
公路长大桥梁结构监测 时空大数据应用指引

公路长大桥梁结构监测 时空大数据应用指引

目 次

1	总则	1
2	单桥监测数据应用	2
2.1	单桥监测数据分析应用	2
2.2	单桥监测数据应用报告主要内容	16
3	省级监测数据应用	17
3.1	一般规定	17
3.2	省域长大桥梁运行状态分析	17
3.3	省域长大桥梁特殊事件分析	19
3.4	省级监测数据应用报告主要内容	20
附录 A	单桥应用场景	21
附录 B	省级应用场景	24

1 总则

1.0.1 为规范和指导公路长大桥梁结构监测数据分析应用，切实发挥监测数据在桥梁超限报警、应急响应、养护评估和基础研究等方面的重要作用，提升桥梁养护管理水平，制定本指引。

1.0.2 本指引适用于安装桥梁结构监测系统的公路长大桥梁，其他类型桥梁可参考使用。

1.0.3 进行监测数据分析时，宜根据需要结合其他信息进行。单桥监测数据结合桥梁养护管理等信息，省级监测数据结合公路基础数据以及气象、水文、地震等信息进行分析。

1.0.4 单桥监测系统和省级监测平台应保持良好的运行状态，采集存储的监测数据应确保完整、及时和准确。

2 单桥监测数据应用

2.1 单桥监测数据分析应用

2.1.1 单桥监测数据分析应用包括超限报警类、应急响应类和养护评估类数据分析应用。具备条件的桥梁，宜结合桥梁的环境、作用、结构等特点，开展面向长期性能等基础研究的数据采集和分析应用。养护评估类应用包括但不限于结构健康度评估、桥梁技术状况评定、桥梁适应性评定等。单桥主要数据分析内容和对应应用场景的汇总见本指引附录 A。

2.1.2 监测数据分析应符合下列规定：

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定期检查、定期检查与特殊检查数据进行分析。

2 监测数据分析应用前，应根据监测数据中错误数据特征，剔除错误数据，保证监测数据分析结果的可靠性。可采用设置合理阈值、统计特征分析、机器学习等方法进行错误数据剔除。

3 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、机器学习或其他可靠方法。

4 监测数据分析样本时长，宜根据监测内容的特征确定。各监测内容分析样本时长可参考表 2.1.2。

表 2.1.2 各监测内容分析样本时长

监测类别		最短样本时长
环境	温度	10min
	湿度	10min
	雨量	10min
作用	车辆荷载	触发式
	风速、风向	3s(阵风风速)、2min(与气象风速对比时)、10min
	风压	10min
	结构温度	10min
	船舶撞击	船舶撞击过程持续时间，船舶撞击前 20min、撞击中、撞击后 20min
	地震	地震持续时间，地震前 20min、地震中、地震后 20min

续表 2.1.2

监测类别		最短样本时长
响应	位移	10min
	转角(倾角)	10min
	应变	静态应变: 1h; 动态应变: 60s
	索力	压力传感器数据: 1h; 加速度传感器数据: 10min
	支座反力	10min
	振动	1min(用于分析短时车致振动时)、10min
变化	基础冲刷	1个月
	锚碇位移	1d(自动化监测)、1个月(人工定期监测)
	拱脚位移	1d(自动化监测)、1个月(人工定期监测)
	裂缝	裂缝计数据: 10min
	腐蚀	1个月
	拉索断丝	每次声发射信号触发: 每次 5ms(采样频率 2MHz)
	螺栓紧固力	10min
	索夹滑移	10min

5 环境监测数据分析应符合下列规定:

1) 温度监测数据应分析最高温度、最低温度、最大温差, 宜用于温度作用与效应及其相关性分析, 辅助养护决策。

2) 湿度监测数据应分析最大值、平均值和超限持续时间等, 宜分析湿度时空分布以及单个测点湿度与累积持续时间频次分布。监测结果可用于提升桥梁相关部件附属机电设备(如除湿机)工作效率, 也可用于针对性检查、辅助养护决策以及结构耐久性基础研究。

