

ICS 93.040  
CCS P20/29

DB21

辽宁省地方标准

DB21/T \*\*—2023

J\*\*—2023

# 城市桥梁智慧监测系统技术规程

Technical specification for intelligent monitoring system  
of the municipal bridge

(征求意见稿)

2023—\*\*—\*\*发布

2023—\*\*—\*\*实施

辽宁省住房和城乡建设厅  
辽宁省市场监督管理局

联合发布

辽宁省地方标准

# 城市桥梁智慧监测系统技术规程

Technical specification for intelligent monitoring system  
of the municipal bridge

DB21/T \*\*—2023

J\*\*—2023

主编部门：辽宁省住房和城乡建设厅

批准部门：辽宁省住房和城乡建设厅

施行日期：2023年\*月\*日

2023 沈阳

# 前 言

根据辽宁省住房和城乡建设厅《关于印发〈2022年度辽宁省工程建设地方标准编制修订计划〉的通知》（辽住建科〔2022〕11号）的要求，为规范辽宁省城市桥梁智慧监测系统，规程编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验的基础上，参考相关标准及技术文献，结合辽宁省工程实际，并在广泛征求意见的基础上，编制了本规程。

本规程的主要内容包括：总则、术语、监测内容、传感器、采集传输、状态识别、智慧评估、智慧平台、验收与维护。

本规程由辽宁省住房和城乡建设厅和辽宁省质量技术监督局批准，由主编单位辽宁省建设科学研究院有限责任公司负责具体内容的解释。

本规程执行过程中如有意见或建议，均可以通过来电和来函等方式进行反馈，我们将及时答复并认真处理（归口管理部门：辽宁省住房和城乡建设厅，地址：沈阳市和平区太原街2号，邮编：110001，联系电话：024-234479652；标准起草单位：辽宁省建设科学研究院有限责任公司，地址：沈阳市和平南大街88号，邮编：110005，联系电话：024-23371019，电子邮箱：hana19810619@163.com）。

本规程主编单位：辽宁省建设科学研究院有限责任公司

本规程参编单位：辽宁省交通高等专科学校

东北大学

中国建筑东北设计研究院有限公司

千寻位置网络（浙江）网络有限公司

沈阳天雄信息技术开发工程有限公司

辽宁城市建设职业技术学院

本规程主要编制人员：

本规程主要审查人员：

# 目 次

1	总 则.....	1
2	术语.....	2
3	监测内容.....	4
3.1	一般规定 .....	4
3.2	悬索桥.....	4
3.3	斜拉桥.....	6
3.4	梁桥 .....	7
3.5	拱桥 .....	8
4	传感器.....	10
4.1	一般规定 .....	10
4.2	选型要求 .....	10
4.3	布点要求 .....	11
5	采集传输.....	14
5.1	一般规定 .....	14
5.2	采 集.....	14
5.3	处 理.....	15
5.4	传 输.....	16
6	状态识别.....	17
6.1	一般规定 .....	17
6.2	模态参数识别.....	17
6.3	损伤识别 .....	18
7	智慧评估.....	19
7.1	一般规定 .....	19
7.2	数据展示 .....	19
7.3	数据分析 .....	20
7.4	安全预警 .....	21
7.5	一级评估 .....	21
7.6	二级评估 .....	22
7.7	评估方法 .....	23

8	智慧平台	25
8.1	一般规定	25
8.2	总体架构	25
8.3	数字模型	27
8.4	信息采集	27
8.5	数据存储	28
8.6	模型与算法	28
8.7	系统管理	29
9	验收与维护	30
9.1	验收	30
9.2	维护	32
附录 A	分部工程竣工申请书	34
附录 B	分部工程质量验收记录	35
	本规程用词说明	34
	引用标准名录	35
	条文说明	34

# CONTENTS

1	General Provisions .....	1
2	Terms .....	2
3	Monitoring Contents.....	4
3.1	General Requirements .....	4
3.2	Suspension Bridge.....	4
3.3	Cable-stayed Bridge .....	6
3.4	Beam Bridge .....	7
3.5	Arch Bridge .....	8
4	Sensors .....	10
4.1	General Requirements .....	10
4.2	Type Selection Requirements.....	10
4.3	Layout Requirements.....	11
5	Acquisition and Transmission .....	14
5.1	General Requirements .....	14
5.2	Acquisition.....	14
5.3	Treatment.....	15
5.4	Transmission.....	16
6	Status Identification.....	17
6.1	General Requirements .....	17
6.2	Model Parameter Identification .....	17
6.3	Damage Identification .....	18
7	Intelligent Evaluation .....	19
7.1	General Requirements .....	19
7.2	Data Presentation .....	19
7.3	Data Analysis.....	20
7.4	Safety Warning .....	21
7.5	Evaluation: Level 1.....	21
7.6	Evaluation: Level 2.....	22
7.7	Evaluation Methods.....	23

8	Intelligent Platform.....	25
8.1	General Requirements .....	25
8.2	Framework.....	25
8.3	Digital Models .....	27
8.4	Information Collection.....	27
8.5	Data Storage.....	28
8.6	Models and Algorithms .....	28
8.7	System Management .....	29
9	Acceptance and Maintenance.....	30
9.1	Acceptance.....	30
9.2	Maintenance.....	32
	Appendix A Application for Completion of Divisional Works .....	34
	Appendix B Quality acceptance record of divisional works .....	35
	Explanation of Wording in This Specification .....	36
	List of Quoted Standards.....	37
	Addition: Explanation of Provisions .....	38

# 1 总 则

**1.0.1** 为规范辽宁省桥梁智慧监测系统设计，提高桥梁信息化监测和养护管理水平，保证桥梁服役安全，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于辽宁省既有和新建的各种城市桥梁服役期间的智慧监测系统设计。

**1.0.3** 根据辽宁省城市桥梁建设规模、重要性、服役环境及其服役期内性能退化情况，桥梁智慧监测系统的等级划分应符合表1.0.3的规定。

表1.0.3 桥梁智慧监测系统的等级划分

等级	桥型	监测性能
一级	特大跨度桥梁（主跨>150m）、复杂结构桥梁、重要桥梁	监测内容全；平台软硬件功能强大，可扩展性强，系统自动化、集成化和网络化程度高；实时在线和远程监测
二级	大跨度桥梁（40 m≤主跨≤150m）、较复杂结构桥梁、较重要桥梁	监测内容较全；系统定期监测（每次连续监测多天）；自动化程度较高；数据管理系统网络化运行

注：（1）复杂结构桥梁指斜拉桥、悬索桥、拱桥以及组合结构等，较复杂桥梁结构指连续梁桥、刚构桥等桥梁；

（2）重要桥梁指桥梁所在位置极为重要，该桥具有重要的政治或经济意义。

**1.0.4** 城市桥梁智慧监测系统应与桥梁管理系统相兼容。

**1.0.5** 城市桥梁智慧监测系统的设计考虑不同时期监测系统的需求，结合桥梁的实际情况，融入信息化手段，做到技术先进、安全可靠、经济合理、便于维护，为桥梁结构设计、损伤识别、养护和维修等提供数据支持。

**1.0.6** 城市桥梁的智慧监测系统宜包括传感器、数据采集传输、状态识别、智慧评估、智慧平台、验收与维护等内容。

**1.0.7** 城市桥梁智慧监测系统的实施，除执行本规程的规定外，尚应符合国家及行业颁发有关标准、规范的规定。

## 2 术语

### 2.0.1 智慧监测 intelligent monitoring

利用信息和通信技术,在桥梁上安装传感器,对实时采集的桥梁结构与环境信息进行收集、处理及分析,并对桥梁使用状况进行智能化的处理和评估。

### 2.0.2 结构监测 structural monitoring

对桥梁结构的整体行为和实时环境响应进行监测,并对桥梁结构服役情况、可靠性、耐久性和承载能力进行智能评估。

### 2.0.3 传感器 sensor

安装在桥梁上的信号装置或器件,由敏感元件和转换元件组成,可将桥梁上监测信息按一定规律转换成可用信号输出的装置。

### 2.0.4 采集传输 acquisition and transmission

用传感器和其他测试设备采集监测参数信号,通过数据转换和处理装置,将采集数据传输到数据中心或者智慧平台的过程。

### 2.0.5 模态参数识别 model parameter identification

基于结构振动试验的实测数据,通过时域、频域或时频域分析方法来提取结构的模态频率、振型及阻尼比,还应包括模态刚度、模态质量等参数。

### 2.0.6 模态损伤识别 model damage identification

利用结构的响应数据来分析结构模态参数/物理参数的变化,进而识别结构损伤过程。

### 2.0.7 智慧评估 intelligent evaluation

通过信息化的测试手段,利用有效评估方法对各项数据进行评估分析,并进行合理有效的安全预警,实现评估管理智能化。

### 2.0.8 一级评估 evaluation: level 1

将各类桥梁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,确定结构状态过程。

### 2.0.9 二级评估 evaluation: level 2

在一级评估的基础上,进行结构损伤识别、模型修正,从而判断桥梁结构性能状态等级的过程。

### 2.0.10 智慧平台 intelligent platform

利用物联网、互联网、大数据等技术将桥梁监测数据整合、处理及分析,形成一个“可

视”、“可监”、“可控”的桥梁监测平台，实时掌握桥梁动态，为桥梁养护管理决策提供有效依据。

#### **2.0.11 验收acceptance**

桥梁智慧监测系统根据合同文件、相关技术标准和质量要求逐项检验合格后交付使用过程。

#### **2.0.12 维护maitenance**

为保持桥梁智慧监测系统应有的性能而进行的例行检查修复活动。

### 3 监测内容

#### 3.1 一般规定

3.1.1 桥梁符合下列条件之一时，进行桥梁结构监测：

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

3.1.2 监测内容的确定应符合下列规定：

1 规定的桥梁根据桥梁运行环境、受力状态分析、耐久性分析、风险评估结果、监测应用目标确定监测内容；

2 规定的桥梁根据桥梁结构、部件、构件的技术状况，既有病害、损伤程度、监测应用目标，经分析确定监测内容；

3 规定的桥梁根据技术状况评定结果、监测应用目标确定监测内容。

3.1.3 监测内容应包含环境、作用、结构响应和结构变化，并分为应选监测项、宜选监测项、可选监测项。

3.1.4 航道等级为I级~V级的通航孔桥以及易受船舶撞击的非通航孔桥宜进行船舶撞击监测，航道等级应根据桥梁设计通航批复文件或通航规定确定。

3.1.5 监测内容宜兼顾《公路桥涵养护规范》JTG5120中规定的桥梁永久观测点观测需求。

#### 3.2 悬索桥

3.2.1 3.1.1中第一条规定的悬索桥，监测内容应符合表3.2.1的规定，可根据特定需求选择监测内容。

表 3.2.1 悬索桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	温度、湿度	桥址区环境温度、湿度	●
		主梁内温度、湿度 <sup>a</sup>	●
		主缆内温度、湿度	○
		锚室内温度、湿度 <sup>b</sup>	●
		鞍罩内温度、湿度	●
		索塔内温度、湿度	○
	结冰	桥面结冰、主缆结冰	◎

