

ICS 93.040

CCS P 28



中华人民共和国交通运输行业标准

JT/T 1037—2022

代替 JT/T 1037—2016

公路桥梁结构监测技术规范

Technical specifications for structural monitoring of highway bridges



2022-01-13 发布

2022-04-13 实施

中华人民共和国交通运输部 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总则 2

5 基本规定 3

6 监测内容 3

7 监测测点布设 9

8 监测方法 12

9 监测系统 17

10 数据管理 24

11 监测应用 26

附录 A（资料性） 测点布设示意图 36

附录 B（资料性） 监测内容基本信息定义 41

附录 C（资料性） 监测系统数据字典定义 44

附录 D（资料性） 实时数据传输协议 51

参考文献 56



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—2016《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》。与 JT/T 1037—2016 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) 标准名称更改为“公路桥梁结构监测技术规范”;
- b) 更改了“预警”和“预警值”的术语(见 3.7、3.8,2016 年版的 3.12、3.13);
- c) 删除了“结构整体响应”“结构局部响应”“模态参数”“模态参数识别”“安全一级评估”“安全二级评估”“专项评估”“专项检查”的术语和定义(见 2016 年版的 3.3、3.4、3.5、3.6、3.10、3.11);
- d) 增加了“作用”“结构响应”“结构变化”“桥梁结构健康度”的术语和定义(见 3.4、3.5、3.6、3.9);
- e) 更改了进行桥梁结构监测的跨径范围,增加了对技术状况等级 3 类、4 类在役桥梁进行监测的要求(见 4.1,2016 年版的第 1 章);
- f) 增加了对监测技术自主可控、鼓励采用新技术和新设备、监测系统安全网联、互联互通、数据共享的要求(见 4.2~4.5);
- g) 增加了桥梁结构监测分为系统设计、系统实施、系统试运行、系统验收、系统运维、监测数据应用阶段的要求(见 5.2);
- h) 增加了监测系统组成的要求(见 5.3);
- i) 更改了监测类别和监测项,增加了桥面结冰、螺栓状态、索夹滑移等监测内容和测点布设的要求(见第 6 章、第 7 章,2016 年版的第 5 章);
- j) 更改了“监测方法”和“数据管理”要求,增加了数据编码、数据交互与共享、数据安全的要求(见第 8 章、第 10 章,2016 年版的第 6 章、第 7 章);
- k) 增加了监测系统的设计、实施、试运行与验收、运维、安全的要求(见 9.2~9.6);
- l) 增加了机器学习等数据分析方法,增加了车辆通行管控、检查指引等监测数据应用的内容(见 11.2、11.4、11.5);
- m) 更改“安全预警”为“超限报警”,并更改了相应的报警级别,增加了涡振报警的要求(见 11.3,2016 年版的 8.3);
- n) 更改“安全一级、安全二级评估”为“结构健康度评估”,并更改了等级划分方法(见 11.6,2016 年版的 8.4、8.5);
- o) 更改“专项评估”为“特殊事件应急管理”,增加了涡振应急管理内容,更改了其他特殊事件的具体规定(见 11.7,2016 年版的 8.6)。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国交通工程设施(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院、同济大学、中交公路长大桥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:李惠、李娜、孙利民、欧进萍、张喜刚、刘晓东、宋晖、叶志龙、袁洪、刘志强、王晓晶、鲍跃全、李小龙、冯良平、孙小飞、刘芳亮、闫昕、崔营营、阮欣、赖马树金、张东昱、黄永、周文松、

徐文城、冷俊、刘天成、李晓龙、毛幸全、金耀、韩帅、赵凯、刘洋、张照辉、徐阳、魏世银、侯榕榕、程潜、何秋雨。

本文件的历次版本发布情况为：

——2016 年首次发布为 JT/T 1037—2016。

——本次为第一次修订。



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、监测应用的要求。

本文件适用于公路桥梁结构监测的系统设计、实施、验收、运营维护、数据管理和监测应用,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—2017 外壳防护等级(IP 代码)
GB/T 8566 信息技术 软件生存周期过程
GB/T 8567 计算机软件文档编制规范
GB/T 9386 计算机软件测试文档编制规范
GB/T 15532 计算机软件测试规范
GB/T 21296.1 动态公路车辆自动衡器 第1部分:通用技术规范
GB/T 24726 交通信息采集 视频交通流检测器
GB/T 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 36344 信息技术 数据质量评价指标
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
JT/T 132 公路数据库编目编码规则
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



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

环境 environmental factors

影响桥梁安全和功能的桥址自然环境因素。

3.4

作用 action

桥梁所受的直接荷载或间接荷载。

3.5

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。

3.6

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。

3.7

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。

3.8

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。

3.9

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 总则

4.1 公路桥梁符合下列条件之一时,进行桥梁结构监测:

- a) 主跨跨径大于等于 500 m 悬索桥、300 m 斜拉桥、160 m 梁桥、200 m 拱桥;
- b) 技术状况等级为 3 类、4 类且需要跟踪观测的在役桥梁;
- c) 经过评定需要进行结构监测的桥梁。

4.2 桥梁结构监测技术自主可控、先进适用。

4.3 桥梁结构监测鼓励采用北斗卫星导航、5G 移动通信、人工智能与大数据等新技术和新设备。

4.4 监测系统稳定可靠、经济实用、安全网联,便于维护和升级扩容。

4.5 要求监测系统与外部系统互联互通、数据共享,实时展示监测结果。

5 基本规定

- 5.1 应根据桥梁的受力状态、风险评估、耐久性分析结果和监测应用需求确定结构的监测内容、布设监测测点、选择监测方法、构建监测系统、进行数据管理、开展监测应用。
- 5.2 桥梁结构监测应分为系统设计、系统实施、系统试运行、系统验收、系统运维和监测数据应用阶段。
- 5.3 监测系统应由系统硬件、系统软件和配套工程组成。
- 5.4 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。
- 5.5 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。

6 监测内容

6.1 一般规定

- 6.1.1 监测内容的确定应符合下列规定:
- a) 4.1 a)规定的桥梁根据桥梁运行环境、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) 4.1 b)规定的桥梁根据桥梁结构、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) 4.1 c)规定的桥梁根据技术状况评定结果、监测应用目标确定监测内容。
- 6.1.2 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。
- 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 悬索桥

- 6.2.1 4.1 a)规定的悬索桥,监测内容应符合表 1 的规定,可根据特定需求选择监测内容。

表 1 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、主缆结冰	◎

表 1(续)

监 测 类 别		监 测 内 容	监 测 选 项
作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、轴数、车速	●
		所有车道车流量	●
		所有车道的车辆空间分布视频图像	◎
	风速、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	○
		视频图像	○
	地震	桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度及以上)	●
		承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度以下)	○
结构响应	位移	主梁竖向位移	●
		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	●

表 1(续)

监 测 类 别		监 测 内 容	监 测 选 项
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。			

6.2.2 4.1 b)和4.1 c)规定的悬索桥,监测内容见表1,可根据技术状况、监测应用目标、特定需求调整监测内容。

6.3 斜拉桥

6.3.1 4.1 a)规定的斜拉桥,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。

表 2 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	◎
作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、轴数、车速	●
		所有车道车流量	●
		所有车道的车辆空间分布视频图像	◎
	风速、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	○
		视频图像	○

表 2(续)

监 测 类 别		监 测 内 容	监 测 选 项
作用	地震	桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度及以上)	●
		承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度以下)	○
结构响应	位移	主梁竖向位移	●
		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	●
		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	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。			
^a 仅适用于封闭箱梁。			

6.3.2 4.1 b) 和 4.1 c) 规定的斜拉桥,监测内容见表 2,可根据技术状况、监测应用目标、特定需求调整监测内容。

6.4 梁桥

6.4.1 4.1 a) 规定的梁桥,监测内容应符合表3的规定,可根据特定需求选择监测内容。

表3 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	◎
作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、轴数、车速	○
		所有车道车流量	○
		所有车道的车辆空间分布视频图像	◎
	风速、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	○
		视频图像	○
	地震	桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度及以上)	●
		承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度以下)	○
结构响应	位移	主梁竖向位移	●
		支座位移	○
		梁端纵向位移	○
		高墩墩顶位移	○
	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	○

表 3(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	○
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。			

6.4.2 4.1 b) 和 4.1 c) 规定的梁桥, 监测内容见表 3, 可根据技术状况、监测应用目标、特定需求调整监测内容。

6.5 拱桥

6.5.1 4.1 a) 规定的拱桥, 监测内容应符合表 4 的规定, 可根据特定需求选择监测内容。

表 4 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	◎
作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、轴数、车速 ^c	●/○
		所有车道车流量 ^c	●/○
		所有车道的车辆空间分布视频图像	◎
	风速、风向	桥面风速、风向 ^c	●/○
		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	○
		视频图像	○
	地震	桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度及以上)	●
		承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度以下)	○