3) 雨量监测数据宜分析 10min 平均降雨量, 结合风速风向、拉索振动数据, 分析斜拉索的风雨激振。

4) 桥面、缆、索、吊杆结冰超声波检测和视频监控数据宜分析结冰位置、范围和程度, 指导桥面、缆索等构件除冰及车辆通行管控。

条文说明

采用视频信号分析桥面和缆索覆冰情况时, 以结冰图像为输入, 以是否结冰和结冰位置、范围与程度为输出, 构建并训练覆冰识别的神经网络, 根据神经网络输出结果和图像位置, 判断桥面、缆、索、吊杆是否结冰、结冰位置、范围与程度。采用超声导波对缆、索和吊杆进行覆冰监测时, 需在构件表面安装超声导波收发换能器, 通过接收的导波信号特征分析结冰程度。超声导波对称模态的波速和幅值存在随覆冰厚度增加而降

低的特性，可以通过分析上述超声导波特征参数来分析覆冰厚度。此外，还需考虑环境温度变化对导波传播特征的影响，可以采用主成分分析法剔除温度影响。

6 作用监测数据分析应符合下列规定：

1) 车辆荷载监测数据应分析车流量、轴重、车重，超载车数量、车重、轴重和出现时间，宜分析年极值、车辆疲劳荷载谱和校验系数，可用于超载车辆管控、车流量预测、实测车辆荷载作用下的疲劳评估，也可用于研究结构刚度长期退化规律、辅助养护决策、支撑基础研究。车辆疲劳荷载谱可基于等效疲劳损伤累积和 Miner 准则统计，校验系数可参照《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01—2015)中的方法进行计算。

2) 风速风向监测数据应分析 10min 平均风速、风向，绘制风玫瑰图，平均风向求解宜采用矢量法，可用于实桥风效应分析，指导车辆通行管控。风压监测数据宜分析 10min 平均风压、计算均方根值，可用于桥梁风荷载基础研究。

条文说明

10min 平均风速、风向可按下列式计算：

$$U = \sqrt{(\bar{u}_x)^2 + (\bar{u}_y)^2} \quad (2-1)$$

$$\theta = \begin{cases} \arccos\left(\frac{\bar{u}_x}{U}\right), & \bar{u}_y \geq 0 \\ 360^\circ - \arccos\left(\frac{\bar{u}_x}{U}\right), & \bar{u}_y < 0 \end{cases} \quad (2-2)$$

式中， U 为 10min 水平平均风速； θ 为 10min 平均风向角； \bar{u}_x 、 \bar{u}_y 分别为水平向监测风速 u_x 和 u_y 的 10min 平均值。

3) 结构温度监测数据应分析温度最大值、最小值、最大梯度和年极值。可用于温度作用下构件和结构的温度场分布分析和长期性能的基础研究，还可用于其他监测内容的温度补偿。桥面铺装层温度分析可用于高温预警、辅助指导洒水降温等养护决策。

7 结构响应监测数据分析应符合下列规定：

1) 主梁竖向和横向位移、塔顶和主缆偏位、高墩墩顶位移和拱顶位移监测数据应分析平均值、绝对最大值、均方根值及其随时间变化规律，应分析主梁下挠、塔顶和主缆及主拱偏位、桥墩沉降等趋势，用于判断结构整体、构件位移异常变化以及超限报警，判断是否出现影响结构安全的持续变形趋势，评估结构安全状态，辅助指导桥梁构件检查和维修加固等养护决策。

条文说明

主梁竖向和横向位移、塔顶和主缆偏位、高墩墩顶位移和拱顶位移监测数据随时间变化规律主要通过绘制平均值、绝对最大值、均方根值等统计指标的时程图，分析其单

调增加、单调减小及剧烈程度等特性。主梁下挠、塔顶和主缆及主拱偏位、桥墩沉降等趋势可以采用中值滤波等趋势项分析方法获得数据随时间的缓变规律。中值滤波计算方法可以参照下列步骤：

