

基于 BIM 和本体论的隧道设施运维 数据融合方法研究

安芃 1, 刘龙祥 1, 胡振中 1, 林佳瑞 2, 于言滔 3

(1.清华大学深圳国际研究生院, 广东深圳 518055; 2. 清华大学土木工程系, 北京 100084 ;

3.香港科技大学土木与环境工程系, 香港 999077)

【摘要】在现代基础设施运维管理中, 数据类型多样且来源复杂, 如何有效地整合和利用这些数据, 已成为亟待解决的关键问题。本研究聚焦于多源异构运维数据的语义提取、融合与应用, 旨在针对各类数据在结构上的高度异构性问题, 提升其语义层面的互操作性。研究构建了一种基于 BIM 和本体论的基础设施运维数据融合方法, 以隧道运维场景为例, 验证了所构建的混合本体模型在实际工程中的可行性。

【关键词】本体建模; 异构数据融合; 语义推理; 结构健康评估多基础设施运维

在现代基础设施运维管理中, 数据发挥着至关重要的作用。通过全面整合各类数据资源, 可以精准评估结构状况, 有针对性地制定养护方案, 从而提升设施运行效率和管理水平。当前, 基础设施运维过程中涉及的运维数据包括 BIM (建筑信息模型)、GIS (地理信息系统)、传感器、点云、图像、文本等多种类型。面对这些在来源、格式与语义层级上具有显著异构性的运维数据, 如何实现信息的高效集成和跨平台、跨模态的融合管理应用, 是实现运维智能化的核心挑战。

传统的数据融合方法在多传感器信息融合方面取得了一定进展, 但在处理结构、语义差异较大的数据源时存在局限, 难以实现统一、智能的数据管理。随着语义网和知识工程[2]的快速发展, 本体(On_tology)作为一种语义建模手段, 逐渐成为解决异构数据语义整合问题的重要工具。本体具有语义一致性、数据集成能力强和推理能力突出等优势, 能够构建统一的概念模型, 从语义层面实现数据的理解、交互与再利用。通过构建多源数据的本体关联模型, 并配合语义规则与查询机制, 可以实现在复杂运维场景下对结构健康状态的智能评估与决策支持。

在此背景下, 本研究基于 BIM 和本体方法构建了一种数据融合与应用框架, 聚焦多源异构运维数据的语义提取、融合与应用, 旨在提升多维数据之间的互操作性, 为运维数据融合建模提供方法论支持。在此基础上, 以隧道运维场景作为研究实例, 构建了融合 BIM、GIS、监测数据的混合本体模型, 在实际工程中验证所提方法的可行性, 进一步实现了语义推理、结构健康评估等多项管理应用。

2 研究现状

本体最初是哲学中的概念, 后被引入人工智能和信息科学领域。本体建模被认为是实现异构数据集成最有效的方式之一。它通过采用统一的“节点一边一节点”三元组结构, 结合领域知识, 可将结构化、半结构化及非结构化数据统一为可计算的语义网络模型[3], 实现信息的交换与融合。

【基金项目】国家重点研发计划资助项目 (2022YFC3801100)

【第一作者】安 (1999), 女, 清华大学深圳国际研究生院博士研究生。E-mail: ap22@mails.tsinghua.edu.cn;

【通讯作者】胡振中 (1983), 男, 清华大学深圳国际研究生院副教授。E-mail: huzhenzhong@tsinghua.edu.cn

本体的描述语言多种多样，其中主流语言包括资源描述框架 RDF 和 web 本体语言 OWLO 针对基础设施数据，目前已有很多广泛应用的数据描述方式。IFC (Industry Foundation Classes)是建筑行业国际通用的数据标准体系，也是 BIM 数据的描述框架。CityGML (City Geography Markup Language)是一种基于 XML 的城市信息模型的存储和交换标准格式，以模块化的方式定义了 GIS 模型中常见的对象。

针对传感数据，则有 SSN (Semantic sensor Network)本体，即语义传感器网络。

在多本体融合方面，一类研究思路是构建参考本体。例如，Deng 等[4]提出了“语义城市模型”，结合 IFC 和 CityGML 的实体与属性，实现 BIM、GIS 数据的有效整合。胡振中[5]等将 4b 信息建模引入施工过程管理，通过构建具有时间维度的语义模型支持施工状态分析与动态调度。Liu 等在建筑防火领域构建了建筑防火本体模型，从系统、设备、运作与施工四个方面组织数据，实现建筑几何信息与传感器监测信息的语义关联。