表 4(续)

监测类别		监测内容	监测选项
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	◎
	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。 ^c 中、下承式拱桥为应选监测项,上承式拱桥为宜选监测项。			

6.5.2 4.1 b) 和 4.1 c) 规定的拱桥,监测内容见表 4,可根据技术状况、监测应用目标、特定需求调整监测内容。

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,并考虑设备布设条件所受约束性。

7.1.2 结构响应和结构变化监测的测点宜布置在受力较大、变形较大、易损、影响主要部件安全耐久和结构整体安全的位置、已有病害和损伤的位置。对性能退化、损伤劣化严重的桥梁构件,应针对性增加监测测点数量。

7.1.3 监测测点布设应明确传感器的类型、数量、安装位置和方向,宜可更换。对不可更换的监测测点,宜做冗余布设。对关键部件或关键构件监测内容,可布设校核测点。

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,可根据桥梁结构类型、联长、跨径、构造增设监测测点。

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。

7.2.3 降雨量监测测点宜布设在桥梁开阔部位。

7.2.4 桥面结冰监测测点宜与车辆荷载视频监测测点同位置,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。

7.3 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满足下列规定:

- a) 跨度小于 1 500 m 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 1 500 m 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 800 m 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 800 m 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桥梁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水位变动区的桥墩底部或承台顶部,视频监测测点宜在主梁上、下游两侧对称布设。

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 800 m 的桥梁,不应少于一个监测测点;长度大于等于 800 m 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;
- 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置在索塔塔顶位置，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。

7.4.3 应变监测测点符合下列规定：

- 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、索股布置形式，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 3 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 3 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 监测测点布置图示

悬索桥、斜拉桥、梁桥和拱桥的监测测点布置图示见附录 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、结构变化监测内容匹配。

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

8.1.3 监测数据采集频率应满足采样定理,且满足监测数据分析和应用要求。

8.2 环境监测

8.2.1 环境温度监测宜采用热电偶、热电阻、光纤温度传感器等,传感器量程上限宜超出大气温度年极大值 30℃以上,量程下限宜低于年极小值 20℃以上,最大允许误差 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,分辨力小于等于 0.1℃,温度监测方法应符合 GB 50982 的相关规定,路面温度传感器应符合 GB/T 33697 的相关规定。

8.2.2 环境湿度监测应采用湿度传感器,可选用氯化锂湿度计、电阻电容湿度计和电解湿度计等,量程应为 0~100% RH(非凝露),最大允许误差 $\pm 2\%$ RH,监测方法应符合 GB 50982 的相关规定。

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

8.2.4 结冰监测可采用超声波测试法、视频监测法,结冰厚度监测最大允许误差宜小于 1 mm,摄像机技术参数和指标应符合 8.3.1 d) 的规定,且应符合 GB/T 24726 的相关规定。

8.3 作用监测

8.3.1 车辆荷载监测宜采用动态称重方法,动态称重设备宜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,且满足下列要求:

- a) 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%;
- b) 具备数据自动采集功能,现场单车荷载数据存储能力宜不少于 90 d,视频数据存储能力宜不少于 30 d;
- c) 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;
- d) 视频图像监测宜采用 IP 网络摄像机,像素应大于等于 200 万,帧率应大于等于 25 FPS;动态范围应大于等于 55 dB,应具备自动光圈、变焦镜头、昼/夜自动转换功能、防护罩;具备水平 $0^\circ \sim 350^\circ$,垂直 $15^\circ \sim -90^\circ$ 旋转功能,且应符合 GB/T 24726 的相关规定。

8.3.2 桥面风速风向监测宜采用三向超声风速仪,塔顶风速风向宜采用机械式风速仪或两向超声风速仪,监测方法应符合 GB 50982 的相关规定,并满足下列要求:

- a) 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;
- b) 风速测试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 0.3 m/s;
- c) 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;
- d) 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 5 m,伸出索塔高度方向宜大于等于 3 m。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:

- a) 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) 主梁风压监测宜选择陶瓷型或扩散硅型微压差传感器,量程宜大于 $-1\,000\text{ Pa} \sim +1\,000\text{ Pa}$,最大允许误差 0.5% F·S,传感器沿主梁截面周向和纵桥向布置,应安装于梁体外表面,气嘴垂直于梁体外表面。

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

8.3.5 船舶撞击桥墩加速度监测宜与地震动监测协同,采用力平衡式加速度传感器、强震仪,技术参数宜符合 8.3.4 的规定,并辅助视频监控,摄像机技术参数和指标应符合 8.3.1 d) 的规定,还宜具备低照度、透雾功能。

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、安装环境,选择传感器类型、精度、位置和安装方式,位移监测方法应符合 GB 50982 的相关规定,并满足下列要求:

- a) 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、主缆偏位宜采用 GNSS 监测技术进行监测,监测数据应转换到大桥独立坐标系。水平方向测量误差应不大于 20 mm,垂直方向测量误差应不大于 50 mm,技术指标应符合 GB/T 39410 相关规定。
- b) 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等,压力变送器监测最大允许误差宜不大于 2 mm,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;
- c) 支座位移、梁端纵向位移宜选用拉线式位移传感器、磁致伸缩位移传感器、激光位移传感器等,位移监测最大允许误差宜不大于 0.5%,技术指标宜符合 JJF 1305 的相关规定。
- d) 特殊条件下的结构和构件位移监测,可选用视频图像法或雷达测试法。视频图像法应符合 8.3.1 d) 的规定,并宜符合 GB/T 24726 的相关规定。

8.4.2 梁端、塔顶转角监测宜采用微电子机械系统倾角传感器,角度量程宜为 $-5^\circ \sim +5^\circ$,角度误差不大于 0.02° 。

8.4.3 应变监测宜采用光纤应变传感器、电阻应变传感器、振弦式应变传感器等,静应变监测可采用光纤应变传感器、振弦式应变传感器,动应变监测可采用光纤应变传感器、电阻应变传感器等。应变监测方法应符合 GB 50982 的相关规定。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:

- a) 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;
- b) 应变传感器量程应大于等于 $1\,000\text{ }\mu\text{e}$,且静应变传感器量程应大于等于被测量预计变化范围的 1.2

倍,动应变传感器量程应大于等于预测被测量变化范围的2倍,分辨力应小于等于 $1\ \mu\epsilon$;

- c) 三向静态和动态监测应变测点可选择应变花;
- d) 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 索力监测宜采用间接测力或直接测力法。索力监测传感器量程应大于索力设计值的1.2倍,误差应小于被测索力设计值的5%,监测方法应符合GB 50982的相关规定。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、压电式加速度传感器,电容式加速度传感器技术指标应符合JJF 1918的相关规定。直接测力法可采用锚索计,锚索计技术指标应符合JT/T 578的相关规定。

8.4.5 支座反力监测宜采用直接测力的成品测力支座,误差应小于被测支座位称竖向承载力值的5%。

8.4.6 振动监测宜采用加速度监测方法,应根据桥梁整体及梁、塔、索结构的动力分析结果、基频、振型等选择传感器,确定振动加速度量程、频响范围、横向灵敏度。钢结构宜采用力平衡式加速度传感器或电容式加速度传感器,索和混凝土结构宜采用电容式或压电式加速度传感器,振动监测方法应符合GB 50982的相关规定,并满足下列要求:

- a) 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计算分析振动响应最大值的1.2倍,且宜不小于 $\pm 1g$,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,且宜不小于 $\pm 5g$,横向灵敏度小于等于5%,频响范围0.1 Hz~100 Hz,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 基础冲刷监测应根据桥址处水流速度、含沙量等水文参数以及设计允许冲刷深度,综合选定监测设备类型。宜采用声学监测方法监测冲刷深度,采用雷达法监测水流速度,监测传感器满足下列要求:

- 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宜大于等于10 m,冲刷深度分辨力宜小于等于5 mm;
- b) 水流速监测仪器的量程应大于等于 $\pm 5\text{ m/s}$,最大允许误差应不大于 $\pm 1\% F \cdot S$,分辨力应小于等于0.1 cm/s;
- 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、拱桥拱脚位移监测宜设置桥梁永久观测点定期观测或GNSS静态观测方法,且满足下列规定:

- 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 裂缝监测宜采用自动监测、观测或相结合的方式,裂缝监测传感器量程应大于裂缝宽度的5倍,测量最大允许误差不大于0.02 mm,分辨力小于等于0.01 mm。可采用振弦式裂缝传感器、电阻式裂缝传感器、长标距光纤等光纤式裂缝传感器、高清摄像机。监测方法应符合GB 50982的相关规定。摄像机技术参数和指标应符合8.3.1 d)的要求,并配置高精度图像自动识别模块。

