

面向地下工程的数字孪生成熟度分级与评价模型研究与应用

李涛¹, 李晓军¹, 徐博², 洪强³, 陈超¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院), 陕西 西安 710000; 3. 浙江省交通运输科学研究院智能交通研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 针对地下工程数字孪生成熟度评价主观性问题, 提出一种成熟度定量分级与评价模型。首先分析了数字孪生成熟度分级方法, 提出了描述、映射、预测、控制与融合五级地下工程数字孪生成熟度分级。其次, 建立了成熟度评价因子体系, 基于决策试行与评价实验室法(DEMATEL)量化评价因子网络关系, 提出了一种考虑标度一致性的网络分析法(ANP)模型构造与判断矩阵生成方法, 并考虑了成熟度分级阈值限制, 获得各因子的局部与全局权重。最后, 结合某地下工程数字孪生实践验证了DEMATEL-ANP成熟度评价模型的可行性与有效性。

关键词: 地下工程; 数字孪生; 成熟度分级; 成熟度评价; 智能建造

中图分类号: TU398⁺. 9

文献标志码: A

Research and Application of Digital Twin Maturity Model for Underground Engineering

Li Tao¹, Li Xiaojun¹, Xu Bo², Hong Qiang³, Chen Chao¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization (China Railway First Survey and Design Institute Group), Xi'an 710000, China; 3. Institute of Intelligent Transportation, Zhejiang Academy of Transport Sciences, Hangzhou 310058, China)

Abstract: This paper investigates the research progress of digital twin and proposes a novel digital twin concept framework for underground engineering. The digital twin maturity grading method is analyzed, and a five-level progressive developed digital twin maturity grading composed of description, reflection, prediction, control

and fusion is proposed. Based on extensive literature research, a maturity impact factor system is developed, and a digital twin maturity evaluation model (DTMM) is proposed based on an optimized decision experimentation and evaluation laboratory (DEMATEL) and analytic network process (ANP) joint method for evaluating the degree of cause, centrality and dependency. Finally, the DTMM is applied in conjunction with an underground project, and the results proved that the method proposed in this paper is applicable to underground projects and has implications for the development of digital twin in underground engineering.

Key words: underground engineering; digital twin; maturity grading; maturity evaluation; intelligent construction

突变地质与恶劣施工条件下, 地下工程设计、建造与运维存在感知不及时、信息离散^[1]、更新迟滞^[2-3]、分析精度不足^[4-6]与机理不够清晰等问题, 其瓶颈在于物理实体与虚拟模型的交互与共融程度低^[7], 缺乏表达实时特征与动态分析的理论技术手段。通过特征感知、双向互联与动态建模, 建立地下工程的数字孪生, 可及时跟踪工程的状态变化, 分析与优化其性能与演化规律, 支撑高效、安全、环保与韧性的地下工程^[8-9]。

然而当前数字孪生研究主要集中于概念、框架或文献综述方向^[10], 相较于制造业数字孪生, 地下工程数字孪生研究仍处于起步阶段。地下工程存在地质体难以勘明, 不确定性信息渐进细化, 岩土、结构、机械、人员复杂系统相互作用机理复杂, 应用场景多

收稿日期: 2022-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(U1934212); 浙江省级重点研发计划(2021C01011)

第一作者: 李涛, 博士生, 主要研究方向为隧道数字孪生。Email: litao0098@hotmail.com

通信作者: 李晓军, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为隧道智能建造。Email: lixiaojun@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

样等特点,导致地下工程数字孪生的技术路线、数据范围、分析能力等存在较大差异,不同学者对数字孪生的概念、技术特征、场景与发展路径也存在不同见解。因此当前亟需研究地下工程数字孪生成熟度分级与评价方法,以支撑其发展与应用。

诸多学者结合专业特征与应用需求,提出了诸多数字孪生成熟度分级(表1)。例如Tao等^[11]针对制造业数字孪生感知、控制、预测等技术特征,提出了六级成熟度分级,Pyne^[12]提出了描述、预测和决策三级成熟度分级。在工程领域,Zhang等^[13]研究了巷道掘进机器人数字孪生建立方法,并提出了“数化”、“互动”、“先知”、“先觉”和“共智”的数字孪生成熟度分级,Zhao等^[14]则针对钻爆法隧道提出了智能建造五级能力成熟度评价。但以上方法局限于单一应用场景,未考虑地下工程信息不确定、对象众多与场景复杂的特点,缺乏具体的评价方法。

在成熟度分级的基础上,Uhlenkamp等^[15]通过PRISMA (preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses,系统综述和元分析的首选报告项目)方法建立了由模型、数据、内容、控制、人机交互、计算能力与集成7个维度31个影响因子构成的数字孪生成熟度评价体系,基于问卷打分评价数字孪生成熟度。Chen等^[16]基于国家数字孪生目标、信任与功能原则(Gemini principal)^[17]确定了成熟度评价的27个因子,并基于问卷获取因子权重。Tao等^[11]则提出物理、虚拟、连接、数据与服务5个维度19个因子构成的成熟度评价体系,基于平权累加的方法计算成熟度等级。Hu等^[18]为评价智能系统成熟度,提出了一种基于层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)的权重计算方法,利用物元法(matter-element)修正不同场景下的权

重,并对地下工程设备、风力电机与车间进行了评价。但以上方法主观地划分不同领域评价因子成熟度等级,忽略了不同因子之间的复杂依赖关系与网络结构,例如感知能力、数据丰富度与分析能力的链式支撑关系,导致数字孪生成熟度评价结果缺乏客观性与实用性。

