**CQJTZ**

重庆市交通运输行业推荐性标准 CQJTZ/XXX—2024

**重庆市长大公路缆索桥监测预警**

**技术指南（报批稿）**

**Technical** **guidelines for monitoring and early warning of Chongqing long span highway cable-supported bridge**

2024-XX-XX发布 2024-XX-XX实施

重庆市交通运输委员会 发布

前 言

本指南由重庆市交通运输委员会提出并归口。

本指南由重庆市交通运输委员会组织实施。

本指南起草单位：重庆交通大学

重庆物康科技有限公司

重庆高速公路集团有限公司

重庆市公路事务中心

重庆大学

本指南主要起草人：张 洪 辛景舟 周建庭 吴海军 杨昌熙 杨纪鹏 狄 谨 孟利波

黎小刚 吴凤波 唐启智 李双江 吴 波 姜 言 夏润川 张森华 周 银 段 敏 刘 昊 陈熠昕 秦凤江 苏 益 黄 博 罗凌峰 曾 渝 徐莲怡 任洪涛 朱顺芳 王 宇 于和路 黄 磊 丁友丽 陈明阳

**目 次**

[1 范围 1](#_Toc185331845)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc185331846)

[3 术语和定义 1](#_Toc185331847)

[4 基本规定 2](#_Toc185331848)

[5 监测内容 3](#_Toc185331849)

[6 监测数据 4](#_Toc185331852)

[7 健康度评估 11](#_Toc185331857)

[8 特殊事件应急管理 13](#_Toc185331860)

[附录A 报警快讯模板 20](#_Toc185331864)

[附录B 报警快报模板 21](#_Toc185331865)

# 1 范围

本指南规定了重庆市长大公路缆索桥监测报警技术的基本规定、监测内容、监测数据、桥梁结构健康度评估、特殊事件应急管理的要求。

本指南适用于长大公路缆索桥监测报警，其他桥梁可参照使用。在不限于本指南规定的要求下，宜引入并使用经验证的新技术、新装备。

# 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指南必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本指南；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本指南。

GB 50982-2014 建筑与桥梁结构监测技术规范

GB/T 36344-2018 信息技术数据质量评价指标

JT/T 1037-2022 公路桥梁结构监测技术规范

JTG/T 5120-2021 公路桥涵养护规范

JTG/T 5122-2021 公路缆索结构体系桥梁养护技术规范

JTG/D 60-2015 公路桥涵设计通用规范

T/CECS 652-2019 结构健康监测系统运行维护与管理标准

T/CECS 529-2018 大跨度桥梁结构健康监测系统预警阈值标准

DB42/T 1951-2023 桥梁结构健康信息化监测技术规范

DB51-T 2794-2021 山区公路混凝土结构桥梁安全风险监测指标体系设计与预警技术指南

DB34∕T 3703.1-2020 长大桥梁养护指南 第1部分：结构安全监测系统布设指南

DB32∕T 3562-2019 桥梁结构健康监测系统设计规范

DBJ50/T-304-2018 桥梁结构健康监测系统实施和验收标准

# 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本指南。

3.1

桥梁结构监测 bridge structural monitoring

一种可以对桥梁的设定参数进行连续、自动测量和记录，获取桥梁环境、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，评估结构健康度的多学科交叉融合技术。

3.2

桥梁结构监测系统 bridge structural monitoring systems

一种通过网络集成技术将分布在桥梁现场和监控中心的各类传感器、数据采集与传输、数据处理与管理、数据分析与应用的硬件设备、软件模块及配套设施连接在一起，具有对桥梁设定参数连续监测、自动记录、数据显示、报警评估的功能，辅助桥梁管理和养护决策的电子信息系统。

3.3

超限阈值 alarming threshold

对桥梁环境、作用、结构响应、结构变化、关键结构构件可能出现的各种级别的异常或风险，各监测点数据特征指标所设定的临界状态警戒值。

3.4

超限阈值修正 alarming threshold correction

结合桥梁人工检测（桥梁专项检测、定期检查等）结果进行计算模型修正或长期监测数据统计结果，得到符合桥梁实际服役状态下的超限阈值。

3.5

报警等级 alarming level

表征监测数据与超限阈值对应等级关系，分为一级、二级和三级共三个等级。

3.6

桥梁结构健康度 bridge structural health level

相对于桥梁成桥状态或设计规定的结构安全和功能要求，当前桥梁结构安全和功能所处的相对水平。

# 4 基本规定

4.1 桥梁结构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。

4.2. 监测应用除应满足本规范的规定外，还宜符合JTG 5120-2021中3.7、JTG/T 5122-2021中3.7对结构监测和结构健康监测系统的相关规定。