作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、轴数、车速	●
		所有车道车流量	●
		所有车道的车辆空间分布视频图像	◎
	风速、风向	桥面风速、风向	●
		塔顶风速、风向	●
	风压	主梁风压	◎
	结构温度	混凝土或钢结构构件温度	●
		桥面铺装层温度	○
	船舶撞击	桥墩加速度	○
		视频图像	○
	地震	桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度及以上)	●
承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度以下)		○	
结构响应	位移	主梁竖向位移	●
		主梁横向位移	●
		支座位移	●
		梁端纵向位移	●
		塔顶偏位	●
		主缆偏位	○
	转角	塔顶转角	◎
		梁端水平转角	●
		梁端竖向转角	●
	应变	主梁关键截面应变	●
		索塔关键截面应变	○
	索力	吊索索力	●
		锚跨索股力	●
	支座反力	支座反力	○
	震动	主梁竖向振动加速度	●
		主梁横向振动加速度	●
		主梁纵向振动加速度	○
		塔顶水平双向振动加速度	●
吊索振动加速度		●	
结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度	◎
	位移	锚碇位移	●
	裂缝	混凝土结构裂缝	○
		钢结构裂缝	○
	腐蚀	墩身、承台混凝土氯离子浓度	◎
		墩身、承台混凝土氯离子侵蚀深度	◎
	断丝	吊索、主缆断丝	○
	螺栓状态	索夹螺杆紧固力、高强螺栓紧固力、螺栓滑脱	○
索夹滑移	索夹滑移	○	

注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项。

<sup>a</sup> 仅适用于封闭箱梁。

<sup>b</sup> 仅适用于地锚式悬索桥。

3.2.2 3.1.1第2款和第3款规定的悬索桥，监测内容见表3.2.1，可根据技术状况、监测应用目标、特定需求调整监测内容。

### 3.3 斜拉桥

3.3.1 3.1.1 第 1 款规定的斜拉桥，监测内容应符合表 3.3.1 的规定，可根据特定需求选择监测内容。

表 3.3.1 斜拉桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	温度、湿度	桥址区环境温度、湿度	●
		主梁内温度、湿度 <sup>a</sup>	●
		索塔锚固区温度、湿度	●
	雨量	降雨量	◎
	结冰	桥面结冰、斜拉索结冰	◎
作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、轴数、车速	●
		所有车道车流量	●
		所有车道的车辆空间分布视频图像	◎
	风速、风向	桥面风速、风向	●
		塔顶风速、风向	●
	结构温度	混凝土或钢结构构件温度	●
		桥面铺装层温度	○
	船舶撞击	桥墩加速度	○
		视频图像	○
	地震	桥岸地表场地加速度	◎
承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度及以上)		●	
承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度以下)		○	
结构响应	位移	主梁竖向位移	●
		主梁横向位移	○
		支座位移	●
		梁端纵向位移	●
		塔顶偏位	●
	转角	塔顶转角	○
		梁端水平转角	●
		梁端竖向转角	●
应变	主梁关键截面应变	●	
	索塔关键截面应变	○	

	索力	斜拉索索力	●
	支座反力	支座反力	○
	振动	主梁竖向振动加速度	●
		主梁横向振动加速度	●
		主梁纵向振动加速度	○
		塔顶水平双向振动加速度	●
	斜拉索振动加速度	●	
结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度	◎
	裂缝	混凝土结构裂缝	○
		钢结构裂缝	○
	腐蚀	墩身、承台混凝土氯离子浓度	◎
		墩身、承台混凝土氯离子侵蚀深度	◎
	预应力	体外预应力	○
	断丝	斜拉索断丝	○
螺栓状态	高强螺栓紧固力、螺栓滑脱	○	
注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项。			
ª仅适用于封闭箱梁。			

3.3.2 3.1.1第2款和第3款规定的斜拉桥，监测内容见表3.3.1，可根据技术状况、监测应用目标、特定需求调整监测内容。

### 3.4 梁桥

3.4.1 3.1.1第1款规定的梁桥，监测内容应符合表3.4.1的规定，可根据特定需求选择监测内容。

表3.4.1 梁桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	温度、湿度	桥址区环境温度、湿度	●
		主梁内温度、湿度ª	●
	结冰	桥面结冰	◎
作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、轴数、车速	○
		所有车道车流量	○
		所有车道的车辆空间分布视频图像	◎
	风速、风向	桥面风速、风向	◎
	结构温度	混凝土或钢结构构件温度	●
		桥面铺装层温度	○
	船舶撞击	桥墩加速度	○
		视频图像	○
地震	桥岸地表场地加速度	◎	
	承台顶或桥墩底部加速度	●	

		(抗震设防烈度为Ⅶ度及以上)	
		承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度以下)	○
结构响应	位移	主梁竖向位移	●
		支座位移	○
		梁端纵向位移	○
		高墩墩顶位移	○
	应变	主梁关键截面应变	●
	支座反力	支座反力	○
	振动	主梁竖向振动加速度	●
		主梁横向振动加速度	○
		主梁纵向振动加速度	○
		桥墩顶部纵向及横向振动加速度	◎
结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度	◎
	桥墩沉降	桥墩竖向位移	○
	裂缝	混凝土结构裂缝	○
		钢结构裂缝	○
	腐蚀	墩身、承台混凝土氯离子浓度	◎
		墩身、承台混凝土氯离子侵蚀深度	◎
	预应力	体外预应力	●
螺栓状态	高强螺栓紧固力、螺栓滑脱	○	
注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项。			
°仅适用于封闭箱梁。			

3.4.2 3.1.1第2款和第3款规定的梁桥，监测内容见表3.4.1，可根据技术状况、监测应用目标、特定需求调整监测内容。

### 3.5 拱桥

3.5.1 3.1.1第1款规定的拱桥，监测内容应符合表3.5.1的规定，可根据特定需求选择监测内容。

表 3.5.1 拱桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	温度、湿度	桥址区环境温度、湿度	●
		主梁内温度、湿度 <sup>a</sup>	●
		主拱内温度、湿度 <sup>b</sup>	●
	结冰	桥面结冰、吊杆结冰	◎
作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、轴数、车速 <sup>c</sup>	●/○
		所有车道车流量 <sup>c</sup>	●/○
		所有车道的车辆空间分布视频图像	◎
	风速、风向	桥面风速、风向 <sup>c</sup>	●/○

		拱顶风速、风向	◎
结构温度		混凝土或钢结构构件温度	●
		桥面铺装层温度	○
船舶撞击		桥墩加速度	○
		视频图像	○
地震		桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度及以上)	●
		承台顶或桥墩底部加速度 (抗震设防烈度为Ⅶ度以下)	○
结构响应	位移	主梁竖向位移	●
		主梁横向位移	○
		支座位移	○
		梁端纵向位移	○
		拱顶位移	●
	应变	主梁关键截面应变	●
		主拱关键截面应变	○
	索力	吊杆(索)力	●
		系杆力	●
	支座反力	支座反力	○
	振动	主梁竖向振动加速度	●
		主梁横向振动加速度	○
		主梁纵向振动加速度	◎
		主拱振动加速度	●
吊杆(索)振动加速度		●	
结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度	◎
	位移	拱脚位移	●
	裂缝	混凝土结构裂缝	○
		钢结构裂缝	○
	腐蚀	墩身、承台混凝土氯离子浓度	◎
		墩身、承台混凝土氯离子侵蚀深度	◎
	断丝	吊杆(索)或系杆断丝	○
螺栓状态	高强螺栓紧固力、螺栓滑脱	○	
注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项。			
<p><sup>a</sup> 仅适用于封闭箱梁。</p> <p><sup>b</sup> 仅适用于箱形拱。</p> <p><sup>c</sup> 中、下承式拱桥为应选监测项，上承式拱桥为宜选监测项。</p>			

3.5.2 3.1.1第2款和第3款规定的拱桥，监测内容见表3.5.1，可根据技术状况、监测应用目标、特定需求调整监测内容。

## 4 传感器

### 4.1 一般规定

4.1.1 在桥梁智慧监测系统中，传感器主要用于监测桥梁环境、作用、结构响应、结构变化四类参数。

4.1.2 桥梁智慧监测系统应根据桥梁结构状态、体系和形式、实际应用条件以及经济条件，并结合桥梁监测中具体内容和目的选择适宜的传感器类型、数量及布设位置。

4.1.3 传感器工作环境适应能力应满足其所在桥址区或桥梁构件的环境条件，可按需配置温湿度控制和保护装置。

4.1.4 传感设备宜使用可原位校准或自校准的产品和技术。

### 4.2 选型要求

4.2.1 桥梁智慧监测系统选择的传感器类型应符合表 4.2.1 规定。

表 4.2.1 常用传感器选择类型

监测类别	监测内容	传感器类型
环境	温度	温度传感器
	湿度	湿度传感器
	雨量	翻斗雨量计、压电雨量计
	结冰	超声波检测仪、视频监测
作用	风荷载	超声风速仪、机械风速仪、风压传感器
	车辆荷载	动态称重系统、网络摄像机
	温度荷载	电阻温度计、光纤光栅温度计
	地震作用	强震记录仪、力平衡加速度传感器
	船舶撞击	加速度传感器、倾角传感器、拉线位移传感器、网络摄像机
结构响应	振动	磁电式加速度传感器、力平衡加速度传感器
	挠度	GNSS 接收机、压力变送器
	应变	电阻应变传感器、振弦式应变传感器、光纤光栅应变传感器
	索力	磁电式加速度传感器、压电式加速度传感器、磁通量传感器
	空间变位	GNSS 接收机、倾角传感器
	梁端纵向位移	拉线位移传感器、磁致伸缩位移传感器、激光位移传感器