针对以上问题,提出了一种DEMATEL-ANP耦合的地下工程数字孪生成熟度评价方法。首先结合地下工程特征与应用场景提出了五级成熟度分级,并建立了成熟度评价因子体系。其次,引入决策试行与评价实验室法(decision-making trial and evaluation laboratory, DEMATEL)方法,将数字孪生成熟度影响因子关系网络的主观构造问题转化为评价因子相对重要度的客观问题,保证评价因子关系网络的客观性。最后,提出了一种改进的基于DEMATEL综合影响矩阵的网络结构分析法(analytic network process, ANP)网络构造方法,解决了DEMATEL与ANP模型的标度不一致问题,并纳入不同成熟度等级对各因子的阈值限制,计算出全局与局部应用场景影响因子权重,为地下工程数字孪生发展与应用提供理论依据。

1 地下工程数字孪生成熟度分级

1.1 数字孪生成熟度分级

近年来,数字孪生的基础概念、理论技术、应用场景等得到了广泛关注与发展,并于2020年左右在制造业、航空、船舶、电力等行业得到应用^[19-20]。为了支撑数字孪生的发展与应用,国内外对数字孪生成熟度分级进行了广泛讨论。表1对通用、制造业、航空与建造业等领域的数字孪生成熟度分级进行了比较。

表1 数字孪生成熟度分级

Tab. 1 Maturity level for digital twin

领域	等级	分级	文献
通用	3	数字模型(digital model)、数字影子(digital shadow)、数字孪生(digital twin)	Kritzinger ^[21]
	5	虚实连接模型、反馈与控制模型、预测分析模型、自主学习模型和广泛智能模型	Arup ^[22]
	4	描述孪生(descriptive)、诊断孪生(diagnostic)、预测孪生(predictive)和规定孪生(prescriptive)	Gartner ^[23]
制造业	6	以虚仿实(L0)、以虚映实(L1)、以虚控实(L2)、以虚预实(L3)、以虚优实(L4)、虚实共生(L5)	Tao ^[11]
	6	基础(Basic)、连接(Connection)、集成(Integration)、认知(Perception)、互动(Interaction)、自主(Autonomy)	Hu ^[18]
	3	描述孪生(description)、预测孪生(prediction)和决策孪生(prescription)	Pyne ^[12]
航空	4	前数字孪生(predigital twin)、数字孪生(digital twin)、自适应数字孪生(adaptive digital twin)和智能数字孪生(intelligent digital twin)	Madni ^[25]
	5	描述孪生(descriptive)、信息孪生(informative)、预测孪生(predictive)、综合孪生(comprehensive)和自主孪生(autonomous)	Autodesk ^[26]
建造业	5	数化、互动、先知、先觉和共智	Zhang ^[13]
	5	基础规划、数字规范、集成共享、数智驱动与数字孪生	Zhao ^[14]

考虑到通用性以及应用便利性,目前成熟度分级数量主要为3至6级。由于数字孪生的应用场景与技术路线仍处于探索阶段,当前的成熟度分级主要基于技术成熟度或功能完善度的原则。例如从技术成熟度的角度,Kritzinger^[21]将按照信息流畅通的程度,将数字孪生划分数字模型(digital model)、数字影子(digital shadow)与数字孪生(digital twin)三个等级。Arup^[22]公司根据“自主性、智能性、学习能力以及保真度”将数字孪生划分为5个成熟度。

功能完善度实质上是在数字孪生技术发展的基础上,对其实际应用与解决具体能力的描述。例如Gartner^[23]按照功能将数字孪生划分描述孪生(description)、诊断孪生(diagnostic)、预测孪生(predictive)和处置孪生(prescriptive)4个等级,在各行各业得到了广泛的应用^[24],Pyne^[12]则进一步将其精简为三级成熟度。同理,Madni^[25]、Hu^[18]、Autodesk^[26]、Zhang^[13]、Zhao^[14]等分别针对航空业、工程信息化、施工机器人、隧道建造等场景的数字孪生提出了分级模型。最后,Tao等^[11]则结合连接、控制以及分析等技术的成熟度与功能完善度提出了6级成熟度模型。

1.2 地下工程数字孪生五级成熟度分级

通过文献调研,数字孪生在地下工程领域的应用场景及功能可分为以下类别:(1)描述地质、结构等工程实体几何、属性等特征,承载监测、病害、材料等信息^[27-30];(2)跟踪工程现场状态,在信息空间建立描述工程实体动态的虚拟映射^[31-34];(3)基于孪生模型分析、拟合与预测工程性能、响应与状态变化^[35-39];(4)基于预测和分析结果,给出优化决策方案,并实现对掘进机等机械的控制^[13, 33-34];(5)基于知识、数据、物理和人工智能模型挖掘潜在规律或机理。

结合既有的数字孪生分级与地下工程特点,本文提出了描述孪生(Description)、映射孪生(Reflection)、预测孪生(Prediction)、控制孪生(Control)和融合孪生(Fusion)五级成熟度分级,主要用于地下工程项目以及企业的数字孪生技术成熟度评价。例如隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)施工数字孪生侧重于虚实状态的映射与预测,而隧道运维则侧重对病害、结构性能、监测数据的描述与分析。

1.2.1 第一级:描述孪生

描述孪生是基础的孪生,是数字化的进一步成熟和发展,主要作为地下工程的信息中心^[40-41],将工程实体的真实状态、属性等特征信息化。描述孪生

综合利用传感器、无人机、LiDAR、照相、人工量测等方式广泛采集地质、结构等实体的几何、材料(组分)、性能(功能、特性)、历史过程等多源、异构、离散的信息,再通过NLP、ETL、计算机视觉等技术统一转化到信息空间中进行处理、关联和共享,以实现工程实体在信息空间的重建。描述孪生尚不具备自主更新与分析能力,且在时间维度上与工程实体存在偏差,需要人工进行更新。描述孪生可以纳入既有的BIM(建筑信息模型)、GIS(地理信息系统)等模型,作为虚拟模型建立的重要基础。

