

JT

中华人民共和国交通运输行业标准

JT/T 1037—202X

代替 JT/T 1037—2022

公路桥梁结构监测技术规范

Technical specifications for structural monitoring of highway bridges

（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。

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中华人民共和国交通运输部 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 2

4 总体要求 3

5 基本规定 3

6 监测内容 3

7 监测测点布设 11

8 监测方法 14

9 监测系统 19

10 数据管理 25

11 监测应用 27

附录 A（资料性）测点布设示意图 41

附录 B（资料性）监测内容基本信息定义 46

附录 C（资料性）监测系统数据字典定义 48

附录 D（资料性）实时数据传输协议 53

附录 E（资料性）实时数据传输协议 57

参考文献 62

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。

本文件代替JT/T 1037—2022《公路桥梁结构监测技术规范》。与JT/T 1037—2022相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术内容变化如下：

- a) 更改了文件适用范围（见第1章，2022年版的第1章）；
- b) 更改了术语“桥梁结构监测”的定义（见3.1，2022年版的3.1），增加了“公路桥梁群”“数据采集点”“数据归集站”“风险场景”的术语和定义（见3.3、3.8、3.9、3.10）；
- c) 更改了总体要求（见第4章，2022年版的第4章）；
- d) 更改了基本规定（见第5章，2022年版的第5章）；
- e) 更改了监测内容分类及确定的规定（见6.1.1、6.1.2，2022年版的6.1.1、6.1.2）；
- f) 更改了梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥的监测内容（见6.2~6.5，2022年版的6.2~6.5）；
- g) 增加了“风险场景监测”的内容（见6.6）；
- h) 更改了监测测点的布设要求（见第7章，2022年版的第7章）；
- i) 更改了监测方法（见第8章，2022年版的第8章）；
- j) 更改了监测系统的要求，并增加了以公路桥梁群方式开展监测时各单桥系统软件统一协同、共享复用的要求；（见第9章，2022年版的第9章）
- k) 更改了数据管理的要求，并增加了数据质量评价要求（见第10章，2022年版的第10章）；
- l) 更改了监测应用的一般规定（见11.1，2022年版的11.1）；
- m) 更改了监测数据分析的要求（见11.2，2022年版的11.2）；
- n) 更改了超限报警及处置规定，其中增加了多指标联合报警、风险场景监测超限报警的规定要求，更改了超限报警等级与部分超限报警的阈值设定准则（见11.3，2022年版的11.3、11.4）；
- o) 增加了风险场景监测数据超限检查建议（见11.5.1）；
- p) 更改了结构健康度评估的规定（见11.5.2、11.5.4，2022年版的11.6.1、11.6.4）；
- q) 增加了监测应用中基础研究的有关规定（见11.6）；
- r) 增加了数据分析报告的分类、频次和内容的规定（见11.7）。

本文件由全国交通工程设施（公路）标准化技术委员会（SAC/TC 223）提出并归口。

本文件起草单位：中交公路规划设计院有限公司、哈尔滨工业大学、交通运输部公路科学研究所、同济大学、中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司、中交公规土木大数据信息技术（北京）有限公司。

本文件主要起草人：刘晓东、李惠、李娜、孙利民、欧进萍、宋晖、邬都、李万恒、叶志龙、袁洪、张革军、李龙、刘志强、王晓晶、鲍跃全、李小龙、何秋雨、刘天成、孙小飞、刘芳亮、闫昕、崔营营、夏烨、阮欣、赖马树金、张东昱、黄永、周文松、徐文城、程潜、韦韩、李晓龙、毛幸全、韩帅、刘洋、张照辉、徐阳、李鑫、侯榕榕、韩飞杨、谷雨、时笑鹏。

本文件的历次版本发布情况为：

——2016年首次发布为JT/T 1037—2016。

——2022年第一次修订为JT/T 1037—2022。

——本次为第二次修订。

公路桥梁结构监测技术规范

1 范围

本文件规定了公路桥梁结构监测技术的总则、基本规定、监测内容、监测测点布设、监测方法、监测系统、数据管理和监测应用。

本文件适用于公路桥梁结构的监测，以及公路桥梁结构监测系统的设计、建设、运营、维护与应用，其他桥梁参照使用。

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 4208 外壳防护等级（IP代码）
- 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 15395 电子设备机柜通用技术条件
- GB/T 15532 计算机软件测试规范
- 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 22239 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求
- GB/T 25070 信息安全技术 网络安全等级保护安全设计技术要求
- GB/T 31167 信息安全技术 云计算服务安全指南
- GB/T 31168 信息安全技术 云计算服务安全能力要求
- GB/T 32630 非结构化数据管理系统技术要求
- GB/T 33697 公路交通气象监测设施技术要求
- GB/T 37048 高速公路机电系统防雷技术规范
- GB/T 39410 低轨星载GNSS测量型接收机通用规范
- GB 50052 供配电系统设计规范
- GB 50054 低压配电设计规范
- 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
- GB 50982 建筑与桥梁结构监测技术规范
- JJF 1305 线位移传感器校准规范
- JT/T 132 公路数据库编目编码规则
- JTG/T 3360—01 公路桥梁抗风设计规范
- JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG/T 3365—01 公路斜拉桥设计规范
- JTG 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 D60 公路桥涵设计通用规范
- JTG/T D65—05 公路悬索桥设计规范
- JTG/T D65—06 公路钢管混凝土拱桥设计规范
- JTG/T H21 公路桥梁技术状况评定标准
- ISO 2631—1 人体承受全身振动的评价标准 第1部分：一般要求(Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

桥梁结构监测 bridge structural monitoring

一种对桥梁所设定的参数，应用仪器设备以人工或自动方式按照适用的频次进行实时或连续观测与记录，获取桥梁环境、作用、结构响应与结构变化的定量数据，进而评估桥梁结构技术状况和工作性能的成套技术体系。

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

公路桥梁群 highway bridge cluster

以线路路段、管辖区域或管养单位等为监测管理单元涵盖的所有桥梁的集合。

3.4

环境 environmental factors

影响桥梁安全和功能的桥址自然环境因素。

3.5

作用 action

桥梁所受的直接荷载或间接荷载。

3.6

结构响应 structural response

由作用引起的桥梁构件、部件、结构的静力或动力响应。

3.7

结构变化 structural variation

以桥梁结构成桥状态或某一规定时刻状态为基准，桥梁构件、部件、结构在使用中几何形态和表现、结构性能发生的相对变化。

3.8

数据采集点 data acquisition

覆盖单座桥或单跨范围的监测数据采集与分发节点。

3.9

数据归集站 data hub

公路桥梁群内多个数据采集点的数据统一汇聚与分发站点。

3.10

风险场景 risk scenario

由外部环境、作用、结构自身等因素可能导致桥梁结构出现可预见失效模式或不利后果的风险情境。

3.11

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。

3.12

超限报警 over-limit alarming

监测数据的特征指标达到或超过超限阈值时，系统自动发出相应级别的警报。

3.13

桥梁结构健康度 bridge structural health level

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

4 总体要求

4.1 下列情形的公路桥梁，应开展结构监测，并应构建桥梁结构监测系统（以下简称监测系统）：

- a) 单孔跨径不小于 150m 的桥梁，构建全方位监测系统；
- b) 单孔跨径不小于 60m 且小于 150m 的桥梁，构建重要指标监测系统；
- c) 单孔跨径不小于 40m 且小于 60m、单孔跨径小于 40m 且多孔跨径不小于 100m，并且风险等级较高及以上的桥梁，构建风险场景监测系统；
- d) 经评定需要构建监测系统的其他桥梁。

4.2 桥梁结构监测应采用人工观测、系统监测或两者相结合的方式。

4.3 宜综合考虑桥梁所属路段、区域、环境特点、结构类型、技术状况和风险管控等因素，以公路桥梁群（以下简称桥梁群）方式进行集约化高效监测。

4.4 桥梁结构监测技术应自主可控、先进适用。

4.5 桥梁结构监测应鼓励采用北斗卫星导航、数字孪生、5G/6G 移动通信、大数据、人工智能、无人机与机器人等新技术和新设备。

4.6 监测系统应稳定可靠、经济实用、安全网联，便于维护和升级扩容。

4.7 监测系统宜与外部系统互联互通、数据共享，实时展示监测结果。

4.8 采用人工观测方式应优先执行 JTG 5120—2021 相关规定，采用系统监测方式应优先执行本文件的规定。

5 基本规定

5.1 对于联跨数目众多的桥梁，宜综合考虑桥址环境、风险评估、结构特点、受力特性、构造差异、施工缺陷及技术状况等因素，选取代表性、控制性或高风险桥跨进行监测。

5.2 应根据桥梁的桥址环境、荷载作用、构造特点、受力特性、技术状况、风险评估、耐久性分析结果和监测应用需求确定监测内容、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。

5.3 监测系统建设应分为系统设计、系统实施、系统试运行、系统验收、系统运维和数据管理及应用阶段。

5.4 监测系统应由系统硬件、系统软件和配套工程构成。

5.5 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、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。

6 监测内容

6.1 一般规定

6.1.1 监测内容宜包括环境、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。

6.1.2 根据桥梁型式、风险场景或两者相结合的方式确定监测内容，并符合下列规定：

- a) 应基于桥梁环境作用特点和结构构造特性，以识别风险、发现隐患、报告事故、指引检查、指导养护、预测退化为目的，根据超限报警、应急管理、养护评估和基础研究的应用需求确定监测内容；
- b) 开展重要指标监测的桥梁，监测内容应包括 6.2~6.5 所规定的应选监测项，宜根据结构特点、技术状况和养护需求增加其他关键指标；

- c) 开展基于风险场景监测的桥梁，宜针对性、靶向化开展监测，精简监测内容；
- d) 以桥梁群方式开展监测的桥梁，监测内容应统筹兼顾、协同共用。
- 6.1.3 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。
- 6.1.4 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。

6.2 梁桥监测内容

梁桥监测内容应符合表1的规定。

表 1 梁桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	温度、湿度	桥址区环境温度、湿度	○
		主梁内温度、湿度 ^a	◎
	结冰	桥面结冰	◎
	桥址环境	视域图像	◎
	雨量	降雨量	◎
	水位	水位	◎
作用	车辆荷载	所有车道车流量、车重、轴重、轴数、车速	○
		所有车道的车辆空间分布视域图像	◎
	风速、风向	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	○
		视域图像	○
	地震	桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度	○
结构响应	位移	主梁竖向位移	●
		支座位移	○
		梁端纵向位移	○
		高墩墩顶位移	○
	转角	主梁横向转角	◎
		桥墩倾斜	◎
	应变	主梁关键截面应变	○
	支座反力	支座反力	◎
	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、承台混凝土氯离子侵蚀深度	◎
	预应力	体外预应力	◎
	螺栓状态	高强螺栓紧固力、螺栓滑脱	◎

表 1 梁桥监测内容（续）

监测类别	监测内容	监测选项
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。		

6.3 拱桥监测内容

拱桥上承式拱桥监测内容应符合表2的规定，中承式或下承式拱桥监测内容应符合表3的规定。

表 2 上承式拱桥监测内容

监测类别	监测内容	监测选项
环境	桥址区环境温度、湿度	○
	主梁内温度、湿度 ^a	◎
	主拱内温度、湿度 ^b	◎
	结冰	桥面结冰 ◎
	桥址环境	视域图像 ◎
	雨量	降雨量 ◎
	水位	水位 ◎
作用	车辆荷载	所有车道车流量、车重、轴重、轴数、车速 ○
		所有车道的车辆空间分布视域图像 ◎
	风速、风向	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 ○
		视域图像 ○
	地震	桥岸地表场地加速度 ◎
		承台顶或桥墩底部加速度 ○
结构响应	位移	主梁竖向位移 ●
		主梁横向位移 ○
		支座位移 ○
		梁端纵向位移 ○
		拱顶位移 ●
	应变	主梁关键截面应变 ○
		主拱关键截面应变 ○
	支座反力	支座反力 ◎
	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 ◎
		主拱振动加速度 ●
结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度 ◎
	位移	拱脚位移 ●
	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 ◎

表2 上承式拱桥监测内容（续）

监测类别		监测内容	监测选项
结构变化	腐蚀	墩身、承台混凝土氯离子侵蚀深度	◎
	螺栓状态	高强螺栓紧固力、螺栓滑脱	◎
注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项。			
^a 仅适用于封闭箱梁。			
^b 仅适用于箱形拱。			

表3 中承式或下承式拱桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	温度、湿度	桥址区环境温度、湿度	●
		主梁内温度、湿度 ^a	○
		主拱内温度、湿度 ^b	○
	结冰	桥面结冰、吊杆结冰	◎
	桥址环境	视域图像	○
	雨量	降雨量	◎
	水位	水位	◎
作用	车辆荷载	所有车道车流量、车重、轴重、轴数、车速	●
		所有车道的车辆空间分布视域图像	◎
	风速、风向	桥面风速、风向	●
		拱顶风速、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	○
		视域图像	○
	地震	桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度	○
结构响应	位移	主梁竖向位移	●
		主梁横向位移	○
		支座位移	○
		梁端纵向位移	○
		拱顶位移	●
	应变	主梁关键截面应变	●
		主拱关键截面应变	○
	索力	吊杆（索）力	●
		系杆力	●
	支座反力	支座反力	◎
	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	◎
		主拱振动加速度	●
		吊杆（索）振动加速度	●
结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度	◎

表 3 中承式或下承式拱桥监测内容（续）

监测类别		监测内容	监测选项
结构变化	位移	拱脚位移	●
	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、承台混凝土氯离子侵蚀深度	◎
	断丝	吊杆（索）或系杆断丝	◎
	螺栓状态	高强螺栓紧固力、螺栓滑脱	◎
注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项。			
^a 仅适用于封闭箱梁。			
^b 仅适用于箱形拱。			

6.4 斜拉桥监测内容

斜拉桥监测内容应符合表4的规定。

表 4 斜拉桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	温度、湿度	桥址区环境温度、湿度	●
		主梁内温度、湿度 ^a	●
		索塔锚固区温度、湿度	●
	雨量	降雨量	◎
	结冰	桥面结冰、斜拉索结冰	◎
	桥址环境	视域图像	○
	水位	水位	◎
作用	车辆荷载	所有车道车流量、车重、轴重、轴数、车速	●
		所有车道的车辆空间分布视域图像	◎
	风速、风向	桥面风速、风向	●
		塔顶风速、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	○
		视域图像	○
	地震	桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度	○
结构响应	位移	主梁竖向位移	●
		主梁横向位移	○
		支座位移	●
		梁端纵向位移	●
		塔顶偏位	●
	转角	塔顶转角	○
		梁端水平转角	○
结构响应	转角	梁端竖向转角	●
	应变	主梁关键截面应变	●

表4 斜拉桥监测内容（续）

监测类别		监测内容	监测选项
结构响应	应变	索塔关键截面应变	◎
	索力	斜拉索索力	●
	支座反力	支座反力	◎
	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	◎
		塔顶水平双向振动加速度	●
		斜拉索振动加速度	●
结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度	◎
	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、承台混凝土氯离子侵蚀深度	◎
	预应力	体外预应力	◎
	断丝	斜拉索断丝	◎
	螺栓状态	高强螺栓紧固力、螺栓滑脱	◎
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；			

6.5 悬索桥监测内容

悬索桥监测内容应符合表5的规定。

表5 悬索桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	温度、湿度	桥址区环境温度、湿度	●
		主梁内温度、湿度 ^a	●
		主缆内温度、湿度	○
		锚室内温度、湿度 ^b	●
		鞍罩内温度、湿度	●
		索塔内温度、湿度	○
	结冰	桥面结冰、吊索结冰	◎
	桥址环境	视域图像	○
	雨量	降雨量	◎
	水位	水位	◎
作用	车辆荷载	所有车道车流量、车重、轴重、轴数、车速	●
		所有车道的车辆空间分布视域图像	◎
	风速、风向	桥面风速、风向	●
		塔顶风速、风向	●
	风压	主梁风压	◎
	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	○

表5 悬索桥监测内容（续）

监测类别		监测内容	监测选项
作用	船舶撞击	视域图像	○
	地震	桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度	○
结构响应	位移	主梁竖向位移	●
		主梁横向位移	●
		支座位移	●
		梁端纵向位移	●
		塔顶偏位	●
		主缆偏位	○
	转角	塔顶转角	◎
		梁端水平转角	○
		梁端竖向转角	●
	应变	主梁关键截面应变	●
		索塔关键截面应变	◎
	索力	吊索索力	●
		锚跨索股力	●
	支座反力	支座反力	◎
	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	○
		塔顶水平双向振动加速度	●
		吊索振动加速度	●
结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度	◎
	位移	锚碇位移	○
	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、承台混凝土氯离子侵蚀深度	◎
	断丝	吊索、主缆断丝	◎
	螺栓状态	索夹螺杆紧固力、高强螺栓紧固力、螺栓滑脱	◎
	索夹滑移	索夹滑移	◎
注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项。			
a仅适用于封闭箱梁。			
b仅适用于地锚式悬索桥。			

6.6 风险场景监测

6.6.1 依据 6.2~6.5 的规定，应结合桥梁面临的风险场景，针对性地选择监测内容。主要风险场景及涵盖范围见表 6。

表6 主要风险场景监测及涵盖范围

风险场景		涵盖范围	场景选取
环境类风险	洪水风险	存在历史水毁记录的桥梁	●

表 6 主要风险场景监测及涵盖范围（续）

风险场景	涵盖范围	场景选取	风险场景
环境类风险	洪水风险	河道变迁风险区的桥梁	○
		边岸再造风险地区的桥梁	○
		山洪易发地区的桥梁	○
		泄洪区的桥梁	○
		冲刷风险较大的桥梁	●
		季节水位变化较大的桥梁	◎
		采用扩大基础的涉水桥梁	◎
	地质风险	沿线、两侧边坡存在边坡崩塌等记录的桥梁	●
		两侧护坡技术状况等级低的桥梁	●
		桥墩高度不小于30m的山区临坡桥梁	●
作用类风险	重载交通风险	规划大件运输通行的桥梁	◎
		重载交通通行量大的桥梁	○
	车辆/船舶等撞击风险	存在车辆/船舶等撞击主体结构记录的桥梁	●
		净空尺度不满足航道规划尺度或抗撞性能不满足的桥梁	●
		非通航孔存在船舶撞击风险的桥梁	○
		存在漂浮物（如冰凌、浮木等）撞击风险的桥梁	◎
		存在车辆撞击桥台（墩）和梁体等主体结构风险的桥梁	○
	地震风险	抗震设防烈度不低于8度地区的桥梁	●
		沿线存在地震带或断层的桥梁	○
		历史最大地震大于7级地震地区的桥梁	○
	沉降风险	采煤挖矿等采空区的桥梁	○
		所在地区存在异常沉降的桥梁	●
		位于高填方区域的桥梁	◎
结构类风险	倾覆风险	独柱墩桥、小曲率半径弯桥	○
	服役性能退化风险	桥梁技术状况评定等级为3类或4类且需要跟踪监测的桥梁	●
		服役年限超过50年的桥梁	●
	承载能力不足	结构承载能力不满足使用要求的桥梁	●
结构类风险	结构体系冗余性不足	双曲拱桥、刚架拱桥、普通桁架拱桥等轻型少筋拱桥	○
		悬臂梁、T形刚构等带挂梁结构的桥梁	○
		无加劲纵梁吊杆拱桥	○
		提篮拱桥、系杆拱桥等养护要求较高的桥梁	●

注：●为应选风险场景，○为宜选风险场景，◎为可选风险场景。

6.6.2 不同风险场景的监测内容应符合表 7 的规定。

表 7 不同风险场景的监测内容

风险场景	监测类别		监测内容	监测选项
洪水风险	环境	视域图像	桥梁及桥下状况	●
		水位	水位	●
	结构响应	位移	主梁位移	○
			墩顶位移	●
洪水风险	结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度	●
地质风险	环境	视域图像	桥梁及周边状况	●

