

ICS XXX

CCS P XX

DB 14

山西省地方标准

DB 14/T XXXX—XXXX

公路桥梁健康监测数字孪生技术
应用指南

(征求意见稿)

2025-XX-XX 发布

2025-XX-XX 实施

山西省市场监督管理局 发布

目 次

前 言	1
1 范围	2
2 规范性引用文件	2
3 术语和定义	2
4 一般规定	4
4.1 总体架构	4
4.2 总体要求	4
5 数据采集	4
5.1 桥梁结构监测数据	4
5.2 桥梁交通监测数据	5
5.3 养护管理数据	5
6 数据传输与存储	5
6.1 数据传输	6
6.2 数据存储	6
7 数字模型	6
7.1 时空底座	6
7.2 结构模型	6
7.3 交通模型	7
8 功能应用	7
8.1 应用方向	8
8.2 应用场景	8

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由山西省交通运输厅提出并监督实施。

本文件由山西省交通运输标准化技术委员会（SXS/TC37）归口。

本文件起草单位：山西省智慧交通研究院有限公司、山西省智慧交通实验室有限公司、山西交通科学研究院集团有限公司、山西省交通建设工程质量检测中心（有限公司）。

本文件主要起草人：郭学兵、高浩、付玉强、赵晓晋、吴佳佳、姚广、郝艳军、王祯国、孙立周、杨洋、张军、赵文溥、杨睿之。

公路桥梁健康监测数字孪生技术应用指南

1 范围

本文件规定了公路桥梁健康监测数字孪生技术的规范性引用文件、术语和定义、一般规定、数据采集、数据传输与存储、数字模型及功能应用等。

本文件适用于指导数字孪生技术在公路桥梁运营阶段的健康监测业务中的应用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 19711	导航地理数据模型与交换格式
GB 20263	导航电子地图安全处理技术基本要求
GB/T 21296.1	动态公路车辆自动衡器 第1部分:通用技术规范
GB/T 28789	视频交通事件检测器
GB/T 33703	自动气象站观测规范
GB/T 24726-2021	交通信息采集视频交通流检测器
GB/T 25068.3-2020	信息技术 安全技术 网络安全 第3部分:面向网络接入场景的威胁、设计技术和控制
GB/T 42517.1	智能运输系统 智能驾驶电子道路图数据模型与表达 第1部分:封闭道路
GB/T 42517.2	智能运输系统 智能驾驶电子道路图数据模型与表达 第2部分:开放道路
JT/T 1037	公路桥梁结构监测技术规范
JTG 5120	公路桥涵养护规范
YD/T 4770	车路协同 路侧感知系统技术要求及测试方法
IEEE 1451.5	IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators—Wireless Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats

3 术语和定义

3.1

健康监测数字孪生技术

桥梁健康监测数字孪生技术是一种采用三维建模、物联网、大数据分析等技术，构建桥梁数字孪生模型，实现数字模型与实际桥梁同步演化，对桥梁全生命周期健康状况进行监测、评估和预测的技术。

3.2

桥梁数字孪生模型

基于桥梁结构虚实之间双向映射、动态交互与实时连接，利用几何数据和非几何数据创建的反映桥梁运营状态的数字虚拟信息模型。桥梁数字孪生包括两种形式：桥梁结构数字孪生和桥梁交通数字孪生，桥梁数字孪生可以是以上两种形式中的某一种或两种的组合。

3.3

结构数字孪生模型

通过数字化技术对桥梁结构进行建模，构建与实际桥梁在几何形状、尺寸及物理特性上高度一致的数字虚拟信息模型，并集成传感器采集到的应力、应变、振动、位移等监测数据，实现桥梁结构健康状况的动态监测与评估。

