道围岩不出现位移

达到理想解的障碍是什么？

无法准确及时获取隧道位移信息

出现这种障碍的结果是什么？

易发生施工事故

不出现这种障碍的条件是什么？

及时准确地处理传输隧道位移信息

依据理想解分析得到方案为：为达到及时精准，需将隧道围岩监测和围岩形变计算分块处理同步运行。

## 2 现有监测方法分析

### 2.1 大地测量法

大地测量法通过设置变形观测站，采用经纬仪、水准仪和全站仪等高精度测量仪器，对隧道进行三维坐标测量。

这种方法技术成熟，成果可靠，能够全面反映围岩的变形情况。然而，大地测量法的实施受到施工条件和人为因素的较大影响，如观测站的设置、测量仪器的校准和测量人员的操作技能等，这些因素都可能影响测量结果的准确性。此外，大地测量法需要人工定期进行测量，无法实时获取隧道变形数据，这在紧急情况下可能无法及时提供预警信息。

### 2.2 三维激光扫描法

三维激光扫描法利用激光扫描仪对隧道进行快速扫描，获取隧道围岩表面的三维点云数据。通过对比不同时间点的扫描图像，可以实时监测隧道的变形情况。这种方法具有采集特征数据快速直观的优势，能够迅速捕捉到隧道表面的整体变形趋势。然而，三维激光扫描法的精度受到多种因素的影响，如激光束的发散角、扫描速度、环境噪声等，这些因素可能导致测量结果的精度下降。此外，三维激光扫描法主要获取的是隧道表面的整体变形情况，对于微小的局部变形可能无法准确反映。

### 2.3 电测法

电测法通过电子仪表（如电阻应变片、位移传感器等）对隧道的变形进行实时监测。电测法具有测试简便、易于实现全自动化远程监测的优点，能够实时获取隧道变形数据，为隧道安全预警提供有力支持。然而，电测法的测量标距较短，通常适用于小范围的变形监测。此外，电子仪表易受电磁干扰的影响，导致测量结果不稳定。在长期使用过程中，电子仪表还可能因老化、损坏等原因导致测量精度下降。

## 3 技术冲突与物理冲突的主要问题

### 3.1 位移监测可靠性的深层技术挑战

隧道雷达监测系统，理论上能够捕捉微小位移，实现高精度监测，但在实际操作中，精度往往受限于复杂地形、恶劣天气及电磁干扰等现场环境。从技术层面剖析，雷达波束的扩散效应、多路径反射、地表粗糙度以及植被遮挡等，均会对雷达信号造成干扰，进而影响位移测量的准确性。此外，雷达设备的分辨率、信号处理算法的优化程度以及校准过程的严谨性，也是决定位移监测精度的关键因素。例如，高分辨率雷达与先进信号处理算法的结合，能显著提升测量数据的信噪比，但面对复杂多变的现场环境，这些技术措施的实施效果往往不尽如人意。

### 3.2 信息处理时效性的技术瓶颈

隧道雷达监测系统面临的技术瓶颈主要在于数据处理速度和时效性。由于需要实时处理海量数据，传统数据处理架构常遭遇性能瓶颈，导致信息处理滞后。为突破这一局限，业界开始探索分布式计算、云计算及边缘计算等技术的应用。分布式计算通过并行处理加速数据处理，云计算提供云端强大的计算与存储资源，而边缘计算在数据源头附近进行初步处理，减少数据传输延迟<sup>[4]</sup>。然而，这些技术的集成应用并非易事，需要解决数据安全、隐私保护、技术兼容性等

问题,以确保信息处理的时效性与安全性。

### 3.3 高昂造价的技术与经济考量

雷达监测系统造价高,主因在于其复杂硬件和尖端技术集成。多线激光雷达通过集成多个设备,发射多条扫描线,提高数据量,但成本随之增加。软件方面,数据采集、处理和分析软件的开发和维护也需大量投资。为降低成本,业界正探索模块化设计、标准化生产和通用硬件应用,优化生产流程,提高效率。技术创新和研发是降低造价的关键,但需持续投入和时间积累,短期内难以显著降低成本。

### 3.4 结合冲突矩阵发明原理的解决方案

发现系统中技术冲突与物理冲突,得到恶化参数和改善参数,利用冲突矩阵和发明原理得出以下解决方案见图1D。

## 4 各模块的创新实践

### 4.1 聚焦隧道顶板监测策略

在隧道结构的安全监控中,信息收集模块首要关注的是隧道顶板沉降这一关键承重部位。因GBSAR技术具有覆盖范围大,高空间分辨率、非接触式、全天候、高精度和不需要人员实地测量等优点,利用该技术通过部署精密传感器,该模块能够实时捕捉顶板微小的位移和变形数据。这种聚焦策略有效减少了数据处理量,提升了响应速度,