表7 不同风险场景的监测内容（续）

风险场景		监测类别		监测内容	监测选项
地质风险		结构响应	位移	主梁位移	○
重载交通风险		环境	视域图像	桥面状况	○
		作用	车辆荷载	车辆总重和轴重	○
		结构响应	位移	主梁竖向位移	●
			应变	主梁关键截面应变	○
			振动	主梁竖向振动加速度	○
车辆/船舶等撞击风险		环境	视域图像	桥梁及桥下状况	●
		结构响应	位移	主梁位移	○
				墩顶位移	●
			振动	桥墩（台）振动加速度	●
地震风险		作用	地震	地震动加速度	●
		结构响应	位移	主梁位移	○
				墩顶位移	○
沉降风险		结构变化	沉降	桥墩（台）竖向位移	●
倾覆风险		结构响应	转角	梁体横向转角	●
		结构变化	位移	支座偏位	○
服役性能退化风险		结构响应	位移	主梁竖向位移	●
		结构变化	裂缝	结构性裂缝	○
承载能力不足		结构响应	位移	主梁竖向位移	●
			应变	主梁关键截面应变	○
			振动	主梁竖向振动加速度	○
结构体系冗余性不足	双曲拱桥、刚架拱桥、普通桁架拱桥等轻型少筋拱桥	结构响应	位移	拱顶位移	●
		结构变化	位移	拱脚位移	●
	悬臂梁、T形刚构等带挂梁结构的桥梁	结构响应	位移	主梁悬臂端竖向位移	●
	无加劲纵梁吊杆拱桥	结构响应	位移	拱顶位移	○
			索力	吊杆（索）力	●
		结构变化	断丝	吊索断丝	○
	提篮拱桥、系杆拱桥等养护要求较高的桥梁	结构响应	位移	拱顶位移	○
			索力	吊杆（索）力	●
		结构变化	断丝	吊索断丝	○

注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项。

7 监测测点布设

7.1 一般规定

7.1.1 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，并宜考虑设备布设条件所受约束性。

7.1.2 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。对关键性监测内容，可布设校核测点。

7.1.3 结构响应和结构变化监测测点宜布设在结构控制性点位，以及受力、变形或位移较大、存在典型病害或已有损伤、影响结构整体或构件安全性的易损部位。对结构劣化、性能退化或材料老化严重的

桥梁构件，应针对性增加监测测点。

7.1.4 位移监测测点可与 JTG 5120—2021 中规定的桥梁永久观测点位置统筹布设。

7.2 环境监测测点

7.2.1 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，可根据桥梁结构型式、联长、跨径、构造等增设监测测点。

7.2.2 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，并可充分融合主梁或主缆等桥梁构件除湿系统监测数据。

7.2.3 降雨量监测测点宜布设在桥梁开阔部位。

7.2.4 水位监测测点宜布设在主梁底部或墩身侧面。

7.2.5 桥面结冰监测测点宜与车辆荷载视频监测测点同位置，缆、索结冰视频监测测点可布设在近塔顶，吊杆结冰测点可布设于主拱。

7.2.6 桥址环境视频监测测点依据视域覆盖范围宜布设在桥梁结构适当部位，也可布设于桥梁周边稳定位置。

7.3 作用监测测点

7.3.1 车辆荷载监测测点应覆盖所有行车道，且宜选择在路基或有稳定墩柱支撑的混凝土结构铺装层内，宜结合视频监测测点获得所有车道的车辆空间分布。

7.3.2 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的布设满足下列规定：

- a) 跨度小于 1500m 悬索桥应在主梁跨中上、下游两侧和塔顶各布设一个风速风向监测测点；跨度大于等于 1500m 悬索桥，结合风场空间相关性，宜在 1/4、3/4 主跨增加风速风向监测测点；可在跨中和 1/4、3/4 主跨断面布设风压监测测点；
- b) 跨度小于 800m 斜拉桥宜在主梁跨中上、下游两侧和塔顶各布设一个风速风向监测测点；跨度大于等于 800m 斜拉桥，结合风场空间相关性，宜增加风速风向监测测点；
- c) 位于强（台）风区的钢结构大跨度梁桥可在主跨跨中布设风速风向监测测点；
- d) 对中、下承式拱桥应在主梁跨中布设风速风向监测测点，风环境复杂时可在拱顶增设风速风向监测测点；位于强（台）风区的上承式拱桥可在主梁跨中布设风速、风向监测测点。

7.3.3 结构温度监测测点布设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；结构温度监测测点宜与应变监测的温度补偿测点协同布设。

7.3.4 船舶撞击监测测点宜布设在有船撞风险的桥墩处，对于拱桥可布设在主拱圈有船撞风险的位置，视频监测测点宜在主梁上、下游两侧对称布设。

7.3.5 地震动监测测点宜布设于桥梁桥墩底部或承台顶部，可布设于桥梁两岸的护岸、锚碇锚室内，近桥址监控中心等自由场地。长度小于 800m 的桥梁，不应少于一个监测测点；长度大于等于 800m 的桥梁，宜增加监测测点。

7.4 结构响应监测测点

7.4.1 结构位移监测测点布设满足下列规定：

- a) 主梁竖向位移监测测点应在主跨跨中和 1/4、3/4 主跨、边跨跨中处布设；对于宽幅桥面、中央索面或其他具有扭转监测需求的主梁，应在同一断面左右幅外侧位置布设监测测点；对于多片梁体的装配式主梁，宜逐片跨中布设监测测点。
- b) 主梁横向位移监测测点应在主跨跨中布设；
- c) 支座位移、主梁梁端纵向位移测点宜布设在墩顶梁端支座处，宜根据不同支座的功能和类型选择支座位移测量方向；
- d) 塔顶偏位和拱顶位移监测测点应分别布设于索塔顶部、拱顶部；
- e) 主缆偏位监测测点宜在主跨跨中和 1/4、3/4 主跨；
- f) 高墩桥梁或纵坡较大的桥梁，桥墩的纵向和横向位移测点宜布设在墩顶。

7.4.2 塔顶转角监测测点宜布设在索塔塔顶位置，梁端水平和竖向转角监测测点宜布设在伸缩缝两端的主梁上，针对倾覆风险的梁体横向转角监测测点宜布设在主跨跨中位置。

7.4.3 应变监测测点布设符合下列规定：

- a) 主梁、索塔、主拱等关键构件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;
 - 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。
- 7.4.4 索力监测测点布设符合下列规定:
- a) 应根据悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)和系杆等索构件的布置形式、规格、型号、长短、索力和应力,确定监测的索构件,宜选择上、下游索构件成对布设;
 - b) 应根据主缆锚固方案、索股布置型式,确定锚跨索股力监测的索股,基准索股宜布设测点。
- 7.4.5 支座反力监测测点布设宜根据支座类型、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。
- 7.4.6 结构振动监测测点布设符合下列规定:
- 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跨跨中和1/4、3/4主跨;主梁纵向振动监测测点宜布设在塔梁连接处或支座位置处;
 - b) 塔顶水平振动监测测点应在塔顶双向布设;
 - c) 宜选择振动幅值大的悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)等索构件布设振动监测测点,测点应根据索构件振动振型确定,避开振型节点;对索面内和索面外均存在较大振动的情况,可双向布设;
 - d) 梁桥桥墩纵向和横向振动监测测点应在桥墩顶部布设;
 - e) 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。
- 7.5 结构变化监测测点
- 7.5.1 基础冲刷监测测点布设应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。
- 7.5.2 悬索桥锚碇位移监测测点宜布设于锚体和前支墩角点处;梁桥桥墩沉降监测测点宜布设于墩顶处;拱桥拱脚位移监测测点宜布设于拱脚承台处。
- 7.5.3 混凝土结构和钢结构裂缝监测测点布设应依据检查(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。
- 7.5.4 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。
- 7.5.5 依据JTG/T H21技术状况评定为“腐蚀”或“锈蚀”标度达到3及以上的悬索桥主缆和吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)和系杆,宜布设断丝测点,测点可布设在锚头端部位置或易腐蚀断丝位置。
- 7.5.6 依据JTG/T H21技术状况评定为“错位、滑移”标度达到3及以上的悬索桥索夹构件,宜布设索夹滑移和索夹螺栓状态监测测点。测点布设宜根据索夹类型、索夹倾角以及螺栓布置形式确定;高强螺栓状态监测测点位置和数量宜根据检查(测)、技术状况评定结果确定。
- 7.5.7 斜拉桥和梁桥体外预应力监测测点位置和数量,宜根据梁体结构构造特点和预应力布设形式、位置确定。

7.6 风险场景监测测点

- 7.6.1 各监测内容测点可参照7.2~7.5进行布设,并聚焦桥梁具体风险场景监测应用进行优化调整。
- 7.6.2 环境类风险场景监测内容测点宜布设于易受洪水、地质等环境影响的结构构件位置。
- 7.6.3 作用类风险场景监测内容测点宜布设于作用着力点位置或结构响应敏感部位。
- 7.6.4 结构类风险场景监测内容测点宜布设于能表征、识别结构风险的位移、应变等特征点位。

7.7 监测测点布设图示

梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥的监测测点布设图示参见附录A。

8 监测方法

8.1 一般规定

- 8.1.1 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、结构响应和结构变化等监测内容相匹配。
- 8.1.2 传感器与数据采集设备的选型应满足监测量程、分辨力、精度、灵敏度、动态频响特性、采样率、可靠性、环境适应性和防护性能等要求。
- 8.1.3 采用人工观测方式所使用的水准仪、全站仪等便携式仪器，应经计量检定合格，且在检定有效期内。
- 8.1.4 鼓励采用多参数集成式传感器，以及感知、采集、传输一体化设备。
- 8.1.5 监测数据采样频率应满足监测数据分析和应用的要求，动态信号采样频率应满足采样定理。
- 8.1.6 监测方法除满足本文件规定之外，还应符合 GB 50982 的相关规定。

8.2 环境监测

- 8.2.1 环境温度监测可采用热电阻等温度传感器，误差不宜大于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，分辨力不宜大于 0.1°C 。传感器量程上限宜超出大气温度年极大值 30°C 以上，量程下限宜低于年极小值 20°C 以上。
- 8.2.2 环境湿度监测可采用氯化锂湿度计、电阻电容湿度计或电解湿度计等湿度传感器，误差不宜大于 $\pm 2\%\text{RH}$ ，量程宜为 $0\%\text{RH}\sim 100\%\text{RH}$ （非凝露）。
- 8.2.3 雨量监测可采用翻斗雨量传感器、电容雨量传感器和红外散射式雨量传感器等，应根据桥址处气候、气象条件选择雨量传感器的类型和量程，分辨力不宜大于 0.1mm ，误差不宜大于 $\pm 4\%\cdot S$ 。
- 8.2.4 水位监测可采用水位计，应根据桥址处历史最低、最高水位选择适宜的量程，误差不宜大于 $\pm 10\text{mm}$ 。
- 8.2.5 结冰监测可采用超声波测试法等，误差不宜大于 $\pm 1\text{mm}$ 。
- 8.2.6 桥址环境监测可采用视频监控，摄像机技术参数和指标应符合 8.3.1d) 的规定。

8.3 作用监测

- 8.3.1 车辆荷载监测宜采用动态称重方法，动态称重设备可采用动态公路车辆自动衡器，设备应符合 GB/T 21296.1 的相关规定，并满足下列要求：

- 传感器布设尺寸应覆盖车道宽度，称重量程根据桥梁车辆限载重以及预估车辆载重综合确定，单轴监测量程不宜小于限载车辆轴重的 200%；
- 具备数据自动采集功能，现场单车荷载数据存储时间不宜少于 90 天，视频数据存储时间不宜少于 30 天；
- 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；
- 视频图像监测宜采用网际协议（IP）网络摄像机，像素不宜低于 400 万，帧率不宜低于 30 帧率（FPS），动态范围不宜低于 120dB，宜具备自动光圈、20 倍以上光学变焦、低照度、透雾以及水平 $0^{\circ}\sim 350^{\circ}$ 和垂直 $15^{\circ}\sim -90^{\circ}$ 旋转等功能，且应符合 GB/T 24726 的相关规定。

- 8.3.2 桥面风速风向监测可采用三向超声风速仪，塔顶风速风向可采用机械式风速仪或两向超声风速仪，并满足下列要求：

- 处于强（台）风区域的桥梁应选择三向超声风速仪，测试参数应包括风速和风向等；
- 风速量程应大于其安装高度处设计风速的 1.2 倍，最大允许误差 0.3m/s ；
- 主梁两侧应采用同类型风速仪，多个索塔塔顶宜采用同类型风速仪；
- 新建桥梁风速风向传感器宜安装在专用支架上，支架应具有足够刚度和强度，与桥体连接牢固，并满足抗风要求；支架伸出主梁边缘水平方向宜大于等于 5m ，伸出索塔高度方向宜大于等于 3m 。在役桥梁风速风向传感器可安装在桥梁沿线附属设施构件上，但应避免主体结构绕流对风速测试数据的影响。

- 8.3.3 桥梁风压监测满足下列要求：

- 自由场处风压监测宜选择皮托管，皮托管应安装在不受干扰的自由风场处，水平周向每隔 30° 布设一个，皮托管安装于固定支架上；

- b) 主梁风压监测可采用陶瓷型或扩散硅型微压差传感器, 量程宜覆盖 $-1000\text{Pa}\sim 1000\text{Pa}$, 误差不宜大于 $0.5\%F\cdot S$, 传感器沿主梁截面周向和纵桥向布设, 应安装于梁体外表面, 气嘴垂直于梁体外表面。
- 8.3.4 地震动监测可采用力平衡式加速度传感器和强震仪等。量程不宜小于 $\pm 2.0g$, 分辨力不宜大于 $1\times 10^{-5}g$, 灵敏度不宜低于 $2.5V/g$, 动态范围不宜低于 120dB 。
- 8.3.5 车船撞击桥墩加速度监测宜与地震动监测协同, 可采用力平衡式加速度传感器和强震仪等, 技术参数宜符合 8.3.4 的规定, 并辅助视频监控, 摄像机技术参数和指标宜符合 8.3.1d) 的规定。
- 8.3.6 结构温度监测可采用热电阻、光纤光栅温度传感器和分布式光纤温度传感器等, 误差不宜大于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 分辨力不宜大于 0.1°C 。路面温度传感器应符合 GB/T 33697 的相关规定。

8.4 结构响应监测

8.4.1 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和安装环境, 选择传感器类型、精度、位置和安装方式, 并满足下列要求:

- 悬索桥主梁竖向位移和横向位移、斜拉桥主梁和拱桥主梁横向位移、塔顶偏位、主缆偏位等监测可采用全球导航卫星系统 (GNSS) 或视觉位移传感器, 监测数据应转换到大桥独立坐标系, 水平方向测量误差不宜大于 $\pm 10\text{mm}$, 垂直方向测量误差不宜大于 $\pm 20\text{mm}$, 技术指标应符合 GB/T 39410 相关规定;
- 斜拉桥、梁桥和拱桥主梁竖向位移监测可选用基于连通管原理的压力变送器、微波雷达、视觉位移传感器和光电挠度仪等, 误差不宜大于 $\pm 2\text{mm}$ 。微波雷达的测量距离不宜小于 100m , 光电挠度仪的测量距离不宜小于 200m 。压力变送器应将安装、调试后监测仪器的初始值作为测量基准值, 并应定期进行温度修正和补液, 压力变送器技术指标宜符合 JJG 882 的相关规定; 也可选用其他类型满足量程、精度、分辨力要求的位移传感器, 或设置桥梁永久观测点固定测标进行定期量测;
- 支座位移、梁端纵向位移和墩梁相对位移可选用拉线式位移传感器、线性可变差动变压器式 (LVDT) 位移传感器、磁致伸缩位移传感器、激光位移传感器和视觉位移传感器等, 误差不宜大于 $\pm 0.5\%F\cdot S$, 技术指标宜符合 JJF 1305 的相关规定。
- 采用水准仪、全站仪开展人工观测技术指标应符合 GB 50026—2020、JGJ 8—2016 的相关规定。

8.4.2 梁端、梁体、塔顶转角和墩台倾角等监测可采用倾角传感器, 量程宜为 $-15^{\circ}\sim 15^{\circ}$, 误差不宜大于 $\pm 0.02^{\circ}$ 。

8.4.3 应变监测可采用电阻应变传感器、振弦式应变传感器、光纤光栅应变传感器和分布式光纤应变传感器等。静应变监测宜采用光纤应变传感器和振弦式应变传感器, 动应变监测宜采用光纤应变传感器和电阻应变传感器等。光纤应变传感器技术指标宜符合 JG/T 422 的相关规定, 电阻应变传感器技术指标宜符合 GB/T 13992 的相关规定, 振弦式应变传感器技术指标宜符合 GB/T 3408.2 的相关规定。应变传感器选型满足下列要求:

- 应变传感器标距应与构件材料性质和被测参数精度要求匹配;
 - 应变传感器的分辨力不宜大于 $2\mu\epsilon$, 量程不宜小于 $1000\mu\epsilon$ 。静应变传感器量程不宜小于预测被测量变化范围的 1.2 倍, 动应变传感器量程不宜小于预测被测量变化范围的 2 倍。
 - 三向静态和动态监测应变测点可选择应变花;
 - 应变监测应进行温度补偿, 安装时应测量记录初始值。
- 8.4.4 索力监测可采用间接测力或直接测力法, 误差不宜大于被测索力设计值的 $\pm 5\%$ 。间接测力法宜采用频率法或电磁弹式传感器, 频率法可选用电容式加速度传感器, 电容式加速度传感器技术指标宜符合 JJF 1918 的相关规定。直接测力法可采用锚索计, 量程不宜小于索力设计值的 1.2 倍, 锚索计技术指标宜符合 JJG 036 的相关规定。
- 8.4.5 支座反力监测可采用直接测力的成品测力支座, 误差不宜大于被测支座标称竖向承载力值的 $\pm 5\%$ 。
- 8.4.6 结构振动监测可采用加速度传感器, 应根据桥梁结构整体及梁、塔、索结构的动力分析成果, 确定加速度传感器的量程、频响范围和灵敏度等。满足下列要求:

- 宜根据桥梁结构振动主要参与振型, 选择三向、双向或单向加速度传感器;

- b) 主梁、塔、主拱振动加速度传感器量程应大于振动响应计算分析最大值的 1.2 倍, 且不宜小于 $\pm 1g$, 横向灵敏度小于等于 5%, 频响范围 0 Hz~100 Hz, 可选用力平衡式加速度传感器;
- c) 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传感器量程应大于计算分析振动响应最大值的 1.5 倍, 且不宜小于 $\pm 5g$, 横向灵敏度小于等于 5%, 频响范围 0.1Hz~100Hz, 可选用电容式加速度传感器或压电式加速度传感器。

8.5 结构变化监测

8.5.1 基础冲刷监测方式应根据桥梁洪水风险、冲刷风险和监测应用需求确定, 可采用在线监测, 也可开展定期观测。在线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进行设备选型, 可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, 并满足下列要求:

- a) 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不宜小于 10m, 冲刷深度分辨力不宜大于 5mm;
- b) 水流速监测仪器的量程不宜小于 $\pm 5m/s$, 误差不宜大于 $\pm 1\%F \cdot S$, 分辨力不宜大于 1mm/s;
- c) 应通过试验确定传感探头的指向角度, 控制探头与桥墩的合理距离;
- d) 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; 声呐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。

8.5.2 悬索桥锚碇位移、梁桥桥墩沉降、拱桥拱脚位移监测可设置桥梁永久观测点进行定期观测或采用 GNSS 静态观测方法, 并满足下列规定:

- a) 永久观测点应安装永久固定金属测标, 永久观测点设置应符合 JTG 5120—2021 的相关规定;
- b) GNSS 监测宜采用北斗卫星导航技术, GNSS 监测应配置永久观测基准站, 应符合 GB/T 39410 的相关规定。

8.5.3 裂缝监测可采用自动监测、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, 误差不宜大于 $\pm 0.02mm$, 分辨力不宜大于 0.01mm。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和摄像机等。

8.5.4 腐蚀监测可选用电化学方法, 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。技术参数宜符合 GB/T 38894 的相关规定。

8.5.5 断丝监测可采用声发射监测方法, 悬索桥吊索和主缆、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)和系杆等裸露钢索的断丝监测, 可选用谐振频率较高的声发射传感器, 工作温度范围宜为 $-30^{\circ}C \sim 70^{\circ}C$, 工作频率范围宜为 40kHz~100kHz; 埋设于混凝土内的预应力钢索断丝监测, 可选用谐振频率较低的声发射传感器, 工作频率范围宜为 10kHz~40kHz。