3.4

交通数字孪生模型

整合交通流量监测数据、车辆行驶轨迹、速度与密度等动态信息，在虚拟环境中构建与实际桥梁交通状况同步的数字虚拟信息模型。该模型可实时呈现桥梁上交通流状态，包括拥堵情况、车速分布、车辆分布、交通流量变化等，并支持不同交通管控策略及突发事件下的交通演变仿真分析，为桥梁交通管理与决策提供支撑。

3.5

数字孪生系统

融合公路桥梁养护管理数据、结构监测数据与交通监测数据，构建桥梁数字孪生模型，新建或升级既有监测系统，实现桥梁状态感知、可视化监测与智能化运维管理。

3.6

时空底座

为数字孪生系统提供统一、精确的时间和空间标准，是数字孪生系统建设和运行的基础支撑。

3.7

时间基准

时间维度上的基本参照依据和度量的起算数据。

3.8

空间基准

桥梁几何数据的统一体现，描述桥梁空间位置标准，包括经纬度坐标、平面直角坐标、高程等。

3.9

数字孪生模型几何数据

桥梁数字孪生模型几何数据是桥梁数字虚拟信息模型结构形态和空间位置数据的集合。

3.10

数字孪生模型非几何数据

桥梁数字孪生模型非几何数据是指除几何数据之外所有数据的集合，包括但不限于传感器数据、运行数据等。

3.11

瓦片服务

一种将地图或模型数据切割为标准化小块并按需分发的技术，用于实现高效的空間数据可视化与实时加载，支持多层次细节展示。

3.12

动态矢量服务

一种基于实时数据驱动的空间数据分发技术，能够按需传输和渲染桥梁结构、传感器数据等矢量要素，支持属性动态更新、空间查询与交互分析，满足数字孪生系统中对时效性、可交互性的需求。

3.13

授时技术

通过高精度时间同步手段为桥梁健康监测系统提供统一时间基准的技术，确保传感器数据、视频监控和结构响应分析的时序一致性。

3.14

CAE 技术

通过数值仿真与计算分析方法对桥梁结构进行力学性能模拟、损伤评估及寿命预测的技术。

4 一般规定

4.1 总体架构

公路桥梁健康监测数字孪生技术架构由数据采集、数据传输与存储、数字模型及功能应用组成。

4.2 总体要求

4.2.1 功能要求

公路桥梁健康监测数字孪生技术应包含以下功能：

- a) 展示：利用三维建模、渲染和动画技术，直观呈现桥梁的运行状态；
- b) 预警报警：实时监测并预警、报警桥梁结构异常情况及交通运行异常情况；
- c) 分析评估：分析、评估桥梁结构健康状况和交通运行状况；
- d) 数据统计：统计、查询与回溯桥梁监测数据和运维管理数据；

4.2.2 技术要求

公路桥梁健康监测数字孪生技术应满足以下要求：

- a) 模型加载：二维瓦片服务加载及响应时间不超过2秒；二维动态矢量服务初始加载时间不超过10秒，后续响应时间不超过3秒；三维瓦片服务初始加载时间不应超过5秒，后续响应时间不超过5秒；三维动态矢量服务初始加载时间不超过10秒，后续响应时间不超过5秒；且应符合GB/T 19711、GB 20263、GB/T 42517.1和GB/T 42517.2中的相关要求；
- b) 数据分析：简单统计分析查询响应时间不超过5秒；千万级数据量下单项统计的响应时间不超过10秒；大数据统计分析报表的响应时间不超过50秒。

5 数据采集

5.1 桥梁结构监测数据

5.1.1 数据内容

桥梁结构监测数据宜包含如下内容：

- a) 环境参数：环境温度、环境湿度、主梁内温度、主梁内湿度、桥面结冰状态、吊杆结冰状态等；
- b) 作用监测参数：车重、轴重、轴数、车距、车流量、车辆空间分布，风速、风向、桥梁构件温度、地震加速度等；
- c) 结构响应参数：位移、应变、应力、索力、支座反力、转角、振动加速度等；
- d) 结构变化参数：基础冲刷深度、裂缝宽度、裂缝长度、混凝土中氯离子浓度、吊杆断丝、螺栓状态等。