(1) 定义长度为 L_a 的中值滤波窗口， $L_a = 2a + 1$ ， a 为正整数。例如， $a = 100$ ， $L_a = 201$ ，即取 201 个样本点。

(2) 对 L_a 数据点按大小进行排序，取序列中间位置数据值为中值滤波值：

$$mx(i) = \text{Medium}[x(i-a), \dots, x(i), \dots, x(i+a)] \quad (2-3)$$

式中， x 表示监测数据的离散信号点； mx 表示中值滤波值；Medium 表示取中位数运算。

(3) 所有中值滤波值形成新的数据序列，即为监测数据的趋势项。

2) 支座位移和梁端纵向位移监测数据应分析平均值、绝对最大值、均方根值和绝对值累积量，宜分析与温度的相关性，并结合振动及模态数据识别支座、伸缩装置的异常和边界条件变化。对于滑动支座，应结合支座位移监测数据和其他检测数据(聚四氟乙烯滑板滑动能力等)进行分析，评估支座工作状态，辅助支座修复或更换等养护决策；对于模数式伸缩装置，宜监测其纵向伸缩均匀性和横向对称性，评估伸缩装置的变形协调性，辅助伸缩装置修复或更换等养护决策。

3) 塔顶截面倾角、梁端水平和竖向转角监测数据应分析平均值、绝对最大值、均方根值及其随时间变化规律，宜与位移数据进行对比较核，判断桥梁部件、构件倾斜情况，分析桥塔变形规律，判断伸缩装置和支座工作状态，辅助桥梁构件检查等养护决策。

4) 主梁关键截面应变监测数据应分析平均值、绝对最大值、主梁疲劳累积损伤指数；通过雨流法计算主梁疲劳累积损伤指数，评估主梁疲劳损伤状态；索塔、主拱关键截面应变监测数据应分析平均值、绝对最大值，评估索塔、主拱关键截面的受力水平、分布及变化趋势；综合上述分析结果，辅助桥梁构件检查等养护决策。

5) 悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)等索力监测数据应分析平均值、最大值、最小值、均方根值、疲劳累积损伤指数及其随时间变化趋势。可采用振动频率法计算索力，通过索力极值判断索结构受力状态；可采用直接测力法计算索构件疲劳累积损伤指数，评估索构件疲劳损伤程度。悬索桥锚跨索股力和拱桥系杆索力监测数据应分析最大值、最小值和变化趋势，可用于分析悬索桥锚跨索股力和拱桥系杆受力状态变化。监测索力宜与成桥索力、设计值、破断索力以及定期检测索力进行比对性分析，评估索力变化以及拉索的安全冗余度。综合上述分析结果，辅助缆索构件检查等养护决策。

条文说明

采用加速度计测量拉/吊索索力时，首先计算测量加速度信号功率谱，通过功率谱峰值所对应频率识别拉/吊索自振频率，再通过下式计算拉/吊索索力 T ：

$$T = 4mL^2 \frac{f_n^2}{n^2} - n^2 \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2-4)$$

式中， n 为拉/吊索振动模态阶数； m 为拉/吊索单位长度质量； f_n 为拉/吊索第 n 阶自振频率； L 为拉/吊索长度； EI 为拉/吊索截面抗弯刚度。

当采用索力计或压力环直接测量拉/吊索索力时，将索力监测值除以索构件净截面面积得到应力时程，再利用雨流法计算拉/吊索疲劳累积损伤指数。

6) 支座反力监测数据宜分析平均值、最大值、最小值及其随时间变化规律，可通过与支座反力超限阈值比对，分析支座反力超限的程度、持续时间和出现频次，可用于判断支座工作状态和上部结构荷载，辅助指导支座检查维修等养护决策。

7) 主梁竖向横向纵向、塔顶横向纵向、悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、梁桥桥墩顶部纵向和横向、拱桥主拱和吊杆(索)振动监测数据应分析绝对最大值、均方根值、频谱，辅助车辆通行管控决策；宜进行桥梁自振频率、振型等模态参数分析，模态参数应剔除环境等因素影响，判断桥梁结构整体性能变化。通过索 10min 加速度均方根值判别索异常振动，辅助索构件检查维修等养护决策。

