

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 总体设计	2
4.1 一般规定	2
4.2 系统架构	3
4.3 传感器模块	3
4.4 数据采集与传输模块	4
4.5 数据处理与管理模块	4
4.6 数据分析与安全预警及评估模块	4
4.7 系统集成及用户界面交互	4
5 监测内容与测点选择	5
5.1 一般规定	5
5.2 监测内容	5
5.3 测点选择	7
6 传感器	9
6.1 一般规定	9
6.2 荷载与环境监测传感器	9
6.3 结构整体响应监测传感器	10
6.4 结构局部响应监测传感器	10
7 数据采集、传输、处理与管理	11
7.1 一般规定	11
7.2 数据采集	12
7.3 数据传输	13
7.4 数据处理	14
7.5 数据管理	14
8 数据分析与安全预警及评估	14
8.1 一般规定	14

8.2	数据分析	15
8.3	安全预警	16
8.4	安全一级评估	16
8.5	安全二级评估	18
8.6	专项评估	20
9	系统集成及用户界面交互	21
9.1	一般规定	21
9.2	系统集成	21
9.3	用户界面交互	22

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准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。

本标准主要起草单位:中交公路规划设计院有限公司、哈尔滨工业大学。

本标准参加起草单位:大连理工大学、中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司、同济大学、香港理工大学、南京重大路桥建设指挥部、宁波市杭州湾大桥发展有限公司、港珠澳大桥管理局、舟山市大桥建设管理局。

本标准主要起草人:欧进萍、张喜刚、李惠、李娜、冯良平、崔冰、宋晖、刘志强、郭安薪、周文松、张东昱、鲍跃全、李顺龙、叶志龙、刘芳亮、梁柱、徐幼麟、孙利民、孙小飞、张晓斌、胡斌、张福俭、毛幸全、马骏、殷鹏雷、冷俊、徐牲、谢浩、郭健、王金权、刘谨、张建、武焕陵、丁鸿志、张胜利、喻言、周智。

公路桥梁结构安全监测系统技术规程

1 范围

本标准规定了公路桥梁结构安全监测系统的总体设计、监测内容与测点选择、传感器模块、数据采集与传输模块、数据处理与管理模块、数据分析与安全预警及评估模块、系统集成与用户界面交互的技术要求。

本标准适用于桥梁主跨跨径不小于150m梁桥、200m拱桥、300m斜拉桥、500m悬索桥等结构复杂和重要桥梁的结构安全监测系统,其他桥梁结构安全监测系统亦可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 18233	信息技术 用户建筑群的通用布缆
GB/T 21296	动态公路车辆自动衡器
GB 50139	内河通航标准
GB/T 50283	公路工程结构可靠度设计统一标准
JTG H11	公路桥涵养护规范
JTG/T H21	公路桥梁技术状况评定标准
BS EN 50173	信息技术 通用布线系统(Information technology-Generic cabling systems)
EIA/TIA—568	商用建筑电信电缆敷设标准(Commercial building telecommunications cabling standard)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

结构安全监测系统 structural safety monitoring system

由安装在桥梁上的传感器以及数据采集与传输、数据处理与管理等软硬件构成,对桥梁的荷载与环境作用以及桥梁结构性能参数进行测量、收集、处理、分析,并对桥梁结构正常使用水平与安全状态进行评估和预警的系统。

3.2

环境参数 environmental parameter

桥梁所在区域的自然环境参数,包括风、温度、湿度、降雨等。

3.3

结构整体响应 structural global response

在荷载作用下桥梁结构整体的振动、位移、变形和转角等。

3.4

结构局部响应 structural local response

在荷载作用下桥梁构件局部的应变、裂缝、腐蚀、拉索索力、支座反力、基础冲刷等。

3.5

模态参数 modal parameter

结构的固有动力特性,包括结构固有频率、阻尼比和模态振型。按照模态参数是实数还是复数,分为实模态和复模态。

3.6

模态参数识别 modal parameter identification

对监测的桥梁结构响应及外部激励数据,采用模态识别方法获得结构模态参数。

3.7

安全评估 safety evaluation

通过监测数据分析桥梁结构当前的工作状态,并与相应的临界状态进行比较分析,评价其安全等级。

3.8

安全一级评估 safety evaluation: level 1

将各类传感器监测数据特征值与预先设计计算分析确定的容许值进行对比,分析结构安全的方法。

3.9

安全二级评估 safety evaluation :level 2

利用修正的结构有限元模型、监测荷载和设计荷载进行结构重分析和极限承载力分析,评估桥梁结构安全状态和安全储备的方法。

3.10

专项检查 special inspection

使用专业技术手段为实现特定目的而开展的桥梁检查活动。

3.11

专项评估 special evaluation

桥梁遭受洪水、流冰、漂流物和船舶车辆的撞击、滑坡、泥石流、地震、风灾、海啸、火灾、化学剂腐蚀和特殊车辆过桥等突发事件后,确定桥梁结构整体或局部构件安全状态的评估方法。

3.12

预警值 alarming value

对桥梁运营环境、结构构件可能出现的不同程度异常或危险,所设定的各监测点设备的监测参数警戒值。

3.13

预警 early-warning

安全监测系统在监测数据特征值超过预警值时,发出异常情况警告的行为。

4 总体设计

4.1 一般规定

4.1.1 系统应进行专项设计,应与桥梁主体结构设计同步进行;系统构建宜与桥梁施工同步进行。

4.1.2 系统宜兼顾施工监控和成桥荷载试验的功能要求,宜与桥梁巡检和养护管理相结合。

4.1.3 系统硬件和软件应技术先进、稳定可靠、操作方便、经济实用、便于维护更换及扩展升级。

4.1.4 监测内容及测点选择应根据桥梁的复杂性、重要性、外部环境与荷载作用、结构力学特性设计确定。

4.1.5 监测内容、测点选择、设备选型、数据采集与传输、数据处理与管理及软件开发应满足数据分析、安全预警、安全一级评估、安全二级评估及专项评估的要求。

4.1.6 系统设计应基于桥梁主体结构设计方案进行,应包括下列主要内容:

- a) 桥梁主体结构计算分析与结构危险性分析;
- b) 系统功能要求与总体方案设计;
- c) 系统各模块的工作流程、功能设计、详细设计及集成方案;
- d) 监测内容和测点选择、监测方法、设备选型与安装方案;
- e) 系统数据采集、传输、处理与管理方案;
- f) 系统供电、通信、防雷、防护方案;
- g) 系统及其附属设施的预埋件和预留孔洞方案;
- h) 系统安全预警和评估方案;
- i) 系统与主体结构工程、监控中心的房建工程、供配电工程、通信工程等的界面划分;
- j) 根据系统的正常使用维护需求,提出对桥梁检修通道的设计要求。

4.1.7 系统在桥梁现场的供配电、通信需求应由系统设计单位提出,由桥梁机电工程设计单位统一设计预留,工作界面划分应设在系统数据采集机柜内;系统在监控中心的需求应由系统设计单位提出,由监控中心的房建工程设计单位统一设计预留。

4.1.8 系统实施不应影响桥梁结构承载能力,不对桥梁结构防腐等防护工程造成损坏。

4.1.9 预埋在结构内部的埋入式监测设备的使用寿命应不低于 20 年;附着安装在结构上的非埋入式监测设备的使用寿命应不低于 5 年;在正常维护和可更换条件下,系统应与桥梁结构同寿命,监测设备的维护与更换应保证数据的一致性和连续性。

4.1.10 桥梁结构安全监测系统设计与构建,除应符合本标准要求外,还应符合国家现行相关标准和规范的有关规定。

4.2 系统架构

4.2.1 系统应包括传感器模块、数据采集与传输模块、数据处理与管理模块、数据分析与安全预警及评估模块,并通过系统集成技术将各模块集成为统一协调的整体。

4.2.2 传感器模块由荷载与环境监测、结构整体响应监测和结构局部响应监测传感器构成,应实现桥梁环境参数、车辆荷载参数及视频信息、结构响应的测量。

4.2.3 数据采集与传输模块由数据采集设备、数据传输设备与缆线、数据采集与传输软件构成,应实现传感器数据同步采集与传输,保证数据质量、不失真。

4.2.4 数据处理与管理模块由数据预处理、中心数据库、数据查询与管理软硬件构成,应实现桥梁监测(检)测数据的处理、查询、存储与管理等功能。

4.2.5 数据分析与安全预警及评估模块应实现数据实时在线显示、数据分析、安全预警及评估等功能。

4.3 传感器模块

4.3.1 传感器模块设计应包括监测内容和测点选择的设计以及传感器选型。

4.3.2 监测内容应包括荷载与环境监测、结构整体响应监测与结构局部响应监测:

