文章编号：1001-4632（2025）06-0144-08
引用格式：李新宇，朱建生，王万齐，等.数字孪生驱动的铁路隧道含水构造判识方法[J].中国铁道科学，2025，46(6)：144-151.
Citation：LI Xinyu，ZHU Jiansheng，WANG Wanqi，et al. Digital Twin-Driven Identification Method for Water-Bearing Structures in Railway Tunnels [J]. China Railway Science，2025，46 (6)：144-151.

数字孪生驱动的铁路隧道含水构造判识方法

李新宇[1]，朱建生[2]，王万齐[1]，史瑞昌[1]，许广春[3]，高红杰[4]

（1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所，北京 100081；
2. 中国国家铁路集团有限公司 科技和信息化部，北京 100844；
3. 中国铁路设计集团有限公司，天津 300251；
4. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所，北京 100081）

摘 要：针对铁路隧道施工中突水涌泥灾害精准防控的迫切需求，提出数字孪生驱动的铁路隧道含水构造判识方法。该方法通过几何重建—数据融合—智能判识技术链，实现铁路隧道含水构造的孪生建模与不确定性量化评估。通过三维几何建模技术，将地震波反射法、瞬变电磁法和地质雷达法等物探数据中抽象的物理场异常重构为形象化的几何实体，引入知识元作为多源信息统一表达与空间集成的基本载体，构建融合地质先验知识与物探解译规则的贝叶斯网络，将离散、不确定的观测证据转化为每个知识元的含水概率，实现判识过程从定性到定量、从静态到动态的转变。基于铁路隧道数字孪生地质系统，形成“探测—预测—验证”闭环迭代的技术流程。在某铁路隧道开展试验验证，结果表明：判识结果与超前水平钻揭露的含水区域表现出明显的空间一致性；数字孪生驱动的铁路隧道含水构造判识方法能够以较高的时效性和准确率识别出目标地质实体中的富水区域，可为隧道掌子面前方含水构造的定量化预测提供技术支撑。

关键词：隧道；数字孪生；含水构造；超前地质预报；三维几何建模；知识元；贝叶斯网络
中图分类号：U453.6；459.1 **文献标识码**：A **doi**：10.3969/j.issn.1001-4632.2025.06.14

我国西部山区地质构造复杂，铁路隧道工程建设面临地质环境不透明带来的巨大安全风险。突水涌泥灾害具有突发性强、破坏性大、防控难度高的特点，往往造成重大人员伤亡和经济损失，严重制约着铁路隧道的安全、高效建设。客观存在的断层、岩溶、裂隙等含水构造是突水涌泥灾害发生的地质基础，也是内在因素。在铁路隧道施工期间，一般通过开展超前地质预报实现含水构造判识。常见的超前地质预报方法包括地质调查法、钻探法和物探法[1]。地质调查法主要以观察研究为基础，宏观定性识别岩体中的含水构造。钻探法通过钻孔直接揭露岩体中的含水构造，但是存在“一孔之见”的弊端。物探法，例如地震波反射法（Tunnel Seismic Prediction，TSP）、瞬变电磁法（Transient Electromagnetic Method，TEM）、地质雷达法（Ground Penetration Radar Method，GPR）等，利用专门的仪器观测地震波场、电磁场、电场等地球物理场的分布特征，通过计算分析岩体介质的物理性质差异识别岩体中的含水构造，但是存在多解性的弊端。工程实践表明，基于多源数据融合的综合超前地质预报技术是提高含水构造判识准确率的有效途径。黄鑫等[2]将地质调查法、物探法和钻探法进行有机结合，提出了一种含水构造综合判识方法，最大限度地发挥单一方法的优势，成功识别了某溶蚀裂隙的分布特征及含水性。张硕等[3]将TSP和TEM相结合，成功识别了某断层的发育范围及含水性。然而，传统的超前地质预报依赖从业人员的知识水平和经验，并且只能得出定性判识结论，难以满足隧道工程建设对地质信息高精度、时效性的需求。如何系统性地融合多源异构地质数

收稿日期：2025-07-02；修订日期：2025-10-20
基金项目：中国铁道科学研究院集团有限公司院基金课题（2023YJ154）
第一作者：李新宇（1990—），女，河北省保定人，助理研究员，博士研究生。E-mail：lixinyumail@163.com