条文说明

桥梁模态参数反映桥梁整体动力特性，可以采用频域分解法(FDD)、随机子空间方法(SS1)、机器学习方法或其他可靠的结构模态识别方法进行桥梁结构模态参数识别。桥梁模态参数识别结果易受到温度等环境变量影响而产生变化，因此需要采用回归分析或其他可靠方法，剔除环境变量对模态参数的影响，再利用剔除环境影响后的模态参数分析桥梁服役状态的变化。

8 结构变化监测数据分析应符合下列规定：

1) 桥墩基础冲刷监测数据宜分析冲刷深度最大值、冲刷范围及其变化规律。可用于评估桥梁水毁风险，也可用于桥梁有限元模型修正、结构安全评估，辅助桥梁检查等养护决策。

2) 主缆锚碇位移、拱脚位移监测数据应分析其是否发生变化，可用于判断主体结构安全风险，也可用于桥梁超限报警。

3) 混凝土结构和钢结构裂缝监测数据宜分析裂缝长度、宽度、数量、位置及其随时间变化规律，可分析裂缝与荷载和结构构造的相关性，可用于结构长期性能基础研究，辅助桥梁构件养护加固等养护决策。结构裂缝监测可采用裂缝传感器、计算机视觉方法或其他可靠方法。

条文说明

可以分析裂缝产生原因及其与荷载、特殊构造之间的关系。例如，车辆荷载长期作

用导致结构疲劳产生裂缝或者特殊构造导致应力集中产生裂缝。

4)墩身、承台混凝土腐蚀监测数据，宜分析氯离子浓度，侵蚀深度最大值、最小值、梯度及其变化趋势，可用于混凝土耐久性基础研究，评估桥梁构件腐蚀发展程度及趋势，辅助桥梁防腐等养护决策。

5)悬索桥主缆和吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)和系杆断丝监测数据宜分析断丝位置和程度，辅助索结构检查、维修及换索等养护决策。

条文说明

可以采用声发射技术监测拉/吊索断丝。当声发射传感器监测到断丝产生的声发射信号时，通过傅里叶分析声发射信号高频成分幅值大小，判断拉/吊索是否发生断丝。当声发射信号高频成分幅值较大时，可以判定拉/吊索发生断丝。当拉/吊索底部和顶部同时安装声发射传感器时，可以根据声发射信号在拉/吊索中的传播速度以及声发射信号到达两个传感器的时间差，对断丝位置进行定位。

6)索夹螺杆紧固力、高强螺栓紧固力和螺栓滑脱监测数据宜分析数量、位置、程度和变化趋势，辅助螺栓检查、紧固及补装等养护决策。

7)索夹滑移监测数据宜分析数量、程度和变化趋势。通过索夹滑移程度，判断索夹整体工作状态，分析滑移风险，辅助养护决策。

8)体外预应力监测数据宜分析预应力变化程度和趋势，通过分析体外预应力下降速率，辅助养护决策。

9 宜分析不同类型监测内容之间、相同类型监测内容之间数据相关性，包括环境、作用与结构响应、结构变化之间的相关性，不同构件、不同测点的结构响应、结构变化之间的相关性等，进行相关性分析的测点可根据桥梁力学分析选择。分析方法可采用皮尔逊相关系数法、机器学习或其他可靠方法。相关性分析结果可与其他监测项分析结果结合，用于判断对应构件服役状态是否异常，辅助结构检查等养护决策。

条文说明

温度-结构响应相关性分析可以按下列步骤进行：

(1)选择待分析的结构响应测点和环境温度测点，有可靠的结构温度测点时也可以选用结构温度测点，以天为单位，采用中值滤波法提取结构响应中的温度趋势项 $mx(t_i)$ ，滤波窗口 L_a 中 a 取 5min 对应的时间序列长度。