基于TRIZ原理得到解决方案:抽取发射、接收、处理关键模块,微型化设计减体积;抛弃冗余如大散热、多余连接,精简高效。实现小巧,精准监测,适应隧道复杂环境,同时降低成本,提升经济效益<sup>[5]</sup>。

### 4.2 信息预处理加速机制

为了提高监测效率,信息收集模块内置了预处理机制。通过地基合成孔径雷达系统技术,在距离向利用脉冲压缩实现高分辨率,在方位向通过波束锐化实现分辨率,从而获取观测区的二维高分辨率图像;通过差分干涉测量技术,把同一目标区域,不同时间获取的序列二维高分辨率图像结合起来,利用图像中各像素点的相位差反演获得被监测区域的高精度变形信息<sup>[6]</sup>。该机制对直接收集到的信息进行初步筛选和分析,通过智能算法快速标记和分类异常数据,为后续深入处理提供了便利。

### 4.3 反馈模块折叠化设计

为满足不同场景的监测需求,信息收集模块采用了折叠化设计。这种设计显著减小了模块的体积,便于携带和部署,同时通过精密机械结构保证了折叠后的稳定性和耐用性<sup>[7]</sup>。折叠设计虽然增加了设计复杂性,但显著提升了监测的灵活性和适应性。采用人工智能技术,实现隧道监测数据的高速自动化处理。通过智能算法分析庞大数据,减少人工负担,提升处理速度。构建阈值预警系统,实时监测并预警安全风险。优化信息传输,确保数据快速稳定传输至云端,利用大

数据处理能力,协同高效分析数据<sup>[8]</sup>。

### 4.4 处理对象灵活切换

信息收集模块具备处理对象灵活切换的功能,能够根据不同的监测任务快速调整传感器类型和监测对象。这一创新设计增强了模块的通用性,但也对算法优化和数据处理能力提出了更高要求,以确保信息的准确性和完整性。隧道监测受地磁干扰,信号差,传输信息需实时高效传输,且信息体量大<sup>[9]</sup>。采用光纤传输,以其强抗干扰、大带宽特性,确保信息高效稳定。锁定光纤因其优越性能,提升传输质量,降低维护成本,增强隧道安全性<sup>[10]</sup>。此方案显著提升监测效率,为隧道实时监测和后续预测提供坚实支撑。

## 5 总结

基于triz理论,采用地基微变形雷达,利用厘米级波长的微波进行干涉测量,快速准确地获取隧道位移信息,用人工智能快速处理信息。为了充分发挥隧道雷达形变位移数据、配合隧道监测成像系统,隧道监测安全稳定性预警系统,在封闭空间下对隧道围岩的回波处理,通过智能算法可自动去掉外部环境干扰。监测精度不低于0.1mm,作用距离大于1km,监测范围为水平90°,垂直45°;采集周期约为1~6min,全天时全天候24小时连续监测,最快每1分钟获取一幅观测场景位移图像,每幅位移图像获取百万级监测点数据。实现对隧道施工安全稳定性的实施自动判别和预警,具有分级预警功能。达到智能化监测对隧道围岩做到实时控制。

## 参考文献

- [1] 谢寿峰.基于专利分析的技术演变与预测研究[D].南京理工大学,2014.
- [2] 王健.城市隧道施工的关键技术研究与创新[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(12):205-207.
- [3] 罗莉萍,林剑峰,胡华.TRIZ创新方法科普化的研究[J].广东科技,2010,19(11):53-56.
- [4] 徐凯.隧道工程智能监测云信息系统的研发与应用[D].西安建筑科技大学,2023.
- [5] 盛兆哲,李宁,王旭斌.隧道洞口危险事件自动化监测预警平台设计与实现[J].测绘与空间地理信息,2024,47(03):147-149.
- [6] 刘晓龙.隧道有轨运输障碍物检测与预警方法研究[D].石家庄铁道大学,2023.
- [7] 杨朝栋,许建文,梁海深,黄涛,董学盛.隧道安全预警及安全管理要点分析[J].企业科技与发展,2022,(11):62-65.
- [8] 李斌,柯巍,刘盈,符凯娟.基于雷达增强型机器视觉的全息隧道监测预警技术[J].中国交通信息化,2022,(04):116-119.
- [9] 栗明明,王艳利.基于时序InSAR技术的地表形变监测技术研究[J].工程勘察,2021,49(07):60-63.
- [10] 吴星辉,璩世杰,马海涛,等.隧道雷达系统在露天矿隧道监测中的应用[J].金属矿山,2018,(02):188-191.