据，并量化判识过程中的不确定性，仍是当前研究的瓶颈。

数字孪生技术[4]为实现隧道含水构造精细化判识提供了新的途径。GB/T 43441.1—2023《信息技术 数字孪生 第一部分 通用要求》[5]明确指出数字孪生系统是“基于数据驱动实现目标实体与数字实体间各要素动态迭代的系统”。这一技术框架在地下工程中的应用已初见成效。李梅等[6]提出了煤矿领域的智能地质保障系统，通过多源数据融合、隐蔽致灾因素探测与三维动态建模，显著提升了地质透明化水平，为隧道工程提供了可借鉴的技术路径。在隧道工程领域，学者们[7−10]探索了多源地质数据的融合方法，动态构建了隧道围岩的结构和属性模型。然而，数字孪生技术在隧道工程含水构造判识方面的前瞻性研究仍较为缺乏。现有研究大多未能突破三维可视化的范畴，缺乏一个能够融合多源数据、封装地质知识并进行不确定性推理的认知模型。

针对上述问题，本文提出数字孪生驱动的铁路隧道含水构造判识方法。采用三维几何建模技术实现物理场异常的可视化重构，构建知识元实现多源地质数据的统一表达，构建贝叶斯网络量化评估知识元的含水概率。

1　铁路隧道含水构造判识数字孪生系统

数字孪生驱动的铁路隧道含水构造判识方法是一种数据驱动的判识方法，由目标地质实体、数字地质实体、双向数据连接构成闭环系统。目标地质实体存在于物理空间，是隧道工程作用域内被选中进行数字化映射的对象，具有特定的空间结构、物理属性及多物理场耦合特征。数字地质实体存在于虚拟空间，是目标地质实体在虚拟空间的数字化映射，它以一定的置信度刻画目标地质实体的几何结构、物理属性、行为响应及规则规律，并且通过与目标地质实体的数据连接而实时更新。数据连接是目标地质实体与数字地质实体之间信息交互的媒介，以实现物理空间与虚拟空间之间动态、实时的信息流循环。

数字孪生驱动的铁路隧道含水构造判识基于铁路隧道数字孪生地质系统[11]在虚拟空间中执行，如图1所示。铁路隧道数字孪生地质系统是基于数据驱动来实现目标地质实体与数字地质实体间各要素动态迭代的系统，系统架构分为4层，包括物理层、资源层、孪生层和服务层。物理层是目标地质实体与数字地质实体交互的感知与执行终端，主要由感知设备、执行设备和通信网络构成。资源层是系统的能力基座，主要由数据库、算法库和知识库构成。数据库通过统一时空基准与格式规范，实现TSP，TEM和GPR等多源地质数据的标准化集成。算法库集成三维几何建模算法、多属性知识元构建算法和贝叶斯网络推理算法，通过标准化的服务接口实现算法的便捷调用。知识库存储隧道突水涌泥灾害案例的孕灾环境、致灾因子、承灾体和处置方案。孪生层是系统的核心引擎，通过数字实体构建、配置、演化全流程技术链，驱动系统资源转化为工程决策。服务层是系统的决策赋能中枢，通过三维可视化技术呈现目标地质实体的几何结构和物理属性，为工程建设提供透明的地质底图。本文主要研究算法库中的三维几何建模算法、多属性知识元构建算法和贝叶斯网络推理算法，以实现铁路隧道含水构造的判识。