1.2.2 第二级:映射孪生

映射孪生在描述孪生的基础上,基于IoT、数据处理和即时通信手段,建立与工程实体实时状态匹配的几何、属性与状态模型。映射孪生可即时描述工程进度、施工操作、结构响应等动态特征,将属性、状态、相互关系等抽象特征进行可视化表达,并可通过AR、MR等技术实现虚拟实体与工程实体的联动。基于实时更新能力,映射孪生可支撑风险预警、方案变更等高时效性决策。与此同时,机械操作及决策可以由映射孪生同步传达工程现场,实现对机械的控制。

1.2.3 第三级:预测孪生

工程实体的高维特征如行为规则、物理模型等被进一步集成至预测模型,在高保真信息的支撑下,预测孪生具备先于现实预测与推演物理实体未来状态的能力,例如预测结构力学响应、服役性能、施工风险等。描述孪生与映射孪生是建立预测孪生的基础,通过数字数值一体化、自动数值模型建模或机器学习方法,预测孪生可以发掘状态变化规律,并结合现场反馈的结果不断优化预测方法,最终实现高精度的预测。

1.2.4 第四级:控制孪生

基于描述、映射与预测孪生,控制孪生可以在信息空间中对施工组织、设计方案、机械操作进行分析和推演,数字孪生通过知识、行为、人工智能与物理模型预测物理实体的真实响应,实时给出优化的决策及控制方案。控制孪生可以建立施工机器人、自动化机械等智能设备高保真模型,支撑机械的远程与自动化控制。

1.2.5 第五级:融合孪生

虚实融合孪生是虚拟模型与工程实体不断逼近与融合的等级。地下工程具有不确定性、随机性与信息渐进细化的特点,信息手段无法完全映射工程实体的特征。融合孪生作为地下工程的数字映射,

通过与物理实体的不断交互与反馈,其信息丰富度、模型精度与预测能力不断提高,虚拟模型也不断迭代和演进,潜在的规律与机理不断被发现,最终达到虚实融合的目标。

2 地下工程数字孪生成熟度评价模型

2.1 改进的 DEMATEL-ANP 地下工程数字孪生

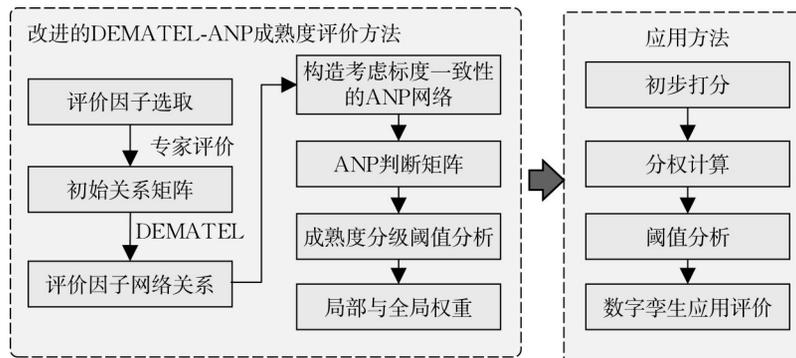


图 1 改进的 DEMATEL-ANP 成熟度评价方法

Fig. 1 Optimized DEMATEL-ANP maturity evaluation method

2.2 基于 DEMATEL 的成熟度评价因子网络关系构造

2.2.1 评价因子选取

本文通过文献调研的形式获取了 30 余篇文献中共计 90 余个成熟度评价因子。根据地下工程专业需求与数字孪生分级,筛除雷同以及次要的因子,综合考虑数字孪生的技术成熟度与功能完善度特

成熟度评价模型框架

征,构造了地下工程数字孪生成熟度评价因子体系如表 2 所示。该体系由 14 个评价因子与 31 个详细的子评价因子构成,每个因子按照五级成熟度分级进行隶属划分。鉴于评价因子体系同时包含定量指标与定性指标,因子定级易受主观影响,为统一评价标准,本文后述将评价因子对应的成熟度等级定性特征进行了描述。

表 2 地下工程数字孪生成熟度评价因子体系

Tab. 2 Grading factors for digital twin maturity model

分级	评价因子	描述或衡量标准	对应数字孪生组分	主要参考文献
描述孪生 (Description)	数据丰富度(DR)	对象覆盖范围、时间覆盖范围、专业覆盖范围	虚拟模型	Pyne ^[12]
	语义丰富度(SR)	相互关系、建造过程等描述性信息,对象覆盖范围、时间覆盖范围、语义信息范围	虚拟模型	Boje ^[42]
	模型完整度(MC)	属性、状态、行为、物理与相互作用模型完整度	虚拟模型	Uhlenkamp ^[15]
	模型匹配度(MQ)	模型精度、模型误差	虚拟模型	
映射孪生 (Reflection)	感知能力(SC)	感知方式、感知频率	物理实体	Lu ^[31]
	互操作性(CI)	数据标准化、数据交互能力	连接	Boje ^[42]
	连接能力(CC)	连接速度、连接质量、连接方式	连接	Tao ^[11]
预测孪生 (Prediction)	模型更新能力(MU)	更新速度、更新范围	虚拟模型	Medina ^[24]
	分析能力(AC)	分析精度、分析形式	虚拟模型	Medina ^[24]
控制孪生 (Control)	预测能力(PC)	预测范围、预测精度	虚拟模型	Agrawal ^[43]
	决策能力(DC)	决策范围、决策精度	虚拟模型	Medina ^[24]
融合孪生 (Fusion)	控制能力(OC)	控制方式、控制范围	物理实体	Tao ^[11]
	演进能力(EC)	演进能力	虚拟模型	Chen ^[16]

2.2.2 直接影响矩阵构造

直接影响矩阵量化了成熟度评价因子的相互关系及重要程度。本文组织了地下工程领域公路隧道

(7位)、铁路隧道(2位)与城市轨道交通(2位)专业共计 11 位专家(其中设计单位 2 人,施工单位 2 人,科研院所 7 人)形成了专家团,基于李克特五级量表