8.5.6 体外预应力索力变化监测可采用基于电磁原理的测力仪器或频率法。电磁弹式索力传感器测量范围为材料的 0~0.9 倍屈服应力, 传感器测力误差不宜大于设计索力 $\pm 5\%$ 。频率法可选用高灵敏度加速度传感器。

8.5.7 螺杆/螺栓紧固力可采用直接测力或间接测力法。直接测力法可选用振弦式或电阻式压力环式传感器。间接测力法可选用超声波法或螺杆/螺栓应变电测法。螺栓滑脱可采用视频图像监测方法。

8.5.8 索夹滑移监测可选用位移监测法或视频监测法, 也可联合使用。位移监测法可选用高精度线位移计, 技术参数指标宜符合 JJF 1305 的相关规定。视频监测法应配置高精度图像自动识别模块。

8.6 数据采集方法

8.6.1 数据采集方法宜基于感知方法、传感器测点数量及位置分布等综合确定, 以获得高质量数据, 包括数据采集硬件、软件以及数据采集制式, 满足下列要求:

- 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。

8.6.2 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, 并满足下列要求:

- a) 数字信号可选用基于 RS485、CAN、Modbus TCP 或 UDP 等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 4mA~20mA 和-5V~5V 等标准工业信号，可选用基于外设组件互连（PCI）总线的数据采集卡或面向仪器系统的 PCI 扩展（PXI）平台进行集中式数据采集设备，并采取光电隔离措施，提高抗干扰能力；
 - d) 光信号数据采集应采用专用的光纤解调设备。光纤光栅解调设备应根据波长范围、采样通道与采样频率进行选型，波长分辨力不宜大于 1pm，扫描频率不宜小于 50Hz；分布式光纤解调设备的空间分辨力不宜大于 200mm，采样分辨力不宜大于 50mm；
 - e) 振弦式传感器信号应选用专用振弦式采集仪采集，频率信号误差不宜大于 0.1Hz；
 - f) 电阻式应变传感器信号应选用惠斯登电桥调理信号放大；
 - g) 电磁弹式索力传感器信号应选用磁弹采集仪采集，误差不宜大于 0.5%F·S；
 - h) 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，静态信号分辨力宜大于等于 16 位，动态信号分辨力宜大于等于 24 位；
 - i) 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；
 - j) 动态信号应选用抗混滤波器进行滤波、降噪。
- 8.6.3 数据采集方式应根据监测内容、数据分析以及监测系统数据采集需求确定，并满足下列要求：
- 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、转角、应变、索力、支座反力、振动等结构响应监测内容应采用实时连续采集；
 - b) 车辆荷载、车辆/船舶撞击、地震动等作用监测内容，断丝等结构变化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、锚碇位移、桥墩沉降、拱脚位移、裂缝、腐蚀、体外预应力、螺栓状态、索夹滑移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宜采用定时采样，超过阈值宜采用触发采集模式；
 - e) 新建、改扩建桥梁通车初期 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。
- 8.6.4 人工观测的监测频次应按照桥梁形式、跨径、技术状况和养护需求确定，变形、裂缝等关键病害发展速率增大应提高监测频次，台风、地震、洪水、船舶撞击等特殊事件后应至少加测一次。
- 8.6.5 系统监测的采样频率应根据监测应用分析要求和功能要求设定，应符合下列规定：
- a) 环境监测内容的采样频率见表 8。

表 8 环境监测内容采样频率

监测内容	采样频率
温度/Hz	1/600
湿度/Hz	1/600
降雨量/Hz	1/60
水位/Hz	1
结冰（在线）/ FPS	30

- b) 作用监测内容的采样频率见表 9。

表 9 作用监测内容采样频率

监测内容		采样频率
车辆荷载	动态称重设备	触发采集
	视频/FPS	30

表9 作用监测内容采样频率（续）

监测内容		采样频率
风速风向/Hz	超声风速仪	10
	机械式风速仪	1
风压/Hz		10
结构温度/Hz		1/600
车辆/船舶等撞击（触发采集）	加速度/Hz	50
	视频/FPS	30
地震（触发采集、加速度）/Hz		50

c) 结构响应监测内容的采样频率见表10。

表10 结构响应监测内容采样频率

监测内容		采样频率
位移/Hz	动位移	20
	静位移	1
转角/Hz		1Hz
应变/Hz	动应变	10
	静应变	1/600
索力/Hz	压力传感器	1
	加速度传感器	50
	电磁弹式传感器	1/3600
支座反力/Hz		1
振动/Hz		20

d) 结构变化监测内容的采样频率见表11。

表11 结构变化监测内容采样频率

监测内容		采样频率
基础冲刷	在线/Hz	1/3600
	离线	每年1次~2次
锚碇位移、拱脚位移、桥墩沉降	在线/Hz	1/3600
	离线	每年1次~2次
裂缝	动态/Hz	10
	静态/Hz	1/3600
	图像	每周1次
腐蚀	在线/Hz	1/3600
	离线	每年1次~2次
体外预应力	在线/Hz	1/3600
	离线	每年3次~4次
断丝（触发采集）/MHz		2
螺栓状态	在线/Hz	1
	图像	每周1次
	离线	每年1次~2次
索夹滑移	在线/Hz	1

表 11 结构变化监测内容采样频率（续）

监测内容		采样频率
索夹滑移	图像	每周1次
	离线	每年1次~2次

- 8.6.6 环境、作用和结构响应监测数据应同步采集，宜采用北斗卫星时钟同步技术，同步精度宜符合下列规定：
- a) 动态监测变量的数据采集时钟同步误差小于 0.1ms；
 - b) 静态监测变量的数据采集时钟同步误差小于 1ms。
- 8.6.7 数据采集应采取抗干扰措施，包括串模干扰抑制、共模干扰抑制以及防雷接地技术和屏蔽技术，以提高信噪比。
- 8.6.8 可采用无人机、机器人等载具装配相应传感器设备进行数据采集。

9 监测系统

9.1 一般规定

9.1.1 监测系统宜采用模块化架构，由系统硬件、系统软件和配套工程构成。全方位监测系统建设宜按图 1 构成开展，重点指标和风险场景监测系统建设宜在不影响系统整体功能的前提下，精简相关构成环节、建设内容。

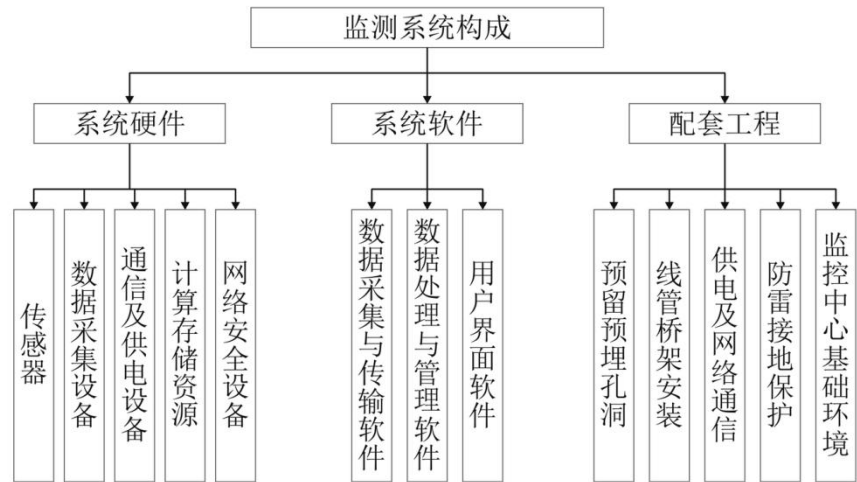


图 1 监测系统构成

- 9.1.2 新建桥梁的监测系统应与桥梁土建、机电工程同步设计、实施和验收，在役桥梁的监测系统应结合应急管理和养护管理等需求进行专项设计、实施和验收。
- 9.1.3 监测系统设计文件应明确设计方案、功能要求、工程界面、预留预埋和维护升级等要求。
- 9.1.4 监测系统硬件采购安装工序与质量控制可按照交通机电工程建设管理程序进行。
- 9.1.5 监测系统现场传感器、数据采集设备现场安装前应检定，安装后应进行校验，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。
- 9.1.6 以桥梁群方式开展监测，各桥监测系统软件宜统一协同、共享复用。
- 9.1.7 应按省级监测平台、部级数据平台的数据交互与共享要求预留传输接口。
- 9.1.8 监测系统宜按照 GB/T 22239、GB/T 25070 的相关规定构建监测系统信息安全保护体系，与外部系统进行数据交换的，应进行数据加密传输。

9.2 设计要求

9.2.1 监测系统技术架构应采用分层模式，宜划分为设备感知层、网络传输层、平台支撑层、业务应

用层和用户交互层，各层应功能独立、边界清晰。

9.2.2 应基于桥梁结构计算分析、风险评估结果和应用场景需求开展监测系统设计，宜包括下列内容：

- a) 系统功能要求与总体方案设计；
- b) 系统及各模块的工作流程、功能设计、详细设计及集成方案；
- c) 监测内容和测点选择、监测方法、设备选型与安装方案；
- d) 系统数据采集、传输、处理与管理方案；
- e) 系统供配电、通信、防雷和防护方案；
- f) 系统及附属设施的预留预埋方案；
- g) 系统软件设计及部署实施方案；
- h) 系统数据分析方案与超限报警阈值设定，以及超限报警、应急管理、养护评估和基础研究等监测应用方案；
- i) 系统与桥梁主体结构、交通机电、网络通信、监控中心及省级监测平台等相关技术接口和工作界面；
- j) 针对系统维护的桥梁检修通道设计需求；
- k) 系统软件、硬件的维护更换和扩容升级等建议。

9.2.3 监测内容、监测测点布置、监测方法、数据管理和监测应用的设计应满足第6章、第7章、第8章、第10章、第11章的规定。

9.2.4 监测系统应基于适应性、匹配性和稳定性开展数据采集、传输、供配电、通信、防雷和预留预埋等方案设计。应强化硬件冗余、通信抗干扰、数据自容错能力，确保断网、断电等异常工况下核心功能连续运行。桥梁群结构监测系统建设可采用数据采集点、数据归集站、桥群监测系统的三级采集传输架构。

9.2.5 监测系统设计应明确桥梁现场系统供配电、通信接入点技术要求，确定供配电和通信通讯方案，应优先选择市电供电和有线传输方式。

9.2.6 监测系统设计应提出监控中心环境及技术要求，纳入监控中心和机电体系统一设计。

9.2.7 监测系统设计宜给出不同功能硬件的合理使用寿命，以及设备的维护与更换，软件模块更新升级的要求。

9.2.8 监测系统设计应明确监测数据采集、传输、处理及存储各环节的技术质量要求，结合传感器性能参数、数据传输协议及数据处理机制，建立全过程数据质量管控体系，确保监测数据满足应用要求。

9.2.9 监测系统硬件设计符合下列规定：

- a) 硬件设备安装方案不应影响桥梁主体结构安全；
- b) 传感器选型应与监测内容、测点布置、监测方法和系统软件相适配，并宜考虑安装和维护的便易性和易保护性；
- c) 数据采集设备应与传感器和数据采集与传输软件相适配，满足数据同步采集和实时传输等要求；
- d) 传感器及数据采集设备应明确“防尘、防水、防雷”等防护要求；
- e) 数据采集设备应结合其工作温度范围和所处环境的温度变化范围配置温控机柜。光纤光栅解调仪所处环境低于 0℃或高于 40℃时，宜配置温控机柜；
- f) 位于结构内部的机柜的防护级别应不低于 GB/T 4208—2017 规定的 IP55，位于结构外部的应不低于 GB/T 4208—2017 规定的 IP65。其他参数宜符合 GB/T 15395 的相关规定；
- g) 系统供配电设计应根据核心功能连续运行要求配置必要的冗余和备用电源，并应在设计文件中明确备用电源的保障对象及保障时长；
- h) 系统网络通信设计应根据核心功能连续运行要求配置必要的冗余，并采取通信抗干扰措施；
- i) 采用云服务作为计算及存储资源的宜配备必要的网络安全及数据备份服务；
- j) 自建监控中心应配备不间断电源、恒温空调和门禁安防系统等；
- k) 系统计算资源、存储资源及网络传输带宽应根据监测点数量、采样频率、数据分析计算量、业务功能复杂度和并发访问量等确定；
- l) 应能够保障系统在桥梁所处温湿度、振动、电磁干扰环境下连续稳定运行。

9.2.10 监测系统软件设计符合下列规定：

- a) 软件设计应基于开放性、人性化要求，人机交互友好，操作便捷流畅；

- b) 系统软件应划分为数据采集与传输软件、数据处理与管理软件 and 用户界面软件，各软件模块之间应相对独立、有序融合、方便维护、扩容和升级；
- c) 单桥系统应预留省级平台数据接入功能，能够按照要求及时推送数据，支持省级平台下穿访问并远程调取单桥系统数据。
- d) 数据采集与传输软件符合下列规定：
- 软件应前置安装运行在桥梁现场采集计算机内；
 - 应具备各类传感器信号的自动化采集和实时传输功能；
 - 应具备原始数据本地暂存功能，能够在网络故障时将数据自动存储在本地计算机，并可在故障恢复后续传数据；
 - 应具备数据采集频率、采集通道、采集参数的自定义设置功能；
 - 应具备原始监测数据预处理功能，宜包含滤波降噪、数据清洗等算法，宜支持部署轻量化人工智能算法实现数据预处理功能；
 - 针对不同监测应用场景，聚焦其关键结构监测指标，可采用定时传输和异常触发模式，正常情况下传感器休眠或处于低频采集模式，异常情况下可触发高频采集，保证设备有效工作时长和关键监测指标的完整性；
 - 系统各采集节点软件模块应采用网络时间协议（NTP）网络授时或北斗卫星授时严格进行时间同步，同步基准应采用国家授时中心的标准时间。
- e) 数据处理与管理软件应符合下列规定：
- 能接收并解析桥梁现场采集的原始数据，具备数据预处理、特征值提取以及数据持久化存储功能；
 - 能定义处理后监测数据的数据单位、数据方向、数据精度，数据单位采用国际标准单位，不同类型监测内容数据单位、数据方向参见附录B；
 - 根据监测类别设置对应的处理算法，将处理前的原始数据换算成反映桥梁环境、作用、结构响应、结构变化的特征数据；
 - 能够自定义设置、修改各类监测数据的配置参数、处理频率、输出数据格式等；
 - 采用读写分离、分布式存储、时间序列数据库等技术提升数据存取效率和稳定性；
 - 音视频、图片、文档类非结构化数据，具备设计完整的上传、检索、导出功能，并分类建立单独的存储目录结构；
 - 支持接入人工智能大模型等技术实现监测数据的高效处理和信息挖掘分析；
 - 具备数据质量评价功能，支持自我评价和第三方评价，评价指标包含完整性、准确性、真实性、时效性等；
 - 具备数据异常识别、自动容错和故障恢复功能，发生数据处理、传输或存储异常时，记录异常信息并保障有效数据不丢失。
- f) 用户界面软件符合下列规定：
- 应设计视觉友好、信息简洁的数据看板，界面应清晰直观地反映系统关键监测指标和运行指标，符合用户使用习惯；
 - 应具备桥梁群基本信息管理功能，包括各桥地理信息系统（GIS）展示、结构类型、技术状况等级、报警信息等；
 - 应采用浏览器/服务器（B/S）架构，满足多用户并发使用和省、部级平台下穿访问需求；
 - 应具备高频采样数据的动态展示功能，宜采用时程曲线、仿真仪表等方式展示数据；
 - 宜具备相关性分析、对比性分析、趋势性分析、索力分析等专项分析功能；
 - 宜具备监测报告自动生成功能，可按要生成日报、周报、月报、特殊事件报告等；
 - 应具备超限报警功能，支持阈值报警、多指标关联报警等，可采用颜色变化、移动端消息推送、短信提示、声光报警等多种报警方式；
 - 应具备传感器设备状态监控功能，实现传感器在线时长、设备实时在线率统计等功能；
 - 宜开发运行在手机、平板上的移动端应用，功能应包含实时数据查看、统计数据查询、超限消息推送、车辆荷载监控等；
 - 应具备系统运行状态监测、桥梁健康度评估、特殊事件记录管理等功能，并按照要求将相关数据定期推送至省级平台；

- 宜结合人工智能等新技术发展，在错误数据剔除、多指标联合报警、数据分析评估、监测报告自动生成等方面探索使用人工智能大模型等技术，提升监测系统智能化水平。

9.2.11 监测系统配套工程符合下列规定：

- a) 系统配套工程宜包括预留预埋、开孔开洞、桥架管线安装和敷设、供配电及网络通信、防雷接地保护、监控中心基础环境建设、设备安装和集成调试；
- b) 系统配套工程设计应符合下列规定：
 - 采用附着式安装，确需开孔（洞）、焊（胶）接、打磨、切割操作的，不影响桥梁主体结构安全；
 - 传感器线缆、光缆、电缆等综合布线设计符合GB 50311的相关规定；
 - 系统供配电设计符合GB 50052和GB 50054的相关规定；
 - 基于桥梁现有主体结构防雷体系设计系统防雷，明确区域强电防雷、弱电防雷等电位连接及接地技术要求，并符合GB/T 37048、GB 50343的相关规定；
 - 提出监控中心基础环境要求，包含机柜数量、供配电及网络通信、环境温湿度、防静电、通风、防火防盗等。

9.2.12 监测系统设计应明确与其他专业的技术接口和工作界面，符合下列规定：

- a) 预留预埋、开孔开洞对桥梁主体结构的防腐涂装等耐久性造成局部损伤时，应进行修复；
- b) 系统专用的不间断供电回路、系统通信光纤网，宜与桥梁交通机电系统联合设计。
- c) 涉及其他专业的预留预埋、设备安装空间、供配电、网络通信和数据接口等技术条件，应在系统设计文件中明确，并与相关专业设计文件保持一致。

9.3 实施要求

9.3.1 监测系统现场施工工序宜分为硬件设备安装调试、软件开发部署、软硬件联合调试。

9.3.2 硬件设备安装调试符合下列规定：

- a) 传感器、数据采集与传输设备的安装位置应符合设计规定，传感器应稳定可靠与被测结构物牢固连接，并采取匹配的防护措施予以保护；
- b) 光电缆线宜与桥梁其他缆线保持必要的距离，并根据强弱电缆位置采取必要的屏蔽措施。光缆敷设弯曲半径应大于光缆外径的20倍，双绞线、同轴电缆、大对数线缆的弯曲半径应大于等于线缆外径的15倍，接头部位应平直不受力；
- c) 光缆接续时应减少接续损耗，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0.05dB；
- d) 当供电电压波动较大、供电不稳时，应在供电设备输出端加设交流稳压装置对监测设备进行稳压供电；

9.3.3 软件开发及部署应符合下列规定：

- a) 宜采用主流的软件开发技术和框架，软件内部各模块应功能独立，模块之间耦合性低；
- b) 软件编码应满足GB/T 8566的相关规定，代码编写应简洁易读、结构清晰、注释规范、易于调试维护；
- c) 软件内部不应内置与业务功能无关的后门程序、加密模块；
- d) 软件开发文档和接口文档应规范、齐全，符合GB/T 8567的相关规定；
- e) 宜由具备资质的软件测评单位进行软件测试，测试流程和内容应符合GB/T 15532和GB/T 9386的相关规定；
- f) 软件部署前应编制软件安装规范，安装过程应规范有序，部署完成后应检查各模块功能完好性；

9.3.4 软硬件联合调试应符合下列规定：

- a) 数据采集与传输软件部署完成后，与桥梁现场传感器模块和数据采集硬件进行数据采集集成校验，数据输出通道、数据流、方向、精度等与外场设备安装保持一致；
- b) 数据处理与管理软件部署完成后，与桥梁现场数据采集与传输软件进行数据对接，数据接收、处理和存储等功能满足设计文件技术要求；
- c) 软、硬件联合调试完成后，用户界面软件各项功能正常，监测数据展示流畅准确，界面数据值、数据精度、数据单位与设计文件技术要求一致。