8.5.4 腐蚀监测宜选用电化学方法,腐蚀监测传感器宜选用沿混凝土保护层深度安装多电极传感器,可监测腐蚀电位、腐蚀电流、混凝土温度、腐蚀速率等参数,监测方法应符合GB 50982的相关规定。技

术参数宜符合 GB/T 38894 的相关规定。

8.5.5 断丝监测宜采用声发射监测方法,悬索桥吊索、主缆,斜拉桥斜拉索,拱桥吊杆(索)、系杆等裸露于空气中的钢索结构断丝可选用谐振频率较高的声发射传感器,工作温度范围宜为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,工作频率范围宜在 $40\text{ kHz} \sim 100\text{ kHz}$ 范围;埋设于混凝土内的预应力钢索断丝可选用谐振频率稍低的声发射传感器,工作频率范围宜在 $10\text{ kHz} \sim 40\text{ kHz}$ 范围内。

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,电磁弹式索力传感器测量范围为材料的 $0 \sim 0.9$ 倍屈服应力,传感器测力最大允许误差不大于设计索力 5% 。

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,摄像机技术参数和指标应符合 8.3.1 d) 的规定,并配置高精度图像自动识别模块。

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。摄像机技术参数和指标应符合 8.3.1 d) 的规定,并应配置高精度图像自动识别模块。高精度线位移计技术参数指标宜符合 JJF 1305 的相关规定。

8.6 数据采集方法

8.6.1 根据桥梁感知方法、传感器数量和分布确定数据采集方法,包括数据采集硬件、软件以及数据采集制式,保障获得高精度、高质量数据,并满足下列要求:

- 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 $4\text{ mA} \sim 20\text{ mA}$ 和 $-5\text{ V} \sim 5\text{ V}$ 等标准工业信号,可选用基于 PCI、PXI 等技术的集中式数据采集设备,并进行光电隔离,以增强抗干扰能力;
- d) 光信号数据采集应采用专用的光纤解调设备,应根据波长范围、采样通道与采样频率进行选型,光纤光栅波长分辨力小于等于 1 pm ,扫描频率大于等于 50 Hz ;
- e) 振弦式传感器信号应选用专用振弦式采集仪采集,频率信号误差不大于 0.1 Hz ;
- 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,误差不大于 $0.5\% F \cdot S$;
- 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,静态信号分辨力大于等于 16 位,动态信号分辨力大于等于 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、数据分析以及系统数据采集需求确定,并符合下列规定:

- a) 温度、湿度、雨量、结冰等环境监测内容,风速、风向、风压等作用监测内容,位移、转角、应变、索力、支座反力、振动等结构响应监测内容,视频图像应采用实时连续采集。
- b) 车辆荷载、船舶撞击、地震动等作用监测内容,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采用定时采样,超过阈值采用触发采集模式。
- e) 新建桥梁通车初期2年内、在役桥梁新设监测系统实施完成2年内、在役桥梁评估结果发现结构关键构件或附属设施异常时,除使用触发采样模式的监测内容外,其他监测内容宜采用连续采样。

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

- a) 环境监测内容的采样频率见表5。

表5 环境监测内容采样频率表

监 测 内 容	采 样 频 率
温度	$\leq 1/600$ Hz
湿度	1/600 Hz
雨量	1/60 Hz
结冰	在线:25 FPS

- b) 作用监测内容的采样频率见表6。

表6 作用监测内容采样频率表

监 测 内 容	采 样 频 率
车辆荷载	动态称重设备:触发采集 视频:25 FPS
风速风向	超声风速仪:10 Hz 机械式风速仪:1 Hz
风压	10 Hz
结构温度	1/600 Hz
船舶撞击	触发采集加速度:50 Hz 视频:25 FPS
地震	触发采集加速度:50 Hz

- c) 结构响应监测内容的采样频率见表7。

表7 结构响应监测内容采样频率表

监 测 内 容	采 样 频 率
位移	动位移:20 Hz 静位移:1 Hz
转角	1 Hz
应变	动应变:10 Hz 静应变:1/600 Hz
索力	压力传感器:1 Hz 加速度传感器:50 Hz 电磁弹式传感器:1/3 600 Hz
支座反力	1 Hz
振动	20 Hz

d) 结构变化监测内容的采样频率见表 8。

表 8 结构变化监测内容采样频率表

监 测 内 容	采 样 频 率
基础冲刷	在线:1 MHz 离线:每年 1 次 ~2 次
锚碇位移、拱脚位移、桥墩沉降	在线:1/3 600 Hz 离线:每年 1 次 ~2 次
裂缝	动态:10 Hz 静态:1/3 600 Hz 图像:每周 1 次
腐蚀	在线:1/3 600 Hz 离线:每年 1 次 ~2 次
体外预应力	在线:1/3 600 Hz 离线:每年 3 次 ~4 次
断丝	触发采集:2 MHz
螺栓状态	在线:1 Hz 图像:每周 1 次 离线:每年 1 次 ~2 次
索夹滑移	在线:1 Hz 图像:每周 1 次 离线:每年 1 次 ~2 次

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

- a) 动态监测变量的数据采集时钟同步误差小于 0.1 ms;
- b) 静态监测变量的数据采集时钟同步误差小于 1 ms。

8.6.6 数据采集应采取抗干扰措施:串模干扰抑制、共模干扰抑制以及防雷接地技术和屏蔽技术,以提高信噪比。

9 监测系统

9.1 一般规定

9.1.1 系统机电工程部分可分为系统硬件、系统软件及配套工程,如图 1 所示。

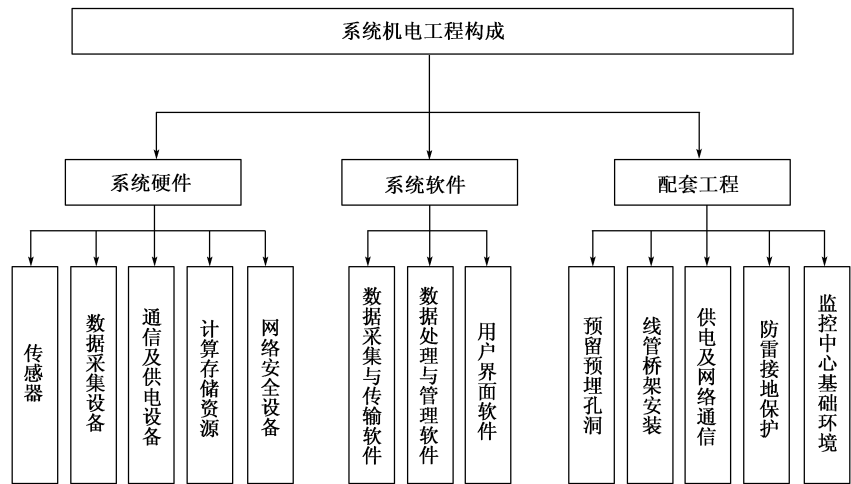


图1 系统机电工程构成

- 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、验收；在役桥梁的监测系统应结合养护管理需求独立设计、实施、验收。
- 9.1.3 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、维护升级要求。
- 9.1.4 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 系统软件操作响应时间宜小于 3 s，数据查询响应时间宜小于 5 s，测点数据完好率宜不低于 90%，可采用公式(1)计算：

$$S = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^p t_i}{P \times T} \right) \times 100\% \quad \cdots \cdots (1)$$

式中：

S ——测点数据完好率；

p ——故障测点数量；

t_i ——第 i 个故障测点故障时间，单位为天(d)；

P ——总测点数量；

T ——检查周期时间，单位为天(d)。

- 9.1.6 系统软件架构、数据库、应用组件宜采用开源技术。
- 9.1.7 系统宜按省级、部级监测系统平台的数据交互与共享要求预留传输接口。
- 9.1.8 系统宜按照 GB/T 22239、GB/T 25070 的相关规定构建系统信息安全保护体系。

9.2 系统设计要求

- 9.2.1 系统设计应基于桥梁结构计算、分析、风险评估结果进行，包括下列内容：
- a) 系统功能要求与总体方案设计；
 - b) 系统各模块的工作流程、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、防护方案；
 - f) 系统及其附属设施的预埋件和预留孔洞方案；
 - g) 系统数据分析和超限管理方案；
 - h) 系统与桥梁主体结构、供配电、通信、监控中心的房建等的工程界面划分；

- i) 针对系统维护的桥梁检修通道设计需求;
- j) 系统软件和硬件的维护更换、扩容升级建议。

9.2.2 监测内容、监测测点布设、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章和第11章的规定。

9.2.3 系统数据采集、传输、供配电、通信、防雷、预埋件、预留孔洞方案等应基于环境适应性、匹配性设计。

9.2.4 新建、在役桥梁的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,纳入桥梁机电工程统一设计预留。