4.3 桥梁结构健康监测报警系统应具备发布、调整和解除报警信息的功能，并且应采用实时、自动和清晰可辨的报警方式，同时建立多指标和多层次的报警体系。

# 5 监测内容

5.1 一般规定

5.1.1 监测内容的确定应符合下列规定：

a) 根据桥梁运行环境、受力状态分析、耐久性分析、风险评估结果、监测应用目标确定监测内容；

b) 根据桥梁结构、部件、构件的技术状况，既有病害、损伤程度、监测应用目标，经分析确定监测内容；

c) 根据技术状况评定结果、监测应用目标确定监测内容。

5.1.2 监测内容应包括环境、作用、结构响应和结构变化，并分为应选监测项、宜选监测项、可选监测项，应符合JT/T 1037-2022中表1或表2的相关规定。

5.1.3 航道等级为I级~V级的通航孔桥以及易受船舶撞击的非通航孔桥宜进行船舶撞击监测，航道等级应根据桥梁设计通航批复文件或通航规定确定。

5.1.4 监测内容宜兼顾JTG 5120-2021中规定的桥梁永久观测点观测需求。

5.1.5 本指南规定的长大缆索桥监测内容应符合表2的规定，可根据特定需求选择监测内容、采样频率、报警指标（等级）及管理对策。

5.2 监测指标

5.2.1 长大缆索桥监测指标体系包括环境、作用、结构响应及结构变化四类，其中：

a) 环境类包括风速风向、温度、湿度（如：大气温湿度、桥面温湿度、主梁内温湿度、索塔锚固区温湿度、主缆内温湿度、锚室内温湿度、鞍罩内温湿度、索塔内温湿度）、降雨量、结冰；

b) 作用类包括车辆荷载（如：车重、轴重、车辆荷载分布）、人群荷载、结构温度、船舶撞击、地震；

c) 结构响应类包括整体变形（主梁变形、索塔变形、倾斜等）、结构位移（梁端位移、支座位移、塔顶位移、主缆偏位）、拉吊索索力、应变（主梁、索塔）、结构振动（主梁振动、拉吊索振动、塔顶振动）、结构固有频率、支座反力、锚跨索股力；

d) 结构变化类包括基础冲刷、结构裂缝（钢、混凝土）、腐蚀、拉（吊）索断丝、螺栓状态（高强度螺栓紧固力、螺栓滑脱）、索夹滑移、锚碇位移、体外预应力。

# 6 监测数据

6.1 监测数据分析

6.1.1 应分析环境、作用、结构响应和结构变化监测数据，并宜结合桥梁养护的日常检查、定期检查与特殊检查数据。

6.1.2 监测数据分析应剔除错误数据，监测数据分析方法可采用统计分析、相关性分析、趋势性分析、比对性分析、机器学习，也可采用其他可靠方法。

6.1.3 监测数据异常按表现形式可以分为不连续离散跳点、数据反复跳变、数据超量程、常量数据、渐进式漂移、数据缺失、整体平移、长周期漂移、频域特征异常等，其对应主要原因见表1。

表1 监测数据异常形式

|  |  |
| --- | --- |
| 数据失真形式 | 主要原因 |
| 离散跳点 | 设备老化，线路腐蚀、短接，电源和接地随机干扰，浪涌，电火花放电等 |
| 数据反复跳变 | 设备老化，设备松动，屏蔽失效，通道串扰，接线与接地接触不良，电压不稳，电源和接地随机干扰，浪涌，电火花放电等 |
| 数据超量程 | 设备老化，参数设定不合理，设备选型不合理，放大器饱和，线缆接头老化等 |
| 常量数据 | 设备老化，线路腐蚀、短接，线缆接头松脱等 |
| 数据缺失 | 设备老化，线路腐蚀、短接，线缆接头松脱等 |
| 渐进式漂移 | 设备老化，线缆接头老化、松脱等 |
| 整体平移 | 偏置电流或偏置电压等 |
| 长周期漂移 | 设备老化，温度干扰，防护失效，线缆接头老化等 |
| 频域特征异常 | 设备老化，采样频率不匹配，参数设定不合理，工频干扰等 |

6.2 超限阈值、超限报警与管理对策

6.2.1 超限级别分为三级，当监测数据超过各级超限阈值时，根据超限阈值判定超限等级，且宜同步报警。报警类别分环境报警、作用报警、结构响应报警、结构变化报警、主梁涡振报警和监测数据分析结果报警。