- d) 采用三级采集传输架构时,对数据采集点、数据归集站和桥群监测系统之间的数据采集、汇聚、转发以及传输中断恢复等功能进行联合调试。

9.4 试运行及验收要求

- 9.4.1 监测系统交付前应进行不少于 3 个月的试运行,试运行期内应开展系统使用培训、功能完善、设备基准值校正、结构监测初始状态建立和超限阈值设置等工作。
- 9.4.2 监测系统试运行期结束后,应及时开展系统验收工作。
- 9.4.3 新建、改扩建桥梁的监测系统应随主体工程相应阶段验收;在役桥梁独立建设的监测系统完成试运行后宜组织一次验收。在役桥梁独立建设的监测系统验收后系统缺陷责任期宜为 2 年。
- 9.4.4 监测系统验收前应按 10.7 要求开展监测数据质量评价工作,评价监测数据完整性、时效性、准确性和真实性。
- 9.4.5 监测系统验收应包含系统硬件验收、系统软件验收和资料验收。
- 9.4.6 监测系统硬件验收满足下列要求:
 - a) 安装设备材料的数量、规格型号、技术参数等应与合同文件、设计文件一致,合格证、质保卡、说明书及出厂检验报告等应齐全;
 - b) 传感器安装位置应正确、牢固、端正,表面平整,与结构物接触面紧密,应采取必要的防腐防护措施,信号线按要求连接到位;
 - c) 数据采集设备应处于正常工作状态,机柜内电力线、信号线、元器件等应布线平直、整齐、固定可靠,插头牢固,标识清晰。出线管与箱体连接应密封良好,机柜内应无积水、尘土、霉变;机柜接地应连接可靠,接地引出线无锈蚀;
 - d) 光电缆线路敷设与监控中心设备安装应符合 JTG 2182 的相关规定。
- 9.4.7 监测系统软件验收应满足下列要求:
 - a) 数据采集与传输软件功能完整性和一致性检查,正常采集、存储、转发监测数据,各项功能和性能指标满足设计文件技术要求;
 - b) 数据处理与管理软件功能完整性和一致性检查,正常接收、处理、存储、转发监测数据,各项功能和性能指标满足设计文件技术要求;
 - c) 用户界面软件功能检查和性能指标检查,软件功能满足设计文件技术要求,静态基础数据、实时监测数据、历史统计数据等各类数据显示准确、齐全,软件整体请求响应速度、数据刷新率等性能指标满足设计文件技术要求;
 - d) 进行系统整体安全性检查,确保满足设计文件中信息安全相关技术要求。
- 9.4.8 监测系统交(竣)工验收应检查验收资料的齐全性、规范性和一致性,验收资料宜包含下列内容:
 - a) 合同相关资料:合同协议书、合同谈判纪要等;
 - b) 实施过程资料:系统设计文件,系统变更资料,专业接口清单,设备进场报验资料、监测设备设施安装记录、设备设施检验资料、系统集成调试记录,监理资料(质量控制资料),有关会议纪要等;
 - c) 技术成果资料:系统竣工图、实施成果报告、系统试运行报告、硬件维护手册、软件操作手册、软件安装部署手册、数据质量评价报告等。

9.5 运维要求

- 9.5.1 应制订监测系统运维计划,建立设备维护台账、备品备件清单、列支系统年度维护(含备品备件)费用,监测系统养护应符合 JTG/T 5122 的相关规定。
- 9.5.2 监测系统运维内容应包含硬件设施和软件系统的日常检查、定期(专项)维护和应急维护。
- 9.5.3 硬件设施日常检查符合下列规定:
 - a) 日常检查宜结合桥梁日常巡查工作开展;
 - b) 系统的日常检查对巡查路线上监测设备的表观完好性及稳固性进行检查,并对巡查情况进行记录;
 - c) 对监控中心用户界面展示的监测数据以及监控中心机房计算机设备和工控机运行状态进行检查,并进行记录;

- d) 对巡查中发现的问题或系统软件反馈的问题,应及时处置或通知专业单位进行处置,并对处置结果进行记录。
- 9.5.4 硬件设施定期(专项)维护和应急维护符合下列规定:
 - a) 不宜低于每半年进行1次定期维护;
 - b) 对强(台)风、超限车辆过桥等可预见的特殊事件发生前应对系统进行专项维护;
 - c) 对监测传感器、采集设备等外观完好性进行检查;对设备及防护罩的固定情况,以及传感器、采集设备与传输线路的接头紧固情况进行检查;
 - d) 对现场采集站、监控中心内等易受灰尘影响的设备及机柜进行除尘处理;
 - e) 对基于连通管原理设备的液位情况进行检查,定期补充连通管内液体至设计液位;
 - f) 对维护发现的问题24h内快速响应并及时处置。
- 9.5.5 软件系统日常检查符合下列规定:
 - a) 宜至少每周1次日常检查;
 - b) 日常检查内容包括功能运行检查、数据质量检查、系统安全检查、存储空间检查和异常故障处理等内容。
 - c) 在系统不停机状态下进行软件日常检查。确需停机维护操作的,在系统访问低谷时间段开展。
- 9.5.6 软件系统定期(专项)维护符合下列规定:
 - a) 宜每月至少开展1次定期维护;
 - b) 软件定期维护内容包括软件功能检查维护、数据维护校验、系统安全维护、软件维护定期评估与报告等;
 - c) 对于有配置参数修改、更正的维护操作,应提前做好备份,并在维护完成后做好日志记录;
 - d) 软件维护应与硬件维护相结合,当硬件设备进行更换、升级或维修后,应进行对应的软件维护检查,确保系统及数据运行正常。
- 9.5.7 软件系统应急维护符合下列规定:
 - a) 软件应急维护内容宜包括软件模块崩溃恢复、功能异常修复和数据异常更正等;
 - b) 当发现软件功能故障时,应及时进行确认和处置;
 - c) 对于非软件因素造成的数据异常或中断等,应联合硬件维护人员进行排查、修复并做好维护记录。

9.6 安全要求

- 9.6.1 应制定监测系统安全应急预案,明确发生系统安全事件后的应急处置流程和责任分工,宜定期开展安全事件应急演练和评估。
- 9.6.2 监测系统应明确安全保护等级要求,宜从物理层、网络层、应用层、系统层等方面构建多层次网络安全防护体系。
- 9.6.3 监控中心应建立物理安全保障措施,配备消防设施、防雷击和电磁干扰设备、视频安防和门禁系统,并配备恒温空调和不间断电源(UPS)设备。
- 9.6.4 监控中心网络应按照功能划分安全域,宜分为数据存储域、数据处理域、应用服务域和工作域,且各安全域之间能够进行隔离。
- 9.6.5 监控中心应配备网络防火墙等安全设备,应定期对网络环境、服务器及存储设备进行安全漏洞扫描和风险评估,及时发现、整改相关安全隐患,确保系统运行安全。
- 9.6.6 监测数据在采集、传输与存储过程中,应采用符合国家标准加密算法进行数据加密,防止数据被窃取、篡改。
- 9.6.7 监测数据传输应采用加密传输协议,并对传输协议版本定期更新,及时修复相关安全漏洞,保障数据传输安全。
- 9.6.8 应建立完善的用户身份认证与授权机制,应根据用户职责和业务需求,合理划分数据访问权限,并定期对用户账号及权限进行检查、更新。
- 9.6.9 应加强对监测系统网络边界的安全管理,严格审查外部网络对监测系统的访问请求,对开放的服务和端口进行定期检查,确保系统访问安全。
- 9.6.10 应对系统使用的各类应用组件、模块定期进行安全扫描,及时修复安全漏洞,不应使用未经授权或来源不明的软件组件。

9.6.11 采用云服务技术的监测系统应符合 GB/T 31167、GB/T 31168 的相关规定。

10 数据管理

10.1 一般规定

10.1.1 监测数据管理应涵盖数据采集、传输、存储、处理、分析、应用、评价等环节，全时域支撑数据应用。

10.1.2 宜采用先进的数据管理技术与工具，构建安全、稳定、高效的数据管理平台，提升数据管理效益与技术水平。

10.2 数据编码

10.2.1 监测数据宜定义数据字典进行编码管理。数据字典见附录 C 的表 C.1。

10.2.2 监测数据宜包括桥梁基础信息数据和监测信息数据。桥梁基础信息数据编码应符合 JT/T 132 编目编码规则。桥梁监测信息数据宜按照桥梁基本信息（表 C.2）、桥梁文件信息（表 C.3）、监测内容基本信息（表 C.4）、监测测点基本信息（表 C.5）、传感器基本信息（表 C.6）、实时监测数据（表 C.7）、特征值统计数据（表 C.8）、车辆荷载监测数据（表 C.9）、视频属性信息（表 C.10）、超限报警信息（表 C.11）、特殊事件信息（表 C.12）、桥梁健康度信息（表 C.13）、桥梁评估报告信息（表 C.14）进行编码管理。

10.2.3 桥梁监测点编号命名规则应符合图 2 的规定。

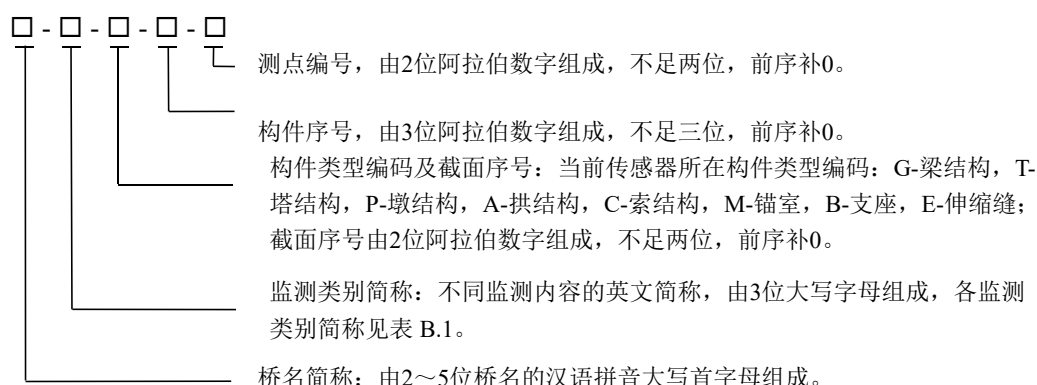


图 2 桥梁监测点编号命名规则

示例：

秀山大桥主梁振动监测项G05梁段第001构件第01个监测点编号，标记为：XS-VIB-G05-001-01。

10.2.4 监测数据应包含桥梁监测点编号、数据采集时间、数值和数据状态等信息，见表 C.7。

10.2.5 实时监测数据应分隔为一定时长的样本，计算数据特征值，包含最大值、最小值、平均值、均方根值等统计值，统计时长宜根据监测内容的特征确定，见表 C.8。

10.2.6 超限报警数据应记录测点编号、超限级别、超限值、超限时间等信息，超限级别划分应与超限报警级别一致，见表 C.11。

10.2.7 视频信息数据应以视频媒体文件形式压缩存储，视频文件应存储其属性信息，视频格式与编码应符合 GB/T 28059.2 的规定，见表 C.10。

10.2.8 桥梁文件信息以文档格式分类分级存储，见表 C.3、表 C.14。

10.3 数据处理

10.3.1 监测系统应具备数据处理功能，按照处理的复杂程度和时效性宜分为数据预处理和数据后处理。

10.3.2 应建立云边协同的高性能数据处理架构，边缘端负责实时性要求高的基础处理任务，云端负责计算复杂度较高的模型训练、数据挖掘分析任务。

10.3.3 桥梁现场边缘端数据预处理应包含信号量转换、实时数据过滤、异常值检测等，应具备明显异

常数据的识别及剔除功能，保障数据基础质量。

10.3.4 云端数据处理应从海量原始数据中抽取关键监测信息，支持全量抽取、增量抽取、基于日志抽取等抽取模式，可支持地理空间信息数据的抽取，支持数据抽取格式和流程的自定义配置。

10.3.5 数据后处理应聚焦数据深度分析与价值挖掘，宜采用大数据分析、多模态人工智能大模型等技术，提取关键特征指标，为后续数据分析应用提供必要条件。

10.4 数据存储

10.4.1 综合考虑测点规模、实施条件、成本预算等因素，宜采用物理介质存储或云存储，物理介质存储应设置独立磁盘冗余阵列（RAID），云存储应选用符合国家标准、具备高安全性与稳定性的云服务提供商，保障数据存储的安全性及可扩展性。

10.4.2 桥梁现场数据采集站内宜安装采集计算机，其原始数据存储时间应大于等于 90 天，视频图像数据存储时间应大于等于 30 天。

10.4.3 应根据数据类型和特点采用不同的存储技术，原始数据应采用时序数据库，结构化数据应采用关系型数据库，非结构化数据（视频、图像）宜采用对象存储方式。

10.4.4 应建立完善的数据目录与存储索引，对不同类型监测数据进行分类分级存储，并设置清晰的数据标识，确保数据高效查询及调用。

10.4.5 对于关键监测数据应采用国密算法对敏感字段进行加密存储，应妥善保管并定期更新加密密钥，防止密钥泄漏风险。

10.4.6 原始监测数据存储时间宜大于 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大于 20 年。

10.4.7 视频数据存储宜大于 30 天，特殊事件视频数据应转移备份并永久保存。

10.4.8 应制定详细的数据备份与恢复策略，定期对重要数据进行全量和增量备份，备份数据应异地存储，存储介质应安全可靠，能够在规定时间内完成数据恢复工作。

10.4.9 对监测数据应实施全生命周期管理，适应数据资产化相关要求，从数据的采集、传输、存储管理到最终销毁，均应制定详细的管理策略，明确数据存储期限，对于超过存储期限且无保留价值的数据，按照安全流程进行销毁、删除，并记录数据在整个生命周期的关键操作与状态变更。

10.5 数据交互与共享

10.5.1 应在保证系统和数据安全的前提下，采用数据接口方式实现与外部系统的数据交互共享。

10.5.2 在进行数据交互时，应明确数据的提供方和接收方，以及数据交换频率、内容、格式等要求。实时监测数据的传输协议见附录 D。应通过数据交换日志记录数据交换的过程和结果，方便问题追溯和排查。

10.5.3 数据交互双方应进行权限验证和安全校验，数据通过互联网传输时应进行传输加密和身份认证。

10.5.4 监测系统与省、部级平台数据交互与共享时，应满足省、部级平台统一的链路、传输、安全技术要求。

10.6 数据安全

10.6.1 监测数据在采集、传输与存储过程中，应采用符合国家标准的加密算法进行数据加密，防止数据被窃取、篡改。

10.6.2 监测数据传输应采用符合国家网络安全和密码管理要求的加密传输协议，并对传输协议版本定期更新，及时修复相关安全漏洞，保障数据传输安全。

10.6.3 系统数据库应采用用户标识和鉴定、数据存取控制、数据库审计、异地备份等技术保证数据存取安全。

10.6.4 应加强对监测系统网络边界的安全管理，严格审查外部网络对监测系统的访问请求，对开放的服务和端口进行定期检查，确保系统访问安全。

10.6.5 应制定监测数据安全应急预案，明确发生数据安全事件后的应急处置流程和责任分工，应急预案应包含数据泄露、系统遭受攻击等各类安全事件的处理流程，应结合应急预案定期开展安全事件演练和评估。

10.7 数据质量评价

10.7.1 数据质量评价采用分层综合评定方法，以各单桥系统为基本单元针对监测项数据开展评价工作。

10.7.2 数据质量评价从数据完整性、数据时效性、数据准确性和数据真实性予以评价。

10.7.3 数据质量评价分为 I 级、II 级、III 级、IV 级、V 级五个等级，应符合表 12 的规定。

表 12 数据质量评价等级

评价等级	分数	数据质量状况
I	[90%, 100%]	数据质量优秀
II	[80%, 90%)	数据质量良好
III	[70%, 80%)	数据质量中等
IV	[60%, 70%)	数据质量一般
V	[0%, 60%)	数据质量较差

10.7.4 数据质量评价分为定期评价和专项评价，定期评价时间周期宜为 1 季，专项评价应根据重大自然灾害或其他重大突发事件发生情况选取评价时间周期。

10.7.5 单桥系统宜针对原始数据开展数据质量评价，评价环节应包括基础资料准备、监测点分项数据质量评价、监测点数据质量评价、监测项数据质量评价、单桥系统数据质量评价。

10.7.6 省级监测平台/部级数据平台宜针对特征值数据开展数据质量评价，评价环节应包括基础资料准备、监测点分项数据质量评价、监测点数据质量评价、监测项数据质量评价、单桥系统数据质量评价和省级监测平台/部级数据平台数据质量评价。

10.7.7 数据质量评价技术方法见附录 E。

11 监测应用

11.1 一般规定

11.1.1 监测应用分为超限报警、应急管理、养护评估和基础研究四大方面，包括但不限于监测数据分析、超限阈值确定与报警、特殊事件应急管理、检查指引、健康度评估和长期性能研究等。

11.1.2 监测应用应充分利用系统监测、人工观测数据开展数据分析，并宜融合检查等养护数据分析成果。

11.1.3 对于建设全方位监测系统的桥梁，应开展结构健康度评估；对于建设重要指标和风险场景监测系统的桥梁，可开展结构健康度评估。

11.2 监测数据分析

11.2.1 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经常检查、定期检查与特殊检查数据。

11.2.2 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，也可采用其他方法。

11.2.3 监测数据分析样本时长，宜根据监测内容的特征确定。

11.2.4 环境监测数据分析符合下列规定：

- 温度监测数据应分析最高温度、最低温度、最大温差等；
- 湿度监测数据应分析最大值、平均值和超限持续时间等；
- 雨量监测数据宜分析 10min 平均降雨量；
- 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；
- 水位监测数据应分析最高水位、最低水位和平均水位等。
- 宜根据桥群所在区域，利用各环境监测项的关联性进行时空分布分析。

11.2.5 作用监测数据分析符合下列规定：

- a) 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、轴重和时间，宜分析年极值、车辆疲劳荷载谱和荷载校验系数，宜结合监控视频通过目标检测跟踪等可靠算法进行全桥车辆分布的动态分析；宜根据桥群所在区域，结合交通流数据进行车辆荷载时空分布分析；
- b) 风速风向监测数据应分析 10min 平均风速和风玫瑰图，宜根据桥群所在区域进行时空分布分析；风压监测数据宜分析 10min 平均风压和均方根值；
- c) 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。
- d) 地震监测数据应分析加速度峰值、反应谱。

11.2.6 结构响应监测数据分析符合下列规定：

- a) 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；支座位移和梁端纵向位移应分析平均值、绝对最大值、均方根值和绝对值累积量；应分析主梁下挠、塔顶和主缆及主拱偏位、桥墩沉降等趋势；
- b) 对于上部结构由多片梁组成的桥梁，宜进行横向协同工作性能评估分析；
- c) 塔顶截面倾角、梁端水平和竖向转角、梁体横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；
- d) 主梁关键截面应变监测数据应分析绝对最大值、疲劳累积损伤指数，索塔、主拱关键截面应变监测数据应分析绝对最大值；
- e) 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、疲劳损伤指数及其随时间变化趋势，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；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对比分析；
- f) 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；
- g) 主梁竖向横向纵向、塔顶水平双向、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，宜进行模态参数分析，模态参数应剔除环境等因素影响，可采用机器学习等模态参数自动识别方法剔除虚假模态影响。

11.2.7 结构变化监测数据分析符合下列规定：

- a) 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；
- b) 主缆锚碇位移、拱脚位移监测数据应分析其是否发生变化；
- c) 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，可分析裂缝与环境、作用和结构构造的相关性，宜结合无人机、机器人等视频图像采用计算机视觉方法进行快速筛查和关联分析；
- d) 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；
- e) 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，宜结合爬索机器人等视频图像采用计算机视觉方法进行关联分析；
- f) 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，宜结合无人机、机器人等视频图像采用计算机视觉方法进行快速筛查；
- g) 索夹滑移监测数据宜分析数量、程度和变化趋势，宜结合无人机、机器人等视频图像采用计算机视觉方法进行快速筛查；
- h) 体外预应力监测数据宜分析其预应力变化程度和趋势。

11.2.8 风险场景监测数据分析符合下列规定：

- a) 风险场景监测的环境、作用、结构响应、结构变化数据分析应符合 11.2.4~11.2.7 的规定；
- b) 洪水风险监测宜分析水位变化、冲刷深度、结构位移之间的关系，分析结构响应和变化的规律；
- c) 地质风险监测应分析墩身和主梁是否存在明显的残余位移，可结合周边边坡监测数据开展关联分析；
- d) 重载交通风险监测宜对车辆荷载和位移、应变等数据进行关联分析，对比同等荷载下位移和应变响应是否出现明显增大，判断在重载交通下是否出现结构性能退化趋势；