(2)计算温度序列 $T(t_i)$ 和结构响应趋势项序列 $mx(t_i)$ 的皮尔逊相关系数 $C(T, mx)$ 。

(3)采用系统运营初期 1 年内的监测数据为样本，计算其相关系数的均值 μ_c 和标准差 σ_c 。当监测数据相关系数超出 $[\mu_c - 3\sigma_c, \mu_c + 3\sigma_c]$ 范围时，可以认为结构状态发生异常。

响应-响应相关性分析可以按下列步骤进行:

(1) 选择待分析的结构响应测点 X 及测点 Y , 以天为单位剔除结构响应中的温度趋势项 $mx(t_i)$ 和 $my(t_i)$ 。

(2) 对于具有线性相关的测点监测数据可计算皮尔逊相关系数 C , 采用系统运营初期 1 年内的监测数据为样本, 计算其相关系数的均值 μ_C 和标准差 σ_C 。当监测数据相关系数超出 $[\mu_C - 3\sigma_C, \mu_C + 3\sigma_C]$ 范围时, 可以认为结构状态发生异常。

(3) 监测数据可以采用机器学习方法进行分析, 可以按下列步骤进行:

① 采用系统运行初期 1 个月的监测数据形成去除温度趋势的监测数据集 $\{X, Y\}$ 。

② 设计神经网络, 网络的预测长度可以根据计算资源选择, 如 1 200 步, 从数据集 $\{X, Y\}$ 中进行采样, 形成与预测步长一致的训练集 $\{x, y\}$, 以序列 x 为输入, 以序列 y 为输出, 对神经网络进行训练。

③ 计算真实值与网络预测值的差值 $\Delta = y - G(x; \theta)$, 计算系统运营初期 1 个月内的数据集预测差值的均值 μ_Δ 和标准差 σ_Δ 。

④ 将待分析的监测数据输入训练完成的神经网络, 计算预测差值 Δ 。当预测差值 Δ 超出 $[\mu_\Delta - 3\sigma_\Delta, \mu_\Delta + 3\sigma_\Delta]$ 范围时, 可以认为结构状态发生异常。

2.1.3 超限报警应符合下列规定:

1 超限阈值应分为三级, 当监测数据超过各级超限阈值时, 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。宜根据监测数据报警类型与超限等级, 制定相应的桥梁检查、养管措施。应将二级及以上的超限报警信息, 通过单桥系统上报省级监测平台。

2 各级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、特殊事件应急响应等桥梁监测应用需求。监测数据超限阈值可依据《公路桥梁结构监测技术规范》(JT/T 1037—2022) 表 9 的规定设定。超限阈值可根据桥梁健康度和技术状况进行调整。当桥梁健康度评估为Ⅲ级中等异常及以上或者桥梁技术状况评定结果为 3 类及以上时, 可结合桥梁所处线路位置和车辆荷载, 适当调整各级监测数据报警阈值, 报警阈值调整幅度宜结合桥梁特点通过专家论证确定。

3 监测数据超限时, 应分析超限监测数据类型与超限等级, 宜参照《公路桥梁结构监测技术规范》(JT/T 1037—2022) 表 10 的规定提出检查建议。

4 宜根据监测数据超限分析结果, 结合《公路缆索结构体系桥梁养护技术规范》(JTG/T 5122—2021) 和《公路桥涵养护规范》(JTG 5120—2021) 的相关规定制定检查和养护措施。

2.1.4 特殊事件应急响应应符合下列规定:

1 桥梁在遭受涡振、台风, 悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)等异常振动, 地震、车辆超载、船撞等特殊事件时, 应对特殊事件全过程监测数据进行分析, 辅

助应急响应决策，并评估结构健康度，必要时组织专家研判。

2 涡振应急响应应符合下列规定：

1) 宜采用 10min 加速度均方根值 S_y 和振动能量比因子 R 作为涡振判定指标，也可补充其他参数。 S_y 和 R 按下列公式计算：

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{y}_i^2} \quad (2.1.4-1)$$

$$R = \frac{p_1}{p_2} \quad (2.1.4-2)$$

式中， S_y 为加速度均方根值； \dot{y} 为主梁振动加速度； N 为 10min 加速度采样点数； p_1 为结构振动响应功率谱密度中最大幅值； p_2 为次最大幅值。

