

DB63

青 海 省 地 方 标 准

DB63/T 2222—2023

公路长大桥梁结构健康监测系统 建设应用指南

2023-12-27 发布

2024-02-01 实施

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 总则 1

5 监测方案 2

 5.1 概要 2

 5.2 资料收集 2

 5.3 监测项目 2

 5.4 测点布设 3

 5.5 监测设备 5

 5.6 数据采集与传输 6

 5.7 数据存储 7

 5.8 报警处置 7

6 系统建设 7

 6.1 设计 7

 6.2 实施 9

 6.3 试运行 9

 6.4 验收 10

7 维护与应用 10

 7.1 检查维护 10

 7.2 监测报警 10

 7.3 分析报告 11

 7.4 对策建议 11

附录 A（资料性） 硬件设备安装记录表 12

附录 B（资料性） 系统软件测试表 14

附录 C（资料性） 系统软件检查维护记录表 15

附录 D（资料性） 系统硬件检查维护记录表 16

参考文献 18

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。

本文件由青海省交通运输标准化专业技术委员会提出。

本文件由青海省交通运输厅归口。

本文件起草单位：青海省高速公路养护服务有限公司、中交第一公路勘察设计研究院有限公司、青海省交通检测有限公司、青海省交通科学研究院、青海省公路局。

本文件主要起草人：白卿、赵晓帆、薛兆锋、王晓光、吴玉林、马明、孔祥玲、田中伟、奎万超、周世学、苏兆邦、唐虹、曹海波、张宁昌、高林丽、顾华杰、韩吉正、宫成兵、岳振民、刘玉芬、党李涛、刘祖锋、仲小萍、任伟、闫亚鹏、颜亮德。

本文件由青海省交通运输厅监督实施。

公路长大桥梁结构健康监测系统 建设应用指南

1 范围

本文件界定了公路长大桥梁结构健康监测系统建设应用的术语和定义，确立了总则和监测方案，提供了监测系统建设、维护与应用等方面的指导。

本文件适用于公路长大桥梁（主跨跨径大于等于500 m悬索桥、300 m斜拉桥、200 m拱桥、160 m梁桥）结构健康监测系统的建设与应用，其它需要健康监测的桥梁可参照执行。

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 8566 系统与软件工程 软件生存周期过程
- GB/T 8567 计算机软件文档编制规范
- GB/T 9386 计算机软件测试文档编制规范
- GB/T 15532 计算机软件测试规范
- GB 50311 综合布线系统工程设计规范
- GB 50343 建筑物电子信息系统防雷技术规范
- 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
- JTG/T 5122 公路缆索结构体系桥梁养护技术规范

3 术语和定义

JT/T 1037界定的术语和定义适用于本文件。

4 总则

- 4.1 长大桥梁结构健康监测系统的设计和构建遵循“适用、稳定、安全、耐久、经济”原则。
- 4.2 系统建设需充分考虑与部、省监测数据平台互联互通、数据共享的需求。
- 4.3 系统建设宜采用大数据、区块链、云技术、AI 及 InSAR 等先进技术。
- 4.4 对于新建桥梁的健康监测系统，宜与桥梁主体同步设计、同步实施、同步验收、同步运维。
- 4.5 系统硬件设备包括传感器、数据采集及数据传输设备，其稳定性和耐久性宜满足高寒环境的条件，且考虑下列因素：
 - a) 传感器：适用性、兼容性和可扩展性；
 - b) 数据采集设备：具备实时采集、自动存储、自动传输等功能；
 - c) 数据传输设备：保证数据传输的安全性和可靠性，且提供足够的带宽和数据冗余度。
- 4.6 系统网络安全等级保护达到二级及以上。

5 监测方案

5.1 概要

监测方案的编制包括但不限于下列因素：

- a) 桥梁环境、作用、结构响应、结构变化特征；
- b) 桥梁服役期病害规律；
- c) 场地供电条件；
- d) 桥址通讯条件；
- e) 预埋件安装；
- f) 检修通道等。

5.2 资料收集

5.2.1 监测方案编制前，需收集的资料包括但不限于：

- a) 桥梁设计、施工和验收档案资料；
- b) 桥址运营环境条件、交通流状况；
- c) 桥梁病害类型、范围和程度；
- d) 桥梁检查、维修加固等养护资料；
- e) 现场供电及网络状况。