- e) 车辆/船舶等撞击风险监测应结合桥墩（台）振动加速度和视频等监测数据，识别撞击事件，分析墩身和主梁是否存在明显残余位移以及撞击前后结构模态参数变化；
- f) 地震风险监测应分析墩身和主梁是否存在明显的残余位移，地震前后结构的模态参数变化；
- g) 沉降风险监测应分析墩沉降趋势、墩（台）间不均匀沉降，沉降速率等；
- h) 倾覆风险监测宜对梁体倾角、支座偏位等多指标开展联合分析；
- i) 服役性能退化风险的桥梁监测宜分析主梁竖向位移、结构性裂缝及其发展趋势；
- j) 承载能力不足的桥梁监测应分析桥梁承载能力的变化情况；
- k) 结构体系冗余性不足的桥梁监测宜分析主梁或主拱圈的刚度变化情况，对断丝吊索宜分析吊索断丝和索力变化的关系。

11.3 超限报警

11.3.1 超限报警分为关注提示、一级报警、二级报警和三级报警。当单指标监测数据超过各级超限阈值时，宜同步报警，必要时可采用多指标关联判断是否报警。报警类别分为环境报警、作用报警、结构响应报警、结构变化报警、主梁涡振报警、监测数据分析结果报警和风险场景监测报警。

11.3.2 可利用具有关联关系的多个监测项或同一监测项不同测点监测数据之间相关性进行报警；监测数据相关性分析方法可采用皮尔逊相关系数法、时序神经网络、生成式模型等机器学习模型及其他方法。

11.3.3 同一桥梁、同一测点、同一监测指标在连续超限且超限等级未提高的情况下，可合并为一次报警。报警记录应保留首次发生时间、持续时间、峰值、累计次数和报警等级；出现等级提高、异常突变或中断后再次超限等情况，报警不应合并。

11.3.4 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) 超限阈值宜根据桥梁技术状况、长期运行监测数据规律以及报警复核、现场检查 and 处置结果进行动态调整；超限阈值调整前应开展技术分析，验证调整的的必要性和合理性。

11.3.5 单指标监测数据超限阈值设定宜符合表 13 的规定。

表 13 超限报警阈值设定表

报警类别	报警内容	超限阈值 ^a	超限级别	桥梁类型			
				悬索桥	斜拉桥	梁桥	拱桥
环境	最高温度、最低温度、最大温差	1.0倍设计值	关注提示	●	●	●	●
		1.2倍设计值	关注提示	●	●	●	●
环境	构件封闭空间内相对湿度 ^b	50%	关注提示	●	●	●	●
	结冰	出现结冰	关注提示	●	●	●	●
	水位	0.8倍最高设计水位	关注提示	●	●	●	●
		最高设计水位	关注提示	●	●	●	●
作用	车辆总重或轴重	1.5倍设计车辆荷载	一级	●	●	●	●
		2.0倍设计车辆荷载	二级	●	●	●	●
	风速、风向	桥面10min平均风速达到25m/s	一级	●	●	●	●
		桥面10min平均风速达到0.8倍桥面设计基准风速	二级	●	●	●	●
		桥面10min平均风速达到桥面设计基准风速	三级	●	●	●	●
	混凝土、钢结构构件温度	设计值	一级	●	●	●	●
	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	●	●	●	●

表 13 超限报警阈值设定表（续）

报警类别	报警内容	超限阈值 ^a	超限级别	桥梁类型			
				悬索桥	斜拉桥	梁桥	拱桥
作用	车辆/船舶等撞击	发生轻微撞击（桥墩承台处振动加速度达到5mg；或撞击后1s内加速度均方根值为日常加速度均方根值的10倍以上）	二级	●	●	●	●
		发生较严重撞击（桥墩承台处振动加速度达到15mg；或撞击后1s内加速度均方根值为日常加速度均方根值的40倍以上）	三级	●	●	●	●
	桥岸地表场地地震动加速度	设计E1地震作用加速度峰值	二级	●	●	●	●
		设计E2地震作用加速度峰值	三级	●	●	●	●
结构响应	主梁竖向位移	0.8倍设计值	二级	●	●	●	●
		设计值或一个月内出现10次以上二级超限	三级	●	●	●	●
	主梁横向位移	0.8倍设计值	二级	●	●	—	●
		设计值或一个月内出现10次以上二级超限	三级	●	●	—	●
	支座位移	0.8倍设计值	二级	●	●	●	●
		设计值	三级	●	●	●	●
	梁端纵向位移	0.8倍设计值	二级	●	●	●	●
		设计值	三级	●	●	●	●
	塔顶偏位	0.8倍设计值	二级	●	●	—	—
		设计值或一个月内出现10次以上二级超限	三级	●	●	—	—
	主缆偏位	0.8倍设计值	二级	●	—	—	—
		设计值或一个月内出现10次以上二级超限	三级	●	—	—	—
	梁桥高墩墩顶位移	0.8倍设计值	二级	—	—	●	—
		设计值或一个月内出现10次以上二级超限	三级	—	—	●	—
	拱桥主拱顶位移	0.8倍设计值	二级	—	—	—	●
		设计值或一个月内出现10次以上二级超限	三级	—	—	—	●
	主梁、索塔、主拱关键截面静应变	0.8倍设计值	一级	●	●	●	●
		设计值或一个月内出现10次以上一级超限	二级	●	●	●	●
	悬索桥吊索、锚跨索股力斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆（索）、系杆等索力	0.95倍设计值或短时间内索力变化率超过10% ^c	二级	●	●	—	●
		设计值或一个月内出现10次以上二级超限或短时间内索力变化率超过15% ^c	三级	●	●	—	●
	支座反力	0.8倍设计值	二级	●	●	●	●
		设计值	三级	●	●	●	●
	主梁振动加速度	10min加速度均方根达到31.5cm/s ² 且持续时间超过30min	一级	●	●	●	●
		10 min加速度均方根达到50cm/s ²	二级	●	●	●	●
		幅值持续增大、呈现发散特征	三级	●	●	●	●

表 13 超限报警阈值设定表（续）

报警类别	报警内容	超限阈值 ^a	超限级别	桥梁类型			
				悬索桥	斜拉桥	梁桥	拱桥
结构响应	悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆（索）振动加速度	10min加速度均方根达到100cm/s ² 且频繁出现 ^d	一级	●	●	—	●
		10min加速度均方根达到300cm/s ² 且频繁出现 ^d	二级	●	●	—	●
	拱桥主拱顶位移	设计值或一个月内出现10次以上二级超限	三级	—	—	—	●
	主梁、索塔、主拱关键截面静应变	0.8倍设计值	一级	●	●	●	●
		设计值或一个月内出现10次以上一级超限	二级	●	●	●	●
	悬索桥吊索、锚跨索股力斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆（索）、系杆等索力	0.95倍设计值或短时间内索力变化率超过10% ^c	二级	●	●	—	●
		设计值或一个月内出现10次以上二级超限或短时间内索力变化率超过15% ^c	三级	●	●	—	●
	支座反力	0.8倍设计值	二级	●	●	●	●
		设计值	三级	●	●	●	●
	主梁振动加速度	10min加速度均方根达到31.5cm/s ² 且持续时间超过30min	一级	●	●	●	●
		10 min加速度均方根达到50cm/s ²	二级	●	●	●	●
		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、拱桥吊杆（索）振动加速度	10min加速度均方根达到100cm/s ² 且频繁出现 ^d	一级	●	●	—	●
		10min加速度均方根达到300cm/s ² 且频繁出现 ^d	二级	●	●	—	●
结构变化	基础冲刷	0.7倍设计冲刷深度	二级	●	●	●	●
		设计冲刷深度	三级	●	●	●	●
	锚碇位移	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	●	—	—	—
		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	●	—	—	—
	拱脚位移	0.8倍设计限值	二级	—	—	—	●
		1.0倍设计限值	三级	—	—	—	●
	裂缝	出现结构性裂缝	二级	●	●	●	●
		结构性裂缝宽度超过规范限值或发展加速	三级	●	●	●	●
	腐蚀	腐蚀深度到达保护层深度	二级	●	●	●	●
	预应力	体外预应力相对损失超过5%	二级	—	●	●	—
		体外预应力相对损失超过10%	三级	—	●	●	—
	断丝	出现断丝	二级	●	●	—	●
		断丝率达到2%	三级	●	●	—	●
	螺栓状态	部分螺栓松动	二级	●	●	●	●
		较多螺栓发生严重松动或少量脱落	三级	●	●	●	●
	索夹滑移	索夹出现滑移	二级	●	—	—	—
		索夹滑移严重或较多数量索夹出现滑移	三级	●	—	—	—

表 13 超限报警阈值设定表（续）

报警类别	报警内容	超限阈值 ^a	超限级别	桥梁类型			
				悬索桥	斜拉桥	梁桥	拱桥
	主梁涡振 ^e	10min振动加速度均方根值Sa达到31.5 cm/s ² 、能量比因子R大于10 ^e	一级	●	●	◐	—
		10min振动加速度均方根值Sa达到50 cm/s ² 、能量比因子R大于10 ^e	二级	●	●	◐	—
		10min振动加速度均方根值Sa达到80cm/s ² 、能量比因子R大于10 ^e	三级	●	●	◐	—
监测数据分析结果 ^f	钢结构疲劳	疲劳损伤指数达到0.1	一级	●	●	●	●
		出现较多疲劳裂缝，或裂缝长度和宽度较大	二级	●	●	●	●
	塔顶或主缆或主拱偏位	出现永久偏位	三级	●	●	—	●
	主梁下挠	持续下挠	三级	●	●	●	●
	桥墩沉降	相邻墩台间的不均匀沉降差，使桥面形成大于2‰的附加纵坡或者在超静定结构中产生的附加内力超过结构的受力要求	三级	—	—	●	—
	索力基准值	与成桥索力相比变化超过10%	二级	●	●	—	●
		与成桥索力相比变化超过15%	三级	●	●	—	●
	剔除环境影响的桥梁主要频率变化	超过3% ^g	二级	●	●	●	●
		超过5% ^g	三级	●	●	●	●

注：●为应报警项；◐ 针对大跨度钢桥；—为无需报警项。

^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 3360—01的相关规定。索力变化限值参考了JTG 5120。锚碇位移限值参考了JTG/T D65—05的相关规定。裂缝限值参考JTG 5120—2021、JTG/T H21的相关规定。

^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，拱桥主拱内封闭空间。

^c 短时间内指：排除长期温度变化、收缩徐变等因素引起的长期索力缓慢变化。

^d 频繁出现指：每日超限占比超过20%，即以10min均方根值作为超限次数的统计口径，每日出现29次及以上超限即为超限占比超过20%。

^e 桥梁涡振报警选取主梁竖向加速度均方根值（Sa）和能量比因子（R）作为报警指标，计算方法按照公式（1），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（Sa）统计规律以及ISO 2631—1舒适性标准制定。一级超限、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。

^f 数据分析结果超限报警为非同步报警项。

^g 计算桥梁主要频率时，需要考虑结构模态参数识别结果中的不确定性影响，宜采用多次结构模态参数识别结果的平均值进行比较。

11.3.6 风险场景监测数据超限阈值设定应符合表 14 的规定。

表 14 风险场景监测超限报警阈值设定表

风险场景	报警类别	报警内容	超限阈值	超限级别
洪水风险	环境	水位	0.8倍最高设计水位	关注提示
			最高设计水位	关注提示
洪水风险	结构响应	主梁位移	0.8倍设计值	二级
			设计值	三级
		墩顶位移	0.8倍设计值	二级
			设计值	三级
	结构变化	墩顶偏位	存在残余位移	三级
		基础冲刷深度	0.7倍设计冲刷深度	二级

表 14 风险场景监测超限报警阈值设定表（续）

风险场景	报警类别	报警内容	超限阈值	超限级别
洪水风险	结构变化	基础冲刷深度	设计冲刷深度	三级
地质风险	结构响应	主梁位移	0.8倍设计值	二级
			设计值	三级
		墩顶位移	0.8倍设计值	二级
			设计值	三级
	结构变化	墩顶偏位	存在残余位移	三级
重载交通风险	作用	车辆总重或轴重	1.5倍设计车辆荷载	一级
			2倍设计车辆荷载	二级
	结构响应	主梁竖向位移	0.8倍设计值	二级
			设计值	三级
		主梁关键截面应变	0.8倍设计值	二级
			设计值	三级
		主梁竖向振动加速度	10min加速度均方根达到 31.5cm/s^2 且持续时间超过30min	一级
			10 min加速度均方根达到 50cm/s^2	二级
			幅值持续增大、呈现发散特征	三级
车辆/船舶等撞击风险	作用	车辆/船舶等撞击	发生轻微车辆/船舶撞击（桥墩承台处振动加速度达到 5mg ；或撞击后1s内加速度均方根值为日常加速度均方根值的10倍以上）	二级
			发生较严重车辆/船舶撞击（桥墩承台处振动加速度达到 15mg ；或撞击后1s内加速度均方根值为日常加速度均方根值的40倍以上）	三级
	结构响应	主梁位移	0.8倍设计值	二级
			设计值	三级
		墩顶位移	0.8倍设计值	二级
			设计值	三级
	结构变化	墩顶偏位	存在残余位移	三级
地震风险	作用	地震动加速度	设计E1地震作用加速度峰值	二级
			设计E2地震作用加速度峰值	三级
	结构响应	主梁位移	0.8倍设计值	二级
			设计值	三级
		墩顶位移	0.8倍设计值	二级
地震风险	结构响应	墩顶位移	设计值	三级
	结构变化	墩顶偏位	存在残余位移	三级
沉降风险	监测数据分析结果	桥墩沉降	相邻墩台间的不均匀沉降差使桥面形成大于2‰的附加纵坡或者在超静定结构中产生的附加内力超过结构的受力要求	三级
倾覆风险	结构响应	梁体横向转角	0.8倍设计值	二级
			设计值	三级
	结构变化	支座偏位	出现支座偏位	三级
服役性能退化风险	结构响应	主梁竖向位移	0.8倍设计值	二级
			设计值	三级
	结构变化	结构性裂缝	出现结构性裂缝	二级
			结构性裂缝宽度超过规范限值或发展加速	三级

表 14 风险场景监测超限报警阈值设定表（续）

风险场景		报警类别	报警内容	超限阈值	超限级别
承载能力不足		结构响应	主梁竖向位移	0.8倍设计值	二级
				设计值	三级
			主梁关键截面应变	0.8倍设计值	二级
				设计值	三级
		监测数据分析结果	剔除环境影响的桥梁主要频率变化	超过3%	二级
				超过5%	三级
结构体系冗余性不足	双曲拱桥、刚架拱桥、普通桁架拱桥等轻型少筋拱桥	结构响应	拱顶位移	0.8倍设计值	二级
				设计值	三级
		结构变化	拱脚位移	0.8倍设计值	二级
				设计值	三级
	悬臂梁、T形刚构等带挂梁结构的桥梁	结构响应	主梁悬臂端竖向位移	0.8倍设计值	二级
				设计值	三级
	无加劲纵梁吊杆拱桥	结构响应	拱顶位移	0.8倍设计值	二级
				设计值	三级
			吊杆（索）力	0.95倍设计值	二级
				设计值	三级
		结构变化	索力基准值	与成桥索力相比变化超过10%	二级
				与成桥索力相比变化超过15%	三级
			吊索断丝	出现断丝	二级
				断丝率达到2%	三级
	提篮拱桥、系杆拱桥等养护要求较高的桥梁	结构响应	拱顶位移	0.8倍设计值	二级
				设计值	三级
			吊杆（索）力	0.95倍设计值	二级
				设计值	三级
		结构变化	索力基准值	与成桥索力相比变化超过10%	二级
				与成桥索力相比变化超过15%	三级
			吊索断丝	出现断丝	二级
				断丝率达到2%	三级

11.3.7 超限报警处置应符合下列规定：

- 对触发报警的监测数据进行有效性复核，核查数据采集、传输、处理及设备运行状态；
- 分析报警起始时间、持续时间、实时数据和报警等级，必要时对关联测点或指标进行综合分析；
- 报警分析结果与相关监测数据和设备状态信息关联存储，保留报警全过程数据；
- 报警分析结论包括数据复核结果、报警等级、超限指标、关联分析结果和养护建议；特殊事件报警分析按 11.4 规定开展。

11.4 应急管理

11.4.1 桥梁在遭受强（台）风及其他特殊天气，涡振、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、车船撞击等特殊事件时，应进行特殊事件数据分析辅助应急管理措施决策，必要时组织专家研判。

11.4.2 车辆在发生特殊事件时，应对车辆通行提出管控建议，管控建议宜基于桥梁结构监测数据分析并协同其他运行管理系统给出，并符合下列规定：

- a) 监测数据显示出现影响行车安全状况时或相关天气气象预报给出提醒时，应给出车辆通行管控建议；
 - b) 根据气象数据，12h 内降雨量超过 50mm 或 12h 内降雪量超过 4mm 以上，宜进行车辆限速限流；大雾能见度小于 200m 时，宜进行车辆限速；大雾能见度小于 50m 时，宜封桥；
 - c) 桥面结冰，缆、索、吊杆结冰时，宜进行车辆限速和除冰处治；
 - d) 桥面风速超过表 13 中一级限值时，可进行封桥管理；
 - e) 主梁加速度超过表 13 中一级限值时，宜进行车辆限速。
- 11.4.3 涡振应急管理符合下列规定：

- a) 宜采用 10min 加速度均方根值 (S_a) 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_a 和 R 分别按公式 (1) 和公式 (2) 计算：

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2} \quad (1)$$

式中：

S_a ——加速度均方根值，单位为米每平方秒 (m/s^2)；

a ——主梁振动加速度，单位为米每平方秒 (m/s^2)；

N ——10min 加速度采样点数。

$$R = \frac{A_1}{A_2} \quad (2)$$

式中：

A_1 ——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 (m^2/s^3)；

A_2 ——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 (m^2/s^3)。

- b) 可采用机器学习算法自动判断涡振，也可采用其他方法；
 - c) 涡振超限阈值宜按表 13 规定选取，检查建议宜符合下列规定：
 - 一级超限，提醒持续关注；
 - 二级超限，提醒采取车辆限速等管理措施；
 - 三级超限，提醒封闭桥梁，按 11.5.2 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：
 - 分析桥面 10min 平均风速、平均风向、风攻角、湍流度；
 - 分析主梁 10min 加速度均方根值、模态参数变化；
 - 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。
- 11.4.4 强（台）风应急管理符合下列规定：
- a) 强（台）风风速超限阈值宜按表 13 规定选取，检查建议符合下列规定：
 - 一级超限，提醒封闭桥梁；
 - 二级超限，提醒检查桥梁构件状态；
 - 三级超限，提醒检查桥梁构件状态，并按 11.5.2 的规定进行桥梁结构健康度评估。
 - b) 应提供桥梁强（台）风分析报告，报告内容宜包括：强（台）风前、强（台）风全过程、强（台）风后数据分析结果。数据分析宜符合下列规定：
 - 分析桥面 10min 平均风速、平均风向、风攻角、湍流度、阵风因子；
 - 分析主梁、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；
 - 分析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。

11.4.5 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二级超限，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 10min 平均风速、平均风向、风偏角、风攻角、降雨量；
- b) 分析索构件 10min 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的类型。

11.4.6 地震应急管理符合下列规定：

- a) 地震动加速度二级超限时，宜提醒对桥梁进行全面检查；
- b) 地震动加速度三级超限时，宜提醒封闭桥梁，对桥梁进行全面检查，并满足下列规定：
 - 按 11.5.2 的规定，利用监测数据进行桥梁结构健康度评估；
 - 可采用考虑土—结构相互作用的非线性结构有限元模型，计算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，分析结构地震响应和损伤状态；
- 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：
 - 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；
 - 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、梁桥高墩墩顶位移、拱桥主拱拱顶位移的最大值和残余位移；分析主梁、索塔、主拱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、拱桥吊杆（索）、系杆等索力基准值变化；分析支座反力的最大值和残余力；
 - 分析主梁、塔顶、主拱、索构件等振动加速度的峰值和均方根值；
 - 分析震前和震后桥梁模态参数变化。