6.2.2 各级超限阈值确定符合下列规定：

a) 超限阈值宜根据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设定，并宜考虑车辆通行管控建议、检查指引、健康度评估、特殊事件应急管理等监测应用需求；

b) 超限阈值可根据桥梁健康度和技术状况进行调整。

6.2.3 监测数据超限阈值设定宜符合表2的规定。

表2 长大缆索桥监测内容、采样频率、报警指标（等级）及管理对策

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 监测类别 | 监测内容 | 采样频率 | 超限阈值a | 报警等级 | 管养对策 |
| 环境 | 最高温度、最低温度、最大温差 | ≤1/600 Hz | 达到1.0倍设计值 | 一级 | 低温：①检查桥面是否准备了除冰防滑材料；②尽量减少重轴载车通过。高温：①应采用洒水降温等措施；②尽量减少重轴载车通过。 |
| 达到1.2倍设计值 | 二级 |
| 构件（主梁、主缆、锚室、鞍罩、索塔和索塔锚固区内）封闭空间内相对湿度b | 1/600 Hz | 达到50% | 一级 | 提示检查除湿设施是否运转正常 |
| 路面状况（根据设备不同进行选择） | 在线：25 FPS（如基于图像原理的设备） | 出现结冰 | 一级 | 提示禁止重轴载车通过并对路面进行检查和除冰 |
| 1/600 Hz（如基于红外激光遥感技术） | 出现积雪、冰水混合物 |
| 风速、风向 | 超声风速仪：10 Hz机械式风速仪：1 Hz | 桥面10 min平均风速达到25 m/s | 一级 | 考虑车辆行驶安全的风速报警阈值，通过桥梁时应降速至60km/h |
| 桥面10 min平均风速达到0.8倍桥面设计基准风速 | 二级 |
| 桥面10 min平均风速达到桥面设计基准风速 | 三级 |
| 作用 | 车辆总重或轴重 | 动态称重设备：触发采集视频：25 Hz | 达到1.5倍设计车辆荷载 | 一级 | 提示检查桥梁主要受力构件的技术状况 |
| 达到2.0倍设计车辆荷载 | 二级 |
| 混凝土、钢结构构件温度 | 1/600 Hz | 达到设计值 | 一级 | 提示进行构件使用性检查 |
| 桥面铺装层温度 | 大于60℃或小于-20℃或根据铺装体系材料力学性能随温度变化关系确定 | 一级 | 提示采用洒水降温等措施 |
| 船舶撞击 | 触发采集加速度：50 Hz视频：25 FPS | 发生船撞事件 | 二级 | 提示及时中断交通，对桥梁进行专项检查维修和安全评估 |
| 桥岸地表场地地震动加速度 | 触发采集加速度：50 Hz | 达到设计El地震作用加速度峰值 | 二级 | / |
| 达到设计E2地震作用加速度峰值 | 三级 | / |
| 结构响应 | 主梁竖向位移 | 动位移：20 Hz静位移：1 Hz | 达到0.8倍设计值 | 二级 | 提示应尽快疏导交通，防止或消除车辆在桥上积压 |
| 达到设计值或30天内出现10次以上二级超限 | 三级 | 提示应限制重载车辆上桥或采用间歇放行方式，事后应对桥梁状态进行专项检测，并反馈设计 |
| 主梁横向位移 | 达到0.8倍设计值 | 二级 | 提示应限制重载车辆上桥或采用间歇放行方式，事后应对桥梁状态进行专项检测，并反馈设计 |
| 达到设计值或30天内出现10次以上二级超限 | 三级 | 提示应禁止车辆通行，对桥梁安全性进行全面检查 |
| 支座位移 | 绝对值达到0.8倍设计值 | 二级 | 提示应减少重车通过，及时检查支座是否损坏 |
| 绝对值达到设计值 | 三级 | 考虑中断交通，并立即组织对桥梁状况的紧急专项检测及安全评估，考虑更换已损坏的支座 |
| 梁端纵向位移 | 绝对值达到0.8倍设计值 | 二级 | 提示检查伸缩缝 |
| 绝对值达到设计值 | 三级 | 考虑中断交通，并立即组织对桥梁状况的紧急专项检测及安全评估，考虑更换已损坏的伸缩缝 |
| 塔顶偏位 | 达到0.8倍设计值 | 二级 | 提示应尽快疏导交通，防止或消除车辆在桥上积压 |
| 达到设计值或30天内出现10次以上二级超限 | 三级 | 提示应限制重载车辆上桥或采用间歇放行方式，事后应对桥梁状态进行全桥检测，并反馈设计 |
| 主缆偏位 | 达到0.8倍设计值 | 二级 | 提示应限制重载车辆上桥或采用间歇放行方式，事后应对桥梁状态进行专项检测，并反馈设计 |
| 达到设计值或30天内出现10次以上二级超限 | 三级 | 提示应禁止车辆通行，对桥梁安全性进行全面检查 |
| 主梁关键截面应变 | 动应变：10 Hz静应变：1/600 Hz | 超过历史最大值 | 一级 | 提示检查传感器附近构件裂缝 |
| 超过设计最不利工况计算值 | 二级 | 提示对传感器所在构件进行特殊检查 |
| 索塔关键截面应变 | 动应变：10 Hz静应变：1/600 Hz | 超过历史最大值 | 一级 | 提示检查传感器附近构件裂缝 |
| 超过设计最不利工况计算值 | 二级 | 提示对传感器所在构件进行特殊检查 |
| 悬索桥吊索力、锚跨索股力、斜拉桥斜拉索索力 | 压力传感器：1 Hz加速度传感器：50 Hz电磁弹式传感器：1/3600 Hz | 达到0.95倍设计值 | 二级 | 提示检查导致索力变化异常的原因，并及时消除此影响 |