- a) 荷载与环境监测内容包括车辆荷载、风、地震、温度、湿度、降雨量和船舶撞击力等;
- b) 结构整体响应监测内容包括结构振动、变形、位移、转角等;
- c) 结构局部响应监测包括构件局部应变、索力、钢构件疲劳、支座反力、裂缝、腐蚀、基础冲刷深度等。

4.3.3 测点选择应满足数据分析与安全预警及评估要求,应采用结构计算分析、结构危险性分析和易损性分析方法确定监测的关键构件和部位。

4.3.4 传感器模块设计应考虑防雷、防静电、防尘、防水等防护措施。

4.4 数据采集与传输模块

4.4.1 数据采集与传输模块设计应包括与传感器接口的匹配性设计、信号调理与数据采集方案、数据传输方案与路由设计、软件功能设计与集成方案。

4.4.2 根据监测数据特点和数据分析要求,采用相应的数据采集方案,应保证信号信噪比高、不失真,动态信号还应满足采样定理。

4.4.3 信号调理与数据采集设备应基于接口匹配性、环境适应性、稳定性、耐久性等要求进行选型。

4.4.4 数据采集与传输设备应选用兼容性、耐久性和环境适应性好的产品,并应易于维护、便于更换,且采取防水、防尘、防雷、防损坏等防护措施。

4.4.5 数据采集站(机柜)布置方案应考虑传感器布置、信号传输距离、易于维护等要求,宜与通信、监控等机电工程资源共享。

4.4.6 数据采集和传输软件应自动采集与传输数据,并可进行人工干预采集与采集参数调整。

4.4.7 数据传输路由与综合布线应基于桥梁现场情况、传感器与数据采集站布置方案及信号传输距离进行设计,宜利用机电工程已有桥架和预留孔洞走线,并远离强电等噪声源。

4.5 数据处理与管理模块

4.5.1 数据处理与管理模块设计应包括架构设计、功能设计、性能设计、安全设计,软件开发应考虑先进性、实用性、安全性、稳定性、容错性、可操作性和可扩展性。

4.5.2 数据处理与管理模块应包括下列主要功能:

- a) 数据预处理、数据存储、自动生成报告报表;
- b) 操作系统中心数据库,进行数据查询和管理;
- c) 备份数据、自动导入和导出数据及手工导入和导出数据;
- d) 统一的数据标准格式和接口;
- e) 数据安全性,可采取设定不同用户级别权限和密码,以及网络防护等技术措施。

4.5.3 数据处理与管理模块应根据不同数据类型设计数据库以及数据维护和备份机制。

4.6 数据分析与安全预警及评估模块

4.6.1 数据分析与安全预警及评估模块应包括数据分析、安全预警、安全一级评估、安全二级评估和专项评估。

4.6.2 数据分析应对荷载与环境数据、结构整体响应数据和结构局部响应数据进行全面统计分析和特殊分析,为安全预警、安全一级评估、安全二级评估和专项评估提供基础数据。

4.6.3 安全预警应根据监测数据流和数据分析结果进行实时预警。

4.6.4 安全一级评估应对监测数据统计特征值与规范设计值进行比对并分析,形成安全一级评估结果。

4.6.5 安全二级评估利用修正结构有限元模型、监测荷载、规范设计荷载进行结构重分析和极限承载能力分析,评估桥梁结构安全储备和安全状态等级,形成安全二级评估结果。

4.6.6 桥梁遭受洪水、流冰、漂流物和船舶车辆的撞击、滑坡、泥石流、地震、风灾、海啸、火灾、化学剂腐蚀和特殊车辆过桥等突发事件后,应采用专业分析方法进行专项评估,形成专项评估结果。

4.6.7 安全评估应选用可靠的评估方法,兼顾结构安全评估技术发展预留升级接口。

4.7 系统集成及用户界面交互

4.7.1 系统集成应包括硬件集成、软件集成和工具平台集成。

4.7.2 系统集成应通过工具平台实现硬件和软件最优配置,形成完整集成方案,使系统整体性能

最优。

4.7.3 系统集成应进行硬件、软件、网络等接口设计,使各模块协调统一工作,形成桥梁安全监测一体化协作平台。

4.7.4 用户界面交互应清晰、友好地显示监测数据、数据采集与传输工作状态、数据处理与分析结果、安全预警信息及评估结果。

4.7.5 系统投入运行前,应基于桥梁结构特性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。

5 监测内容与测点选择

5.1 一般规定

5.1.1 监测内容应根据运营环境、结构特点、结构危险性分析、结构设计和监测功能确定。

5.1.2 测点选择应满足安全预警和评估要求,遵循“代表性、实用性、经济性、少而精”的选择原则。

5.1.3 监测内容和测点选择符合下列规定:

- a) 荷载与环境监测内容和测点选择应根据荷载与环境作用特点确定;
- b) 结构整体响应监测内容和测点选择应根据结构振动和变形特点、模态参数识别及安全评估要求确定;
- c) 结构局部响应监测内容和测点选择应根据结构计算分析和易损性分析结果确定。

5.2 监测内容

5.2.1 荷载与环境监测内容选择符合下列规定:

- a) 应对桥梁车辆荷载进行监测,包括断面交通流、车型、车轴重、轴数、车辆总重、车速等;
- b) 应对桥梁结构温度场和湿度进行监测;
- c) 应对大跨径斜拉桥和悬索桥等风敏感结构的风参数进行监测,其他桥梁可根据抗风设计和安全评估要求进行选择;
- d) 应对特大型桥梁桥址区域地震动进行监测,宜对抗震设防等级较高区域的其他桥梁地震动进行监测,非抗震设防区域宜根据抗震设计和安全评估要求进行选择;
- e) 按 GB 50139 规定,航道等级为 I 级 ~ V 级的桥梁宜进行船舶撞击监测,非通航孔桥宜在船舶撞击风险区进行船舶撞击监测;
- f) 宜对斜拉桥进行降雨量监测。

5.2.2 结构整体响应监测内容包括结构振动、位移、变形和转角,各种桥型均应进行振动与变形监测,位移和转角可根据结构受力特点选择确定。

5.2.3 结构局部响应监测内容选择符合下列规定:

- a) 应对关键构件应变进行监测;
- b) 应对缆索(主缆、吊索和系杆)力进行监测;
- c) 宜对边界约束体系中关键支座的支座反力进行监测;
- d) 应对钢箱梁正交异性钢桥面板、吊索、斜拉索以及其他存在疲劳效应的钢构件进行疲劳监测;
- e) 宜依据大跨径混凝土桥梁结构受力特点、易损性和结构设计要求进行裂缝监测;
- f) 宜对水文和地质条件复杂、冲刷严重的桥梁进行流速和冲刷深度监测;
- g) 宜对位于海洋环境、盐碱地区和石油化工等侵蚀性工业环境的桥梁进行腐蚀监测。

5.2.4 根据桥型和受力特点按表 1 选择相应监测内容,除表 1 所列桥型之外的复杂和重要桥梁也可参照表 1。

表1 监测内容

类别		主要参数	桥型选择				
			梁桥	拱桥	斜拉桥	悬索桥	
荷载 与环境	车辆荷载	断面交通流、车型、车轴重、轴数、车辆总重、车速	●	●	●	●	
		空间分布	○	○	○	○	
	船舶撞击	桥墩加速度	○	○	○	○	
	风速、风向	桥面	○	○	●	●	
		拱顶	-	○	-	-	
		塔顶	-	-	●	●	
	风压	梁表面风压	-	-	○	○	
	地震	桥岸地表场地加速度	○	○	○	○	
		承台顶或桥墩底部加速度	○	○	○	○	
	温度	箱梁内外环境温度	●	●	●	●	
		混凝土温度	●	○	●	○	
		钢结构温度	○	○	●	●	
		主拱温度	-	●	-	-	
		主缆温度	-	-	-	●	
		锚室内温度	-	-	-	●	
		鞍罩内温度	-	-	-	●	
		桥面铺装层温度	○	○	○	○	
		湿度	箱梁内湿度	●	●	●	●
			环境湿度	●	●	●	●
	索塔锚固区湿度		-	-	●	-	
	主缆内湿度		-	-	-	●	
	锚室内湿度		-	-	-	●	
	鞍罩内湿度		-	-	-	●	
雨量	降雨量	-	-	○	-		
结构整体 响应	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	○	○	○	○	
		桥墩顶部纵向和横向振动加速度	○	-	-	-	
		拱顶三向振动加速度	-	●	-	-	
		塔顶水平双向振动加速度	-	-	●	●	
		吊杆(索)振动加速度	-	●	-	●	
		斜拉索振动加速度(面内、面外)	-	-	●	-	