5.2.2 资料收集时需保证资料的真实性、有效性和保密性。

5.3 监测项目

5.3.1 监测内容的确定宜综合考虑桥梁运营环境、受力状态分析、耐久性分析、风险评估结果、部构件技术状况、病害类型与损伤程度、监测应用目标等因素。

5.3.2 综合集成监测系统是为了保证桥梁结构整体安全性，同时监测多个目标或多种项目的长期监测系统，宜按 JT/T 1037 所描述的各类桥型的监测内容设置。

5.3.3 特定目标监测系统是针对某一项或几项特定的结构安全风险专门实施的长期监测系统，其监测内容见表 1。

表1 特定目标监测项目

项次	监测目标	监测类别	监测内容	监测选项
1	寒区环境	结冰	桥面、索结构覆冰	●
		除冰盐	除冰盐	○
		冻蚀	冻蚀	●
2	盐渍土环境	腐蚀	氯离子浓度	●
			钢筋锈蚀	●
			硫酸盐浓度	○
			侵蚀深度	●
3	结构性裂缝	裂缝	裂缝宽度	●
			裂缝长度	○
			氯离子浓度	◎
		腐蚀	侵蚀深度	◎
			温湿度	◎
4	薄壁高墩 温度梯度	结构温度	环境温度、湿度	◎
		应变	混凝土构件温度	●
			桥墩混凝土应变	●
		位移	桥墩顺桥向位移	●
			桥墩横桥向位移	●

表1 特定目标监测项目（续）

项次	监测目标	监测类别	监测内容	监测选项
5	支座损伤	温湿度	环境温度、湿度	●
		位移	支座位移	●
		车辆荷载	所有车道车重、轴重、轴数、车速	○
			所有车道车流量	○
6	基础冲刷	基础冲刷	基础偏位	●
			冲刷深度	●
7	桩基冻拔	位移	基础竖向位移	●
			基础横向位移	●
		振动	墩顶加速度	○
		温度	基础土体温度	●
		含水率	土体含水率	○
8	不均匀沉降	位移	基础位移	●
		振动	墩顶加速度	○
		含水率	土体含水率	○
9	铺装层开裂	结构温度	铺装层温度	●
		紫外线强度	紫外线强度	○
		腐蚀	氯离子浓度	○
			侵蚀深度	○
		裂缝	主梁裂缝	●
		车辆荷载	所有车道车重、轴重、轴数、车速	◎
			所有车道车流量	◎
10	桥面渗水	桥面状况	视频图像	○
11	伸缩缝病害	位移	伸缩缝位移	●
		温湿度	环境温度、湿度	●
12	桥头跳车	路基沉降	桥头路基沉降位移	●
		含水率	台后填土含水率	●
		温度	填土温度	○
13	锥坡开裂、滑移	含水率	土体含水率	●
		温度	土体温度	○
		温湿度	环境温度、湿度	○
		裂缝	土体裂缝	●
14	冰撞击	振动	桥墩加速度	○
		结构状况	视频图像	○

注：●必选项，○宜选项，◎可选项。

5.4 测点布设

5.4.1 宜合理利用监测点之间联系和结构的对称性等，优化测点布设。

5.4.2 测点布设宜明确传感器的数量、安装位置、方向等，对于不可更换的测点，宜做冗余设计。

5.4.3 监测测点布设位置和数量，需考虑但不限于以下因素：

- 桥址环境、所受作用分布；
- 结构构造特点、静力特性及动力特性；
- 结构病害特征及分布；
- 监测项目数据分析和结构状态评估需求；
- 对于结构既有损伤及缺陷位置，需设置针对性测点。

