

山东省工程建设标准

桥梁智慧健康监测技术标准

DB37/T 5245—2022

前 言

根据山东省住房和城乡建设厅、山东省市场监督管理局《关于印发2021年山东省工程建设标准制修订计划的通知》（鲁建标字〔2021〕19号）的要求，编制组经过深入调查和试验研究，依据国家相关标准，结合山东省具体情况，编制本标准。

本标准主要技术内容包括：1.总则；2.术语；3.基本规定；4.系统设计；5.监测内容与方法；6.硬件安装实施；7.软件开发实施；8.系统调试；9.系统验收；10.系统管理与维护；11.数据分析与应用。

本标准由山东省住房和城乡建设厅负责管理，由山东省建筑科学研究院有限公司负责具体技术内容解释。在执行过程中如有意见和建议，请反馈至山东省建筑科学研究院有限公司（地址：济南市天桥区无影山路29号，邮政编码：250031，E-mail: luqiaosuo@126.com）。

主 编 单 位：山东省建筑科学研究院有限公司
青岛市市政公用工程建设发展中心

参 编 单 位：济南市道路和桥隧服务中心
山东高速工程检测有限公司
山东省交通规划设计院集团有限公司
青岛市政空间开发集团有限责任公司
铁正检测科技有限公司
海纳云物联科技有限公司
临沂市市政管理服务中心
菏泽市市政工程管理处

主要起草人员：刘 治 刘 恒 司 磊 连 峰 刘近龙
李君强 辛公锋 付廷波 孙海波 李 强
王 涛 岳增峰 徐传昶 刘国飞 王亚男
徐怀升 胡现虎 陈 斌 韩卫国 于 振

李成栋	李文平	朋兴亚	栾心国	王 硕
王 恒	张家豪	李逢祥	田海飞	冷丰冬
高 猛	孟祥伟	马凤玲	钟士胜	杨 勇
吴成乾	刘利军	张均霞		
主要审查人员：王有志	任瑞波	孙 杰	王建光	庞吉莲
王显根	钟 军	荣 杰	尚志强	

目 次

1	总 则	1
2	术 语	2
3	基本规定	5
4	系统设计	7
4.1	一般规定	7
4.2	传感器模块	8
4.3	数据采集与传输模块	9
4.4	数据处理与管理模块	11
4.5	视频监控系统	12
5	监测内容与方法	14
5.1	一般规定	14
5.2	作用与环境监测	15
5.3	结构响应监测	18
5.4	结构变化监测	26
5.5	监测方法	28
5.6	数据采集方法	33
6	硬件安装实施	36
6.1	一般规定	36
6.2	传感器安装	36
6.3	桥架安装	41
6.4	线管安装	42
6.5	线缆敷设	42
6.6	防雷与接地	44
6.7	机柜安装	45
7	软件开发实施	47
7.1	一般规定	47

7.2	设计与开发	47
7.3	软件测试	48
7.4	软件部署	49
8	系统调试	50
8.1	一般规定	50
8.2	单项调试	50
8.3	联合调试	51
8.4	系统验证	52
9	系统验收	53
9.1	一般规定	53
9.2	硬件验收	53
9.3	软件验收	54
9.4	资料验收	55
10	系统管理与维护	56
10.1	一般规定	56
10.2	系统运维管理	56
10.3	系统异常处置	57
11	数据分析与应用	59
11.1	一般规定	59
11.2	数据分析	59
11.3	特征数据样本和智能分析	62
11.4	超限阈值与报警	63
11.5	报警响应措施	70
11.6	状态评估	73
附录 A	传感器主要参数指标	77
附录 B	采集设备性能要求	83
	本标准用词说明	85

引用标准名录.....	86
附：条文说明	88

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms	2
3	Basic Requirements	5
4	System Design	7
4.1	General Provisions	7
4.2	Sensor Module	8
4.3	Data Collection and Transmission Module	9
4.4	Data Processing and Management module	11
4.5	Video Surveillance System	12
5	Monitoring Content and Method	14
5.1	General Requirements	14
5.2	Function and Environmental Monitoring	15
5.3	Structural Response Monitoring	18
5.4	Monitoring of Structural Changes	26
5.5	Monitoring Method	28
5.6	Data Acquisition Method	33
6	Hardware Implementation	36
6.1	General Requirements	36
6.2	Sensor Installation	36
6.3	Bridge Frame Installation	41
6.4	Line Pipe Installation	42
6.5	Cable Laying	42
6.6	Lightning Protection and Grounding	44
6.7	Cabinet Installation	45
7	Software Implementation	47

7.1	General Requirements	47
7.2	Design and Development	47
7.3	Software Test	48
7.4	Software Deployment	49
8	System Debug	50
8.1	General Requirements	50
8.2	Single Debugging	50
8.3	Joint Commissioning	51
8.4	System Validation	52
9	System Acceptance	53
9.1	General Requirements	53
9.2	Hardware Acceptance	53
9.3	Software Acceptance	54
9.4	Data Acceptance	55
10	System Management and Maintenance	56
10.1	General Requirements	56
10.2	System Operation and Maintenance Management	56
10.3	Abnormal Disposal of the System	57
11	Data Analysis and Application	59
11.1	General Requirements	59
11.2	Data Analytics	59
11.3	Feature Data Samples and Intelligent Analysis	62
11.4	Over-limit Threshold and Alarm	63
11.5	Alarm Response Measures	70
11.6	State Assessment	73
Appendix A Main Parameters of the Sensor		77
Appendix B Performance Requirements for the Acquisition Equipment		83

Explanation of Wording in This Standard.....	85
List of Quoted Standards	86
Addition: Explanation of Provisions.....	88

1 总 则

1.0.1 为规范山东省城市桥梁智慧健康监测制定本标准。

1.0.2 本标准适用于山东省城市桥梁的健康监测。

1.0.3 城市桥梁健康监测系统设计和构建应遵循“技术先进、稳定可靠、经济实用、智能安全”的原则，且便于维护、升级和扩展。

1.0.4 桥梁的健康监测，除应符合本标准的要求外，尚应符合国家和山东省现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 桥梁智慧健康监测系统 intelligent health monitoring system for bridges

利用布设于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和配套的软件模块，实时获取桥梁服役环境、作用、结构响应与结构变化数据，借助人工智能、大数据技术，实现桥梁结构异常状况自动化报警，以及结构状态和安全智能化评估的系统。

2.0.2 人工智能 artificial intelligence

已工程化（即设计并制造）的系统感知环境的能力，以及获取、处理、应用和表示知识的能力，机器学习方法被长期作为实现人工智能的根本途径。

2.0.3 机器学习 machine learning

通过学习数据以自动建立分析模型的方法，其分支包括集成学习、迁移学习、强化学习、深度学习等，按使用目的可分为分类、聚类、回归、关联分析等方法，按对标签数据的依赖程度可分为有监督学习、半监督学习、无监督学习等方法。

2.0.4 大数据技术 big data technology

用以处理海量多源异构数据的技术，体现在数据采集、存储、处理、分析方法等几个方面。其中，数据存储、处理技术多以云计算、分布式软件或工具等形式呈现；大数据分析法则包括数据库知识发现、数据挖掘、机器学习、模式识别、统计学等各类数据分析算法。

2.0.5 智能化评估 intelligent evaluation

结合人工智能方法、大数据技术及结构计算分析理论，自动、合理、可靠评价桥梁结构安全状态与服役性能的过程。

2.0.6 埋入式传感器 embedded sensor

预埋于结构内部的传感器。

2.0.7 表贴式传感器 surface mounted sensor

附着安装在结构表面的传感器。

2.0.8 多源异构数据 multi-source heterogeneous data

来源于不同设备种类、型号、采集环境的不同结构、不同格式的数据。

2.0.9 时序数据库 time-series database

时序数据库全称为时间序列数据库，时间序列数据库指主要用于处理带时间标签（按照时间的顺序变化，即时间序列化）的数据，带时间标签的数据也称为时间序列数据。

2.0.10 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。

2.0.11 结构变化 structural variation

相对于桥梁结构成桥状态或规定的某一时刻状态，桥梁结构或构件的初始几何形态、表观状态和结构性能发生的相对变化，如不可恢复的变形、沉降、开裂等。

2.0.12 系统运维 system operation and maintenance

系统建成后为保障其持续正常运行所需的管理和维护工作，以及利用系统功能完成桥梁结构报警和评估，为应急响应和管养决策提供技术支持的所有活动的总称。

2.0.13 统计阈值 statistical threshold

基于统计分析得到的阈值，用于触发数据标记功能。

2.0.14 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。

2.0.15 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。

2.0.16 特征数据样本 characteristic data sample

一组包含表征桥梁某时刻运营状态的数据组,该数据组包含作用与环境数据以及与其相对应的结构响应数据。

2.0.17 桥梁健康状况评估 bridge health assessment

分析监测系统所获取的数据,评估桥梁结构健康状态的过程。

2.0.18 结构构件异常状况 abnormal condition of structural member

当前结构构件受力状态和使用功能相较于设计成桥状态或正常使用状态的异常程度。

2.0.19 结构整体健康度 bridge structural health level

相较于成桥状态或设计规定的安全和功能要求,当前桥梁结构整体安全和功能所处的相对水平。

3 基本规定

3.0.1 开展桥梁智慧健康监测的总体要求应符合如下规定：

1 符合下列条件的桥梁，应进行健康监测：

- 1) 主跨跨径大于 100m 的桥梁及特殊结构的桥梁；
- 2) 技术状况等级为 C 级、D 级且需要跟踪观测的在役桥梁；
- 3) 设计文件中明确要求应进行结构监测的桥梁；
- 4) 经过评定需要进行结构监测的桥梁。

2 符合下列条件的桥梁，宜进行健康监测：

1) 城市快速路上的大跨径桥梁或跨越城市轻轨、铁路和重要交通枢纽节点的桥梁；

2) 荷载等级提高或经结构加固的重要桥梁；

3) 采用特殊材料、特殊施工工艺，或具有特殊要求的新建桥梁。

3.0.2 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。

3.0.3 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。

3.0.4 监测系统宜采用先进监测手段、智能化采集和集成设备，鼓励采用北斗卫星导航、5G 移动通信等新技术和新装备。

3.0.5 监测系统宜采用云计算、时序数据库技术、人工智能与大数据等新技术开展桥梁智能化监测与评估。

3.0.6 监测系统建设不得影响结构承载能力和正常使用功能，对桥梁结构防腐等防护工程造成破坏时应及时修复。

3.0.7 建设单位、监理单位应根据项目实施进度，采用随工检查、专家会评审形式组织对系统硬件、软件进行验收。未经验收或验收不合格的系统不得交付使用。

3.0.8 监测系统运行维护与管理内容包括日常检查、定期维护和异常处置。

3.0.9 监测系统应对结构状态异常进行报警，分析监测数据，评估桥梁结构安全性及健康程度。

3.0.10 监测数据分析、超限阈值的设置、健康状况评估应由具备相应资质的机构承担。

4 系统设计

4.1 一般规定

4.1.1 监测系统的设计应安全可靠，包括监测数据的可靠性、分析方法的可靠性和系统软硬件的可靠性。

4.1.2 系统设计应基于桥梁结构计算、分析、风险评估和监测应用需求进行，包括下列内容：

1 系统功能需求分析，包括桥梁结构特性分析、环境和作用特点分析、既有监测系统状况分析、养护需求对策分析等。

2 系统总体方案设计，包括系统各模块的工作流程设计、功能设计及集成设计等。

3 监测方案详细设计，包括以下内容：

1) 监测内容和测点布置方案；

2) 监测方法、设备选型、设备安装及施工方案；

3) 系统数据采集、传输、处理与管理方案；

4) 系统供电、通信、防雷、防护方案；

5) 监测设备及其附属设施的预埋件和预留孔洞方案；

6) 数据分析应用及报警管理方案；

7) 应急响应与决策支持功能设计；

8) 监测系统运营维护方案，包括系统软件和硬件的维护更换、扩容升级。

4 系统与主体结构、供配电、通信、监控中心、沿线附属设施等工程界面的划分与衔接。

5 系统建设及运维的概、预算编制。

4.1.3 监测内容、测点布置和监测方法的设计应满足本标准第 5 章的规定。

4.1.4 系统设计应明确桥梁现场供配电和通信接入点的技术要求。

4.1.5 硬件设备安装设计方案应避免损伤桥梁主体结构。

4.1.6 数据采集设备应与传感器和数据采集与传输软件系统相匹配,满足数据同步采集、实时传输要求。

4.1.7 监测系统的硬件应具备适当的保护措施设计与维修替换设计。

4.1.8 监测系统应进行网络安全等级保护设计,安全保护等级宜满足现行国家标准《信息安全技术 网络安全等级保护定级指南》GB/T 22240规定的安全保护等级第二级要求。

4.2 传感器模块

4.2.1 传感器模块的设计应包括传感器选型及技术要求、传感器布设及安装施工设计。

4.2.2 传感器分为埋入式和表贴式两类,其使用年限要求分别如下:

- 1 埋入式传感器及其预埋安装件的正常使用年限应不低于 20 年。
- 2 表贴式传感器及其安装预埋件的正常使用年限应不低于 5 年。

4.2.3 传感器选型与安装施工设计应符合下列规定:

1 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应;

2 传感器选型应满足监测量程、精度、分辨力、灵敏度、动态响应特性、长期稳定性、耐久性、环境适应性要求;

3 传感器安装施工设计应考虑防雷、防静电、防尘、防水等防护措施;

4 常用传感器的选型与安装应符合本标准第 5、6 章相关内容的要求。

4.2.4 传感器在安装前应进行校准或标定。

4.3 数据采集与传输模块

4.3.1 数据采集与传输模块的设计应包括信号调理方案设计、数据采样方案设计、数据采集设备选型与接口匹配性设计、数据传输网络与路由设计以及配套软件功能设计。

4.3.2 数据采集、集成等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，并与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。

4.3.3 数据采集与传输软件宜前置安装运行在桥梁现场采集端设备中，具备各类传感器信号的自动化采集和实时上传功能。

4.3.4 数据采集与传输软件应具备数据采集频率、采集通道、采集参数的远程自定义设置功能。

4.3.5 数据采集模块的功能设计应满足下列要求：

- 1 数据采集模块应具有连续采集、触发采集及定时采集功能；
- 2 在特殊状态下支持人工干预采集；
- 3 支持数据实时同步采集；
- 4 数据采集软件具有自动缓存和断点续传功能；
- 5 数据采集设备具有自诊断和自动重启功能；
- 6 支持远程配置关键参数。

4.3.6 数据采集设备的功能和性能技术指标应符合下列规定：

1 传感器输出为电荷信号的，应选用电荷放大器进行信号调理后采集；

2 传感器输出为数字信号的，可选用基于 RS485、CAN、Modbus TCP 或 UDP 等分布式数据采集设备，并确定传输距离、传输带宽及速率等技术参数；

3 传感器输出为模拟电信号的，宜采用 4mA~20mA 和 -5V~5V 等标准工业信号，可选用基于 PCR、PXI 等技术的集中式数据采集设备，并进行光电隔离，增强抗干扰能力；

4 传感器输出为光信号的，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；

5 电阻应变传感器信号应选用惠斯通电桥调理仪进行信号调理放大；

6 振弦式传感器信号应选用专用振弦式采集仪采集；

7 数据采集设备的模数转换（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；

8 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；

9 动态信号应采用抗混叠滤波器进行滤波和降噪。

4.3.7 桥梁现场数据采集硬件设备组网方式宜采取以下方案：

1 监测测点间距离较远且分散时，选用分布式网络拓扑方案，或分布式与集中式相结合的网络拓扑方案；

2 监测测点距离较近且相对集中时，选用星型、总线型等集中式网络拓扑方案。

4.3.8 多个数采设备可集中布置在数据采集站中，数据采集站的安装位置应根据传感器信号的传输距离要求、现场安装条件、供电、网络设施接入等因素综合确定。

4.3.9 同一桥梁监测系统的环境、作用及结构响应数据应同步采集，动态监测变量的数据采集时间同步精度小于 0.1ms，静态监测变量的数据采集时间同步精度小于 1ms。

4.3.10 传感器与数采设备间通讯线路宜采用抗干扰措施，包括串模干扰抑制、共模干扰抑制、以及接地和屏蔽技术，以提高信噪比。

4.3.11 数据传输路由与布线方案应根据桥梁现场环境、传感器与数据采集站布置方案、信号传输距离上限等条件进行综合设计，宜利用桥梁主体结构工程及机电工程的预留孔洞、桥架及管道布设线缆，并远离强

电等干扰源。

4.3.12 数据传输应根据数据传输距离、现场地形条件、网络覆盖状况、已有的通信设施等因素选取有线传输方式或无线传输方式。

4.3.13 由传感器至数据采集站再至集中传输点设备（智能网关或带网关功能的工控机）的局域网络数据传输，可采用有线传输方式、无线传输方式或两者相结合的方式。

4.3.14 数据传输软件的设计开发应符合下列规定：

- 1 应保障数据传输的一致性、完整性、可靠性、安全性和保密要求；
- 2 宜考虑异构系统之间的数据兼容性及其后期升级扩展的要求；
- 3 宜以数据包为单位进行传输，并实现对数据包进行压缩和解压复原功能；
- 4 宜具备数据缓存备份和断点续传能力；
- 5 宜基于 TCP/IP 协议进行数据传输，并符合协议标准 IEEE802.3 的规定。

4.4 数据处理与管理模块

4.4.1 数据处理与管理模块的设计应包括功能设计、性能设计、架构设计和安全性设计。

4.4.2 数据处理与管理软件应能接收并解析桥梁现场采集的各类监测数据，并具备数据预处理、二次处理、特征值提取以及数据持久化储存功能。

4.4.3 应根据监测类别设置对应的数据处理方法，并应对数据进行滤波、特征提取、转换与统计等处理。

4.4.4 多源异构数据的处理宜采用数据融合技术对环境与作用数据、结构响应数据进行整合。

4.4.5 监测系统数据存储宜分为桥梁现场采集站储存、监控中心机房储

存和云服务器存储。

4.4.6 监测系统数据管理应采用数据库技术实现存储调度、存储监控及存储管理可视化功能。

4.4.7 数据库宜采用模块化架构设计,按照功能和业务类型对桥梁结构信息、监测系统信息和监测数据进行分类存储和管理。

4.4.8 监测系统所有实时监测的原始数据应采用实时数据库进行存储和管理。

4.4.9 监控中心机房实时监测数据存储时间宜大于 5 年,经过后处理得到的特征数据、超限报警、评估结果等结构化数据存储时间宜大于 20 年。

4.4.10 视频数据存储宜采用循环更新存储方式,普通视频存储不宜小于 3 个月,突发事件视频应进行转移备份存储并永久保存。

4.4.11 监测系统应明确安全保护等级,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。

4.4.12 监测系统应采用防火墙技术实现核心应用与互联网之间的安全阻断与隔离。

4.4.13 监测中心应建立网络防火墙,并制定安全策略对未经授权的访问和数据传递进行筛选和过滤,对内部网络节点进行屏蔽和隐藏,在内外网络边界上为监测系统数据安全提供防御保障。监测系统的存储备份、数据处理、预警评估等中枢功能模块均应部署在网络防火墙内。

4.4.14 采用云服务技术的监测系统应符合现行国家标准《信息安全技术 云计算服务安全指南》GB/T 31167、《信息安全技术 云计算服务安全能力要求》GB/T 31168 的相关规定。