	支座位移	拉线位移传感器、磁致伸缩位移传感器、激光位移传感器
结构变化	裂缝	振弦式裂缝传感器、电阻式裂缝传感器、光纤光栅裂缝传感器
	拱脚位移	GNSS 接收机
	锚碇位移	GNSS 接收机
	桥墩沉降	GNSS 接收机、压力变送器
	腐蚀	腐蚀传感器
	断丝	声发射传感器

### 4.3 布点要求

#### 4.3.1 梁桥各监测内容布点应符合表 4.3.1 的规定。

表 4.3.1 梁桥传感器布点参考位置

监测内容	传感器布设位置
温度	主跨跨中
湿度	主跨跨中
雨量	桥梁开阔部位
结冰	与主桥相连的引桥桥头，上下行车道
车辆荷载	与主桥相连的引桥桥头，上下行车道
温度荷载	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、边跨跨中和支座处
地震作用	桥墩承台
船舶撞击	桥墩底部或承台顶部
振动	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、边跨跨中
挠度	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、边跨跨中
应变	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、边跨跨中和支座处
空间变位	桥墩顶部
梁端纵向位移	伸缩缝两侧
支座位移	墩顶梁端支座处
裂缝	依据检查(测)、技术状况评定、养护维修结果确定
桥墩沉降	桥墩顶部
腐蚀	墩台水位变动、浪溅区的混凝土保护层内
断丝	依据检查(测)、技术状况评定、养护维修结果确定

#### 4.3.2 拱桥各监测内容布点应符合表 4.3.2 的规定。

表 4.3.2 拱桥传感器布点参考位置

监测内容	传感器布设位置
温度	主跨跨中
湿度	主跨跨中
雨量	桥梁开阔部位
结冰	与主桥相连的引桥桥头，上下行车道、主拱
风荷载	主拱跨中、主梁跨中
车辆荷载	与主桥相连的引桥桥头，上下行车道
温度荷载	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、主拱跨中和拱脚
地震作用	拱脚承台
振动	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、主拱跨中
挠度	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、主拱跨中
应变	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、主拱跨中和拱脚
索力	吊杆
空间变位	主跨跨中、主拱跨中
梁端纵向位移	伸缩缝两侧
裂缝	依据检查(测)、技术状况评定、养护维修结果确定
拱脚位移	拱脚承台
腐蚀	墩台水位变动、浪溅区的混凝土保护层内
断丝	依据检查(测)、技术状况评定、养护维修结果确定

**4.3.3 斜拉桥各监测内容布点应符合表 4.3.3 的规定。**

表 4.3.3 斜拉桥传感器布点参考位置

监测内容	传感器布设位置
温度	主跨跨中
湿度	主跨跨中
雨量	桥梁开阔部位
结冰	与主桥相连的引桥桥头，上下行车道、索塔顶部
风荷载	主跨跨中、索塔顶部
车辆荷载	与主桥相连的引桥桥头，上下行车道
温度荷载	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、边跨跨中和索塔
地震作用	桥墩承台
船舶撞击	桥墩底部或承台顶部
振动	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、边跨跨中
挠度	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、边跨跨中

应变	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、边跨跨中和索塔
索力	斜拉索
空间变位	主跨跨中、索塔顶部
梁端纵向位移	伸缩缝两侧
支座位移	墩顶梁端支座处
裂缝	依据检查(测)、技术状况评定、养护维修结果确定
腐蚀	墩台水位变动、浪溅区的混凝土保护层内
断丝	依据检查(测)、技术状况评定、养护维修结果确定

4.3.4 悬索桥各监测内容布点应符合表 4.3.4 的规定。

表 4.3.4 悬索桥传感器布点参考位置

监测内容	传感器布设位置
温度	主跨跨中
湿度	主跨跨中
雨量	桥梁开阔部位
结冰	与主桥相连的引桥桥头，上下行车道、索塔顶部
风荷载	主跨跨中、索塔顶部
车辆荷载	与主桥相连的引桥桥头，上下行车道
温度荷载	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、边跨跨中和索塔
地震作用	桥墩承台
船舶撞击	桥墩底部或承台顶部
振动	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、边跨跨中
挠度	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、边跨跨中
应变	主跨跨中、1/4 跨、3/4 跨、边跨跨中和索塔
索力	主缆、吊索
空间变位	主跨跨中、主缆跨中、1/4 跨、3/4 跨、索塔顶部
梁端纵向位移	伸缩缝两侧
支座位移	墩顶梁端支座处
裂缝	依据检查(测)、技术状况评定、养护维修结果确定
锚碇位移	锚体和前支墩角点
腐蚀	墩台水位变动、浪溅区的混凝土保护层内
断丝	依据检查(测)、技术状况评定、养护维修结果确定

## 5 采集传输

### 5.1 一般规定

- 5.1.1 数据采集与传输、数据处理、存储及管理软件开发应满足数据分析、结构状态评估及监测预警的要求。
- 5.1.2 系统的设计应采用先进的硬件设备、先进的网络平台、先进的开发技术，必须保证系统具有一定的超前性，且安全可靠。
- 5.1.3 系统应合理运用计算机技术和远程信息传输技术，保障系统的实时性。
- 5.1.4 系统设计应采用统一数据标准格式和统一数据接口，以满足系统应用需求。
- 5.1.5 系统应满足用户的不同需求，系统软件应操作简便，满足长期稳定工作要求。
- 5.1.6 系统应能比较容易地实现扩展和升级，便于养护、管理部门进行维护。
- 5.1.7 系统应在采集、处理、传输、管理、存储各个环节提供安全措施，防止非法侵入。

### 5.2 采集

- 5.2.1 数据采集设备应与相应传感器参数匹配、兼容，其精度和分辨率不应低于相应传感器，并能满足被测物理量的要求。
- 5.2.2 数据采集硬件设备选型应满足下列要求：
  - 1 数字信号可选用基于 RS485，CAN，Modbus TCP 或 UDP 等分布式数据采集设备，并兼顾传输距离、传输带宽和速率；
  - 2 模拟电信号宜选用 4mA~20mA 和 -5V~5V 等标准工业信号，并进行光电隔离，保证抗干扰能力；
  - 3 光信号数据采集应采用专用的光纤解调设备，应根据波长范围、采样通道与采样频率进行选型，光纤光栅波长分辨力小于等于 1pm，扫描频率大于等于 50Hz；
  - 4 振弦式传感器信号应选用专用振弦式采集仪采集，频率信号误差不大于 0.1Hz；
  - 5 电阻式应变传感器信号应选用惠斯登电桥调理信号放大；
  - 6 数据采集模数转换(A/D 转换)应满足传感器分辨力、精度和数据分析要求，静态信号分辨力大于等于 16 位，动态信号分辨力大于等于 24 位。
- 5.2.3 当被测物理量为结构动态响应信号时，监测数据采集频率应满足采样定理，且满足

监测数据分析和应用要求。

**5.2.4** 数据采集设备应设置保护、抗干扰措施，避免受温湿度、静电、强磁场、雷击、过载冲击及干扰源等环境因素的影响并防止损坏；采集设备应具备不间断供电设备作为保障。

**5.2.5** 当需要对数据进行相关性分析时，数据采集站的设置应考虑数据同步采集的需求；动态数据采集的时间差应不大于 0.1ms，静态数据采集的时间差应不大于 3s。

**5.2.6** 针对台风、地震、撞击等特殊状态，原始监测数据应具有可追溯性，满足事后分析要求。

**5.2.7** 数据采集方案应符合下列规定：

- 1 应根据监测目的、监测参数类型和数据采集、传输能力综合确定采集方案；
- 2 宜根据地震动、振动等动态监测值和应变、位移等静态监测值启动触发采集；
- 3 触发阈值宜根据桥梁结构规范、桥梁结构计算和现场测试统计值综合确定。

**5.2.8** 数据采集频率应满足下列规定：

- 1 地震动、振动监测参数的采样频率应不低于 50Hz；
- 2 风荷载、应力、位移等动态监测参数的采样频率应不低于 1Hz；
- 3 温湿度、应变、位移、裂缝宽度、索力等静态监测参数采样频率不宜低于 1/600Hz。

### 5.3 处 理

**5.3.1** 数据处理设备宜具备对信号进行放大、滤波、去噪等预处理功能，提高信号的信噪比。

**5.3.2** 数据处理软件应能接收并解析桥梁现场采集的原始数据，并具备数据预处理、特征值提取以及数据持久化存储；

**5.3.3** 数据处理软件应正确判断异常数据是由结构状态变化引起还是监测系统自身异常引起，应剔除由监测系统自身引起的异常数据。

**5.3.4** 数据处理软件应能定义处理后监测数据的数据单位、数据方向、数据精度，数据单位采用国际标准单位，时间应采用公历。

**5.3.5** 数据处理软件应根据监测类别设置对应的处理算法，将处理前的原始数据换算成反映桥梁环境、作用、结构响应、结构变化的特征数据。

**5.3.6** 数据处理软件应能够自定义设置、修改各类监测数据的配置参数、处理频率、输出数据格式等。

## 5.4 传 输

- 5.4.1 数据传输系统应具有数据接收、处理、交换和传输的能力，应保证数据传输的可靠性、高效性和数据传输质量。
- 5.4.2 数据传输系统的设计应坚持因地制宜的原则，并综合考虑数据传输距离、工程各阶段特征和工程现场地形条件、网络覆盖状况、已有的通信设施等因素，灵活选取合适的数据传输方式。
- 5.4.3 根据系统前端传感器单位时间采集的数据量的大小，结合设计的传输实际通信能力，对数据进行分包处理，以包为单位实施传输。
- 5.4.4 数据可采用有线或者无线方式进行传输。数据传输子系统按照传输速度要求的不同，可设计为同步传输和异步传输两种方式。
- 5.4.5 当传输距离较远时，宜采用数字信号和光纤进行传输，并考虑传输线路安全性和可更换性。
- 5.4.6 无线传输方式宜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。
- 5.4.7 数据传输软件中应设计数据备份机制，以保证传输故障时的数据完整性和可靠性。
- 5.4.8 数据传输软件在设计中应采用应答模式，并引入校验—重发—补发机制进行误码控制。
- 5.4.9 数据传输软件应考虑数据传输的一致性、可靠性，并满足日后系统扩展、升级；
- 5.4.10 数据传输系统的线路应根据设备安装要求采取一定的防护措施，并根据实际情况制定应对特殊突发情况的应急预案。