5.4.4 综合集成监测测点布设见表2。

表2 综合集成监测测点布设

项次	监测内容		布设位置
1	温度、湿度	桥址区	跨中
		主梁内、主缆内、锚室内、鞍罩内、索塔内	桥梁湿度变化较大的部位、对湿度敏感的构件
2	雨量		桥梁开阔部位
3	结冰	桥面	桥面易结冰区域的典型位置
		缆索	近塔顶
		吊杆	主拱
4	车辆荷载	所有车道	路基或有稳定墩柱支撑的混凝土结构铺装层内
5	风速、风向、风压		能监测自由场风速和风向；宜布设于跨中上下游、塔顶、拱顶；悬索桥（ $\geq 1500\text{ m}$ ）、斜拉桥（ $\geq 800\text{ m}$ ）需增设测点
6	结构温度	构件温度	根据温度场分布特点、结合结构类型、联长、跨径、构件尺寸、铺装体系、日照情况等综合确定；与结构应变温度补偿测点协同布设
7		桥面铺装层	铺装层内
8	船舶撞击		有船撞风险的水位变动区的桥墩底部、承台顶部
9	地震动		桥岸、承台顶或桥墩底部；护岸、锚碇锚室、近桥址监控中心等自由场地；大跨桥梁考虑地面运动的非一致性
10	位移	主梁竖向	主跨跨中和1/4、3/4主跨、边跨跨中；有扭转监测需求时，同一断面左右幅外侧
		主梁横向	主跨跨中
		支座	墩顶梁端支座处
		梁端纵向	梁端伸缩缝处
		塔顶偏位	索塔顶部
		拱顶位移	拱顶部
		主缆偏位	主跨跨中和1/4、3/4主跨
		高墩位移	墩顶
11	转角	塔顶转角	塔顶
		梁端转角	梁端主梁
12	应变	主梁、索塔、主拱	根据结构计算分析和易损性分析确定截面和部位
		正交异性钢桥面板	车道轮迹线、疲劳热点（顶板、U肋、横隔板）
		受力复杂的构件	根据结构计算分析确定三向静、动态应变测点
		钢混结合段	应变较大或应力集中处
13	索力	悬索桥吊索	根据索构件的布置形式、规格、型号、长短、索力和应力选取代表性、索力较大、拉索应力变化较大的拉索
		斜拉桥斜拉索	
		拱桥吊杆（索）和系杆	根据主缆锚固方案、索股布置形式确定，至少包括基准索股
		锚跨索股	
14	支座反力		根据支座类型、构造、安装方式确定；可能出现横向失稳等倾覆性破坏的独柱桥、曲线桥、基础易发生沉降或采用压重设计的桥梁支座
15	振动	主梁竖向和横向	振型峰值点，避开振型节点；至少包括主跨跨中和四分点
		主梁纵向	塔梁连接处或支座位置处
		索塔	塔顶
		索	振幅较大的索，避开索构件振型节点
		桥墩	墩顶
		主拱	根据主拱振型确定，宜布设在振型峰值点出，避开振型节点
16	冲刷		根据基础冲刷风险分析确定；圆形桥墩不设置上下游两侧；圆端形布设在上下游及侧面最大冲刷位置；冲刷严重宜在周边侧面同断面布置
17	基础变位	锚碇位移	锚体和前支墩角点
		桥墩沉降	墩顶
		拱脚位移	拱脚承台
18	裂缝		既有典型裂缝或可能发生开裂的区域；结合检查、技术状况评定、养护维修结果确定

表2 综合集成监测测点布设（续）

项次	监测内容	布设位置
19	腐蚀	墩台水位变动、浪溅区混凝土保护层内；根据氯离子浓度梯度测试要求确定位置和数量；结合结构特点、特殊部位、连接位置的腐蚀速率确定
20	断丝	“腐蚀或锈蚀”标度达到3及以上的索；锚头端部或易断丝位置
21	索夹滑移	“错位、滑移”标度达到3及以上的索夹；索夹类型、索夹倾角、螺栓布置形式
22	高强度螺栓状态	检查（测）、技术状况评定结果
23	体外预应力	构造特点和预应力布设形式、位置
24	支座反力	横向失稳发生倾覆性破坏的独柱墩桥梁、弯桥，以及基础易发生沉降、存在负反力等桥梁的关键支座
25	疲劳	根据结构计算分析和结构易损性分析结果，布设在易于或已出现疲劳破坏初期征兆的部位