| 超过设计值或30天内出现10次以上二级超限 | 三级 | 提示应立刻进行专项索体检查，评估索体是否发生损伤 |
| 支座反力 | 1 Hz | 绝对值达到0.8倍设计值 | 二级 | 提示检查支座 |
| 绝对值达到设计值 | 三级 | 考虑中断交通，并立即组织对桥梁状况的紧急专项检测及安全评估，考虑更换已损坏的支座 |
| 主梁振动加速度 | 20 Hz | 10 min加速度均方根达到31.5 cm/$s^{2}$且持续时间超过30 min | 一级 | 立即实行交通管制，减少重车同时通过，对重车实行间隔放行，并安排专项检查，对地震可能影响的构件进行检查，如支座、伸缩缝、承台、锚头等 |
| 10 min加速度均方根达到50 cm/s² | 二级 | 立即实行交通管制，禁止重车通过，立即开展桥梁全面检查，检查单位评估桥梁的安全性 |
| 幅值持续增大、呈现发散特征 | 三级 |
| 悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索振动加速度 | 50 Hz | 10 min加速度均方根达到100 cm/s² | 一级 | 立即实行交通管制，减少重车同时通过，对重车实行间隔放行，并安排索构件专项检查 |
| 10 min加速度均方根达到300 cm/s²且频繁出现 | 二级 | 立即实行交通管制，禁止重车通过，立即开展索构件专项检查 |
| 结构变化 | 基础冲刷 | 在线：1 MHz离线：每年1次~2次 | 达到0.7倍设计冲刷深度 | 二级 | 提示全桥检查 |
| 达到设计冲刷深度 | 三级 |
| 锚碇位移 | 在线：1/3600 Hz离线：每年1次~2次 | 锚碇水平位移达到0.00005倍主跨跨径，锚碇竖向位移达到0.0001倍主跨跨径 | 二级 | 提示全桥检查 |
| 锚碇水平位移达到0.0001倍主跨跨径，锚碇竖向位移达到0.0002倍主跨跨径 | 三级 | 立即实行交通管制，禁止重车通过，立即开展专项检查 |
| 裂缝 | 动态：10 Hz静态：1/3600 Hz图像：每周1次 | 出现结构性裂缝 | 一级 | 提示管理部门注意，提示对构件进行特殊检查 |
| 结构性裂缝宽度超过规范限值或发展加速 | 二级 | 提示对构件进行特殊检查，采用必要的应急处治措施 |
| 腐蚀 | 在线：1/3600 Hz离线：每年1次~2次 | 腐蚀深度到达保护层深度 | 二级 | 提示对腐蚀区进行特殊检查 |
| 断丝 | 触发采集：2 MHz | 出现断丝 | 二级 | 提示进行特殊检查 |
| 断丝率达到2% | 三级 |
| 螺栓状态 | 在线：1 Hz图像：每周1次离线：每年1次~2次 | 个别螺栓轻微松动 | 一级 | 提示管理部门注意 |
| 部分螺栓松动 | 二级 | 提示检查螺栓 |
| 较多螺栓发生严重松动或少量脱落 | 三级 | 提示中断交通，进行全桥检查和维修加固 |
| 索夹滑移 | 在线：1 Hz图像：每周1次离线：每年1次~2次 | 索夹出现滑移 | 二级 | 提示检查索夹 |
| 索夹滑移严重或较多数量索夹出现滑移 | 三级 | 提示中断交通，进行全桥检查和维修加固 |
| 主梁涡振c | / | 10min振动加速度均方根值达到31.5cm/s2、能量比因子大于10 | 一级 | 提示管理部门注意 |
| 10min振动加速度均方根值达到50cm/s2、能量比因子大于10 | 二级 | 提示中断交通，进行全桥检查和维修加固 |
| 10min振动加速度均方根值达到80cm/s2、能量比因子大于10 | 三级 | 立即实行交通管制，禁止重车通过，立即开展专项检测及安全评估 |
| 监测数据分析结果d | 钢结构疲劳 | / | 疲劳损伤指数达到0.1 | 一级 | 提示管理部门注意 |
| 出现较多疲劳裂缝，或裂缝长度和宽度较大 | 二级 | 提示中断交通，进行全桥检查和维修加固 |
| 塔顶或主缆偏位 | / | 出现永久偏位 | 三级 | 立即实行交通管制，禁止重车通过，立即开展专项检测及安全评估 |
| 主梁下挠 | / | 持续下挠 | 三级 | 立即实行交通管制，禁止重车通过，立即开展专项检测及安全评估 |
| 索力基准值 | / | 与成桥索力相比变化超过10% | 二级 | 提示管理部门注意 |
| 与成桥索力相比变化超过15% | 三级 | 提示中断交通，进行全桥检查 |
| 剔除环境影响的桥梁主要频率变化 | / | 超过3% | 二级 | 提示管理部门注意 |
| 超过5% | 三级 | 提示中断交通，进行全桥检查 |
| a“超限阈值”一列中的“设计值”参考了JTG D60、JTG 3362、JTG/T D65- 05、JTG/T 3365- -01、JTG/T D65- 06、JTG/T 336001的相关规定。裂缝限值参考JTG 5120-2021、JTG/T H21的相关规定。部分指标具体计算见6.3。b构件封闭空间为主梁内，悬索桥主缆、锚室和鞍罩内，斜拉桥索塔和索塔锚固区内。c桥梁涡振报警选取主梁竖向加速度均方根值和能量比因子作为报警指标，阈值取值的原则依据已有桥梁发生涡振的加速度均方根值统计规律以及ISO 2631-1舒适性标准制定。超限一级、二级和三级阈值分别取为31.5cm/s2、50cm/s2和80cm/s2分别对应ISO 2631-1中的“稍有不舒适”“比较不舒适”和“不舒适”的下限。d数据分析结果超限报警为非同步报警项。 |