9.2.5 系统设计应提出监控中心环境、技术要求,纳入监控中心房建、机电体系统设计。

9.2.6 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。

9.2.7 系统硬件设计符合下列规定:

- a) 硬件设备安装设计方案应避免损伤桥梁主体结构;
- b) 传感器选型应与监测内容、测点布设、监测方法和软件系统相适配,并考虑安装、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功能相适配,满足数据同步采集、实时传输要求;
- d) 传感器及数据采集设备应明确“防尘、防水、防雷”指标要求;
- e) 数据采集设备应根据元器件的环境温度工作适宜性配置温控机柜。光纤光栅解调仪低于0℃或高于40℃时,宜配置温控机柜;
- f) 机柜位于结构内部防护级别应不低于GB/T 4208—2017规定的IP55,置于结构外部防护等级应不低于GB/T 4208—2017规定的IP65,其他参数宜符合GB/T 15395的相关规定;
- g) 通信、供电设备用电功率的设计宜预留冗余;
- h) 网络传输的设计宜预留冗余;
- 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) 采用自建监控中心的应配备UPS电源、恒温空调、门禁安防系统;
- k) 监测系统计算资源、存储资源及网络传输带宽应根据测点数量、采样频率、数据分析计算量、业务功能复杂度、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。

9.2.8 系统软件设计符合下列规定:

- a) 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;
- b) 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;
- c) 数据采集与传输软件符合下列规定:
 - 1) 软件宜前置安装运行在桥梁现场采集端设备;
 - 2) 应具备各类传感器信号的自动化采集和实时上传功能;
 - 3) 应具备原始数据本地暂存功能,能够在网络故障和突发事件情况下将数据自动存储在本地计算机,并可在恢复后续传数据;
 - 4) 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。
- d) 数据处理与管理软件符合下列规定:
 - 1) 应能接收并解析桥梁现场采集的原始数据,并具备数据预处理、特征值提取以及数据持久化存储功能;

- 2) 应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、数据方向见附录 B;
 - 3) 应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;
 - 4) 应能够自定义设置、修改各类监测数据的配置参数、处理频率、输出数据格式等;
 - 5) 宜采用读写分离、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;
 - 6) 音视频、图片、文档类非结构化数据,应设计完整的上传、检索、导出功能,并分类建立单独的存储目录结构。
- e) 用户界面软件(UI)满足下列要求:
- 1) 宜采用视觉友好的数据看板,界面应能清晰直观反映数据变化,且符合用户特定使用习惯;
 - 2) 宜采用浏览器/服务器(B/S)架构,满足并发访问需求;
 - 3) 应具备高频采样数据的实时动态展示功能,宜采用图形化方式展示数据;
 - 4) 宜具备相关性分析、对比性分析、趋势性分析等统计分析结果展示功能;
 - 5) 应具备超限管理提醒功能,提醒方式可采用颜色变化、消息推送、短信提示、声光报警等;
 - 6) 宜具备传感器设备状态自诊断功能,能够显示设备运行状态信息;
 - 7) 对于有移动访问需求的用户,宜开发运行在手机、平板上的小程序、App 等应用软件,功能可包含实时数据查看、统计数据查询、超限管理消息推送、车辆荷载监控等;
 - 8) 应具备用户角色管理、权限控制功能,能够根据用户身份控制系统访问权限。

9.2.9 系统配套工程应符合下列规定:

- a) 包括预留预埋、开孔开洞、线管桥架安装、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:
 - 1) 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;
 - 2) 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;
 - 3) 系统供配电设计符合 GB 50052 和 GB 50054 的相关规定;
 - 4) 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;
 - 5) 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。

9.2.10 系统设计应明确与其他工程的工作界面划分,符合下列规定:

- a) 桥梁主体结构上的预留预埋件安装、开孔开洞后对耐久性防腐涂装局部损伤应进行专业修复;
- b) 系统专用的不间断供电回路、系统通信光纤网,宜与桥梁原交通机电系统联合设计,并专业施工接入。

9.3 系统实施要求

9.3.1 系统现场实施工序宜分为硬件设备采购与测试、软件开发与测试、软硬件安装与联合调试,如图 2 所示。

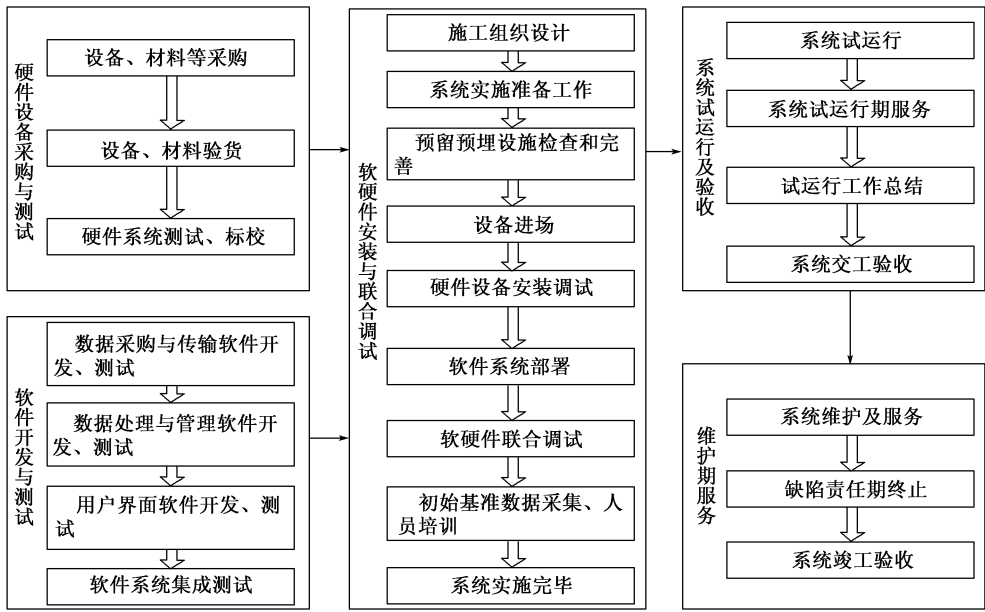


图2 监测系统实施工序

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0.05 dB；
- 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；
- e) 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。

9.3.3 软件开发与测试符合下列规定：

- a) 宜采用国内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) 多方协同开发的软件模块，宜使用软件代码版本控制工具；
- d) 系统软件内部不应内置与业务功能无关的后门程序、加密模块；
- e) 编写软件开发文档和接口文档应符合 GB/T 8567 的相关规定；
- f) 宜采用边缘计算、分布式处理、消息中间件、时序数据库等技术；
- g) 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；
- h) 《软件测试报告》应描述每个测试用例的测试结果，对于重大功能偏离、缺陷和逻辑错误，需经开发单位修复完善后再次提交测试，最终测试通过率宜不低于测试用例总数的95%。

9.3.4 软件系统部署应符合下列规定:

- a) 软件部署前编制软件部署指南,过程规范有序,部署完成后检查各功能完好性;
- b) 软件现场部署前,服务器、工作站、工控机等硬件安装完毕并接电稳定运行,监控中心网络、供电、通信、照明等满足设计技术要求;
- c) 操作系统、应用组件、数据库等应用支撑软件的安装和配置满足软件设计文件的技术要求;
- d) 软件安装和调试分步进行,软件部署完成后进行功能确认。

9.3.5 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。

9.4 系统试运行及验收规定

9.4.1 系统交付前应进行不低于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、超限阈值设置等工作。

9.4.2 监测系统试运行期结束后,应开展系统验收工作。

9.4.3 系统验收宜分为交工验收和竣工验收。与新建桥梁同期建设的监测系统应与桥梁建设同步进行交(竣)工。在役桥梁独立建设的监测系统交工后系统缺陷责任期宜为2年。

9.4.4 系统验收前,应对输入和输出的监测数据进行逻辑性、相关性和匹配性检验。

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 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 系统软件验收应满足下列要求:

- a) 进行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,各项功能指标满足设计文件技术要求;
- b) 进行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,各项功能指标满足设计文件技术要求;
- c) 进行用户界面软件功能完整性和一致性检查,各软件模块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;
- d) 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;
- e) 进行系统整体安全性检查,确保满足设计文件中对于网络信息安全相关技术要求。

9.4.8 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,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,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、软件操作手册等。

9.5 系统运维要求

9.5.1 应合理制订系统运维计划,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—2021 的相关规定。

9.5.2 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) 宜不低于每半年进行 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、采集设备等表观完好性进行检查;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 24 h 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) 日常检查内容包括各软件模块功能工作状态检查、实时数据及历史数据检查、超限数据检查确认等;
- 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系统时间同步检查、磁盘存储空间检查及清理、数据库异地备份及软件运行日志检查等;
- 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。