5.4.5 特定目标监测测点布设见表3：

表3 特定目标测点布设

项次	监测内容	布设位置
1	桥面覆冰	宜布设在动态称重系统附近桥面位置
2	索结构覆冰	宜布设在索体顶部
3	除冰盐	宜布设在受除冰盐侵蚀的典型区域和典型节点
4	冻蚀	宜布设在水中桥墩
5	盐渍土腐蚀	氯离子浓度 钢筋锈蚀 硫酸盐浓度 侵蚀深度 盐蚀交替区域
6	薄壁高墩温度梯度	混凝土构件温度 桥墩混凝土应变 桥墩顺桥向位移 桥墩横桥向位移 温度梯度效应最大处截面四周 墩顶或温度梯度效应最大处
7	基础冲刷	基础偏位 宜布设于桥墩顶部
8	桩基冻拔	基础竖向位移 基础竖向位移 墩顶加速度 基础土体温度 土体含水率 宜布设于桥墩顶部 桩周土体冻融范围内
9	不均匀沉降	基础位移 墩顶加速度 土体含水率 宜布设于墩台顶部 桩周土体扰动范围内
10	铺装层温度	宜根据桥梁日照特征，选取具有代表性的截面进行测点布设
11	紫外线强度	宜与铺装层温度传感器同断面
12	铺装层裂缝	开裂位置处
13	桥面渗水	梁底或墩顶盖梁
14	桥头跳车	路基沉降 桥台顶部及台后路基沉降范围内 台后填土含水率 台后填土温度 桥头搭板下方台后填土内
15	锥坡开裂、滑移	土体含水率 土体温度 裂缝 锥坡土体内 土体裂缝最宽处
16	冰撞击振动	宜布设于桥墩顶部

5.5 监测设备

5.5.1 监测设备见表4。

表4 监测设备

项次	监测内容	监测设备
1	温湿度	氯化钾湿度计、电解湿度计、电阻电容湿度计（温湿度传感器）
2	雨量	雨量计（电容雨量计、红外散射式雨量计、单翻斗雨量计）
3	结冰	温度计
4	温度	热电偶、热电阻、光纤光栅温度计
5	地震	强震动记录仪、三向加速度传感器
6	车辆	动态称重仪、视频摄像头
7	船撞	加速度传感器、倾角仪、位移计
8	风速风向	超声风速仪、机械式风速仪
9	风压	陶瓷型或扩散硅型微压差传感器
10	振动	加速度传感器（压电式、伺服式、电容式）、速度传感器、长标距光纤光栅传感器
11	位移	GNSS/北斗传感器、倾角仪、静力水准仪、电平梁、压力变送器、长标距光纤光栅传感器、机器视觉传感器、位移计
12	应变	振弦式应变计、光纤光栅应变计、电阻应变计
13	索力	加速度传感器、磁通量传感器、压力传感器（锚索计）、长标距光纤光栅传感器
14	断丝	声发射传感器
15	裂缝	振弦式裂缝计、光纤光栅裂缝计、裂缝观测传感器、长标距光纤光栅传感器、导电涂料传感器
16	腐蚀	腐蚀传感器、长标距光纤光栅传感器、混凝土保护层深度安装多电极传感器（腐蚀类型、腐蚀速率）
17	疲劳	应变传感器
18	覆冰	电容传感器、光纤传感器、超声波测试法、视频监测法
19	除冰盐	桥面系水体氯离子浓度
20	冻蚀	温度计、高清摄像头
21	紫外线强度	紫外线辐射传感器
22	土体含水率	渗压计、土壤水分传感器
23	桥面/结构状况	高清摄像头

5.6 数据采集与传输

5.6.1 宜综合考虑监测手段、传感器数量及空间位置分布，选取采集模式：

- 传感器空间分布较集中、传感器网络与采集站的距离较近时，采用集中式采集；
- 传感器和采集设备较多，各监测部位相距较远且相对分散时，采用分布式采集；
- 同一桥梁结构监测中传感器空间分布较为分散时，总体可设置多个子采集站进行分布式采集，局部位置同时采用集中式采集。

5.6.2 数据采集需考虑但不限于下列因素：

- 采样频率的适用性：宜按 JT/T 1037 设置，并考虑监测需求；
- 监测数据的同步性：变量数据时钟同步误差动态监测小于 0.1 ms，静态监测小于 1 ms；
- 采集数据的稳定性：采集数据和历史数据的差值宜在一定范围内，可根据具体情况设定阈值；
- 异常数据的诊断：数据完好率宜不低于 90%。

5.6.3 数据传输需考虑但不限于以下因素：

- 数据传输的及时性、可靠性和完整性；
- 高速数据传输宜采用同步传输，低速数据传输可采用异步传输；
- 远距离宜采用光纤传输技术、无线传输技术或两者相结合的方式。

5.6.4 监测系统上传至省、部级监测平台的数据包含但不限于：

- 基础数据：桥梁基本信息、监测设备信息、传感器监测点位信息等；
- 原始数据：各类监测指标的初始数据；

- c) 特征值数据：最大值、最小值、平均值、均方根值、方差等；
- d) 状态数据：桥梁健康度、单桥系统运行状态、传感器运行状态等数据；
- e) 报警数据：超过报警阈值的测点数据；
- f) 应急监测数据：应急预案、应急通讯录、事中处置信息、处置结果信息、处置报告等；
- g) 视频数据：动态称重、桥面、航道等视频监控数据。