6.2.4 在采取表2中报警对应的管养对策后，具备以下条件时，可以消除报警：

a) 对监测系统的硬件及软件设备进行全面检查，发现报警是由系统设备故障导致监测数据异常触发的，在更换或修复故障设备后，数据恢复至正常范围；

b) 监测系统正常运行时，遭遇瞬时激增荷载所触发的报警，通过对报警发生时所采集的监测数据进行综合分析，随着瞬时激增荷载的有效解除，各关键监测参数恢复至正常值范围内；

c) 由桥梁结构性能改变触发的报警，按6.4的规定对超限阈值进行修正，监测数据处于修正后的阈值范围内。

6.3 超限阈值分类与计算

6.3.1 长大缆索桥结构响应类超限阈值宜分为增量型和绝对量型两大类，超限阈值的设定应符合以下要求：

a) 在桥梁建设期同步实施安装桥梁监测系统的超限阈值宜采用绝对量型，桥梁建设完成后实施安装监测系统的超限阈值应根据结构响应类型分为增量型和绝对量型；

b) 增量报警指标宜包含结构应变、主梁位移（空间变形）、梁端位移、塔顶偏位、主缆偏位；

c) 绝对量报警指标宜包含拉（吊）索索力、支座位移、支座反力、主梁振动加速度、梁端位移、拉（吊）索振动加速度。

6.3.2 超限阈值计算应依据当时桥梁设计规范进行复核建模计算，荷载工况应包含温度作用（均匀温度和梯度温度）、汽车荷载，宜包含风荷载、人群荷载，具体参数设定依据设计文件。

6.3.3 通过结构分析模型计算超限阈值设计值时宜采用标准组合，各分项系数均取1.0，同时结合6.3.1确定阈值类型。

6.3.4 超限阈值计算时应考虑监测系统初始化时的温度，以此作为基准温度计算均匀温度升温、均匀温度降温产生的效应。

6.4 超限阈值修正

6.4.1 通过结构计算模型设定超限阈值时，应根据长期稳定监测数据或桥梁定检数据修正计算模型，模型修正方法可根据实际情况采用基于参数调整法、模型更新法、误差分析法、数据融合法等的一种或多种方法组合，并应符合JT/T 1037-2022中11.6.3节的相关规定。

6.4.2 对监测数据进行处理可以得到超限阈值，但应通过从服役起至少一年且结构未见异常的连续监测数据得到，当模型计算得到的超限阈值与长期监测数据不吻合时，报警阈值应做相应地更新，可基于数学统计分析方法（如极值理论法、机器学习方法）修正超限阈值。