表 1(续)

类 别		主 要 参 数	桥 型 选 择			
			梁桥	拱桥	斜拉桥	悬索桥
结构整体 响应	变形	主梁挠度	●	●	●	●
		主梁横向变形	○	○	●	●
		墩顶偏位	○	-	-	-
		拱顶偏位	-	●	-	-
		拱脚偏位	-	○	-	-
		塔顶偏位	-	-	●	●
		主缆偏位	-	-	-	●
	位移	支座位移	○	○	○	○
		梁端纵向位移	○	○	○	○
		锚碇位移	-	-	-	●
转角	塔顶截面倾角	-	-	○	○	
结构局部 响应	应变	主梁关键截面应变	●	●	●	●
		体内、体外预应力	○	-	-	-
		主拱关键截面应变	-	●	-	-
	裂缝	混凝土结构	○	○	○	○
	基础冲刷	流速、基础冲刷深度	○	○	○	○
	腐蚀	混凝土侵蚀深度	○	○	○	○
		钢结构、拉索、主缆及锚具腐蚀	○	○	○	○
	索力	吊杆(索)	-	●	-	●
		系杆	-	●	-	-
		斜拉索	-	-	●	-
		拉索断丝	○	○	○	○
	支座反力	支座反力	○	○	○	○
	疲劳	斜拉索	-	-	●	-
		主梁	-	-	●	●
吊索		-	●	-	●	
伸缩缝		○	○	●	●	

注：“●”为必选监测项，“○”为宜选监测项，“-”为不包含项。

5.3 测点选择

5.3.1 荷载与环境监测

5.3.1.1 车辆荷载监测宜采用不停车称重方法,称重测点宜选择在路基或有稳定支撑的混凝土结构铺装层内,应覆盖所有行车道。

- 5.3.1.2 船舶撞击荷载监测宜采用监测结构振动的方法,测点宜选择在易遭受船舶撞击的桥墩处。
- 5.3.1.3 风荷载监测应测量风速和风向,测点宜选择在桥面两侧、塔顶、拱顶,其安装位置应尽量能够监测自由场风速和风向。跨度小于800m斜拉桥和跨度小于1500m悬索桥宜在主梁跨中上下游两侧各布设一个测点;跨度大于或等于800m斜拉桥和跨度大于或等于1500m悬索桥,宜结合风场空间相关性适当增加测点数量。
- 5.3.1.4 对风敏感的特大跨桥梁,宜根据钢箱梁绕流场特性进行钢箱梁表面风压监测,测点应沿钢箱梁截面周向和纵向布置。
- 5.3.1.5 对地震动监测宜测量地表振动,测点选择符合下列规定:
- 长度小于800m的桥梁,宜布设一个测点;长度不小于800m的桥梁,考虑地震地面运动非一致性,宜增设一个测点;
 - 桥岸地表区域可将测点布设于护岸、锚碇锚室内、近桥址监控中心等自由场地上,水体区域可布置于人可到达的索塔和桥墩底部或承台顶部,并易于保护和维修。
- 5.3.1.6 温度监测测点选择符合下列规定:
- 根据截面温度梯度及结构整体升降温和空间分布特点,可通过有限元模拟或参考相关桥梁设计规范确定测点位置;
 - 宜在主梁跨中、索塔、拱圈、主缆等关键截面布设测点;
 - 测点布置宜与应变监测的温度补偿测点统一设计、数据共享。
- 5.3.1.7 湿度监测测点选择符合下列规定:
- 单体桥梁湿度测点不宜少于两个,宜布设于桥梁结构内外湿度变化较大和对湿度敏感的桥梁结构内部或外部;
 - 大型桥梁关键钢结构应布设湿度测点,宜布设在桥面上、钢结构箱梁内、斜拉桥的斜拉索锚固区、悬索桥的锚室内和主缆内以及鞍罩内。
- 5.3.1.8 降雨量监测测点宜布设在桥梁开阔部位,且不宜布设在振动较大部位。
- 5.3.2 结构整体响应监测
- 5.3.2.1 结构整体振动监测测点选择:
- 测点选择应根据桥梁结构动力计算结果、振型特点以及所需监测振型阶数综合确定;传感器宜布设在结构主要振型振幅最大或较大部位,并避开节点位置;
 - 宜采用以识别振型为目标的测点最优选择方法;
 - 宜采用以结构损伤识别与模型修正为目标的测点最优选择方法。
- 5.3.2.2 结构整体变形和位移监测测点选择应根据最不利荷载组合作用下主梁、索塔、主缆、主拱等关键构件的挠度、位移和倾角包络线选择变形、位移和倾角最大或较大的位置。
- 5.3.3 结构局部响应监测
- 5.3.3.1 应变监测测点选择:
- 宜根据结构计算分析选择受力较大或影响结构整体安全的关键构件、截面和部位;
 - 宜根据结构易损性分析选择最易破坏或局部破坏易导致结构倒塌的关键构件、截面和部位;
 - 受力复杂的构件、截面和部位,宜布设三向应变测点。
- 5.3.3.2 索力监测宜根据拉索主要参数选择有代表性、索力较大、拉索应力变化较大的拉索进行监测。宜采用振动频率法、磁通量测试法、锚垫板承压力测试法及其他不影响结构安全的监测方法。
- 5.3.3.3 支座反力监测宜采用测力支座;宜选择可能出现横向失稳等倾覆性破坏的独柱桥梁、弯桥、基础易发生沉降、采用压重设计等桥梁的关键支座。
- 5.3.3.4 疲劳监测宜采用监测动应变方法,根据结构局部计算分析结果,选择钢箱梁正交异性钢桥面

板 U 肋、横隔板过焊缝等易产生疲劳效应的部位。

5.3.3.5 腐蚀监测宜选择代表性桥墩的水位变动区、浪溅区的关键截面。

5.3.3.6 基础冲刷监测宜根据桥梁基础局部冲刷专题研究成果以及水文勘测资料综合选择冲刷监测区域,应选择冲刷最大区域以及桩基薄弱区域。

6 传感器

6.1 一般规定

6.1.1 传感器选型应满足量程、测量精度、分辨率、灵敏度、动态频响特性、长期稳定性、耐久性、环境适应性和经济性等要求。

6.1.2 传感器选型宜便于系统集成。

6.1.3 传感器安装前应进行必要的标定、校准或自校。

6.2 荷载与环境监测传感器

6.2.1 车辆荷载监测宜选用动态称重系统,并满足下列要求:

- a) 动态称重传感器技术参数和安装要求应符合 GB/T 21296 的规定;
- b) 动态称重系统传感器布设尺寸应考虑车道宽度,量程应根据桥梁车辆限载重以及预估车辆荷载重综合确定,单轴监测量程不宜小于限载车辆轴重的 200%;
- c) 应具备数据自动采集功能,现场数据存储能力不宜少于 14d。

6.2.2 风速和风向监测宜选用三向超声风速仪或机械式风速仪,并满足下列要求:

- a) 处于台风区域的桥梁宜选择三向超声风速仪,测试参数应包括脉动风速、平均风速、风向和风向角等;
- b) 风速仪量程不应小于其安装高度的设计风速;
- c) 当同时采用多个风速仪时,可采用三向超声风速仪和机械式风速仪联合使用方案,但主梁两侧应采用相同类型风速仪;
- d) 风速仪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,并满足抗风设计要求;支架伸出主体结构(主梁、索塔、拱顶等)边缘不宜少于 5m。某些情况下,风速仪也可根据监测要求安装在桥梁沿线设施构件上,但应尽可能避免主体结构紊流对风速仪测试数据的影响。

6.2.3 风压监测可选择陶瓷型或扩散硅型微压差传感器;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,且在不同方位角不应少于一个(每个位置的角度间隔宜为 30°)。风压传感器满足下列要求:

- a) 量程不宜小于 $-1\ 000\text{Pa} \sim +1\ 000\text{Pa}$;
- b) 测量精度不宜大于 0.2% FS;应能在雷雨环境下正常工作;
- c) 传感器沿主梁截面周向和纵桥向布置,可安装于梁体外表面,应使气嘴与桥面平行,风向正对皮托管测压孔;皮托管安装应有固定支架,防止皮托管振动。

6.2.4 桥址处地震监测可选用强震动记录仪或三向加速度传感器,传感器应符合地震动监测相关标准的要求。

6.2.5 船舶撞击监测可与地震监测统一设计、数据共享。

6.2.6 温度监测宜选用温度传感器,并满足下列要求:

- a) 温度传感器选型应考虑量程、精度、分辨率和耐久性,技术参数满足下列要求:
 - 1) 监测大气环境温度的传感器,量程宜超出年极值最高温度 $+20\text{℃}$ 和年极值最低温度 -20℃ ;

- 2) 监测结构表面温度的传感器,量程宜超出年极值最高温度 + 50℃ 和年极值最低温度 - 20℃;
- 3) 大气环境温度传感器精度不宜低于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,分辨率不宜低于 0.1℃;
- 4) 结构表面和内部温度传感器精度不宜低于 $\pm 0.2^\circ\text{C}$,分辨率不宜低于 0.1℃。

b) 温度传感器可选用热电偶、热电阻和光纤光栅温度传感器等,应根据监测构件和部位具体情况和要求综合选定。

6.2.7 湿度监测宜选用湿度传感器,并满足下列要求:

- a) 湿度传感器选型应考虑量程、精度、工作温度范围、稳定性、适应性和耐久性等。量程宜选为 0 ~ 100% RH,精度不宜低于 3% RH;
- b) 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,应根据监测构件和部位具体情况和要求综合选定。

6.2.8 降雨量监测宜选用雨量计,并满足下列要求:

- a) 雨量计应依据桥址处气候和气象条件选择设备类型、量程和精度等;
- b) 雨量计可选用电容雨量计、红外散射式雨量计、单翻斗雨量计,应根据监测要求、匹配性和耐久性综合选定。

6.3 结构整体响应监测传感器

6.3.1 结构整体振动监测宜选用加速度传感器,并满足下列要求:

- a) 应根据桥梁结构动力计算分析结果、环境适应性和耐久性等进行传感器选型;
- b) 基频较低的大跨径桥梁,宜选用低频性能优良的力平衡式或电容式加速度传感器,量程不宜小于 $-2g \sim +2g$,横向灵敏度宜小于 1%,频响范围 0 ~ 100Hz;
- c) 自振频率较高的桥梁或斜拉索、吊索、系杆等构件,可选用电容式加速度传感器和压电式加速度传感器,量程不宜小于 $-20g \sim +20g$,横向灵敏度宜小于 5%,压电式加速度传感器频响范围 0.1Hz ~ 1 000Hz;
- d) 可根据桥梁结构主要参与振动的振型,选择三向、双向和单向加速度传感器。

6.3.2 位移和变形监测传感器满足下列要求:

- a) 应根据被测桥梁结构、构件和附属设施的特点和监测要求,选用位移计、液压连通管系统、全球导航卫星定位系统和倾角传感器进行结构和构件局部或整体绝对或相对位移监测;
- b) 悬索桥、跨度大于 600m 的斜拉桥主梁挠度和横向偏位、索塔偏位、主缆偏位应采用全球导航卫星系统(GPS 系统、北斗系统等)进行监测。基准站应选址在地基稳定、上方天空开阔、远离电磁干扰、易受保护及维修的区域;监测站应安装在被测结构或构件顶部,上方无遮挡,并远离电磁干扰。全球卫星定位系统的监测数据应可转换到大桥独立坐标系下(施工坐标系);
- c) 梁桥、拱桥和跨度小于或等于 600m 的斜拉桥主梁挠度监测应选用基于连通管原理的监测仪器。宜将安装、调试后监测仪器的初始值作为测量基准值,监测数据应进行温度修正。

6.4 结构局部响应监测传感器

6.4.1 应变传感器满足下列要求:

- a) 应变传感器选型应考虑传感器标距、精度、量程、环境适应性、耐久性和长期稳定性;
- b) 静应变传感器量程宜不小于预测最大值的 1.5 倍 ~ 3 倍,动应变传感器量程宜不小于预测最大值的 2 倍;
- c) 疲劳测点应根据结构计算分析和结构易损性分析结果布设在易于或已出现疲劳破坏初期征兆的部位,应选用三向应变传感器;
- d) 应变监测应进行温度补偿;

e) 应变传感器可选用电阻应变传感器、振弦式应变传感器和光纤光栅应变传感器等,可根据监测要求和被测结构或构件应力场及其动态特性综合确定。

6.4.2 索力监测可根据监测要求和被测拉索的特点选用加速度传感器(频率法)、压力传感器、磁通量传感器和光纤光栅应变传感器等,监测精度宜不低于1%。

6.4.3 拉索断丝监测传感器满足下列要求:

- a) 拉索断丝监测可选用声发射传感器,裸露于空气中的钢索结构可选用谐振频率较高的声发射传感器,埋设于混凝土内的预应力钢索宜选用谐振频率稍低的声发射传感器;
- b) 声发射传感器的谐振频率量程宜在 100kHz ~ 400kHz 范围内,灵敏度不宜小于 60dB [相对于 $1V/(m/s)$],在监测带宽和使用温度范围内灵敏度变化不应大于 3dB;
- c) 声发射传感器宜安装在主缆索股、斜拉索、吊杆、系杆的锚固端,与被测结构之间保持电绝缘,并屏蔽无线电波或电磁噪声干扰。安装前应对被测索构件进行衰减特性测量,以确定监测所需传感器数量;
- d) 损伤源定位宜先进行断铅试验,确保每个传感器接收断铅信号幅值相差不超过 3dB。

6.4.4 支座反力监测传感器满足下列要求:

- a) 支座反力监测宜选用测力支座,满足支座安装要求;
- b) 测力支座安装后不应改变桥面高程,不应改变桥梁结构与支座接触方式和接触面积;
- c) 测力支座应具备可更换性。

6.4.5 腐蚀监测传感器可选用沿混凝土保护层深度安装的多电极传感器,监测混凝土保护层腐蚀侵蚀深度,判断钢筋腐蚀状态。

6.4.6 基础冲刷传感器满足下列要求:

- a) 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,可选用声呐传感器;
- b) 声呐传感器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;
- c) 可根据桥梁冲刷专题研究报告的桥墩(台)冲刷试验结果确定声呐探头位置。圆形桥墩宜布设在桥墩上下游和两侧;圆端形桥墩宜布设在桥墩上游、下游以及在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;
- d) 声呐传感器应通过试验确定声呐探头的指向角度,控制探头与桥墩的合理距离;
- e) 应根据监测区域水流速度、压力等水文特点,进行声呐传感器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。声呐探头宜选用非永久方法固定,安装连接材料应防水、防锈、耐老化。

7 数据采集、传输、处理与管理

7.1 一般规定

7.1.1 数据采集与传输应确保获得高精度、高品质、不失真数据,包括数据采集与传输的软硬件设计与开发,以及数据采集制度的确定:

- a) 数据采集与传输的软硬件研发与选型应满足传感器监测要求;
- b) 数据采集制度应包括数据采集方式、触发阈值和采样频率的确定。

7.1.2 数据处理应能纠正或删除异常数据,提高数据质量。

7.1.3 数据管理应具有标准化读写接口,应考虑数据的结构化、安全性、共享性以及使用友好性和便捷性。

7.2 数据采集

7.2.1 数据采集方式应根据桥梁的空间尺寸、测点数量和布置以及传感器类型等进行设计,满足下列要求:

- a) 测点相距较远且较分散,宜选用分布式数据采集方式;
- b) 测点相距较近且分布较集中,宜选用集中式数据采集方式或分布式与集中式相结合的数据采集方式。

7.2.2 数据采集设备根据传感器输出信号类型、匹配性、兼容性、精度和分辨率等要求进行选型,并满足下列要求:

- a) 电荷信号应选用电荷放大器进行信号调理和采集;
- b) 数字信号可选用基于 RS485、CAN、Modbus TCP 或 UDP 等的分布式数据采集设备,并确定传输距离、传输带宽和速率;
- c) 模拟信号宜选用 4mA ~ 20mA 和 -5V ~ 5V 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,并确定输入范围、分辨率、精度、传输带宽和速率;也可选用在传感器端进行模数转换,按 7.2.2b) 规定确定技术参数;
- d) 数据采集模数转换分辨率应满足传感器分辨率和监测要求,不宜低于 16 位;
- e) 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;
- f) 电阻应变传感器应选用惠斯登电桥调理放大信号;
- g) 电信号应进行光电隔离,以增强抗干扰能力;
- h) 静态模拟信号可选用多路模拟开关和采样保持器进行多路信号依次采集;
- i) 动态信号应选用抗混滤波器进行滤波和降噪。

7.2.3 数据采集方案应根据监测变量类型、监测要求以及系统数据采集、传输、处理和管理能力确定,并符合下列规定:

- a) 车辆荷载、温度、湿度、降雨量等荷载与环境监测变量,静态位移、拉索索力、支座反力、腐蚀、基础冲刷等结构整体与局部响应监测变量,宜定时采样,采样频率符合 7.2.4 的规定;
- b) 船舶撞击、风速风向、风压、地震等荷载与环境监测变量,加速度和动态位移、应变等结构整体与局部响应监测变量,宜采用触发采样,触发阈值应根据桥梁结构计算分析和现场测试结果确定;
- c) 根据桥梁荷载与环境、结构响应特点和监测要求,用户可自行设定混合采样,混合采样为定时采样和触发采样相结合方式,监测变量没有超过阈值时采用定时采样,超过阈值采用触发采样模式;
- d) 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,应与高清摄像机配套安装,同步采集;
- e) 桥梁通车初期 3 年内或桥梁安全一级评估结果发现结构关键构件异常时宜采用连续采样。

7.2.4 采样频率根据监测要求和功能要求设定,不宜低于下列规定,动态信号应满足采样定理:

- a) 荷载与环境监测:
 - 1) 车辆荷载:触发采集;
 - 2) 船舶撞击桥墩加速度:50Hz;
 - 3) 风速和风向:超声风速仪 10Hz,机械式风速仪 1Hz;
 - 4) 风压:20Hz;
 - 5) 地震:50Hz;
 - 6) 温度:1/600Hz;

7) 湿度:1/600Hz;

8) 降雨量:1/60Hz。

b) 结构整体与局部响应监测:

1) 振动加速度:50Hz;

2) 动位移:20Hz;

3) 静位移:1Hz;

4) 动应变:10Hz;

5) 静应变:1/600Hz;

6) 索力:压力式传感器 1Hz,频率法加速度传感器 50Hz,磁通量索力传感器 1/600 Hz;

7) 拉索断丝:1MHz;

8) 支座反力:1Hz;

9) 腐蚀:1/3 600Hz;

10) 声呐传感器测量基础冲刷:1MHz。

7.2.5 不同监测数据的数据采集时间同步精度应符合下列规定:

a) 相同类型监测变量的数据采集时间同步误差宜小于 0.1ms;

b) 不同类型监测变量的数据采集时间同步误差宜小于 1ms。

7.2.6 数据采集宜考虑自校准功能,无自校准功能时应根据监测要求定期检测。

7.2.7 数据采集应采用抗干扰措施,包括串模干扰抑制、共模干扰抑制以及接地技术和屏蔽技术,提高信噪比。

7.2.8 数据采集站布置应根据监测要求和信号传输距离要求确定,不应影响数据质量;数据采集站之间应考虑数据采集时间同步性要求,同步精度应符合 7.2.5 的规定。

7.2.9 数据采集软件开发符合下列规定:

a) 应实现数据实时采集、自动存储、缓存管理、即时反馈和自动传输等功能;

b) 应与数据库系统和数据分析软件稳定、可靠地通信,可本地或远程调整设备配置,可通过标签数据库或本地配置文件进行信息读取;

c) 应对传感器输出信号、数据采集和传输设备的运行状态信号进行实时采集,对系统运行状态进行监控,异常时可及时报警;

d) 应接受并处理数据采集参数的调整指令,并记录和备份处理过程。

7.3 数据传输

7.3.1 数据传输应确保系统各模块之间无缝连接,以成为一个有机协调的整体;应确保监测数据和指令在各模块之间高效可靠的传输。

7.3.2 有线数据传输方式选用符合下列规定:

a) 当传输距离相对较短且无强电磁干扰时,可采用模拟信号进行传输;

b) 当传输距离较远或有较强电磁干扰时,宜采用 RS-485、工业以太网等数字信号或光纤传输技术进行传输。

7.3.3 无线传输方式选用电磁波传输技术,信号发射装置和接收装置应远离强电磁干扰源。

7.3.4 桥梁现场与监控管理中心之间的远距离数据传输宜采用光纤传输技术、无线传输技术及两者相结合的方式。

7.3.5 数据传输软件开发符合下列规定:

a) 应考虑数据传输的一致性、完整性、可靠性和安全性,应满足系统开放性和可扩展性要求;

b) 应实现对数据进行压缩包处理和解包复原功能,宜以包为单位进行传输;

c) 宜基于 TCP/IP 协议进行数据交换和传输,应符合 IEEE 802.3 的规定。

7.4 数据处理

7.4.1 数据处理应实现数据预处理和数据后处理功能,数据预处理宜采用数字滤波、去噪、截取和异常点处理等,数据后处理方式宜根据数据分析要求确定。

7.4.2 平稳信号频谱分析宜采用离散傅立叶变换,非平稳信号宜采用时频域分析方法。

7.4.3 频谱分析宜选择合适窗函数进行信号截断,以减少对谱分析精度的影响。

7.4.4 时域变换宜利用自相关函数检验数据的相关性和混于随机噪声中的周期信号,宜利用互相关函数确定信号源位置,并检验受通道噪声干扰的周期信号。

7.4.5 数据处理软件开发应实现数据备份、清除和故障恢复等功能。故障恢复功能宜兼具手工操作控制功能,其他功能应自动调用。

7.5 数据管理

7.5.1 数据管理应实现快速显示、高效存储、生成报告和数据归档等功能。

7.5.2 原始监测数据应定期存储、备份存档,后处理数据宜保持不少于3个月在线存储;经统计分析的数据应专项存储,每季度或每年数据分析后宜存储某一段或某几段典型数据。

7.5.3 数据管理软件应对监测数据或图像在指定时间段进行回放。

7.5.4 数据报告报表应提供月报、季报、年报和特殊事件后的专项报告等,报告报表应导出办公系统易于调用的通用文档格式。

7.5.5 数据库应模块化架构,可对桥梁结构信息、监测系统信息和监测数据进行分层、分类存储和管理,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、统计分析数据子数据库、结构安全评估子数据库、施工监控子数据库和荷载试验子数据库等。

7.5.6 桥梁结构信息子数据库应对桥梁设计、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、竣工图纸目录及科研报告等分类。

7.5.7 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,包括设备安装位置、技术参数、品牌和规格等。

7.5.8 结构有限元模型子数据库应存储和管理桥梁结构各阶段有限元模型。有限元模型宜采用通用有限元分析软件创建,宜用标准文件格式进行保存。

7.5.9 实时数据子数据库应存储和管理监测系统监测的所有变量的时程数据。

7.5.10 统计分析数据子数据库应存储和管理数理统计以及各种数据分析方法得到的分析结果。

7.5.11 结构安全评估子数据库应存储和管理预警值、安全评估方法和结果以及预警历史记录等,且宜与桥梁巡检以及桥梁养护管理系统无缝衔接、数据共享。

7.5.12 施工监控子数据库应存储和管理桥梁施工过程和历次养护维修施工控制过程的施工监控信息和各阶段施工监控报告。

7.5.13 荷载试验子数据库应存储和管理历次荷载试验信息,包括静、动力加载工况和荷载试验报告以及荷载试验过程中监测系统所采集的荷载和环境以及结构响应数据与分析结果。

7.5.14 数据存储和管理可在本地计算机上进行,宜采用云存储和云管理技术。

8 数据分析与安全预警及评估

8.1 一般规定

8.1.1 数据分析应符合8.2的规定,并形成数据分析报告,每年不应少于一次。数据分析结果可用于安全预警、安全一级评估、安全二级评估和专项评估。

8.1.2 在线实时预警应实现自动化,按8.3的规定设定预警值。

8.1.3 安全一级评估应符合 8.4 的规定,定期形成安全一级评估报告,每年不应少于一次;当监测数据、数据分析结果发生红色预警,应进行安全一级评估。

8.1.4 安全一级评估结果满足 8.4.6 的规定时,应进行专项检查。

8.1.5 当满足下列条件之一时,应在数据分析、安全一级评估和专项检查的基础上,按 8.5 的规定进行安全二级评估,形成安全二级评估报告:

- a) 安全一级评估或专项评估结果出现结构响应特征值变量异常;
- b) 桥梁服役中后期,每年不宜少于一次安全二级评估。

8.1.6 当桥梁遭受洪水、流冰、漂流物和船舶车辆的撞击、滑坡、泥石流、地震、风灾、海啸、火灾、化学剂腐蚀和特殊车辆过桥等突发事件后应进行数据分析,并按 8.6 的规定进行专项评估,形成专项评估报告。

8.1.7 在桥梁安全状态评估时,当本标准、JTG/T H21 和 JTG H11 的评定结果产生差异时,应采用三者中最不利的安全评定结果。

8.2 数据分析

8.2.1 数据分析包括统计分析和特殊分析,统计分析包括最大值、最小值、平均值、均方根值、累计值等统计值;特殊分析包括荷载谱分析、风参数分析、模态分析、疲劳分析等。采样频率大于 1Hz 的数据应以 10min、日、月、年为统计间隔获得其统计值。温湿度、静应变、静位移等监测变量,应给出以日、月、年为统计间隔的统计值。

8.2.2 荷载与环境监测数据分析符合下列规定:

- a) 应分析过桥车流量、车型、轴重、总重、速度及超载车比例等车辆荷载参数,提取出车辆荷载日、月、年最大值及其统计分布;宜将车辆荷载统计和模型转化为疲劳荷载谱,也可将车辆荷载重量、数量和相应时间直接作为车辆疲劳荷载;
- b) 分析风参数,宜包括风速、风向、风攻角、脉动风速谱、湍流强度、阵风系数及各等级风速疲劳谱等;
- c) 分析地震数据,宜包括加速度峰值、速度峰值、持续时间、频谱和反应谱等;
- d) 分析温度数据,应包括最高温度、最低温度和构件断面最大温度梯度等;
- e) 分析湿度数据,应包括构件内/外湿度最大值、平均值和超限持续时间等;
- f) 分析雨量数据,宜包括每小时最大降雨量、累计降雨量等。

8.2.3 结构整体响应监测数据分析符合下列规定:

- a) 结构整体响应监测数据包括变形、位移、加速度等;
- b) 分析结构变形包括平均值和绝对最大值,宜进行挠度与温度、车辆荷载相关性分析,横向位移和挠度与风荷载相关性分析;
- c) 分析梁端位移与支座位移,包括绝对最大值和累计位移,宜进行梁端位移、支座位移与温度和车辆荷载相关性分析;
- d) 宜分析锚碇位移的最大值和累计值等;
- e) 分析加速度,包括绝对最大值和最大均方根值,宜进行结构振动与风速风向及车辆荷载的相关性分析;
- f) 分析模态参数宜包括结构频率、振型和阻尼比,模态分析符合下列规定:
 - 1) 模态分析所用加速度样本时长不宜小于 10min;
 - 2) 宜采用频域分解法(FDD)、环境激励(NE_xT)和特征系统实现方法(ERA)、随机子空间(SS_I)方法进行模态分析,也可采用其他方法识别模态参数;
 - 3) 采用环境激励(NE_xT)和特征值实现方法(ERA)、随机子空间(SS_I)方法识别的模态参数,应根据识别的阻尼比或者有限元计算分析的振型剔除“虚假”模态;

- 4) 模态分析应考虑温度对自振频率的影响、风速对阻尼比的影响、振动幅值对自振频率和阻尼比的影响,振型可不考虑上述因素的影响。

8.2.4 结构局部响应监测数据分析符合下列规定:

- 结构局部响应监测数据包括应变、裂缝、冲刷、腐蚀、索力、支座反力等;
- 应变花等三向应变应转化为主应力方向应变后再按 8.2.4c) 的规定进行分析;
- 应变时程数据分析,包括平均值、最大值、最小值、应力幅最大值等;钢箱梁等钢结构宜根据雨流计数法和 Miner 线性损伤理论计算疲劳损伤指数;
- 索力时程数据分析,包括平均值、最大值、最小值等;应对监测索力与成桥索力、设计容许索力、破断索力进行对比分析;宜根据索的应力幅值计算疲劳损伤指数;
- 支座反力时程数据分析,包括平均值、最大值和最小值、最大变化量等;
- 应对冲刷深度最大值及其变化规律进行分析,并宜预测其发展趋势;
- 应对腐蚀深度最大值以及腐蚀进程进行分析;
- 应对裂缝长度、宽度、深度的最大值进行数据分析。

8.2.5 桥梁因遭受洪水、流冰、漂流物和船舶车辆的撞击、滑坡、泥石流、地震、风灾、海啸、火灾、化学剂腐蚀和特殊车辆过桥等突发事件后进行专项评估时,应对事件发生前后数据进行对比分析。

8.2.6 数据分析报告应包括桥梁及安全监测系统的基本信息、分析项目、分析方法和分析结果等。

8.3 安全预警

8.3.1 安全预警应设黄色和红色两级。

- 黄色预警:提醒桥梁管养单位应对环境、荷载、结构整体或局部响应加强关注,并进行跟踪观察;
- 红色预警:警示桥梁管养单位应对环境、荷载与结构响应连续密切关注,查明报警原因,采取适当检查、应急管理措施以确保桥梁结构安全运营,并及时进行结构安全评估。

8.3.2 实时预警的各类监测变量预警值设定宜符合下列规定:

- 当车辆总重或轴重大于 1.5 倍设计车辆荷载时,进行黄色预警;大于 2.0 倍设计车辆荷载时,进行红色预警;
- 当最大平均风速大于 0.8 倍设计风速时,进行黄色预警;大于设计风速时,进行红色预警;
- 当最高温度、最低温度、最大温差和最大温度梯度大于设计值时,进行黄色预警;
- 当水平地震动加速度峰值大于设计 E1 地震作用加速度峰值时,进行黄色预警;大于设计 E2 地震作用加速度峰值时,进行红色预警;
- 当索结构应力大于 0.95 倍设计值时,进行黄色预警;大于设计值或一个月内发现 10 次以上黄色预警时,进行红色预警;
- 当位移或变形大于 0.8 倍设计值时,进行黄色预警;大于设计值或一个月内发现 10 次以上黄色预警时,进行红色预警;
- 当桥墩冲刷深度大于 0.7 倍设计冲刷深度时,进行黄色预警;大于设计冲刷深度时,进行红色预警;
- 当监测点处钢筋发生腐蚀时,进行红色预警。

8.3.3 安全预警内容应包括:预警级别、报警传感器编号和位置、报警监测值和预警值。

8.4 安全一级评估

8.4.1 根据数据分析结果定期开展桥梁结构局部或整体安全一级评估。

8.4.2 利用应变对关键构件进行安全一级评估符合下列规定:

- 根据应变计算应力时应考虑温度对应变的影响,对钢筋混凝土桥梁还应考虑收缩、徐变对应

变的影响；

- b) 当应力未超过设计值时,监测点处构件应力状态正常;当应力超过设计值时,监测点处构件应力状态异常。

8.4.3 利用应变传感器进行钢结构疲劳安全一级评估符合下列规定:

- a) 对只承受压力的构件不宜进行疲劳状态评估;
 b) 宜采用容许应力法或疲劳损伤指数法进行监测点处构件疲劳状态评估;
 c) 采用容许应力法进行疲劳状态评估时,当应力最大值小于规范规定的构件疲劳容许应力时,监测点处构件疲劳状态正常;否则,监测点处构件疲劳状态异常,宜按 d) 的规定进行桥梁疲劳状态评估;
 d) 应力时程宜采用雨流法和 Miner 准则计算监测点处构件疲劳累计损伤指数 D ,采用表 2 的规定进行疲劳状态评估。

表 2 疲劳状态分级

D 值	构件测点状态	D 值	构件测点状态
0 ~ 0.05	完好状态	0.45 ~ 0.80	严重损伤状态
0.05 ~ 0.20	较好状态	> 0.80	危险状态
0.20 ~ 0.45	中等损伤状态		

注:表中给出的疲劳状态分级未考虑腐蚀对疲劳寿命的影响,当发生腐蚀时应考虑腐蚀对钢构件疲劳寿命的不利影响。

8.4.4 缆索承重桥梁结构安全一级评估符合下列规定:

- a) 当拉索、吊索、吊杆、系杆应力小于设计值时,可判定索体结构处于正常状态;否则,判定索体结构状态异常;
 b) 当拉索、吊索、吊杆、系杆应力大于规范容许疲劳应力时,可判定索体结构疲劳状态异常,应按 8.4.3 的规定进行疲劳状态评估。

8.4.5 利用运营荷载结构校验系数进行安全一级评估符合下列规定:

- a) 应在自然流车辆荷载作用下,获取位移影响线最不利位置加载时刻结构响应值与该时刻车辆荷载作用下结构响应计算值的比值;
 b) 在特定时刻桥上有重车通行,单辆车总重不宜低于 30t;
 c) 运营荷载结构校验系数小于 1 时,判定结构处于正常状态;否则,判定结构状态异常。

8.4.6 针对未监测构件,宜按照下列规定利用桥梁整体内力状态进行安全一级评估:

- a) 应基于桥梁构件实际物理特性参数、几何特性参数以及结构边界条件建立有限元模型;
 b) 利用监测的环境、车辆荷载及结构响应,计算结构整体内力和线形,与设计值进行对比;
 c) 结构整体内力和线形满足桥梁设计规范要求,判定结构处于正常状态;否则,判定结构状态异常。

8.4.7 利用结构动力特性进行安全一级评估符合下列规定:

- a) 应基于监测的加速度,采用模态分析获取结构动力特性;
 b) 获取的结构动力特性宜与设计值进行对比;
 c) 监测获取的桥梁结构自振频率与设计理论计算频率的比值大于或等于 1,判定结构处于正常状态;否则,判定结构状态异常。

8.4.8 安全一级评估有下列情况,应进行专项检查:

- a) 结构局部响应异常；
- b) 钢结构内相对湿度大于 60% 的累计天数大于 365d；
- c) 构件监测点处钢筋发生腐蚀,判定监测点处腐蚀状态异常；
- d) 桥墩冲刷深度大于 70% 设计冲刷深度,判定桥墩冲刷状态异常；
- e) 关键构件拉、压应力大于设计值,判定监测点处构件应力状态异常；
- f) 关键构件疲劳状态超过中等损伤,判定监测点处构件疲劳状态异常；
- g) 拉索、吊索、吊杆和系杆应力大于或等于设计值,判定索体结构状态异常。

8.4.9 安全一级评估中有下列情况,应进行安全二级评估:

- a) 结构整体响应异常:
 - 1) 变形大于或等于设计值；
 - 2) 顺桥向梁端位移达到伸缩缝设计值的 80% 或者梁端位移最大值达到设计值；
 - 3) 锚碇、基础出现严重沉降或位移,达到或超出设计值；
 - 4) 结构频率明显降低。
- b) 结构局部响应异常,专项检查发现桥梁损伤；
- c) 车辆荷载水平超过设计值；
- d) 最高温度、最低温度、最大温差和最大温度梯度超过设计值；
- e) 运营荷载结构校验系数大于 1。

8.4.10 安全一级评估报告应包括桥梁及安全监测系统基本信息、评估项目、一级评估判定状态异常的界限值、评估结果以及报告异常状态的监测仪器编号、位置、数量和建议等。

8.5 安全二级评估

8.5.1 安全二级评估应基于数据分析、安全一级评估和专项检查结果进行结构损伤识别与模型修正,然后基于修正有限元模型进行结构重分析和极限承载力分析,再按 8.5.6 的规定确定结构安全状态等级。

8.5.2 桥梁结构构件或局部损伤分析和单元模型修正符合下列规定:

- a) 对发现异常状态的构件进行损伤分析,根据损伤分析结果修正相应构件或单元弹性刚度矩阵；
- b) 按 8.5.4 的规定进行极限承载力分析和安全评估时,应修正构件或单元弹塑性恢复力模型；
- c) 当桥梁结构构件或局部损伤还直接降低材料强度或构件承载力时,应修正材料容许应力或构件允许承载力。

8.5.3 基于结构动力响应的损伤识别和模型修正符合下列规定:

- a) 可根据模态参数进行损伤识别,也可采用其他可靠的损伤识别方法；
- b) 损伤识别宜融合构件或局部损伤分析、多种识别方法和专项检查的结果、多传感器信息以及对比分析结构整体响应和监测点处构件或部位的损伤状态进行综合判断；
- c) 模型修正宜采用有限元模型,也可采用其他等效模型进行参数修正；
- d) 可根据桥梁构件的监测数据、安全一级评估和专项检查结果,以及按 8.5.2、8.5.3a) 和 b) 规定得到的损伤分析或识别结果,直接修正相应结构构件有限元模型；
- e) 根据模态参数进行模型修正,宜采用有限元模型与实测自振频率之差的平方和、有限元模型振型与实测振型的模态置信因子 (MAC) 值,或者两者的组合值来确定模型修正的优化目标函数,也可采用其他与结构自振频率和振型相关的结构振动参数作为模型修正的目标函数。振型的 MAC 值计算方法如下:

$$MAC_n(\phi_w, \phi_{pr}) = \frac{(\phi_w^T \phi_{pr})^2}{(\phi_w^T \phi_w)(\phi_{pr}^T \phi_{pr})} \quad (r = 1, 2, \dots, n)$$

式中： r ——模态阶数；

ϕ_w ——成桥试验测试的桥梁初始状态的第 r 阶模态；

ϕ_{pr} ——当前识别的桥梁第 r 阶模态；

n ——可测量的模态总数；

T ——向量转置。

f) 可采用桥梁挠度、变形或者主梁应变作为模型修正的优化目标函数；

g) 在模型修正优化求解前，宜对所采用的模型进行参数灵敏度分析，选取对目标函数敏感的结构参数作为修正参数，宜根据参数物理意义设置参数变化范围。

8.5.4 桥梁结构重分析及安全二级评估符合下列规定：

a) 应采用按 8.5.2 和 8.5.3 规定修正的有限元模型；

b) 宜采用按 8.2.2 规定的荷载和环境数据分析结果，与规范设计荷载比较，选取较大值作为结构重分析的输入荷载，未监测荷载选用规范设计值；荷载工况宜按照规范要求选择最不利荷载组合；

c) 宜按 8.5.4b) 规定的最不利荷载组合作用于按 8.5.4a) 规定的修正有限元模型，计算桥梁结构荷载效应，与结构设计荷载效应对比，统计不满足设计指标的构件或部位的数量；

d) 结构重分析的评估分级标准符合 8.5.6 的规定。

8.5.5 桥梁结构极限承载力分析及安全评估符合下列规定：

a) 应采用按 8.5.2 和 8.5.3 规定修正的有限元模型，宜按照荷载试验的荷载工况对修正有限元模型进行加载，并以 10% 的增量逐步提高车辆荷载水平，全过程分析桥梁结构破坏极限承载能力，以结构关键构件出现破坏时极限车辆荷载与荷载试验车辆荷载的比值作为结构车辆荷载的整体安全储备；

b) 斜拉桥、悬索桥和吊杆拱桥还应基于修正的有限元模型按照规范的设计风速进行加载，并以 10% 的增量逐步提高风荷载水平，全过程分析桥梁结构抖振破坏极限承载能力，以结构关键构件出现破坏极限风速与设计风速比值作为结构抗风整体安全储备；

c) 结构极限承载能力分析评估分级标准符合 8.5.6 的规定。

8.5.6 桥梁结构状态评定宜符合表 3 规定，评定结果宜进行专家评审论证。

表 3 桥梁结构安全状态等级划分与评定依据

分类	总体评定	评定依据
1 类	完好状态	结构车辆荷载和抗风的整体安全储备大于 2；在设计荷载和监测荷载作用下，所有构件的内力、变形均小于规范的设计允许值，不影响结构安全、行车舒适性和耐久性
2 类	较好状态	结构车辆荷载和抗风的整体安全储备介于 1.6 ~ 2.0；在设计荷载和监测荷载作用下，关键构件良好，部分次要构件（10% 以内）的内力、变形大于规范设计允许值的 5%，但不影响结构安全、行车舒适性和耐久性
3 类	中等损伤状态	结构主要频率降低；结构车辆荷载和抗风的整体安全储备介于 1.4 ~ 1.6；在设计荷载和监测荷载作用下，部分关键构件（5% 以内）内力大于规范设计允许值的 5%，较多次要构件（10% ~ 20%）内力大于规范设计值的 10%，影响结构的行车舒适性和耐久性，但不影响结构的安全