另一类研究思路则是基于不同领域本体的映射与耦合，开发面向融合应用的复合本体模型。例如，Hor 等[8]抽取了 IFC 与 CityGML 的概念本体，并通过语义映射实现 BIM GIS 模型的集成。胡瑛婷等利用 SWIRL 规则将 IFC 向 CityGML 转换，实现几何和语义层面的融合。Shi 等[9]提出面向城市信息建模的融合本体，将 BIM、CIM 与物联网数据进行语义关联，形成一个完整的城市信息平台。

尽管当前本体技术在建筑与城市领域取得了广泛应用，但在面对运维场景中多源、多模态数据的融合需求时，仍存在本体碎片化、语义映射缺乏自动化支撑等挑战。本课题提出了一种基于混合本体模式的语义融合方法，以“全局本体+局部本体”的体系架构为核心，辅以语义映射机制，形成面向运维领域多类数据的统一融合通道。

3 研究方法

3·1 数据融合方法框架

本研究提出了一个基于本体的数据融合与应用方法框架（图 1），旨在构建一个多层次、系统化的解决方案，以实现对运维数据的全面管理和智能分析。该框架由四个核心层次构成：数据层、本体层、映射层和应用层。数据层涵盖隧道运维过程中常用的数据，包括 BIM 数据、GIS 数据、监测数据、文本数据和图像数据等，其中监测数据、文本数据和图像数据又可归类为 RDB 数据。本体层主要关注于 BIM 数据本体、GIS 数据本体、监测数据本体、文本数据本体和图像数据本体的概念解释与构建方法。本体层与数据层通过各类转换方式进行关联，从而得到具有丰富实例信息的各类隧道运维数据本体模型。映射层主要通过概念相似度和局部置信度来计算不同本体之间的综合相似度，进而建立不同本体模型之间的联系。应用层主要利用构建的隧道异构运维数据本体，实现对隧道结构健康状态的分级与后续运维，主要包括应用本体构建、映射与语义查询、结构健康评估以及运维策略选择等步骤。

3·2 领域本体建模

对于多源异构运维数据，采用混合本体模式构建本体层。本研究选取隧道工程为研究领域，提取 BIM、GIS、RDB 数据中的核心实体与关系，构建局部本体模型。

基于现有的 IFC 实体概念，以 0、1、m 为核心，考虑类属、位置、区段、截面等特征及其属性，扩展了与隧道设施相关的概念与关系，构建隧道 BIM 数据核心本体（图 2）。以 CityGML 中的核心模块、建造模块、隧道模块为骨架，抽取对象、空间、几何、构造实体等元概念，构建层级化的隧道 GIS 本体（图 3）。

RDB 数据选用传感器监测数据。基于 SSN/SOSA 框架，围绕核心概念“：0 标”以监测对象、指标、结果、时间作为表征观测内容的实体，将路面、渗漏水、能见度、排水、通风、衬砌及烟雾等隧道监测指标实例化为可观测属性，构建隧道监测语义本体结构（图 4）。该本体与几何本体通过共享的监测对象实体关联，实现监测数据与空间信息的本体级融合。