原则(即 0:不相关,1:弱相关,2:正常,3:较强,4:很强),对评价因子两两之间的相互关联程度进行了集体讨论,参照公式 1 构造了成熟度直接关系矩阵:

$$M_d = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & 0 & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: M_d 为直接关系矩阵; a_{ij} 表示成熟度评价因子*i*对*j*的影响度; m 是直接影响矩阵的维度,等于评价因子的数量。评价因子不考虑自影响,即 $a_{ii} \equiv 0$ 。

2.2.3 综合影响矩阵计算

直接关系矩阵 M_d 表达了各评价因子的两两关系,但存在全局不一致问题,需对因子关系进行归一化,构造规范关系矩阵,以评价因子的全局影响度贡献,计算方法如下:

$$M_n = M_d / f_s \quad (2)$$

$$f_s = \max_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^m a_{ij} \quad (3)$$

其中: M_n 为规范化关系矩阵; f_s 为归一系数。

在规范化关系矩阵的基础上,规范化关系矩阵通过自乘可获得不同幂级各评价因子的间接影响,最终将所有幂级的影响求和,得到评价因子之间的综合影响矩阵 M 为

$$M = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{l=1}^k M_n^l = M_n(I - M_n)^{-1} = [t_{ij}]_{m \times m} \quad (4)$$

其中: M_n 为规范化关系矩阵; M 为综合影响矩阵; t_{ij} 表示成熟度评价因子*i*对*j*的综合影响度。

综合影响矩阵 M 的行和 R 代表各因子的影响度,即对其他评价因子影响的程度,列和 C 代表被影响度,即其受影响的程度。影响度与被影响度之和 $M_i = D_i + C_i$ 表征评价因子的中心度,定量化表示某因子在成熟度评价体系中的总体重要程度。去除被影响度后,某评价因子原因度由 $R_i = D_i - C_i$ 表示,代表评价因子对其他因子产生的综合影响值,如果该值为负,则代表其主要受其他因子的影响。基于以上方法,地下工程数字孪生成熟度评价综合关系矩阵如表 3 所示。

表 3 成熟度评价因子综合影响矩阵

Tab. 3 Maturity impact factor composite relationship matrix

因子	DR	SR	MC	MQ	SC	CI	CC	MU	AC	PC	DC	OC	EC
DR	0.018	0.089	0.159	0.153	0.052	0.055	0.006	0.141	0.217	0.250	0.288	0.186	0.299
SR	0.016	0.024	0.149	0.136	0.016	0.110	0.064	0.071	0.138	0.163	0.186	0.155	0.223
MC	0.008	0.014	0.014	0.089	0.014	0.039	0.001	0.085	0.165	0.190	0.217	0.105	0.171
MQ	0.011	0.018	0.011	0.027	0.015	0.067	0.001	0.024	0.163	0.186	0.211	0.131	0.221
SC	0.137	0.121	0.114	0.126	0.023	0.027	0.008	0.167	0.123	0.145	0.200	0.199	0.242
CI	0.039	0.047	0.080	0.063	0.013	0.012	0.003	0.056	0.082	0.125	0.143	0.122	0.177
CC	0.074	0.086	0.100	0.084	0.022	0.019	0.005	0.160	0.107	0.157	0.183	0.219	0.253
MU	0.009	0.016	0.101	0.090	0.017	0.011	0.001	0.022	0.085	0.128	0.177	0.185	0.211
AC	0.008	0.014	0.006	0.049	0.013	0.005	0.001	0.019	0.034	0.164	0.185	0.113	0.193
PC	0.007	0.013	0.013	0.022	0.013	0.003	0.001	0.101	0.033	0.040	0.174	0.112	0.183
DC	0.010	0.014	0.006	0.016	0.038	0.003	0.001	0.009	0.025	0.029	0.034	0.090	0.152
OC	0.011	0.012	0.008	0.013	0.065	0.003	0.001	0.012	0.018	0.021	0.026	0.022	0.085
EC	0.038	0.074	0.019	0.090	0.018	0.014	0.005	0.028	0.164	0.186	0.210	0.159	0.111
R	1.912	1.45	1.111	1.086	1.632	0.961	1.468	1.052	0.804	0.716	0.428	0.297	1.115
C	0.386	0.542	0.78	0.957	0.319	0.366	0.096	0.895	1.354	1.785	2.233	1.797	2.521
M_i	2.298	1.992	1.891	2.043	1.951	1.327	1.564	1.947	2.158	2.501	2.661	2.094	3.635
R_i	1.526	0.909	0.331	0.129	1.312	0.595	1.372	0.157	-0.551	-1.068	-1.806	-1.501	-1.406

通过分析综合影响矩阵,对数字孪生成熟度影响较大的(中心度较高)的因子为数据丰富性(DR)、模型符合度(MQ)、分析(SC)、预测(PC)、决策(DC)、控制(OC)与演进能力(EC)。其中数据丰富性(DR)、语义丰富度(SR)、感知能力(SC)和连接能力(CC)是主要的原因因素或者输入因子,而预测(PC)、决策(DC)、控制(OC)与演进能力(EC)是受影响较大的因子,也就是说,其受制于数据输入、动态更新、决策分析等能力的支撑。

2.2.4 成熟度评价因子网络关系构造

根据表 3 的综合影响矩阵,忽略影响关系低于均值的关系($t_{ij} < \sum t_{ij} / m^2$),设定影响关系阈值为 0.08(即忽略影响较弱的关系,例如 SC 与 CI),可构造图 2 所示网络关系图。图 2 横坐标代表因子的中心度,数值越大代表在系统中的重要性越高。纵坐标代表因子的原因度,数值越大代表其对整个系统的输入贡献越大,负值代表其为结果因子。由图可知,感知(SC)、连接(CC)是等感知与输入相关的因