4.5 视频监控系统

4.5.1 桥梁结构监测系统宜与视频监控系统相结合,视频监控系统宜采用技术成熟的软件平台。

4.5.2 视频监控系统应对所监测桥梁的交通通行情况进行监测,宜对重要易损部位和区域、关键设施、桥下航道和铁路等进行有效的视频探测与监视。

4.5.3 前端设备的最大视频探测范围应满足现场监视覆盖范围的要求,应具有常规的变倍、旋转等控制功能。

4.5.4 视频监视或回放的图像应清晰、稳定,显示方式应满足安全管理要求。显示画面上应有图像编号、地址、日期、时间等。文字显示应采用简体中文。

4.5.5 监控系统宜采用分布式存储部署 NVR+监控硬盘,保证网络因意外情况断开情况下,实现不间断录像,录像时长应大于 30d。

4.5.6 摄像机选型与设置应充分满足监视目标的环境照度、安装条件、传输、控制和安全管理需求等因素的要求,并符合以下规定:

1 摄像机应有稳定牢固的支架,摄像机应设置在监视目标区域附近不易受外界损伤的位置;

2 在监视目标的环境中可见光照明不足或摄像机隐蔽安装监视时,宜选用红外灯作光源;

3 摄像机的工作温度、湿度应适应现场气候条件的变化,必要时可采用适应环境条件的防护罩。

5 监测内容与方法

5.1 一般规定

5.1.1 监测内容应根据桥梁运行环境、受力状态分析、耐久性分析、状态评估需求、风险评估结果及养护管理要求等因素综合确定。

5.1.2 技术状况等级为 C 级、D 级的桥梁还应根据桥梁结构、部件、构件的技术状况、既有病害、损伤程度、状态评估需求等因素确定监测内容。

5.1.3 监测内容应包括环境、作用、结构响应和结构变化。

5.1.4 监测测点布置应能准确获取桥梁环境、作用、结构响应、结构变化等信息，并兼顾“代表性、经济性、可更换性”的原则。测点布置位置应满足以下要求：

- 1 能够较全面地、精确地获取结构参数的信息；
- 2 振动测点测得的模态信息与有限元分析结果保持吻合；
- 3 应对结构参数的变化较为敏感；
- 4 宜布置在结构响应最不利位置或已损伤位置；
- 5 对性能退化、损伤劣化严重的结构构件，应增加测点数量；
- 6 宜布置在方便传感器安装和更换的位置；
- 7 布置的位置宜减少信号的传输距离。

5.1.5 监测测点应明确传感器的类型、数量、安装位置和角度，宜可更换，对不可更换的测点宜做冗余布设。

5.1.6 监测方法应综合桥梁使用环境、监测内容和测点布设、数据分析与应用的要求选择确定，包括感知方式、数据采集方式、数据传输方式和数据存储方式。

5.1.7 对采用创新性、突破性和首次使用新型科研成果的监测技术时，监测测点宜做冗余布设。

5.2 作用与环境监测

5.2.1 车辆荷载监测应包括断面车流量、车型、车轴重、轴数、车辆总重、车速等。测点布设应符合下列规定：

- 1 测点应布设在桥头路基或有稳定墩柱支撑的结构铺装层内；
- 2 宜结合视频监控系统获取桥跨范围内所有车道的车辆空间分布。

5.2.2 结构温度监测测点应根据桥梁结构类型、温度场分布特点、构件尺寸、铺装类型、日照情况等条件综合确定。测点布设应符合下列规定：

- 1 结构温度测点应布置在温度梯度变化较大位置，宜对称、均匀，应反映结构竖向及水平向温度场变化规律；
- 2 宜在主梁铺装层内布置温度监测测点；
- 3 结构温度测点布置宜与应变监测的温度补偿测点协同设计。

5.2.3 对风荷载敏感桥梁应进行风速风向和风压监测，测点布设应符合下列规定：

- 1 风速和风向测点宜选择在桥面两侧、塔顶或拱顶等高处，其安装位置应与其他设施保持足够距离以监测自由场风速和风向。

- 2 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；

- 3 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，跨度大于或等于 800m 斜拉桥宜结合风场空间相关性适当增加测点数量；

- 4 跨度小于 1500m 悬索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，跨度大于或等于 1500m 悬索桥，宜结合风场空间相关性在 1/4、3/4 主跨增加风速风向监测测点，可在 1/4、3/4 主跨断面增加风压监测测点；

- 5 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。

5.2.4 船舶撞击监测测点的布设，宜符合下列规定：

1 航道等级为 I 级至 V 级或存在船舶碰撞风险的桥梁宜进行船舶撞击监测，监测测点宜布设在水位变动区的桥墩底部或承台顶部；

2 宜结合具有区域入侵自动识别功能的视频（或红外线）监控系统进行船舶撞击预警；

3 宜采用振动传感器监测撞击过程中的结构振动响应，且同时监测水平面内纵桥向和横桥向结构振动响应。

5.2.5 地震动监测测点的布设，符合下列规定：

1 抗震设防类别为 A 类且抗震设防烈度Ⅶ度及以上的桥梁应进行地震动监测；

2 监测测点宜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，水体区域可布置于索塔和桥墩底部或承台顶部；

3 长度小于 800m 的桥梁应布设一个测点，长度大于或等于 800m 的桥梁，宜增加监测测点。

5.2.6 桥址环境温度和湿度的监测测点宜布设在桥梁跨中位置，可根据桥梁规模、结构类型增设测点数量。

5.2.7 桥梁构件封闭空间的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。

5.2.8 处于地质灾害高发区的桥梁，宜根据具体灾害风险评估结果，选择性的对桥址周边的地表沉降、山体位移和倾斜度、地裂缝、深部位移、降雨量、地下水位等进行监测。

5.2.9 对无有效设施抑制拉索风雨振的斜拉桥，可进行降雨量监测，测点宜布设在桥面开阔部位，宜与风速仪布设在同一位置。

5.2.10 桥面结冰监测测点宜与车辆荷载视频监控测点协同布置。

5.2.11 作用与环境监测内容应根据运营环境、结构特点、监测应用目标、特定需求按表 5.2.11 选择。

表 5.2.11 常见作用与环境监测内容选取汇总表

监测类别		监测内容	梁式桥		拱桥		斜拉桥	悬索桥
			简支梁	连续梁/连续刚构	上承式	中下承式		
环境	温度、湿度	桥址环境温度、湿度	●	●	●	●	●	●
		主梁内温度、湿度	●	●	●	●	●	●
		主缆内温度、湿度	—	—	—	—	—	●
		锚室内温度、湿度	—	—	—	—	—	●
		鞍罩内温度、湿度	—	—	—	—	—	●
		索塔内温度、湿度	—	—	—	—	●	●
		主拱内温度、湿度	—	—	●	●	—	—
	结冰	桥面结冰	○	○	○	○	○	○
	雨量	降雨量	—	—	—	—	○	—
作用	车辆荷载	断面车流量、车轴重、轴数、车辆总重、车速	○	●	●	●	●	●
		车辆空间分布视频图像	○	○	○	○	○	○
		超限时刻抓拍	●	●	●	●	●	●
	风荷载	风速、风向	○	○	○	●	●	●
		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	●	●	●	●	●	●
	地震动	桥岸地表场地加速度	○	○	○	○	○	○
		承台顶或桥墩底部加速度（抗震设防类别为 A 级且抗震设防烈度为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）	○	○	○	○	○	○

注：1 “●”表示应监测项；“●”表示宜监测项；“○”表示可选监测项，“—”表示不包含项。

2 主梁内温度、湿度监测项仅适用于封闭箱梁；主拱内温度、湿度监测项仅适用于箱型拱。

5.3 结构响应监测

5.3.1 结构振动测点应根据桥梁结构动力计算结果、振型特点及所需振型阶数综合确定，并符合下列规定：

1 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；竖向和横向振动测点宜布设在主跨跨中和 $1/4$ 、 $3/4$ 主跨；桥面较宽桥梁的竖向振动测点宜上下游对称布置；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；

2 塔顶纵向和横向振动监测测点应在塔顶布设，桥墩纵向和横向振动监测测点应在桥墩顶部布设；

3 对振动幅值大的索构件（悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索或拱桥吊杆等）可布设振动监测测点，测点应根据索构件振动振型确定，避开振动节点；

4 拱肋振动监测测点应根据拱肋振动振型确定，避开振型节点；

5 宜以模型修正和结构损伤识别为目标优化测点布设方案。

5.3.2 结构位移监测测点布设，符合下列规定：

1 结构整体变形和位移测点的布设应根据结构受力分析结果，选择最不利荷载组合作用下关键构件变形、位移最大或较大位置；对车辆荷载引起结构位移敏感的部位宜布设动态位移测点；

2 主梁竖向静态和动态位移监测测点应在主跨跨中、边跨跨中处布设，对于主跨跨径大于等于 100 米桥梁，宜在主跨增设 $1/4$ 、 $3/4$ 主跨测点；

3 对于宽幅桥面、中央索面或其他具有扭转监测需求的主梁，应在同一断面左右两侧布设静态和动态位移监测测点；

4 主梁横向位移监测测点应在主跨跨中布设；

5 支座位移、主梁梁端纵向位移测点宜布设在墩顶梁端支座，应根据支座的功能和类型选择测量方向；

6 塔顶偏位和拱顶位移监测测点应布设于索塔和拱肋顶部；

7 主缆偏位监测测点宜在主跨跨中和 $1/4$ 、 $3/4$ 主跨;

8 桥墩的纵向和横向位移测点宜布设在桥墩顶部;

9 受地灾或洪水威胁的桥跨, 宜同时监测上下部结构位移或其相对位移。

5.3.3 塔顶转角监测测点宜布设在索塔塔顶位置, 主梁水平和竖向转角监测测点宜布设在梁端位置。

5.3.4 应变、应力监测测点布置, 符合下列规定:

1 应变监测测点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;

2 宜对永久作用下应力水平较高且安全余度较低的关键构件、截面和部位进行静态应变监测; 宜对可变荷载作用下应力幅较大且安全余度较低的关键构件、截面和部位进行动态应变监测。

3 宜对混凝土桥梁主要承重构件关键截面的钢筋应力进行监测, 新建或改造中的桥梁应预先安装在关键截面的被测钢筋上;

4 正交异性钢桥面板动态应变监测测点, 应选择在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处;

5 受力复杂的构件截面和部位, 宜布设双向或三向静态和动态应变监测测点;

6 钢混结合段宜布设应变监测测点, 宜布设在应力较大和应力集中处。

5.3.5 索力监测测点布置, 符合下列规定:

1 宜对结构体系中主要承重缆索(如: 主缆、斜拉索、吊杆和柔性系杆、体外预应力钢束)的内力进行监测;

2 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设形式、规格型号、长度、索力和应力, 确定监测的索构件, 宜上、下游对称布设;

3 应根据悬索桥主缆锚固方案、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；

4 仅对部分缆索进行内力监测时，宜优先选择恒载作用下应力水平高或活载作用下应力幅较大的代表性拉索（钢束）布设测点。

5 可采用振动频率法、磁通量测试法、锚垫板承压法及其他不影响结构安全的方法监测拉索内力。

5.3.6 支座反力监测测点布设，符合下列规定：

1 宜对可能发生横向失稳等倾覆性破坏的独柱桥梁、弯桥、斜桥、基础易发生沉降或采用压重设计的桥梁进行支反力监测；

2 支座反力监测测点宜根据支座类型、构造、安装方式确定，可选用测力支座，测力支座在使用前，应重新设置零点，并在支座上加标准重物，修正支座参数；

3 支座反力测点宜与支座位移测点协同布设，应能判定支座脱空情况。

5.3.7 简支梁桥结构响应监测内容和测点布设应根据结构特点、监测应用目标、特定需求按表 5.3.7 选择。

表 5.3.7 简支梁桥结构响应监测内容和测点布设

监测类别		监测内容		监测优先级	测点布设	
					主要测点	附加测点
结构响应	振动	主梁振动加速度	竖向	*	跨中截面	1/4、3/4 截面
			横向	●	跨中截面	1/4、3/4 截面
			纵向	—	—	—
		桥墩顶部纵横向振动加速度		●	墩顶位置	—
	位移	主梁竖向位移	静态挠度	*	跨中截面	1/4、3/4 截面
			动态挠度	*	跨中截面	1/4、3/4 截面
		支座位移		●	梁端支座	—
		梁端纵向位移		●	伸缩缝处梁端截面	—
		高墩墩顶位移		●	墩顶位置	—

续表 5.3.7

监测类别		监测内容		监测优先级	测点布设	
					主要测点	附加测点
结构响应	位移	桥台倾斜		●	桥台顶	—
	应变	静态应变		*	跨中截面	1/4、3/4 截面
		动态应变	混凝土结构	●	跨中截面	1/4、3/4 截面
			钢结构	*	跨中截面	1/4、3/4 截面
	钢筋应力	静态应力		○	跨中截面	1/4、3/4 截面
		动态应力		○	跨中截面	1/4、3/4 截面
	支座反力	支座反力		○	弯桥、斜桥、易倾覆的独柱墩、基础沉降的墩台	—

注：1 “*”表示应监测项；“●”表示宜监测项；“○”表示可选监测项，“—”表示不包含项。

2 “主要测点”为优先布设的测点，“附加测点”为条件允许时可布设的测点。

3 当被测桥梁由相同结构类型的多孔跨组成时，可选择技术状况较差或运营条件恶劣的代表性桥跨实施监测。

5.3.8 连续梁、连续刚构桥结构响应监测内容和测点布设应根据结构特点、监测应用目标、特定需求按表 5.3.8 选择。

表 5.3.8 连续梁、连续刚构桥结构响应监测内容和测点布设

监测类别		监测内容		监测优先级	测点布设	
					主要测点	附加测点
结构响应	振动	主梁振动加速度	竖向	*	边跨：跨中截面 主跨：跨中、1/4、3/4 截面	边跨：1/4、3/4 截面 主跨：1/8、3/8、5/8、7/8 截面
			横向	●	主跨跨中截面、连续刚构桥主墩墩顶截面	边跨：跨中截面 主跨：1/4、3/4 截面
			纵向	●	大跨高墩连续刚构桥主跨跨中截面、主墩墩顶截面	大跨高墩连续刚构桥边跨跨中截面、支座截面
		桥墩顶部纵横向振动加速度		●	墩顶位置	—
	位移	主梁竖向位移	静态挠度	*	边跨：跨中截面 主跨：跨中、1/4、3/4 截面	边跨：1/4、3/4 截面 主跨：1/8、3/8、5/8、7/8 截面

续表 5.3.8

监测类别		监测内容		监测优先级	测点布设	
					主要测点	附加测点
结构响应	位移	主梁竖向位移	动态挠度	●	边跨：跨中截面 主跨：跨中截面	主跨：1/4、3/4 截面
		支座位移		●	梁端支座	—
		梁端纵向位移		●	伸缩缝处梁端截面	—
		高墩墩顶位移		●	墩顶位置	—
		桥台倾斜		●	桥台顶	—
	应变	静态应变		●	边跨最大正弯矩截面、支点处最大负弯矩截面、主跨跨中截面	主跨 1/4、3/4 截面
		动态应变	混凝土结构	●	边跨最大正弯矩截面、支点处最大负弯矩截面、主跨跨中截面	主跨 1/4、3/4 截面
			钢结构	●	边跨最大正弯矩截面、支点处最大负弯矩截面、主跨跨中截面	主跨 1/4、3/4 截面
	钢筋应力	静态应力		○	跨中截面	1/4、3/4 截面
		动态应力		○	跨中截面	1/4、3/4 截面
	支座反力	支座反力		○	弯桥、斜桥、易倾覆的独柱墩、基础沉降的墩台	—

注：1 “●”表示应监测项；“●”表示宜监测项；“○”表示可选监测项，“—”表示不包含项。

2 “主要测点”为优先布设的测点，“附加测点”为条件允许时可布设的测点。

3 当被测桥梁由相同结构类型的多孔跨组成时，可选择技术状况较差或运营条件恶劣的代表性桥跨实施监测。

5.3.9 拱桥结构响应监测内容和测点布设应根据结构特点、监测应用目标、特定需求按表 5.3.9 选择。

表 5.3.9 拱桥结构响应监测内容和测点布设

监测类别		监测内容		监测优先级	测点布设	
					主要测点	附加测点
结构响应	振动	主梁、主拱振动加速度	竖向	●	主拱圈拱顶截面、中下承式拱桥桥面系跨中截面	主拱圈：1/4、3/4 截面 桥面系：主跨 1/4、3/4 截面

续表 5.3.9

监测类别		监测内容		监测优先级	测点布设	
					主要测点	附加测点
结构响应	振动	主梁、主拱振动加速度	横向	●	主拱圈拱顶截面、中下承式拱桥桥面系跨中截面	主拱圈：1/4、3/4 截面 桥面系：主跨 1/4、3/4 截面
			纵向	○	主拱圈拱顶截面	—
		吊杆（索）振动加速度		●	中下承式拱桥代表性吊杆	—
		桥墩顶部纵横向振动加速度		●	墩顶位置	—
	位移	主梁竖向位移	静态挠度	●	中下承式拱桥：跨中、1/4、3/4 截面	中下承式拱桥：1/8、3/8、5/8、7/8 截面
			动态挠度	●	中下承式拱桥：跨中截面	中下承式拱桥：1/4、3/4 截面
		主拱圈变形		●	主拱圈拱顶截面	主拱圈：1/4、3/4 截面
		支座位移		●	梁端支座	—
		梁端纵向位移		●	伸缩缝处梁端截面	—
		高墩墩顶位移		●	墩顶位置	—
		桥台倾斜		●	桥台顶	—
		静态应变		●	主拱圈拱脚截面、拱顶截面、主梁跨中截面	主拱圈 1/4、3/4 截面 主梁 1/4、3/4 截面
	应变	动态应变	混凝土结构	●	主拱圈拱脚截面、拱顶截面、主梁跨中截面	主拱圈 1/4、3/4 截面 主梁 1/4、3/4 截面
			钢结构	●		
	钢筋应力	静态应力		○	主拱圈拱顶、拱脚截面	主拱圈 1/4、3/4 截面
		动态应力		○	主梁体系关键截面	行车道板梁的跨中截面
	索力	吊杆（索）力		●	中下承式拱桥代表性吊杆	—
		系杆力		●	中下承式拱桥柔性系杆	—
	支座反力	支座反力		—	—	—

注：1 “●”表示应监测项；“●”表示宜监测项；“○”表示可选监测项，“—”表示不包含项。

2 “主要测点”为优先布设的测点，“附加测点”为条件允许时可布设的测点。

3 当被测桥梁由相同结构类型的多孔跨组成时，可选择技术状况较差或运营条件恶劣的代

表性桥跨实施监测。

5.3.10 斜拉桥结构响应监测内容和测点布设应根据结构特点、监测应用目标、特定需求按表 5.3.10 选择。

表 5.3.10 斜拉桥结构响应监测内容和测点布设

监测类别		监测内容		监测优先级	测点布设	
					主要测点	附加测点
结构响应	振动	主梁振动加速度	竖向	*	边跨：跨中截面 主跨：跨中、1/4、3/4 截面	边跨：1/4、3/4 截面 主跨：1/8、3/8、5/8、7/8 截面
			横向	*	主跨跨中截面	边跨：跨中截面 主跨：1/4、3/4 截面
			纵向	●	塔梁连接处或支座位置处	—
		斜拉索振动加速度		*	代表性斜拉索	—
		塔顶水平双向振动加速度		*	塔顶位置	—
	位移	主梁竖向位移	静态挠度	*	边跨：跨中截面 主跨：跨中、1/4、3/4 截面	边跨：1/4、3/4 截面 主跨：1/8、3/8、5/8、7/8 截面
			动态挠度	*	边跨：跨中截面 主跨：跨中、1/4、3/4 截面	边跨：1/4、3/4 截面 主跨：1/8、3/8、5/8、7/8 截面
		主梁横向位移		○	主跨跨中截面	边跨跨中截面
		支座位移		*	梁端支座	—
		梁端纵向位移		*	伸缩缝处梁端截面	—
		塔顶偏位		*	塔顶位置	—
		高墩墩顶位移		●	墩顶位置	—
		桥台倾斜		●	桥台顶	—
	转角	塔顶转角		●	塔顶位置	—
		梁端水平转角		* / ●	伸缩缝处梁端截面	—
		梁端竖向转角		* / ●	伸缩缝处梁端截面	—
	应变	静态应变		*	边跨最大正弯矩截面、 支点处最大负弯矩截面、 主跨跨中截面、索塔根部结构	主跨 1/4、3/4 截面

