

T/CASME

团 体 标 准

T/CASME XXX—2024

连续刚构桥梁健康自动化监测技术规范

Technical specification for health automation monitoring of continuous
rigid frame bridge

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

2024 – XX – XX 发布

2024 – XX – XX 实施

中国中小商业企业协会 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 总体要求 1

5 监测内容 2

6 监测点布设 3

7 监测方法 4

8 监测系统 9

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。

本文件由广西北投公路建设投资集团有限公司提出。

本文件由中国中小商业企业协会归口。

本文件起草单位：广西北投公路建设投资集团有限公司……

本文件主要起草人：……

连续刚构桥梁健康自动化监测技术规范

1 范围

本文件规定了连续刚构桥梁（以下简称桥梁）健康自动化监测的总体要求、监测内容、监测点布设、监测方法、监测系统。

本文件适用于连续刚构桥梁结构检测的系统设计、实施、验收、运营维护、数据管理和监测应用。

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 33697 公路交通气象监测设施技术要求
- GB/T 38894 无损检测 电化学检测 总则
- GB 50982—2014 建筑与桥梁结构监测技术规范
- JT/T 1037—2022 公路桥梁结构监测技术规范
- JTG 5120—2021 公路桥涵养护规范

3 术语和定义

JT/T 1037—2022界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

连续刚构桥梁 continuous rigid frame bridge

为道路跨越天然或人工障碍物而修建，以由三个或三个以上支座支承的梁作为上部结构主要承重构件，梁与墩台为刚性联结，常用跨径为100 m～300 m的建筑物。

3.2

桥梁健康自动化监测 health automation monitoring of bridge

应用北斗卫星导航、5G移动通信、人工智能、BIM技术、大数据分析、信息系统安全等技术，对桥梁结构整体行为和实时环境响应的监测，实现对桥梁服役情况、可靠性、耐久性和承载能力的评估，为桥梁养护与管理决策提供依据和指导。

注：BIM为建筑信息模型（Building Information Modeling）。

4 总体要求

4.1 桥梁健康自动化监测技术自主可控、先进适用。

4.2 桥梁健康自动化监测宜采用北斗卫星导航、5G移动通信、人工智能与大数据等新技术和新设备。

4.3 监测系统稳定可靠、经济实用、安全网联，便于维护和升级扩容。监测系统与外部系统互联互通、数据共享，实时展示监测结果。

- 4.4 应根据桥梁的受力状态、风险评估、耐久性分析结果和监测应用需求确定结构的监测内容、布设监测测点、选择监测方法、构建监测系统、进行数据管理、开展监测应用。
- 4.5 桥梁健康自动化监测应分为系统设计、系统实施、系统试运行、系统验收、系统运维和监测数据应用阶段。
- 4.6 监测系统应由系统硬件、系统软件和配套工程组成。
- 4.7 桥梁健康自动化监测应贯穿桥梁结构运营期，在正常维护和更换条件下，监测系统硬件、系统软件的更换与升级应保障监测数据的衔接与分析的连续性。预埋在结构内部的传感器的使用寿命应不低于20年；附着安装在结构上的非埋入式传感器的使用寿命应不低于5年。
- 4.8 桥梁健康监测系统的一般规定、设计、实施、试运行及验收、运维和安全应符合 JT/T 1037—2022 中 9.1、9.2、9.3、9.4、9.5、9.6 的规定。
- 4.9 数据管理应符合 JT/T 1037—2022 中第 10 章的规定。
- 4.10 监测应用应符合 JT/T 1037—2022 中第 11 章、JTG 5120—2021 中 3.7 的规定。

5 监测内容

- 5.1 应根据桥梁结构、部件、构件的技术状况、运行环境、受力状态分析、耐久性分析、既有病害、监测应用目标确定监测内容。
- 5.2 监测内容应符合 JTG 5120—2021 规定的桥梁永久观测点观测需求和表 1 的规定，可根据特定需求选择监测内容。

表1 监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	温湿度	桥址区环境温湿度	●
		主梁内温湿度 ^a	●
	结冰	桥面结冰	◎
作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、轴数、车速	○
		所有车道车流量	○
		所有车道的车辆空间分布视频图像	◎
	风荷载	桥面风速、风向	◎
	结构温度	混凝土或钢结构构件温度	●
		桥面铺装层温度	○
	船舶撞击	桥墩加速度	○
		视频图像	○
	地震	桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度（抗震设防烈度为VII度及以上）	●
		承台顶或桥墩底部加速度（抗震设防烈度为VII度以下）	○
结构响应	位移	主梁竖向位移	●
		支座位移	○
		梁端纵向位移	○
		墩顶位移	○
	应变	主梁关键截面应变	●
	支座反力	支座反力	○