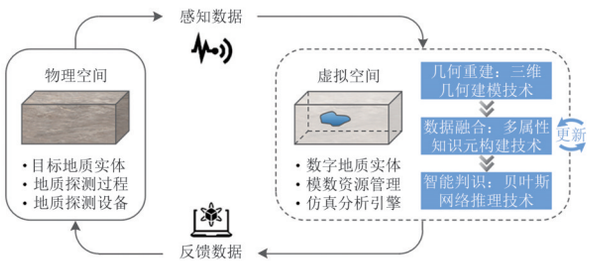

图1　数字孪生驱动的铁路隧道含水构造判识系统

在实际工程中，首先，在物理空间通过遥感、物探、钻探等技术手段对目标地质实体实施探测，获取多源感知数据并实时传输至虚拟空间。然后，在虚拟空间对多源感知数据进行整理和融合，驱动数字地质实体动态更新；利用更新后的数字地质实体分析和预测可能发生的地质风险；基于分析结果与知识规则，生成风险预警信息、支护优化建议或机械控制指令，并反馈至物理空间。接着，物理空间的施工人员根据反馈信息实施人工干预，智能施工机械则自动接收并执行下发的控制指令。与此同时，一系列工程活动引起目标地质实体的状态变化，智能施工机械运行数据被重新采集，并实时回传至虚拟空间，触发新一轮数字地质实体更新与分析。铁路隧道数字孪生地质系统通过“感知-传输-建模-决策-执行”的信息流循环，实现目标地质实体与数字地质实体的动态迭代、地质风险动态管控

及施工方案动态优化，提升隧道施工安全与效率。

2 铁路隧道含水构造判识方法

算法库中的三维几何建模算法、多属性知识元构建算法和贝叶斯网络推理算法是铁路隧道含水构造判识系统的核心技术。三维几何建模技术是数字孪生实现可视化和空间分析的先决条件；多属性知识元构建技术解决了多源异构数据的统一表达与集成难题；贝叶斯网络推理技术将多源、不确定的观测证据转化为每个知识元的含水概率，是数字孪生实现分析预测的智能引擎。3项技术共同构成了“几何重建-数据融合-智能判识”的完整技术链，是数字孪生理念在铁路隧道含水构造判识任务中的具体技术实现。

2.1 三维几何建模

在超前地质预报中，TSP，TEM和GPR等物探方法采集和反演的地球物理场数据客观地表征了目标地质实体的物理性质，是开展含水构造判识的科学依据和重要抓手。通过三维几何建模技术，能够将抽象的物理场异常重构为形象化的几何实体，呈现潜在含水构造的空间形态。

1）基于TSP数据的几何建模

基于TSP数据的三维几何建模使用的数据源是5维数值矩阵，可表示为（x，y，z，v_p，v_s）。它是由TSP探测仪采集的原始数据经反演分析得到的物理场数据。其中，x，y和z是目标地质实体内部空间点的坐标；v_p是空间点的纵波波速；v_s是空间点的横波波速。根据v_p和v_s可直接计算出空间点的泊松比、弹性模量、剪切模量等物理属性值。TSP物理场数据的解译以介质的弹性性质差异为物理基础，根据物理场的变化特征推断岩体破碎程度与地下水赋存情况。基于TSP数据的几何建模采用隐式建模方法，将TSP的某一物理场数据（如纵波波速）视为规则的空间点云数据，采用区域自增长算法对其进行数据分割，通过迭代优化逐步将点云数据划分为若干个具有内在一致性的区域，每个区域代表潜在含水构造的1个组成部分。针对每个封闭的点云数据区域，运用Delaunay三角剖分技术生成三维表面网格，从而将具有物理场异常标志的区域构建为几何实体，如图2所示。

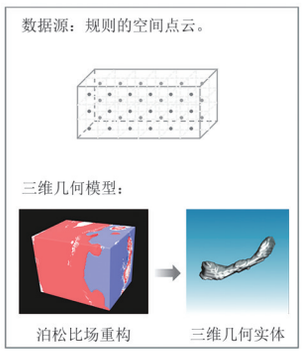

图2 基于TSP数据生成三维几何实体过程

2）基于TEM数据的几何建模

基于TEM数据的三维几何建模使用的数据源是4维数值矩阵，可表示为（m，n，d，ρ）。它是由TEM探测仪采集的原始数据经反演分析得到的物理场数据。其中，m是剖面编号，n是测线编号，d是测线上的空间点与观测点之间的距离，ρ是空间点的视电阻率。开展1次TEM探测试验将会布置M个扫描剖面，每个扫描剖面上布置N条测线，每条测线上布置k个测点。测点在三维空间以离散的形式分布，严格遵循着试验所设定的测线走向和间距，保证数据采集的全面性和系统性。TEM物理场数据的解译以介质的导电性差异为物理基础，根据视电阻率场的变化特征推断地下水赋存情况。基于TEM数据的几何建模采用隐式建模方法，采用二维克里金插值算法对单个剖面上的离散测点数据进行数据重构，生成二维平面视电阻率场；采用三维克里金插值算法对多个剖面上的离散测点数据进行数据重构，生成三维空间视电阻率场，从而将TEM数据转化为规则的空间点云数据，可表示为（x，y，z，ρ）。采用区域自增长算法对其进行数据分割，通过迭代优化逐步将点云数据划分为若干个具有内在一致性的区域，每个区域代表潜在含水构造的1个组成部分。针对每个封闭的点云数据区域，运用Delaunay三角剖分技术生成三维表面网格，从而将具有视电阻率场异常标志的区域构建为几何实体，如图3所示。