续表 5.3.10

监测类别		监测内容		监测优先级	测点布设	
					主要测点	附加测点
结构响应	应变	动态应变	混凝土结构	●	边跨最大正弯矩截面、支点处最大负弯矩截面、主跨跨中截面、索塔根部结构	主跨 1/4、3/4 截面
			钢结构	*		
	钢筋应力	静态应力		○	主梁关键截面	索塔及其横梁、交界墩的关键截面
		动态应力		○	主梁关键截面	—
	索力	斜拉索索力		*	代表性斜拉索	—
	支座反力	支座反力		○	易脱空支座、受拉支座	—

注：1 “*”表示应监测项；“●”表示宜监测项；“○”表示可选监测项，“—”表示不包含项。

2 “主要测点”为优先布设的测点，“附加测点”为条件允许时可布设的测点。

3 主跨跨径大于等于 300m 的斜拉桥梁端水平和竖向转角为应监测项，小于 300m 的斜拉桥为宜监测项。

5.3.11 悬索桥结构响应监测内容和测点布设应根据结构特点、监测应用目标、特定需求按表 5.3.11 选择。

表 5.3.11 悬索桥结构响应监测内容和测点布设

监测类别		监测内容		监测优先级	测点布设	
					主要测点	附加测点
结构响应	振动	主梁振动加速度	竖向	*	边跨：跨中截面 主跨：跨中、1/4、3/4 截面	边跨：1/4、3/4 截面 主跨：1/8、3/8、5/8、7/8 截面
			横向	*	主跨跨中截面	边跨：跨中截面 主跨：1/4、3/4 截面
			纵向	●	塔梁连接处或支座位置处	—
		吊索振动加速度		*	代表性吊索	—
		塔顶水平双向振动加速度		*	塔顶位置	—
	位移	主梁竖向位移	静态挠度	*	边跨：跨中截面 主跨：跨中、1/4、3/4 截面	边跨：1/4、3/4 截面 主跨：1/8、3/8、5/8、7/8 截面

续表 5.3.11

监测类别		监测内容		监测 优先 级	测点布设	
					主要测点	附加测点
结构 响应	位移	主梁竖向 位移	动态挠度	*	边跨：跨中截面 主跨：跨中、1/4、3/4 截面	边跨：1/4、3/4 截面 主跨：1/8、3/8、5/8、 7/8 截面
		主梁横向位移		* / 〇	主跨跨中截面	边跨跨中截面
		支座位移		*	梁端支座	—
		梁端纵向位移		*	伸缩缝处梁端截面	—
		塔顶偏位		*	塔顶位置	—
		主缆偏位		*	主跨跨中	1/4、3/4 主跨
		桥台倾斜		〇	桥台顶面	—
	转角	塔顶转角		〇	塔顶位置	—
		梁端水平转角		* / 〇	伸缩缝处梁端截面	—
		梁端竖向转角		* / 〇	伸缩缝处梁端截面	—
	应变	静态应变		*	边跨最大正弯矩截面、 支点处最大负弯矩截 面、主跨跨中截面、索 塔根部结构	主跨 1/4、3/4 截面
		动态应变	混凝土结 构	〇	边跨最大正弯矩截面、 支点处最大负弯矩截 面、主跨跨中截面、索 塔根部结构	主跨 1/4、3/4 截面
			钢结构	*		
	钢筋 应力	静态应力		〇	主塔及交界墩关键截 面	主塔横梁关键截面
		动态应力		—	—	—
	索力	吊索索力		*	代表性吊索	—
		锚跨索股力		*	主缆、锚固区典型索股	基准索股
	支座 反力	支座反力		〇	易脱空支座、受拉支座	—

注：1 “*”表示应监测项；“〇”表示宜监测项；“—”表示不包含项。

2 “主要测点”为优先布设的测点，“附加测点”为条件允许时可布设的测点。

3 主跨跨径大于等于 500m 的悬索桥主梁横向位移、梁端水平和竖向转角为应监测项，小于 500m 的悬索桥为宜监测项。

5.4 结构变化监测

5.4.1 基础冲刷监测宜包括冲刷深度、水位、水流速监测，测点布设应

符合下列规定：

1 应根据桥梁基础冲刷风险分析和人工检查结果确定墩台截面和测点位置；

2 宜对浅埋扩大基础和冲刷深度已接近或超过设计限值的桩基础进行冲刷监测；

3 冲刷监测测点宜布设在桥墩上、下游两侧及桥墩侧面最大冲刷位置，对冲刷严重情况宜在周边侧面增加测点。

5.4.2 结构变位监测测点布置，应符合下列规定：

1 悬索桥锚碇位移监测测点宜布设于锚体和前支墩角点处；

2 悬索桥索夹滑移监测测点数量应根据现场检测结果确定；

3 拱桥拱脚位移监测测点宜布设于拱脚承台处；

4 桥墩台沉降监测测点宜布设于墩台顶处。

5.4.3 混凝土结构和钢结构裂缝监测测点布置，应根据桥梁结构受力分析、易损性分析结果，宜选取主要承重构件上代表性的受力裂缝进行裂缝宽度和长度监测。

5.4.4 混凝土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，测点位置和数量可根据氯离子浓度梯度测试要求确定。

5.4.5 体外预应力监测测点布置宜根据结构构造特点、预应力布设形式和位置确定。

5.4.6 技术状况评定为腐蚀或锈蚀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，测点宜布设在锚头端部位置或宜腐蚀断丝位置。

5.4.7 索夹螺栓、高强螺栓紧固力测点位置和数量宜根据现场检测、技术状况评定结果确定。

5.4.8 结构变化监测内容应根据桥梁运营环境、结构特点、监测应用目标、特定需求按表 5.4.8 选择。

表 5.4.8 结构变化监测内容选取汇总表

监测类别	监测内容	梁式桥		拱桥		斜拉桥	悬索桥
		简支梁	连续梁/连续刚构	上承式	中下承式		
结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度	○	○	○	○	○
	结构变位	锚碇位移	—	—	—	—	●
		索夹滑移	—	—	—	—	○
		拱脚位移	—	—	●	●	—
		桥墩沉降	●	●	●	●	●
	裂缝	混凝土结构裂缝	●	●	●	●	●
		钢结构裂缝	●	●	●	●	●
	腐蚀	墩台身混凝土氯离子浓度	○	○	○	○	○
		墩台身混凝土氯离子侵蚀深度	○	○	○	○	○
	预应力	体外预应力	●	●	—	—	—
	断丝	主缆、吊索、斜拉索、吊杆（索）、系杆断丝	—	—	—	○	○
	螺栓状态	索夹螺栓、高强螺栓紧固力	○	○	○	○	○

注：“●”表示应监测项；“●”表示宜监测项；“○”表示可选监测项，“—”表示不包含项。

5.5 监测方法

5.5.1 车辆荷载监测方法应满足下列要求：

1 车辆荷载监测宜选用动态称重系统，设备应符合现行国家标准《动态公路车辆自动衡器 第1部分：通用技术规范》GB/T 21296.1的有关规定；

2 动态称重系统量程应根据桥梁的限行车辆载重及实际预估车辆载重确定，单轴监测量程应大于限载车辆轴重的2倍；

3 传感器布设尺寸横向应覆盖车道宽度，纵向应满足车辆轴距要求；

4 应具备数据自动采集功能，现场单车荷载数据存储能力不宜小于

90d, 视频数据存储能力不宜小于 30d;

5 宜联合动态称重和视频监控设备获取车辆空间分布, 视频监测范围应覆盖所有行车道, 且具备图像自动抓拍功能;

6 技术参数要求宜按本标准附录 A 的规定选择。

5.5.2 风荷载监测方法应满足下列要求:

1 桥面风速风向监测宜采用三向超声风速仪, 塔顶宜采用机械式风速仪或两向超声风速仪, 处于强(台)风区域的桥梁应采用三向超声风速仪;

2 风速仪量程应大于安装高度处设计风速的 1.2 倍, 最大允许误差为 0.3m/s;

3 宜选取采样频率高的风速仪, 机械式风速仪不应低于 1Hz, 超声风速仪不应低于 10Hz;

4 相同部位的风速风向监测应采用同一类型风速仪;

5 自由风场处风压监测宜选用皮托管, 安装于固定支架上, 水平周向每隔 30° 布设一个;

6 主梁风压监测宜选用陶瓷型或扩散型微压差传感器, 风压量程宜大于 10hPa, 最大允许误差为 0.5%F·S, 传感器应安装于梁体外表面, 沿主梁截面周向和纵桥向布置, 气嘴垂直于梁体外表面。

7 传感器技术参数要求宜按附录 A 的规定选择。

5.5.3 地震动监测宜采用力平衡式三向加速度传感器、强震仪。力平衡式加速度传感器量程宜大于 $\pm 2.0g$, 灵敏度大于等于 2.5V/g, 分辨力不小于 $1 \times 10^{-5}g$, 动态范围大于等于 120dB。强震仪技术要求应符合现行地方标准《数字强震动加速度仪》DB/T 10 相关规定。

5.5.4 船舶撞击监测宜与地震动监测、结构振动监测协同, 采用力平衡式加速度传感器、强震仪, 传感器技术参数应符合本标准第 5.5.3 条的规定。

5.5.5 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

程宜超出大气温度年极值+30℃以上和年极值最低温度-20℃以下,误差不大于±0.5℃。传感器技术参数要求宜按附录 A 的规定选择。

5.5.6 路面温度传感器应符合现行国家标准《公路交通气象监测设施技术要求》GB/T 33697 的相关规定。

5.5.7 环境湿度监测宜采用氯化锂湿度计、电阻电容湿度计、电解湿度计和露点仪等,湿度计量程应为 0%RH~100%RH,误差不大于 2%RH,传感器技术参数要求宜按附录 A 的规定选择。

5.5.8 雨量监测宜采用电容雨量传感器、红外散射式雨量传感器、单翻斗雨量传感器等,分辨力不大于 0.1mm,最大允许误差为±4%F·S,传感器技术参数要求宜按附录 A 的规定选择。

5.5.9 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 1mm,摄像机技术参数和指标应符合现行国家标准《交通信息采集.视频车辆检测器》GB/T 24726 的相关规定。

5.5.10 振动监测方法应满足下列要求:

1 结构整体振动宜采用加速度监测方法,应根据桥梁结构主要参与振型选用三向、双向和单向加速度传感器,量程、频响范围、灵敏度应符合桥梁结构振动监测的要求;

2 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;

3 大跨径桥梁的主梁、塔、主拱等构件,宜选用低频性能优良的力平衡式加速度传感器,量程应大于计算分析振动响应最大值的 1.2 倍,且不宜小于±1g,横向灵敏度小于等于 5%,频响范围 0Hz~100Hz;

4 中小跨径桥梁或悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)等索构件,可选用电容式加速度传感器和压电式加速度传感器,量程应大于计算分析振动响应最大值的 1.5 倍,且不宜小于±5g,横向灵敏度小于等于 5%,频响范围 0Hz~100Hz;

5 传感器技术参数要求宜按附录 A 的规定选择。

5.5.11 位移监测方法应满足下列要求：

1 应根据被测桥梁结构、构件和附属设施的构造特点、监测要求、安装环境，选择传感器类型、精度、位置和安装方式；

2 主跨跨径大于 500m 的悬索桥主梁竖向和横向位移、塔顶偏位、主缆偏位，以及主跨跨径大于 300m 的斜拉桥、200m 拱桥主梁横向位移、塔顶偏位、主拱顶偏位，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；

3 斜拉桥、拱桥和梁桥主梁竖向静态位移监测可选用基于连通管原理的压力变送器等，最大允许误差不大于 2mm，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；主梁竖向和横向动态位移宜选用光电挠度仪、激光挠度仪、毫米波雷达等，采样频率不宜小于 20Hz；

4 中小跨径桥梁主梁竖向位移宜采用光电挠度仪、激光挠度仪、毫米波雷达等动态监测方法，采样频率不宜小于 30Hz；

5 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，最大允许误差不大于 0.5% F·S；

6 梁端、塔顶转角监测宜采用微电子机械系统倾角传感器，角度误差不大于 0.01° ；塔顶、拱顶偏位、墩顶纵向和横向位移可选用高精度倾角传感器，角度误差不大于 0.005° ；

7 传感器技术参数要求宜按附录 A 的规定选择，GNSS 监测技术还应符合现行国家标准《低轨星载 GNSS 测量型接收机通用规范》GB/T 39410 相关规定，压力变送器技术指标还应符合现行行业标准《压力变送器检定规程》JJG 882 的相关规定。

5.5.12 应变监测方法应满足下列要求：

1 静态应变监测宜采用振弦式应变传感器、光纤光栅应变传感器，动态应变宜采用电阻应变传感器、光纤光栅应变传感器等；

2 混凝土构件应变监测宜选用大标距的应变传感器，应变梯度较

大的应力集中区域，宜选用标距较小的应变传感器；

3 钢结构应变监测宜选用电阻应变计或光纤光栅应变传感器；

4 三向静态和动态应变测点宜采用应变花布设方式；

5 应变监测应进行温度补偿，安装时应测量记录初始值；

6 中小跨径桥梁应变监测宜采用动态监测方式；

7 埋入式传感器应采用高耐久性材料进行封装；

8 传感器技术指标宜按附录 A 的规定选择。

5.5.13 索力监测方法应满足下列要求：

1 索力监测宜选用加速度传感器、毫米波雷达（振动频率法）、振弦式压力传感器、光纤光栅测力传感器等，技术参数要求宜按附录 A 的规定选择；

2 振动频率法监测最大允许误差不小于 $5.0\%F \cdot S$ ，压力传感器测定法监测最大允许误差不小于 $3.0\%F \cdot S$ ；

3 采用振动频率法监测时，加速度传感器安装位置应远离拉索锚固点。

5.5.14 支座反力监测宜采用测力支座，最大允许误差不大于被测支座标称竖向承载力值的 5%。

5.5.15 基础冲刷宜包括冲刷深度监测和水流速度监测，满足下列要求：

1 冲刷深度监测宜采用声纳传感器，传感器探头宜安装在承台底部或桩顶部位置，冲刷深度分辨力宜小于等于 5mm；

2 水流速度监测宜采用雷达法，最大允许误差应小于等于 $\pm 1\% F \cdot S$ ，分辨力应小于等于 0.1cm/s。

5.5.16 悬索桥锚碇位移、拱桥拱脚位移和桥墩（台）沉降监测宜设置桥梁永久观测点，或采用 GNSS 静态观测方法。

1 永久观测点应安装永久固定金属测标，永久观测点的设置应符合现行行业标准《公路桥涵养护规范》JTG 5120 相关规定；

2 GNSS 监测宜采用北斗卫星导航技术，GNSS 监测应配置永久观

测基准点，应符合现行国家标准《低轨星载 GNSS 测量型接收机通用规范》GB/T 39410 的相关规定。

5.5.17 裂缝监测可选用振弦式裂缝传感器、电阻式裂缝传感器、光纤式裂缝传感器、光电裂缝传感器、高清摄像机等，传感器量程应大于裂缝预警宽度，最大允许误差不大于 0.02mm，分辨力宜小于等于 0.01mm。技术指标宜按附录 A 的规定选择。

5.5.18 混凝土结构腐蚀监测可选用多极电化学传感器，沿混凝土保护层深度进行安装，监测混凝土保护层腐蚀侵蚀深度，判断钢筋的工作状态，技术参数宜符合现行国家标准《无损检测电化学检测总则》GB/T 38894 的相关规定。

5.5.19 悬索桥吊索、主缆，斜拉桥斜拉索，拱桥吊杆（吊索）、系杆等钢索结构断丝监测宜选用声发射传感器，监测方法应符合现行行业标准《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T 1037 的相关规定。

5.6 数据采集方法

5.6.1 数据采集方式可分为分布式数据采集和集中式数据采集，应根据桥梁规模、测点空间分布、结构特点、传感器类型进行选择。

5.6.2 数据采集设备应考虑传感器的分辨力、信号类型、接口的兼容性，保证信号高信噪比、不失真，确保获得高质量、高精度的有效数据。动态信号应进行抗混滤波，满足采样定理。

5.6.3 数据采集设备的模数转换分辨力应满足实时报警、数据分析及应用的要求，技术指标宜按附录 B 的规定选择。

5.6.4 光纤光栅信号采集应选用光纤光栅解调仪，宜根据情况配置温控机柜，以保证光纤光栅解调仪正常运行，技术指标宜按附录 B 的规定选择。

5.6.5 各数据采集设备的数据采集应保持时间同步，时间同步精度应满足报警、数据分析及应用的要求。相同类型监测数据的采集时间同步误

差宜小于 0.1ms，不同类型监测数据的采集时间同步误差宜小于 1ms。

5.6.6 数据采集频率应满足实时报警、数据分析及应用的要求，各监测数据采集频率宜参照表 5.6.6 进行设置和调整。

表 5.6.6 数据采集频率汇总表

类别	监测项目	采样频率
作用监测内容	车辆荷载	触发采集
	风速、风向	三向超声风速仪：≥10Hz 机械式风速仪：≥1Hz
	风压	10Hz
	结构温度	1/600Hz
	船舶（漂流物）撞击	触发采集：50Hz
	地震动	触发采集：50Hz
环境监测内容	温度	1/600Hz
	湿度	1/600Hz
	雨量	1/60Hz
	结冰	在线：25FPS
结构响应监测内容	振动加速度	50Hz
	静态位移	静态位移：1Hz
	动态位移	大跨径桥梁：动态位移：≥20Hz 中小跨径桥梁：动态位移：≥30Hz
	静态应变	静态应变：1/600Hz
	动态应变	动态应变：≥30Hz
	转角	1Hz
	索力	压力式传感器：1Hz 频率法加速度传感器：50Hz 电磁弹式传感器：1/3600Hz
	支座反力	1Hz
结构变化监测内容	基础冲刷	在线：1Hz 离线：每年 1 次~2 次
	锚碇位移	在线：1/3600Hz 离线：每年 1 次~2 次
	拱脚偏位	在线：1/3600Hz 离线：每年 1 次~2 次
	桥墩沉降	在线：1/3600Hz 离线：每年 1 次~2 次

续表 5.6.6

类别	监测项目	采样频率
结构变化监测内容	裂缝	动态: 10Hz 静态: 1/3600Hz
	腐蚀	在线: 1/3600Hz 离线: 每年 1 次~2 次
	体外预应力	在线: 1/3600Hz 离线: 每年 3 次~4 次
	拉索断丝	触发采集: 2MHz
	螺栓紧固力	在线: 1Hz 离线: 每年 1 次~2 次
	索夹滑移	在线: 1Hz 离线: 每年 1 次~2 次

6 硬件安装实施

6.1 一般规定

6.1.1 监测系统实施前,应按设计要求深化施工图,编制施工组织设计、专项施工方案,在通过审查、技术交底后方可进行现场施工。

6.1.2 硬件在安装前应进行检查、测试,确认是否满足设计文件的要求。

6.1.3 硬件的检查包括外观检查和标志检查。外观和标志检查以目测为主,应满足下列要求:

- 1 名称、型号、数量与设计文件要求一致;
- 2 外观应无锈迹、裂痕,各部分连接牢固,引出线缆无损坏;
- 3 铭牌标志、备件和附带技术文件齐全;
- 4 安装孔尺寸及安装孔之间距离应符合设计文件的要求。