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治;
- 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 系统安全规定

9.6.1 应建立网络安全应急工作机制,对系统信息安全实行分级管理。

9.6.2 宜明确系统安全保护等级要求,可从物理层、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,宜配备消防设施、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 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 应采用防火墙技术实现核心应用层与互联网之间的安全阻断与隔离,各应用服务器采取安全防护措施以阻断木马程序、病毒的传播。

9.6.6 各应用服务器、工作站应安装防病毒软件、日志系统、安全审计模块等。

9.6.7 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。

9.6.8 系统软件应具备下列安全功能:

- a) 用户角色管理、权限控制功能;
- b) 用户登录密码复杂性校验功能,并定期提示用户更换密码;
- c) 安全加密和分级授权功能;
- d) 日志记录功能,能够对用户登录、页面操作、配置修改、恶意攻击、系统故障等信息进行自动记录保存,能够事后统计和追查用户的访问操作。

9.6.9 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 桥梁结构监测系统数据管理应包含数据编码、数据预处理、数据存储、数据交互与共享、数据安全。

10.1.2 监测数据管理应实现数据的完整性、准确性、一致性、时效性、可访问性。数据质量评估应符合 GB/T 36344 的相关规定。

10.1.3 监测系统的结构化数据应包括桥梁基础数据、监测数据、特征值数据、超限值数据,非结构化数据可包括图像、音视频及文本。

10.1.4 数据管理应具备存储展示、搜索查询、报表生成等功能。

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 监测测点编码应在 JT/T 132 桥梁编号及扩充位的基础上按固定规则编码。宜由“桥名简

称-监测类别简称-构件类型编码-截面序号-构件序号-测点编号”组成,桥梁监测点编号命名规则如图 3 所示。

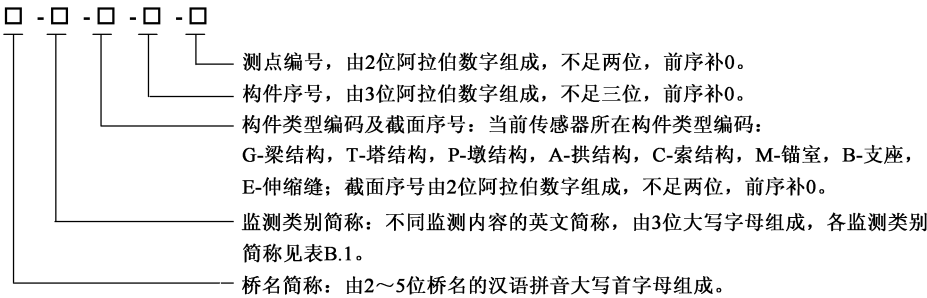


图 3 桥梁监测点编号命名规则

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 监测数据应包含测点编号、数据采集时间及数值、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管理级别一致,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 文本以文档格式分类分级别存储,见表 C.3、表 C.14。

10.3 数据预处理

10.3.1 数据采集设备内置的数据预处理功能应与传感器的分辨力、精度、抗电磁干扰等性能相匹配,应剔除错误数据并将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,并应符合 GB/T 38637.2 的相关规定。

10.3.2 传感器感知的信号应进行调理、预处理,原始监测数据信号选择对应的处理算法,宜采用阈值法、平均值法以及其他滤波算法。

10.3.3 数据异构转换应支持感知控制设备或系统通信协议,支持解析指定的感知数据包和控制数据包,支持通过协议转换模块进行数据结构转换,实现感知控制设备与网关或系统之间数据互通。

10.3.4 从数据源中提取数据应支持全量抽取、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 对图像、音频、视频及文本非结构数据特征抽取应符合 GB/T 32630 的相关规定。

10.4 数据存储

10.4.1 桥梁结构监测系统数据存储宜分为桥梁现场采集站存储、监控中心计算机机房存储和云存储,宜在线存储,也可离线存储。

10.4.2 桥梁现场数据采集站内宜安装采集计算机,采用循环更新存储方式。在网络中断情况下,现场本地数据存储空间结构化原始数据应大于等于 90 d,非结构化视频图像数据应大于等于 30 d。

10.4.3 应采用数据库技术存储监测系统数据,应提供存储调度、存储监控及存储管理可视化功能。数据库宜采用模块化架构,可按功能对桥梁结构信息、监测系统信息和监测数据进行分层、分类存储和管理。宜包括桥梁结构信息子数据库、监测系统信息子数据库、结构有限元模型子数据库、实时数据子

数据库、数据分析子数据库、监测应用子数据库等。

10.4.4 桥梁结构信息子数据库宜对桥梁设计、竣工图纸以及科研专题研究资料进行存储和管理,数据库的表格宜按照桥梁设计、竣工图纸、科研报告等分类。

10.4.5 监测系统信息子数据库应存储和管理传感器、数据采集和传输设备、数据处理和管理设备及软件等信息,包括设备厂商、安装位置、技术参数、品牌和规格等。

10.4.6 结构有限元模型子数据库应存储和管理桥梁结构有限元模型。有限元模型宜使用标准文件格式进行保存,并可根据监(检)测数据应用和桥梁养护维修结果定期按需修正。

10.4.7 实时数据子数据库应存储和管理监测系统所有监测内容的原始数据。

10.4.8 数据分析子数据库应存储和管理采用统计方法、相关性分析、趋势性分析、比对性分析、机器学习等分析的数据。

10.4.9 监测应用子数据库应存储和管理超限报警、评估、分析结果等数据。

10.4.10 监控中心计算机机房实时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。

10.4.11 监控中心计算机机房非结构化视频数据存储宜大于 90 天,特殊事件视频数据应转移备份并永久保存。

10.4.12 监测系统宜采用容灾备份机制,可具备各类数据压缩存储和异地备份功能。

10.5 数据交互与共享

10.5.1 监测系统应具备与外部系统进行数据交互与共享功能,数据传输协议见附录 D。

10.5.2 监测系统与外部系统数据交互方式可采用数据交换接口、中间存储介质或数据库同步等方式。

10.5.3 数据交互应采取权限验证和安全管理措施,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、部级桥梁监测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 数据安全应包含数据完整性、数据加密、数据访问权限控制和数据可审计性。

10.6.2 数据完整性应包含数据传输完整性和数据存储完整性,并符合下列规定:

- a) 数据传输完整性宜符合 GB/T 37025 的相关规定;
- b) 应采用封装签名、测试字验证、引用约束等方式保证数据存储完整性,并提供非完整数据的解决措施。

10.6.3 对监测系统敏感字段或业务数据应加密存储。

10.6.4 通过公网传输监测数据时,应根据管理要求进行加密传输,加密过程应使用国家密码管理部门批准使用的算法。

10.6.5 数据审计应具备监测记录外部用户访问监测数据行为的功能。

10.6.6 监测系统应具备数据访问权限控制功能,能够对用户访问权限进行分级管理。

11 监测应用

11.1 一般规定

11.1.1 监测应用应包括但不限于:监测数据分析、超限阈值与报警、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。

11.1.2 监测数据分析应支撑监测应用,可结合养护管理等系统的数据开展。

11.1.3 当根据 JTG/T H21、JTG 5120—2021、JTG/T 5122—2021 确定的桥梁技术状况、适应性评定结果与本规范得到的结构健康度评估结果不同时,可选用最不利评估结果。

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,也可采用其他可靠方法。

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:

- a) 温度监测数据应分析最高温度、最低温度、最大温差等;
- b) 湿度监测数据应分析最大值、平均值和超限持续时间等;
- c) 雨量监测数据宜分析 10 min 平均降雨量;
- d) 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。

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;
- b) 风速风向监测数据应分析 10 min 平均风速、风向和风玫瑰图;风压监测数据宜分析 10 min 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。

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) 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;
- c) 主梁关键截面应变监测数据应分析平均值、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平均值、绝对最大值;
- d) 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 and 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;
- e) 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;
- f) 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。

11.2.7 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;
- 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；
- 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；
- g) 索夹滑移监测数据宜分析数量、程度和变化趋势；
- 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 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,可采用机器学习或其他可靠方法。

11.2.9 监测数据分析应定期形成分析报告,宜采用季报、年报和特殊事件专项报告,报告内容宜包括但不限于:

- a) 季报内容:11.2.4~11.2.8中规定的季度内监测数据分析结果,超过限值的数量、比例、位置和时间；
- b) 年报内容:11.2.4~11.2.8中规定的年度内监测数据分析结果,超过限值的数量、比例、位置和时间；
- c) 特殊事件专项报告内容:按11.7的规定进行分析,在特殊事件发生后快速提供专项报告。