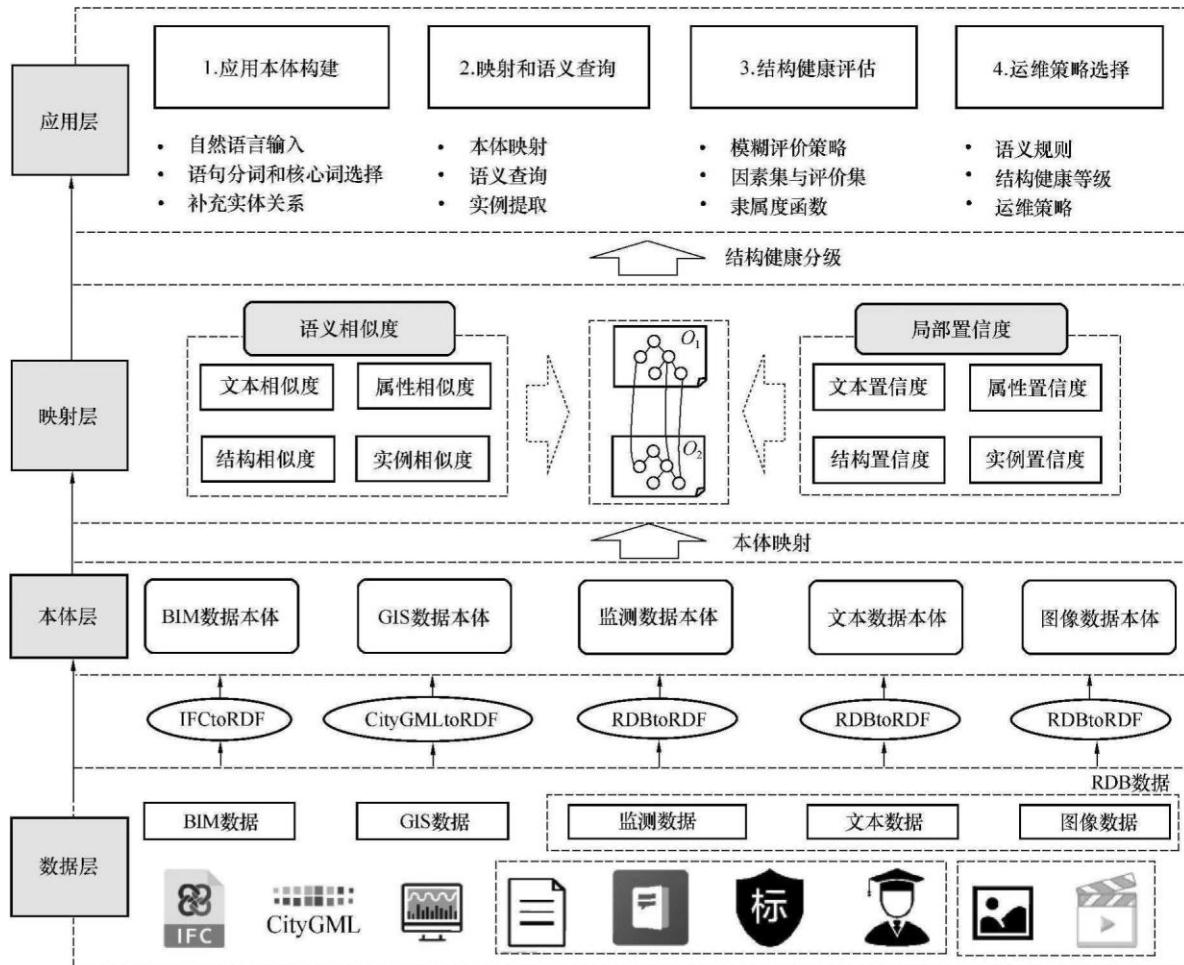


图 1 基于本体的数据融合与应用方法框架

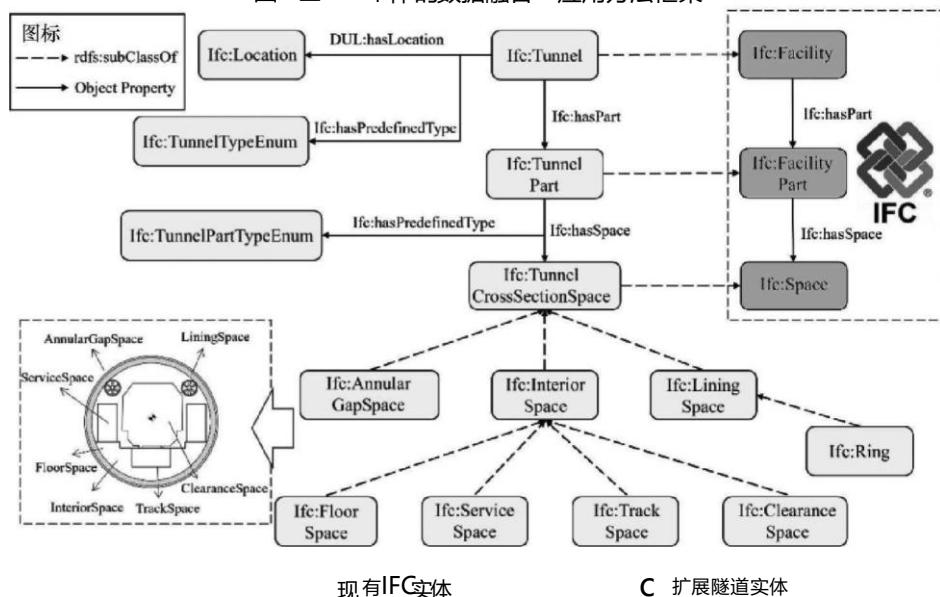


图 2 隧道 BIM
数据核心本体



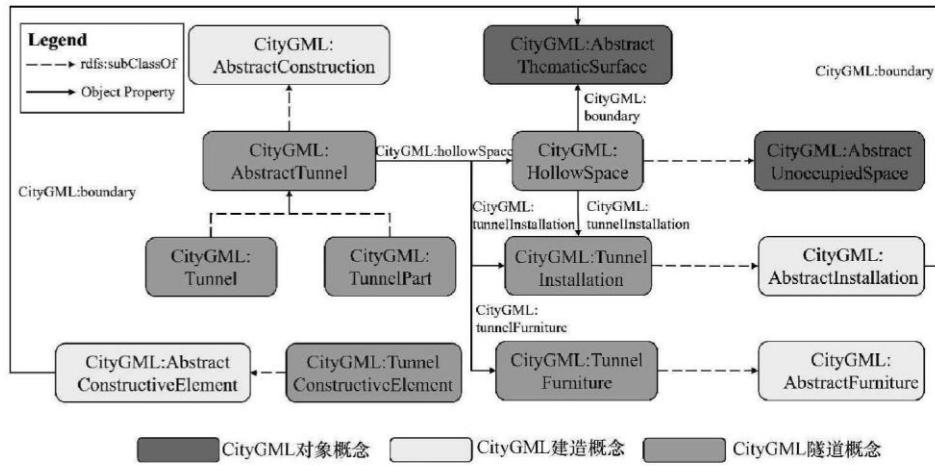


图 3 隧道 GIS 数据核心本体模型

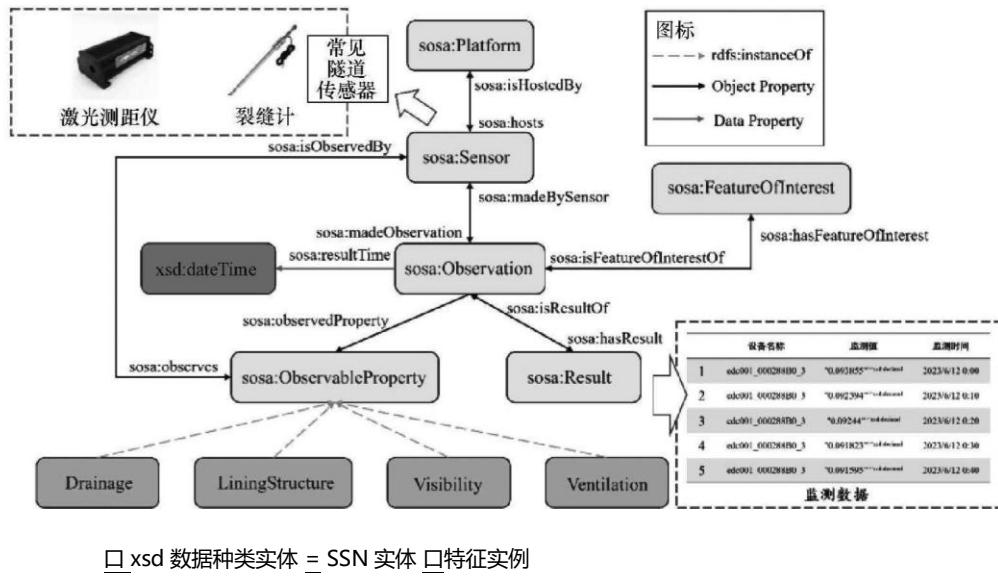


图 4 隧道监测数据核心本体模型

3.3 本体映射

映射层对围绕隧道运维数据构建的三类局部本体进行概念相似度和局部置信度计算，通过加权得到综合相似度结果，据此建立局部本体之间的映射关系。

首先，基于文本相似度和属性相似度，建立相似语义间的基础连接。基于文本的概念相似度关注实体名的字符序列差异，采用编辑距离进行度量。该指标计算的是通过增加、删除、修改等操作将一个字符串转换成另一个字符串的最小数量，计算方式为：

$$dis(l_1, Q)$$

(l)

$$\max(C_l, C_z)$$

其中， $|l_1|, |Q|$ 分别代表两个概念节点、的字符串长度， $\max(C_l, C_z)$ 表示取其中的较大值， $dis(l_1, Q)$ 代表 l_1, Q 之间的编辑距离，即将字符串 Q 转换成字符串 l_1 经过的删除、插入、替换等操作数之和。编辑距离越小，代表两个字符串的文本相似度就越高。