6.1.4 对已安装的传感器、线缆等硬件应采取保护措施,防止人为破坏和雨水冲刷等破坏。

6.1.5 安装就位后的传感器、桥架等硬件不应影响车辆、行人和检修人员的正常通行。

6.2 传感器安装

6.2.1 动态称重传感器安装应符合现行国家标准《动态公路自动衡器》GB/T 21296 的规定,还应满足以下规定:

- 1 传感器的基础材料和强度等级应符合设计要求;
- 2 传感器前后的引道应为直线路段,引道的长度不应小于 20m;
- 3 传感器与路面水平面的高差应符合设计文件要求,当设计文件无要求时,高差不应大于 3mm;
- 4 接地片的横截面积和埋深应符合设计文件要求,当设计文件无规定时,接地电阻不应大于 4 Ω ;
- 5 安装时不应超开挖、超切割路面,安装完成后应及时修复,并

不得影响道路使用。

6.2.2 风速风向传感器的安装应符合下列规定：

- 1 风向传感器的定北标志方向与正北方的角度偏差不应大于 0.5° ；
- 2 风速风向传感器的中轴应保持竖直状态；
- 3 风速风向传感器应在避雷措施的有效防护范围内；
- 4 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，与桥体联接牢固，并满足抗风要求；支架伸出主梁边缘水平风向宜大于等于 5m，伸出索塔高度方向宜大于等于 3m；
- 5 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。

6.2.3 地震动传感器安装及基座施工应符合下列规定：

- 1 应在安装基座和传感器的安装面分别满涂环氧树脂，再按设计规定方式安装；
- 2 传感器敏感轴方向应和设计方向保持一致；
- 3 传感器保护罩不得与地震动传感器接触；
- 4 安装基座的尺寸应符合设计规定，安装基座边缘与最近传感器边缘的距离不应小于 20mm；
- 5 安装基座应与被测构件牢固连成一体。

6.2.4 环境温湿度传感器的安装应符合下列规定：

- 1 温度传感器不应受到阳光的直接辐射；
- 2 湿度传感器不应安装在空气不流通的桥梁结构或保护装置内的死角处；
- 3 湿度传感器宜加装透气防尘罩。

6.2.5 混凝土内部预埋温度传感器的安装应符合下列规定：

- 1 监测点位置远离结构钢筋时，宜采用直径不小于 $\phi 6$ 的钢筋作为定位辅助钢筋；

- 2 应将温度传感器与钢筋牢固绑扎；
- 3 混凝土浇筑过程中应避免振动棒直接接触温度传感器。

6.2.6 混凝土钻孔中温度传感器的安装应符合下列规定：

- 1 钻孔前应确认钻孔深度范围内无预应力钢筋；
- 2 钻孔方向应与设计孔位方向一致；钻孔深度不得小于设计深度；
钻孔直径与设计偏差应小于 3mm；
- 3 达到钻孔深度后，应将孔内残留物清理干净；
- 4 沿孔深方向宜采用钢筋等辅助工具进行温度传感器的定位；
- 5 传感器安装到位后应采用细石混凝土或砂浆将钻孔堵塞密实。

6.2.7 结构表面的温度传感器安装应符合下列规定：

- 1 在混凝土表面安装时，传感器的敏感元件应紧贴混凝土表面，
并应采用细石混凝土或砂浆等材料将温度传感器完全包裹；
- 2 在钢结构表面安装时，应除去钢结构表面的防腐层，使传感器的敏感元件紧贴钢结构表面，并应采用绝热材料隔绝传感器与外界环境之间的热交换。

6.2.8 静力水准仪或压力变送器的安装应符合下列要求：

- 1 采用螺栓或抱箍固定传感器时，宜先在螺栓或抱箍及传感器的连接面上满涂环氧树脂，再拧紧螺栓或抱箍；
- 2 传感器应竖直安装，角度偏差不应大于 2°；
- 3 连通主管、支管的直径不应小于设计直径；
- 4 连通主管、支管应采用抱箍、卡环或定位卡等定位装置可靠固定在结构物上；
- 5 连通管的弯曲半径应符合设计规定，当设计无规定时，弯曲半径应大于管道外径的 3.5 倍；
- 6 连接处管的内径不得小于被连接管道的内径；
- 7 连通管与传感器液嘴的连接宜为软连接；
- 8 施工过程中不得扭曲、划伤连通管；

9 灌入液体的材料、配比应符合设计要求；

10 应从连通管的一端连续、匀速地灌入液体，避免在连通管中形成气泡；

11 应采用有效措施排出连通管中水平长度大于 10mm 的气泡；

12 连通管安装完成后，应对连通管施加不小于 2 个标准大气压并持续 30min，所有的管道、接头处应无渗漏现象。

6.2.9 GNSS 位移传感器的安装应符合下列规定：

1 天线 2m 空间范围内应无尺寸大于 20cm 的金属物；

2 天线周围俯仰角 30°范围内应无建筑、铁塔等较大的遮挡物；

3 GNSS 天线应位于避雷针保护范围内；

4 GNSS 天线不得和其他硬件的接地导体连接；

5 GNSS 天线应安装在观测墩顶部或支架的南面；

6 保护罩应安装严密，防止雨水渗入；

7 观测墩顶部的强制对中器的底盘应调整水平，倾斜度应不大于 1°；

8 固定 GNSS 天线的支架应竖直，角度偏差不应大于 2°；

9 引下馈线从观测墩外部或支架走线时，其与观测墩或支架的绑扎间距不应大于 0.8m，拐弯两侧应同时绑扎固定；

10 馈线不得缠绕、扭绞，且拐弯应圆滑均匀。硬质馈线最小弯曲半径应不小于馈线外径的 20 倍；软馈线最小弯曲半径不应小于馈线外径的 10 倍；

11 引下馈线的长度应有余量，防止因环境温度降低而拉坏。

6.2.10 光电挠度仪的安装应符合下列规定：

1 安装前应确认监测点的靶标、基准靶标与光学成像系统之间可通视；

2 宜采用红外线光源的靶标；

3 靶标应竖直安装且与被测桥梁顺桥向垂直，垂直度偏差不应大

于 1° ;

4 靶标应与桥梁结构牢固连接, 车辆通行情况下靶标与桥梁结构不得相对晃动;

5 安装基座应与桥梁结构或无沉降的基础刚性连接;

6 安装基座的安装表面应水平。

6.2.11 应变传感器的安装应符合以下要求:

1 预埋式应变传感器安装位置与设计监测点的距离偏差不应大于 30mm, 角度偏差不应大于 1° ;

2 预埋式应变传感器宜采用结构钢筋或辅助钢筋进行预埋传感器的定位, 并应在传感器两端、中部分别绑扎牢固;

3 在混凝土浇筑过程中, 禁止振捣器触碰传感器;

4 引出线缆宜采用软管保护;

5 表贴式应变传感器安装位置与设计监测点的距离偏差不应大于 20mm, 角度偏差不应大于 0.5° ;

6 在钢结构上安装表贴应变传感器时, 应先清除结构表面的油漆、焊渣等杂物, 并将安装表面打磨光滑, 宜采用冷焊或螺栓固定应变传感器。

6.2.12 加速度传感器的安装应符合以下要求:

1 加速度传感器的安装基座应与被测构件牢固连成一体, 钢结构构件上的安装基座宜采用冷焊进行固定;

2 加速度传感器测试方向与设计方向的角度偏差不应大于 1° ;

3 采用单螺栓固定加速度传感器时, 应采取防止加速度传感器发生转动的措施;

4 加速度传感器外壳与接地体之间的阻抗不应大于 1Ω ;

5 加速度传感器的屏蔽线外层应与接地体可靠连接。

6.2.13 锚索计的安装应符合下列规定:

1 应确认锚索计的安装基面与所测索孔径方向垂直; 索与锚垫板

不垂直时，应采用与锚垫板刚度相同的楔形垫板进行调整；

- 2 锚垫板与锚束张拉孔的中心轴线应相互垂直；
- 3 锚索计的内径应大于所测索的外径；
- 4 应将锚索计平稳放置于锚板和工作锚之间；
- 5 锚索计出现几何偏心时应即时予以调整；
- 6 锚索计安装就位后应及时调零，并读取初值。

6.2.14 倾角仪的安装应符合下列规定：

- 1 倾角仪宜采用刚性连接方式与被测构件牢固连接；
- 2 倾角仪轴线宜与被测构件轴线重合，水平位置偏差宜不大于1cm；
- 3 倾角仪安装后应及时读取初始值作为传感器的起始值。

6.3 桥架安装

6.3.1 桥架支架的材质、加工尺寸和焊接施工应符合设计文件和现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的规定。

6.3.2 桥架安装施工应符合现行国家标准《建筑电气施工质量验收标准》GB50303 的规定。

6.3.3 钢支架在安装前应进行防腐处理，防腐层应均匀、完整，以避免钢支架发生锈蚀。

6.3.4 支架安装应符合下列规定：

- 1 支架焊接不应有漏焊、欠焊、裂纹和咬边等缺陷；
 - 2 在钢筋混凝土构件上安装支架时应避开钢筋进行钻孔。对废弃不用的膨胀螺栓钻孔，应采用浆料填塞处理；
 - 3 支架安装坡度、弧度应符合设计要求，当设计无规定时，支架安装坡度、弧度应与电缆沟或桥梁结构的坡度、弧度相同；
 - 4 支架固定后应横平竖直、整齐美观，各支架之间的距离应均匀。
- 6.3.5** 支架的间距应符合设计规定。当设计无规定时，支架的间距宜为

1.5m~3m。

6.3.6 桥架垂直段大于 2m 时，应在垂直段上、下端槽内增设固定电缆用的支架；当垂直段大于 4m 时，应在中部增设支架。

6.3.7 桥架采用螺栓连接时，应采用平滑的半圆头螺栓，螺母应在电缆槽外侧，固定应牢固。

6.3.8 在易受车辆、风等引发振动的环境安装桥架时，固定桥架的螺母应有防滑功能。

6.4 线管安装

6.4.1 线管不得有变形或裂缝，其内部应清洁干燥、无毛刺，管口应有保护措施。

6.4.2 线管安装的线路应满足设计要求。当设计无要求时，应按最短路径原则集中安装、敷设。

6.4.3 线管与控制箱、接线箱、接线盒等连接时，应采用锁母将管口固定牢固。

6.4.4 线管穿过桥体时应加装保护套管。

6.4.5 焊接钢管不得在焊接处弯曲，弯曲处不得有折皱。镀锌钢管不得加热弯曲。

6.4.6 位于桥架外的通信线缆应采用镀锌钢管加以保护，并采取保护措施。

6.4.7 线管接头及线盒连接处的粘接应牢靠，无形变损坏。

6.4.8 钢管进线盒的连接施工应符合下列规定：

- 1 线盒开孔应一管一孔，且应排列整齐；
- 2 钢管与线盒的连接应采用锁紧螺母或护圈帽固定。

6.5 线缆敷设

6.5.1 线缆敷设不应妨碍桥梁结构的维护、维修操作，不应影响桥梁的

正常使用。

6.5.2 宜在线管安装施工结束后敷设线缆，且敷设过程中不得损伤线缆。

6.5.3 硬件的外部接线应满足下列要求：

- 1 接线排列应整齐、美观，导线应绝缘良好、无损伤；
- 2 固定接线的螺栓和螺钉应采用有金属防护层或铜质的制品；
- 3 固定接线的螺栓和螺钉应拧紧，拧紧力矩值应符合硬件技术文件的要求；
- 4 接线张紧程度应适中，不得使硬件内部受到额外应力。

6.5.4 信号线在以下部位应进行标识：

- 1 传感器的接线端；
- 2 桥架的接入端和引出端；
- 3 采集设备接入端；
- 4 线路每 100m 间距处。

6.5.5 电源线在以下部位应进行标识：

- 1 与主电源的连接端；
- 2 桥架的接入端和引出端；
- 3 用电设备接入端。

6.5.6 信号线、电源线的标识应符合下列要求：

- 1 标识应统一、清楚、易读和整洁；
- 2 相同去向线缆标识粘贴的朝向应一致，宜统一朝上或朝向维护操作面；
- 3 标识宜采用不同颜色区分强电、弱电。

6.5.7 在经过伸缩缝或支座时，桥架、线管及线缆的安装和敷设应采取适应变形的措施。

6.5.8 敷设的管线和线缆应横平竖直、整齐美观，不宜交叉。

6.5.9 线缆敷设施工应符合设计及现行国家标准《综合布线系统工程验

收规范》GB 50312 的规定。

6.5.10 光缆敷设前应进行外观检查和光纤导通检查。

6.5.11 光缆的弯曲半径不应小于设计要求。当设计无要求时，弯曲半径不应小于光缆外径的 15 倍。

6.5.12 以牵引方式敷设光缆时，主要牵引力应施加在光缆的加强芯上。

6.5.13 光缆连接应采用专用设备进行熔接，熔接损耗不应大于 0.08dB。

6.5.14 线缆中继接头应按设计要求制作，无虚焊；同轴电缆的连接应采用专用接头。

6.5.15 电源线、信号线的敷设施工应符合下列规定：

1 不应敷设在有腐蚀性物质排放、强磁场和强电场干扰的区域。当无法避免时，应采取防护或屏蔽措施；

2 电源线、信号线的接头应在暗线箱或接线盒内。接头宜采用压接，当采用焊接时应采用无腐蚀性助焊剂；

3 在雨天、大雾天等恶劣天气条件下，不应进行室外的光缆、电缆的接续工作；

4 线缆垂直敷设于桥架内时，其顶部和每隔 1.5m 处宜与桥架固定；线缆水平敷设于桥架内时，每隔 3m~5m 处宜与桥架固定；

5 线缆敷设作业人员不得攀爬桥架和支架。

6.5.16 线缆从室外进入室内或进入室外的机柜、机箱时，宜从底部进入，并应有防水密封措施。

6.5.17 线缆在进入桥架前，宜采用软波纹管进行保护。

6.6 防雷与接地

6.6.1 防雷与接地装置的施工应符合现行国家标准《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB 50343 的规定，并应符合下列规定：

1 防雷保护器的安装应牢固，接线应可靠；多个防雷保护器的安

装位置、顺序应符合设计文件和产品说明书的要求；

2 当桥梁结构有接地装置时，宜将监测系统的接地与桥梁接地焊接牢固，并应采取防腐措施；

3 当桥梁结构无接地装置时，监测系统的接地体埋设位置和深度应符合设计文件要求；

4 接地电阻值无法满足设计文件要求时，应采取物理或化学降阻措施。

6.6.2 接地线的安装应符合现行国家标准《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB 50343 的规定，并应符合下列规定：

1 接地线不应有机械损伤；

2 接地端子应设置在便于操作部位，并做明显标记。

6.7 机柜安装

6.7.1 机柜尺寸应符合设计要求。机柜的面板、边框应无锋边、毛刺；机柜的箱门把手等外露和操作部位的棱角半径应不小于 2mm。

6.7.2 采集站的机柜应牢固固定在基座上。机柜安装位置与设计文件的偏差应小于 30mm。

6.7.3 机柜的安装应考虑开门方向和操作便利性，机柜的设备舱门和配线舱门应能完全开启。

6.7.4 落地式机柜的安装应符合下列规定：

1 机柜竖立后应及时固定，防止倾倒造成人员伤亡和设备损坏；

2 机柜上的固定螺丝、垫片和弹簧垫圈应紧固；

3 有抗震要求时，应按设计要求对机柜固定装置进行抗震加固。

6.7.5 壁挂式机柜的安装应符合下列规定：

1 机柜距离地面不应小于 300mm，机柜门应垂直于地面开启；

2 机柜与结构或安装基座的固定点不应少于 4 个。

6.7.6 在机柜固定后方可安装机柜内的设备和部件，设备、部件应与机

柜固定牢固。

6.7.7 机柜内设备的分布应符合设计要求。当设计无要求时，设备分布应做到功能集中、方便布线、利于维护和更换。

6.7.8 机柜内的布线应符合下列规定：

- 1 布线应横平竖直、无交叉，接头不得扭绞、打圈；
- 2 线缆不应受外力的挤压和损伤；
- 3 邻近机柜之间布设走线宜在机柜的顶端；
- 4 裸线应用套管或绝缘胶布包裹。

6.7.9 机柜过线区的安装应符合下列规定：

- 1 电源线、信号线应有独立的进线孔以避免相互干扰；
- 2 应考虑线缆引入、固定和接线时的安全性、便利性和扩容性，并预留足够的过线空间；
- 3 当户外机柜有屏蔽要求时，过线区应增加屏蔽措施。

6.7.10 线缆安装完毕后，机柜的进出线缆孔洞应采用防火胶泥封堵，并做好防水和防潮处理。

6.7.11 机柜门的最大开启角度不应小于 90°。室外机柜门开启时，应能防止外部积水进入机柜。室外机柜门应配置门锁，门锁应具有防盗功能。

6.7.12 机柜接地应符合设计要求。当设计无要求时，应符合下列规定：

- 1 机柜金属部分任意两点之间的连接电阻应不大于 0.1Ω ；
- 2 接地连线应采用截面面积不小于 4mm^2 的铜线；
- 3 接地连接点应有清晰的接地标识。

6.7.13 机柜编号及机柜标识张贴应符合下列规定：

- 1 机柜应统一编号，并将标签贴于机柜外部醒目处；
- 2 同一机柜内的设备应统一编号，并应将机柜内所有设备列表标签张贴于机柜内部醒目处。

7 软件开发实施

7.1 一般规定

7.1.1 系统软件开发应包含软件设计与开发、软件测试、软件部署。

7.1.2 软件开发应符合以下规定：

1 采用主流的软件开发技术和框架，软件内容各模块功能独立，模块之间耦合性低；

2 软件编写遵循国际通用编码规范和注释规范，程序编码风格应简洁易读、结构清晰、易于调试维护；

3 对于需要多方协调开发的软件，使用软件代码版本控制工具；

4 软件系统内部不得内置与业务功能无关的后门程序、加密模块等；

5 按照现行国家标准《计算机软件文档编制规范》GB/T 8567 等计算机软件行业标准要求编写软件开发文档和接口文档；

6 软件开发时选用技术路线考虑安全性、可靠性和技术先进性，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。

7.1.3 软件系统应具有本地配置和管理功能。

7.1.4 软件系统应具备自动恢复功能，在无人值守情况下可从故障中恢复正常工作状态。

7.1.5 软件测试部署应由专业人员完成，在软件测试、部署前，应编制相应的测试、部署文档。

7.1.6 测试部署时应详细记录出现的异常、错误等事件，在部署完成后应建立软件文档台账。

7.2 设计与开发

7.2.1 软件应采用模块化设计，各模块的功能宜相对独立，以便调试和后期维护。

7.2.2 软件设计和开发过程中应形成的文档包括：

- 1 软件需求说明书；
- 2 软件接口规格说明书；
- 3 软件设计说明书；
- 4 软件详细设计说明书；
- 5 数据库设计说明书。

7.2.3 软件安全设计应符合现行国家标准《信息安全技术 信息系统通用安全技术要求》GB/T 20271 的要求。

7.3 软件测试

7.3.1 软件测试中的单元测试、集成测试、配置项测试和系统测试等应符合现行国家标准《计算机软件测试规范》GB/T 15532 的规定。

7.3.2 软件测试文档的编制应符合现行国家标准《计算机软件测试文档编制规范》GB/T 9386 的规定。

7.3.3 软件测试应制定详细的软件测试需求分析、测试方案和测试用例，并搭建配合软件测试的硬件、网络环境后，方可开展测试工作。

7.3.4 应对数据采集、传输和存储监测软件进行压力测试，压力测试宜包括以下内容：

- 1 超过设计规定采样频率的全桥传感器同步采集能力；
- 2 数据传输量的饱和测试；
- 3 超出规定存储量的数据存储能力。

7.3.5 软件系统测试以功能测试、安全测试为主。

7.3.6 监测软件测试报告应包括以下内容：

- 1 软件测试单位编制的测试计划、测试用例文档；
- 2 测试用例的结果，包括测试期间出现的所有偏离、失败情况。

7.4 软件部署

7.4.1 符合下列条件后方可进行软件部署：

- 1** 监测软件、网络等的配置符合监测系统设计要求；
- 2** 监测软件通过测试并确认合格；
- 3** 监测硬件工作正常。

7.4.2 监测软件部署应符合下列规定：

- 1** 操作系统、应用组件、数据库等应用支撑软件的安装和配置应满足软件设计文件的技术要求；
- 2** 专用服务器、工控机等硬件不得安装与监测系统无关的软件；
- 3** 操作系统、防毒软件宜设置为自动更新；
- 4** 软件部署后能正常启动。