5.7 数据存储

5.7.1 监测系统数据宜采用模块化架构的数据库存储技术，具备提供存储调度、存储监控及存储管理可视化功能，可对桥梁结构信息、监测系统信息和监测数据进行分层、分类存储和管理。

5.7.2 监测系统数据库包括但不限于：

- a) 桥梁结构信息数据库：宜对桥梁设计、竣工图纸以及专题研究等资料进行存储和管理，数据库表宜按桥梁设计、竣工图纸、研究报告等分类；
- b) 监测系统信息数据库：宜存储和管理传感器、数据采集和传输设备、数据处理和管理设备及软件等信息，包括设备厂商、安装位置、技术参数、品牌和规格等；
- c) 结构有限元模型数据库：宜存储和管理桥梁结构有限元模型，有限元模型宜使用标准文件格式进行保存，并可根据监测数据应用和桥梁养护结果定期按需修正；
- d) 实时数据数据库：宜存储和管理监测系统所有监测内容的原始数据；
- e) 数据分析数据库：宜存储和管理采用统计方法、相关分析、趋势分析、比对分析及机器学习等数据；
- f) 监测应用数据库：宜存储和管理超限报警、评估、分析结果等数据。

5.7.3 数据存储考虑下列因素：

- a) 现场采集站存储时，宜在采集站内安装采集计算机，采用循环更新存储方式。在网络中断情况下，现场本地数据存储空间结构化数据宜不少于 90 d，非结构化数据宜不少于 d；
- b) 对于交变类型的较高频连续监测数据，可根据数据存储准则存储数据，存储数据时间宜采用公历，最低精度为 s；
- c) 监控中心计算机机房监测数据存储时间：
 - 结构化数据：不少于5年，经处理后的特征数据、超限报警、评估结果等结构化数据存储时间宜不少于20年，
 - 非结构化视频数据：不少于90 d，特殊事件视频数据应转移备份并永久保存；
- d) 监测系统宜采用容灾备份机制，可具备各类数据压缩存储和异地备份功能。

5.8 报警处置

5.8.1 报警等级、报警阈值宜参考 JT/T 1037 设置。

5.8.2 报警值应满足工程设计及被监测对象的控制要求，数据超限报警宜分为三级，当监测数据超过各级阈值时，宜同步报警。

5.8.3 监测数据和报警信息宜实时在线显示，并将报警信息及时传送给运维管理人员。

5.8.4 监测数据触发异常报警时，宜根据桥梁特点、报警频次、异常极值等进行检查和养护，按 JT/T 1037、JTG 5120、JTG/T 5122 执行。

6 系统建设

6.1 设计

6.1.1 设计内容包括但不限于：

- a) 系统总体方案与功能组成；
- b) 监测内容与测点布设；
- c) 数据采集、传输、处理与管理方案；
- d) 软件开发、数据库设计、软件部署和联调方案；
- e) 系统供电、网络、防雷、防护方案；
- f) 预留预埋方案；
- g) 数据分析与阈值设置方案；
- h) 系统运维要点；
- i) 设计图：测点布置图、分项测点布置与安装图、采集站布置图、系统拓扑图、综合布线图、设备电气原理图；
- j) 工程数量表及预算。

6.1.2 系统硬件包括传感器、数据采集及传输设备、计算存储设备、网络安全设备及供电设备，设计需考虑但不限于以下因素：

- a) 技术适用性：传感器宜符合监测指标对灵敏度、通频带、动态范围、线性度、稳定性、供电方式及寿命等方面的要求，并具备足够的量程储备量，对于受冲击的传感器宜工作在满量程的 20%~30%，其他监测量宜工作在满量程的 30%~70%；
- b) 环境适宜性：
 - 满足青海高原寒区的环境特点，相关监测设备建议选取低温稳定性较好的电子元器件，有效工作温度下限低于桥址区年温极小值 20℃，上限高于桥址区年温极大值 30℃，必要时进行低温稳定性测试和验证，
 - 根据元器件的工作环境配置温控机柜，其防护级别：位于结构内部时不低于 IP55，外部时不低于 IP65，其他参数宜符合 GB/T 15532 规定；
- c) 长期稳定性：按照可靠性设计流程，从设备选型、降额设计、冗余设计、供电电源、传感器测量精度等各个环节，明确“防尘、防水、防雷、防震、防腐蚀”指标，确保系统稳定有效；
- d) 系统兼容性：传感器选型、采集仪选型宜和软件系统相适配，满足数据同步采集、实时传输需求，并考虑安装、维护的便易性。