表 1 监测内容（续）

监测类别		监测内容	监测选项
结构响应	振动	主梁竖向振动加速度	●
		主梁横向振动加速度	○
		主梁纵向振动加速度	○
		桥墩顶部纵向及横向振动加速度	◎
结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度	◎
	桥墩沉降	桥墩竖向位移	○
	裂缝	混凝土结构裂缝	○
		钢结构裂缝	○
	腐蚀	墩身、承台混凝土氯离子浓度	◎
		墩身、承台混凝土侵蚀深度	◎
注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项。			
* 仅适用于封闭箱梁。			

6 监测点布设

6.1 基本要求

- 6.1.1 监测测点布设应能够把握环境、作用、结构响应和结构变化的特征，兼顾代表性、经济性、可更换性，并考虑设备布设条件所受约束性。
- 6.1.2 结构响应和结构变化监测的测点宜布置在受力较大、变形较大、易损、影响主要部件安全耐久和结构整体安全的位置、已有病害和损伤的位置。对性能退化、损伤劣化严重的桥梁构件，应针对性增加监测测点数量。
- 6.1.3 监测测点布设应明确传感器的类型、数量、安装位置和方向，宜可更换。对不可更换的监测测点，宜做冗余布设。对关键部件或关键构件监测内容，可布设校核测点。
- 6.1.4 位移监测测点应与 JTG 5120—2021 规定的桥梁永久观测点位置统筹布设。

6.2 环境监测测点

- 6.2.1 桥址区环境温度和湿度的监测测点宜布设在桥梁跨中位置，可根据桥梁结构类型、联长、跨径、构造增设监测测点。
- 6.2.2 对于桥梁构件封闭空间，温度和湿度监测测点应布设于桥梁结构内、外温度或湿度变化较大和对温度、湿度敏感的部位。
- 6.2.3 降雨量监测测点宜布设在桥梁开阔部位。
- 6.2.4 桥面结冰监测测点宜与车辆荷载视频监测测点同位置。

6.3 作用监测测点

- 6.3.1 车辆荷载监测测点应覆盖所有行车道，宜布设于桥头路面，结合视频监测测点获得所有车道的车辆空间分布。
- 6.3.2 风速风向监测测点应能监测自由场风速和风向，风速风向和风压监测测点布设于主跨 L/2 截面桥面。
- 6.3.3 结构温度监测测点应根据桥梁结构温度场分布特点并结合结构类型、联长、跨径、构件尺寸、

铺装体系、日照情况等因素综合确定。宜在主梁铺装层布设温度监测测点。结构温度监测测点应与振弦式应变计同位置布设。

6.3.4 船舶撞击监测测点宜布设在有船撞风险的水位变动区的桥墩底部或承台顶部，视频监测测点宜在主梁上、下游两侧对称布设。

6.3.5 地震动监测测点宜布设于桥头路面，应不少于一个监测测点。

6.4 结构响应监测测点

6.4.1 结构位移监测测点符合以下规定：

- a) 主梁竖向位移监测测点应在 0#台、1#墩、2#墩、3#台、边跨 $L/2$ 截面、主跨 $L/2$ 截面、 $L/4$ 截面、 $3L/4$ 截面布设；
- b) 支座位移宜在主梁两端桥台两侧布设，每端各 2 个；
- c) 主梁梁端纵向位移测点宜布设在主梁两端，每端各 1 个。

6.4.2 桥墩位移：桥墩的纵向和横向位移测点应在墩顶截面布设。

6.4.3 应变监测测点符合以下规定：

- a) 主梁及桥墩关键截面静态和动态应变监测测点位置和数量应根据结构计算分析和易损性分析，选择受力较大的关键截面、部位布设，预埋于块中及墩表面；
- b) 正交异性钢桥面板动态应变监测测点应选择在重车道或行车道车轮轮迹线对应位置，宜布设在顶板、U 肋和横隔板等疲劳热点；
- c) 受力复杂的构件截面和部位，宜布设三向静态和动态应变监测测点；
- d) 钢混接合段宜布设应变监测测点，可布设在应变较大和应力集中处。

6.4.4 支座反力监测测点宜根据支座类型、构造、安装方式确定，宜选择可能出现横向失稳等倾覆性破坏的独柱桥梁、曲线桥、基础易发生沉降或采用压重设计的桥梁的支座。

6.4.5 结构振动监测测点符合以下规定：

- a) 主梁竖向和横向振动监测测点应根据主梁振动振型确定，宜布设在振型峰值点处，避开振型节点；测点位置应至少包括主梁主跨 $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ 截面、边跨 $L/2$ 截面，每截面箱梁内布置 1 个；
- b) 桥墩纵向和横向振动监测测点应在桥墩顶部布设；
- c) 主拱振动监测测点应根据主拱振型确定，宜布设在振型峰值点处，避开振型节点。