11.3 超限阈值与报警

11.3.1 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。

11.3.2 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。

11.3.3 监测数据超限阈值设定宜符合表9的规定。

表9 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	达到1.0倍设计值	一级	●	●	●	●
		达到1.2倍设计值	二级	●	●	●	●
	构件封闭空间内相对湿度 ^b	达到50%	一级	●	●	●	●
	结冰	出现结冰	一级	●	●	●	●
作用	车辆总重或轴重	达到1.5倍设计车辆荷载	一级	●	●	●	●
		达到2.0倍设计车辆荷载	二级	●	●	●	●
	风速、风向	桥面10 min平均风速达到25 m/s	一级	●	●	●	●
		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	●	●	●	●
	混凝土、钢结构构件温度	达到设计值	一级	●	●	●	●

表 9(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	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	●	●	●	●
	船舶撞击	发生船撞事件	二级	●	●	●	●
	桥岸地表场地地震动加速度	达到设计 E1 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	达到 0.8 倍设计值	二级	●	●	●	●
		达到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	达到 0.8 倍设计值	二级	●	●	—	●
		达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级超限	三级	●	●	—	●
	支座位移	绝对值达到 0.8 倍设计值	二级	●	●	●	●
		绝对值达到设计值	三级	●	●	●	●
	梁端纵向位移	绝对值达到 0.8 倍设计值	二级	●	●	●	●
		绝对值达到设计值	三级	●	●	●	●
	塔顶偏位	达到 0.8 倍设计值	二级	●	●	—	—
		达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级超限	三级	●	●	—	—
	主缆偏位	达到 0.8 倍设计值	二级	●	—	—	—
		达到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	达到 0.8 倍设计值	二级	—	—	●	—
		达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级超限	三级	—	—	●	—
	拱桥主拱拱顶位移	达到 0.8 倍设计值	二级	—	—	—	●
		达到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	超过历史最大值	一级	●	●	●	●
		超过设计最不利工况计算值	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	达到 0.95 倍设计值	二级	●	●	—	●
		超过设计值或一个月内出现 10 次以上二级超限	三级	●	●	—	●
	支座反力	绝对值达到 0.8 倍设计值	二级	●	●	●	●
		绝对值达到设计值	三级	●	●	●	●

表 9(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	主梁振动加速度	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	●	●	●	●
		10 min 加速度均方根达到 50 cm/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	10 min 加速度均方根达到 100 cm/s^2	一级	●	●	—	●
		10 min 加速度均方根达到 300 cm/s^2 且频繁出现	二级	●	●	—	●
结构变化	基础冲刷	达到 0.7 倍设计冲刷深度	二级	●	●	●	●
		达到设计冲刷深度	三级	●	●	●	●
	锚碇位移	锚碇水平位移达到 0.000 05 倍主跨跨径, 锚碇竖向位移达到 0.000 1 倍主跨跨径	二级	●	—	—	—
	锚碇位移	锚碇水平位移达到 0.000 1 倍主跨跨径, 锚碇竖向位移达到 0.000 2 倍主跨跨径	三级	●	—	—	—
	拱脚位移	达到 0.8 倍设计限值	二级	—	—	—	●
		达到 1.0 倍设计限值	三级	—	—	—	●
	裂缝	出现结构性裂缝	一级	●	●	●	●
		结构性裂缝宽度超过规范限值或发展加速	二级	●	●	●	●
	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	个别螺栓轻微松动	一级	●	●	●	●
		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索夹出现滑移	三级	●	—	—	—

表 9(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 ^c			10 min 振动加速度均方根值达到 31.5 cm/s ² 、能量比因子大于 10	一级	●	●	◐	—
			10 min 振动加速度均方根值达到 50 cm/s ² 、能量比因子大于 10	二级	●	●	◐	—
			10 min 振动加速度均方根值达到 80 cm/s ² 、能量比因子大于 10	三级	●	●	◐	—
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	●	●	●	●
			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 ^e	墩台均匀总沉降达到 20√ <i>L</i> mm,或相邻墩台总沉降差值达到 10√ <i>L</i> mm	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%	二级	●	●	●	●	
		超过 5%	三级	●	●	●	●	
注:●为应报警项;◐ 针对大跨度钢桥;—为无须报警项。								
^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。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 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 31.5 cm/s ² 、50 cm/s ² 和 80 cm/s ² 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。								
^e <i>L</i> 为相邻墩台最小跨径,单位为米(m)。								

11.4 车辆通行管控

- 11.4.1 车辆通行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信息给出。
- 11.4.2 监测数据显示出现影响行车安全状况时,应给出车辆通行管控建议。
- 11.4.3 根据气象数据,12 h 内降雨量超过 50 mm 或 12 h 内降雪量超过 4 mm 以上,宜进行车辆限速限流;大雾能见度小于 200 m 时,宜进行车辆限速;大雾能见度小于 50 m 时,宜封桥。
- 11.4.4 桥面结冰,缆、索、吊杆结冰时,宜进行车辆限速和除冰处治。
- 11.4.5 桥面风速超过表 9 中一级限值时,可进行封桥管理。
- 11.4.6 主梁加速度超过表 9 中一级限值时,宜进行车辆限速。

11.5 检查指引

11.5.1 监测数据和分析结果超限出现表9情况时,宜提醒进行桥梁检查,检查建议见表10,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10 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	一级	提示检查除湿设施是否运转正常
作用	车辆总重或轴重	二级	提示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	提示进行构件使用性检查
	铺装层温度	一级	提示洒水降温
结构响应	主梁竖向位移	二级	提示全桥检查
	主梁横向位移	二级	提示全桥检查
	支座位移、支座反力	二级	提示检查支座
	梁端纵向位移	二级	提示检查伸缩缝
	塔顶偏位	二级	提示全桥检查
	主缆偏位	二级	提示全桥检查
	梁桥高墩墩顶位移	二级	提示全桥检查
	拱桥主拱拱顶位移	二级	提示全桥检查
	主梁、索塔、主拱关键截面静应变	一级	提示检查传感器附近构件裂缝
		二级	提示对传感器所在构件进行特殊检查
	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	提示检查索构件
	主梁振动加速度	二级	提示应对连接构件进行检查
	悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)振动加速度	一级	提示管理部门注意
		二级	提示分析原因并检查减振设施有效性
结构变化	基础冲刷	二级	提示全桥检查
	锚碇位移	二级	提示全桥检查
	桥墩沉降	三级	提示全桥检查
	拱脚位移	二级	提示全桥检查
	裂缝	一级	提示管理部门注意
		二级	提示对构件进行特殊检查
	腐蚀	二级	提示对腐蚀区进行特殊检查
	体外预应力	二级	提示全桥检查
	断丝	二级	提示进行特殊检查
	螺栓状态	一级	提示管理部门注意
		二级	提示检查螺栓
	索夹滑移	二级	提示检查索夹

表 10(续)

监 测 类 别	监 测 内 容	超 限 级 别	检 查 建 议
监测数据 分析结果	钢结构疲劳	一级	提示管理部门注意
		二级	提示检查疲劳裂纹发展情况

11.6 结构健康度评估

11.6.1 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严重异常四级,评定依据见表 11。

表 11 桥梁结构健康度等级评定依据

健康度等级	结 构 构 件	结 构 整 体
Ⅰ 基本完好	11.6.2 a)中所列监测数据无超限	11.6.2b)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	11.6.2 a)中所列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,11.6.2 b)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	11.6.2 a)中所列监测数据超限等级二级	11.6.2 b)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;或多项构件健康度中等异常
Ⅳ 严重异常	11.6.2 a)中所列监测数据超限等级三级	11.6.2 b)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

11.6.2 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:

- a) 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;
- b) 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。

11.6.3 也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 9 中超限阈值进行对比,参考表 11 进行桥梁结构健康度评估。

11.6.4 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。

11.7 特殊事件应急管理

11.7.1 桥梁在遭受涡振、强(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,必要时组织专家研判。

11.7.2 涡振应急管理符合下列规定:

- a) 宜采用 10 min 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 按公式(2)和公式(3)计算:

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

式中:

S_a ——加速度均方根值,单位为米每平方秒(m/s^2);

a_i ——主梁振动加速度,单位为米每平方秒(m/s^2);

N ——10 min 加速度采样点数。

$$R = \frac{A_1}{A_2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

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,也可采用其他可靠方法;
- c) 涡振超限阈值宜按表 9 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 11.6.1 和 11.6.2 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:
- 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。

11.7.3 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 9 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 11.6.1 和 11.6.2 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:
- 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、拱桥吊杆(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、主拱拱顶位移、索力基准值变化等最大值。

11.7.4 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的类型。

11.7.5 地震应急管理符合下列规定：

- 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) 按 11.6.1 和 11.6.2 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、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;
 - 3) 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;
 - 4) 分析震前和震后桥梁模态参数变化。