5.1.2 数据来源

桥梁结构监测数据来源于桥梁结构监测传感器，应从如下传感器中选取：

- a) 环境监测传感器：温湿度传感器、结冰检测传感器等；
- b) 作用监测传感器：动态公路车辆自动衡器、风速传感器、风向传感器、风压传感器、结构温度传感器、加速度传感器等；
- c) 结构响应监测传感器：位移传感器、转角传感器、应变传感器、索力传感器、振动传感器等；
- d) 结构变化监测传感器：基础冲刷监测传感器、结构裂缝监测传感器、离子浓度监测传感器等。

5.1.3 技术要求

桥梁结构监测数据及传感器应符合如下技术要求：

- a) 桥梁结构监测数据采集频率、数据精度及传感器布设符合JT/T 1037的相关技术要求；
- b) 动态公路车辆自动衡器的整车总质量和轴荷载准确度不低于GB/T 21296.1中5级整车总质量准确度等级和E级轴或轴组荷载准确度等级的要求。

5.2 桥梁交通监测数据

5.2.1 数据内容

桥梁交通监测数据宜包含如下数据内容：

- a) 车辆影像数据：监控视频、监控图片；
- b) 车辆数据：车辆类型、车辆荷载（轴数、轴距、轴重）、车辆速度、车辆外廓（长、宽、高）等；
- c) 环境数据：温度、湿度、能见度等；
- d) 交通流参数：车辆位置、交通流量、交通密度、车道分布、拥堵指数等。

5.2.2 数据来源

桥梁交通监测数据来源于桥梁结构监测传感器，应从如下传感器中选取：

- a) 相机：视频流量检测器、视频监控摄像机、卡口摄像机、测速摄像机、违规抓拍摄像机、多光谱摄像机等；
- b) 超限检测设备：动态公路车辆自动衡器、激光雷达等；
- c) 环境监测设备：温湿度传感器、能见度检测器等；
- d) 车辆跟踪设备：激光雷达、跟踪相机、微波雷达等。

5.2.3 技术要求

桥梁交通监测数据及传感器应符合如下技术要求：

- a) 桥梁路侧感知设备和数据符合GB/T 28789、YD/T 4770、GB/T 33703、GB/T 24726-2021的相关技术要求；
- b) 动态公路车辆自动衡器符合5.1.3.b要求；
- c) 车辆外廓尺寸的示值误差满足如下要求：车辆长度示值误差 $\leq 300\text{mm}$ ，车辆宽度示值误差 $\leq 80\text{mm}$ ，车辆高度示值误差 $\leq 50\text{mm}$ 。

5.3 养护管理数据

5.3.1 数据来源

养护管理数据来源宜包含人工填报、自动化检测和历史数据导入等。

5.3.2 数据内容

养护管理数据宜包含如下内容：

- a) 设备维修记录：故障部位、故障原因、故障时间、维修措施、维修时间、维修人员等；
- b) 桥梁基础数据：桥梁结构参数、桥梁运营数据等；
- c) 桥梁检查数据：日常巡查数据、经常检查数据、定期检查数据、特殊检查数据等。

5.3.3 技术要求

桥梁日常巡查数据、经常检查数据、定期检查数据、特殊检查数据应符合JTG 5120的相关技术要求。

6 数据传输与存储

6.1 数据传输

系统数据传输符合如下要求：

- a) 宜采用MQTT、HTTPS、CoAP等传输协议实现现场设备与系统间数据传输；
- b) 数据传输丢包率应小于 3%，且不宜出现连续 2 个数据包丢失的情况，并采用数据缓存与重传机制；
- c) 敏感数据传输应符合 GB/T 25068.3-2020 的相关要求；
- d) 光纤通信传输整体时延应小于1s，移动通信传输整体时延应小于3s，针对时延敏感数据，宜配置冗余通信链路；
- e) 数据传输应具备良好的兼容性，能够对接其他网络协议与系统，并支持扩展接口；
- f) 数据传输应具备故障切换能力，当部分链路或节点出现故障时，能切换至备用协议通道，确保数据传输不中断。