6.5 结构变化监测测点

6.5.1 基础冲刷监测测点布设，宜根据基础冲刷风险分析确定桥墩断面和测点位置，也可根据桥梁冲刷专题研究确定。圆形桥墩宜布设在桥墩上、下游两侧；圆端形桥墩宜布设在桥墩上、下游以及桥墩侧面最大冲刷位置。冲刷较严重情况宜在周边侧面同断面布设。

6.5.2 桥墩沉降监测测点宜布设于墩顶处。

6.5.3 钢结构裂缝监测测点应依据检查（测）、技术状况评定、养护维修结果确定测点位置和数量，宜对裂缝宽度和长度变化跟踪观测。

6.5.4 腐蚀监测测点宜布设在墩台水位变动、浪溅区的混凝土保护层内。测点位置、数量可根据氯离子浓度梯度测试要求确定。

7 监测方法

7.1 基本要求

7.1.1 监测方法包括感知方法和数据采集方法，应与桥梁环境、作用、结构响应、结构变化监测内容

匹配。

7.1.2 传感器与数据采集设备选型应满足监测量程、分辨力、精度、灵敏度、动态频响特性、长期稳定性、环境适应性要求。

7.1.3 监测数据采样频率应满足采样定理，且满足监测数据分析和应用要求。

7.2 环境监测

7.2.1 桥址区环境温度监测宜采用温度传感器，传感器量程宜为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最大允许误差 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，分辨力应不大于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度监测方法应符合 GB 50982—2014 中 4.4 的规定，路面温度传感器应符合 GB/T 33697 的规定。

7.2.2 桥址区环境湿度监测应采用湿度传感器，可选用氯化锂湿度计、电阻电容湿度计和电解湿度计等，量程应为 $0\%\text{RH}\sim 100\%\text{RH}$ （非凝露），最大允许误差 $\pm 2\%\text{RH}$ （ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时），监测方法应符合 GB 50982—2014 中 4.4 的规定。

7.2.3 主梁内温湿度监测宜采用温湿度采集仪，电源（DC） $9\text{ V}\sim 36\text{ V}$ 、RS485 接口，可无线控制。

7.2.4 雨量监测宜采用雨量传感器，可选用电容雨量传感器、红外散射式雨量传感器、单翻斗雨量传感器等，应根据桥址处气候、气象条件选择雨量传感器类型、量程，分辨力不大于 0.1 mm ，最大允许误差 $\pm 4\%\text{F}\cdot\text{S}$ 。

7.2.5 结冰监测可采用超声波测试法、视频监测法，结冰厚度监测最大允许误差宜小于 1 mm ，摄像机应符合 7.3.1 e) 和 GB/T 24726 的规定。

7.3 作用监测

7.3.1 车辆荷载监测宜采用动态称重方法，动态称重设备宜采用符合 GB/T 21296.1 规定的动态公路车辆自动衡器，且符合以下要求：

- a) 压电称重传感器布设尺寸应覆盖车道宽度，最大允许误差为 $\pm 2\text{ km/h}$ ，测速范围为 $20\text{ km/h}\sim 180\text{ km/h}$ ，称重范围不小于 300 kN/轴 ，轴距误差不大于 $\pm 150\text{ mm}$ ；
- b) 具备数据自动采集功能，测量通道不少于 2，测量误差 $\pm 10\%$ ，现场单车荷载数据存储能力宜不少于 90 d，视频数据存储能力宜不少于 30 d；
- c) 线圈传感器分离车辆准确度不低于 95%；
- d) 车辆空间分布宜联合采用动态称重和视频图像监测设备，视频监测范围应覆盖全桥范围内的所有行车道，且具备图像自动抓拍功能；
- e) 视频图像监测宜采用高清视频摄像机，像素不低于 400 万，帧率不低于 25 FPS；动态范围不低于 55 dB，夜视距离不低于 150m，白天识别率不低于 98%，夜间识别率不低于 90%，外壳防护等级不低于 IP65，应支持光学变焦、数字变焦，具备昼/夜自动转换功能、防护罩，具备水平 $0^{\circ}\sim 350^{\circ}$ ，垂直 $15^{\circ}\sim -90^{\circ}$ 旋转功能，且应符合 GB/T 24726 的规定，宜具备正白/暖白光色；
- f) 视频监控专用硬盘应不小于 2 TB。

7.3.2 风荷载监测宜采用风速风向仪，风向测量范围 $0^{\circ}\sim 359.9^{\circ}$ ，分辨率不大于 0.1° ，误差不大于 $\pm 3^{\circ}$ ；风速测量范围 $0\text{ m/s}\sim 40\text{ m/s}$ ，分辨率不大于 0.01 m/s ，风速 $0\text{ m/s}\sim 5\text{ m/s}$ 范围内时误差不大于 $\pm 0.3\text{ m/s}$ ，在不小于测 5 m/s 时误差不大于测量值的 2%。监测方法应符合 GB 50982—2014 中 4.7 的规定。