6.4.3 当存在以下情况时，也应对超限阈值进行修正：

a) 开展定期检测或荷载试验的桥梁，应基于定期检查及技术状况评定或荷载试验成果对超限阈值进行修正；

b) 突发事件（如地震、强风、船撞、断索等）后，应基于桥梁检查结果和结构状态评估结果研究当前超限阈值的适用性，修正阈值；

c) 桥梁主要结构构件加固改造或更换后，应基于施工后结构状态分析与评估结果，对相应超限报警阈值进行修正；

d) 结构发生了一定程度的损伤后，应对相应监测指标的超限阈值进行适当调整，使超限阈值符合实际情况。

# 7 健康度评估

7.1 健康度评估分级

7.1.1 桥梁结构健康度应包括整体健康度和结构构件健康度，等级宜划分为I-基本完好、II-轻微异常、III-中等异常、IV-严重异常四级评定宜符合表3规定。

7.1.2 桥梁结构健康度等级应当通过监测系统进行实时动态评估，当构件健康度或结构整体健康度为Ⅲ级中等异常或Ⅳ级严重异常时，应进行专家研判。

表3 桥梁结构健康度等级划分与评定依据

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 健康度等级 | 结构构件监测参数 | 结构构件健康度 | 结构整体监测参数 | 结构整体健康度 |
| I级基本完好 | 构件健康度表征评估参数：采用梁端纵向位移、关键截面应变、索力、支座反力、索振动、裂缝、断丝、螺栓状态、索夹滑移等监测数据 | 监测数据无超限 | 结构整体健康度表征评估参数：采用主梁竖向和横向位移、支座位移、塔顶偏位、主缆偏位、基础冲刷深度、锚碇位移、主梁振动等监测数据，以及主梁持续下挠、桥墩沉降、索力基准值变化、剔除环境影响的桥梁主要频率变化等分析结果 | 监测数据超限等级全部为一级或无超限 |
| II级轻微异常 | 监测数据超限等级为一级 | 结构整体监测参数中所列监测数据与分析结果超限等级仅有1项为二级、无三级 |
| III级中等异常 | 监测数据超限等级为二级 | 结构整体监测参数中所列监测数据与分析结果超限等级出现多项（2项及以上）二级或1项三级；或多项构件健康度中等异常 |
| IV级严重异常 | 监测数据超限等级为三级 | 结构整体监测参数中所列监测数据与分析结果超限等级出现多项三级；或多项构件健康度严重异常 |

7.2 健康度评估报告

7.2.1 根据监测数据评估结果应当出具桥梁整体健康度评估报告，出具频率宜符合表4规定：

表4 桥梁整体健康度评估报告出具频率

|  |  |
| --- | --- |
| 报警等级 | 频率 |
| I-基本完好 | 每季度1次 |
| II-轻微异常 | 每月1次 |
| III-中等异常 | 每日1次 |
| IV-严重异常 | 每小时1次 |

7.2.2 桥梁结构整体健康度评估报告内容除应包括桥梁结构及监测系统基本信息、评估项目、事件概况（如特殊事件概况）、评估判定状态异常的超限阈值、评估方法、评估结果以及报告异常状态的监测设备编号、位置、数量和建议等，还宜包括评估期内监测系统的总体运行情况、评估期内其他报警事件及其处理过程汇总。

# 8 特殊事件应急管理

8.1 桥梁在遭受涡振、强（台）风，悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索等异常振动，地震、车辆超载、车辆撞击或船撞、雨雪及结冰、车辆火灾、暴雨、大雾、突发断电等特殊事件时，应进行特殊事件数据分析辅助应急管理措施决策，并评估结构健康度，同时出具健康度评估报告，必要时组织专家研判。