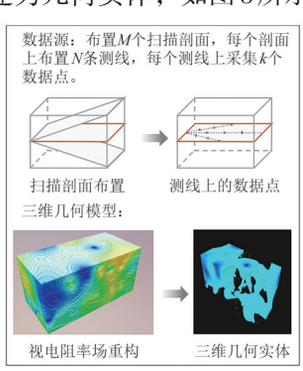

图3 基于TEM数据生成三维几何实体过程

3）基于GPR数据的几何建模

基于GPR数据的三维几何建模使用的数据源是数字图像和XML格式的标注文档。其中，数字图像是由地质雷达仪采集的原始数据经专业软件处理之后导出的波形堆积图。GPR探测一般会在隧道掌子面布置2条水平测线，从而产生2张波形堆积图。XML格式的标注文档描述了目标检测算法解译的含水构造在图像中的位置。基于GPR数据的几何建模采用显式建模方法，从XML格式的标注文档中提取目标的轮廓点集，通过曲线拟合和曲面放样技术生成潜在含水构造的三维几何模型，如图4所示。

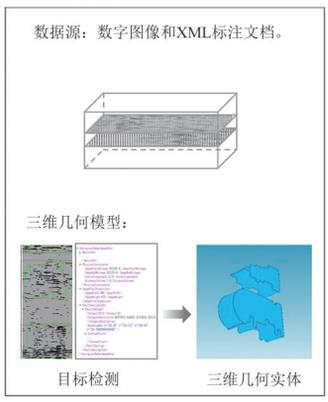

图4　基于GPR数据生成三维几何实体过程

基于TSP，TEM和GPR数据生成的三维几何模型可以在统一的图形引擎中加载，模型之间的互操作性为开展多源数据融合的含水构造判识提供了条件。

2.2　多属性知识元构建

不同来源的三维几何模型彼此孤立存在，难以直接作为不确定性推理的计算单元。为此，引入知识元作为多源数据融合的基本载体。如图5所示，不同来源的三维几何模型通过空间叠合和布尔分割生成一系列独立的空间单元，称为知识元。每个知识元都继承了其所处空间位置对应的若干种物理场异常标志S_i，从而成为1个承载多源信息的基本载体。

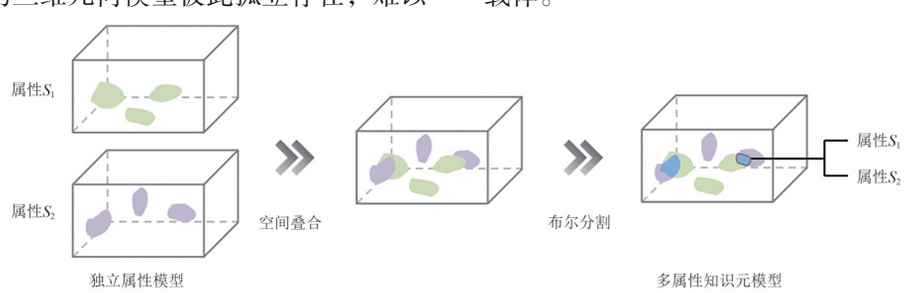

图5　知识元构建过程

知识元是最小的独立计算单元，是具备物理场异常标志描述、空间形态描述和空间定位描述的复合型数据载体，能够为含水构造判识提供规范化的数据输入。其形式化定义可表示为1个4元矩阵，即

$$\boldsymbol{E}=(k,\boldsymbol{S},\boldsymbol{G},\boldsymbol{R}) \tag{1}$$

式中：k为知识元的唯一标识符；$\boldsymbol{S}$为物理场异常标志矩阵；$\boldsymbol{G}$为几何属性矩阵；$\boldsymbol{R}$为该知识元与其他知识元的空间拓扑关系。其中，物理场异常标志是一种独特的、可识别的特征模式。例如，纵波波速下降是地震波波速场的异常标志，表示岩体中可能存在含水构造。根据常见的隧道含水构造解译规则，列举出的物理场异常标志见表1。