7.4.3 监测软件部署后应形成的文档包括：

- 1** 用户手册；
- 2** 监测软件产品规格说明书；
- 3** 监测软件系统故障与恢复手册。

8 系统调试

8.1 一般规定

8.1.1 系统调试应由机电、结构和软件专业技术人员组成调试小组，根据设计文件和产品技术文件进行。

8.1.2 系统调试前应做好以下准备工作：

1 按照施工资料查验已安装硬件和软件的规格、型号、数量和标识位置，应正确无误；

2 查验接地系统和接地电阻符合设计要求；当无设计要求时，接地电阻应小于 4Ω ；

3 断开不同接地系统的公共连接点后，不同接地系统之间的绝缘阻值应大于 $50M\Omega$ ；

4 查验引入电源是否符合设计或设备电源要求，包括电源种类、电压、负载能力等；

5 电气接线应无松动、短路、断路等现象。

8.1.3 系统调试前应制定调试方案并采取必要的安全防护措施。

8.1.4 系统调试应进行单项调试和联合调试，并出具调试报告。

8.1.5 系统验证使用的计量仪表和检测器具应在规定的使用期内且检定合格，仪表和器具的测量精度应不低于相应传感器的测量精度。

8.2 单项调试

8.2.1 系统供电调试应符合下列规定：

1 电源设备的带电部分与金属外壳之间的绝缘电阻应满足产品设计要求，当无设计要求时，用 $500V$ 兆欧表测量时不应小于 $5M\Omega$ ；

2 市电 $220V$ 电压波动不应超过 $\pm 10\%$ ，当超过该范围时，应加装稳压设备；

3 $60V$ 以上的直流电源电压波动不应超过 $\pm 10\%$ ， $60V$ 以下的直流

电源电压波动不应超过 $\pm 5\%$;

4 不间断电源宜进行自行切换性能试验, 切换时间和切换电压值应符合产品技术文件的规定。

8.2.2 系统信号调试应符合下列规定:

1 检查各传感器采集参数设置是否满足设计要求;

2 当设计要求多种采集策略时, 应针对每种采集策略分别测试传感器能否正确返回测试信号;

3 单个传感器采集数据的响应时间应满足设计和产品技术文件的要求;

4 需要同步采集的传感器其同步精度应满足监测需要。

8.2.3 系统数据调试应符合下列规定:

1 传感器的编号及数据在现场数据库及远程数据库中应完全对应;

2 数据存储精度应不低于传感器的分辨率;

3 各传感器的测量数据应不超过传感器测量范围。

8.3 联合调试

8.3.1 监测系统的功能调试包括:

1 自动和人工实现数据采集、传输和存储功能;

2 数据显示、回放和统计功能;

3 监测系统报警和预警功能;

4 监测系统的结构安全评估功能;

5 设计文件要求的其他功能。

8.3.2 监测系统的时钟每月最大计时误差小于 5s。

8.3.3 试运行期间监测系统的可靠性应满足下列要求:

1 设备每月平均无故障工作时间应大于每月总时长的 95%, 统计时宜排除网电等外部因素影响;

2 系统自动采集数据日均数据缺失率应不大于 5%。

8.3.4 试运行期间监测系统的稳定性应满足下列要求：

1 在监测点与人工测试点相同或邻近条件下，系统自动采集数据与相应时间人工测试数据的规律一致，变化幅值接近；

2 监测数据具有较好的周期性，无明显的系统性偏移。

8.4 系统验证

8.4.1 系统安装完成后，可采用车辆加载试验对系统进行验证。

8.4.2 动态称重传感器的现场验证方法和偏差可参照现行国家标准《动态公路车辆自动衡器 第 1 部分：通用技术规范》GB/T 21296.1，设备性能指标应满足设计要求。

8.4.3 温度、湿度、风速、裂缝和固有频率等参数可采用参考计量仪器进行验证。

8.4.4 在相同截面处，定期观测位移与监测系统位移测试的变化趋势应吻合。

9 系统验收

9.1 一般规定

9.1.1 监测系统建成,并正常运营不少于3个月后,由建设单位组织系统验收,验收内容包括硬件验收、软件验收和资料验收。

9.1.2 与新建桥梁同期建设的监测系统应与桥梁建设同步进行验收。

9.1.3 监测系统竣工交付使用后系统缺陷责任期宜为2年。

9.1.4 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。

9.1.5 监测系统验收宜由建设单位组织专家评审。

9.1.6 建设单位在验收合格后应及时开具验收证书,作为工程交付使用的依据。

9.2 硬件验收

9.2.1 硬件验收包括传感器安装验收、采集与传输设备安装验收,在硬件实施过程中由建设单位或监理单位进行随工检查。

9.2.2 传感器验收内容应达到以下要求:

1 传感器安装位置应正确、牢固、端正,表面平整,与结构物接触紧密,应采取必要的防腐防护措施,信号线按要求连接到位;

2 应保证表贴式传感器的成活率为100%,埋入式传感器的成活率不低于95%;

3 传感器采集数据精度应满足桥梁安全评价与预警的需求;

4 传感器和线路的安装应不造成对桥梁的破坏,不影响桥梁的外观;

5 传感器布设应具有较好的防锈蚀、防老化和防人为破坏功能,并做好防雷、防盗等安全措施。

9.2.3 采集及传输设备验收内容应达到以下要求:

1 设备类型、型号、安装位置及质量应符合设计文件要求，设备标识齐全、牢固、清晰；

2 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；

3 出线管与箱体连接应密封良好，机柜内应无积水、尘土，机柜接地应连接可靠，接地引出线无锈蚀；

4 线缆敷设验收应符合设计以及现行国家标准《综合布线系统工程验收规范》GB 50312 和《电气装置安装工程电缆线路施工及验收标准》GB 50168 的有关规定。

5 防雷接地验收应符合设计、本标准及现行国家标准《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》GB 50169 的有关规定。

9.3 软件验收

9.3.1 软件验收包括数据采集与传输软件、数据处理与管理软件、用户界面软件等功能性验收，功能性检验宜采用实机操作演示。

9.3.2 系统功能性检验应包含以下内容：

1 对数据采集与传输软件功能完整性和一致性进行检查，正常采集、存储、转发监测数据，各项功能指标应满足设计文件要求；

2 对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，各项功能指标应满足设计文件要求；

3 对用户界面软件功能完整性和一致性进行检查，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；

4 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；

5 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；

- 6 提供系统完整的帮助文档和操作手册；
- 7 业主和设计单位的其它要求。

9.4 资料验收

9.4.1 资料验收应检查验收资料的齐全性、规范性和一致性，验收资料宜包含以下内容：

- 1 合同相关资料：合同协议书、合同谈判纪要等；
- 2 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、随工验收记录及签证、设备设施检验资料，监理资料（质量控制资料）、系统调试资料，有关会议纪要等；
- 3 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。

10 系统管理与维护

10.1 一般规定

10.1.1 应制定系统运维计划，建立设备运维台账、设备备件清单、列支系统年度维护（含备品备件）预算。

10.1.2 系统维护管理人员应掌握系统系统硬件性能、技术参数，熟练操作监测系统软件。

10.1.3 监测系统的日常检查、定期维护和异常处置应分别填写完整的记录表并存档，宜每半年编写系统运行维护与管理的总结报告并存档。

10.2 系统运维管理

10.2.1 系统运维管理应包括硬件设施和软件系统的日常检查、定期维护。

10.2.2 硬件设施的日常检查应符合下列规定：

1 维护人员应按照维护计划、巡查路线进行日常检查，宜结合桥梁日常巡查工作展开；

2 应对巡查路线上的监测设备外观完好性和稳固性进行检查，并对巡查情况进行记录并存档；

3 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运行状态进行检查，并对检查情况进行记录并存档；

4 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并存档；

5 对反复出现的异常问题应列入定期维护计划中。

10.2.3 硬件设施定期维护应符合下列规定：

1 硬件设施定期维护周期宜小于 6 个月；

2 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；

3 对传感器、线路、采集设备、摄像头等设备外观完好性进行检查，对设备及防护罩的外观、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；

4 对现场采集站、监控中心等易受灰尘影响的设备及机柜进行除尘处理；

5 检查静力水准仪或压力变送器设备的液位情况，定期补充连通管内液体至设计液位；

6 对定期维护发现的问题应在 24h 内快速响应并及时处置。

10.2.4 软件系统日常检查应符合下列规定：

1 软件系统宜每周进行一次检查；

2 日常检查内容包括各软件模块工作状态检查、实时数据及历史数据检查；

3 对超限报警信息进行检查确认，宜根据现场监控视频、图像等信息进行报警确认；

4 需要停机维护时，应在系统访问低谷时间段实施。

10.2.5 软件系统定期维护应符合下列规定：

1 软件系统定期维护周期宜小于 1 个月；

2 软件系统定期维护内容包括软件时间同步检查、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；

3 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。

10.3 系统异常处置

10.3.1 监测系统异常处置宜在异常发生后 24 小时之内进行，系统异常处置应根据系统报警和系统故障分别制定响应机制和应急措施。

10.3.2 系统异常响应机制应包括下列内容：

1 制定异常时间报告管理制度，规定异常事件的现场处理、事件报

告和后期恢复的管理职责；

2 根据系统的设计要求或异常事件对监测对象产生的影响程度，对异常事件进行分类和分级；

3 对不同的异常事件制定相应的响应方式，包括报告程序、报告对象和报告方式等。

10.3.3 系统异常应急措施应包括下列内容：

1 在统一的框架下制定不同异常事件的应急预案，框架包括：应急预案启动条件、应急处理流程、系统恢复流程、事后教育和培训等内容；

2 定期对系统相关人员进行应急预案培训和演练；

3 定期审查应急预案，根据实际情况对预案不断优化和完善。

10.3.4 桥梁遭遇台风、地震、洪水、地质灾害、极端气候、车船撞击等特殊事件后，应对软、硬件系统进行紧急排查，重点检查室外安装的各类设备的工作状态，评估其对系统功能和性能的影响程度，必要时进行专项维护以免影响结构安全监测系统的正常运行。

11 数据分析与应用

11.1 一般规定

11.1.1 数据分析与应用的功能宜与桥梁养护管理系统协同，宜与桥梁养护工作形成互补机制。

11.1.2 监测数据分析应结合桥梁养护管理、检测评估的数据开展，宜采用比对分析、统计分析、机器学习等方法。

11.1.3 应基于监测数据和监测数据的分析结果，对桥梁出现的异常状态进行实时报警。

11.1.4 应定期对桥梁日常运营监测数据进行分析，并形成定期监测数据分析报告。

11.1.5 当桥梁遭受自然灾害（洪水、泥石流、地震、海啸、台风等）、船舶或车辆撞击、火灾和特殊车辆过桥等突发事件时，应根据监测数据和现场检测结果对桥梁结构受损状况进行专项分析，形成专项评估报告。

11.2 数据分析

11.2.1 对监测数据宜按照作用与环境、结构响应和结构变化进行按需分析，分析方法可采用统计分析、趋势性分析、比对性分析、机器学习等。

11.2.2 数据分析应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、均方差、累计值等；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。

11.2.3 作用监测数据分析应符合下列规定：

1 车辆荷载监测数据分析内容应包括过桥车流量、车型、车牌、轴重、总重、超载车数量和时间等数据，并提取出日、月、年最大值及其统计分布；

2 宜将车辆荷载统计数据转化为疲劳荷载谱；对较重的车辆荷载数据统计分析时，宜同时统计与该车辆荷载相对应的结构动态挠度或动态应变数据；

3 风速风向监测数据应分析 10min 平均风速、风向和风玫瑰图；风压监测数据宜分析 10min 平均值和均方根值；

4 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；

5 船舶撞击和地震监测数据分析包括加速度峰值、持续时间、反应谱等。

11.2.4 环境监测数据分析符合下列规定：

1 温度监测数据分析应包括最高温度、最低温度、最大温差等；

2 湿度监测数据分析应包括最大值、平均值和超限持续时间等；

3 雨量监测数据宜分析 10min 平均降雨量；

4 结冰监测宜结合视频监控分析结冰位置、范围和程度。

11.2.5 结构响应监测数据分析符合下列规定：

1 结构振动监测数据分析应包括绝对最大值、最大均方根值、频谱、大幅度振动的持续时间，对风作用敏感的大跨度桥梁宜进行结构振动与风速风向的相关性分析；宜进行模态参数分析，包括结构频率、振型和阻尼比，模态分析应考虑温度和风速等环境变量和桥面车辆重量对自振频率和振型识别结果的影响；

2 主梁竖向和横向位移、塔顶和主缆偏位、高墩墩顶位移和拱顶位移监测数据应分析平均值、绝对最大值、均方根值及其随时间变化规律；应对主梁下挠、塔顶和主缆及主拱偏位、桥墩沉降等数据进行趋势分析；

3 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；

4 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；

5 主梁关键截面应变监测数据应分析平均值、绝对最大值、疲劳累积损伤指数等，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；

6 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等；监测索力宜与成桥索力、设计容许索力、破断索力以及定期检测索力进行对比分析；

7 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；

8 结构静态、动态位移和静态、动态应变数据宜与温度、车辆荷载、风荷载等进行相关性分析；宜结合车辆荷载、风荷载等进行结构计算和趋势分析。

11.2.6 结构变化监测数据分析应符合下列规定：

1 桥墩基础冲刷深度监测数据分析宜包括冲刷深度最大值、冲刷范围及其变化规律；

2 悬索桥锚碇位移、拱脚位移监测数据应分析其是否发生变化和变化量；

3 裂缝数据分析应包括裂缝长度和宽度的最大值、裂缝数量和位置及其变化规律，宜分析裂缝与荷载、环境和结构构造的相关性；

4 墩身、承台混凝土腐蚀监测数据分析宜包括氯离子浓度、侵蚀深度最大值、梯度及其变化趋势；

5 悬索桥主缆和吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆（索）和系杆断丝监测数据宜分析断丝位置和程度；

6 索夹螺杆紧固力、高强螺栓紧固力和螺栓脱落监测数据宜分析数量、位置、程度和变化趋势；

7 索夹滑移监测数据宜分析数量、程度和变化趋势；

8 体外预应力监测数据宜分析预应力变化程度和趋势。

11.2.7 不同监测类型监测内容之间、相同监测类型监测内容之间宜进行数据相关性分析，可采用机器学习或其他可靠方法。

11.2.8 桥梁日常运营状态的监测数据分析应定期形成分析报告，宜采用季报和年报的形式，报告内容宜包括：

1 桥梁概况、监测系统基本信息及监测方案、分析内容、分析结果、结论及建议等；

2 分析内容宜包括监测期内报警值、报警数据、比例、位置和时间等信息；监测期内监测变量的变化趋势、模态分析、相关性分析、疲劳分析等。

11.2.9 桥梁遭受洪水、泥石流、地震、海啸、台风等自然灾害、船舶或车辆撞击、火灾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，若结构状态发生变化，应对桥梁进行专项检查。

11.2.10 专项评估报告应包括突发事件发生概况、监测系统基本信息及监测方案、评估项目、评估方法、分析结果、结论及建议等。

11.3 特征数据样本和智能分析

11.3.1 监测系统宜设置统计阈值，当监测数据超过统计阈值时，监测系统应同步对各监测类型的监测数据进行标记和存储管理。

11.3.2 统计阈值应小于报警阈值，宜根据桥梁实际运行状况进行动态调整，统计阈值的设置可按表 11.3.2 进行选取。

表 11.3.2 统计阈值设定用表

监测类别	监测内容	统计阈值
作用	车辆总重或轴重	(0.6~1.0) 倍设计值
结构响应	主梁动态挠度	(0.6~1.0) 倍设计值
	结构动态应变	(0.6~1.0) 倍设计值
	塔顶偏位	(0.5~0.8) 倍设计值

续表 11.3.2

监测类别	监测内容	统计阈值
结构响应	主缆偏位	(0.5~0.8) 倍设计值
	墩顶位移	(0.5~0.8) 倍设计值
	支座位移、梁端纵向位移	(0.5~0.8) 倍设计值
	支座反力	(0.5~0.8) 倍设计值

注：1 表中主梁动态挠度是指在车辆荷载作用下主梁所发生的挠度相对变化值；结构动态应变是指在外部荷载作用下主要承重构件所发生的应变相对变化值。

2 表中车辆荷载、结构响应等参数的统计阈值，应根据桥梁结构实际运行状况进行动态调整。对于新建桥梁宜利用基于验收荷载试验等结构测试数据修正的有限模型计算理论值替代设计值，对于既有桥梁和技术状况较差的桥梁，应利用基于静力和动力测试结果修正的有限元模型计算理论值替代设计值。

11.3.3 特征数据样本应由一组表征桥梁某典型时刻运行状态的数据构成，宜包含车辆荷载及空间分布数据、环境数据、结构响应数据和经过预处理得到的特征值等。

11.3.4 特征数据样本库应采用实时数据库进行管理，应包含超限报警时刻的特征数据样本数据，特征数据样本库的数据应进行永久性储存。

11.3.5 宜采用机器学习等先进人工智能方法对特征数据样本库数据进行分析，开展桥梁结构异常状态识别、运营状态趋势分析和状态预测等探索研究。

11.4 超限阈值与报警

11.4.1 当监测数据超过各级超限阈值时应同步报警，报警功能应具备实时和自动报警功能，以及发布、调整和解除报警功能，并在监测系统软件界面展示报警信息。

11.4.2 报警应遵循下列原则：

1 桥梁日常运营过程中出现影响桥梁结构安全、行车安全的状况时，应进行报警；

2 桥梁遭受地震、船舶或车辆撞击、台风、风致异常振动等突发

事件时，应进行报警；

3 针对环境、作用、结构响应和结构变化真实监测数据予以报警，应排除监测系统自身故障引起的数据错误情况。

11.4.3 根据监测数据超限程度，将超限报警等级设定为三级，按表 11.4.3 的确定。

表 11.4.3 超限报警等级设定表

超限报警等级	颜色标识	级别描述
1	蓝色	监测指标异于日常数据的正常水平，接近或超过桥梁正常使用条件界限值，但不会对桥梁安全、正常使用和行车安全产生影响
2	黄色	监测数据超出桥梁正常使用条件限值，且可能对桥梁安全、正常使用和行车安全产生显著影响
3	红色	监测指标已超出设计允许和规范规定，或者严重影响桥梁安全、正常使用和行车安全

11.4.4 超限阈值应基于监测数据历史统计值、设计值和规范容许值，考虑监测数据动态特征、统计特性以及异常特征，兼顾桥梁定期检查及技术状况评定结果综合确定。

11.4.5 超限阈值应根据桥梁结构实际运行状况进行动态调整，当桥梁已进行承载力评定时，应采用基于相关测试结果修正的有限元模型计算理论值替代设计值。

11.4.6 作用与环境监测数据超限阈值设定应符合表 11.4.6 的规定。

表 11.4.6 作用与环境监测数据超限报警阈值设定表

报警类别	报警内容	超限阈值	超限级别	梁式桥		拱桥		斜拉桥	悬索桥
				简支梁	连续梁/连续刚构	上承式	中下承式		
环境	最高温度、最低温度、最大温差和最大温度梯度	大于 1.0 倍设计值	1	*	*	*	*	*	*
		大于 1.2 倍设计值	2	*	*	*	*	*	*