子是构造数字孪生的源头影响因子。感知与处理的数据经过建模,进一步通过模型完整度(MC)、模型匹配度(MQ)与模型更新能力(MU)实现对地下工

程实体的描述。在模型与数据的基础上,数字孪生进一步实现了分析(AC)、预测(PC)、决策(DC)与控制(OC),最终支撑融合数字孪生(EC)的发展。

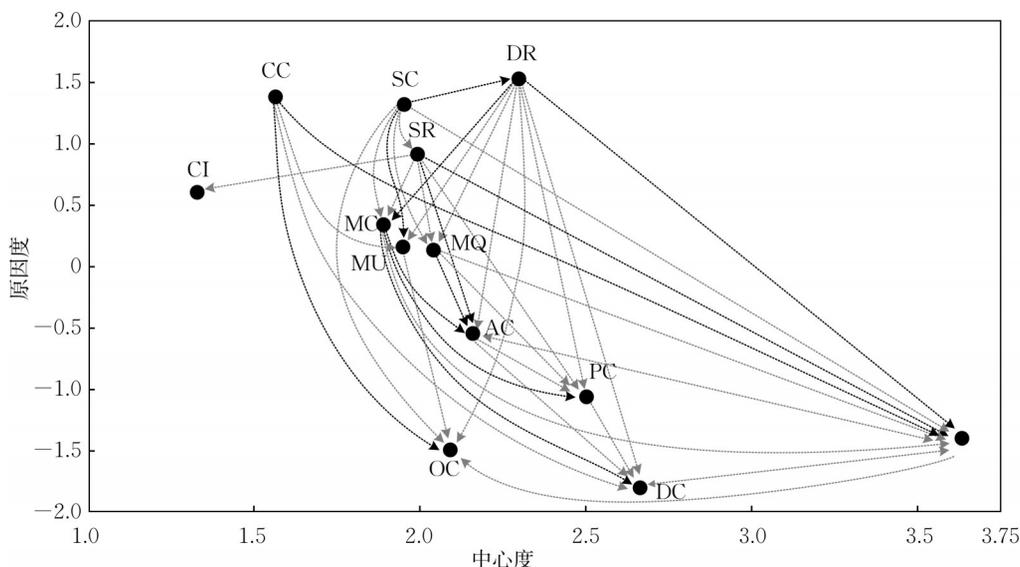


图 2 成熟度评价因子网络关系图

Fig. 2 Relation network for maturity impact factor

2.3 基于优化的 ANP 的成熟度评价因子权重分析

2.3.1 改进的基于 DEMATEL-ANP 网络构建方法

DEMATEL 方法分析得出了不同因子之间的关联关系与对成熟度的贡献,然而获取的综合影响矩阵仅能用于分析关联关系,其中中心度无法用于量化评价数字孪生成熟度。ANP 方法通过将系统元素划分为控制层因素(需要达到的目标)和网络层元素(影响控制层目标的因素),其中控制层因素和网

络层元素可以重叠。通过两两比较网络层元素对控制层元素(目标)的重要性,形成一个判断网络,进而评估不同因素的重要性,形成最优的方案。

本文依据 DEMATEL 方法的综合影响矩阵,以受影响较大的元素为控制层元素,以原因度较大的元素为网络层因素,构造的 ANP 模型结构如图 3 所示。

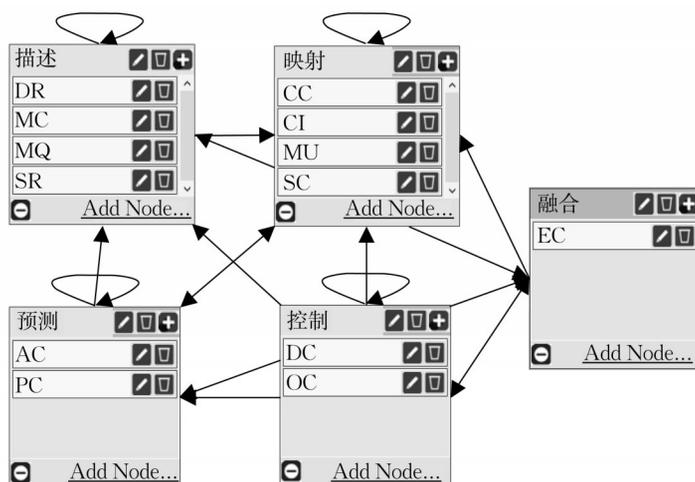


图 3 基于 DEMATEL 的成熟度评价因子 ANP 结构

Fig. 3 ANP structure for maturity impact factors

2.3.2 权重计算

既有 DEMATEL-ANP 方法在构造 ANP 判断矩阵过程中忽略了 DEMATEL 综合影响矩阵对评价因子重要关联程度的定量评价,采用不同标度和专家问卷重新构造判断矩阵,导致模型迁移误差。本文基于综合影响矩阵 M ,通过标度映射,构造 ANP 的判断矩

阵,保证 ANP 判断矩阵与 DEMATEL 综合影响矩阵的结构一致性。由于成熟度评价矩阵较多,表 4 展示了以分析能力(AC)准则下描述孪生重要度判断矩阵的构造方法。为避免转化误差,需对判断矩阵进行一致性检验,表 4 所示判断矩阵不一致性为 0.004,满足小于 0.1 的一致性误差要求。

表 4 以分析能力(AC)为准则的描述孪生重要度判断矩阵

Tab. 4 Importance judgement matrix using analytical capability

AC	DR	MC	MQ	SR
DR	1	3	2	3
MC	1/3	1	2	1
MQ	1/2	1/2	1	2
SR	1/3	1	1/2	1

依次选择所要判断的成熟度评价因子并构建判断矩阵后,利用 SuperDecision 软件计算出未加权超矩阵、加权超矩阵以及稳定的极限超矩阵,求得稳定极限超矩阵列向量,归一化后获得 ANP 权重: $\omega = (0.139, 0.065, 0.046, 0.052, 0.262, 0.034, 0.078, 0.054, 0.059, 0.053, 0.043, 0.025, 0.089)^T$