6.2 数据存储

系统数据存储应符合如下要求：

- a) 结构化数据：桥梁环境、作用、结构响应、结构变化、车辆数据、交通流参数及特殊事件等监测元数据采用JSON或XML格式存储；
- b) 非结构化数据：视频监控采用H.264或H.265编码格式，图像采用JEPG、PNG、BASE64编码格式；
- c) 模型数据：数字模型格式支持主流工程仿真软件。

7 数字模型

7.1 时空底座

7.1.1 底座搭建

通过GNSS的定位和授时技术，构建与实际桥梁空间参考系和时间参考系一致的桥梁时空底座，为桥梁数字孪生的业务应用提供统一的时空数据基础。

7.1.2 技术要求

时空底座应符合如下要求：

- a) 虚拟模型与现实桥梁地理坐标误差 $<5\text{cm}$ ；
- b) 全桥梁数据时间同步误差 $<1\text{ms}$ 。

7.2 结构模型

7.2.1 模型构建

对桥梁实体进行点云数据采集或图纸信息采集，结合多视角摄影测量，形成带有精准空间坐标的数字虚拟信息模型。

7.2.2 模型要求

结构模型符合如下要求：

- a) 结构模型应精确表达桥梁构件的完整几何形状和尺寸，与实际桥梁外轮廓尺寸误差 $<0.2\text{m}$ ；
- b) 结构模型精细程度应达到构件级，构件应具备精确的几何尺寸、位置、数量及方向信息，构件ID应与监测点ID对应；
- c) 结构模型在满足精细程度的前提下，宜进行轻量化压缩处理，模型文件宜小于50MB。

7.2.3 模型与数据融合

结构模型与相关数据融合符合如下要求：

- a) 结构模型应标注桥梁结构传感器及桥梁交通监测传感器安装位置，且与实际安装位置误差小于0.1m；
- b) 结构模型应关联桥梁定期检查数据，病害数据标注位置精度不应低于桥梁构件级，且病害数据更新频率不应低于JTG 5120的要求；
- c) 结构模型应以形变或云图形式展示桥梁结构监测数据，具有监测点的构件显示监测数据，不具有监测点的构件采用样条曲线/曲面插值显示相关结构响应数据；
- d) 结构模型插值数据应标注置信区间，与监测点数据的同步时间误差应小于2s，且符合IEEE 1451的相关要求；
- e) 结构模型宜支持桥梁结构监测数据反向追溯，可动态回放任意时段结构状态演变过程；
- f) 结构模型宜开放API接口，支持有限元仿真软件调用模型几何拓扑关系、桥梁结构监测数据及交通监测数据等，计算全桥结构响应数据，分析结果通过API接口推送至结构模型；

7.3 交通模型

7.3.1 模型构建

利用交通感知设备对交通参与者的感知、测距、跟踪能力，构建车辆的三维模型（尺寸、重心等）和运动模型（速度、加速度）。通过跟踪算法处理数据，将车辆重量、位置、速度等信息转化为可分析的参数，将交通行为转化为可量化、可分析的交通模型（包括车辆轮廓、位置、速度、荷载等），将交通模型融入结构模型。

7.3.2 模型要求

交通模型宜符合如下要求：

- a) 交通模型感知内容应包括定位、速度、航向角等通行交通参与者运动特征；
- b) 感知时延 $\leq 200\text{ms}$ ，消息输出频率 $\geq 5\text{Hz}$ ；
- c) 识别的交通参与者类别应包括车辆（轿车、客车、货车、挂车等）、骑行者（自行车、助行车、摩托车的骑行者等）、行人、障碍物（锥桶、三角警示牌、动物、纸箱、轮胎等）；
- d) 交通参与者定位误差 $\leq 1\text{m}$ ，速度误差 $\leq 2.5\text{km/h}$ ，航向角检测误差 $\leq 5^\circ$ ；
- e) 交通模型能识别停止、逆行、拥堵、低速/超速、交通事故、道路施工等不同交通事件，检出率 $\geq 96\%$ ；
- f) 车辆全域跟踪成功率 $\geq 95\%$ ；