8.1.1 涡振应急管理宜符合下列规定：

a) 宜采用10 min加速度均方根值和振动能量比因子作为涡振判定指标，也可补充其他参数。和按公式（1）和公式（2）计算：

  （1）

式中：

—加速度均方根值，单位为米每平方秒（）；

—主梁振动加速度，单位为米每平方秒（）；

—10 min加速度采样点数。

  （2）

式中：

—结构振动响应功率谱密度中最大幅值，单位为平方米每三次方秒（）；

—结构振动响应功率谱密度中次最大幅值，单位为平方米每三次方秒（）。

b) 可采用机器学习算法自动判断涡振，也可采用其他可靠方法；

c) 涡振超限阈值宜按本指南表2的规定选取，检查建议宜符合下列规定：

1) 超限一级，提醒持续关注；

2) 超限二级，提醒采取车辆限速等管理措施；

3) 超限三级，提醒封闭桥梁，按7.1的规定进行桥梁结构健康度评估。

d) 应提供桥梁涡振事件分析报告，报告内容宜包括：涡振前、涡振事件全过程、涡振后数据分析结果。数据分析宜符合下列规定：

1) 分析桥面10 min平均风速、平均风向、风攻角、湍流度；

2) 分析主梁10 min加速度均方根值、模态参数变化；

3) 分析涡振全过程持续时间、风况条件、加速度和位移均方根值、振动频率。

8.1.2 强风应急管理宜符合下列规定：

a) 强风风速超限阈值宜按表2的规定选取，检查建议符合下列规定：

1) 超限一级，提醒封闭桥梁；

2) 超限二级，提醒检查桥梁构件状态；

3) 超限三级，提醒检查桥梁构件状态，并按7.1的规定进行桥梁结构健康度评估。

b) 应提供桥梁强风分析报告，报告内容宜包括：强风前、强风全过程、强风后数据分析结果。数据分析宜符合下列规定：

1) 分析桥面10 min平均风速、平均风向、风攻角、湍流度、阵风因子；

2) 分析主梁、悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索等振动加速度均方根值、模态参数变化；

3) 分析主梁竖向和横向位移、塔顶偏位、主缆偏位、索力基准值变化等最大值。

8.1.3 地震应急管理宜符合下列规定：

a) 地震动加速度超限二级时，宜提醒对桥梁进行全面检查；

b) 地震动加速度超限三级时，宜提醒封闭桥梁，对桥梁进行全面检查，并满足下列规定：

1) 可按7.1的规定，利用监测数据进行桥梁结构健康度评估；

2) 也可采用可靠的考虑土结相互作用的非线性结构有限元模型，通过计算分析在地震动作用下桥梁加速度、位移、支座反力、构件内力和应力等结构响应的最大值和残余量，进行桥梁结构健康度评估；

c) 提供地震事件分析报告，报告内容宜包括：震前、地震过程中和震后数据分析结果。数据分析宜符合下列规定：

1) 分析地震过程中桥址地表场地和桥梁墩底(承台)加速度峰值、均方根值、反应谱；

2) 分析主梁竖向和横向位移、支座位移、梁端纵向位移、塔顶偏位、主缆偏位的最大值和残余位移；分析主梁、索塔关键截面应变最大值和残余应变；分析悬索桥吊索、锚跨索股力，斜拉桥斜拉索等索力基准值变化；分析支座反力的最大值和残余力；

3) 分析主梁、塔顶、索构件等振动加速度的峰值和均方根值；

4) 分析震前和震后桥梁模态参数变化。

8.1.4 悬索桥吊索或斜拉桥斜拉索等索构件振动加速度超限二级，应提醒检查减振设施有效性并进行数据分析，数据分析内容宜包括：索构件异常振动前、异常振动全过程、异常振动后数据分析结果。数据分析宜符合下列规定：

a) 分析桥面10 min平均风速、平均风向、风偏角、风攻角、降雨量；

b) 分析索构件10 min加速度均方根值、模态参数变化；

c) 分析索构件异常振动全过程持续时间、风况条件、加速度和位移均方根值、振动频率；

d) 分析索构件索力基准值变化；

e) 分析索构件异常振动类型。

8.1.5 车辆超载应急管理宜符合下列规定：

a) 监测车辆荷载超限二级时，应提醒进行桥梁结构检查；

b) 可按7.1的规定，利用监测数据进行桥梁结构健康度评估；

c) 也可采用可靠的修正有限元模型，验算超载车辆荷载作用下的主梁竖向位移、支座反力、构件内力和应力，并通过与实测监测数据对比，进行桥梁结构健康度评估；

d) 车辆超载特殊事件专项报告内容宜包括：超载车辆荷载、发生时间，主梁竖向位移、支座位移、主梁关键截面静应变，悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索等索力，支座反力等最大值。

8.1.6 车辆或船舶撞击应急管理宜符合下列规定：

a) 发生车辆或船舶撞击后，应提醒进行桥梁结构检查；

b) 可按7.1的规定进行桥梁结构健康度评估，提供分析报告，报告内容宜包括车辆或船舶撞击前、撞击全过程、撞击后数据分析结果。数据分析宜符合下列规定：

1) 对车辆或船舶撞击全过程视频监测数据进行分析；

2) 分析主梁、塔顶、桥墩墩顶振动加速度，主梁横向位移、支座位移、主梁关键截面静应变、悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索等索力，支座反力等监测数据的绝对最大值与残余值，模态参数等。