经过混合权重方法 $W = \omega + M\omega$ 纳入前期忽略的影响关系(影响关系小于阈值的),最终获得表 5 所示地下工程数字孪生成熟度评价因子全局与局部权重。

表 5 地下工程数字孪生成熟度评价因子权重

Tab. 5 Weight of maturity impact factors

等级	描述孪生				映射孪生				预测孪生		控制孪生		融合孪生
因子	DR	SR	MC	MQ	SC	CI	CC	MU	AC	PC	DC	OC	EC
全局权重	0.139	0.065	0.046	0.052	0.262	0.034	0.078	0.054	0.059	0.053	0.043	0.025	0.089
局部权重	0.460	0.216	0.151	0.173	0.612	0.080	0.183	0.126	0.531	0.469	0.630	0.370	1.000

2.4 阈值限制

基于成熟度评价因子间的依赖关系,但不同成熟度的数字孪生对局部因子成熟度存在最低要求,例如预测孪生对数据丰富度(DR)以及控制孪生对连接能力(CC)的要求。在成熟度评价时,需要考虑局部因子的限制。为简化评价流程,数字孪生成熟度等级与局部评价因子等级最多相差一级,且权重最高的评价因子等级不得低于成熟度等级,否则数字孪生成熟度分级应与评价因子等级保持一致。例如,映射孪生等级应不高于感知能力(SC),且不应高于连接能力(CC)一级。

通过建立传感与数据标准化采集系统,驱动地质与结构孪生模型动态更新,老营隧道实现了模型驱动的隧道结构稳定性分析与施工决策,初步建立了数字孪生模型。选取双洞 K5+000-K5+500 里程的勘察、设计与施工数字孪生建模为评价对象。

首先根据表 6 对数字孪生成熟度评价因子进行分级。

描述孪生维度,老营隧道孪生模型包含了多个断面地质报告、施工进度、施工参数、现场监测等数据,数据丰富度(DR)为 3 级。模型涵盖了地质条件、BIM 设计模型、地质模型等模型,但模型与现场存在一定的时间误差,模型匹配度(MQ)为 2 级(图 4)。

映射孪生维度,现场缺乏及时通信手段,连接能力为 0 级。通过地质雷达、全站仪等设备人工跟踪地质与结构状态,感知能力(SC)为 1 级。现场采集的数据通过提取转化加载(extract, transfer, load, ETL)进行划标准化处理,并基于云服务实现共享,数据交互性(CI)为 3 级。

3 成熟度评价模型应用案例分析

为了验证地下工程数字人路过成熟度模型的稳健性与可用性,本文选取了云南老营隧道数字孪生建模作为应用案例,进行了局部与整体的成熟度评价。老营隧道是云南省保泸(保山-泸水)高速公路的控制性工程,为分离式特长(11.5 km)超深埋(1259 m)钻爆法施工隧道,隧道设计与施工变更频繁。

分析、预测与融合孪生维度,采用了典型断面分析方法计算掌子面与结构的稳定性,设计与施工决

表 6 地下工程数字孪生成熟度评价因子分级表
Tab. 6 Impact factors grading for digital twin maturity evaluation

因子	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
数据丰富度(DR)	断面或多个对象,当前工程阶段,地质与结构	多个断面主要对象,当前工程阶段,地质、结构与机械	多个断面主要对象,历史及当前工程阶段,地质、结构、人员与机械	全部相关对象,历史与主要工程阶段,地质、结构、人员与机械	全部相关对象,全部相关阶段,所有专业
语义丰富度(SR)	断面或多个对象,当前工程阶段,空间关系	多个断面所有对象,当前工程阶段,空间关系与过程	多个断面所有对象,历史及当前工程阶段,空间关系、过程及响应	全部相关对象,历史与主要工程阶段,空间关系、过程、相互关系	全部相关对象,全部相关阶段,所有专业
模型完整度(MC)	属性、状态模型任一	属性、状态、行为模型	属性、状态、行为与相互作用模型	属性、状态、行为与相互作用模型	属性、状态、行为、物理与相互作用模型
模型匹配度(MQ)	真实数据,粗糙模型,误差一般	真实实时数据,精细模型,误差一般	真实语义特征,精细模型,误差较低	真实语义特征,高精度模型,几无误差	高维语义与物理特征,高精度模型,几无误差
感知能力(SC)	人工读取,部分传感	半自动感知,可控传感	自动语义感知,可控感知	自动语义感知,可控感知	可控感知,全部语义感知
互操作性(CI)	部分标准化,可解译	标准化,可解译	高度标准化,局部共享	高度标准化,全局共享	高度标准化,全局共享
连接能力(CC)	人工配置,单向连接,满足数据传递需求,连接可用	半自动配置,双向连接,基本即时性通信需求,连接基本稳定	自动配置,双向连接,满足实时通信需求,连接可靠	自动配置,自动交互,满足扩展性需求,高度可靠	自适应配置,融合连接,高度扩展的连接能力,高度可靠
模型更新能力(MU)	断面部分组件,部分属性可更新	断面部分组件,属性、状态模型可更新	断面主要组件,属性、状态可预测更新	工程主要对象,属性、状态、行为模型可预测更新	工程全部相关对象,属性、状态、行为与物理模型可预测更新
分析能力(AC)	真实数据模型,手动建模分析,误差较大	真实实时数据模型,半自动分析,误差一般	多物理分析与优化,自动分析,误差较低	多物理分析与优化,全自动分析,几无误差	多物理仿真预测,全自动分析,几无误差
预测能力(PC)	基于数据的拟合预测	基于分析的相同场景匹配预测	基于复杂分析的复杂场景预测	考虑人机作用的复杂场景预测	复杂系统场景推演
决策能力(DC)	基于经验的决策,误差不可控	基于分析的辅助决策,误差较大	基于预测的决策,误差可控	基于预测的决策优化,误差较低	自主决策
控制能力(OC)	人工控制	机械辅助的人工控制	人工辅助的半自动控制	人工监督的自主控制	自主控制
演进能力(EC)	数据规律挖掘	时序特征挖掘	复杂行为特征挖掘	基于反馈的物理特征挖掘	虚实协同演进