## 6 状态识别

### 6.1 一般规定

6.1.1 通过结构振动监测数据，获取结构自振频率、振型、模态阻尼比，如有特殊要求，可获取模态刚度、模态质量等参数。

6.1.2 桥梁施工监控和成桥荷载试验的数据，可以用于修正桥梁健康状态的模型，以便后期结构损伤识别。

6.1.3 选用的传感器性能指标应满足预期监测目的及技术要求，不应采用性能指标不达标的传感器，也不宜采用指标高于监测目的和要求太多的产品，选择时也应尽量使不同硬件相互匹配。实际长期监测中，部分硬件可能不能正常工作甚至完全损坏，因此对于监测所需的关键参数或者预期可能损坏硬件，可进行一定程度的硬件冗余配置。

### 6.2 模态参数识别

6.2.1 模态试验和参数识别应满足的要求：

1 模态测试前应根据目的制定符合相关技术要求的测试方案，并进行必要的解析或数值计算。

2 模态测试应符合的要求：

(1) 传感器宜选择高灵敏度的低频传感器；

(2) 测点布置应尽量避开振型节点和反节点处，所布测点数不宜少于所测模态阶数的2倍，宜对称布置同时采集；

(3) 采样频率应满足采样定理的基本要求；

(4) 采样时间要保证数据有足够的分析长度；

(5) 当测点较多而传感器数量不足时，可以分批测量，每批测试应至少保留一个共同的参考点。

6.2.2 模态参数识别方法可应用下列方法：

1 频域识别方法：通过对结构响应和激励信号的傅里叶变换得到频响函数，然后进行模态参数提取。即通过试验模态分析得到频响函数矩阵的一行或一列，再进一步基于曲线拟合或图形法确定模态参数。可采用 Levy、峰值拾取法、频域分解法(FDD)。

2 时域识别方法：对结构响应信号直接识别。最常用的有 Ibrahim 时域法、随机子空间法(SSI 法)和 ARMA 时序分析法。

3 时频域识别方法：非稳定信号的频率是时变的，在时域或频域都无法说明信号不同频率分量的分布与变化情况，因此需要同时在时域和频域上联合表示，以体现其时变谱特征。可采用小波分析、希-黄变换(HHT)等方法。

6.2.3 在线识别技术，可采用环境激励下的工程结构模态识别方法实现结构在线模态参数识别。

## 6.3 损伤识别

6.3.1 损伤识别的目标和要求：

1 通过分析、对比结构不同时间和状态下的参数来识别结构损伤。

2 损伤识别宜由浅入深，逐次分为损伤判断、损伤定位、损伤定量、损伤评估；

(1) 损伤判断应给出结构是否发生损伤的明确判断，并对相应的判断准则或阈值进行说明；

(2) 损伤定位宜给出具体的结构损伤单元或构件发生的位置；

(3) 损伤定量应给出发生损伤的单元或构件的损伤程度；

(4) 损伤评估应对结构发生损伤后的性能退化做出综合评估，对结构损伤后的剩余寿命进行预测。

6.3.2 损伤识别可应用下列方法：

1 静力参数法可采用结构刚度（包括结构单元刚度）、位移、应变、残余力、材料参数如弹性模量、单元面积或惯性矩等来构建损伤指标。

2 动力参数法可采用频率比、振型变化、振型曲率、应变模态振型、MAC、COMAC、柔度曲率、模态应变能、里兹向量等来构建损伤指标。

3 模型修正法是常用的损伤识别方法，可采用矩阵型修正方法、基于参数灵敏度修正方法以及随机模型修正方法。

4 结构损伤识别也可采用神经网络法、遗传算法、小波变换、希-黄变换方法（HHT 方法）等。

## 7 智慧评估

### 7.1 一般规定

7.1.1 桥梁智慧监测系统智慧评估子系统应实现数据实时在线展示、数据分析、安全预警及评估等功能。

7.1.2 数据分析应对监测数据进行统计分析和特殊分析，为安全预警、一级评估、二级评估提供基础数据。

7.1.3 安全预警应根据监测数据分析结果进行实时预警。

7.1.4 预警值应根据结构的设计值、相关现行规范所规定的容许值，并结合结构的重要性等多种因素综合确定，可依据结构运行状况对预警值进行校验和调整。

7.1.5 一级评估应对监测数据统计特征值与规范容许值、设计值进行对比分析，对结构状态进行判定。

7.1.6 二级评估应基于监测数据分析、一级评估结果、专项检查，对结构性能进行评估，确定结构性能状态等级。

### 7.2 数据展示

7.2.1 数据展示形式应结合监测数据特性，通过图、表等数据可视化工具美观、简明地呈现监测数值及数据的深层次含义。

7.2.2 数据展示模块所呈现内容应包括以下类型：

1 系统应支持对桥梁各个点位的实时监测数据进行展示；

2 系统应支持对历史监测数据的检索展示，检索条件由用户给出，检索方式应支持点位检索、设备检索、监测类型检索、时间区间检索以及多筛选条件的混合；

3 系统应支持对桥梁检测报告、人工巡检报告、设备养护记录等类型文件的下载及在线预览。

7.2.3 对于具有典型周期特性的监测数据类型，如环境数据、车辆数据等，宜在展示时显示历史同期数据用于进行对比观察。

7.2.4 系统应具备数据对比展示功能，根据用户指定的多个监测点位或多个监测项，协同展示依时间轴对齐的不同监测指标的变化趋势，便于用户进行多指标的对比分析。

7.2.5 数据处理及渲染时间应满足实时性要求，数据检索查询界面响应时间应不大于 2s，统计分析页面响应时间应不大于 5s。

### 7.3 数据分析

7.3.1 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。

7.3.2 环境与荷载监测数据分析符合下列规定：

1 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；

2 分析温度监测数据，宜包括最高温度、最低温度和构件断面最大温度梯度；

3 分析湿度监测数据，宜包括构件内外湿度最大值、平均值和超限持续时间；

4 分析地震动响应监测数据，宜包括加速度峰值、速度峰值、持续时间、频谱和反应谱；

5 分析车辆荷载监测数据，应分析通过桥梁的车流量、车型、轴重、总重、车速及超载车辆比例等车辆荷载参数，得出车辆荷载日、月、年最大值及其分布；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；

6 分析雨量监测数据，宜包括每小时最大降雨量、累计降雨量。

7.3.3 结构局部响应监测数据分析符合下列规定：

1 分析应力监测数据，宜包括平均值、最大值、最小值等；并应与桥梁设计规范、材料允许值、设计最不利值进行对比；

2 分析索力监测数据，宜包括平均值、最大值、最小值等；并应与成桥索力、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；

3 分析裂缝监测数据，应对裂缝长度、宽度、深度的最大值进行分析；

4 分析支座反力数据，宜包括平均值、最大值和最小值、最大变化量。

7.3.4 结构整体响应监测数据分析符合下列规定：

1 分析结构变形监测数据，宜包括平均值和绝对最大值，宜进行挠度与温度、车辆荷载的相关性分析，横向位移和挠度与风速风向的相关性分析；

2 分析伸缩缝位移监测数据，宜包括绝对最大值和累计位移，宜进行与温度和车辆荷载的相关性分析；

3 分析振动加速度监测数据，宜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；

4 分析模态参数宜包括结构自振频率、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数据采集时长宜不小于 10min；

(2) 宜采用频域识别法、时域识别法或时频域识别法进行模态分析；

(3) 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；

(4) 获取的模态参数，可为结构模型修正及损伤识别提供基础数据。

7.3.5 材料性能监测数据分析符合下列规定：

1 分析腐蚀监测数据，应对腐蚀深度最大值以及腐蚀进程进行分析；

2 分析疲劳监测数据，应对应变时程数据进行分析，包括平均值、最大值、最小值、应力幅最大值，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。

## 7.4 安全预警

7.4.1 安全预警内容应包括：预警级别、预警传感器编号和位置、预警值。

7.4.2 安全预警级别宜设黄色、橙色和红色三级：

1 黄色预警：管理人员应对环境、荷载、结构响应加强关注，并进行跟踪观察；

2 橙色预警：管理人员应对环境、荷载、结构响应连续密切关注，查明报警原因，采取适当检查；

3 红色预警：管理人员应采取应急管理措施以确保桥梁结构安全运营，并应及时进行结构性能评估。

7.4.3 在系统发出预警指令后，系统应通过声、光、短讯等手段及时预警。

7.4.4 通过监测数据分析，获取结构各监测内容特征值，超过黄色预警值，则预示异常，由系统发出黄色预警信号。

7.4.5 通过监测数据分析，获取结构各监测内容特征值，超过橙色预警值，由系统发出橙色预警信号。

7.4.6 通过监测数据分析，获取结构各监测内容特征值，超过红色预警值，由系统发出红色预警信号。

## 7.5 一级评估

7.5.1 根据数据分析结果定期开展桥梁结构一级评估。

7.5.2 基于数据分析结果进行一级评估时，应符合下列规定：

1 根据应变计算应力时应考虑温度效应的影响，对钢筋混凝土桥梁还应考虑收缩、徐变的影响。

2 监测点处应力值与设计值进行比较，当小于设计值说明监测点处应力状态正常；当大于设计值时，说明监测点处应力状态异常。

3 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。

4 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，应进行疲劳状态评估。

5 利用环境、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，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。

6 应基于监测的加速度，采用模态参数分析获取结构动力特性。

7 获取的结构动力特性应与设计值进行对比，当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；当该比值小于 1 且有其它关键监测数据大于限值或设计值，判定结构状态异常。

7.5.3 当一级评估中有下列情况，应进行专项检查：

1 关键构件监测点位置拉、压应力大于设计值，应力状态异常；

2 关键构件监测点位置疲劳状态超过中等损伤，疲劳状态异常；

3 拉索、吊索、吊杆和系杆应力大于或等于设计值，索体结构状态异常。

## 7.6 二级评估

7.6.1 二级评估应基于数据分析、一级评估和专项检查结果进行结构有限元模型修正与结构损伤识别，确定结构性能状态等级。

7.6.2 二级评估应对结构整体、结构主要部件和结构的次要部件分级评估，其评定等级分别由表 7.6.2-1、表 7.6.2-2 和表 7.6.2-3 确定。

表 7.6.2-1 结构整体性能评定等级

等级	总体评价	性能状况描述
1	完好	全新状态，功能完好，在设计荷载和监测荷载作用下，结构稳定，所有构件

		的内力、变形均小于设计值且满足现行规范
2	较好	有轻微损伤，对结构使用功能无影响
3	中度损伤	有中等损伤，尚能维持正常使用功能
4	损伤严重	主要构件有大的损伤，严重影响结构使用功能
5	危险	主要构件存在严重损伤，不能正常使用，结构处于危险状态