若某知识元由物理场异常标志S_1和S_2对应的三维几何模型交叉分割生成，则该知识元的物理场异常标志矩阵可表示为$\boldsymbol{S}=$（1，1，0，0，0，0，0）。知识元作为三维几何模型可实现精确定位，作为多维数据载体集成多种属性，为多源数据融合的含水构造判识提供了数据基础。

表1　常见的物理场异常标志

数据来源	标识符	物理场	异常标志
TSP	S_1	纵波波速场	物理量的值下降
	S_2	横波波速场	物理量的值下降
	S_3	纵横波速比场	物理量的值上升
	S_4	泊松比场	物理量的值上升
TEM	S_5	视电阻率场	物理量的值偏低
GPR	S_6	电磁波场	物理量呈现“岩体破碎”的特征模式
	S_7	电磁波场	物理量呈现“岩体富水”的特征模式

2.3　贝叶斯网络判识

贝叶斯网络[12−14]是一种用于不确定知识表达和推理的理论模型，它以有向无环图（Directed Acyclic Graph，DAG）为基础架构。其中，DAG的节点代表随机变量，可以是可观测到的现象、随机事件，也可以是隐变量或未知参数等；DAG的

有向边代表变量间的依赖关系，由父节点指向子节点，直观地展示了变量之间的因果联系或影响路径；每条有向边关联的条件概率表（Conditional Probability Table，CPT）则定量描述了这种依赖关系的强度。

贝叶斯有向网络图中蕴含了变量之间的条件独立性假设，给定节点X_j的父节点集合$\pi(X_j)$，节点X_j与其所有非父节点$A(X_j)$条件独立。

$$P(X_j|A(X_j),\pi(X_j))=P(X_j|\pi(X_j)) \tag{2}$$

条件独立假设大大简化了联合概率分布的表示和计算，1个变量只直接依赖于它的父节点。1个包含t个随机变量X_1，X_2，…，X_t的贝叶斯网络，其完整的联合概率分布$P(X_1, X_2, \cdots, X_t)$可以通过网络结构和每个节点的CPT定义。联合概率分布可以分解为所有节点在给定其父节点下的条件概率的乘积，即

$$P(X_1, X_2, \cdots, X_t)=\prod_{j=1}^{t} P(X_j|\pi(X_j)) \tag{3}$$

贝叶斯网络具有处理工程不确定性、提供概率化决策依据的能力。为了量化评估每个知识元的含水概率，设计贝叶斯网络拓扑结构如图6所示。根节点是物理场异常标志，是客观存在的观测证据，也是整个推理过程的起点；中间节点是基于单一物探技术的推理结论；叶节点是基于多种物探技术的综合推理结论，代表了不同物探方法对同一地质异常的交叉印证。从根节点到叶节点的推理过程符合铁路隧道综合物探[15]的决策逻辑。

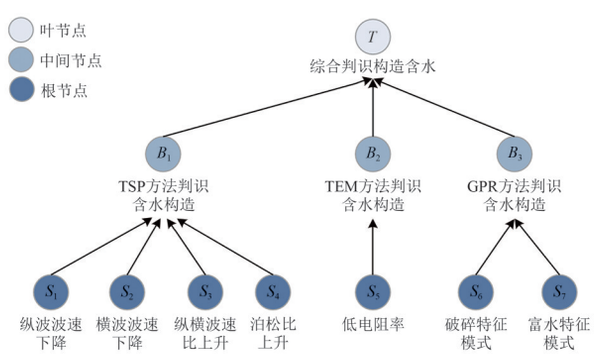

图6 贝叶斯网络拓扑结构

采用经验驱动的方法构建贝叶斯网络的参数。设计结构化问卷进行专家访谈，利用层次分析法（Analytic Hierarchy Process，AHP）量化多指标权重，最终生成各节点的CPT。完成上述构建后，该贝叶斯网络模型可通过输入知识元的物理场异常标志矩阵（如$\boldsymbol{S}$=（1，1，0，0，0，0，0）），进行构造含水概率的推理计算，其推理公式为