7.3.3 地震动监测宜采用力平衡式加速度传感器、强震仪。力平衡式加速度传感器量程宜大于 $\pm 2.0\text{ g}$ ，灵敏度大于等于 2.5 V/g ，分辨力小于等于 $1\times 10^{-5}\text{ g}$ ，动态范围不小于 120 dB。强震仪技术要求应符合 DB/T 10 规定。地震动监测方法应符合 GB 50982—2014 中 4.6 的规定。

7.3.4 船舶撞击桥墩加速度监测宜与地震动监测协同，采用力平衡式加速度传感器、强震仪，技术参

数宜符合 7.3.3 的规定，并辅助视频监控，摄像机应符合 7.3.1 e) 的规定，还宜具备低照度、透雾功能。

7.4 结构响应监测

7.4.1 位移监测应根据被测桥梁结构、构件和附属设施的构造特点、安装环境，选择传感器类型、精度、位置和安装方式，位移监测方法应符合 GB 50982—2014 中 4.3 的规定，并符合以下规定：

- 主梁竖向位移宜采用静力水准仪进行监测，量程不小于 1 000 mm，精度不低于 $\pm 0.25\%FS$ ，分辨力 $\pm 0.01\%FS$ ，外壳防护等级不低于 IP66；静力水准采集仪具备 RS485 接口，可无线控制；
- 支座位移、梁端纵向位移宜选用位移计进行监测，量程不小于 500 mm，精度不低于 $\pm 1\%FS$ ，分辨力： $\pm 0.01\%FS$ ，外壳防护等级不低于 IP66；
- 特殊条件下的结构和构件位移监测，可选用视频图像法或雷达测试法。视频图像法应符合 7.3.1 e) 的规定，并符合 GB/T 24726 的规定；
- 桥墩位移宜选用微电子机械系统倾角传感器，角度量程宜为 $\pm 30^\circ$ ，精度 $0.02\%F \cdot S$ ，分辨力： $0.025\%F \cdot S$ ，外壳防护等级不低于 IP66。

7.4.2 应变监测方法应符合 GB 50982—2014 中 4.2 的规定，并符合以下规定：

- 主梁、主墩关键截面应变（静态）宜采用振弦应变计、三向应变计、智能采集仪（静态）进行监测，量程 $\pm 1000 \mu\epsilon \sim \pm 1500 \mu\epsilon$ ，精度 $0.5\%F \cdot S$ ，分辨力 $0.1\%F \cdot S$ ；
- 主梁关键截面应变（动态）宜采用动态应变计进行监测，量程 $-3\ 000 \mu\epsilon \sim 3\ 000 \mu\epsilon$ ；灵敏度 0.005，精度 $\pm 2\%FS$ （非线性），外壳防护等级不低于 IP66；
- 支座反力监测宜采用直接测力的成品测力支座，误差应小于被测支座位称竖向承载力值的 5%；
- 振动监测宜采用加速度监测方法，宜选择振动传感器、三向加速度传感器，量程宜不小于 $\pm 2g$ ，分辨率不低于 $2 \mu g$ ；动态范围不低于 130 dB，灵敏度 $1V/g \sim 3V/g$ ，频响范围 0.1 Hz～100 Hz，外壳防护等级不低于 IP66；振动监测方法应符合 GB 50982—2014 中 4.5 的规定。

7.5 结构变化监测

7.5.1 基础冲刷监测应根据桥址处水流速度、含沙量等水文参数以及设计允许冲刷深度，综合选定监测设备类型。宜采用声学监测方法监测冲刷深度，采用雷达法监测水流速度，监测传感器应符合以下规定：

- 传感探头类型和数量应根据被测墩身基础类型、尺寸和水流特点确定，传感器探头宜安装在承台底部或桩顶部位置，距离被测墩身处水底面的距离宜大于等于 10 m，冲刷深度分辨力宜小于等于 5 mm；
- 水流速监测仪器的量程应不小于 $\pm 5m/s$ ，最大允许误差应不大于 $\pm 1\%F \cdot S$ ，分辨力应小于等于 0.1 cm/s；
- 应通过试验确定传感探头的指向角度，控制探头与桥的合理距离；
- 应根据监测区域水流速度、压力、含沙量等水文特点，进行声传感探头预埋安装件专项设计，预埋安装件应与桥墩（台）结构长期牢固连接。声探头宜选用可拆卸安装方式，安装连接材料应防水、耐老化、耐侵蚀。