11.4.7 车辆超载应急管理符合下列规定：

- a) 监测车辆荷载二级超限时，应提醒进行桥梁结构检查；
- b) 可根据 11.5.2 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、拱桥吊杆（索）、系杆等索力，支座反力等最大值。

11.4.8 车辆/船舶等撞击应急管理符合下列规定：

- a) 发生车辆/船舶等撞击后，应提醒进行桥梁结构检查；
- b) 可按 11.5.2 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/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：
 - 对车辆/船舶等撞击全过程视频监测数据进行分析，已安装船舶碰撞监测预警系统的桥梁，可进行关联分析；
 - 分析主梁、塔顶、桥墩墩顶振动加速度，主梁横向位移、梁桥高墩墩顶位移、支座位移、主梁关键截面静应变、悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆（索）、系杆等索力，支座反力、拱脚位移等监测数据的绝对最大值与残余值，模态参数等。

11.5 养护评估

11.5.1 检查指引符合下列规定：

- a) 监测数据和分析结果超限出现表 13、表 14 情况时，宜提醒进行桥梁检查，检查建议见表 15，风险场景对应检查建议见表 16，并结合 JTG/T 5122—2021 和 JTG 5120—2021 相关规定制定检查和养护措施。

表 15 监测数据超限检查建议

监测类别	监测内容	超限级别	检查建议
环境	构件封闭空间内相对湿度	关注提示	检查是否存在渗漏水、除湿设施是否运转正常、钢构件锈蚀状况
	水位	关注提示	全桥检查
作用	车辆总重或轴重	二级	检查桥梁主要受力构件的技术状况
	混凝土、钢结构构件温度	一级	检查伸缩装置、支座、相关结构构件等状况
	铺装层温度	一级	洒水降温
结构响应	主梁竖向位移	二级	全桥检查
	主梁横向位移	二级	全桥检查
	支座位移	二级	检查支座
		三级	全桥检查
	梁端纵向位移	二级	检查伸缩装置
		三级	全桥检查
	塔顶偏位	二级	全桥检查
	主缆偏位	二级	全桥检查
	梁桥高墩墩顶位移	二级	全桥检查
	拱桥主拱拱顶位移	二级	全桥检查
	主梁、索塔、主拱关键截面静应变	一级	检查传感器附近构件状况
		二级	全桥检查
	悬索桥吊索、锚跨索股力、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆（索）、系杆等索力	二级	检查索（杆）构件
	支座反力	二级	检查支座
		三级	全桥检查
结构变化	基础冲刷	二级	全桥检查，重点是桥梁基础构件
	锚碇位移	二级	全桥检查
	拱脚位移	二级	全桥检查
	裂缝	二级	对出现裂缝构件进行特殊检查
	腐蚀	二级	对腐蚀构件进行特殊检查
	预应力	二级	全桥检查
	断丝	二级	对断丝主缆、拉（吊）索进行特殊检查
	螺栓状态	二级	检查全部螺栓
	索夹滑移	二级	检查滑移索夹及其吊索以及附近主缆
结构变化	钢结构疲劳	二级	检查疲劳裂纹发展情况
	塔顶或主缆或主拱偏位	三级	全桥检查
	主梁下挠	三级	全桥检查
	桥墩沉降	三级	全桥检查
	索力基准值	二级	检查索构件
	剔除环境影响的桥梁主要频率变化	二级	检查伸缩装置、支座、阻尼器、相关结构构件等状况
		三级	全桥检查

表 16 风险场景监测数据超限检查建议

风险场景		监测类别	监测内容	超限级别	检查建议
洪水风险	环境	结构响应	水位	关注提示	全桥检查
			主梁位移	二级	全桥检查
	结构变化	结构变化	墩顶位移	二级	全桥检查
			墩顶偏位	三级	全桥检查，重点是偏位桥墩及其基础
			基础冲刷深度	二级	全桥检查，重点是桥梁基础构件
地质风险	结构响应	结构响应	主梁位移	二级	全桥检查
			墩顶位移	二级	全桥检查
	结构变化	结构变化	墩顶偏位	三级	全桥检查，重点是偏位桥墩及其基础
重载交通风险	作用	作用	车辆总重或轴重	二级	检查桥梁主要受力构件的技术状况
	结构响应	结构响应	主梁竖向位移	二级	全桥检查
			主梁关键截面应变	二级	检查传感器附近构件状况
				三级	全桥检查
			主梁竖向振动加速度	二级	全桥检查
车辆/船舶等撞击风险	作用	作用	车辆/船舶等撞击	三级	全桥检查
	结构响应	结构响应	主梁位移	二级	全桥检查
			墩顶位移	二级	全桥检查
	结构变化	结构变化	墩顶偏位	三级	全桥检查，重点是偏位桥墩及其基础
地震风险	作用	作用	地震动加速度	二级	全桥检查
	结构响应	结构响应	主梁位移	二级	全桥检查
			墩顶位移	二级	全桥检查
	结构变化	结构变化	墩顶偏位	三级	全桥检查，重点是偏位桥墩及其基础
沉降风险	监测数据分析结果	监测数据分析结果	桥墩沉降	三级	全桥检查
倾覆风险	结构响应	结构响应	梁体横向转角	二级	全桥检查
	结构变化	结构变化	支座偏位	三级	全桥检查，重点是偏位支座
服役性能退化风险	结构响应	结构响应	主梁竖向位移	二级	全桥检查
	结构变化	结构变化	结构性裂缝	二级	对出现裂缝构件进行特殊检查
承载能力不足	结构响应	结构响应	主梁竖向位移	二级	全桥检查
			主梁关键截面应变	二级	检查传感器附近构件状况
				三级	全桥检查
	监测数据分析结果	监测数据分析结果	剔除环境影响的桥梁主要频率变化	二级	检查主梁状况
				三级	全桥检查
结构体系冗余性不足	双曲拱桥、刚架拱桥、普通桁架拱桥等轻型少筋拱桥	结构响应	拱顶位移	二级	全桥检查
		结构变化	拱脚位移	二级	全桥检查
	悬臂梁、T形刚构等带挂梁结构的桥梁	结构响应	主梁悬臂端竖向位移	二级	全桥检查

表 16 风险场景监测数据超限检查建议（续）

风险场景		监测类别	监测内容	超限级别	检查建议
结构体系冗余性不足	无加劲纵梁吊杆拱桥	结构响应	拱顶位移	二级	全桥检查
			吊杆（索）力	二级	检查索（杆）构件
		结构变化	索力基准值	二级	检查索构件
			吊索断丝	二级	对断丝吊索进行特殊检查

- b) 宜融合监测数据成果和检查等养护数据分析成果开展包括桥梁技术状况评定、适应性评定和其他专项养护评估等内容的综合评估，给出评估结论和管养建议。
- c) 可结合人工智能大模型等技术，在监测系统软件平台中构建桥梁运维知识库，为桥梁管养提供更全面的养护检查和处置建议。

11.5.2 结构健康度评估符合下列规定：

- a) 桥梁结构健康度应包括结构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较重异常、Ⅴ严重异常五级，评定依据见表 17。

表 17 桥梁结构健康度等级评定依据

健康度等级	状态	结构构件	结构整体
Ⅰ	基本完好	构件健康度表征评估参数监测数据无超限	结构整体健康度表征评估参数中所列监测数据超限等级全部为一级或无超限
Ⅱ	轻微异常	构件健康度表征评估参数监测数据超限等级一级	除塔顶偏位、锚碇位移、拱脚位移之外，结构整体健康度表征评估参数中所列其他监测数据与分析结果超限等级仅有1项为二级、无三级
Ⅲ	中等异常	构件健康度表征评估参数监测数据超限等级二级	结构整体健康度表征评估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；或当塔顶偏位、锚碇位移、拱脚位移出现1项或以上二级；或多项构件健康度“Ⅲ中等异常”
Ⅳ	较重异常	构件健康度表征评估参数监测数据超限等级三级	多项构件健康度出现“Ⅳ较重异常”
Ⅴ	严重异常	/	结构整体健康度表征评估参数中所列监测数据与分析结果超限等级出现多项三级

- b) 宜通过监测数据分析、并与超限阈值比较，进行桥梁结构健康度评估，评估参数包括：
 - 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、疲劳等监测数据；
 - 结构整体健康度表征评估参数：采用主梁竖向和横向位移、塔顶偏位、主缆偏位、支座位移、高墩墩顶位移、锚碇位移、拱脚位移、基础冲刷深度、锚跨索股力、预应力、主梁振动等监测数据，以及塔顶或主缆或主拱永久偏位、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。

11.5.3 可通过损伤识别和模型修正建立可靠的有限元模型，将计算的结构响应和结构变化结果与表 13 中超限阈值进行对比，参考表 17 进行桥梁结构健康度评估。

11.5.4 当构件健康度或结构整体健康度为Ⅲ级中等异常时，应开展专项分析，可组织专家研判；当构件健康度或结构整体健康度为Ⅳ级较重异常或Ⅴ严重异常时，应进行专家研判。

11.6 基础研究

11.6.1 应用长期跟踪监测数据，可开展桥梁结构、构件、材料、附属设施等长期性能退化及预测、结构可靠性评估和区域桥梁群体关联性研究。

11.6.2 基于风险场景监测，宜开展桥梁特定致灾机理研究。

11.6.3 应用监测数据，可开展桥梁设计理论方法的验证、修正工作。

11.6.4 根据特定需求，可开展相应监测及基础研究工作。

11.7 数据分析报告

11.7.1 监测数据应用应定期或按需形成数据分析报告，报告成果可包括日常监测报告、特殊事件报告、养护评估报告和基础研究报告，报告出具的频次应满足表 18 的要求。

表 18 监测应用数据分析报告出具频次

序号	报告类型	频率
1	日常监测报告	季度、年度
2	特殊事件报告	特殊事件发生后
3	养护评估报告	年度
4	基础研究报告	按需

11.7.2 日常监测报告内容应包括系统运行情况说明和桥梁结构状况分析，并给出分析结论和管养建议。系统运行情况说明宜包括数据质量分析、软硬件的维护情况等，桥梁结构状况分析宜汇总说明周期内各监测数据分析及其超限报警情况、特殊事件应急管理下的分析结论以及为养护评估而开展的相关数据分析和结论。

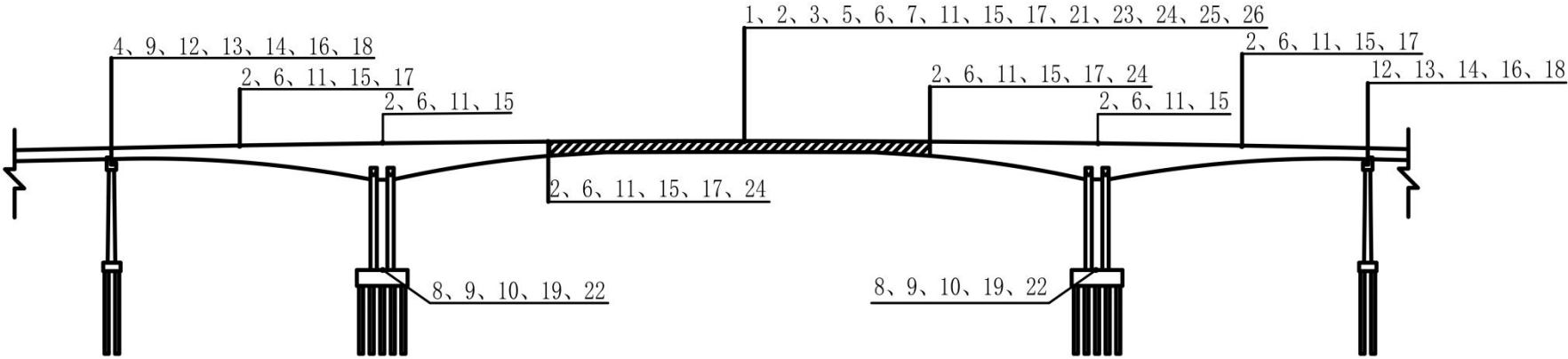
11.7.3 针对台风、影响程度较大的地震、车船撞击、大件运输车辆过桥、主梁涡激振动等对桥梁安全运行管理影响较大的特殊事件，应编制特殊事件报告，其他类型特殊事件视影响程度大小确定是否编制报告。特殊事件报告应说明事件概况、监测数据超限报警情况、应急处置、信息报送等情况，分析事前、事中、事后数据，评估事件影响，给出管养建议。

11.7.4 养护评估报告宜综合采用监测、检查等数据分析成果编制，宜包括结构健康度评估、桥梁技术状况评定、适应性评定和其他专项养护评估等内容，并综合分析评估结构整体受力性能、主要受力构件性能、附属设施使用性能等，给出评估结论和管养建议。

11.7.5 基础研究报告可结合研究情况，针对桥梁结构、构件、材料、附属设施等长期性能或其他研究内容进行编制。

附录 A
(资料性)
测点布设示意图

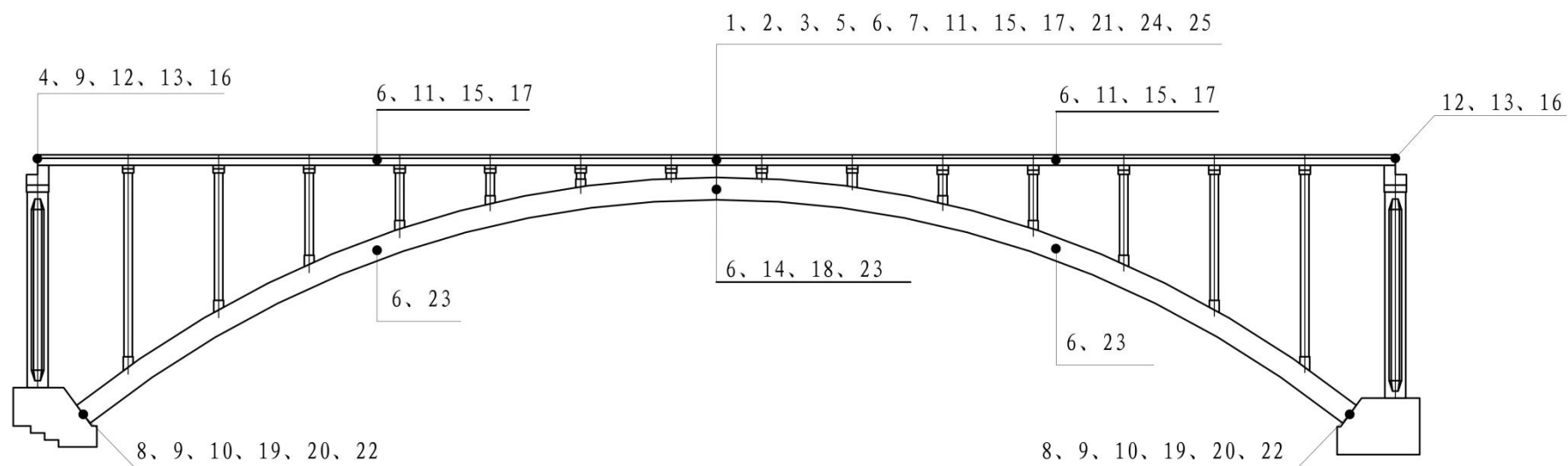
测点布设示意图见图A.1～图A.5。



标引序号说明：

- | | | | | | |
|------------|------------|--------------|------------------|-------------|---------|
| 1——环境温湿度； | 6——结构温度； | 11——主梁位移（竖）； | 16——支座反力； | 21——关键截面裂缝； | 26——水位。 |
| 2——主梁内温湿度； | 7——桥面铺装温度； | 12——支座位移； | 17——主梁振动（纵、横、竖）； | 22——腐蚀； | |
| 3——桥面结冰； | 8——船舶撞击； | 13——梁端纵向位移； | 18——墩顶振动（纵、横）； | 23——体外预应力； | |
| 4——车辆荷载； | 9——视频图像； | 14——墩顶位移（竖）； | 19——基础冲刷； | 24——螺栓状态； | |
| 5——桥面风速风向； | 10——地震动； | 15——主梁应变； | 20——桥墩沉降； | 25——降雨量； | |

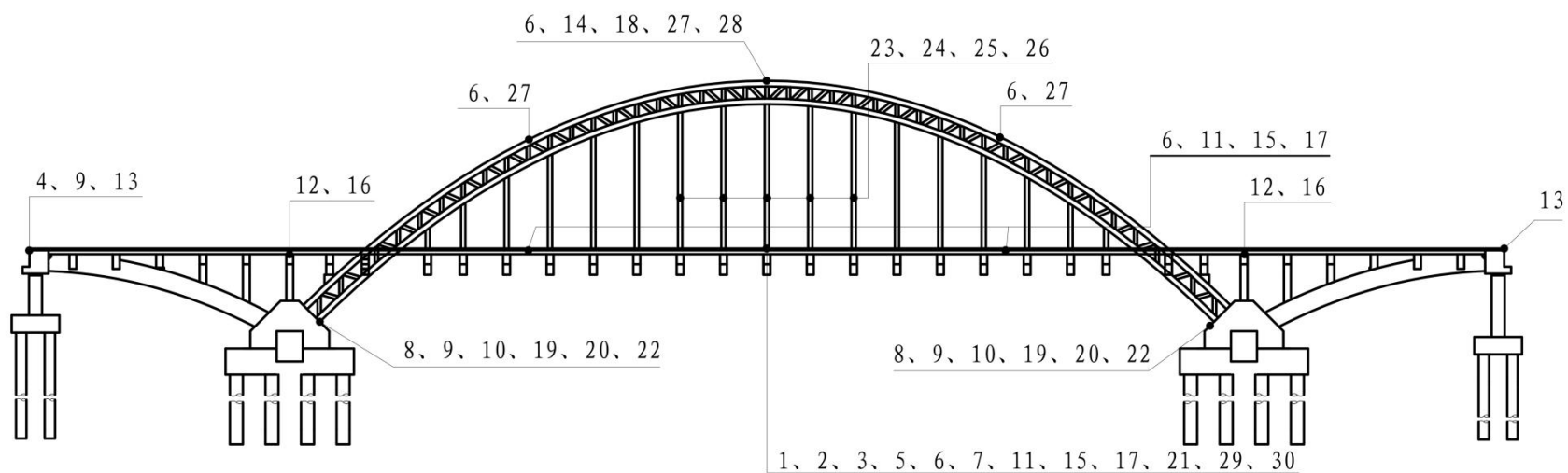
图A.1 梁桥测点布设示意图



标引序号说明:

- | | | | |
|------------|----------------|------------------|-----------|
| 1——环境温湿度; | 8——船舶撞击; | 15——主梁应变; | 22——腐蚀; |
| 2——主梁内温湿度; | 9——视频图像; | 16——支座反力; | 23——主拱应变; |
| 3——桥面结冰; | 10——地震动; | 17——主梁振动(纵、横、竖); | 24——降雨量; |
| 4——车辆荷载; | 11——主梁位移(横、竖); | 18——拱顶振动(纵、横、竖); | 25——水位。 |
| 5——桥面风速风向; | 12——支座位移; | 19——基础冲刷; | |
| 6——结构温度; | 13——梁端纵向位移; | 20——拱脚位移; | |
| 7——桥面铺装温度; | 14——拱顶位移; | 21——关键截面裂缝; | |