续表 11.4.6

报警类别	报警内容	超限阈值	超限级别	梁式桥		拱桥		斜拉桥	悬索桥
				简支梁	连续梁/连续刚构	上承式	中下承式		
环境	构件封闭空间相对湿度	大于 50%	1	●	●	●	●	●	●
	结冰	出现结冰	1	●	●	●	●	●	●
作用	车辆总重或轴重	大于 1.0 倍设计车辆荷载	1	●	●	●	●	●	●
		大于 1.5 倍设计车辆荷载	2	●	●	●	●	●	●
		大于 2.0 倍设计车辆荷载	3	●	●	●	●	●	●
	风速、风向	桥面 10 分钟平均风速大于 25m/s	1	●	●	●	●	●	●
		桥面 10 分钟平均风速大于 0.8 倍桥面设计风速	2	●	●	●	●	●	●
		桥面 10 分钟平均风速大于桥面设计风速	3	●	●	●	●	●	●
	混凝土、钢结构构件温度	大于 1.0 倍设计值	1	●	●	●	●	●	●
	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	1	●	●	●	●	●	●
	船舶撞击	发生船舶撞击	3	●	●	●	●	●	●
	桥岸地表场地震动加速度	达到设计 E1 地震作用加速度峰值	2	●	●	●	●	●	●
		达到设计 E2 地震作用加速度峰值	3	●	●	●	●	●	●

注：“●”表示应报警项；“●”表示宜报警项；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。车辆总重或轴重报警阈值参考《大跨度桥梁结构健康监测预警阈值标准》T/CECS529 的相关规定，其他报警阈值参考《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T 1037。表中车辆总重或轴重监测数据的超限阈值，应根据桥梁结构实际承载力状况进行动态调整。

11.4.7 结构响应监测数据超限阈值设定宜符合表 11.4.7 的规定。

表 11.4.7 结构响应监测数据超限报警阈值设定表

报警类别	报警内容	超限阈值	超限级别	梁式桥		拱桥		斜拉桥	悬索桥
				简支梁	连续梁/连续刚构	上承式	中下承式		
结构响应	主梁振动加速度	10 分钟加速度均方根达到 31.5cm/s^2 且持续时间超过 30 分钟	1	●	●	●	●	●	●
		10 分钟加速度均方根达到 50cm/s^2	2	●	●	●	●	●	●
		幅值持续增大、呈现发散特征	3	●	●	●	●	●	●
	主梁竖向位移	达到 0.8 倍设计值	2	●	●	●	●	●	●
		达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级报警	3	●	●	●	●	●	●
	主梁横向位移	达到 0.8 倍设计值	2	●	●	●	●	●	●
		达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级报警	3	●	●	●	●	●	●
	主梁动态挠度	大于 1.0 倍理论值	1	●	●	●	●	●	●
		大于 1.5 倍理论值	2	●	●	●	●	●	●
		大于 2.0 倍理论值	3	●	●	●	●	●	●
	主梁动态应变	大于 1.0 倍理论值	1	●	●	●	●	●	●
		大于 1.5 倍理论值	2	●	●	●	●	●	●
		大于 2.0 倍理论值	3	●	●	●	●	●	●
	支座位移	绝对值达到 0.8 倍设计值	2	●	●	●	●	●	●
		绝对值达到 1.0 倍设计值	3	●	●	●	●	●	●
	梁端纵向位移	绝对值达到 0.8 倍设计值	2	●	●	●	●	●	●
		绝对值达到 1.0 倍设计值	3	●	●	●	●	●	●
	索塔塔顶偏位	达到 0.8 倍设计值	2	—	—	—	—	●	●
		达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级报警	3	—	—	—	—	●	●
	主缆偏位	达到 0.8 倍设计值	2	—	—	—	—	—	●
		达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级报警	3	—	—	—	—	—	●
	梁桥高墩墩顶位移	达到 0.8 倍设计值	2	●	●	—	—	—	—

续表 11.4.7

报警类别	报警内容	超限阈值	超限级别	梁式桥		拱桥		斜拉桥	悬索桥
				简支梁	连续梁/连续刚构	上承式	中下承式		
结构响应	梁桥高墩墩顶位移	达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级报警	3	●	●	—	—	—	—
	拱桥主拱拱顶位移	达到 0.8 倍设计值	2	—	—	●	●	—	—
		达到设计值或一个月内出现 10 次以上二级报警	3	—	—	●	●	—	—
	主梁、索塔、主拱关键截面静态应变	超过历史最大值	1	●	●	●	●	●	●
		超过设计最不利工况计算值	2	●	●	●	●	●	●
	悬索桥吊索、锚跨索股力、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)、系杆等绝对索力	达到 0.95 倍设计限值	2	—	—	—	●	●	●
		达到设计限值或一个月内出现 10 次以上二级报警	3	—	—	—	●	●	●
	支座反力	绝对值达到 0.8 倍设计值	2	●	●	●	●	●	●
		绝对值达到 1.0 倍设计值	3	●	●	●	●	●	●
	悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)振动加速度	10 分钟加速度均方根达到 100cm/s^2	1	—	—	—	●	●	●
		10 分钟加速度均方根达到 300cm/s^2 且频繁出现	2	—	—	—	●	●	●

注：1 “●”表示应报警项；“●”表示宜报警项；“—”表示无报警项。超限阈值一列中的设计值参考了现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362、《公路悬索桥设计规范》JTG/T D65-05、《公路斜拉桥设计规范》JTG/T 3365-01、《公路钢管混凝土拱桥设计规范》JTG/T D65-06、《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T3360-01 的相关规定。

2 表中结构响应监测数据的超限阈值，应根据桥梁结构实际运行状况进行动态调整。对于新建桥梁宜利用基于验收荷载试验等结构测试数据修正的有限模型计算理论值替代设计值，对于既有桥梁和技术状况较差的桥梁，应利用基于静力和动力测试结果修正的有限元模型计算理论值替代设计值。

3 表中主梁动态挠度是指在车辆荷载作用下主梁所发生的挠度变化值；结构动态应变是指在外部荷载作用下主要承重构件所发生的应变变化值；应根据设计参数或经过实测数据修正的有限元模型计算得到。

11.4.8 结构变化监测数据超限阈值设定应符合表 11.4.8 的规定。

表 11.4.8 结构变化监测数据超限报警阈值设定表

报警类别	报警内容	超限阈值	超限级别	梁式桥		拱桥		斜拉桥	悬索桥
				简支梁	连续梁/连续刚构	上承式	中下承式		
结构变化	基础冲刷	达到 0.7 倍设计冲刷深度	2	●	●	●	●	●	●
		达到设计冲刷深度	3	●	●	●	●	●	●
	锚碇位移	锚碇水平位移大于 0.00005 倍主跨跨径, 锚碇竖向位移大于 0.0001 倍主跨跨径	2	—	—	—	—	—	●
		锚碇水平位移大于 0.0001 倍主跨跨径, 锚碇竖向位移大于 0.0002 倍主跨跨径	3	—	—	—	—	—	●
	拱脚位移	达到 0.8 倍设计限值	2	—	—	●	●	—	—
		大于 1.0 倍设计限值	3	—	—	●	●	—	—
	裂缝	出现结构性裂缝	1	●	●	●	●	●	●
		裂缝宽度超过规范限值或发展加速	2	●	●	●	●	●	●
	腐蚀	腐蚀深度达到保护层深度	2	●	●	●	●	●	●
	预应力	体外预应力相对损失超过 5%	2	●	●	—	—	●	—
		体外预应力相对损失超过 10%	3	●	●	—	—	●	—
	断丝	出现断丝	2	—	—	—	●	●	●
		断丝率达到 2%	3	—	—	—	●	●	●
	螺栓状态	个别螺栓轻微松动	1	●	●	●	●	●	●
		部分螺栓松动	2	●	●	●	●	●	●
		较多螺栓发生严重松动或少量脱落	3	●	●	●	●	●	●
	索夹滑移	索夹出现滑移	2	—	—	—	—	—	●
		索夹滑移严重或较多数量索夹出现滑移	3	—	—	—	—	—	●

注：“●”表示应报警项；“●”表示宜报警项；“—”表示无报警项。锚碇位移限值参考了现行行业标准《公路悬索桥设计规范》TG/T D65-05 的相关规定。裂缝限值参考了《公路桥涵养护规范》JTG 5120、《公路桥梁技术状况评定标准》JTG/T H21、《城市桥梁养护技术标准》CJJ 99 的相关规定。

11.4.9 监测数据分析结果超限报警为非同步报警，阈值设定宜符合表 11.4.9 的规定。

表 11.4.9 监测数据分析结果超限报警阈值设定表

报警类别	报警内容	超限阈值	超限级别	梁式桥		拱桥		斜拉桥	悬索桥
				简支梁	连续梁/连续刚构	上承式	中下承式		
监测数据分析结果	主梁涡振	10min 加速度均方根达到 31.5cm/s^2 、能量比因子大于 10	1	—	—	—	—	*	*
		10min 加速度均方根达到 50cm/s^2 、能量比因子大于 10	2	—	—	—	—	*	*
		10min 加速度均方根达到 80cm/s^2 、能量比因子大于 10	3	—	—	—	—	*	*
	钢结构疲劳	疲劳损伤指数达到 0.1	1	*	*	*	*	*	*
		出现较多疲劳裂缝或裂缝长度和宽度较大	2	*	*	*	*	*	*
	塔顶、主缆或主拱偏位	出现永久偏位	3	—	—	—	*	*	*
	主梁下挠	持续下挠	3	*	*	*	*	*	*
	墩台沉降	墩台均匀总沉降达到 $20\sqrt{L}\text{mm}$ ，或相邻墩台总沉降差值达到 $10\sqrt{L}\text{mm}$	3	*	*	—	—	—	—
	索力变化值	与成桥索力相比变化超过 10%	2	—	—	—	*	*	*
		与成桥索力相比变化超过 15%	3	—	—	—	*	*	*
	剔除环境影响的桥梁主要频率变化	超过 3%	2	*	*	*	*	*	*
		超过 5%	3	*	*	*	*	*	*

注：“*”表示应报警项；“●”表示宜报警项；“—”表示无报警项。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，参考《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T 1037 的相关规定。L 为相邻墩台最小跨径，单位为米（m）。

11.5 报警响应措施

11.5.1 监测系统报警功能应与桥梁养护管理制度形成协同机制，出现报警时应提醒桥梁养护管理单位进行桥梁检查、检测、特殊检测、交通管制、封闭桥梁等响应措施。

11.5.2 作用与环境监测数据超限报警时应提醒对桥梁构件和设施进行使用性检查，检查、检测建议见表 11.5.2。

表 11.5.2 作用与环境监测数据超限检查、检测建议

监测类别	监测内容	超限级别	检查、检测建议
环境	构件封闭空间相对湿度	1	检查除湿设备是否正常运转，检查钢构件锈蚀情况
	结冰	1	提示进行路面除冰措施
作用	车辆总重或轴重	3	对桥梁主要受力构件进行检测，并进行技术状况评估
	混凝土、钢结构构件温度	1	进行构件使用性检查
	桥面铺装层温度	1	进行洒水降温

11.5.3 结构响应监测数据超限报警时应提醒对桥梁结构进行功能性检查，检查、检测建议见表 11.5.3。

表 11.5.3 结构响应监测数据超限检查、检测建议

监测类别	监测内容	超限级别	检查、检测建议
结构响应	主梁振动加速度	2	对桥梁结构连接构件进行检查
	主梁竖向位移	2	对桥梁上部结构进行全面检查
	主梁横向位移	2	对桥梁上部结构进行全面检查
	主梁动态挠度	3	对桥梁主要受力构件进行检测，并进行技术状况评估
	主梁动态应变	3	对桥梁主要受力构件进行检测，并进行技术状况评估
	支座位移	2	检查支座工作状态
	支座反力	2	检查支座工作状态
	梁端纵向位移	2	检查伸缩缝工作状态
	索塔塔顶偏位	2	对全桥进行检查
	主缆偏位	2	对全桥进行检查
	梁桥高墩墩顶位移	2	对全桥进行检查

续表 11.5.3

监测类别	监测内容	超限级别	检查、检测建议
结构响应	拱桥主拱拱顶位移	2	对全桥进行检查
	主梁、索塔、主拱关键截面静态应变	1	对关键部位裂缝情况进行检测
		2	对传感器在所在构件进行特殊检测
	悬索桥吊索、锚跨索股力、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆（索）、系杆等绝对索力	2	对索体和锚固端进行检查
	悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆（索）振动加速度	1	提示管理部门注意
		2	检查减震设施的有效性

11.5.4 结构变化监测数据超限报警时应提醒对桥梁进行结构检测和性能评估，检查、检测建议见表 11.5.4。

表 11.5.4 结构变化监测数据超限检查、检测建议

监测类别	监测内容	超限级别	检查、检测建议
结构变化	基础冲刷	2	提示管理部门采取防冲刷措施
	锚碇位移	2	对全桥进行几何线形检测和技术状况评估
	拱脚位移	2	对全桥进行几何线形检测和技术状况评估
	裂缝	2	对构件进行特殊检测和技术状况评估
	腐蚀	2	对腐蚀区域进行特殊检测，并采取防腐措施
	预应力	2	进行桥梁结构检测和技术状况评估
		3	进行桥梁结构检测和承载力评估
	断丝	2	对索体进行特殊检测，并评估索体使用寿命
		3	对索体进行特殊检测，宜更换索体
	螺栓状态	2	对螺栓进行全面检测
	索夹滑移	2	对索夹紧固力进行检测

11.5.5 监测数据分析结果超限报警时应提醒对桥梁进行结构检测和承载力评估，检查、检测建议见表 11.5.5。

表 11.5.5 监测数据分析结果超限检查、检测建议

监测类别	监测内容	超限级别	检查、检测建议
监测数据 分析结果	钢结构疲劳	1	提示管理部门注意
		2	检查疲劳裂缝发展情况,进行技术状况评估
	塔顶、主缆或主拱偏位	3	进行桥梁结构检测和承载力评估
	主梁下挠	3	进行桥梁结构检测和承载力评估
	墩台沉降	3	进行桥梁结构检测和承载力评估
	索力变化值	2	提示管理部门注意
		3	进行桥梁结构检测和承载力评估
	剔除环境影响的桥梁主要频率变化	2	提示管理部门注意
		3	进行桥梁结构检测和承载力评估

11.5.6 桥梁在遭受涡振、强（台）风、索构件异常振动、地震、船撞、超重车过桥等特殊事件报警时,应提醒桥梁养护管理部门进行特殊事件数据分析和应急管理措施,应符合表 11.5.6 的规定。

表 11.5.6 特殊事件分析及应急措施

特殊事件	超限级别	特殊事件分析	应急措施
涡振	1	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、振动频率和模态参数变化等。	提示管理部门持续关注
	2		采取车辆限速等管理措施
	3		封闭桥梁,进行桥梁结构检测和承载力评估
强（台）风	1	分析风况条件,主梁、索构件振动加速度均方根值和模态参数变化,主梁位移、索塔偏位、主缆偏位、主拱顶位移、索力基准值变化等最大值。	提示注意行车安全,设计时速大于 60km/h 的大跨径桥梁宜封闭桥梁
	2		提示封闭桥梁,检查桥梁构件状态
	3		提示封闭桥梁,检查桥梁构件状态,进行桥梁结构检测和承载力评估
索构件振动加速度	2	分析索构件异常振动持续时间、风况条件、加速度和位移均方根值、振动频率、索力基准值变化、振动类型等。	检查索构件减振设施有效性

续表 11.5.6

特殊事件	超限级别	特殊事件分析	应急措施
地震	2	分析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；分析主梁静动态位移、支座位移、塔顶偏位、主缆偏位、高墩顶位移、主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、索塔、主拱、索构件等振动加速度峰值和均方根；分析震前震后桥梁模态参数变化。	对桥梁进行结构检测和技术状况评估
	3		封闭桥梁，对桥梁进行结构检测和承载力评估
超重车辆过桥	3	统计分析超重车辆荷载、发生时间、主梁竖向静动态位移、支座位移、主梁关键截面静动态应变、索力、支座反力等最大值；并结合修正的有限元模型进行结构承载力验算。	检查桥梁主要受力构件外观状况、结构材料缺损状况
船舶撞击	3	分析船舶撞击全过程视频监测数据，分析主梁、索塔顶、桥墩墩顶振动加速度，主梁横向位移、高墩墩顶位移、支座位移、主梁关键截面静动态应变、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。	封闭桥梁，对桥梁进行结构检测和承载力评估

注：特殊事件分析内容还应符合 JT/T 1037 相关规定。

11.6 状态评估

11.6.1 桥梁状态评估可采用基于监测数据分析的方法和基于精确结构力学模型分析的方法，评估桥梁健康状况。

11.6.2 基于监测数据的桥梁状态评估，宜根据车辆荷载、结构响应、结构变化、监测数据分析结果的超限情况，进行超限车辆通行状况评估和桥梁健康状况评估。

11.6.3 超限车辆通行状况评估宜根据车辆荷载超限等级和数量进行评估，评估周期为 1 天，宜通过监测系统数据处理软件实现智能化评估。

按下表 11.6.3 进行评定。

表 11.6.3 超限车辆通行状况评估用表

等级	等级描述	评定依据	运营对策
I	一般超限或无超限现象;对桥梁结构安全、正常使用和行车安全影响不显著	车辆荷载仅为 1 级超限或无超限	正常通车
II	车辆超限较严重:对桥梁结构安全、正常使用和行车安全有一定影响	车辆荷载 2 级超限次数小于 10 次	统计超限车辆信息
III	车辆超限严重:超限车辆频繁出现,影响桥梁结构安全、正常使用和行车安全	车辆荷载 2 级超限次数超过 10 次且未超过 20 次	向交管部门反馈重载车辆情况
IV	车辆超限特别严重:严重影响桥梁结构安全、正常使用和行车安全	车辆荷载 2 级超限次数超过 20 次,或 3 级超限超过 1 次	进行交通管制或封闭交通,对全桥进行检测评估

注:车辆荷载超限阈值和超限级别的设置应按表 11.4.6 执行。

11.6.4 超限车辆通行状况评估结果在Ⅲ级及以上等级时,宜将车辆荷载统计和模型转化为疲劳荷载谱,进行桥梁疲劳损伤评估。当评估为Ⅳ级时,应对桥梁结构进行进一步检测。

11.6.5 桥梁健康状况评估宜分为结构构件异常状况评估和结构整体健康度评估,按异常程度等级宜分为 I、II、III、IV 级。

11.6.6 结构构件异常状况评估宜根据表征结构构件工作状态的监测数据超限等级进行评定,结构构件及对应监测内容见表 11.6.6-1,评定依据见表 11.6.6-2。

表 11.6.6-1 表征结构构件工作状态的监测内容

构件名称	表征结构构件工作状态监测内容	超限等级		
		1	2	3
伸缩缝装置	梁端纵向位移	—	●	●
主梁、索塔、主拱等构件	主梁、索塔、主拱关键截面静态应变	●	●	—
主梁	主梁动态挠度、主梁动态应变	●	●	●
悬索桥吊索、主缆、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)、系杆	悬索桥吊索、锚跨索股力、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)、系杆等绝对索力	—	●	●
	断丝	—	●	●
支座	支座反力、支座位移	—	●	●