7.5.2 裂缝监测宜采用自动监测，观测或相结合的方式，裂缝监测传感器量程应大于裂缝宽度的 5 倍，测量最大允许误差不大于 0.02 mm，分辨力不大于 0.01 mm。可采用振弦式裂缝传感器、电阻式裂缝传感器、长标距光纤等光纤式裂缝传感器、高清摄像机。监测方法应符合 GB 50982—2014 中 4.3 的规定。摄像机技术参数和指标应符合 7.3.1 e) 的规定，并配置高精度图像自动识别模块。

7.5.3 腐蚀监测宜选用电化学方法，腐蚀监测传感器宜选用沿混凝土保护层深度安装多电极传感器可监测腐蚀电位、腐蚀电流，混凝土温度、腐蚀速率等参数，监测方法应符合 GB 50982—2014 中 4.8 II 的规定。技术参数应符合 GB/T 38894 的规定。

7.6 数据采集方法

7.6.1 根据桥梁感知方法、传感器数量和分布确定数据采集方法，包括数据采集硬件、软件以及数据采集制式，保障获得高精度、高质量数据，并符合以下规定：

- a) 监测测点相距较远且较分散时，宜选用分布式数据采集硬件；
- b) 监测测点相距较近且较集中时，宜选用集中式数据采集硬件；
- c) 数据采集硬件、软件应与传感器技术参数匹配；
- d) 数据采集制式应包括数据采集方式和采样频率。

7.6.2 数据采集硬件应根据传感器输出信号类型、范围、兼容性、精度和分辨力等要求进行设备选型，并符合以下规定：

- a) 数字信号宜选用基于 RS485 的分布式数据采集设备，并兼顾传输距离、传输带宽和速率；
- b) 电荷信号应选用电荷放大器进行信号调理后采集；
- c) 模拟电信号宜选用 4 mA~20 mA 和-5 V~5 V 等标准工业信号，可选用基于 PCI、PXI 等技术的集中式数据采集设备，并进行光电隔离，以增强抗干扰能力；

注1：PCI为定义局部总线的标准（Peripheral Component Interconnect）。

注2：PXI为面向仪器系统的PCI扩展（PCI extensions for Instrumentation）。

- d) 智能采集仪（静态）通道数不少于 8，分辨率不大于 0.2%，采集精度不大于 0.1 Hz，采集范围 0 Hz~400 Hz；
- e) 智能采集仪（动态）采样率为 0 Hz/通道~400 Hz/通道，内部存储不低于 16 GB；
- f) 数据采集模数转换（A/D 转换）应满足传感器分辨力、精度和数据分析要求，静态信号分辨力不小于 16 位，动态信号分辨力不小于 24 位；
- g) 静态模拟信号宜选用多路模拟开关、采样保持器进行多路信号采集；
- h) 动态信号应选用抗混滤波器进行滤波、降噪。

7.6.3 数据采集方式应根据监测内容、数据分析以及系统数据采集需求确定，并符合下列规定：

- a) 温度、湿度、雨量、结冰等环境监测内容，风速、风向、风压等作用监测内容，位移、应变、支座反力、振动等结构响应监测内容，视频图像应采用实时连续采集；
- b) 车辆荷载、船舶撞击、地震动等作用监测内容宜采用触发采集。车辆荷载数据采集应具备在桥梁现场自动采集记录、存储功能，并与高清摄像机配套安装，同步采集；
- c) 基础冲刷、桥墩沉降、裂缝、腐蚀等结构变化监测内容宜定期连续采集或定时采集；
- d) 数据采集方式根据监测应用需求可自 行设定定时采集和触发采集相结合的混合方式。监测内容没有超过阈值时采用定时采样，超过阈值采用触发采集模式；
- e) 新建桥梁通车初期 2 年内、在役桥梁新设监测系统实施完成 2 年内、在役桥梁评估结果发现结构关键构件或附属设施异常时，除使用触发采样模式的监测内容外，其他监测内容宜采用连续采样。

7.6.4 采样频率应根据监测应用分析要求和功能要求自行设定，符合下列规定：

- a) 环境监测内容的采样频率见表 2；

表2 环境监测内容采样频率表

环境监测内容	采样频率
温度	≤1/600 Hz
湿度	1/600 Hz
雨量	1/600 Hz
结冰	在线：25 FPS

b) 作用监测内容的采样频率见表 3；

表3 作用监测内容采样频率表

作用监测内容	采样频率
车辆荷载	称重数据采集仪、压电称重传感器：触发采集 视频：25 FPS
风速风向	超声风速风向仪：10 Hz 机械式风速风向仪：1 Hz
风压	10 Hz
结构温度	1/600 Hz
船舶撞击	触发采集加速度：50 Hz 视频：25 FPS
地震	触发采集加速度：50 Hz

c) 结构响应监测内容的采样频率见表 4；

表4 结构响应监测内容采样频率表

结构响应监测内容	采样频率
位移	动位移：20 Hz 静位移：1 Hz
应变	动应变：10 Hz 静应变：0.1 Hz
支座反力	1 Hz
振动	20 Hz

d) 结构变化监测内容的采样频率见表 5。

表5 结构变化监测内容采样频率表

结构变化监测内容	采样频率
基础冲刷	在线：1 MHz 离线：每年1次~2次
桥墩沉降	在线：1/3 600 Hz 离线：每年1次~2次
裂缝	动态：10 Hz 静态：1/3 600 Hz 图像：每周1次
腐蚀	在线：1/3 600 Hz 离线：每年1次~2次