基于属性的概念相似度则关注节点的共有属性，基于它们属性的交集、差集和联合情况进行相似度计算，计算方式为：

$$\text{Simproperty}@1, \text{cz) (2)} = \frac{\text{c1} \cap \text{cz}}{\text{c1} \cup \text{cz}} = \frac{\text{c1} \cap \text{cz}}{\text{c1} + \text{cz} - \text{c1} \cap \text{cz}} = \frac{\text{c1} \cap \text{cz}}{\text{c1} + \text{cz}}$$

其中， c1 表示目标对象的属性个数， c2 表示属性的个数， $\text{c1} \cap \text{c2}$ 表示两个概念的共有属性数， $\text{c1} + \text{c2}$ 表示两个概念的属性总和。 $\text{c1} \cap \text{c2}$ 表示两个概念的属性差异， $\text{c1} + \text{c2}$ 表示两个概念的属性总和。 $\text{c1} \cap \text{c2}$ 表示两个概念的属性差异， $\text{c1} + \text{c2}$ 表示两个概念的属性总和。

综合以上计算结果，在阈值范围内建立基础映射关系。在此基础上，基于结构相似度扩展局部连接。该指标通过计算两个概念节点到最近的公共子节点的距离定义它们的相似度，计算方式为：

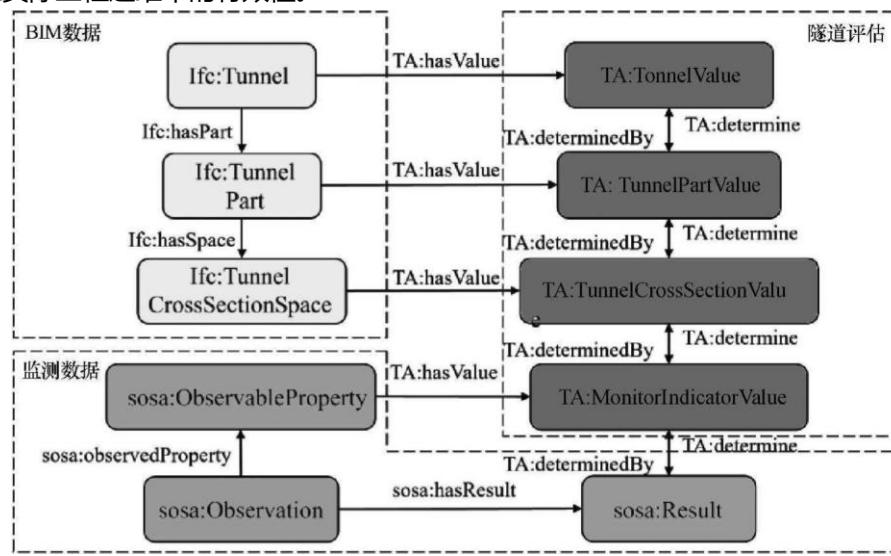
$$\text{Simsanantic} @1, 0) = \frac{1}{\text{dis}(1, 0) + 1}$$

其中， $\text{dis}(1, 0)$ 定义为从、分别到它们最近的公共父节点（或子节点）的最短路径之和。

4 应用实例

塘朗山隧道位于深圳市南山区，为双洞六车道分离式公路隧道，全长近 1.72km。为保障隧道结构安全及运行稳定，综合考虑不良地质条件、结构性病害与潜在安全风险等因素，将隧道划分为若干个运维监测区段，并在每个区段内设定关键监测断面。各断面根据具体工况布设激光测距仪、静力水准仪、裂缝计与表面应变计等不同类型的传感器，用于监测拱顶下沉、隧道沉降、裂缝宽度变化及环向与纵向应变。

