

ICS 93.060

CCS P 66

DB 14

山 西 省 地 方 标 准

DB14/T 3496—2025

公路桥梁健康监测数字孪生技术 应用指南

2025 - 07 - 10 发布

2025 - 10 - 10 实施

山西省市场监督管理局 发 布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 一般规定 2

5 数据采集 2

 5.1 桥梁基础数据 2

 5.2 桥梁结构监测数据 2

 5.3 桥梁交通监测数据 3

6 数据传输与存储 3

 6.1 数据传输 3

 6.2 数据存储 3

7 数字模型 3

 7.1 时空基准 3

 7.2 结构模型 4

 7.3 交通模型 4

8 应用方向 5

 8.1 运行监测 5

 8.2 运行仿真 5

 8.3 安全管控 5

 8.4 数字运维 5

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山西省交通运输厅提出、组织实施和监督检查。

山西省市场监督管理局对本文件的组织实施情况进行监督检查。

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

本文件提出了公路桥梁健康监测数字孪生技术的一般规定、数据采集、数据传输与存储、数字模型及应用方向等。

本文件适用于公路桥梁运营阶段健康监测中数字孪生技术应用。

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 21296.1 动态公路车辆自动衡器 第1部分：通用技术规范

GB/T 24726 交通信息采集视频交通流检测器

GB/T 25068.3 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 43441.1 信息技术 数字孪生 第1部分：通用要求

JTG 5120 公路桥涵养护规范

JTG/T H21 公路桥梁技术状况评定标准

JT/T 1037 公路桥梁结构监测技术规范

YD/T 4770 车路协同 路侧感知系统技术要求及测试方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

桥梁健康监测

一种可以对桥梁结构和交通进行连续、自动测量和记录，获取桥梁环境、交通、车辆、作用、结构响应与结构变化定量数据，实现监测数据超限报警，评估桥梁健康状况的多学科交叉融合技术。

3.2

数字孪生

具有保证物理状态和虚拟状态之间以适当速率和精度同步数据连接的目标实体的数字化表达。

3.3

数字模型

对目标实体及其关联关系映射构建目标实体内外部特征与行为规律的模型。

3.4

时空基准

数字模型和目标实体一致的时间和空间参照系。

3.5

瓦片服务

一种将地图或模型数据切割为标准化小块并支持多层级展示的技术。

3.6

动态矢量服务

一种按需实时返回矢量数据并支持属性动态更新、空间查询与交互分析的技术。

4 一般规定

公路桥梁健康监测数字孪生技术包含数据采集、数据传输与存储及数字模型构建,应用于运行监测、运行仿真、安全管控、数字运维等方向,可实现桥梁结构及交通运行状态的展示、预警报警、分析评估等。

5 数据采集

5.1 桥梁基础数据

5.1.1 数据宜包含如下内容:

- a) 基本状况:行政识别数据、桥梁技术指标、桥梁结构信息、桥梁档案资料等;
- b) 养护数据:日常养护数据、预防养护数据、修复养护数据、专项养护数据、应急养护数据、桥梁加固数据、桥梁改建数据等;
- c) 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;
- d) 设备数据:传感器信息、摄像头信息、情报板信息、车道提示器信息、声光报警装置信息、阻隔装置信息等。

5.1.2 数据来源宜包含人工填报、自动化检测和历史数据导入等。

5.1.3 基本状况、养护数据及检查数据应符合 JTG 5120 的相关技术要求。

5.2 桥梁结构监测数据

5.2.1 数据宜包含如下内容:

- a) 环境:环境温度(场)、环境湿度、主梁内温度、主梁内湿度、结冰状态、桥面径流等;
- b) 作用: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: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:基础冲刷深度、裂缝宽度、裂缝长度、混凝土中氯离子浓度、断丝、螺栓状态等。

5.2.2 数据宜来源于如下传感器:

- a) 环境数据:温湿度传感器、结冰检测传感器、桥面径流检测传感器等;
- b) 作用数据: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) 结构响应数据: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) 结构变化数据: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。

5.2.3 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。

5.3 桥梁交通监测数据

5.3.1 数据宜包含如下内容：

- a) 影像：车辆监控视频、车辆监控图片等；
- b) 车辆：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：温度、湿度、能见度、桥面结冰状态、风速、风向等；
- d) 交通流：车辆位置、交通流量、车道分布等。

5.3.2 数据宜来源于如下设备：

- a) 影像数据：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) 车辆数据：动态公路车辆自动衡器、激光雷达等；
- c) 环境数据：温湿度传感器、能见度检测器、结冰检测传感器、风速传感器、风向传感器、风压传感器等；
- d) 交通流数据：激光雷达、跟踪相机、微波雷达等。