7.6.5 环境、作用和结构响应监测数据应同步采集，宜采用 GPS/北斗卫星导航/服务器时钟同步技术，同步精度应符合下列规定：

- a) 动态监测变量的数据采集时钟同步误差小于 0.1 ms;
 - b) 静态监测变量的数据采集时钟同步误差小于 1 ms。
- 7.6.6 数据采集应采取抗干扰措施：串模干扰抑制、共模干扰抑制以及防雷接地技术和屏蔽技术。

8 监测系统

8.1 系统设计

8.1.1 设计原则

8.1.1.1 桥梁结构健康监测系统宜融合 BIM 技术、大数据分析、信息系统安全等技术，使系统具有高度的可扩展性、三维可视化、大数据分析能力、加密性等要求，构建桥梁数字孪生系统，实现物理对象在数字世界的全面呈现、精准表达和动态演变。

8.1.1.2 软件设计应满足桥梁结构健康监测系统的业务需求，适应各业务角色的工作特点，易于使用、扩展、管理与维护，并遵循以下原则：

- a) 开放性和标准化：采用的标准、技术、结构、系统组件和用户接口等必须遵从开放性和标准化的要求；
- b) 高可靠性：
 - 1) 应有明确的可靠性指标和可靠性评估方案；
 - 2) 可靠性设计应贯穿于功能设计的各个环节，在满足基本功能的同时，全面考虑影响可靠性的各种因素；
 - 3) 应针对系统故障或失效的表现形式进行设计，最大限度地消除或控制系统在寿命周期内可能出现的故障或失效模式；
 - 4) 应在继承以往成功经验的基础上，积极采用先进的设计原理和可靠性设计技术，但新技术应经过试验，并严格论证其对可靠性的影响。
- c) 高效性：
 - 1) 用户界面应方便高效、友好、灵活，用户应能够快捷地在权限范围内于各子系统之间切换；
 - 2) 系统应为整体化设计；
 - 3) 系统应不依赖于特定硬件环境；
 - 4) 在系统结构一致的前提下可选择实施各模块的应用，各模块可单独实施并使用。
- d) 集成性：数据、网络和应用应统一，形成决策层、调度层、操作层之间相互衔接的标准体系，系统各子模块之间高度整合。