2) 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。

3) 涡振超限阈值宜按《公路桥梁结构监测技术规范》(JT/T 1037—2022) 表 9 的规定选取，检查建议及处置措施宜符合下列规定：

a) 超限一级，应持续关注结构状态；

b) 超限二级，宜采取车辆限速等管理措施；

c) 超限三级，宜封闭桥梁，按本指引第 2.1.5 条相关规定进行桥梁结构健康度评估。

4) 应编制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、涡振后数据分析与涡振超限管理和处置结果。数据分析宜包括下列内容：

a) 桥面 10min 平均风速、平均风向、风攻角、湍流度；

b) 主梁 10min 加速度均方根值，固有频率、阻尼比等模态参数变化；

c) 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。

条文说明

10min 平均风攻角按下式计算：

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\bar{u}_z}{U} \right) \quad (2-5)$$

式中， α 为 10min 平均风攻角； \bar{u}_z 为竖向瞬时风速 u_z 在 10min 内的平均值； U 为 10min 水平平均风速。

湍流度宜按下式计算：

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U}, \quad I_v = \frac{\sigma_v}{U}, \quad I_w = \frac{\sigma_w}{U} \quad (2-6)$$

式中， I_u 、 I_v 和 I_w 分别为顺风向、横风向和竖向湍流度； σ_u 、 σ_v 和 σ_w 分别为顺风向、横风向和竖向脉动风速 $u(t)$ 、 $v(t)$ 和 $w(t)$ 在 10min 内的均方根值。

$$\begin{aligned} u(t) &= u_x(t) \cos(\theta) + u_y(t) \sin(\theta) - U \\ v(t) &= -u_x(t) \sin(\theta) + u_y(t) \cos(\theta) \\ w(t) &= u_z(t) - \bar{u}_z \end{aligned} \quad (2-7)$$

式中, u_x 、 u_y 、 u_z 分别为风速仪 x 、 y 和 z 方向监测瞬时风速; θ 为 10min 时距平均风向角。

3 台风应急响应符合下列规定:

1) 风速超限阈值宜按《公路桥梁结构监测技术规范》(JT/T 1037—2022) 表 9 的规定选取, 处置措施宜符合下列规定:

- a) 超限一级, 宜封闭桥梁;
- b) 超限二级, 宜检查桥梁构件状态;
- c) 超限三级, 宜检查桥梁构件状态, 并按本指引第 2.1.5 条的规定进行桥梁健康度评估。

2) 应编制桥梁台风事件分析报告, 报告内容宜包括台风前、台风全过程、台风后数据分析与超限管理和处置结果。数据分析宜包括下列内容:

- a) 桥面 10min 平均风速、平均风向、风攻角、湍流度、阵风因子;
- b) 主梁、悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)等振动加速度均方根值、模态参数变化;
- c) 主梁竖向和横向位移、塔顶偏位、主缆偏位、主拱拱顶位移、索力基准值变化等最大值。

条文说明

阵风因子 g_u 宜按下式计算:

$$g_u = \frac{u_{\max,3s}}{U} \quad (2-8)$$

式中, $u_{\max,3s}$ 为 10min 内瞬时风速时程每 3s 平均值中的最大值。

4 悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)等索构件振动加速度超限二级, 应检查减振设施有效性并提供异常振动事件分析报告, 报告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。数据分析宜包括下列内容:

- 1) 桥面 10min 平均风速、平均风向、风偏角、风攻角、降雨量;
- 2) 索构件 10min 加速度均方根值、模态参数变化;
- 3) 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;
- 4) 索构件索力基准值变化;
- 5) 索构件异常振动类型。

条文说明

索构件异常振动类型主要包括拉索多模态涡激振动、斜拉索风雨振、拉索驰振、拉

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/407062102056010004>