续表 11.6.6-1

构件名称	表征结构构件工作状态监测内容	超限等级		
		1	2	3
悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆（索）减震设施	悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆（索）振动加速度	—	●	●
主梁、索塔、主拱等构件	主梁、索塔、主拱等构件裂缝	●	●	—
高强螺栓	螺栓状态	●	●	●
索夹	索夹滑移	—	●	●
钢构件	钢结构疲劳	●	●	—

表 11.6.6-2 结构构件异常状况等级评定依据

等级	等级描述	评定依据	养护对策
I	基本完好	表 11.6.6-1 中所列构件对应的监测内容无超限	日常保养
II	轻微异常	表 11.6.6-1 中所列构件对应的监测内容超限等级最高为 1 级	保养小修
III	中等异常	表 11.6.6-1 中所列构件对应的监测内容超限等级最高为 2 级	针对性小修或局部中修工程
IV	严重异常	表 11.6.6-1 中所列构件对应的监测内容超限等级最高为 3 级	检测评估后进行局部中、大修或加固工程

11.6.7 结构构件异常状况评估，宜通过监测系统数据处理软件实现智能化实时评估。

11.6.8 结构整体健康度评估宜根据表征结构整体工作状态的监测数据与分析结果的超限等级和数量进行评定，监测内容见表 11.6.8-1，评定依据见表 11.6.8-2。

表 11.6.8-1 表征结构整体工作状态的监测内容

监测类型	表征结构整体工作状态监测内容	超限等级		
		1	2	3
结构响应	主梁振动加速度	●	●	●
	主梁竖向位移	—	●	●
	主梁横向位移	—	●	●
	索塔塔顶偏位	—	●	●
	主缆偏位	—	●	●
	梁桥高墩墩顶位移	—	●	●
	拱桥主拱拱顶位移	—	●	●

续表 11.6.8-1

监测类型	表征结构整体工作状态监测内容	超限等级		
		1	2	3
结构变化	基础冲刷深度	—	●	●
	锚碇位移	—	●	●
	拱脚位移	—	●	●
	体外预应力	—	●	●
监测数据分析结果	塔顶、主缆或主拱永久偏位	—	—	●
	主梁下挠	—	—	●
	墩台沉降	—	—	●
	索力变化值	—	●	●
	剔除环境影响的桥梁主要频率变化	—	●	●

表 11.6.8-2 结构整体健康度评估等级评定依据

等级	等级描述	评定依据	养护对策
I	基本完好	表 11.6.8-1 中所列监测内容无超限	日常保养
II	轻微异常	表 11.6.8-1 中所列监测内容超限等级最高为 I 级	保养小修
III	中等异常	表 11.6.8-1 中所列监测内容超限等级最高为 2 级；或多项结构构件异常等级为 III 级	针对性小修或局部中修工程
IV	严重异常	表 11.6.8-1 中所列监测内容超限等级最高为 3 级；或多项结构构件异常等级为 IV 级	检测评估后进行局部中、大修或加固工程

11.6.9 宜根据累积的历史监测数据统计分析、对比分析和趋势性分析结果、桥梁定期检测（查）结果，并与超限阈值比较，进行结构整体健康度评估。

11.6.10 宜通过修正后的有限元模型进行结构计算分析，并根据分析结果对桥梁健康状况评估结果进行修正。

11.6.11 当桥梁健康状况评估结果与依据现行行业标准《城市桥梁养护技术标准》CJJ 99、《公路缆索结构体系桥梁养护技术规范》JTG/T 5122、《公路桥涵养护规范》JTG 5120、《公路桥梁技术状况评定标准》JTG/T H21 评定的技术状况结果不一致时，可选用最不利评估结果。

附录 A 传感器主要参数指标

表 A.1 动态称重仪技术参数指标

项目		技术要求
称重范围		>300kN/轴
称重误差	压电薄膜传感器	$\leq \pm 10\%$
	石英晶体传感器	$\leq \pm 5\%$
速度范围		10km/h~200 km/h
测速误差		$\leq \pm 1.5\%$
分离车辆准确可靠度		$\geq 98\%$
交通量统计准确性		$\geq 95\%$
轴距误差		$\leq \pm 1\%$
可分类车型		交通部颁布的标准车型
可采集车辆信息		单轴重, 轴数, 轴组重, 总车重, 等效单轴负载, 轴间距, 总轴距, 车速, 车间距时间, 车流量, 车间距, 行驶方向, 跨道行驶车辆车道代码, 车辆分类, 时间和日期
视频摄像机		像素 ≥ 200 万 帧率 ≥ 25 FPS 动态范围 ≥ 55 dB 旋转: 水平 $0^\circ \sim 350^\circ$, 垂直 $15^\circ \sim -90^\circ$ 具备自动光圈、变焦镜头、昼/夜自动转换功能
技术指标应符合 GB/T 21296.1 的有关规定		

表 A.2 超声风速风向仪技术参数指标

项目	技术参数
风速测量范围	0m/s~60m/s
风速分辨力	≤ 0.01 m/s
风速测量误差	≤ 0.3 m/s
风向方位角测量范围	$0^\circ \sim 360^\circ$
风向分辨力	$\leq 0.1^\circ$

续表 A.2

项目	技术参数
风向测量误差	$\leq \pm 2^\circ$ (1 m/s ~30m/s), $\pm 5^\circ$ (30 m/s ~40m/s)
采样频率	$\geq 10\text{Hz}$

表 A.3 机械式风速风向仪技术参数指标

项目	技术参数
风速测量范围	0m/s~60m/s
风速测量误差	$\leq \pm 0.3\text{m/s}$
风向方位角测量范围	$0^\circ \sim 360^\circ$
风向测量误差	$\leq \pm 3^\circ$
采样频率	$\geq 1\text{Hz}$

表 A.4 风压计技术参数指标

项目	技术参数
测量范围	0 hPa~10 hPa
测量误差	$\leq 0.5\%F \cdot S$
分辨力	0.01 hPa
采样频率	$\geq 10\text{Hz}$
适用环境	雷雨环境

表 A.5 强震仪、力平衡式加速计技术参数指标

项目	技术参数
灵敏度	$\geq \pm 0.125 \text{ V/ (m/s}^2\text{)}$
满量程输出	$\pm 2.5 \text{ V}$
频率响应	0 Hz~80 Hz
动态范围	$\geq 120 \text{ dB}$
线性度误差	$\leq 1\%$
技术指标宜符合 DB/T10 相关规定	

表 A.6 温度传感器技术参数指标

项目	技术参数
测量范围	-30℃~+85℃，且满足 5.5.5 条规定
环境温度误差	$\leq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$
结构温度误差	$\leq \pm 0.2^{\circ}\text{C}$

表 A.7 湿度传感器技术参数指标

项目	技术要求
测量范围	0~100%RH
测量误差	$\leq \pm 2\%\text{RH}$
稳定性	<1% (RH/年)

表 A.8 路面温度传感器技术参数指标

项 目	技术参数
测量范围	-20℃~+100℃
精 度	$\pm 2^{\circ}\text{C}$

表 A.9 雨量计技术参数指标

项 目	技术参数
分辨力	$\leq 0.1\text{mm}$
误 差	$\leq 4\% \text{ F}\cdot\text{S}$

表 A.10 加速度传感器技术要求参数

项 目	力平衡加速度计	电动式加速度计	ICP 压电加速度计
灵敏度	$\pm 0.125\text{V/m/s}^2$	$\pm 0.3\text{V/m/s}^2$	$\pm 0.1\text{V/m/s}^2$
满量程输出	$\pm 2.5\text{V}$	$\pm 6\text{V}$	$\pm 5\text{V}$
频率响应	0~80Hz	0.25~80Hz	0.3~100Hz
动态范围	$\geq 120\text{dB}$	$\geq 120\text{dB}$	$\geq 110\text{dB}$
线性度	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$
运行环境温度	-10~+50℃	-20~+50℃	-10~+50℃
信号调理	线性放大，积分	线性放大，积分	ICP 调理放大

表 A.11 速度传感器技术要求参数

项 目	技术参数
灵敏度	$\pm 1 \sim 25 \text{ V/(m/s)}$ (可调)
满量程输出	$\pm 5 \text{ V}$
频率响应	$0.1 \sim 100 \text{ Hz}$ (可调)
动态范围	$\geq 120 \text{ dB}$
线性度	$\leq 1\% \text{FS}$
运行环境温度	$-20 \sim +50 \text{ }^{\circ}\text{C}$
信号调理	线性放大、积分、滤波

表 A.12 压力变送器技术要求参数

项目	技术指标
量程范围	0~6m 水柱 (可定制)
测量误差	$\leq 0.5 \text{ mm}$
过压影响	$\leq 0.025\% \text{FSR}/16 \text{ MPa}$
稳定性	$\leq 0.1\% \text{FRS}/60 \text{ 个月}$
技术指标应符合 JJG 882 的相关规定	

表 A.13 静力水准仪技术要求参数

项目	技术指标
量程范围	0~150mm (可定制)
测量误差	$\leq 0.5 \text{ mm}$
分辨力	$\leq 0.025\% \text{FSR}$

表 A.14 GNSS 接收机技术要求参数

项目	技术参数
静态测量误差	水平方向: $\leq 3 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$
	垂直方向: $\leq 5 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$
动态测量误差	水平方向: $\leq 10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$
	垂直方向: $\leq 15 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$
技术指标应符合 GB/T39410 相关规定	

表 A.15 位移传感器性能指标

项目	技术参数（小量程）	技术参数（中量程）	技术参数（大量程）
测量范围	0~2mm	0~300mm	50~7600mm
线性度	$\leq 0.25\% \text{ FS}$	$< 0.25\% \text{ FS}$	$< 0.05\% \text{ FS}$

表 A.16 光电挠度仪技术要求参数

项目	技术指标
测量距离	1m~500m（可定制）
测量误差	$\leq \pm 0.1\text{mm}$ （ $\leq 10\text{m}$ ） $\leq \pm 0.5\text{mm}$ （ $\leq 50\text{m}$ ） $\leq \pm 2\text{mm}$ （ $\leq 100\text{m}$ ） $\leq \pm 10\text{mm}$ （ $\leq 500\text{m}$ ）
采样频率	$\geq 20\text{Hz}$

表 A.17 振弦应变传感器性能指标

项目	技术指标
标准量程	$\pm 1500\mu\epsilon$
线性度	直线： $\leq 1\% \text{ F} \cdot \text{S}$ ，多项式： $\leq 0.1\% \text{ F} \cdot \text{S}$
技术指标应符合 GB/T3408.2 的相关规定	

表 A.18 电阻应变传感器性能指标

项目	技术指标
标准量程	$\pm 3000\mu\epsilon$
线性度	$\leq 2\% \text{ F} \cdot \text{S}$
灵敏度	$500\mu\epsilon/\text{mV/V}$
技术指标应符合 GB/T13992 的相关规定	

表 A.19 光纤应变传感器性能指标

项目	技术指标
标准量程	$\pm 1500\mu\epsilon$
线性度	$\leq 1\% \text{ F} \cdot \text{S}$
灵敏度	$0.1\% \text{ F} \cdot \text{S}$
技术指标应符合 JG/T422 的相关规定	

表 A.20 裂缝计技术要求参数

项 目	技术要求
量程	1~10mm（可选）
分辨力	0.01mm
误差	$\leq \pm 1\%FS$

表 A.21 倾角传感器性能指标

项目	技术指标		
轴数	2（X-Y）	2（X-Y）	2（X-Y）
量程	$\pm 3^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 15^\circ$
误差	$\leq \pm 0.001^\circ$	$\leq \pm 0.005^\circ$	$\leq \pm 0.006^\circ$

表 A.22 索力加速度传感器性能指标

项目	技术参数
测量方向（轴数）	1
测量范围	$\pm 2g$
灵敏度	$\geq 1V/g$
频响范围	0.1~80Hz

表 A.23 摄像机技术要求参数

项目	技术要求
图像传感器	≥ 200 万像素
最低照度	彩色：1.4Lux @ (50IRE) 黑白：0.15Lux @ (50IRE)
最大图像尺寸	1920×1080
主码流分辨率及帧率	50Hz:25fps(1920×1080)、25fps(1280×960)、25fps(1280×720) 60Hz:30fps(1920×1080)、30fps(1280×960)、30fps(1280×720)
网络协议	IPv4/IPv6, HTTP, HTTPS, 802.1x, FTP, PPPoE

附录 B 采集设备性能要求

表B.1 通用型数据采集模块性能指标要求

项目	技术指标
信号输入范围	4-20mA/0-5 Vdc
分辨率	24bits
采样频率	10Hz(Total)
采样误差	电流 $\leq \pm 0.1\%$ ，电压 $\leq \pm 0.05\%$

表 B.2 振弦数据采集模块性能指标要求

项目	技术指标
频率误差	0.05%
温度误差	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
频率分辨率	0.01Hz
温度分辨率	0.1 $^{\circ}\text{C}$

表 B.3 电阻应变计采集模块性能指标要求

项目	技术指标
分辨率	24bits
输入范围	$\pm 2.5\text{V}$
桥接方式	1/4桥、半桥和全桥
测量范围	$\pm 3000\mu\epsilon$
调平范围	$\pm 3000\mu\epsilon$
零点漂移	$\pm 0.1\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ ； $\pm 0.5\mu\epsilon/24\text{h}$
灵敏度变化	$\pm 0.05\%/^{\circ}\text{C}$ ； $\pm 0.3\%/24\text{h}$
导线电阻	自动修正

表 B.4 振动数据采集模块性能指标要求

项目	技术指标
分辨率	24bits
输入范围	$\pm 2.5V$
程控放大	10、20、40、100倍
程控滤波	0.05~10、20、50Hz
抗混叠滤波	支持

表 B.5 光纤解调仪性能指标要求

项目	技术指标
波长范围	$\geq 40nm$ @C-Band
测量误差	2pm
分辨率	0.1pm
扫描频率	100Hz

本标准用词说明

- 1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的用词：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
 - 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
 - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
 - 4) 表示允许有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。
- 2 条文中指明应按其它有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《电气装置安装工程电缆线路施工及验收标准》 GB 50168
- 2 《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》 GB 50169
- 3 《钢结构工程施工质量验收标准》 GB 50205
- 4 《建筑电气施工质量验收标准》 GB 50303
- 5 《综合布线系统工程验收规范》 GB 50312
- 6 《建筑物电子信息系统防雷技术规范》 GB 50343
- 7 《建筑与桥梁结构监测技术规范》 GB 50982
- 8 《计算机软件文档编制规范》 GB/T 8567
- 9 《计算机软件测试规范》 GB/T 15532
- 10 《信息安全技术 信息系统通用安全技术要求》 GB/T 20271
- 11 《动态公路车辆自动衡器 第1部分:通用技术规范》 GB/T 21296.1
- 12 《信息安全技术 网络安全等级保护定级指南》 GB/T 22240
- 13 《交通信息采集.视频交通流检测器》 GB/T 24726
- 14 《信息安全技术 云计算服务安全指南》 GB/T 31167
- 15 《信息安全技术 云计算服务安全能力要求》 GB/T 31168
- 16 《公路交通气象监测设施技术要求》 GB/T 33697
- 17 《无损检测电化学检测总则》 GB/T 38894
- 18 《低轨星载 GNSS 测量型接收机通用规范》 GB/T 39410
- 19 《公路桥梁技术状况评定标准》 JTG/T H21
- 20 《公路桥梁荷载试验规程》 JTG/T J21
- 21 《公路桥涵设计通用规范》 JTG D60
- 22 《公路悬索桥设计规范》 JTG/T D65-05
- 23 《公路钢管混凝土拱桥设计规范》 JTG/T D65-06
- 24 《城市桥梁养护技术标准》 CJJ 99

- 25 《压力变送器检定规程》 JJG 882
- 26 《公路桥梁结构监测技术规范》 JT/T1037
- 27 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》 JTG 3362
- 28 《公路桥梁抗风设计规范》 JTG/T 3360-01
- 29 《公路斜拉桥设计规范》 JTG/T 3365-01
- 30 《公路桥涵养护规范》 JTG 5120
- 31 《公路缆索结构体系桥梁养护技术规范》 JTG/T 5122
- 32 《数字强震动加速度仪》 DB/T 10

山东省工程建设标准

桥梁智慧健康监测技术标准

DB37/T 5245—2022

条文说明

目 次

1	总 则	90
2	术 语	91
3	基本规定	92
4	系统设计	93
4.1	一般规定	93
4.2	传感器模块	93
4.3	数据采集与传输模块	93
4.4	数据处理与管理模块	94
5	监测内容与方法	96
5.1	一般规定	96
5.2	作用与环境监测	96
5.3	结构响应监测	97
5.4	结构变化监测	98
5.5	监测方法	98
5.6	数据采集方法	99
10	系统管理与维护	100
10.1	一般规定	100
11	数据分析与应用	101
11.2	数据分析	101
11.3	特征数据样本和智能分析	102
11.4	超限阈值与报警	104
11.5	报警响应措施	105

1 总 则

1.0.1 桥梁结构在长期服役过程中,受环境侵蚀、材料老化和荷载长期效应、疲劳效应与突变效应等因素的耦合作用下,将不可避免的导致结构和系统的损伤累积和抗力衰减,极端情况下引发灾难性的突发事件。结构健康监测技术被普遍认为是提高工程结构健康与安全及实现结构长寿命和可持续管理的最有效途径之一,随着与物联网、云计算、5G通讯、人工智能与大数据等新技术结合应用,桥梁结构健康监测技术日趋智能化,在公众对桥梁结构安全性日益关注的背景下,开展桥梁健康监测已成为行业发展到一定阶段的内在需求。为规范山东省城市桥梁健康监测的系统设计、实施、验收、运营维护、数据管理和监测应用,制定本标准。

1.0.2 本条明确了本标准适用于山东省行政区内城市桥梁健康监测。

1.0.4 本条明确了本标准与其他相关标准规范的关系。开展桥梁健康监测时,除应符合本标准的要求外,尚应符合国家和山东省现行有关标准的规定。

2 术 语

2.1.1 本条对桥梁智慧健康监测系统进行了定义,明确了监测系统应实现自动化报警和智能化评估的功能。

2.1.9 用于触发数据标记功能而设定的阈值。

2.1.12 由某类型监测数据超过统计阈值时系统所标记的各类监测数据组成。

3 基本规定

3.0.1 条款 1.1) 参考现行行业标准《城市桥梁养护技术标准》 CJJ 99-2017 第 3.0.3 条规定 I 类养护是指跨径大于 100m 的桥梁及特殊结构的桥梁,第 4.3.12 条, I 类养护的城市桥梁应设立自动化监测系统。特殊结构桥梁指结构受力复杂和在养护方面有特殊要求的桥梁,指系杆拱桥、悬索桥和斜拉桥等。条款 1.2) 中的“技术状况等级”是依据现行行业标准《城市桥梁养护技术标准》 CJJ 99, 对 II 类~III 类养护的城市桥梁以桥梁状况指数 BCI 确定的桥梁技术状况。条款 2.1) 中出现的大跨径桥梁的定义遵循我国现行桥梁设计规范的规定。条款 2.2) 中出现的重要桥梁是指设计安全等级为一级的桥梁。

桥梁改扩建和大中修后,桥梁的通行等级、荷载等级等通常会提高,可根据改扩建和大中修方案,选择关键桥段进行针对性监测。对于一些早期建设的大型复杂桥梁,没有设置监测系统或设置的简单监测系统不满足监测需求的,可以考虑设置或改造监测系统。

3.0.5 基于云计算和时序数据库技术的监测系统平台,一方面可以大大降低系统平台的初期建设和运维成本,另一方面,可以有效解决传统监测系统无法处理高频动态监测方式带来的海量数据管理问题。在上述基础上,结合人工智能与大数据技术针对海量、冗余、复杂的监测数据,开展智能化的数据处理,建立智能化桥梁结构安全预警系统。