$$P(X_j|\pi(X_j))=\frac{P(X_j)P(\pi(X_j)|X_j)}{P(\pi(X_j))} \tag{4}$$

式中：$\pi(X_j)$为给定节点X_j的父节点集合。

贝叶斯网络建立了多源地质数据的融合框架，有效整合了TSP，TEM和GPR这3种物探方法的预测结果。相较于近年来热门的深度学习方法，贝叶斯网络在数据稀缺的隧道工程场景下进行数据融合更具可行性，且其因果网络提供了清晰的物理可解释性，这对于需要明确决策依据的含水构造判识至关重要。利用贝叶斯网络的概率推理机制，实现对每个知识元含水概率的量化评估。这种多源数据融合的方式，能够充分发挥不同探测方法的优势，弥补单一方法的局限性，从而更准确地预测目标地质实体中隐蔽的含水构造。

3 铁路隧道含水构造判识方法验证

我国西部地区某铁路隧道在施工过程中，因涌水量较大导致频繁停工，严重影响工程进度。该工程隧址区地质构造极为复杂，区域性断裂构造发育，并且受到地表水系的强烈切割，地下水主要为松散堆积体孔隙水、构造裂隙水、风化带网状裂隙水。隧道施工至某里程处，掌子面揭示围岩为花岗岩，呈现出较破碎至破碎的特征，节理裂隙发育显著，沿裂隙出现股状涌水，水量约20 $m^3 \cdot h^{-1}$。

为了查清目标地质实体中可能存在的含水构造，在当前掌子面实施了TSP，TEM和GPR探测以及超前水平钻探。其中，超前水平钻探数据仅用于验证含水构造判识结论。数据上传至系统后，系统调用三维几何建模服务、多属性知识元构建服务和贝叶斯网络推理服务，完成对每个知识元含水概率的量化评估。将概率较高（本研究设置阈值为0.7）的知识元判识为含水构造，并渲染为蓝色，如图7所示。该图直观呈现了超前地质预报结果中含水构造的空间位置和形态，能够减少地质信息传递过程中的歧义。

铁路隧道数字孪生地质系统部署在基于鲲鹏ARM架构的云虚拟机上。经过对系统工作负载的评估，为其分配了8核CPU和16 GB内存。当有新的超前地质预报数据上传时，系统调用算法服务进行处理，并将结果更新到三维场景中。系统的刷新频率与超前地质预报作业频率保持一致，由施工现场决定。从新一批超前地质预报数据导入完成，