5.3.3 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 24726、YD/T 4770 的相关技术要求；
- b) 动态公路车辆自动衡器符合 5.2.3.b 要求；
- c) 车辆外廓尺寸的示值误差满足如下要求：车辆长度示值误差不大于 300 mm，车辆宽度示值误差不大于 80 mm，车辆高度示值误差不大于 50 mm。

6 数据传输与存储

6.1 数据传输

6.1.1 数据传输宜采用 MQTT、HTTPS 等传输协议实现现场设备与系统间数据传输，数据传输应具备良好的稳定性。

6.1.2 数据传输应符合 GB/T 25068.3 的相关要求。

6.1.3 针对涉及结构安全的重要数据，宜配置备用通信链路。

6.1.4 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。

6.2 数据存储

6.2.1 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结构化数据宜采用 JSON 或 XML 格式存储。

6.2.2 视频监控宜采用 H.264 或 H.265 编码格式，图像宜采用 JPEG、PNG、BASE64 编码格式。

6.2.3 数字模型格式宜支持主流工程仿真软件。

7 数字模型

7.1 时空基准

7.1.1 桥梁健康监测数字孪生宜采用北斗卫星导航系统的定位和授时技术，建立数字模型与目标实体统一的时空基准。

7.1.2 时空基准应符合如下技术要求：

- a) 数字模型与目标实体地理坐标误差小于 5 cm；
- b) 动态监测变量的数据采集时钟同步误差小于 0.1 ms；
- c) 静态监测变量的数据采集时钟同步误差小于 1 ms。

7.2 结构模型

7.2.1 结构模型应依据目标实体的三维数据构建，数据宜采用摄影测量、点云数据采集、图纸信息采集及人工现场采集等方式获取。

7.2.2 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小于 0.05 m；
- b) 结构模型构件细度宜达到构件级，参照 GB/T 43441.1 及 JTG/T H21，且构件 ID 应与监测点 ID 对应；
- c) 结构模型宜进行轻量化压缩处理，模型文件宜小于 50 MB；
- d) 二维瓦片服务加载及响应时间不宜超过 2 秒；二维动态矢量服务初始加载时间不宜超过 10 秒，后续响应时间不宜超过 3 秒；三维瓦片服务初始加载时间不宜超过 5 秒，后续响应时间不宜超过 5 秒；三维动态矢量服务初始加载时间不宜超过 10 秒，后续响应时间不宜超过 5 秒。

7.2.3 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 0.1 m；
- 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) 结构模型宜以形变等形式展示桥梁结构状态，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。

7.3 交通模型

7.3.1 交通模型应依据交通参与者的类别、轮廓、运动特征等数据构建，数据宜采用交通感知设备采集。

7.3.2 交通模型符合如下要求：

- a) 交通模型感知内容应包括定位、速度、航向角等交通参与者运动特征；
- b) 感知时延应不大于 200 ms，消息输出频率应不小于 5 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、助力车、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宜不大于 1 m，速度误差宜不大于 2.5 km/h，航向角检测误差宜不大于 5 °；
- 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，检出率宜不小于 96 %；
- f) 车辆全域跟踪成功率应不小于 90 %。

7.3.3 交通模型与相关数据融合符合如下要求：

- a) 车辆模型宜集成车辆的外廓尺寸、轴距等关键信息并在结构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) 交通模型宜复现车型分布、车速分布、到达间隔等实测数据特征；

- c) 交通模型宜融入结构模型，将车辆重量、车辆轮廓、位置、速度等信息转化为可分析、可量化的参数。

8 应用方向

8.1 运行监测

- 8.1.1 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，宜包括车辆类型、车辆位置、车牌号等。
- 8.1.2 基于结构监测数据，在数字模型中展示桥梁结构实时及历史运行状态，宜包括结构作用、结构响应、结构变化等。
- 8.1.3 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，宜包括恶劣气候、极端天气等。
- 8.1.4 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，宜包括传感器在线、传感器离线、传感器故障等。

8.2 运行仿真

- 8.2.1 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。
- 8.2.2 模拟桥梁突发事件时不同管控方案下交通运行情况，为应急决策提供数据。
- 8.2.3 实现监测数据与运行仿真结果的交互验证。

8.3 安全管控

- 8.3.1 综合交通监测数据、结构监测数据及报警条件，在数字模型中展示不同监测类别报警位置、报警级别等。
- 8.3.2 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，向交通参与者发布信息。

8.4 数字运维

- 8.4.1 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。
 - 8.4.2 融合桥梁基础数据、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。
-