3.0.9 报警是桥梁结构监测系统的重要功能之一。当桥梁环境、运营状态异常导致监测数据出现异常时,监测系统及时给出警示,提醒桥梁管理部门。当桥梁遭受地震、洪水、台风、船撞等突发事件后,监测系统可以回溯桥梁突发事件的全过程,通过对数据的分析,获得桥梁遭遇特殊事件后的状态,为桥梁管理部门制定突发事件后的应急管理方案提供技术支持。

4 系统设计

4.1 一般规定

4.1.1 桥梁结构健康监测系统的设计应立足于长期规划,结合实际桥梁的结构特点和使用环境,考虑不同时期(结构施工、运营、维修加固等阶段)对结构安全监控的需求,为结构设计验证、结构模型校正、结构损伤识别、结构养护和维修以及新方法、新技术的应用提供支持。系统设计应做到安全可靠、效费合理、方案可行、便于维护。

4.1.2 系统设计的重点作为监测内容与测点布设、系统选型集成与软件开发部署设计和数据应用,均体现在详细设计中。系统的设计涉及到传感、通讯、数据管理、结构分析理论和决策理论等多个专业领域,最终的设计方案应经过专家评审后进行实施。

4.2 传感器模块

4.2.1 在工程项目实践中,“监测内容选取、传感器的类型及技术参数”通常在设计说明中明确,“测点布设及安装施工设计”通常包括传感器总体布置图、分类布置图及各传感器安装详图等。

4.2.2 本条文的技术要求与现行行业标准《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T 1037-2022 第 5.4 条规定一致。对于埋入式传感器,建议同时布设与其监测数据强相关的表贴式传感器,便于通过相关性分析建立埋入式传感器与表贴式传感器监测数据之间的对应关系,以备埋入式传感器失效后,表贴式传感器能继续“接力”监测,从而保障监测数据的连续性和一致性。

4.3 数据采集与传输模块

4.3.1 在工程项目实践中,“信号调理方案”、“数据采样方案”、“数

据采集设备选型与接口匹配性要求”、以及“配套软件功能”等内容通常在设计说明中明确；“数据传输网络与路由设计”通常包括传感器与数采设备索引表和电缆布置图、系统网络拓扑图、采集站位置与安装详图（包括各采集站机柜中数采与通信设备的布置）、采集与传输软件模块构成图、以及在桥梁结构上的开孔和走线图。

4.3.9 对时间同步精度要求不高的设备，可支持 NTP 时钟同步功能以保持与远程服务器的时钟同步。如设备之间需要高精度的时钟同步，可采用北斗卫星导航时钟同步技术。

4.4 数据处理与管理模块

4.4.2 由于环境因素影响以及硬件设备自身稳定性的原因，监测系统采集的监测数据时常会出现数据异常，包括数据缺失、数据飘移、长周干扰、非一致异点（跳点）、干扰噪声、及其他难以快速识别和消除的数据异常等，这些异常数据将严重影响监测数据分析结果的准确性，因此，在数据分析应用前，需进行数据预处理，包括异常数据识别、错误数据剔除等，由于数据量较大，宜采用基于深度学习的方法进行处理。

4.4.4 数据融合技术是指利用计算机对按时序获得的多种监测数据，在一定准则下加以自动分析、综合，以完成所需的决策和评估任务而进行的信息处理技术。利用该技术可将动态称重系统获取的车辆荷载信息、视频识别获取的车辆轨迹信息以及桥梁结构响应信息，在时域和空间上进行整合，便于进行结构受力状态评估分析。宜采用计算机视觉、自然语言处理等方法对多源异构数据中的非结构化数据进行处理。

4.4.5 桥梁现场数据采集站应采用循环更新存储方式，在网络中断情况下，本地数据存储空间应满足结构化原始数据大于等于 90d 数据量的要求，满足非结构化视频图像数据大于等于 30d 数据量的要求。

4.4.7 桥梁结构信息主要包括：桥梁设计、竣工图纸以及科研专题研究

资料等基本信息，以及桥梁结构有限元模型标准格式文件，并根据监测（检测、桥梁维修）数据分析结果定期进行修正。

监测系统信息主要包括：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，以及对应的设备厂商、安装位置、技术参数、品牌和规格等。

监测数据包括监测系统实时监测的原始数据、分析数据和应用数据；分析数据是指采用统计方法、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；应用数据是指超限报警、评估、分析结果等数据。

考虑数据量增长对数据存取的压力，基于数据安全和存取效率，宜探索采用读写分离、视图机制、分布式存储、时序数据库等方式。对于所有格式的办公文档、文本、图片、XML、HTML、各类报表、图像和音频/视频信息等非结构化数据，应设计完整的存入、检索、导出功能，设置适宜存储资源进行存储管理，不同数据类型应分类建立单独的存储目录结构。

5 监测内容与方法

5.1 一般规定

5.1.3 环境监测内容主要包括桥址环境温度、湿度、降雨量、结冰、桥位处水文地质灾害风险指标等影响桥梁安全和功能的自然环境因素；作用监测内容主要包括车辆荷载、结构温度、风速风向、风压、地震动、船舶（或漂流物）撞击等桥梁所受的直接或间接荷载；结构响应内容主要包括位移、转角、应变、索力、支座反力、结构振动等由作用引起的桥梁结构的静力或动力响应；结构变化内容主要包括基础冲刷、变位、裂缝、腐蚀、断丝等桥梁结构的几何形态、表观、结构性能发生的相对变化。

5.1.4 测点位置和数量应依据桥址环境、所受作用分布、结构构造特点、结构静力和动力特性、结构病害分布等因素综合确定，应满足监测参数分析和结构状态评估需求。测点位置选取时应根据桥梁结构的受力分析结果对测点布设方案进行优化，选取的测点数据应与理论分析结果建立对应关系；宜对结构构件进行重要性、危险性和易损性分析，并将分析结果作为测点布设方案优化的参考指标；对施工过程中发生过质量安全事故，经检测、处理与评估后恢复施工或使用的桥梁部位应考虑布设对比测点；测点数量和数采设备接入能力应具有适度冗余，以确保系统的可靠性，并满足系统未来改进、扩充和升级的需要。

5.2 作用与环境监测

5.2.4 关于航道等级的相关规定，请参照现行国家标准《内河通航标准》GB 50139。区域入侵自动识别视频监控系统可在船只偏离航道进入危险水域时自动识别，并通过声光发生装置提醒驾驶人员，避免事故发生或降低事故损失。

5.2.5 地震动监测应根据桥梁抗震设计要求和安全风险评估结论进行监测，应测量地表振动。地震动监测数据除直接用于安全预警外，也可作为震后桥梁结构安全专项评估提供基础。

5.2.7 环境温度和结构温度的实测数据一般不直接用于安全预警，作为结构受力和变形分析的重要输入参数。

湿度的实测数据一般不直接用于安全预警，湿度监测主要从桥梁结构耐久性角度考虑。主要在钢结构主要承重构件（钢箱梁、钢拱箱、钢桥塔、主缆以及鞍罩等）封闭空间内部、设置钢结构主要承重构件的混凝土结构（箱梁拉索锚固区、桥塔拉索锚固区、锚碇等）封闭空间内部布置湿度测点，以便在封闭箱室内湿度超过设计或规范限值时提醒桥梁管养单位检修或增设除湿系统，以确保桥梁结构长期安全。

5.2.8 山东省重要地质灾害隐患点情况和重要地质灾害隐患点分布，可参考山东省自然资源厅每年发布的《山东省年度地质灾害防治方案》。

5.3 结构响应监测

5.3.1 结构振动测点的布设可参考现行行业标准《公路桥梁荷载试验规程》JTG TJ21 的相关规定，桥梁自振特性应包括竖平面内弯曲、横向弯曲以及扭转自振特性。简支梁桥宜至少监测竖向 1 阶振型，非简支梁、拱桥宜监测 3 阶振型，对墩高超过 50 米的梁桥可增设水平向拾振器，监测桥梁纵向及横向低阶振动，斜拉桥、悬索桥宜监测 9 阶振型。

5.3.2 受地灾或洪水威胁的桥跨，安全监测应关注的主要风险是由于基础承载能力不足或下部结构失稳导致的桥梁整体坍塌，以及上、下部结构间相对位移过大导致落梁的风险。除监测地灾和冲刷风险本身外，还可监测墩台倾斜度、墩顶偏位、及墩梁间相对位移等结构整体响应指标。

5.3.4 应变监测测点的选择，应根据结构计算分析和易损性分析结果，选择受力较大、易破坏或破坏后易导致结构整体失稳的关键构件、截面

和部位进行监测；用于监测永久作用下结构应变的传感器，应在桥梁新建或加固改造过程中，承重构件尚未承受恒载前预先埋设在关键截面测点处。

5.4 结构变化监测

5.4.3 结构自振频率宜采用 25℃时的频率，不同温度下的自振频率宜根据结构第一年监测数据得到的自振频率与温度的对应关系进行转化，并与第一年 25℃频率对比，得到变化百分比。

5.5 监测方法

5.5.10 振动监测前，宜进行结构动力特性测试，动态响应监测时，测点应选在桥梁结构振动敏感处；当进行动力特性分析时，振动测点宜布置在需识别的振型关键点上，且宜覆盖结构整体，也可根据需求对结构局部增加测点；测点布置数量较多时，可进行优化布置。

5.5.11 主跨跨径大于等于 500m 悬索桥、300m 斜拉桥、200m 拱桥的主梁竖向和横向位移、塔顶偏位、主缆偏位、主拱顶偏位等变形量较大，在满足监测精度要求条件下宜采用 GNSS 监测技术进行监测。

为避免 GPS 系统不可用带来的风险，宜将 BDS 系统由辅助地位上升为主导地位，并研制基于 BDS 系统的 RTK 处理平台，通过 CORS 基站系统对 BDS 数据进行实时处理和修正，向用户提供全时段、全区域、高精度的 BDS 位置服务，对移动信号覆盖较弱的跨海、跨无人区和跨荒漠桥梁，应新建数据中心和连续运行的 CORS 参考站，每个参考站信号覆盖范围宜小于 10km。

主跨跨径小于 500m 悬索桥、300m 斜拉桥、200m 拱桥和梁桥主梁竖向静态挠度宜采用基于连通管原理的压力变送器，主梁竖向、横向动态挠度宜采用光电挠度仪、激光挠度仪等，采样频率应满足数据处理和

应用的要求；中小跨径桥梁在车辆活荷载作用下主梁挠度响应时间较短，为有效监测主梁变形时程曲线，宜优先采用动态位移监测方式，采样频率不宜小于 30Hz，同理，中小跨径桥梁宜优先选用动态应变监测方式，采样频率不宜小于 30Hz。

5.5.13 振动频率法监测索力的加速度传感器频响范围应覆盖索体振动基频，采用实测频率推算索力时，应将拉索及拉索两端弹性支承结构整体建模共同分析。

5.5.14 测力支座的技术要求应在主体结构设计文件中明确。

5.6 数据采集方法

5.6.1 对于长大桥梁空间尺度大、监测断面距离较远、测点较为分散，宜选择分布式数据采集方式，多孔长大桥梁宜根据桥梁特点选择分布式或集中式和分布式相结合的数据采集方式，中等规模桥梁宜选择集中式采集方式。

5.6.2 采样定理是连续时间信号（通常称为“模拟信号”）和离散时间信号（通常称为“数字信号”）之间的基本桥梁。时域采样定理的另一种表述方式是：当时间信号函数 $f(t)$ 的最高频率分量为 f_M 时， $f(t)$ 的值可由一系列采样间隔小于或等于 $1/(2f_M)$ 的采样值来确定，即采样点的重复频率 $f \geq (2f_M)$ 。

5.6.4 光纤光栅解调仪的工作环境温度范围一般为 $0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ ，根据实际情况当不满足条件时应为其配置温控机柜。

10 系统管理与维护

10.1 一般规定

10.1.1 为保证监测系统的长期稳定运行,应考虑各个方面的影响因素,针对可能存在或已经存在的影响因素,宜根据监测项目特点,制定一套完备的系统维护与管理办法,包括监测系统运行、故障排查、维护和管理操作规程。

10.1.2 由于监测系统的复杂性,系统维护管理人员应掌握传感器、采集设备等硬件的相关原理、性能和技术参数,并熟悉监测系统软件的各个模块功能,对系统出现的故障能够及时进行故障判断和处理,并能采取相应的措施避免类型故障重复发生。

11 数据分析与应用

11.2 数据分析

11.2.1 由于桥梁结构的复杂性、监测数据类型的多样性，难以对监测数据分析标准化，因此建议将监测数据按照作用与环境、结构响应和结构变化进行划分，对每一类数据进行分析；根据桥梁状态评估的需求，还应对不同类型监测数据进行相关性分析、对比分析和趋势性分析；对于海量数据，宜采用机器学习等方法进行深入分析。

11.2.3 超载车辆是影响桥梁结构安全的最大隐患，应着重关注超载车辆的数量、车型、车重以及载货类型等荷载信息。在进行桥梁疲劳损伤评估时，可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。

在车辆荷载识别、挠度或应变监测数据精度足够的情况下，宜结合较重的车辆荷载数据及其作用下产生的挠度（或应变）响应数据，分析结构刚度（或强度）的变化趋势。

11.2.5 分析结构变形包括平均值和绝对最大值，宜进行挠度和温度、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。分析梁端位移与支座位移，包括绝对最大值和累积位移，宜进行梁端位移、支座位移与温度和车辆荷载相关性分析。分析加速度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。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统计法和 Miner 线形损伤理论计算疲劳损伤指数。可采用机器学习等方法深入分析监测数据，提取数据中可以反映桥梁状态的数据特征，用于桥梁状态评估。

11.2.7 监测数据相关性分析宜采用线性相关系数、相关函数、相干函

数等指标,也可采用机器学习等人工智能方法。宜根据相关性分析结果,判断桥梁状态是否发生变化。

11.2.10 对于大跨度悬索桥、斜拉桥遭受台风、强风时,桥梁易产生显著的静力变形和动力响应,应对自由场风场参数、桥梁变形和振动特征进行专项分析。

当桥梁遭受地震灾害时,应进行专项分析和评估,分析内容包括震中数据分析评估与震前、震后数据对比分析评估两部分。震中数据分析主要关注桥梁自由场和桥墩墩底的地震动输入以及桥梁结构在地震过程中的位移、加速度、应变和内力的峰值响应。地震动分析主要关注地震动加速度峰值、均方值和反应谱,将分析结果与桥梁设计地震动进行比较。桥梁结构的位移、应变和内力极值与桥梁结构/构件的设计允许值进行对比。桥梁震前和震后监测数据分析主要关注于桥梁频率和振型的变化、关键受力构件内力变化、以及由于地震产生的桥梁残余位移和应变。对于跨径或总长大于 500m 的桥梁,地震动输入时宜考虑地震行波效应。

当有超重车辆过桥时,宜将监测的桥梁变形、支座反力、构件内力等响应与设计值或基于修正的结构模型计算的理论值进行比较,当监测数值与计算数值存在较大差异时,预示桥梁可能发生了损伤,宜对桥梁进行进一步检测。

11.3 特征数据样本和智能分析

11.3.1 由于监测数据类别的多样性(包括静态数据、动态数据、振动数据等结构响应数据,图像和视频数据,车辆荷载数据,环境数据等等)以及数据量巨大,在有效数据的获取、多类型数据融合、海量数据人工分析等方面存在较大的困难;为解决以上问题,在桥梁日常运营监测过程中,设置某个典型参数的阈值(小于报警阈值),当该参数的监测数

据超过该阈值时，桥梁现场数据采集模块同步将该时刻（或时域内）相关监测数据（包括：环境温湿度监测数据，车辆荷载及车辆空间分布、风速风向、结构温度等荷载监测数据，结构变形、偏位、位移、应变、索力、支座反力等结构动静态响应数据）进行标记，并对标记的数据进行统一存储管理，形成以表征桥梁日常运营典型状态的数据样本库，称为“特征数据样本库”。上述中的阈值即为“统计阈值”。

11.3.3 特征数据样本是一组包含表征桥梁某时刻运营状态的数据组，该数据组包含环境温湿度监测数据，车辆荷载及车辆空间分布、风速风向、结构温度等作用监测数据，结构变形、偏位、位移、应变、索力、支座反力等结构动静态响应数据；它由某类型监测数据超过统计阈值时系统所标记的各类监测数据组成。

11.3.5 结构监测数据处理和有效信息提取是桥梁结构状态评估的工作基础，然而，桥梁监测系统实时采集的海量数据（包含大量传感器长期在线采集的多维度、海量且含有大量噪声和不确定因素的原始数据），已经大大超过了结构工程领域传统的数据处理能力和理解方式，如何从海量数据中获取结构状态信息，已经成为桥梁健康监测和状态评估技术能否发挥实际作用的关键所在。

目前，利用人工智能开展监测数据智能化处理已成为建立智能化桥梁结构监测预警和评估系统的有效技术路径。为此，本标准提出了特征数据样本的概念，通过现场智能采集设备对桥梁运行状态中某典型工况（如重车过桥、强风、结构动态响应较大等）时刻的各类监测数据进行标记并单独存储管理，获取一组表征该时刻桥梁运行状态的数据组，包括作用数据、环境数据以及对应的结构响应数据，通过长期积累可以获得大量有效的结构响应信息；在此基础上，将作用数据和环境数据作为输入量，将结构动态响应数据作为输出量，利用深度学习等人工智能方法建立输入与输出的关系，从而分析桥梁日常运行的行为特征，开展桥

梁结构异常状态识别、运营状态趋势分析和状态预测等研究。

11.4 超限阈值与报警

11.4.1 报警信息包括报警级别、报警传感器编号和位置、报警监测值和报警阈值、报警时刻的桥面行车图像信息等。报警形式除了在软件界面自动实时展示外，还可通过声光报警、邮件、短信、微信、APP 等形式发送报警信息。

11.4.4 基于监测历史统计值得到的阈值，应通过从服役起至少一年且结构未见异常的连续监测数据得到，随着监测数据不断积累，阈值应做相应更新。基于设计值确定的阈值，应是正常使用极限状态下充分考虑温湿度变化、混凝土收缩徐变、活载等设计荷载的组合情况，分析各荷载组合下的最不利工况响应值。

监测数据动态特征值包括主梁振动加速度、索振动加速度、桥梁结构基频、振型 MAC 值等；统计特性包括最大平均风速、10min 平均风速、水平地震动加速度峰值、最高温度、最低温度、最大温差和最大温度梯度等；监测数据异常特征是指监测车辆总重或轴重、索应力、主梁动态挠度、动态应力等监测值过大，以及桥梁自振频率、振型 MAC 值、统计模型参数显著异常等。

11.4.5 基于监测数据的桥梁结构安全评估，需要建立结构基准有限元模型，基准有限元模型应与结构的实际力学状态基本吻合。但由于模型结构误差、模型参数误差以及有限元离散化所带来的误差，造成所建立的有限元模型与结构的真实情况存在着偏差，要得到比较准确的计算结果，必须用比较准确的结构参数建立模型，这就要求根据相关桥梁结构测试结果，利用有效手段修正结构计算参数，使所建立的有限元模型尽可能反映结构的真实状态。

11.5 报警响应措施

11.5.1 桥梁检查、检测、特殊检测等内容和技术要求应符合现行行业标准《城市桥梁养护技术标准》CJJ 99、《公路缆索结构体系桥梁养护技术规范》JTG/T 5122、《公路桥涵养护规范》JTG 5120、《公路桥梁技术状况评定标准》JTG/T H21 的相关规定，并依据上述养护规范制定检查和养护措施，并与桥梁监测系统形成协同、互补的养护管理机制。

桥梁检查对应上述规范中的日常巡查和经常性检查；桥梁检测对应上述规范中的定期检查或定期检测；特殊检测对应上述规范中的特殊检测或特殊检查。