本研究以塘朗山隧道为应用对象，融合 BIM、GIS 与多源监测数据，构建并实例化隧道运维混合本体模型。在此基础上，构建并关联用于结构健康评估的局部本体（图 5），开发语义推理、结构健康评估等应用场景，验证了该模型在实际工程运维中的有效性。



□ 隧道评价实体 0 IFC 扩展隧道实体 □ SN 实体

图 5 隧道结构健康评估混合本体结构

4.1 基于本体的语义推理

第十一届全国 BIM 学术会议论文集

基于混合本体模型和实际工程数据, 开发语义查询与规则推理等应用功能。语义查询利用 SPARQL 语言, 在 GraphDB 中实现对实例化本体的灵活查询。例如, 通过定制化查询语句获取塘朗山隧道各断面的传感器布设情况、监测指标及对应结构的健康评价值, 构建面向运维的综合数据视图 (图 6)。

为支持自动化判断与辅助决策, 在 Protégé 环境中引入 SWRL 规则, 实现结构健康评价值向健康等级的语义映射。该规则依据监测指标的数值范围设定逻辑条件, 并输出对应的健康等级标签。通过规则推理 (图 7), 可实现对隧道各结构层级健康状态的自动评估。

Name	Rule	Comment
Rule01	I .5) swrbgreaterThanOrEqual(7min, I)	Grades: The Inference rule for tus
Rule02	'A	Crade4: The Inference rule fortu...
Rule03	2.5) ^A sosa:ObservableProperty(?op)	Grade3: The inference rule fortu...
Rule04	4.5) ^A ?min)	Grade2: The Inference rule tortu...
Rule05	?min)	Grade1: The Inference rule fortu.

Control Rules Asserted Axioms Inferred Axioms OWL 2 RL
 OWL axioms successfully transferred to rule engine. OWL+SWRL—Drools
 Number of SWRL rules exported to rule engine: 5 1
 Number of OWL class declarations exported to rule engine: 27
 Number of OWL individual declarations exported to rule engine: 87 (2)
 Number of OWL object property declarations exported to rule engine: 18
 Number of OWL data property declarations exported to rule engine: 4
 Total number of OWL axioms exported to rule engine: 315 Run Drools
 The ganger took 166 millisecongy. 1
 Press the 'Run Drools' button to run the rule engine
 Number of inferred axioms: 260
 The process took 226 millisecond(s).
 Look at the 'Inferred Axioms' tab to see the inferred axioms. Drools—OWL
 Successfully transferred Inferred axioms to OWL model.
 The process took 1 millisecond(s). (4)

OWL+SWRL—Dr001s Run Drools Drools—OWL
 基于 SWRL 的规则推理

Tunnel_Query +

```

1 PREFIX DUL: <http://www.ontologydesignpatterns.org/ont/dul/_DUL.owl#>
2 PREFIX sosa: <http://www.w3.org/ns/sosa/>
3 PREFIX TA: <http://www.semanticweb.org/tunnel-assessment#>
4 PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
5 PREFIX Ifc: <http://standards.buildingsmart.org/IFC/DEV/IFC4_1/OWL#>
6 select ?TunnelCrossSectionSpace ?TunnelCrossSectionValue ?Sensor ?observedProperty
7 where { ?Sensor rdf:type sosa:Sensor.
8      ?TunnelCrossSectionSpace rdf:type Ifc:TunnelCrossSectionSpace.
9      ?Sensor sosa:isHostedBy ?Platform.
10     ?Sensor sosa:observes ?observedProperty.
11     ?Platform DUL:hasLocation ?TunnelCrossSectionSpace.
12     ?TunnelCrossSectionSpace TA:hasValue ?TunnelCrossSectionValueEntity.
13     ?TunnelCrossSectionValueEntity TA:hasNumber ?TunnelCrossSectionValue }
    
```

Save
Copy
Link
More
Run

SPARQL 语句
»

Filter query results
Showing results from 1 to 24 of 24. Query took 0.2s, minutes ago.