11.7.6 车辆超载应急管理符合下列规定：

- a) 监测车辆荷载超限二级时,应提醒进行桥梁结构检查;
- b) 可根据 11.6.1 和 11.6.2 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。

11.7.7 船舶撞击应急管理符合下列规定：

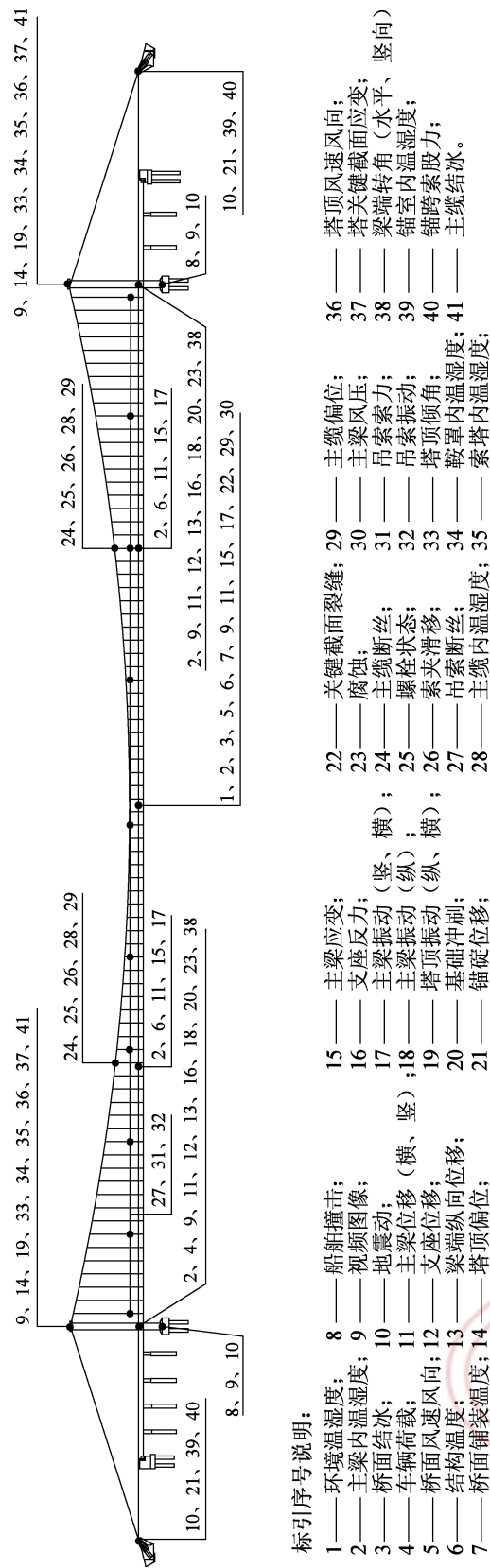
- a) 发生船舶撞击后,应提醒进行桥梁结构检查;
- b) 可按 11.6 的规定进行桥梁结构健康度评估,提供分析报告,报告内容宜包括船舶撞击前、撞击全过程、撞击后数据分析结果。数据分析宜符合下列规定:
 - 1) 对船舶撞击全过程视频监控数据进行分析;
 - 2) 分析主梁、塔顶、桥墩墩顶振动加速度,主梁横向位移、梁桥高墩墩顶位移、支座位移、主梁关键截面静应变、悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)、系杆等索力,支座反力、拱脚位移等监测数据的绝对最大值与残余值,模态参数等。