8.1.2 系统架构

8.1.2.1 架构图

桥梁结构健康监测系统架构图见图1。

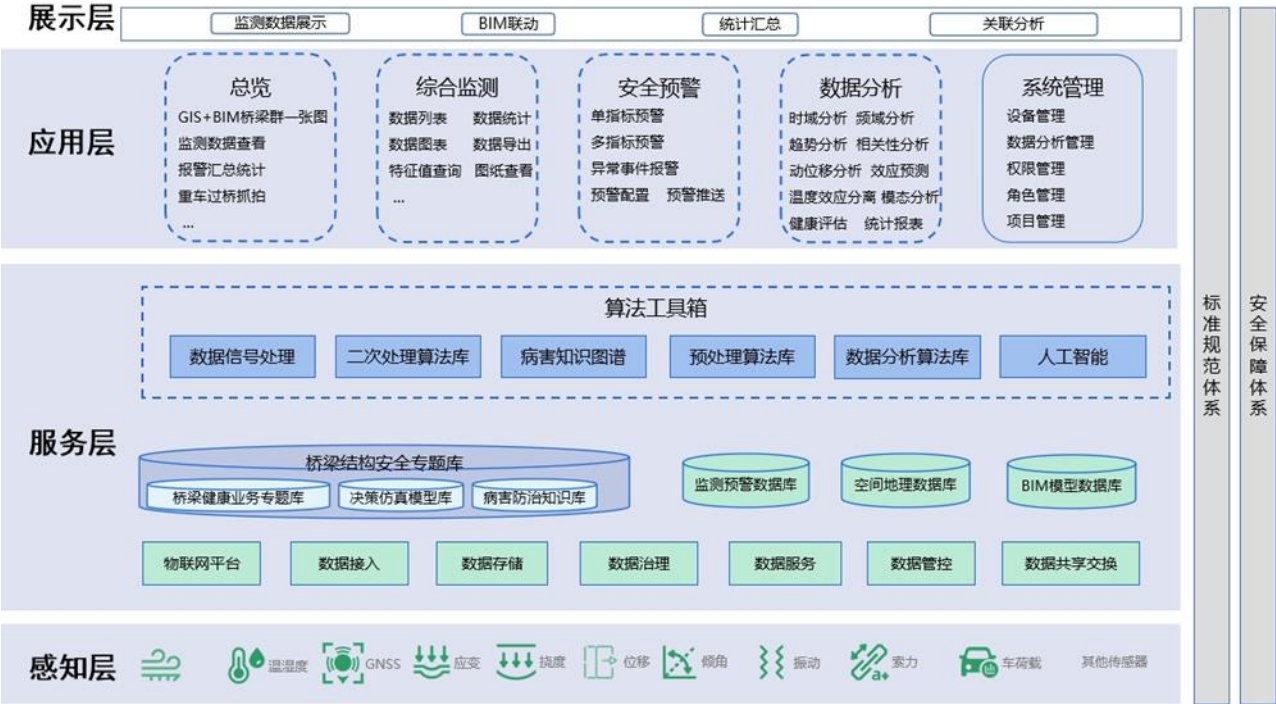


图1 桥梁结构健康监测系统架构图

8.1.2.2 感知层

位于桥梁结构健康监测系统的底层，是获取结构相关参数信息的关键部分，通过各类变形、沉降、应力、应变、温湿度、风力风向等环境监测传感器直接获取结构的即时参数指标信息。

8.1.2.3 服务层

制定统一的数据规范、数据目录规范以及交换规则等，并建立数据共享接口，在满足不同系统间的信息交换、信息共享与业务协同需求的同时，加强信息资源管理，开展数据和应用交换。

8.1.2.4 应用层

对桥梁结构主体进行实时智能监测，包括数据采集、数据清洗、数据传输和数据存储等，经过机器学习、大数据分析等技术实现对八渡三桥的健康状况评估，并实现多种方式的预测预警。

8.1.2.5 展示层

从不同维度展示和关联分析经数据处理后的监测数据，实现数据的互联互通和深度挖掘。根据应用层的数据统计分析结果，用户可以通过虚拟空间和现实场景呼应的数字孪生技术实时了解桥梁结构状态。

8.1.3 系统功能

8.1.3.1 运维总览

展示桥梁BIM模型，显示测点种类、位置及设备状态，预警情况。在BIM模型周围设置提示，支持桥梁基本信息、桥梁安全状态、车流统计等功能。

8.1.3.2 综合监测

具备数据采集和展示的功能，实时解算并进行初步分析，对处理结果进行展示，查询传感器历史数据的最大值、最小值、平均值的统计分析，可自定义时间段查询某传感器的历史数据，通过数据曲线和数据列表形式展示。

8.1.3.3 安全预警

展示当前未处理的预警列表，包括测点信息、预警类型、预警等级、预警数据以及预警处理、阈值设置、预警推送等。

8.1.3.4 预处理

具备异常值去除、数据降噪、基线校正、动静分离等功能。

8.1.3.5 数据分析

应具备以下数据分析功能：

- a) 时域统计：采用动静分离后的数据分析时段内采集数据的最大值、最小值、平均值、有效值、标准差，用于单指标预警；
- b) 准静态时域统计：采用动静分离后车辆自重作用下的准静态数据，分析结构长期趋势；
- c) 频域分析：针对振动监测数据的振动频率分析，通过频谱分析桥梁的振动指标情况，与固有频率对比，分析结构长期趋势；
- d) 温度效应提取：提取动静分离后的温度效应，通过温度对应变、挠度的影响，与设计值对比，分析结构长期趋势；
- e) 趋势分析：通过趋势突变得得到可能危及结构安全的因素，提示对该部位加强监测或进行预警；
- f) 相关性分析：采用时间序列相关性分析方法进行作用与作用效应之间、关联测点之间的相关性，为评估桥梁健康状况提供依据；
- g) 动位移分析：通过加速度积分得到动挠度，反映桥梁整体的刚度、稳定性和承载能力；
- h) 模态分析：通过随机子空间法结合稳定图理论，消除虚假模态和避免模态遗漏，进而提高模态识别精度和效率，分析结构固有频率；
- i) 效应预测：对桥梁监测数据中因温度、收缩、徐变及环境作用等因素引起的结构的变形参数作用进行效应预测；
- j) 健康度评估：结构整体健康度评估和结构构件健康度评估功能；
- k) 统计报表：按照月度、季度、年度生成桥梁健康状态报表功能，支持在线浏览、下载、打印；
- l) 资料管理：桥梁相关资料上传、存储、查看功能；
- m) 巡检养护：桥梁日常巡检记录上传、查看功能；
- n) 系统管理：设备管理、数据分析管理、权限管理、角色管理、项目管理等后台设置功能。