注：车辆全域跟踪成功率是指在特定的交通场景和监测范围内，车辆跟踪系统能够成功对车辆进行持续、准确跟踪的比率。

7.3.3 模型与数据融合

交通模型与相关数据融合符合如下要求：

- a) 车辆模型应集成车辆的外廓尺寸、轴距等关键信息并在交通模型中等比例仿真展示，具备将车辆位置、重量、轴重等数据集成在车辆模型并转化为对桥梁实际荷载分布的能力；
- b) 交通模型应复现车型分布、车速分布、到达间隔等实测数据特征；
- c) 交通模型宜开放API接口，支持交通仿真软件调用模型几何拓扑关系和交通监测数据，分析预测全桥交通运行数据，分析结果通过API接口推送至交通模型；
- d) 离线交通仿真宜满足大规模交通流并行计算，在线交通仿真宜满足基于实时交通流数据，实现分钟级交通运行分析。

8 功能应用

8.1 应用方向

8.1.1 运行监测

运行监测宜包含以下内容：

- a) 交通监测：基于交通监测数据，在数字模型中展示桥梁交通实时及历史运行状态，包括车辆类型、车辆位置、车牌号等；
- b) 结构监测：基于结构监测数据，融合CAE技术，在数字模型中展示桥梁结构实时及历史运行状态，包括结构作用、结构响应、结构变化等；
- c) 环境监测：基于环境监测数据，在数字模型中展示桥梁环境实时及历史状况，包括恶劣气候、极端天气等；
- d) 设备监测：基于设备数据传输情况，在数字模型中展示监测设备运行状态，包括传感器在线、传感器离线、传感器故障等；

8.1.2 运行仿真

运行仿真宜包含以下内容：

- a) 交通仿真：基于数字模型，模拟桥梁突发事故时不同应急管控方案下交通参与者与桥梁结构的行为及相互作用，为应急决策提供数据；
- b) 结构仿真：基于数字模型，模拟桥梁在长期运营下结构响应、结构变化情况，为桥梁养护提供数据；
- c) 融合仿真：基于数字模型，实现监测数据与运行仿真结果的交互验证。

8.1.3 安全管控

安全管控宜包含以下内容：

- a) 报警提示：基于交通监测数据、结构监测数据及相应报警触发条件，在数字模型中展示不同监测类别报警位置、报警级别等；
- b) 安全管控：数字模型支持与情报板、车道提示器、声光报警装置、阻隔装置等信息发布设施联动控制，向交通参与者发布控制指令。

8.1.4 数字运维

数字运维宜包含以下内容：

- a) 资产数字化：基于桥梁各类构件及设备数据信息，在数字模型中展示各类构件及设备的位置、名称、数量等基础信息；
- b) 综合分析：融合桥梁结构基础数据、养护检查数据、结构监测数据及交通监测数据，构建桥梁健康评估综合模型，在数字模型中展示桥梁综合健康状况。

8.2 应用场景

8.2.1 桥梁结构监测数字孪生

构建与实际桥梁在几何形状、尺寸及物理特性上高度一致的数字模型，集成传感器采集到的结构监测数据，并融合桥梁养护检查数据，实现桥梁结构运行状况的可视化监测与评估。

8.2.2 桥梁交通监测数字孪生

构建与实际桥梁在几何形状、尺寸特性上高度一致的数字模型，集成传感器采集到的交通监测数据，实现桥梁交通运行状况的可视化监测与评估。