6.1.3 系统软件设计采用主流的设计架构，选取合适的技术路线和编程语言，各模块之间相互独立、有序融合，方便维护、扩容和升级，具体如下：

- a) 采集与传输：需考虑数据采集的协议和通信方式，宜提供可靠和稳定的数据采集功能，实时、准确地获取传感器采集到的桥梁监测数据，支持多种传感器类型和数据接口，并添加校验机制，具备远程配置和调整关键参数的功能；
- b) 数据处理与管理：将原始数据转换成反映桥梁环境、作用、结构响应、结构变化的特征数据，并设计合适的数据存储结构，支持大容量的数据存储和高效的数据管理，具备数据备份与恢复功能；
- c) 用户界面：宜选用 B/S 模式，具备数据及结果显示、查询、推送及交互功能。

6.1.4 配套工程设计具体如下：

- a) 预埋件及预留孔洞：宜合理设置；
- b) 传感器：
 - 保护罩：具备“防尘、防水”的功能，
 - 支架：具备足够的强度、刚度和稳定性；
- c) 线缆桥架：
 - 线缆的敷设与防护宜符合 GB 50311 规定，

- 管线桥架能够承受管线的重量和外部环境的作用，且具备防腐功能；
- d) 供电及通信网络：通信网络宜具备可靠性，综合考虑传输距离、网络覆盖状况等因素，宜采用光缆传输和组网，可采用无线传输和组网。新建桥梁机电工程设计时宜预留接口；
- e) 防雷接地保护：宜符合 GB 50343 规定；
- f) 监测数据中心：宜满足长期稳定运行的需求。

6.2 实施

6.2.1 传感器安装需考虑但不限于以下因素：

- a) 定位准确：安装位置与设计文件一致；
- b) 牢固可靠：选择合理的安装方式，使用的预埋件、锚杆、基座、支架和夹具等宜具有足够的强度、刚度和耐久性，与被测结构物连接牢固，安装工艺符合监测期内的使用需求及技术指标；
- c) 标识唯一：标识清晰、准确、完整，粘贴牢固，并按附录 A 填写安装记录。

6.2.2 采集与传输设备安装需考虑但不限于以下因素：

- a) 安装位置、数量宜与设计保持一致；
- b) 采集站与结构间的连接宜采用焊接或防松脱螺栓等方式，保证连接牢固；
- c) 采集站内设备布置安装稳固，走线规整，接线端子接触良好；
- d) 安装后进行校验，包括接线正确性校验和数据完整性校验，并宜定期对比校准；
- e) 校验无误后按附录 A 填写安装记录。

6.2.3 管线安装需考虑但不限于以下因素：

- a) 线缆宜敷设于桥架内，桥架外线缆宜采用防护管，且与结构物连接牢固，防护管弯曲符合相关要求；
- b) 光电线缆宜与桥梁其他线缆保持合适的距离，并根据强弱电缆位置采取屏蔽措施；
- c) 光缆接续时每道工序完成后宜采用前向双程测试法测量接头损耗，中断段光纤的平均接头损耗不大于每个 0.03 dB；
- d) 线缆终端接头宜留有冗余；
- e) 线缆宜从底部进入设备箱，并设置防水措施。

6.2.4 系统供配电需考虑但不限于以下因素：

- a) 市电供电时系统需配备独立配电箱供电；太阳能供电时保证连续使用时长不少于 7d；
- b) 设置过载、接地、漏电、短路、防雷等保护装置；
- c) 具备来电后自动恢复功能。

6.2.5 软件开发测试与部署需考虑但不限于以下因素：

- a) 软件编码宜符合 GB/T 8566 规定，软件开发文档和接口文档宜符合 GB/T 8567 规定；
- b) 软件部署前编制软件部署指南，过程规范有序，部署完成后测试系统功能及性能；
- c) 软件测试流程和内容宜符合 GB/T 15532 和 GB/T 9386 规定，并填写系统软件测试表，见附录 B。

6.2.6 系统调试包括但不限于：

- a) 检查硬件设备的运行状态；
- b) 测试采集数据的可靠性、完整性、有效性以及信号传输的稳定性；
- c) 设置传感器的参数及初始状态；
- d) 检查干扰信号的来源，并采取有效措施。