表 7.6.2-2 结构主要部件性能评定等级

等级	总体评价	性能状况描述
1	完好	全新状态，功能完好，在设计荷载和监测荷载作用下，结构部件稳固，内力、变形均小于设计值且满足现行规范
2	较好	功能良好，部件出现有局部轻微缺损或污染
3	中度损伤	部件有中等缺损，或出现轻度功能性病害，但发展缓慢，尚能维持正常使用功能
4	损伤严重	部件有严重缺损，或出现中等功能性病害，且发展较快，结构变形小于或等于规范值，功能明显降低
5	危险	部件严重损伤，或出现严重功能性病害，且有继续扩展现象，关键部位的部分材料强度达到极限，变形大于规范值，结构的强度、刚度、稳定性不能达到安全通行的要求

表 7.6.2-3 结构次要部件性能评定等级

等级	总体评价	性能状况描述
1	良好	全新状态，功能良好，部件有轻度损伤
2	中度损伤	部件有中等损伤，但不影响使用功能
3	严重损伤	部件有严重缺损，出现功能降低，进一步恶化将不利于主要部件
4	危险	部件有严重损伤，失去应有功能，严重影响正常交通

7.6.3 二级评估应给出具体维护管理建议，并根据实际情况及时调整措施。

## 7.7 评估方法

### 7.7.1 确定性方法

#### 1 层次分析法

通过建立层次结构模型、构造对比较阵、计算权向量并体系一致性检验、计算组合权向量并做组合一致性检验等步骤进行分析。

#### 2 极限分析法

解答物体所处的状态将要被破坏而尚未被破坏的状态的临界问题分析方法。

### 7.7.2 可靠度方法

#### 1 构件可靠度分析法

构件可靠度分析法可采用两大类。一类是解析算法，包括改进的一次二阶矩法、二次二阶矩法、JC 法等；另一类是随机模拟法，包括蒙特卡罗法、验算点随机有限元法等。

(1) 改进的一次二阶矩法：适用于结构功能函数，所含基本随机变量为独立、正态变量情况。

(2) 二次二阶矩法：在广义随机空间内，将一组非正态随机变量，根据广义随机空间映射变换方法将非正态随机变量变换成标准正态随机向量，确定结构的失效概率或可靠度。

(3) JC 法：适用于结构功能函数，所含基本变量为独立、非正态的情况。

(4) 蒙特卡罗法 (MC 法)：是通过大量的随机抽样，对结构反复进行有限元计算，将得到的结果作统计分析，得到该结构的失效概率或可靠度。该方法需要进行大量的模拟计算，工作量大。

(5) 验算点展开随机有限元法：是以数学、力学分析作为工具，找出结构系统（确定的或随机的）响应与输入信号（确定的或随机的）之间的关系，并据此得到结构内力、应力或位移的统计规律，得到结构的失效概率或可靠度。该方法可用于直接分析结构的可靠度或失效概率。

## 2 体系可靠度分析法

体系可靠度分析法可采用界限估算法、串联及并联和混联体系可靠度计算法、概率网络估算技术方法、分枝界限法等。

### 7.7.3 评估流程

- 1 建立基于大数据的桥梁智慧监测系统；
- 2 将所述桥梁智慧监测系统应用于面向目标用户的大数据平台；
- 3 由目标用户在所述大数据平台输入目标桥梁的特征参数；
- 4 桥梁智慧监测系统将所述目标桥梁的特征参数与数据库中已知桥梁的特征参数进行对比；
- 5 查找出 N 组最接近的特征参数及桥梁寿命；
- 6 根据所述特征参数所影响桥梁寿命的权重计算目标桥梁的寿命，并反馈给客户端的用户。

## 8 智慧平台

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 智慧平台建设宜采用智能传感、北斗、GIS、BIM、云计算、大数据、智能分析的技术路线，支撑桥梁长期服役性能研究、桥梁相关科学观测研究等基础科研工作，且具备智能分析、预判的预防性养护功能，降低养护成本，延长城市桥梁使用寿命。

**8.1.2** 智慧平台应按现行行业标准《城市运行管理服务平台技术标准》CJJ/T312的规定，通过国家电子政务外网等，实现上下级平台之间联网互通、数据交换和业务协同。

**8.1.3** 各级智慧平台应按现行行业标准《城市运行管理服务平台数据标准》CJ/T545的规定建立城市运行管理服务数据库，数据质量检查、验收和更新应符合真实性、完整性、正确性、一致性、现势性和可交换性要求。

**8.1.4** 智慧平台在设计、建设、验收、运行和维护中的信息安全内容应符合现行国家标准《信息安全技术网络安全等级保护基本要求》GB/T 22239的规定。

**8.1.5** 智慧平台应能根据城市桥梁安全评估结果或预警指标实现自动预警，应具备权限管理功能以对所有用户的可查看数据范围及操作权限进行限定。

**8.1.6** 当监测数据量较大或单台服务器性能难以满足高效管理要求时，宜采用分布式存储技术组建数据存储集群，并配置负载均衡中间件。

**8.1.7** 由于现场条件限制或其他原因导致无法部署私有数据管理系统时，宜采用云平台托管相应数据及系统软件。

### 8.2 总体架构

**8.2.1** 城市桥梁智慧监测系统的技术架构可划分为感知层、网络层、数据层、应用层和展示层，各部分内容的组成关系，如图 8.2.1：

1 感知层作为城市桥梁智慧监测系统建设的基础，全要素感知城市桥梁环境、作用、响应与变化，对城市桥梁进行实时、动态的监测；

2 网络层用于将感知层设备采集到的监测数据传送到监测平台，为数据应用分析及桥梁运维决策提供可靠的数据；

3 数据层实现对城市桥梁运营及监测数据整体规划管理，形成桥梁全生命周期内的数据中心，为各种应用提供数据存储和交换平台；

4 应用层针对桥梁智慧监测管理需求，通过建立数学模型将抽象的业务规则及逻辑具象化、程序化，实现数据处理与控制、海量数据综合管理、数据分析与健康评价、智能决策支持等具体业务功能；

5 展示层将各种数据按需求向用户展示，并且接受用户对系统的控制与输入，一方面从数据层获得信息并显示给用户，另一方面将信息需求推送给应用层进行处理。系统应支持多种交互终端，包括显示 PC 客户端、笔记本电脑、平板电脑、智能手机、监控大屏等。



图 8.2.1 智慧平台总体架构

8.2.2 城市桥梁智慧监测系统涉及的数据包括：桥梁基本信息、监测测点基本信息、传感器基本信息等基础数据，实时监测数据、监测特征数据、视频属性信息、报警数据等业务数

据，统计分析数据、路网桥梁专项分析与业务应用数据等主题数据。

**8.2.3** 智慧平台建设应按照“统一组织、分级建设、统一标准、省级汇聚、深化应用”的总体思路，以单桥监测系统建设为基础，以“省-市-单桥”三级节点联网贯通为目标，严格单桥监测设备准入标准，加强大数据分析决策应用，突出规律性研究预警，基本实现突发事件“可看、可听、可联、有信息”。

**8.2.4** 智慧平台应汇聚省/市域单桥监测数据和实现互联互通，动态掌握辖区城市桥梁结构运行状况，形成主动监测、科学预警和响应及时的城市桥梁结构健康监测及安全保障工作闭环，提升省域城市桥梁精细化管理和安全风险防控智慧化水平。

### 8.3 数字模型

**8.3.1** 数字模型由模型数据资源和模型引擎构成。

**8.3.2** 模型数据资源应包括桥梁结构数据、桥梁附属设施数据和地图数据。

**8.3.2** 模型引擎应包括 BIM 引擎、地图数据引擎、GIS 服务引擎、可视化渲染引擎，各类引擎的要求如下：

1 BIM 引擎应支持支持常用格式的 BIM 数据的轻量化处理、支持 BIM 和三维地图的数据融合，支持 BIM 数据的三维可视化，支持 BIM 模型和三维地形、影像、倾斜摄影模型在同一场景内的渲染和查询。

2 地图数据引擎应具备地图数据资源、三维模型数据和桥梁其它动静态数据的存储、更新、融合、接入等管理功能。

3 GIS 服务引擎宜包括但不限于各类图层管理、查询检索、桩号转换、二维地图服务、三维场景服务、地理信息数据服务、空间统计分析等功能。

4 可视化渲染引擎应具备相关模型数据的一体化拼接、可视化渲染功能，能在地图上叠加桥梁基础设施状态、桥址区气象状况、道路运行状况、交通事件状况等，并通过数字孪生技术实现协同展示。

### 8.4 信息采集

**8.4.1** 平台应按照 8.2.2 给出的数据类型，根据各类数据的形态、格式、采集条件，明确各项数据的具体采集方式和更新频率。

**8.4.2** 应支持多种设备接入方式、接入协议，通过提供统一的接口服务，实现监测设备与

业务应用之间的数据上传和指令下发。

**8.4.3** 与智慧平台对接的设备和系统宜适配智慧平台的数据接口及通信协议，并在对接之前进行数据预处理。

**8.4.4** 宜具备设备版本管理、版本发布、远程升级等功能，并具备对桥梁现场设备运行状态、设备计算资源和存储空间、关键算法、软件运行状态监测等功能。

## 8.5 数据存储

**8.5.1** 应采用数据库管理系统存储和管理桥梁智慧监测系统全过程的信息，包括所有的硬件、软件以及监测和分析结果等。

**8.5.2** 宜采用基于数据库的数据存储管理方法，并提供方便的接口和完整的数据控制功能。

**8.5.3** 数据库设计应遵循可靠性、先进性、可扩展性原则，并应考虑数据结构的整体性、数据库系统与应用系统的统一性。

**8.5.4** 宜采用读写分离、分布式存储、时间序列数据库等技术提升数据存取效率和稳定性。

**8.5.5** 数据库应采用模块化设计，宜按表 8.5.5 进行数据库模块划分。

表 8.5.5 数据库分类

序号	数据库名称	数据库功能描述
1	原始数据数据库	存储传感器监测的原始数据
2	过程数据数据库	存储原始监测数据经处理分析后的数据
3	结构状态数据库	存储结构安全预警子系统分析的中间数据和最终结论
4	系统参数数据库	存储运营状态系统中的各类参数，包括设备编号、监测参数、采样参数、设备状态参数等
5	系统维护数据库	传感器自诊断信息、存储系统运行期间所有设备和系统的历史工作状态
6	桥梁信息数据库	桥梁的基本信息及病害信息
7	养护维修数据库	测试数据和桥检报告；历次养护维修施工数据和报告