8.1.7 雨雪及结冰应急管理宜符合下列规定：

a) 当桥面出现结冰、积雪、冰水混合物时，应提示禁止重轴载车通过并对路面进行检查和除冰，严重时可封闭交通；

b) 应提供桥梁雨雪及结冰分析报告，报告内容宜包括：雨雪及结冰前、雨雪及结冰事件全过程、雨雪及结冰后数据分析结果。数据分析宜符合下列规定：

1) 分析桥面温度、湿度、积雪厚度变化趋势；

2) 对雨雪及结冰全过程视频监测数据进行分析，评估车辆运行状况。

8.1.8 车辆火灾应急管理宜符合下列规定：

a) 发生车辆火灾时，应迅速疏散人员并启动消防程序，并考虑是否需要部分或全部封闭桥梁；

b) 应提供车辆火灾事故分析报告，报告内容宜包括：车辆火灾前、车辆火灾全过程、车辆火灾后数据分析结果。数据分析宜符合下列规定：

1) 对车辆火灾事故全过程视频监测数据进行分析；

2) 火灾扑灭后，应对桥梁进行全面检查，重点关注火灾影响区域；

3) 分析主梁振动加速度，主梁竖向位移、主梁关键截面静应变、主梁温度场、主梁局部模态等参数；

4) 分析车辆火灾后桥梁结构的剩余承载能力和耐久性。

8.1.9 暴雨应急管理宜符合下列规定：

a) 桥址处发生暴雨时，应提醒车辆限速等管理措施；

b) 桥址处存在滑坡、泥石流、洪峰等潜在灾害时，应关注潜在灾害发展动态，同时加强视频监测数据分析；

c) 桥址处发生滑坡、泥石流、洪峰等灾害时，应提供分析报告，报告内容宜包括：暴雨前、暴雨全过程、暴雨后数据分析结果。数据分析宜符合下列规定：

1) 分析降雨量、降雨持续时间、桥面积水及桥墩水位变化情况；

2) 分析主梁、悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索等振动加速度均方根值、模态参数变化。

8.1.10 桥址处发生大雾时，应提醒车辆限速，管理部门根据全线气象数据决定是否封闭交通。

8.1.11 桥梁监测系统突发断电应急管理宜符合下列规定：

a) 在断电期间，应加强人工巡检，特别是对桥梁的关键部位和潜在风险点进行重点检查，确保桥梁安全运行；

b) 若断电持续时间较长，应考虑采用备用电源或临时监测设备，以保障桥梁结构监测数据的连续性；

c) 若断电事件对桥梁结构安全造成严重影响，应提供分析报告，报告内容宜包括：断电前、断电期间（人工巡检数据）、断电恢复后数据分析结果。数据分析宜符合下列规定：

1) 分析断电原因、持续时间及恢复过程；

2) 评估断电对桥梁结构监测数据连续性的影响；

3) 根据人工巡检数据和断电恢复后的监测数据，分析在断电期间的桥梁结构状态。

8.2 报警信息应服务于桥梁日常管理和运营维护部门，对危及桥面行车安全、结构安全的情况及时发出警告信息，其报警信息管理流程可按图1所示设置。



图1 桥梁健康监测平台报警信息管理流程

8.3 报警信息发布

8.3.1 桥梁健康监测系统宜支持对异常事件触发、报警状态调整（包括自动升级和人工干预）、报警快讯/快报发布、应急响应措施等全过程事件的自动记录和归档，其中，报警快讯/快报发布、应急响应宜符合以下规定：

a) 报警快讯：可仅包含桥梁名称、报警时间、报警级别、触发方式、对应状态特征指标及超出阈值级别等信息，宜由系统自动通过电话、短信、微信、系统内信息等快捷通讯方式中的一种或多种第一时间通知相关责任人；

b) 报警快报：宜包含桥梁概况、报警前桥梁运行监测或检查的概况、报警触发过程及原因分析、对桥梁安全状态影响的预判、应急响应建议等内容，宜经技术会审后提交相关责任单位；

c) 应急响应：桥梁突发事件应急预案应与结构安全报警机制配套，并形成联动机制，宜定期对其有效性进行检查评估；桥梁结构安全报警后应快速启动相应的应急预案，统筹协调监测系统的报警管理机制，及时采取相应的应急响应措施，预防桥梁坍塌等恶性事故发生。

8.3.2 监控中心可同时设置指示灯、声音、可变情报板等报警提示方式；特殊事件需要进行交通管制时，可采取指示灯、声音、网络、短信提示、可变情报板、路侧广播牌等方式对外发布信息。

8.3.3 报警信息应服务于桥梁日常管理和运营维护部门，对危及桥面行车安全、结构安全的情况及时发出警告信息，其报警信息管理流程可按图1所示设置。

附录A 报警快讯模板

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 桥梁名称 |  | 报警时间 |  |
| 报警类别 |  | 报警内容 |  |
| 报警级别 |  | 触发方式 |  |
| 对应状态特征指标 |  |

附录B 报警快报模板

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 桥梁名称 |  | 报警时间 |  |
| 报警类别 |  | 报警内容 |  |
| 报警级别 |  | 触发方式 |  |
| 桥梁概况 |  |
| 报警前桥梁运行监测或检查的概况 |  |
| 报警触发过程及原因分析 |  |
| 桥梁安全状态影响预判 |  |
| 应急响应建议 |  |