8.2 综合布线设计

8.2.1 布线原则

电源线、通讯信号线、光缆布线应遵循以下原则：

- a) 安全性：线路均套管或桥架，不允许裸线敷设；
- b) 抗干扰性：强电和弱电电路单独穿管走线，不同信号的弱电缆线分离走管，大弯联接；
- c) 易维护性：线缆两端均有明确标识标签；
- d) 经济性：依据通讯线缆的最大传输距离及采集设备数据通道利用的最大化，充分考虑采集设备的布置地点（通讯线缆汇聚点）及线缆路由方式，兼顾信号线缆传输距离最优化及采集设备利用的最大化。

8.2.2 系统供电接入

向桥梁位置引入可满足健康监测系统供电的电源。引入电源时，符合以下规定：

- a) 桥梁有为健康监测系统提供电源的专用供电接口；
- b) 从为健康监测系统预留的配电柜中独立电源分配单元取电；
- c) 线缆应由标签，便于维护；
- d) 按负载情况及供电距离，选择电源线线径，宜采用 $3 \times 2.5 \text{ mm}$ 阻燃软线缆，若长距离传输，应加大主线的线径，如采用 $3 \times 4 \text{ mm}$ 阻燃软线缆。

8.2.3 网络接入

8.2.3.1 前端数据采集局域网络，以光缆为传输介质对外与外网连接。

8.2.3.2 根据桥址附近的通讯条件，从最近的光纤网络接入点，通过立杆架空等方式敷设光缆至桥体，该光纤网络为桥梁结构健康监测系统专用的光纤信号接口。

8.2.3.3 利用光纤跳线（跳线类型包含 FC/LC/SC，以现场光纤接口类型决定），从光纤收发器至为系统预留的光接口进行连接，经过“光-电转换”完成本地局域网络的接入外网。光跳线及光纤接入接口应有明确的标签标识，便于后期调试及维护。

8.2.4 传感器供电布线

8.2.4.1 箱梁内宜采用具有抗干扰屏蔽效果的热镀锌金属桥架作为线缆管槽，各采集断面内采用 JDG 金属管或塑料管敷设管槽，并将管槽与桥架连接。

注：JDG金属管包括套接紧定式镀锌钢导管、电气安装用刚性金属平导管。

8.2.4.2 桥外测点通过箱梁的穿线预留孔，沿构件表面通过敷设管道进行线缆敷设。

8.2.5 数据传输线缆布设

8.2.5.1 光纤传输网络

桥梁设置光纤收发器，将前端有传感设备及采集设备通过交换机组建的局域网络，通过“电转光”模式接入光纤传输网络，采集数据通过光缆，接入云端服务器。

8.2.5.2 超五类网线

外场采集站处设工业级千兆交换机，各测点采集设备通过超五类网线接入交换机，组成本地局域网。超五类网线传输距离不应超过90 m。

8.2.5.3 屏蔽线和同轴线缆传输网络

各采集断面屏蔽线或同轴线缆通过管槽连接至桥架，沿桥架将各采集断面传感设备数据接入外场采集站处的数据采集仪进行数据传输。

8.2.6 防雷电保护和接地

8.2.6.1 设备箱内设电源空气开关或漏电保护器、防雷浪涌保护器。

8.2.6.2 供电和数据传输布线线缆屏蔽层采用两端接地。同轴布线电缆外导体和屏蔽电缆的屏蔽层两端与所连接设备的金属机壳外表面有良好的电气接触。

8.2.6.3 所有箱体内部设备的金属外壳，应利用接地线与箱体接地铜排进行接地连接，接地接铜排与桥梁接地点进行连接。

8.2.6.4 箱体门通过纯铜接地编织带与箱体内部接地铜排进行接地连接。

8.3 采集站设置

8.3.1 数据存储

8.3.1.1 外场数据采集站应具有适当的数据预处理能力和充足的缓冲存储器容量，以保存一定时段的采样数据。当数据传输出现故障时，外场数据采集站不中断采集工作，并将数据备份到外场数据采集站中。采用远程数据存储+现场采集子站备份方式进行数据存储，在传输出现故障时数据不丢失。

8.3.1.2 桥梁结构健康监测系统数据采集主机安装在现场，具备不少于 180 d 的原始数据存储空间，在本地网络中断的前提下，可进行本地存储，并在网络恢复时，数据回传至监控中心。

8.3.2 采集主机与采集单元

外场数据采集站包括数据采集主机和数据采集单元，各采集单元分别采集不同的电压、电流信号、温湿度信号，对应振动、温湿度等多种参量。传感器信号通过信号电缆传输至外场数据采集站进行数据的采集与处理。

8.3.3 采集站安装

采集站安装应基于桥址附近场地条件、环境天气条件，综合考虑采集站设备的通风、通电、防尘、防雨水、防过热和防盗等因素，宜将外场采集站设置在箱梁内。