**8.5.6** 音视频、图片、文档类非结构化数据，应设计完整的上传、检索、导出功能，并分类建立单独的存储目录结构。

**8.5.7** 当监测数据量较大或单台服务器性能难以满足高效管理要求时，宜采用分布式存储技术组建数据存储集群，并配置负载均衡中间件。

**8.5.8** 数据库应具有网络防护功能，防止恶意攻击和病毒破坏并根据用户级别设定相应权限。

## 8.6 模型与算法

**8.6.1** 智慧平台宜构建视频智能分析、图像结构化处理等算法，其中针对桥梁结构宜构建模态参数识别、结构损伤识别、桥梁状态评估等算法。

**8.6.2** 智慧平台宜具备算法管理、数据采集标注、算法运行监测等功能。

**8.6.3** 智慧平台宜基于业务逻辑构建城市桥梁专项分析与业务模型，包括复杂风场、重载车通行、地震、跨中下挠、高墩倾斜、伸缩缝及支座位移、结冰等方面的业务场景应用。

**8.6.4** 算法与模型宜持续优化、不断迭代。

## **8.7 系统管理**

**8.7.1** 系统应具有友好的、符合专业操作习惯的用户界面。

**8.7.2** 系统应具备权限管理功能，宜对所有用户的可查看数据范围及操作权限进行限定。

**8.7.3** 系统涉及的功能包括：监测设备管理、监测信息管理、结构模型信息管理、评估分析信息管理、数据转储管理、用户管理、安全管理以及预警信息管理等方面。

**8.7.4** 系统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。

**8.7.5** 系统数据库管理宜考虑：支持对海量数据的高效管理机制、异常情况下的容错功能、系统恢复功能、支持分布式数据管理功能。

**8.7.6** 系统应对录入数据进行定期备份，备份方式宜采用日增量备份外加月全拷贝备份。

**8.7.7** 系统应对历史数据进行定期清理，清理周期宜不少于1次/年，同时应保证系统对于历史监测数据的保存年限不少于15年，重要数据宜永久保存。

## 9 验收与维护

### 9.1 验收

- 9.1.1 桥梁智慧监测系统交付业主单位前，应根据合同文件、相关技术标准和质量要求，由建设单位组织系统的验收，验收合格后交付业主单位。
- 9.1.2 桥梁智慧监测系统各硬件和软件在验收前应进行检查、测试，以及试运行，并应满足设计、技术文件要求。
- 9.1.3 桥梁智慧监测系统交付业主单位前应对监测系统的硬件和软件提供技术指标要求，并对传感器初始值进行确定。
- 9.1.4 桥梁智慧监测系统的监测内容、数据设备及软件应满足对桥梁安全预警和状态评估要求。
- 9.1.5 桥梁智慧监测系统应建立适合的数据库，采用统一数据标准格式和接口。静态数据库包括桥梁设计与施工信息库、桥梁养护检查数据库、系统软硬件信息库；动态数据库包括桥梁监测数据库、桥梁分析结果库。
- 9.1.6 数据库应能管理桥梁智慧监测系统全过程的信息，包括硬件和软件信息、监测数据以及分析结果。
- 9.1.7 数据库应具有网络防护功能，并根据用户级别设定相应权限。
- 9.1.8 承担桥梁智慧监测系统实施的单位应建立项目组织机构、安全管理制度、施工质量控制和检验制度。
- 9.1.9 桥梁智慧监测系统实施前，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。
- 9.1.10 桥梁智慧监测系统根据实施方法、性质分为硬件系统工程和软件系统工程。
- 1 硬件系统工程可划分为传感器安装、线缆敷设、采集设备安装、传输设备安装、防雷与接地施工、机房建设等分部工程；
  - 2 软件系统工程可划分为开发、测试、联合调试和部署等分部工程；
  - 3 各分部工程可根据生产厂家、生产批次的不同划分为若干分项工程。
- 9.1.11 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。
- 9.1.12 各硬件分项工程可划分为一个检验批。同一检验批的所有硬件均应进行检查；同一

检验批硬件测试数量不应少于该批硬件数量的 10%且不少于 1 个。

**9.1.13** 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。

**9.1.14** 硬件的测试采用专用工具和试验设备进行，以检验硬件能否正常工作为主。若发现抽检硬件无法正常工作，该批硬件应送有资质的第三方检验机构进行检验。

**9.1.15** 若送检硬件不满足设计文件或技术文件要求，该批硬件应返修并全部重新检验。

**9.1.16** 基座、预埋件、防护措施等土建施工需监理单位工序验收合格后，方可进行传感器、线缆等硬件的安装。

**9.1.17** 硬件实施过程中的安全技术、劳动保护、防火措施及环境保护等应符合国家有关法律法规和现行有关标准的规定。

**9.1.18** 桥梁智慧监测系统的软件在部署前应在有资质的第三方测试机构进行功能测试。

**9.1.19** 桥梁智慧监测系统设计文件范围内传感器安装、线缆敷设、采集站和机房建设以及软件部署完毕后，即可进行系统的分部工程验收。

**9.1.20** 系统软、硬件联合调试完毕，符合设计文件和本规范的规定时，桥梁智慧监测系统即可开通运营进入试运行阶段，同时可进行系统阶段验收。

**9.1.21** 系统连续正常运营 90 天、经验证合格及完成档案验收后即具备竣工验收条件。分部工程验收。

**9.1.22** 桥梁智慧监测系统具备分部工程验收条件后，可向监理和业主提交书面申请进行分部工程验收。

分部工程验收时，应提交下列文件：

- 1 安装和质量检查记录；
- 2 隐蔽工程记录；
- 3 接地电阻测量记录；
- 4 硬件和材料的产品质量合格证明。

**9.1.23** 系统具备阶段工程验收条件后，应向监理和业主申请阶段工程验收。

阶段工程验收时，应提交下列文件：

- 1 分部验收所提交资料；
- 2 单项调试和联合调试试验记录；
- 3 硬件清单；
- 4 软件清单。

9.1.24 系统具备竣工验收条件后，应向监理和业主申请竣工验收。工程资料清单包括：

- 1 竣工验收申请报告；
- 2 竣工图；
- 3 工程决算书；
- 4 图纸会审记录，设计变更洽商记录；
- 5 材料、硬件的质量合格证明；
- 6 施工记录。包括必要的检验、试验记录；
- 7 中间交接记录与证明；
- 8 工程质量事故发生和处理记录；
- 9 其它有关该项工程的技术决定和技术资料；
- 10 系统说明书；
- 11 系统操作说明；
- 12 系统硬件、软件清单；
- 13 系统内部接线图；
- 14 系统审批资料；
- 15 本规范规定的在软件实施过程中形成的文档；
- 16 系统联合调试报告；
- 17 软件第三方测试报告。

## 9.2 维 护

- 9.2.1 桥梁智慧监测系统维护宜包括日常管理、定期检查与维护 and 异常处置。
- 9.2.2 桥梁智慧监测系统日常管理的对象应包括传感系统、数据设备、软件系统。
- 9.2.3 桥梁智慧监测系统定期检查与维护的对象应包括传感器、数据采集设备、数据传输设备、数据存储设备和数据显示设备。
- 9.2.4 桥梁智慧监测系统异常处置应包括响应机制和应急措施。

**9.2.5** 桥梁智慧监测系统日常管理的内容宜包括运行环境管理、工作状态检查和运行安全管理。

**9.2.6** 桥梁智慧监测系统定期检查与维护的内容宜包括工作状态检查、保养与维护和保护装置的维护。

**9.2.7** 桥梁智慧监测系统运行维护与管理应由专业技术人员进行。

**9.2.8** 桥梁智慧监测系统日常管理宜每周进行一次，对于采集子站的日程管理宜两个月进行一次现场巡检，桥梁智慧监测系统定期检查与维护应每六个月进行一次，桥梁智慧监测系统异常处置应在异常发生的 24 小时内进行。宜每六个月向上一级管理部门或负责人上报桥梁智慧监测系统运行维护与管理纸质总结报告并存档。

**9.2.9** 桥梁智慧监测系统硬件更换应保证更换后硬件的主要技术指标不低于被更换硬件的主要技术指标，桥梁智慧监测系统软件升级应保证升级后软件的性能高于升级前软件的性能。应做好桥梁智慧监测系统硬件更换和软件升级前后监测数据的衔接。

**9.2.10** 桥梁智慧监测系统日常管理、定期检查与维护 and 异常处置应分别填写书面记录。

## 附录 A 分部工程竣工申请书

工 程 名 称		分部工程名称	
合 同 开 工日期	年 月 日	合同竣工日期	年 月 日
实 际 开 工日期	年 月 日	实际完工日期	年 月 日
工 程 范 围 及 内 容			
提 前 延 期说明			
报 告 要 求	本工程合同所含工程范围的项目已于 年 月 日施工完毕，经自查工程质量达到有关规定要求，现向建设单位申请于年 月 日组织竣工验收。		
业主单位 项目负责人： (公章) 年 月 日	监理单位 总监理工程师： (公章) 年 月 日	施工单位 项目经理： 单位负责人： (公章) 年 月 日	

## 附录 B 分部工程质量验收记录

工程名称		分部工程名称			
施工单位		项目经理			
序号	分项工程名称	检验批数	施工单位检查结果	验收意见	
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
质量控制资料					
单项和联合调试报告					
功能验收					
综合验收结论					
建设单位	监理单位	设计单位	施工单位		
项目负责人： (公章) 年 月 日	总监理工程师： (公章) 年 月 日	项目负责人： (公章) 年 月 日	项目经理： (公章) 年 月 日		