6.3 试运行

- 6.3.1 系统试运行不少于 3 个月，并组织相关培训。
- 6.3.2 开展软件功能优化、基准值校正、超限阈值设置等工作。
- 6.3.3 检验监测数据的完整性、准确性、逻辑性、相关性和匹配性。
- 6.3.4 编写试运行报告。

6.4 验收

监测系统验收及资料编制宜按JT/T 1037规定执行。

7 维护与应用

7.1 检查维护

7.1.1 监测系统宜建立检查维护台账。

7.1.2 检查维护具体如下：

- a) 日常检查：
 - 软件工作状态检查、数据完整性分析、超限报警确认、数据库备份情况检查宜每周进行1次，并按附录C记录，
 - 监控中心硬件设备工作状态检查、存储空间情况统计宜每周进行1次，并按附录D记录，
 - 结合桥梁日常巡查，开展硬件设施的表现完好性、线缆牢固性检查，按附录D记录，
 - 对巡查中发现的问题及时处置，并做好记录；
- b) 定期（专项）维护：
 - 维护频次：至少每半年进行1次；当监测设备发生故障或桥梁遭遇地震、火灾、车船撞击等特殊事件后及时进行专项维护，
 - 软件维护：对数据完整性、性能指标、报警功能、安全性、系统日志等，
 - 设备维护：传感器保护罩及支架牢固性、采集设备的运行状态、网络传输质量、防雷接地可靠性、配电设备状态等，
 - 故障处置：24 h内快速响应并及时处置，做好记录，
 - 分析总结：每年对系统工作状态进行分析总结，提出维护计划；
- c) 应急维护：对系统运行出现的突发故障排查原因，并及时采取处置措施。

7.2 监测报警

7.2.1 各级阈值宜综合考虑监测内容历史统计值、材料允许值、仿真计算值、设计值和规范容许值，并结合管理建议、特殊事件应急管理、结构状态评估等需求进行设定，可根据实际运营状况进行必要的调整，具体如下：

- a) 技术状况为 1、2 类的桥梁：宜按 JT/T 1037 规定设定；
- b) 技术状况为 3、4 类的桥梁：宜基于设计值、荷载试验结果、定期检查及技术状况评定结果设定。

7.2.2 宜对传感器采集到的数据进行处理分析，状态特征值超过阈值后，方可报警。

7.2.3 报警内容包括传感器编号、位置、监测值、报警阈值和报警级别。

7.2.4 报警触发流程如下：

- a) 监测系统根据预设的报警阈值自动触发相应的报警级别；
- b) 人工对自动触发报警等级进行确认，必要时升级或降级；
- c) 根据报警类型、报警级别等采取闭合处理措施，形成联动机制。

7.3 分析报告

7.3.1 分析报告具体如下：

- a) 日报和月报：以自动化报警情况统计分析为主，包括报警参数、报警位置、报警数量、报警阈值等情况，并与结构分析结果进行对比；
- b) 季报和年报：
 - 特征值分析：宜包括时程曲线展示、数据解耦、特征指标提取及数值统计等，
 - 规律分析：宜包括数据特征值的变化趋势、相关性分析等，
 - 异常事件记录：事件描述、数据变化、异常数据图表、传感器状态、原因分析、状态评估、响应措施及维护记录等，
 - 特定目标监测系统评估：需结合监测设计目标进行专项分析与评估，
 - 综合集成监测系统评估：根据各监测项开展专项评估后，结合人工检查结果进行综合评估，
 - 健康度计算：宜按JT/T 1037计算，
 - 状态评估：根据专项评估及综合评估结果，研判桥梁使用性能，评估运营状态。