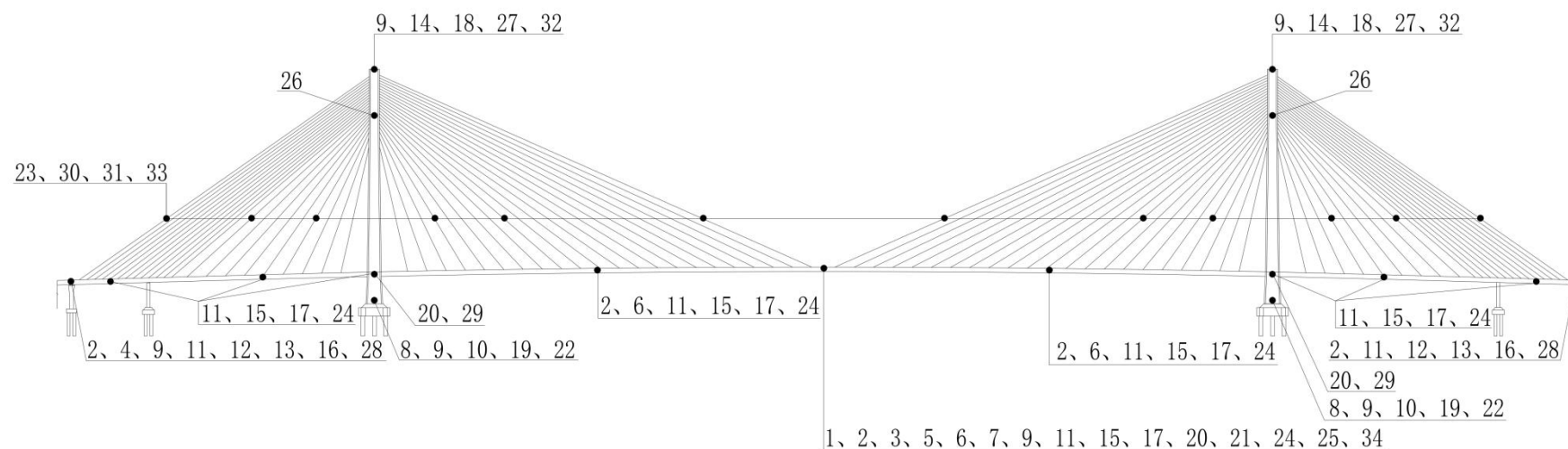
图A.2 上承式拱桥测点布设示意图



标引序号说明:

- | | | | | |
|------------|----------------|------------------|-------------|----------|
| 1——环境温湿度; | 8——船舶撞击; | 15——主梁应变; | 22——腐蚀; | 29——降雨量; |
| 2——主梁内温湿度; | 9——视频图像; | 16——支座反力; | 23——吊杆断丝; | 30——水位。 |
| 3——桥面结冰; | 10——地震动; | 17——主梁振动(纵、横、竖); | 24——螺栓状态; | |
| 4——车辆荷载; | 11——主梁位移(横、竖); | 18——拱顶振动(纵、横、竖); | 25——吊杆力; | |
| 5——桥面风速风向; | 12——支座位移; | 19——基础冲刷; | 26——吊杆振动; | |
| 6——结构温度; | 13——梁端纵向位移; | 20——拱脚位移; | 27——主拱应变; | |
| 7——桥面铺装温度; | 14——拱顶位移; | 21——关键截面裂缝; | 28——拱顶风速风向。 | |

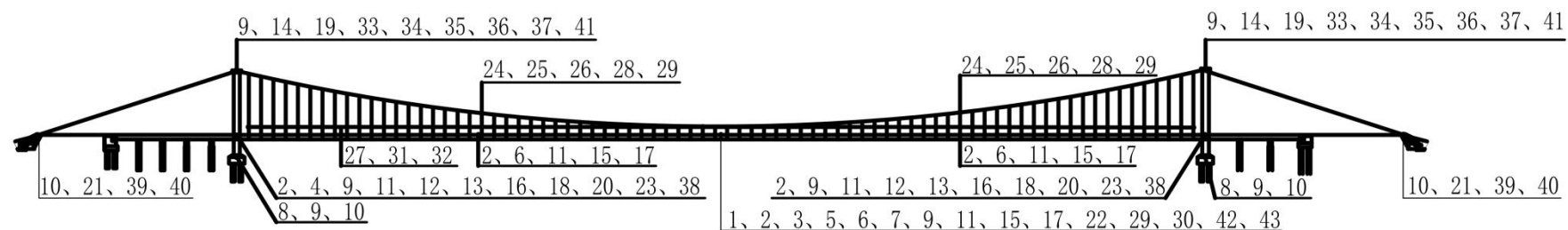
图A.3 中承式或下承式拱桥测点布设示意图



标引序号说明:

- | | | | | |
|------------|----------------|------------------|------------------|---------------|
| 1——环境温湿度; | 8——船舶撞击; | 15——主梁应变; | 22——腐蚀; | 29——索塔关键截面应变; |
| 2——主梁内温湿度; | 9——视频图像; | 16——支座反力; | 23——斜拉索断丝; | 30——斜拉索索力; |
| 3——桥面结冰; | 10——地震动; | 17——主梁振动(纵、横、竖); | 24——螺栓状态; | 31——斜拉索振动; |
| 4——车辆荷载; | 11——主梁位移(横、竖); | 18——塔顶振动(纵、横); | 25——降雨量; | 32——塔顶风速风向; |
| 5——桥面风速风向; | 12——支座位移; | 19——基础冲刷; | 26——索塔锚固区温湿度; | 33——斜拉索结冰; |
| 6——结构温度; | 13——梁端纵向位移; | 20——预应力; | 27——塔顶倾角; | 34——水位。 |
| 7——桥面铺装温度; | 14——塔顶偏位; | 21——关键截面裂缝; | 28——梁端转角(水平、竖向); | |

图A.4 斜拉桥测点布设示意图



标引序号说明:

- | | | | | | |
|------------|----------------|----------------|-------------|------------------|----------|
| 1——环境温湿度; | 9——视频图像; | 17——主梁振动(竖、横); | 25——螺栓状态; | 33——塔顶倾角; | 41——主缆结冰 |
| 2——主梁内温湿度; | 10——地震动; | 18——主梁振动(纵); | 26——索夹滑移; | 34——鞍罩内温湿度; | 42——水位; |
| 3——桥面结冰; | 11——主梁位移(横、竖); | 19——塔顶振动(纵、横); | 27——吊索断丝; | 35——索塔内温湿度; | 43——降雨量。 |
| 4——车辆荷载; | 12——支座位移; | 20——基础冲刷; | 28——主缆内温湿度; | 36——塔顶风速风向; | |
| 5——桥面风速风向; | 13——梁端纵向位移; | 21——锚碇位移; | 29——主缆偏位; | 37——塔关键截面应变; | |
| 6——结构温度; | 14——塔顶偏位; | 22——关键截面裂缝; | 30——主梁风压; | 38——梁端转角(水平、竖向); | |
| 7——桥面铺装温度; | 15——主梁应变; | 23——腐蚀; | 31——吊索索力; | 39——锚室内温湿度; | |
| 8——船舶撞击; | 16——支座反力; | 24——主缆断丝; | 32——吊索振动; | 40——锚跨索股力; | |

图A.5 悬索桥测点布设示意图

附 录 B
(资料性)
监测内容基本信息定义

监测类别基本信息定义见表B.1。

表B.1 监测类别基本信息定义

监测类别		监测类别简称	监测内容	数据单位	数据方向
环境	环境温度	RTS	桥址区环境温度	摄氏度 (°C)	—
			主梁内温度		
			主缆内温度		
			锚室内温度		
			鞍罩内温度		
			索塔内温度		
	环境湿度	RHS	桥址区环境湿度	百分比 (%)	—
			主梁内湿度		
			主缆内湿度		
			锚室内湿度		
			鞍罩内湿度		
			索塔内湿度		
	雨量	PWS	降雨量	毫米 (mm)	—
	结冰	FRZ	桥面结冰	毫米 (mm)	—
			主缆结冰		
	水位	WAT	水位	毫米 (mm)	—
作用	车辆荷载	HSD	所有车道车重、轴重、轴数、车速	车重、轴重：千克 (kg) 车速：千米每小时 (km/h)	—
			所有车道车流量	辆	—
			所有车道的车辆空间分布	—	—
	风速、风向	UAN	桥面风速、风向	风速：米每秒 (m/s)， 风向：度 (°)	水平风向以正北向为0°，正东向为90°，正南向为180°，正西向为270°；竖直风向以水平为0°，垂直于水平面向下为-90°，垂直于水平面向上为90°。
			塔顶风速、风向		
	结构温度	TMP	混凝土或钢结构构件温度	摄氏度 (°C)	—
			主缆温度		
			桥面铺装层温度		
	船舶撞击	VID	桥墩加速度	米每平方秒 (m/s ²)	—
	地震	VIE	桥岸地表场地加速度	米每平方秒 (m/s ²)	—
			承台顶或桥墩底部加速度		
结构响应	位移	DIS	主梁竖向位移	毫米 (mm)	下挠为负，上拱为正
			主梁横向变形		—
			支座位移		—
			梁端纵向位移		—

表B.1 监测类别基本信息定义表（续）

监测类别		监测类别简称	监测内容	数据单位	数据方向
结构响应	位移	DIS	塔顶偏位	毫米（mm）	x为顺桥向方向、y为横桥向方向，z为水平面向上法线方向。
			主缆偏位		x为顺桥向方向、y为横桥向方向，z为水平面向上法线方向。
			拱顶位移		—
			梁桥高墩墩顶位移		—
	转角	INC	塔顶截面倾角	度（°）	—
			梁端水平转角		
			梁端竖向转角		
	应变	RSG	主梁关键截面应变	微应变（ $\mu\epsilon$ ）	负值为压应变，正值为拉应变
			索塔关键截面应变		
	索力	VIC	吊索索力	千牛（kN）	—
			锚跨索股力		
	支座反力	STF	支座反力	千牛（kN）	—
	振动	VIB	主梁竖向振动加速度	米每平方秒（ m/s^2 ）	—
			主梁横向振动加速度		
			主梁纵向振动加速度		
			塔顶水平双向振动加速度		
			索振动加速度		
结构变化	基础冲刷	SCO	基础冲刷深度	毫米（mm）	—
	位移	AND	锚碇位移	毫米（mm）	—
			拱脚位移		—
	裂缝	CRK	混凝土结构裂缝	毫米（mm）	—
			钢结构裂缝		
	腐蚀	COR	墩身、承台混凝土氯离子浓度	千克每立方米（ kg/m^3 ）	—
			墩身、承台混凝土侵蚀深度	毫米（mm）	—
	预应力	STR	体外预应力	千牛（kN）	—
	断丝	BRK	吊索、主缆断丝	—	—
	螺栓状态	BTF	索夹螺杆紧固力、高强螺栓紧固力、螺栓滑脱	千牛（kN）	—
	索夹滑移	CSP	索夹滑移	毫米（mm）	—

附 录 C
(资料性)
监测系统数据字典定义

监测系统在设计时对桥梁基本信息、监测项监测点属性信息、实时监测数据等重要数据进行必要的数据字典规范定义，具体定义见下表C.1～表C.14。

表C.1 数据字典定义

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	字典唯一标识（ID）
字典类别	字符型	类别编码
字典项	字符型	字典项的键名（Key）
字典值	字符型	字典项的键值（Value）
是否有效	布尔型	该字典项是否有效
备注	字符型	备注或说明

表C.2 桥梁基本信息

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	桥梁ID
桥梁编码	字符型	公路桥梁唯一编码
桥梁名称	字符型	
桥梁简称	字符型	桥梁名称大写首字母大写组合，如杭州湾大桥表示为：HZWDQ
桥梁中心桩号	字符型	
所在路线名称	字符型	桥梁所在国省道路线名称，如G2-京沪高速
桥梁全长	字符型	
跨径总长	字符型	
单孔最大跨径	字符型	
桥梁全宽	字符型	
桥面净宽	字符型	
按跨径分类类型	字符型	特大桥、大桥、中桥、小桥
主桥上部结构类型	字符型	桥型：斜拉桥、悬索桥、梁桥、拱桥等
主桥上部结构材料	字符型	钢、钢混组合、钢管混凝土、钢筋混凝土等
桥墩类型	字符型	桁架墩、混合墩、薄壁墩、单柱墩、多柱墩等
设计荷载	字符型	公路I级、汽车-20级等
抗震等级	字符型	
建设单位	字符型	
设计单位	字符型	
施工单位	字符型	
监理单位	字符型	
修建年度	字符型	
通车日期	字符型	
管养单位	字符型	
监管部门	字符型	
技术状况等级	字符型	一类-五类
最新评定日期	日期时间型	最近一次技术状况评定日期
监测系统建成时间	字符型	系统投入运行时间
监测项数	整型	监测系统总监测项数量
测点数量	整型	监测系统总测点数量

表C.2桥梁基本信息表（续）

字段名称	数据类型	字段含义
备注	字符型	

表C.3 桥梁文件信息

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	文件ID
模块类型	字符型	资料所属模块，如报告资料
文件类别	字符型	资料文件类别，如报告中的月报或年报
文件类型	字符型	文件类型，如word、pdf、png
业务ID	长整型	业务ID，具体挂接业务信息，可为桥梁ID，-1表示无业务信息
文件名	字符型	
文件大小	整型	单位字节数
文件存储路径	字符型	
文件缩略图	字符型	
文件创建时间	日期时间型	
创建人	字符型	创建人ID
是否有效	布尔型	该账号在该组织下是否有
备注	字符型	备注或说明

表C.4 监测内容基本信息

字段名称	数据类型	字段含义
ID	整型	监测项ID
监测内容编码	字符型	系统监测类型唯一标识定义
监测内容名称	字符型	本文件中规定的监测类型全称
监测内容简称	字符型	3位大写字母
所属监测类别	字符型	枚举类型：环境、作用、结构响应、结构变化
监测目的	字符型	描述该监测项主要监测部位和目的
传感器类型	字符型	使用的传感器类型
备注	字符型	

表C.5 监测测点基本信息

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	监测点唯一标识
监测内容ID	整型	
传感器ID	长整型	
传感器位置	字符型	传感器安装位置描述
通道编码	整型	该监测点通道编码，为整型数字，用于实时监测数据传输报文
数据单位	字符型	输出数据单位
数据精度	浮点型	数据保留小数点精度
三级超限阈值上限	浮点型	三级超限阈值上限
三级超限阈值下限	浮点型	三级超限阈值下限
二级超限阈值上限	浮点型	二级超限阈值上限
二级超限阈值下限	浮点型	二级超限阈值下限
一级超限阈值上限	浮点型	一级超限阈值上限
一级超限阈值下限	浮点型	一级超限阈值下限

表C.5 监测测点基本信息表（续）

字段名称	数据类型	字段含义
是否启动报警	布尔型	是否启动超限报警功能
备注	字符型	

表C.6 传感器基本信息

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	传感器唯一标识
传感器编码	字符型	传感器在桥上安装的唯一编码
传感器类型	字符型	传感器类型
传感器型号	字符型	传感器型号
生产厂家	字符型	传感器生产厂家
信号类型	字符型	电流、电压、电阻、光纤等
信号范围	字符型	信号输出范围，如：4mA~20mA
分辨力	双精度浮点型	传感器采集数据分辨力
K值	双精度浮点型	转换参数K值
B值	双精度浮点型	转换参数B值
采样频率	浮点型	数据采样频率，单位为赫兹（Hz）
安装时间	日期时间型	设备安装或更换时间
安装位置	字符型	设备在桥梁安装位置
当前状态	整型	0：正常，1：故障，2：损坏，3：维修，4：更换

表C.7 实时监测数据

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	
传感器ID	长整型	该条监测数据所属传感器
数据采集时间	日期时间型	
当前值	双精度浮点型	按实际精度要求保留小数点
报警状态	整型	0：正常，1：一级超限报警，2：二级超限报警，3：三级超限报警
数据状态	整型	0：正常，1：异常
备注	字符型	

表C.8 特征值统计数据

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	
传感器ID	字符型	该条监测数据所属传感器
数据采集时间	日期时间型	
采样间隔	整型	特征值统计间隔时间，单位为秒（s）
最大值	双精度浮点型	统计时间范围内的最大值
最小值	双精度浮点型	统计时间范围内的最小值
平均值	双精度浮点型	统计时间范围内的平均值
RMS均方根	双精度浮点型	统计时间范围内的均方根值
方差	双精度浮点型	统计时间范围内的方差值
数据状态	整型	0：正常，1：异常
备注	字符型	

表C.9 车辆荷载监测数据

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	数据ID
监测点ID	长整型	该条监测数据所属测点ID
车道号	整型	车辆所在的车道号
车辆经过时间	日期时间型	车辆经过，设备采集到的时间
上下行	整型	当前车辆行驶方向
车辆类型ID	字符型	根据类型ID与车辆类型表关联
车速	双精度浮点型	车辆在行进中，设备采集到的车速
车轴数量	整型	车辆对应的轴数
总负荷	双精度浮点型	车辆总重
左轴1重；左轴2重……	双精度浮点型	左轴重量（根据轴数多少来增删）
右轴1重；右轴2重……	双精度浮点型	右轴重量（根据轴数多少来增删）
车牌对应的ID	字符型	通过外键与车牌信息表关联
备注		

表C.10 视频属性信息

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	
视频编号	字符型	对应摄像头的名称
桥梁ID	字符型	摄像头所属桥梁ID
网际协议地址	字符型	对应摄像头的访问地址
端口	字符型	通过端口和网际协议访问摄像头
登录用户名	字符型	摄像头登录页面用户名
登录密码	字符型	用户名对应的密码
状态	整型	根据状态判断摄像头是否在工作
备注	字符型	

表C.11 超限报警信息

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	数据ID
监测点ID	长整型	该条报警数据所属监测点ID
报警级别	整型	报警级别（0：关注提示；1：一级超限；2：二级超限；3：三级超限）
当前超限值	双精度浮点型	按照实际精度保留小数
报警开始时间	日期时间型	开始出现报警的时间
报警结束时间	日期时间型	报警结束的时间
处理状态	整型	报警记录的关注状态（0：未处理；1：已处理）
处理措施	字符型	
备注	字符型	

表C.12 特殊事件信息

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	
特殊事件名称	字符型	特殊事件的名称
特殊事件类型	字符型	特殊事件所属的事件类型（例如：强（台）风；地震；洪水；车祸等）

表C.12 特殊事件信息表（续）

字段名称	数据类型	字段含义
特殊事件开始时间	日期时间型	特殊事件发生的时间
特殊事件结束时间	日期时间型	特殊事件结束的时间
事件描述	长文本型	对特殊事件进行一个简述
录入人	字符型	录入事件的人员名称
录入时间	日期时间型	录入事件的时间
处置状态	整型	(0: 未处置; 1: 已处置)
处置措施	长文本型	
备注	字符型	

表C.13 桥梁健康度信息

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	数据ID
健康度	字符型	健康度等级: I基本完好、II轻微异常、III中等异常、IV较重异常、V严重异常
评估时间	日期时间型	
备注	字符型	
是否最新	布尔型	

表C.14 桥梁评估报告信息

字段名称	数据类型	字段含义
ID	长整型	
桥梁ID	字符型	报告所对应的桥ID
名称	字符型	上传报告的名称
报告所属类型	字符型	报告类型编号
文件实体ID	字符型	用于对报告进行后期下载查看
评估日期	日期时间型	报告对应的评估日期
上传人	字符型	上传报告的用户
上传时间	日期时间型	用户上传报告的时间
备注	字符型	

附录 D
(资料性)
实时数据传输协议

D.1 通用报文协议编码

通用报文协议编码主要用于除了GNSS和动态称重数据的监测数据的实时传输，其网络连接采用TCP或UDP协议，报文长度一共16+N×4个字节，其中前面16字节为传感器属性信息，后面的N×4为每一秒的数据值，可以是多组数据，具体报文协议结构如图D. 1所示。具体协议数据格式见表D. 1。



图 D.1 通用报文协议结构组成
表D.1 通用报文协议数据格式定义

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注
报文类型	0	报文类型	BYTE	报文类型=2	02代表通用报文
预留位	1	预留	BYTE	预留，默认为0	
	2	方向	BYTE	0：下行信息，1：上行信息	
	3	网络通讯计算机编号	BYTE	默认为0	
	4	命令码	BYTE	命令码=1	
消息长度	5	长度低	INT	报文长度用两个字节表示，低字节在前，高字节在后	报文长度为 N×4+9, 即7个时间字节和2个对象码字节，每个数据值占4个字节，一共N对。
	6	长度高			
时间戳	7	年	BYTE	年+1900	实际的年需要加上1900
	8	月	BYTE	月	
	9	日	BYTE	日	
	10	时	BYTE	时	
	11	分	BYTE	分	
	12	毫秒低	INT	毫秒用两个字节表示，低字节在前，高字节在后	用毫秒数除以1000得到的值就是秒数，余数就是毫秒数。
	13	毫秒高			
传感器通道	14	对象码低	INT	对象码用两个字节表示，低字节在前，高字节在后	对象码就是数据通道编码
	15	对象码高			
传感器数据	16	数据值低	FLOAT	数据值用四个字节表示，此字节为低字节	从字节16开始，依次每四个字节表示一个数据值，一共N个。
	17	数据值		数据值用四个字节表示，此字节为次低字节	
	18	数据值		数据值用四个字节表示，此字节为次高字节	
	19	数据值高		数据值用四个字节表示，此字节为高字节	