## 本规程用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待，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”；

表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准、规范执行时，写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

## 引用标准名录

- 1 《公路桥涵养护规范》 JTG 5120
- 2 《城市运行管理服务平台技术标准》 CJJ/T312
- 3 《城市运行管理服务平台数据标准》 CJ/T545
- 4 《信息安全技术网络安全等级保护基本要求》 GB/T 22239
- 5 《建筑与桥梁结构监测技术规范》 GB50982
- 6 《交通信息采集 视频车辆检测器》 GB/T24726
- 7 《动态公路车辆自动衡器》 GB/T 21296
- 8 《压力变送器检定规程》 JJG882
- 9 《低轨星载 GNSS 测量型接收机通用规范》 GB/T 39410
- 10 《线位移传感器校准规范》 JJF 1305
- 11 《建筑抗震试验方法规程》 JGJ101
- 12 《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》 JT/T1037
- 13 《建筑结构检测技术标准》 GB /T 50344
- 14 《公路桥梁承载力检测评定规程》 JTG/T J21
- 15 《结构健康监测系统设计标准》 CECS 333
- 16 《天津市桥梁结构健康监测系统设计技术规程》 DB/T29 208
- 17 《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》 JT/T 1037
- 18 《城市交通基础设施智能监测技术规范》 TCSPSTC62
- 19 《城市桥梁设计规范》 GJJ11
- 20 《公路桥梁健康监测系统设计数据库架构设计规范》 DB32/T 3940
- 21 《市政桥梁结构监测系统标准》 DB22/T 5054
- 22 《桥梁结构健康监测系统设计规范》 DB32/T 3562
- 23 《桥梁健康监测系统设计运营维护与管理规范》 DB34/T 3968

辽宁省地方标准

# 城市桥梁智慧监测系统技术规程

DB21/T \*\*—2023

条文说明

# 目 次

1	总则.....	42
2	术语.....	44
3	监测内容.....	45
3.1	一般规定 .....	45
3.2	悬索桥.....	45
3.3	斜拉桥.....	46
3.4	梁桥 .....	47
3.5	拱桥 .....	48
4	传感器.....	50
4.1	一般规定 .....	50
4.2	传感器性能参数.....	50
5	采集传输.....	54
5.1	一般规定 .....	54
5.2	采集.....	54
5.3	处理.....	55
5.4	传输.....	55
6	状态识别.....	57
6.2	模态参数识别.....	57
6.3	损伤识别 .....	61
7	智慧评估.....	65
7.1	一般规定 .....	65
7.2	数据展示 .....	65
7.6	二级评估 .....	66
7.7	评估方法 .....	67
8	智慧平台.....	68
8.1	一般规定 .....	68
8.2	设计要点 .....	68
8.3	开发原则 .....	69

9 验收与维护.....	70
9.1 验收.....	70
9.2 维护.....	70

# 1 总 则

**1.0.1** 城市桥梁智慧监测系统技术规程，是在城市运行管理服务平台上搭建城市桥梁安全运行监测系统，解决城市桥梁系统运行监测“一网统管”问题，深化平台智能化应用，及时预判风险，提升防控效率。

桥梁建成后随着运营时间的推移，大桥各构件将面临各种损伤及内力状态的改变，相应桥梁的刚度和承载能力就会出现不同程度的衰减，这些损伤和内力状态的改变如果能够被预先警告获知，并且及时进行适当的调整、维护、维修，就不会危及桥梁结构的运营安全，否则在长期疲劳下，多种因素耦合作用可能导致灾难性事故。随着科学技术的发展，综合现代测试与传感技术、网络通信技术、信号处理和分析技术、数学理论和结构分析理论等多个学科领域的桥梁结构健康监测系统，可极大地延拓桥梁的监测内容，并可连续地、实时地、在线地对结构“健康”状态进行监测和评估，对桥梁的运营安全和提高桥梁的管理水平具有极大的指导意义。

面对辽宁省城市桥梁高速发展的实际情况，保障桥梁服役期的安全使用，指导桥梁监测系统设计，协调辽宁省内各市桥梁结构监测系统监测数据的统一及共同管理，在辽宁省开展桥梁智慧监测系统的研究，为桥梁的智能监测和统一管理提供技术支持。

**1.0.2** 本条规定了本规程的适用范围，桥梁智慧监测系统不仅适用在建桥梁，对于已建的结构形式特殊或意义重大的桥梁，也宜进行桥梁智慧监测系统的设计。

**1.0.3** 桥梁智慧监测系统的设计须遵循功能要求和效益—成本分析两大准则。智慧监测系统的设计首先应考虑建立该系统的目的和功能，对于不同桥梁的建设规模、重要性、投资、服役环境及其服役期内性能退化等情况，建立智慧监测系统的设计和监测等级应有所不同。监测系统的规模以及所采取的传感器、数据的采集传输、状态识别、智慧评估、智慧平台和验收与维护等均需考虑投资的限度。

**1.0.4** 城市桥梁智慧监测系统的最终目的是为桥梁的运营管理和维护服务的，因此应最大限度的降低桥梁管养成本，保障桥梁安全运营，这就需要留有与现有桥梁养护管理软件系统兼容的数据接口，实现数据共享，为桥梁的综合评判提供合理依据。

**1.0.5** 城市桥梁智慧监测的目的如下：

1 通过设计对桥梁运营期内车辆过桥时桥梁结构响应的智慧监测系统，实时掌握桥梁结构缺陷与功能退化情况，智慧评估分析桥梁结构在运营车辆荷载作用下可能出现的发展趋势及其对结构安全运营可能造成的潜在威胁，为桥梁养护管理、维修加固提供决策依据，确

保桥梁结构安全运营。

2 通过智慧监测平台对遭受超重车辆或船舶撞击的桥梁,及时采集监测桥梁荷载数据,评估分析响应指标超出预警值情况,对预警信息提请桥梁管理部门对该桥进行进一步的检测和评估。

3 通过桥梁智慧监测系统对服役桥梁结构的健康状况、结构安全可靠进行定期数据采集和评估分析,进而给大桥运营者提供实时的等级预警信息,及时地对桥梁结构进行检查和维修。

## 2 术语

本章仅将本规程出现的、比较生疏的术语列出。术语的解释，其中有部分是行业公认的，大部分是概括性的含义。术语的英文名称不是标准化名称，仅供引用时参考。

## 3 监测内容

### 3.1 一般规定

**3.1.1** 监测内容包括环境与作用、结构响应及变化，应根据桥梁所处环境、所受作用以及结构构造特点、力学行为特性、状态评估需求和养护管理要求等因素综合确定。

**3.1.2** 监测内容应考虑不同桥梁的监测需求，系统新建或改造升级时应根据桥梁技术状况、构件状况和典型病害等确定相应监测内容。

**3.1.3** 监测内容包含应选监测项、宜选监测项、可选监测项。对于不具备建设条件的应选监测项，经分析论证，可根据实际情况调整监测内容，但应在具备条件后加以增补。

**3.1.4** 根据养护管理需要，可对桥梁附属设施状况及桥梁运营状态等进行监测，可将相关其他系统数据接入监测系统，包括除湿系统、防撞护栏、异物侵限、声屏障、桥面和桥下车船状态等数据。

### 3.2 悬索桥

**3.2.1** 本条规定悬索桥环境监测、作用监测、响应监测、结构变化监测的具体内容：

**1** 环境监测项主要包括环境温度和、环境湿度和结冰情况。

**2** 作用监测项主要包括车辆荷载、风荷载、结构温度、船舶撞击、地震等。车辆荷载是悬索桥运营期间的主要荷载，通过监测桥上所有车道的车重、轴重、车流量、空间分布等数据，可以获得车辆荷载信息，为桥梁评估提供荷载数据。风荷载是大跨度悬索桥的主要荷载之一，桥梁结构风参数应通过监测自由风场的风速和风向获得。风速、风向的监测位置主要为桥面和塔顶，通过风参数监测，为主缆、主梁、吊索等的风致振动评估提供数据。结构温度监测项主要包括混凝土或钢结构构件温度、桥面铺装层温度等，通过温度监测数据，可用于温度修正和温度梯度的获取。考虑悬索桥航道的船舶撞击风险，宜对船舶撞击进行监测，监测内容为桥墩加速度和视频监控。地震是抗震设防区悬索桥在服役过程中可能遭受的破坏力强的荷载，应进行地震监测，地震动监测传感器宜布设在桥岸地表场地、承台顶或桥墩底部，获得桥梁地震动输入，为桥梁震后评估提供数据。

**3** 悬索桥响应监测项主要包括位移、转角、应变、索力、支座反力、振动等。位移监测项主要包括主梁挠度、主梁横向变形、支座位移、梁端纵向位移、塔顶偏位和主缆偏位等，

通过位移监测数据，可以评估桥梁整体稳定性。转角监测项主要包括塔顶截面倾角、梁端水平转角、梁端竖向转角等，通过转角监测数据，可以评估桥梁整体变形特性和伸缩缝支座性能。应变监测主要包括主梁和索塔关键截面应变，通过应变监测数据可以确定关键截面的应力状态。通过索力、锚跨索股力监测数据可以获得吊索和锚跨索股索力进而评估吊索和锚跨索股状态。支座反力监测数据可以反映支座是否处于正常受压工作状态并且是否出现脱空、卡死现象。振动监测项主要包括主梁竖向振动加速度、主梁横向振动加速度、主梁纵向振动加速度、塔顶水平双向振动加速度和索振动加速度等，通过振动监测数据可以判断桥梁是否发生过大的振动，识别桥梁结构频率、振型、阻尼比等动力特性，判断是否发生涡振等，识别吊索振动频率以及吊索过大的振动，进而评估吊索状态等。

4 悬索桥结构变化监测项主要包括基础冲刷、变形、裂缝、腐蚀、断丝、螺栓紧固力和索夹滑移等。基础冲刷项主要监测基础冲刷深度，可以为评估基础承载力和桥梁稳定性提供依据。变形监测主要包括锚碇位移，通过变形监测数据，可以评估和判断桥梁整体安全状态。裂缝监测主要包括混凝土结构裂缝和钢结构裂缝，通过监测裂缝长度、宽度和扩展速度，可以为桥梁评级提供依据，同时反映桥梁局部刚度退化情况。腐蚀监测项主要包括墩身和承台的混凝土氯离子浓度、墩身和承台混凝土侵蚀深度等。通过监测吊索、主缆断丝数量，可以评估吊索、主缆的承载力和寿命退化程度。索夹发生滑移会改变吊索状态，导致内力状态变化，也会损坏主缆防护层从而导致主缆损伤，严重影响结构安全，索夹滑移主要监测索夹滑移量大小。索夹螺栓松动是造成索夹抗滑力不足、产生滑移的一个原因，通过监测索夹螺栓紧固力，可以反映螺栓是否处于正常均匀受力状态、有无发生松动、是否需要补足螺栓紧固力。