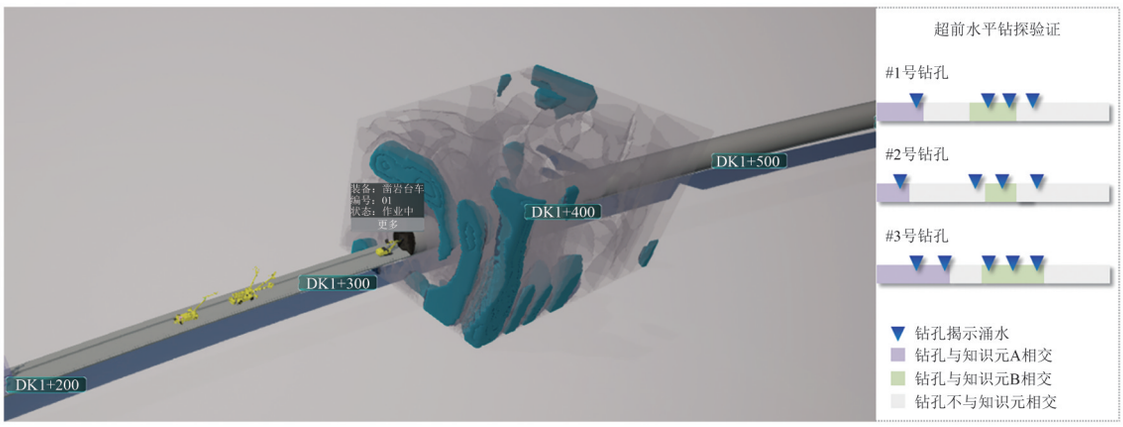

图7　某铁路隧道试验区间含水构造判识与验证

到贝叶斯网络推理和三维场景更新完成，整个流程的平均耗时小于10 min，满足施工现场对预报时效性要求。

采用试验区间的超前水平钻探数据对这一判识结论进行验证。钻探方法存在一孔之见的局限性，钻探数据仅能提供钻孔轨迹上的出水位置、水量、岩芯破碎情况等信息。通过稀疏的钻探数据，无法获取整个三维空间中每个知识元的真实含水状态。因此，验证严格限定在被钻孔直接穿过的知识元样本集上。根据钻孔揭露的涌水状态，为这些知识元赋予确定的真值标签（若钻孔在该知识元范围内揭露涌水，则该知识元标记为含水，否则为不含水）。通过计算样本集上的准确率、精确率、召回率和F1分数，评估本文提出的含水构造判识方法的性能。结果显示，在该验证集上该方法的准确率为90%，精确率为85%，召回率为88%，F1分数为86.5%。这表明，该方法在有效控制漏报的同时保证了可靠性，对于工程风险预警具有重要价值。需要强调的是，此评估结果代表的是数字孪生驱动的铁路隧道含水构造判识方法在钻孔轨迹上的性能，是其在三维空间中性能的一个保守估计。

4　结　语

针对传统超前地质预报方法在含水构造判识任务中的局限性，提出一种数字孪生驱动的铁路隧道含水构造判识方法。该方法通过三维几何建模技术、多属性知识元构建技术和贝叶斯网络推理技术，有效融合TSP，TEM和GPR数据，将物理空间中目标地质实体中的含水构造映射至虚拟空间，使设计、施工及管理人员能够在统一的空间框架下准确把握含水构造的空间位置、规模与形态，减少地质信息传递过程中的歧义。在我国西部地区某铁路隧道工程中的技术验证表明，该方法在有效控制漏报的同时保证了时效性和可靠性，为隧道掌子面前方含水构造的定量化预测提供了可靠的技术支撑。

参　考　文　献

[1] 张世殊，杨为民，秦念稳，等.超深埋隧道地质信息透明化技术研究现状[J/OL].地下空间与工程学报，1-15[2025-08-15].
(ZHANG Shishu, YANG Weimin, QIN Nianwen, et al. Research Status of Transparent Geological Information Technology for Ultra-Deep Buried Tunnels [J/OL]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 1-15 [2025-08-15]. in Chinese)

[2] 黄鑫，许振浩，林鹏，等.隧道突水突泥致灾构造识别方法及其工程应用[J].应用基础与工程科学学报，2020，28(1)：103-122.
(HUANG Xin, XU Zhenhao, LIN Peng, et al. Identification Method of Water and Mud Inrush Hazard-Causing Structures in Tunnel and Its Application [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28 (1): 103-122. in Chinese)

[3] 张硕，甄大勇，刘康，等.TSP与瞬变电磁成果三维化在隧道断层含水预报中的应用[J].中国铁路，2024(5)：75-81.
(ZHANG Shuo, ZHEN Dayong, LIU Kang, et al. Application of TSP and 3D Transient Electromagnetic Results in