表 3(续)

分类	总体评定	评定依据
4类	严重损伤状态	结构主要频率明显降低;结构车辆荷载和抗风的整体安全储备介于1.2~1.4;在设计荷载和监测荷载作用下,部分关键构件(10%以内)内力大于规范设计允许值的10%或关键构件疲劳累计损伤指数0.45~0.80,承载能力下降10%以内,影响结构安全性
5类	危险状态	结构主要频率大幅降低或者振型MAC值显著减小;结构车辆荷载或抗风的整体安全储备小于1.2;在设计荷载或监测荷载作用下,关键构件内力大于规范设计允许值的10%,损伤发展扩大,或者关键构件疲劳累计损伤指数大于0.8,出现重大破坏,影响结构的稳定和安全

注:识别的频率、振型和成桥后监测系统首次采集数据得到的相应频率、振型进行比较。

8.5.7 安全二级评估报告应包括桥梁及安全监测系统的基本信息、评估项目、评估方法、评估结果和建议等。

8.6 专项评估

8.6.1 当桥梁遭遇洪水时和洪水后,按下列规定进行专项评估:

- a) 分析洪水期间桥墩冲刷深度变化量及变化速率,当桥梁冲刷深度达到0.7倍设计值且变化速率较快时,建议及时采取桥梁封闭或限行措施,并进行专项检查;
- b) 应按8.2.3和8.2.4的规定分析在洪水期间桥梁结构整体和局部响应,并按8.4的规定进行安全一级评估;
- c) 当满足8.4.9规定时,应进行安全二级评估,宜按8.5.6和8.5.7的规定对桥梁结构状态进行评定。

8.6.2 当桥梁遭受漂流物或船舶撞击后,按下列规定进行专项评估:

- a) 分析靠近漂流物或船舶处桥墩底部、主梁、桥塔顶部船舶撞击后20s内的加速度响应绝对最大值、均方根值和频谱及加速度响应衰减规律;
- b) 分析漂流物或船舶撞击后20s内结构变形和位移等整体响应监测数据的绝对最大值、均方根值和频谱,分析支座反力、支座位移、应变和索力等结构局部响应监测数据的绝对最大值和均方根值,宜按8.4的规定进行安全一级评估;
- c) 按8.2.3f)的规定,选择漂流物或船舶撞击前后加速度监测数据进行模态分析,当模态参数发生明显变化时,宜按8.5.6的规定对桥梁结构状态进行评定;
- d) 当满足8.4.9规定时,应进行二级安全评估;漂流物或船舶撞击后应按8.5.2的规定修正桥梁有限元模型;按8.5.4和8.5.5的规定,利用修正桥梁有限元模型进行桥梁结构受力重分析和极限承载能力分析;宜按8.5.6和8.5.7的规定对桥梁结构状态进行评定,并进行专项检查。

8.6.3 当平均风速大于设计风速时,应按下列规定进行专项评估:

- a) 以10min为时间间隔,计算统计平均风速、风向、风攻角、湍流强度和脉动风速谱等风参数及其随时间的变化趋势;
- b) 以10min为时间间隔,计算分析在强风作用下桥梁主梁加速度幅值和均方根值:
 - 1) 当实测平均风速处于主梁涡振锁定区,且主梁振动加速度均方根值超过行车舒适度限值时,可判定桥梁发生涡激振动,应按8.5的规定进行安全二级评估;
 - 2) 当实测平均风速大于桥梁颤振临界风速,且桥梁主梁振动幅值随时间不断增大时,可判定桥梁发生颤振,应按8.5的规定进行安全二级评估。
- c) 以10min为时间间隔,计算分析在强风作用下桥梁主梁水平变形、塔顶偏位、索力等的最大值、

最小值和变化幅值及其随时间的变化趋势,并按 8.4 的规定进行安全一级评估;

- d) 按 8.2.3f) 的规定,选择强风作用前后桥梁加速度的监测数据,以 10min 为时间间隔,计算桥梁的模态参数及其变化规律,分析桥梁模态参数与风参数之间的相关性;当桥梁模态参数在强风作用前后发生明显变化时,应对桥梁进行专项检查,确定桥梁模态参数变化原因,宜按 8.5.6 和 8.5.7 的规定对桥梁结构状态进行评估;
 - e) 计算桥梁主梁位移和加速度、索力和关键构件应变等数据与风参数(包括平均风速、风向、风攻角、湍流强度等)之间的相关性,分析风荷载作用下桥梁结构响应随风参数的变化规律。
- 8.6.4 当地震动水平加速度峰值大于设计 E1 地震作用加速度峰值时,按下列规定进行专项评估:
- a) 地震动数据分析按 8.2.2c) 的规定进行,宜采用不同位置的三向地震动加速度数据分析地震动的行波效应特征;
 - b) 宜分析地震过程中桥梁加速度、变形、位移等整体响应数据的绝对最大值、均方根值和频谱,宜分析支座反力、支座位移、应变和索力等结构局部响应数据的绝对最大值和均方根值,并按 8.4 的规定进行安全一级评估;
 - c) 按 8.2.3f) 的规定,选择地震作用前后监测的加速度数据,分析桥梁结构模态参数,当模态参数发生明显变化时,宜按 8.5.6 和 8.5.7 的规定对桥梁结构状态进行评定;
 - d) 应将实测的地震动加速度时程输入修正有限元模型(跨径或总长大于 500m 的桥梁宜考虑地震动行波效应)进行结构动力分析,宜按 8.5.6 和 8.5.7 的规定对桥梁结构状态进行评定。
- 8.6.5 应根据流冰、车辆撞击、滑坡、泥石流、海啸、火灾、化学剂腐蚀和特殊车辆过桥等突发事件的具体情况分专业分项目进行专项评估。
- 8.6.6 专项评估桥梁异常应进行突发事件后桥梁专项检查。
- 8.6.7 专项评估报告应包括突发事件发生概况、桥梁和安全监测系统基本信息、评估项目、评估方法、评估结果和建议等内容。

9 系统集成及用户界面交互

9.1 一般规定

- 9.1.1 系统集成应根据监测系统整体要求,确保各个子系统和模块的兼容性、数据传输可靠性、系统整体稳定性、环境适应性、可扩展性与技术先进性。
- 9.1.2 系统集成应基于统一软件工具平台开发,硬件集成应考虑匹配性,并兼顾系统定期扩容的便捷性。
- 9.1.3 系统集成应采用网络技术,宜考虑有线网络和无线网络相结合,根据监测要求设计网络拓扑结构,宜采用 TCP/IP 参考模型。
- 9.1.4 用户界面交互应包括桥梁基本信息、系统信息、监测数据、数据采集和传输、数据处理和管理、安全预警及评估等静态和动态信息,用户界面应开放兼容、美观友好、操作便利。

9.2 系统集成

- 9.2.1 系统集成应采用模块化、单元化、标准化设计,确保软硬件模块无缝连接。
- 9.2.2 系统集成应考虑网络通信、环境适应性、防雷的要求,并考虑数据采集接口、通信接口和规约、供电接口等兼容性和匹配性,考虑以最优分配和可靠度最大为约束条件的可靠性和稳定性。
- 9.2.3 系统防雷应在桥梁整体防雷工程下进行,考虑强电防雷、弱电防雷和接地。
- 9.2.4 网络通信设备选型应考虑网络带宽和吞吐率、品牌和性价比、可扩展性、可靠性和稳定性等。
- 9.2.5 网络服务器可采用 X86 构架服务器,宜采用工作组服务器或部门级服务器。
- 9.2.6 综合布线应符合 EIA/TIA - 568 和 BS EN 50173 的要求。

9.3 用户界面交互

9.3.1 用户界面交互软件模块宜根据监测要求综合考虑选择 Client/Server 模式、主机/终端模式以及 Browser/Server 模式。

9.3.2 用户界面交互软件模块应与各数据库无缝衔接,保证数据交换高效。

9.3.3 监测数据和实时预警信息应实时在线显示,并可将预警信息传送给桥梁管养指定机构。

9.3.4 传感器、数据采集和传输、数据处理和管理的设备信息应实时在线显示,并可对各模块功能参数进行在线设置和修改。

9.3.5 用户界面交互应设计有进入数据分析模块的通道,并有链接、存储、调用或显示各类评估结果、报告的接口。

9.3.6 用户界面交互考虑应采用加密、分级授权等网络安全措施,可通过互联网远程安全登录、查阅系统监测数据、报告。