7.3.2 分析报告及原始记录等宜归档。

7.4 对策建议

7.4.1 超限报警处置宜按 JTG 5120、JTG/T 5122、JT/T 1037 执行。

7.4.2 发生涡振、地震、船舶撞击及大件运输等特殊事件时，宜对桥梁结构进行必要的检查、分析，并给出对策建议，数据分析内容及对策建议见表 5。

表5 监测数据超限检查建议

事件类型	数据分析	对策建议
涡振	1. 根据风监测数据，计算分流特性 2. 计算结构索体振动加速度均方根值、模态参数变化 3. 分析结构位移变化最大值	一级报警：持续关注 二级报警：采取车辆限速等管理措施 三级报警：封闭桥梁进行状态评估
地震	1. 分析地震加速度峰值、均方根值、反应谱 2. 分析结构空间位移监测值的最大值和残余位移 3. 所有截面应变、索力、支座反力等响应数据的最大值和残余值 4. 分析结构振动加速度峰值、均方根值，计算结构模态参数，对比地震前后的参数变化 5. 必要时，利用监测的地震时程数据进行结构仿真分析，并与实测结果对比 6. 提供地震分析报告，包括震前、震中和震后数据分析结果	二级报警：对桥梁进行特殊检查 三级报警：封闭桥梁进行特殊检查
大件运输	1. 进行车辆超载专项分析，获取超载车辆荷载、时间 2. 分析主梁竖向位移、支座位移、主梁应力等数据的绝对最大值、残余值 3. 采用修正的有限元模型，验算主梁竖向位移、结构应力等结构响应数据，并与实测值对比分析	二级报警：进行桥梁特殊检查
船舶撞击	1. 视频数据查看与存储 2. 结构振动数据分析、模态参数计算 3. 主梁横向位移、墩顶位移、支座位移、锚碇位移、拱脚位移等数据的绝对最大值、残余值 4. 应变、索力的变化值、绝对最大值、残余值等	进行桥梁特殊检查

7.4.3 结合人工检查报告和自动化监测报告进行综合分析，制定桥梁养护方案或维修计划。

附 录 A
(资料性)
硬件设备安装记录表

A. 1 传感器设备安装记录表见 A. 1。

表A. 1 传感器设备安装记录表

安装日期		温度	
设备类型		设备名称	
设备型号		线缆规格/编号	
技术指标			
设备用途			
安装说明	(接线线序、调试要点、方向说明等)		
安装位置	(传感器1)	(传感器2)	
传感器编号			
设备ID			
采集设备编号			
对应通道号			
初始读数			
安装照片			

安装： 复核：

A.2 采集设备安装记录表见 A.2。

表A. 2 采集设备安装记录表

安装日期		温度	
设备类型		设备名称	
设备型号		设备编号	
设备ID		设备IP	
采集信号类型		通道数	
所属采集站			
技术指标			
设备用途			
安装位置			
安装说明	(接线线序、调试要点等)		
安装照片			

安装： 复核：

附 录 B
(资料性)
系统软件测试表

系统软件测试记录见表B. 1。

表B. 1 系统软件测试表

功能模块	测试项目	测试步骤	预期结果	实际结果	结论 (通过/不通过)
数据采集与传输	传感器连接				
	接收				
	稳定性				
					
数据处理与控制	数据预处理				
	数据转换				
	数据存储				
	数据查询				
					
用户界面	用户登录				
	数据展示				
	数据报警				
	统计分析				
					
其它	兼容性测试				
	性能测试				
	安全测试				
	与其它平台互联				
					
测试日期			温度		

记录： 复核：

附 录 C
(资料性)
系统软件检查维护记录表

系统软件检查维护记录见表C. 1。

表C. 1 系统软件检查维护记录表

功能模块	检查项目	功能状况	运行结论	异常说明
数据采集与传输	传感器连接			
	接收			
	稳定性			
				
数据处理与控制	数据预处理			
	数据转换			
	数据存储			
	数据查询			
				
用户界面	数据展示			
	数据报警			
	统计分析			
				
数据状况	完整性			
	超限报警			
				
其它	系统日志			
	数据库日志			
	安全管理软件			
	系统软件配置			
				
日期			温度	

记录： 复核：

附 录 D
(资料性)
系统硬件检查维护记录表

D.1 外场硬件设备检查维护记录见表 D.1。

表D.1 外场硬件设备检查维护记录表

[illegible]

记录: 复核:

D.2 监控中心硬件设备检查维护记录见表 D. 2。

表D. 2 监控中心硬件设备检查维护记录表

检查项目		设备编号	设备位置	状况	存在问题及维护情况
存储设备	外壳清洁、破损				
	运行声音				
	振动				
	温度				
	接线				
	指示灯				
	剩余存储空间				
显示设备	外壳清洁、破损				
	显示屏显示状况				
	功能按键				
.....					
检查维护日期			温度		

记录： 复核：

参 考 文 献

- [1] 《公路长大桥梁结构健康监测系统建设实施方案》（交办公路〔2021〕21号）
 - [2] 《公路长大桥梁结构健康监测系统试点建设技术指南》（2021，交通运输部公路局）
-