Prediction of Fault Water Content in Tunnel [J]. China Railway, 2024 (5): 75-81. in Chinese)
[4] 张霖.关于数字孪生的冷思考及其背后的建模和仿真技术[J].系统仿真学报,2020,32(4):1-10.
(ZHANG Lin. Cold Thinking about Digital Twinning and the Modeling and Simulation Technology Behind It [J]. Journal of System Simulation, 2020, 32 (4): 1-10. in Chinese)
[5] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.GB/T 43441.1—2023 信息技术 数字孪生 第一部分 通用要求[S].北京:中国标准出版社,2023.
(State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. GB/T 43441. 1—2023 Information Technology Digital Twin Part 1: General Requirements [S]. Beijing: China Standard Press, 2023. in Chinese)
[6] 李梅,毛善君,赵明军.煤矿智能地质保障系统研究进展与展望[J].煤炭科学技术,2023,51(2):334-348.
(LI Mei, MAO Shanjun, ZHAO Mingjun. Research Progress and Prospects of Coal Mine Intelligent Geological Guarantee Systems [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51 (2): 334-348. in Chinese)
[7] WU H, ZHU Q, GUO Y, et al. Multi-Level Voxel Representations for Digital Twin Models of Tunnel Geological Environment [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022 (112): 102887-102898.
[8] SUN H, ZHU M, DAI Y, et al. Digital Twin of Advanced Geological Conditions in Rock Tunnel Construction [J]. Automation in Construction, 2025 (178): 106407-106429.
[9] ZHENG G, YU W. Fusion of Three-Dimensional Geotechnical and Geophysical Data for Developing Digital Twin of Underground Space [J]. Soils and Foundations, 2024, 64 (6): 101528-101543.
[10] WANG J, LI P, ZHUANG X, et al. Multi-Source Data Integration and Multi-Scale Modeling Framework for Progressive Prediction of Complex Geological Interfaces in Tunneling [J]. Underground Space, 2024 (15): 1-25.
[11] 李新宇,朱建生,王万齐,等.铁路隧道数字孪生地质系统技术架构[J].铁道建筑,2025,65(10):160-165.
(LI Xinyu, ZHU Jiansheng, WANG Wanqi, et al. Technical Framework of a Digital Twin Geological System for Railway Tunnels [J]. Railway Engineering, 2025, 65 (10): 160-165. in Chinese)
[12] 卢睿,孔文亚,方明亮.基于贝叶斯网络的铁路“四电”工程质量安全风险研究[J].中国铁道科学,2020,41(5):162-170.
(LU Rui, KONG Wenya, FANG Mingliang. Research on Quality and Safety Risk of Railway Electric/Electronic Systems Engineering Based on Bayesian Network [J]. China Railway Science, 2020, 41 (5): 162-170. in Chinese)
[13] ZHANG G, CHEN W, JIAO Y, et al. A Failure Probability Evaluation Method for Collapse of Drill-and-Blast Tunnels Based on Multistate Fuzzy Bayesian Network [J]. Engineering Geology, 2020 (276): 105752-105767.
[14] GUO Q, REN H, YU J, et al. A Method of Predicting Oil and Gas Resource Spatial Distribution Based on Bayesian Network and Its Application [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022 (208): 109267-109278.
[15] 中国铁路总公司.Q/CR 9217—2015 铁路隧道超前地质预报技术规程[S].北京:中国铁道出版社,2015.
(China Railway Corporation. Q/CR 9217—2015 Technical Specification for Geology Forecast of Railway Tunnel [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015. in Chinese)

Digital Twin-Driven Identification Method for Water-Bearing Structures in Railway Tunnels

LI Xinyu[1], ZHU Jiansheng[2], WANG Wanqi[1], SHI Ruichang[1], XU Guangchun[3], GAO Hongjie[4]

(1. Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. Department of Science, Technology and Informatization, China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China;
3. China Railway Design Corporation, Tianjin 300251, China;
4. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: To address the urgent need for precise prevention and control of water-inrush and mud-gushing disasters during railway tunnel construction, this paper proposes a digital twin-driven identification method for water-bearing structures in railway tunnels. This method establishes a technical chain of “geometric reconstruction-

data fusion-intelligent identification", enabling twin modeling and uncertainty quantification of water-bearing structures in railway tunnels. First, three-dimensional geometric modeling technology is employed to reconstruct abstract physical field anomalies from geophysical data (such as tunnel seismic prediction, transient electromagnetic method and ground penetrating radar method) into visualized geometric entities. Second, "knowledge element" is introduced as the fundamental carrier for unified representation and spatial integration of multi-source information. Subsequently, a Bayesian network incorporating geological prior knowledge and geophysical interpretation rules is constructed. This network transforms discrete and uncertain observational evidence into the water-bearing probability of each knowledge element, thereby achieving a shift in the identification process from qualitative to quantitative and from static to dynamic. Furthermore, based on the digital twin geological system for railway tunnels, a closed-loop iterative technical workflow of "detection-prediction-verification" is formed. Experimental validation conducted in a railway tunnel demonstrates that the identification results exhibit significant spatial consistency with water-bearing regions revealed by advanced horizontal drilling. The proposed digital twin-driven identification method can identify water-rich zones within target geological entities with high timeliness and accuracy, providing technical support for the quantitative prediction of water-bearing structures ahead of the tunnel face.

Key words: Tunnel; Digital twin; Water-bearing structures; Geological forward-prospecting; Three-dimensional geometric modeling; Knowledge element; Bayesian network

（责任编辑　吴　彬）