D.2 GNSS 报文协议编码

GNSS报文协议编码主要实现GNSS监测类型的数据实时传输，包含北斗、GPS等，传输数据应为解算后的X, Y, Z坐标的相对变化量，协议消息体长度根据测点数量而变化，具体报文协议结构如图D. 2所示。GNSS报文协议具体数据格式定义见表D. 2。



图 D.2 GNSS 报文协议结构组成

表 D.2 GNSS 报文协议数据格式定义

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注
报文类型	0	报文类型	BYTE	报文类型=3，	03代表GNSS报文
预留位	1	预留	BYTE	预留，默认为0	预留信息
	2	方向	BYTE	0：下行信息，1：上行信息	数据传输方向
	3	网络通讯计算机编号	BYTE	默认为0，	预留信息
	4	命令码	BYTE	命令码=1，	预留信息
	5	数据类型	BYTE	数据类型=0	默认为0 表示坐标数据
测点数	6	测点个数	BYTE	本报文中包含测点数量	最小为1，最大255
测点1数据	7	测点1的dx编号	INT	x方向的数据通道编号，二字节整数	编号为整型数字
	9	测点1的dx值	FLOAT	浮点数，占用4个字节，字节序前低后高	
	13	测点1的dy编号	INT	y方向的数据通道编号，二字节整数	编号为整型数字
	15	测点1的dy值	FLOAT	浮点数，占用4个字节，字节序前低后高	
	19-20	测点1的dz编号	INT	z方向的数据通道编号，二字节整数	编号为整型数字
	21-24	测点1的dz值	FLOAT	浮点数，占用4个字节，前低后高	
	25-32	测点1采集时间	BYTE[8]	占用8个字节，时间格式是年月日时分秒毫秒（毫秒两字节）	实际的年需要加上1900
...	...				
测点N数据	26×(N-1)+7	测点N的dx编号	INT	x方向的数据通道编号	重复测点1的字段

D.3 车轴车速仪报文协议编码

车轴车速仪报文协议编码主要实现动态称重（WIM）系统采集的车速、车重、车型等数据的实时传输，其网络连接采用传输控制协议（TCP）或用户数据报协议（UDP），报文协议由一组固定长度为162字节的消息体组成，具体协议构成如图 D.3和表 D.3。

报文 类型 1byte	预留位 5byte	车辆基本信息 23byte	轴重信息 64byte	轴距信息 28byte	其他信息 41byte
-------------------	--------------	------------------	----------------	----------------	----------------

图 D.3 车轴车速仪报文协议组成

表 D.3 车轴车速仪报文协议数据格式定义

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注
报文类型	0	报文类型	BYTE	报文类型=4	04表示车轴车速仪报文
预留位	1	预留	BYTE	预留，暂时为空	
	2	方向	BYTE	方向=1	1:上行信息
	3	网络通讯计算机编号	BYTE	计算机编号=1	称重计算机编号
预留位	4	命令码	BYTE	命令码=1	默认为1
	5	数据类型	BYTE	数据类型=1	全部数据内容放在一个结构体里。
车辆基本信息	6-9	图片编号	BYTE[4]	四字节图片编号	与本条数据对应的车辆照片的编号,有抓拍功能的使用
	10	车道号	BYTE		车辆通过时所在车道号
	11-16	检测时间	BYTE[6]	六字节,年月日时分秒	车辆通过时间,精确到秒
	17	上下行	BYTE	BYTE, 0/1	0: 上行 1: 下行
	18	单轴数	BYTE	单字节整数	车辆总轴数
	19	轴组数	BYTE	单字节整数	
	20-23	总重	INT	整数值, 4个字节, 前低后高	
	24-27	超限率	INT	整数值, 4个字节, 前低后高	
	28	车型	BYTE	单字节车型编码	
轴重信息	29-32	左1轮重	INT	整数值, 4个字节, 前低后高	
	33-36	左2轮重	INT	整数值, 4个字节, 前低后高	
	37-40	左3轮重	INT	整数值, 4个字节, 前低后高	
	41-44	左4轮重	INT	整数值, 4个字节, 前低后高	
	45-48	左5轮重	INT	整数值, 4个字节, 前低后高	
	49-52	左6轮重	INT	整数值, 4个字节, 前低后高	
	53-56	左7轮重	INT	整数值, 4个字节, 前低后高	
	57-60	左8轮重	INT	整数值, 4个字节, 前低后高	
	61-64	右1轮重	INT	整数值, 4个字节, 前低后高	
	65-68	右2轮重	INT	整数值, 4个字节, 前低后高	
	69-72	右3轮重	INT	整数值, 4个字节, 前低后高	

表 D.3车轴车速仪报文协议数据格式定义（续）

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注
轴重信息	73-76	右4轮重	INT	整数值，4个字节，前低后高	
	77-80	右5轮重	INT	整数值，4个字节，前低后高	
	81-84	右6轮重	INT	整数值，4个字节，前低后高	
	85-88	右7轮重	INT	整数值，4个字节，前低后高	
	89-92	右8轮重	INT	整数值，4个字节，前低后高	
	93-96	轴1、2间距	INT	整数值，4个字节，前低后高	
	97-100	轴2、3间距	INT	整数值，4个字节，前低后高	
	101-104	轴3、4间距	INT	整数值，4个字节，前低后高	
	105-108	轴4、5间距	INT	整数值，4个字节，前低后高	
	109-112	轴5、6间距	INT	整数值，4个字节，前低后高	
	113-116	轴6、7间距	INT	整数值，4个字节，前低后高	
	117-120	轴7、8间距	INT	整数值，4个字节，前低后高	
其他信息	121-124	违例码	INT	整数值，4个字节，前低后高	
	125	超限标识	BYTE	0：未超限，1：超限	
	126-129	车速	INT	整数值，4个字节，前低后高	车辆通过时车速（km/h）
	130-133	加速度	FLOAT	浮点值，4个字节，前低后高	
	134-137	当量轴次	FLOAT	浮点值，4个字节，前低后高	将车重换算成标准轴载作用次数
	138-157	车牌	NVCHAR	预留	有车辆抓拍功能的使用
	158-161	车牌颜色	NVCHAR	预留	有车辆抓拍功能的使用

附 录 E (资料性) 实时数据传输协议

E.1 监测点分项评分

E.1.1 监测点评分由数据完整性、数据时效性、数据准确性、数据真实性四个分项组成，见公式 (E.1)：

$$F_{l,k}^m, m=1,2,3,4 \quad (\text{E.1})$$

式中：

$F_{l,k}^m$ ——第 l 个监测项中第 k 个监测点数据第 m 个评分项的得分，值域为 0%~100%；单桥系统数据质量评价时，评价对象为原始数据，省级监测平台/部级数据平台数据质量评价时，评价对象为特征值数据。

m ——评分项编号，其中 1 代表数据完整性，2 代表数据时效性，3 代表数据准确性，4 代表数据真实性；

l ——单桥系统各监测项编号；

k ——监测项中监测点编号。

E.1.2 数据完整性反映了监测系统数据的完整程度，通过数据完整率指标进行评价。可按公式 (E.2) 计算数据完整率：

$$F_{l,k}^1 = \frac{n_{l,k}^1}{N_{l,k}^1} \times 100\% \quad (\text{E.2})$$

式中：

$n_{l,k,原}^1$ ——第 l 个监测项第 k 个监测点评价时间周期内实际数据量；

$N_{l,k,原}^1$ ——第 l 个监测项第 k 个监测点评价时间周期内要求数据量。

E.1.3 数据时效性反映了监测系统数据的及时性和监测系统的时钟同步性，通过原始数据时效性进行评价。当原始数据写入单桥系统数据库时间早于原始数据采集时间，或者写入数据库时间与采集时间的差值大于 10 分钟，认为该条原始数据时效性不满足要求。当特征值数据写入省级监测平台/部级数据平台数据库时间早于特征值采集时间，或者写入数据库时间与特征值采集时间的差值大于 20 分钟，认为该条特征值数据时效性不满足要求。可按公式 (E.3) 计算数据时效性：

$$F_{l,k}^2 = \frac{n_{l,k}^2}{N_{l,k}^2} \times 100\% \quad (\text{E.3})$$

式中：

$n_{l,k,原}^2$ ——第 l 个监测项第 k 个监测点评价时间周期内传输至监测系统及时的数据量；

$N_{l,k,原}^2$ ——第 l 个监测项第 k 个监测点评价时间周期内传输至监测系统总的数据量。

E.1.4 数据准确性反映了数据变化趋势及数据大小与实际或者经验情况的符合程度。可通过数据异常检测算法进行自动化分析，可采用标准差的统计方法、变异系数的统计方法、一阶差分与阈值比较的差分方法等方法，通过数据准确率进行评价。必要时，可现场校核数据准确性。可按公式 (E.4) 计算数据准确性：

$$F_{l,k}^3 = \frac{n_{l,k}^3}{N_{l,k}^3} \times 100\% \quad (\text{E.4})$$

式中：

$n_{l,k,原}^3$ ——第 l 个监测项第 k 个监测点评价时间周期内数据准确的数据量；

$N_{l,k,原}^3$ ——第 l 个监测项第 k 个监测点评价时间周期内总的数据量。

E.1.5 数据真实性反映了数据保持原始状态、未被篡改、伪造或未经授权修改的特性，可采用统计分布特性方法、结合其他相关信息（如天气状况、交通流量等）的多角度验证等方法进行。

监测点原始数据不真实时， $F_{l,k}^4$ 为 0%；否则， $F_{l,k}^4$ 为 100%。

E.2 监测点评分

监测点评分按公式（E.5）计算。

$$M_{l,k}=F_{l,k}^1\times\left(\frac{F_{l,k}^2+100\%}{2}\right)\times F_{l,k}^3\times F_{l,k}^4 \tag{E.5}$$

式中：

$M_{l,k}$ ——第 l 个监测项第 k 个监测点总体评分，值域为 0%~100%。

E.3 监测项评分

监测项评分按公式（E.6）计算。

$$M_l=\overline{M_{l,k}} \tag{E.6}$$

式中：

M_l ——第 l 个监测项总体评分，值域为 0%~100%；

$\overline{M_{l,k}}$ ——第 l 个监测项各监测点总体评分平均值，值域为 0%~100%。

E.4 单桥系统评分

E.4.1 单桥系统评分按公式（E.7）计算。

$$B_i=\frac{\sum(M_l\times\omega_l)}{\sum\omega_l} \tag{E.7}$$

式中：

B_i ——第 i 座单桥系统评分，值域为 0%~100%；

ω_l ——第 l 个监测项数据的权重指标赋分值。

E.4.2 监测项数据权重符合下列规定：

- a) 超限报警、应急管理、养护评估、基础研究等不同应用场景使用不同的权重；
- b) 表 E.1~表 E.4 列有但单桥监测系统未设置的监测项，其权重应按各既有监测项权重占全部既有监测项权重的比例，分配给其他既有监测项；
- c) 表 E.1~表 E.4 未列但单桥监测系统已设置的监测项，其权重宜按同类、同等重要程度监测项的权重确定，并按各既有监测项权重占全部既有监测项权重的比例，从其他既有监测项权重中扣减。

E.5 省级监测平台/部级数据平台系统评分

省级监测平台/部级数据平台系统评分按公式（E.8）计算

$$P_j=\overline{B_i} \tag{E.8}$$

式中：

P_j ——不同维度下省级监测平台/部级数据平台评分，值域为 0%~100%；

$\overline{B_i}$ ——不同维度下省级监测平台/部级数据平台各单桥系统评分平均值，值域为 0%~100%。

E.6 监测项数据的权重指标赋分值表

E.6.1 梁桥监测数据权重指标赋分值见表 E.1。

表 E.1 梁桥权重指标赋分值

监测类别	梁桥监测项	ω_l			
		超限报警	应急管理	养护评估	基础研究
环境	温度、湿度	0.021	0.019	0.016	0.024
	结冰	0.019	0.025	0.019	0.018
	降雨量	0.012	0.017	0.013	0.012
	水位	0.019	0.025	0.019	0.018
作用	车辆荷载	0.045	0.040	0.046	0.066
	风速、风向	0.028	0.030	0.023	0.027
	结构温度	0.022	0.019	0.015	0.027
	船舶撞击	0.045	0.081	0.061	0.043

表 E.1 梁桥权重指标赋分值（续）

监测类别	梁桥监测项	ω_1			
		超限报警	应急管理	养护评估	基础研究
作用	地震	0.047	0.062	0.047	0.046
结构响应	位移	0.088	0.078	0.120	0.086
	转角	0.045	0.039	0.046	0.043
	应变	0.042	0.036	0.028	0.040
	支座反力	0.075	0.067	0.061	0.074
	振动	0.058	0.080	0.039	0.058
结构变化	基础冲刷	0.086	0.075	0.070	0.082
	桥墩沉降	0.085	0.075	0.113	0.082
	裂缝	0.064	0.057	0.064	0.062
	腐蚀	0.069	0.061	0.069	0.066
	预应力	0.095	0.082	0.095	0.091
	螺栓状态	0.035	0.032	0.036	0.035

E.6.2 上承式拱桥监测数据权重指标赋分值见表 E.2。

表 E.2 上承式拱桥权重指标赋分值

监测类别	拱桥监测项	ω_1			
		超限报警	应急管理	养护评估	基础研究
环境	温度、湿度	0.022	0.019	0.018	0.025
	结冰	0.024	0.028	0.025	0.023
	雨量	0.015	0.019	0.016	0.015
	水位	0.024	0.028	0.025	0.023
作用	车辆荷载	0.046	0.038	0.049	0.064
	风速、风向	0.033	0.035	0.029	0.031
	结构温度	0.025	0.023	0.019	0.030
	船舶撞击	0.047	0.082	0.068	0.044
	地震	0.051	0.067	0.056	0.049
结构响应	位移	0.094	0.083	0.139	0.092
	应变	0.048	0.042	0.036	0.047
	支座反力	0.084	0.075	0.075	0.082
	振动	0.065	0.088	0.048	0.063
结构变化	基础冲刷	0.091	0.081	0.083	0.091
	位移	0.142	0.126	0.105	0.139
	裂缝	0.070	0.061	0.078	0.068
	腐蚀	0.077	0.068	0.085	0.074
	螺栓状态	0.042	0.037	0.046	0.040

E.6.3 中承式或下承式拱桥监测数据权重指标赋分值见表 E.3。

表 E.3 中承式或下承式拱桥权重指标赋分值

监测类别	拱桥监测项	ω_1			
		超限报警	应急管理	养护评估	基础研究
环境	温度、湿度	0.018	0.016	0.016	0.021

表 E.3 中承式或下承式拱桥权重指标赋分值（续）

监测类别	拱桥监测项	ω_1			
		超限报警	应急管理	养护评估	基础研究
环境	结冰	0.019	0.024	0.020	0.019
	雨量	0.013	0.016	0.014	0.013
	水位	0.019	0.024	0.020	0.019
作用	车辆荷载	0.036	0.033	0.041	0.053
	风速、风向	0.027	0.029	0.024	0.026
	结构温度	0.021	0.019	0.016	0.025
	船舶撞击	0.038	0.068	0.057	0.036
	地震	0.041	0.056	0.045	0.040
结构响应	位移	0.076	0.070	0.115	0.076
	应变	0.039	0.034	0.030	0.037
	索力	0.083	0.075	0.062	0.081
	支座反力	0.069	0.062	0.062	0.067
	振动	0.053	0.073	0.040	0.052
结构变化	基础冲刷	0.077	0.069	0.067	0.075
	位移	0.119	0.105	0.088	0.115
	裂缝	0.057	0.051	0.065	0.055
	腐蚀	0.063	0.057	0.071	0.062
	断丝	0.097	0.087	0.109	0.094
	螺栓状态	0.035	0.032	0.038	0.034

E.6.4 斜拉桥监测数据权重指标赋分值见表 E.4。

表 E.4 斜拉桥权重指标赋分值

监测类别	斜拉桥监测项	ω_1			
		超限报警	应急管理	养护评估	基础研究
环境	温度、湿度	0.018	0.017	0.015	0.022
	雨量	0.016	0.020	0.015	0.016
	结冰	0.023	0.032	0.026	0.022
	水位	0.023	0.032	0.026	0.022
作用	车辆荷载	0.033	0.030	0.036	0.048
	风速、风向	0.027	0.029	0.023	0.025
	结构温度	0.019	0.017	0.014	0.022
	船舶撞击	0.044	0.077	0.062	0.042
	地震	0.045	0.058	0.048	0.044
结构响应	位移	0.076	0.068	0.111	0.075
	转角	0.042	0.037	0.045	0.041
	应变	0.036	0.032	0.027	0.035
	索力	0.086	0.075	0.060	0.084
	支座反力	0.063	0.057	0.054	0.063
	振动	0.057	0.075	0.040	0.056
结构变化	基础冲刷	0.076	0.066	0.064	0.073
	裂缝	0.056	0.049	0.059	0.054
	腐蚀	0.062	0.056	0.067	0.062

表 E.4 斜拉桥权重指标赋分值（续）

监测类别	斜拉桥监测项	ω_1			
		超限报警	应急管理	养护评估	基础研究
结构变化	预应力	0.073	0.064	0.077	0.071
	断丝	0.068	0.059	0.072	0.067
	螺栓状态	0.057	0.050	0.059	0.056

E.6.5 悬索桥监测数据权重指标赋分值见表 E.5。

表 E.5 悬索桥权重指标赋分值

监测类别	悬索桥监测项	ω_1			
		超限报警	应急管理	养护评估	基础研究
环境	温度、湿度	0.017	0.015	0.015	0.020
	结冰	0.014	0.019	0.015	0.014
	雨量	0.009	0.013	0.010	0.009
	水位	0.014	0.019	0.015	0.014
作用	车辆荷载	0.027	0.026	0.033	0.043
	风速、风向	0.030	0.032	0.028	0.030
	风压	0.020	0.019	0.015	0.020
	结构温度	0.020	0.019	0.015	0.021
	船舶撞击	0.038	0.068	0.056	0.037
	地震	0.034	0.047	0.038	0.033
结构响应	位移	0.068	0.060	0.101	0.065
	转角	0.036	0.032	0.040	0.034
	应变	0.033	0.030	0.024	0.032
	索力	0.072	0.067	0.053	0.071
	支座反力	0.057	0.051	0.049	0.056
	振动	0.052	0.072	0.038	0.051
结构变化	基础冲刷	0.076	0.068	0.066	0.072
	位移	0.093	0.084	0.068	0.091
	裂缝	0.048	0.043	0.053	0.048
	腐蚀	0.053	0.048	0.059	0.052
	断丝	0.076	0.067	0.085	0.077
	螺栓状态	0.039	0.035	0.043	0.038
	索夹滑移	0.074	0.066	0.081	0.072

参 考 文 献

- [1] GB/T 3408.2 大坝监测仪器 应变计 第2部分：振弦式应变计
 - [2] GB/T 13992 金属粘贴式电阻应变计
 - [3] GB/T 24726 交通信息采集 视频交通流检测器
 - [4] GB/T 28059.2 公路网图像信息管理系统平台互联技术规范 第2部分：视频格式与编码
 - [5] GB/T 37025 信息安全技术 物联网数据传输安全技术要求
 - [6] GB/T 38637.2 物联网 感知控制设备接入 第2部分：数据管理要求
 - [7] GB/T 38894 无损检测 电化学检测 总则
 - [8] JG/T 422 土木工程用光纤光栅应变传感器
 - [9] JJF 1918 电容式加速度传感器校准规范
 - [10] JJG 036 水运工程钢弦式锚索测力计检定规程
 - [11] JJG 882 压力变送器检定规程
 - [12] JTG 2182 公路工程质量检验评定标准 第二册 机电工程
 - [13] SJG 148 桥梁结构健康监测技术标准
 - [14] DB/T 10—2016 数字强震动加速度仪
 - [15] 公路长大桥梁结构监测时空大数据应用指引（交办公路〔2024〕37号）
 - [16] 公路桥梁群监测系统试点建设技术指南（交办公路〔2025〕1号）
 - [17] 公路自然灾害监测预警系统技术指南（交办公路函〔2025〕507号）
 - [18] 公路长大桥梁结构监测数据质量评价技术指南（试行）（交办公路函〔2025〕795号）
-