附 录 A
(资料性)
测点布设示意图

测点布设示意图 A.1 ~ 图 A.4。





图A.1 悬索桥测点布设示意图

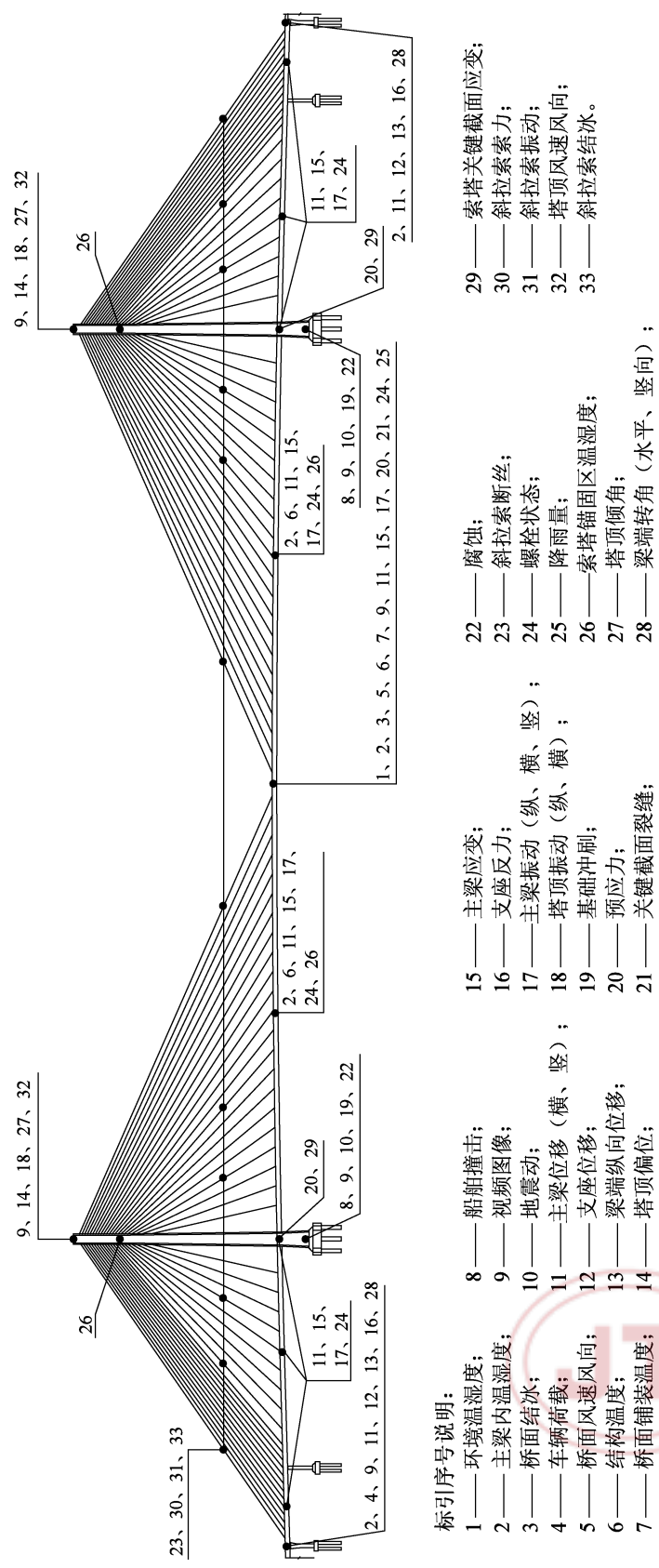


图 A.2 斜拉桥测点布设示意图

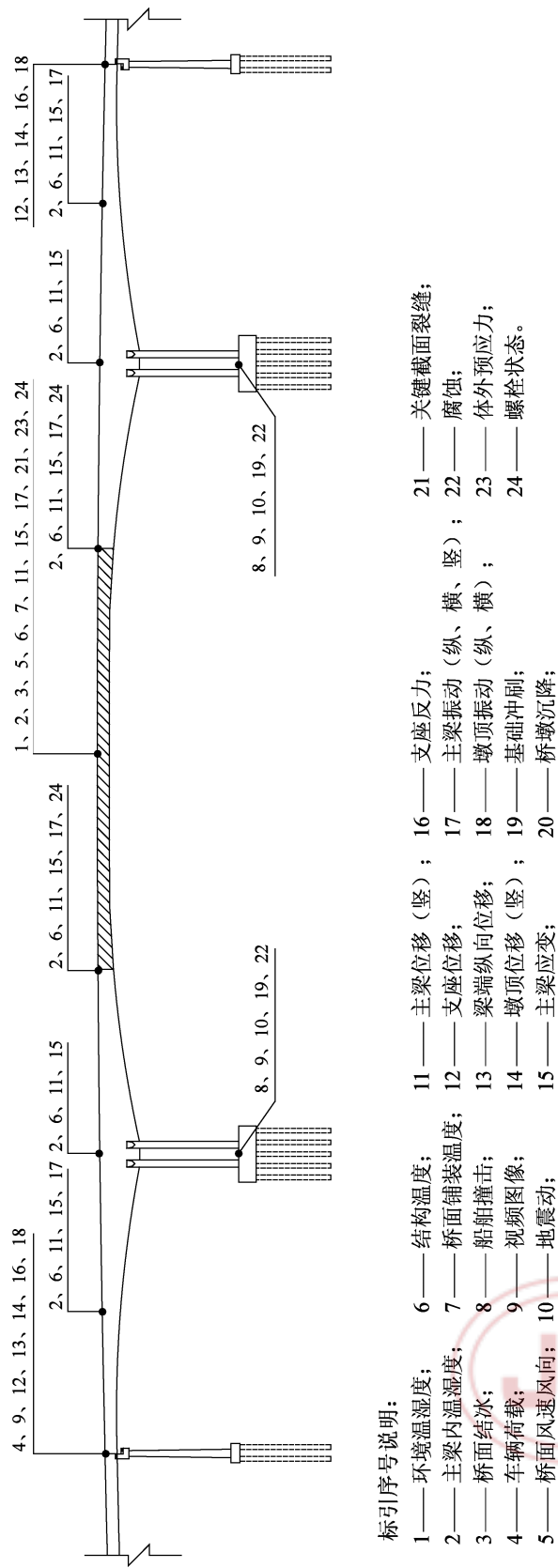
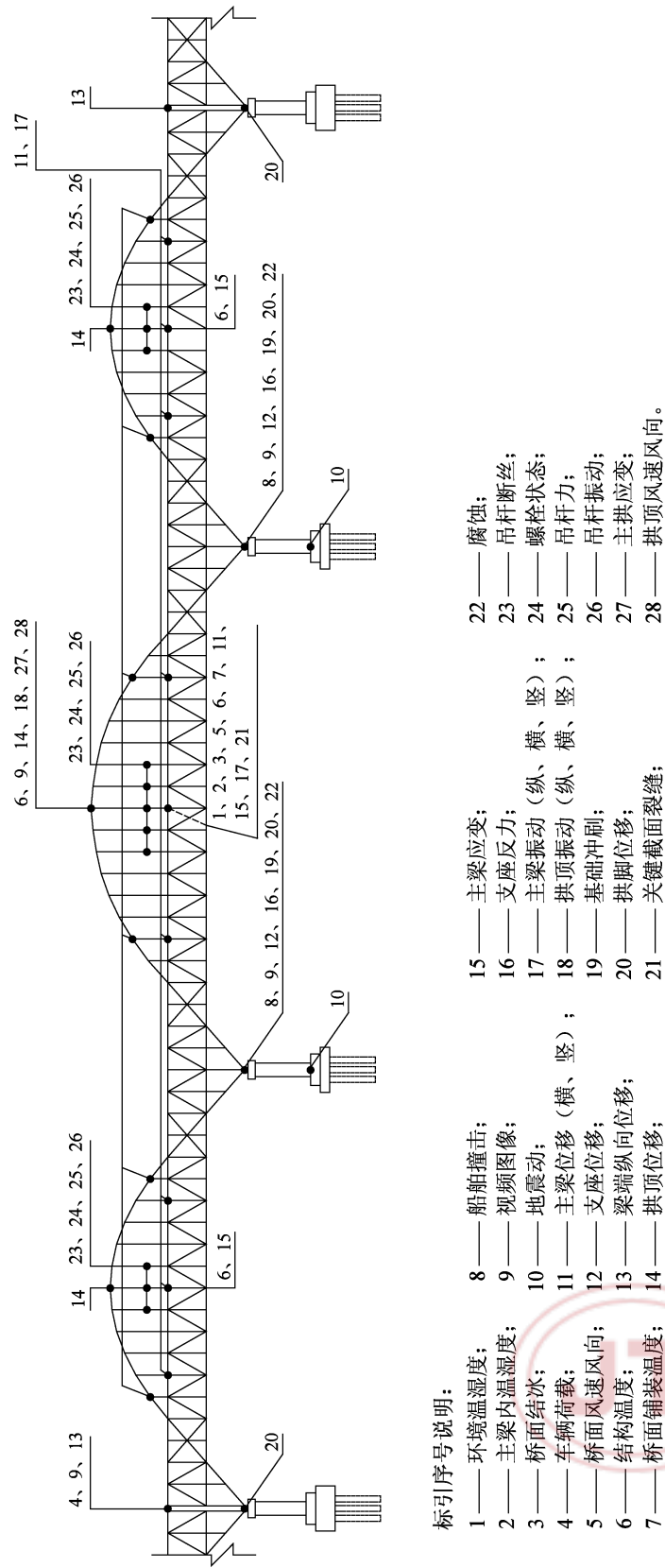


图 A.3 梁桥测点布设示意图



图A.4 拱桥测点布设示意图

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表

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(℃)	—
			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		
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(℃)	—
			主缆温度		
			桥面铺装层温度		

表 B.1 (续)

监测类别		监测类别简称	监测内容	数据单位	数据方向
作用	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		—
			塔顶偏位		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
			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($^{\circ}$)	—
			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		

表 B.1(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 变化	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

公路桥梁结构监测系统在设计时对于桥梁基本信息、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,具体定义见表 C.1 ~ 表 C.14。

表 C.1 数 据 字 典 表

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 桥梁基本信息表

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 京沪高速公路
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	

表 C.2(续)

字 段 名 称	数 据 类 型	字 段 含 义
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
备注	字符型	

表 C.3 桥梁文件信息表

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 监测内容基本信息表

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

表 C.4(续)

字 段 名 称	数 据 类 型	字 段 含 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 监测测点基本信息表

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
超限三级阈值上限	浮点型	超限三级阈值上限
超限三级阈值下限	浮点型	超限三级阈值下限
超限二级阈值上限	浮点型	超限二级阈值上限
超限二级阈值下限	浮点型	超限二级阈值下限
超限一级阈值上限	浮点型	超限一级阈值上限
超限一级阈值下限	浮点型	超限一级阈值下限
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 传感器基本信息表

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

表 C.6(续)

字 段 名 称	数 据 类 型	字 段 含 义
信号范围	字符型	信号输出范围,如:4 mA ~ 20 mA
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	设备安装或更新时间
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 实时监测数据表

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-超限一级报警;2-超限二级报警;3-超限三级报警
数据状态	整型	0-正常;1-异常
备注	字符型	

表 C.8 特征值统计数据表

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(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 车辆荷载监测数据表

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	字符型	

表 C.10 视频属性信息表

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
IP 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 IP 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 超限报警信息表

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(1-超限一级;2-超限二级;3-超限三级)
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

表 C.11(续)

字段名称	数据类型	字段含义
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 特殊事件信息表

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)
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 桥梁健康度信息表

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 桥梁评估报告信息表

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

表 C.14(续)

字 段 名 称	数 据 类 型	字 段 含 义
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 $16 + N \times 4$ 个字节,其中前面 16 字节为传感器属性信息,后面的 $N \times 4$ 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	网络通信 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 $N \times 4 + 9$,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 + 1 900	实际的年需要加上 1 900
	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 1 000 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			

表 D.1(续)

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注
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 4 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	网络通信计算机编号	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
测点 1 数据	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

表 D.2(续)

消息结构	字节序	字 段	数 据 类 型	内 容 描 述	备 注
测点 1 数据	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 1 900
...	...				
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 WIM 动态称重系统采集的车速、车重、车型等数据的实时传输,其网络连接采用 TCP 或 UDP 协议,其报文协议由一组固定长度为 162 字节的消息体组成,具体协议构成见图 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	网络通信计算机编号	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

表 D.3(续)

消息结构	字节序	字 段	数 据 类 型	内 容 描 述	备 注
车辆基本信息	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(s)
	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	
	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	
轴距信息	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	超限标示	BYTE	0-未超限;1-超限	

表 D.3(续)

消息结构	字节序	字 段	数 据 类 型	内 容 描 述	备 注
其他信息	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



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 15395 电子设备机柜通用技术条件
- [4] GB/T 22239 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求
- [5] 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
- [6] 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
- [7] GB/T 37025 信息安全技术 物联网数据传输安全技术要求
- [8] 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
- [9] GB/T 38894 无损检测 电化学检测 总则
- [10] JJG 882 压力变送器
- [11] JJF 1305 线位移传感器校准规范
- [12] JJF 1918 电容式加速度传感器校准规范
- [13] DB/T 10 数字强震动加速度仪
- [14] JG/T 422 土木工程用光纤光栅应变传感器
- [15] JT/T 578 水运工程 钢弦式锚索测力计
- [16] JTG 2182 公路工程质量检验评定标准 第二册 机电工程
- [17] JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- [18] JTG D60 公路桥涵设计通用规范
- [19] JTG/T 3360—01 公路桥梁抗风设计规范
- [20] JTG/T 3365—01 公路斜拉桥设计规范
- [21] JTG/T D65—05 公路悬索桥设计规范
- [22] JTG/T D65—06 公路钢管混凝土拱桥设计规范
- [23] JTG/T H21 公路桥梁技术状况评定标准
- [24] 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)