注:若不满足Level 1的要求,则为0分

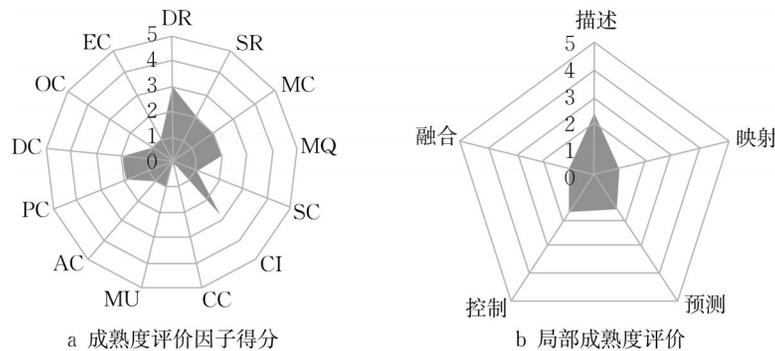


图 4 基于DTMM的老营隧道成熟度评价

Fig. 4 Maturity evaluation of Laoying Tunnel

策依赖典型滞后的典型断面分析结果,分析能力(AC)为1级,决策能力(DC)为2级。现场施工机械人工操作,缺少即时通信与自动控制能力,控制能力(OC)为1级。地质条件以及结构响应的预测基于离散与滞后的数据,演进能力(EC)为1级。

成熟度评价结果如表 7 所示。老营隧道数字孪生成熟度最高的维度为描述孪生,总体成熟度得分为 1.52 分,满足阈值约束要求。老营隧道孪生模型

基于广泛的数据,实现了对施工过程与参数的描述,但缺乏语义信息,模型及时性与精准性有待提高。此外,老营隧道数字孪生缺乏及时连接能力,导致数据与模型无法及时更新,无法反映工程现场及时状态,进一步制约了分析与预测能力,导致设计变更与决策响应滞后。

基于数字孪生成熟度评价,可以发现,通信与模型更新能力是限制老营隧道数字孪生发展的主要因

素,也是当前钻爆法隧道数字孪生应用存在的主要问题。在推进隧道数字孪生研究与应用时,可优先发展即时感知、连接与基于时序数据的模型更新方法,以支撑更加科学的决策。

表 7 老营隧道施工数字孪生成熟度评价
Tab. 7 Maturity evaluation of Laoying Tunnel

维度	因子	分级	全局得分	局部得分	局部分级
描述	DR	3	0.418	0.460	2.460
	SR	2	0.131	0.216	
	MC	2	0.092	0.151	
	MQ	2	0.105	0.173	
映射	SC	1	0.262	0.612	0.977
	CI	3	0.102	0.080	
	CC	0	0.000	0.183	
	MU	1	0.054	0.126	
预测	AC	1	0.059	0.531	1.469
	PC	2	0.105	0.469	
控制	DC	2	0.086	0.630	1.630
	OC	1	0.025	0.370	
融合	EC	1	0.089	1.000	1
共计			1.522		

4 结论

针对地下工程数字孪生成熟度分级不清晰与评价主观性的问题,提出了面向地下工程的数字孪生五级成熟度分级(描述、映射、预测、控制与融合)。鉴于数字孪生成熟度影响因子存在复杂依赖关系,本文改进了DEMATEL-ANP方法,将成熟度评价因子的依赖关系量化为网络关系图。通过DEMATEL网络关系矩阵与ANP判断矩阵的标度映射,建立了针对地下工程的成熟度评价模型。该模型考虑了不同成熟度影响因子的关联关系,为既有地下工程数字孪生的成熟度提供了量化的分级与评价方法,也可以对数字孪生成熟度提升所需的理论研究、技术开发与工程应用提供建议。但由于当前数字孪生应用案例较少,本文未考虑实施过程、实施成本和应用效益等方面的成熟度评价,未来可结合数字孪生的应用进一步扩展评价模型,以提高模型的实用性。

作者贡献声明:

李 涛:图表制作,论文写作与修改。

李晓军:论文框架指导,论文审校。

徐 博:数据获取,论文修改。

洪 强:资源提供,论文验证。

陈 超:软件开发,数据处理,论文修改。

参考文献:

- [1] 陈湘生,李克,包小华,等.城市盾构隧道数字化智能建造发展概述[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(5):1057.
CHEN Xiangsheng, LI Ke, BAO Xiaohua, *et al.* Innovations in the development of digital and intelligent construction of urban shield tunnels [J] Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(5): 1057.
- [2] 《中国公路学报》编辑部.中国隧道工程学术研究综述·2015[J].中国公路学报,2015,28(141):1.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's tunnel engineering research:2015 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(141): 1.
- [3] 李皓燃,李启明,陆莹.2002—2016年我国地铁施工安全事故规律性的统计分析[J].都市轨道交通,2017,30(1):12.
LI Haoran, LI Qiming, LU Ying. Statistical analysis on regularity of subway construction accidents from 2002 to 2016 in China [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(1):12.
- [4] KATEBI H, REZAEI A H, HAJIALILUE-BONAB M. *et al.* Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on shield tunnel lining loads (by FEM) [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49: 67.
- [5] NINIĆ J, BUI H G, MESCHKE G. BIM-to-IGA: A fully automatic design-through-analysis workflow for segmented tunnel linings [J]. Advanced Engineering Informatics, 2020, 46: 101137.
- [6] ALSAHLI A, HEGEMANN F, KÖNIG M, *et al.* Integrated BIM - to - FEM approach in mechanised tunnelling [J]. Geomechanics and Tunnelling, 2020, 13(2): 212.
- [7] TAO F, YING C, JIANGFENG C, *et al.* Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603.
- [8] TAO F, CHENG J, QI Q, *et al.* Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9/12): 3563.
- [9] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems [M]. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, 2017.
- [10] JIANG F, MA L, BROYD T, *et al.* Digital twin and its implementations in the civil engineering sector [J]. Automation in Construction, 2021, 130: 103838.
- [11] TAO F, ZHANG C, QI Q, *et al.* Digital twin maturity model [J]. Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS, 2022, 28(5): 1267.
- [12] PYNE S, PRAKASA RAO B L S, RAO S B. Big data analytics: Methods and applications [M]. Springer India, 2016.
- [13] ZHANG C, ZHANG X H, MAO Q H, *et al.* Research and application of digital twin system for intelligent tunneling equipment in coal mine [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(5): 813.
- [14] ZHAO S, LI X, XU B. Capability maturity evaluation model