TunnelCrossSectionSpace	TunnelCrossSectionValue
1 Tl:ZK0+900	"3.69"^^xsd:decimal
2 Tl:ZK0+900	"3.69"^^xsd:decimal
3 Tl:ZK0+950	"5.00"^^xsd:decimal
4 Tl:ZK0+950	"5.00"^^xsd:decimal
5 Tl:ZK1+000	"3.92"^^xsd:decimal
6 Tl:ZK1+000	"3.92"^^xsd:decimal
7 Tl:ZK1+100	"4.41"^^xsd:decimal
8 Tl:ZK1+100	"4.41"^^xsd:decimal
9 Tl:ZK1+200	"4.55"^^xsd:decimal

Sensor	observedProperty
Tl:edc001_000288B0_13	Tl:Waist_Ring_Strain
Tl:edc001_00029285_6	Tl:Peripheral_Displacement
Tl:edc001_000288B0_11	监测数据
Tl:edc001_00029285_4	Tl:Waist_Ring_Strain
Tl:edc001_000288B0_9	Tl:Peripheral_Displacement
Tl:edc001_00029285_2	Tl:Waist_Ring_Strain
Tl:edc001_0002921B_7	Tl:Tunnel_Settlement
Tl:edc001_0002921B_8	Tl:Peripheral_Displacement
Tl:edc001_000288B0_7	Tl:Longitudinal_Strain_Of_Vault

SPARQL fi0i#Xfifij

4.2 结构健康评估

采用模糊评价方法对隧道健康状态进行评估，基于混合本体模型的核心支撑作用，对隧道整体、监测区段、各截断面分层级建立健康评价的相应因素集。根据《公路隧道养护技术规范》JTG H12-2015

2015 中对于结构状态的分级评价标准，隧道结构健康状况评定分为五个等级，分别对应完好状态、轻微破损、中等破损、严重破损和危险状态，据此在各层级上定义健康评价等级类和评价集立—{ 0, 2, 0, t, 4 "5 }。其中，0 "2 "3 "4 "1 与上述结构健康状况等级——对应。为了便于对不同等级进行量化分析，在评价集立的基础上构建等级评分矩阵 G —[5, 4, 3, 2, 1]，其中 0 等级对应评分 5，以此类推。

针对各类监测数据及其关联的区段特征，基于制定的语义推理规则，实现对塘朗山隧道的分层级评价（图 8）。在此过程中，借助关联建模结果，应用案例构建了“隧道—区段—断面—构件—传感器”的多级结构体系。每一层级的实体不仅具有几何形态、空间位置等描述属性，还关联着具体的监测指标，通过关联映射构建连接关系，为模糊评价方法的实施提供了完备的数据基础和语义上下文。通过预设的语义规则和本体实例化数据，实现监测值与对应结构的自动匹配，并结合模糊评价方法实现各层级状态等级的自动判定，从而在健康评估过程中能够综合考虑多个监测参数之间的关联关系及其空间层级

◦

本研究针对基础设施运维中多源异构数据的融合难题，提出了一种基于 BIM 和混合本体的数据语义建模与融合方法，面向隧道运维领域实现了 BIM、GIS 及传感器等多类数据的语义统一与互操作。以塘朗山隧道为工程实例，验证了该方法在实际场景下的有效性，通过语义推理实现了结构健康状态的多维度、自动化评估，为后续运维策略提供了智能化支持。研究结果表明，本体驱动的数据融合方法在提升运维数据管理效率、促进多模态信息融合与智能决策支持等方面具有广泛的应用前景。

根据评估结果,所选三个监测区段的整体结构健康评估等级均为2级以上,表明隧道整体结构状况较好,且该结果与最新人工巡检报告相一致,验证了本策略的合理性。面可结合具体监测指标中评估值偏低的项,开展针对性维护措施。

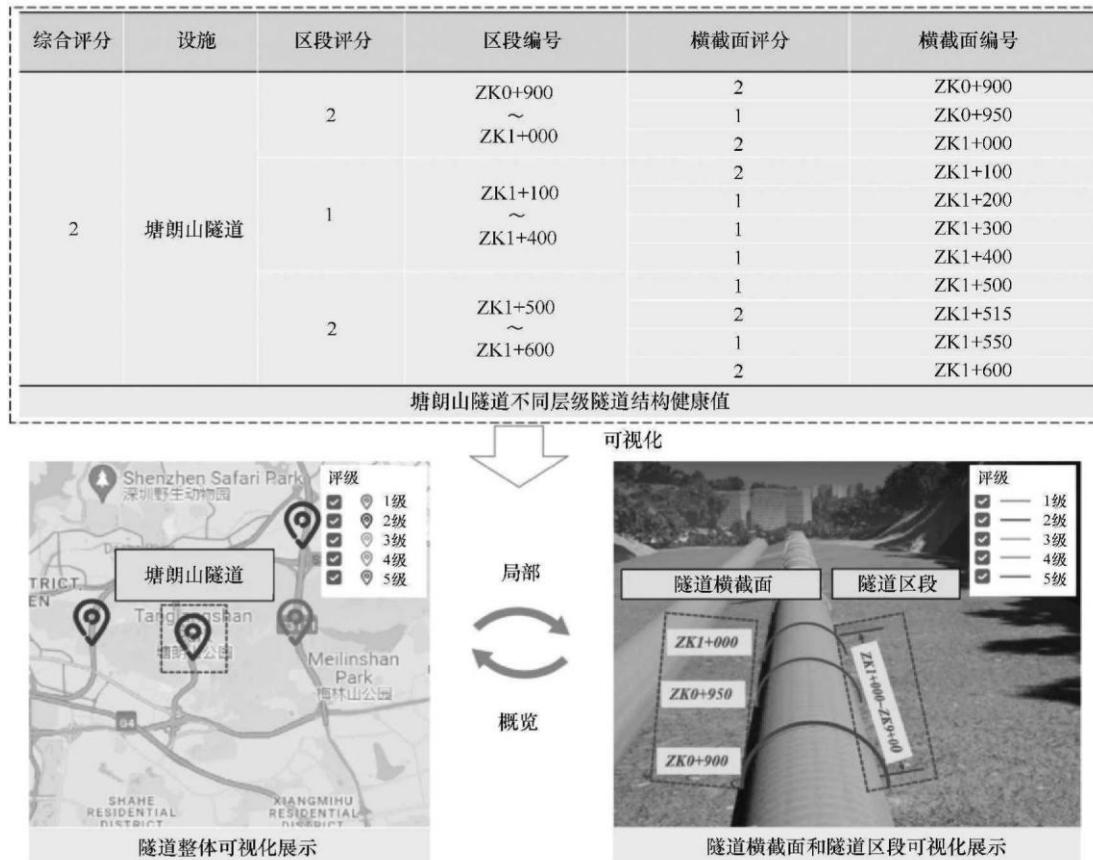


图8 塘朗山隧道结构健康评估与等级展示
参考文献

- [1] Pauwels P, Zhang S, Lee Y-C. Semantic web technologies in AEC industry: A literature overview[J]. Automation in Construction, 2017, 73: 145-165.
- [2] Kügler P, Dworschak F, Schleich B, et al. The evolution of knowledge-based engineering from a design research perspective: Literature review 2012-2021[C]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 55: 101892.
- [3] Amara F Z, Hemam M, Djezzar M, et al. Semantic web technologies for Internet of Things semantic interoperability [C]//Maleh Y, Alazab M, Gherabi N, et al. Advances in Information, Communication and Cybersecurity. Cham: Springer International Publishing, 2022: 133-143.
- [4] Deng Y, Cheng J C P, Anumba C. Mapping between BIM and 3D GIS in different levels of detail using schema mediation and instance comparison[J]. Automation in Construction, 2016, 67: 1-21.
胡振中, 张建平, 张旭磊. 基于4D施工安全信息模型的建筑施工支撑体系安全分析方法[J]. 工程力学, 2010, 27 (12): 192-200.
- [6] Zhang J P, Zhang Y, Hu Z Z, et al. Construction management utilizing 4D CAD and operations simulation methodologies [J]. Tsinghua Science and Technology, 2008, 13(S1): 241-247.
- [7] Jiang L, Shi J, Wang C, et al. Intelligent control of building fire protection system using digital twins and semantic web technologies[J]. Automation in Construction, 2023, 147: 104728.
- [8] Hor A-H, Jadidi A, Sohn G. BIM-GIS integrated geospatial information model using semantic web and RDF graphs [C]// ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, 111-4: 73-79.
胡瑛婷, 王铭浩, 石玉. SWRL N3与Jena BIM 8m GIS建筑本体融合方法[J]. 现代信息科技, 2022, 6 (7): 91-96, 101.

- [10] Shi J, Pan Z, Jiang L, et al. An ontology-based methodology to establish city information model of digital twin city by merging BIM, GIS and IoT[J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 57: 102114.