- for intelligent tunnel construction by drill and blast method [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022(S2): 1.
- [15] UHLENKAMP J F, HAUGE J B, BRODA E, *et al.* Digital twins: A maturity model for their classification and evaluation [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 69605.
- [16] CHEN L, XIE X, LU Q, *et al.* Gemini principles-based digital twin maturity model for asset management [J]. *Sustainability (Switzerland)*, 2021, 13(15):1.
- [17] BOLTON A, ENZER M, SCHOOLING J. The gemini principles: Guiding values for the national digital twin and information management framework [Z]. [S. l.]: Centre for Digital Built Britain and Digital Framework Task Group, 2018.
- [18] HU W, FANG J, ZHANG T, *et al.* A new quantitative digital twin maturity model for high-end equipment [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 66: 248.
- [19] OPOKU D G J, PERERA S, OSEI-KYEI R, *et al.* Digital twin application in the construction industry: A literature review [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 40: 102726.
- [20] LI T, LI X, XU B, *et al.* Research progress and key theories and technologies of underground engineering digital twin [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022(S2): 1.
- [21] KRITZINGER W, KARNER M, TRAAR G, *et al.* Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, 51(11): 1016.
- [22] ARUP. Digital twin: Towards a meaningful framework [R]. [S.l.]:ARUP, 2019.
- [23] KART L, LINDEN A, SCHULTE W. Extend your portfolio of analytics capabilities [R]. Stamford, CT: Gartner Group, 2013.
- [24] MEDINA F G, UMPIERREZ A W, MARTINEZ V, *et al.* A maturity model for digital twin implementations in the commercial aerospace OEM industry [C]// 2021 10th International Conference on Industrial Technology and Management. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021: 149-156.
- [25] MADNI A M, MADNI C C, LUCERO S D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering [J]. *Systems*, 2019, 7(1):7.
- [26] Autodesk. Digital twins in construction, engineering, and architecture [EB/OL]. [2024-11-14]. <https://www.autodesk.com/design-make/emerging-tech/digital-twin/architecture-engineering-construction>.
- [27] ZHU Q, ZHANG L, DING Y, *et al.* From real 3D modeling to digital twin modeling [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 1040.
- [28] CHEN J, SHENG Q, CHEN G, *et al.* Review of advances in digital twin technology for geotechnical engineering [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(8): 1.
- [29] KHAJAVI S H, MOTLAGH N H, JARIBION A, *et al.* Digital twin: Vision, benefits, boundaries, and creation for buildings [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 147406.
- [30] JIANG F, MA L, BROYD T, *et al.* Building digital twins of existing highways using map data based on engineering expertise [J]. *Automation in Construction*, 2022, 134:104081.
- [31] LU Q, PARLIKAD A K, WOODALL P, *et al.* Developing a digital twin at building and city levels: Case study of west cambridge campus [J]. *Journal of Management in Engineering*, 2020, 36(3): 1.
- [32] LU Q, CHEN L, LI S, *et al.* Semi-automatic geometric digital twinning for existing buildings based on images and CAD drawings [J]. *Automation in Construction*, 2020, 115: 103183.
- [33] XIE J, WANG X, YANG Z. Design and operation mode of production system of fully mechanized coal mining face based on digital twin theory [J]. *Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS*, 2019, 25(6): 1381.
- [34] WANG T. Development and design system of intelligent multi-functional tunnel robot based on digital-twin [J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(1): 162.
- [35] LIU Z, LIU Z, SUN J, *et al.* Intelligent construction methods and model experiments based on digital twins [J]. *Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal of Building Structures*, 2021, 42(6): 26.
- [36] LIU Z, XING Z, HUANG C, *et al.* Digital twin modeling method for construction process of assembled building [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(7): 213.
- [37] HU W, FANG J, LIU F, *et al.* Real-time state mirror-mapping for driving and bolting integration equipment based on digital twin [J]. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 2022, 49(2): 1.
- [38] ZHANG C, LIU Z A, LANG Z, *et al.* Digital twin-based experimental method for construction loads of adjacent works [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(7): 121.
- [39] HU C, YANG Q, XING J. Subsidence prediction of underground structures driven by digital twin self-evolution [J]. *Journal of Army Engineering University of PLA*, 2022, 1(5): 66.
- [40] SACKS R, BRILAKIS I, PIKAS E, *et al.* Construction with digital twin information systems [J]. *Data-Centric Engineering*, 2020, 6: 1040.
- [41] GürDür BROO D, BRAVO-HARO M, SCHOOLING J. Design and implementation of a smart infrastructure digital twin [J]. *Automation in Construction*, 2022, 136:104171.
- [42] BOJE C, GUERRIERO A, KUBICKI S, *et al.* Towards a semantic construction digital twin: Directions for future research [J]. *Automation in Construction*, 2020, 114: 103179.
- [43] AGRAWAL A, FISCHER M, SINGH V. Digital twin: From concept to practice [J]. *Journal of Management in Engineering*, 2022, 38(3): 6022001.