### 3.3 斜拉桥

3.3.1 本条规定斜拉桥环境监测、作用监测、响应监测、结构变化监测的具体内容：

1 环境监测项主要包括环境温度、环境湿度、降雨量和结冰情况。

2 作用监测项主要包括车辆荷载、风荷载、结构温度、船舶撞击、地震等。车辆荷载是斜拉桥运营期间的主要荷载，通过监测桥上所有车道的车重、轴重、车流量、空间分布等数据，可以获得车辆荷载信息，为桥梁评估提供荷载数据。风荷载是大跨度斜拉桥的主要荷载之一，桥梁结构风参数应通过监测自由风场的风速和风向获得。风速、风向的监测位置主要为桥面和塔顶，通过风参数监测，为主梁、斜拉索等的风致振动评估提供数据。结构温度

监测项主要包括混凝土或钢结构构件温度、桥面铺装层温度等，通过温度监测数据，可用于温度修正和温度梯度的获取。考虑斜拉桥航道的船舶撞击风险，宜对船舶撞击进行监测，监测内容为桥墩加速度和视频监控。地震是抗震设防区斜拉桥在服役过程中可能遭遇的破坏性强的荷载，应进行地震监测，地震动监测传感器宜布设在桥岸地表场地、承台项或桥墩底部，获得桥梁地震动输入，为桥梁震后评估提供数据。

**3** 斜拉桥响应监测项主要包括位移、转角、应变、索力、支座反力、振动等。位移监测项主要包括主梁挠度、主梁横向变形、支座位移、梁端纵向位移、塔顶偏位等，通过位移监测数据，可以评估桥梁整体稳定性。转角监测项主要包括塔顶截面倾角、梁端水平转角、梁端竖向转角等，通过转角监测数据，可以评估桥梁整体变形特性和伸缩缝支座性能。应变监测项主要包括主梁关键截面、钢-混凝土连接处附近等，通过应变监测数据可以确定关键截面和钢砼连接处的应力状态。通过索力监测数据可以获得斜拉索索力进而评估斜拉索状态。支座反力监测数据可以反映支座是否处于正常受压工作状态并且是否出现脱空、卡死现象。振动监测项主要包括主梁竖向振动加速度、主梁横向振动加速度、主梁纵向振动加速度、塔顶水平双向振动加速度和索振动加速度等，通过振动监测数据可以判断桥梁是否发生过大的振动，识别桥梁结构频率、振型、阻尼比等动力特性，判断是否发生涡振等，识别斜拉索振动频率以及斜拉索过大的振动，进而评估斜拉索状态等。

**4** 斜拉桥变化监测项主要包括基础冲刷、裂缝、腐蚀、断丝、螺栓紧固力等。基础冲刷项主要监测基础冲刷深度，可以为评估基础承载力和桥梁稳定性提供依据。裂缝监测项主要包括混凝土结构裂缝和钢结构裂缝，通过监测裂缝长度、宽度和扩展速度，可以为桥梁评级提供依据，同时反映桥梁局部刚度退化情况。腐蚀监测项主要包括墩身和承台的混凝土氯离子浓度、墩身和承台的混凝土侵蚀深度等。通过监测斜拉索断丝数量，可以评估斜拉索的承载力和寿命退化程度。通过监测高强螺栓紧固力，可以反映螺栓是否处于正常均匀受力状态、有无发生松动、是否需要补足螺栓紧固力。

### 3.4 梁桥

**3.3.1** 本条规定斜拉桥环境监测、作用监测、响应监测、结构变化监测的具体内容：

**1** 环境监测项主要包括环境温度和环境湿度。

**2** 作用监测项主要包括车辆荷载、风荷载、结构温度、船舶撞击、地震等。车辆荷载是梁桥运营期间的主要荷载，通过监测桥上所有车道的车重、轴重、车流量、空间分布等数

据,可以获得车辆荷载信息,为桥梁评估提供荷载数据。风荷载是大跨度梁桥的主要荷载之一,桥梁结构风参数应通过监测自由风场的风速和风向获得。风速、风向的监测位置为桥面,通过风参数监测,为桥梁风致振动评估提供数据。结构温度监测项主要包括混凝土或钢结构构件温度、桥面铺装层温度等,通过温度监测数据,可用于温度修正和温度梯度的获取。考虑梁桥航道的船舶撞击风险,宜对船舶撞击进行监测,监测内容为桥墩加速度和视频监控。地震是抗震设防区梁桥在服役过程中可能遭遇的破坏性强的荷载,应进行地震监测,地震动监测传感器宜布设在桥岸地表场地、承台顶或桥墩底部,获得桥梁地震动输入,为桥梁震后评估提供数据。

3 桥梁响应监测项主要包括位移、应变、支座反力、振动等。位移监测项主要包括主梁挠度、支座位移、梁端纵向位移、梁端竖向位移、高墩墩顶偏位等,通过位移监测数据,可以评估桥梁整体稳定性。应变监测主要包括主梁关键截面等,通过应变监测数据可以确定关键截面的应力状态。支座反力监测数据可以反映支座是否处于正常受压工作状态并且是否出现脱空等现象。振动监测项主要包括主梁竖向振动加速度、主梁横向振动加速度、桥墩顶部纵向及横向振动加速度等,通过振动监测数据可以判断桥梁是否发生过大的振动,识别桥梁结构频率、振型、阻尼比等动力特性,判断是否发生涡振等。

4 梁桥变化监测项主要包括基础冲刷、裂缝、腐蚀、预应力、螺栓紧固力等。基础冲刷项主要监测基础冲刷深度,可以为评估基础承载力和桥梁稳定性提供依据。裂缝监测主要包括混凝土结构裂缝和钢结构裂缝,通过监测裂缝长度、宽度和扩展速度,可以为桥梁评级提供依据,同时反映桥梁局部刚度退情况。腐蚀监测项主要包括墩身和承台的混凝土氯离子浓度、墩身和承台的混凝土侵蚀深度等。预应力监测项主要监测体外预应力,通过预应力监测数据可以反映桥梁体外预应力的损失情况,可以为评估桥梁的整体受力状态提供依据。通过监测高强螺栓紧固力,可以反映螺栓是否处于正常均匀受力状态、有无发生松动、是否需要补足螺栓紧固力。

### 3.5 拱桥

3.3.1 本条规定斜拉桥环境监测、作用监测、响应监测、结构变化监测的具体内容:

1 环境监测项主要包括环境温度和环境湿度。

2 作用监测项主要包括车辆荷载、风荷载、结构温度、船舶撞击、地震等。车辆荷载是拱桥运营期间的主要荷载,通过监测桥上所有车道的车重、轴重、车流量、空间分布等数

据，可以获得车辆荷载信息，为桥梁评估提供荷载数据。考虑拱桥航道的船舶撞击风险，宜对船舶撞击进行监测，监测项为桥墩加速度。风速、风向的监测位置主要为桥面、拱顶，通过风参数监测，为桥梁风致振动评估提供数据。地震是抗震设防区拱桥在服役过程中可能遭遇的破坏性强的荷载，应进行地震监测，地震动监测传感器宜布设在桥岸地表场地、承台顶或桥墩底部，获得桥梁地震动输入，为桥梁震后评估提供数据。结构温度监测项主要包括混凝土或钢结构构件温度、桥面铺装层温度等，通过温度监测数据，可以为温度修正和温度梯度的获取提供依据。

**3** 拱桥响应监测项主要包括位移、应变、索力、支座反力、振动等。位移监测项主要包括主梁挠度、主梁横向变形、支座位移、梁端纵向位移、拱顶偏位等，通过位移监测数据，可以评估桥梁整体稳定性。应变监测项主要包括主梁关键截面、拱关键截面等，通过应变监测数据可以确定主梁和主拱关键截面的应力状态。索力监测项主要包括吊杆索力、系杆索力等，通过索力监测数据可以获得吊杆和系杆索力进而评估吊杆和系杆状态。支座反力监测数据可以反映支座是否处于正常受压工作状态并且是否出现脱空、卡死现象。振动监测项主要包括主梁竖向振动加速度、主梁横向振动加速度、拱顶三向振动加速度、吊杆振动加速度等，通过振动监测数据可以判断桥梁是否发生过大的振动，识别桥梁结构频率、振型、阻尼比等动力特性等。

**4** 拱桥变化监测项主要包括基础冲刷、裂缝、腐蚀、断丝、螺栓紧固力等。基础冲刷项主要监测基础冲刷深度，可以为评估基础承载力和桥梁稳定性提供依据。裂缝监测主要包括混凝土结构裂缝和钢结构裂缝，通过监测裂缝长度、宽度和扩展速度，可以为桥梁评级提供依据，同时反映桥梁局部刚度退化情况。腐蚀监测项主要包括墩身和承台的混凝土氯离子浓度、墩身和承台的混凝土侵蚀深度等。通过监测吊杆断丝数量，可以评估吊杆的承载力和寿命退化程度。通过监测高强螺栓紧固力，可以反映螺栓是否处于正常均匀受力状态、有无发生松动、是否需要补足螺栓紧固力。

## 4 传感器

### 4.1 一般规定

#### 4.1.1 传感器的选型应符合以下原则：

- 1 传感器选型应满足测量精度、分辨率、灵敏度、线性度、量程、频响特性等要求；
- 2 应选用具有良好耐久性、长期稳定性、环境适应性及抗干扰（电源、电磁）能力的传感器；
- 3 在满足监测要求的情况下，应坚持实用性原则第一，优先选择造价低、技术成熟、性能先进的传感器；
- 4 所选传感器的安装应不影响桥梁的结构安全及正常运营，且便于施工、维护和更换。

#### 4.1.2 传感器的布置应符合以下原则：

- 1 根据桥梁结构受力特点，所选位置应尽可能获取全面、精确的作用和结构参数信息；
- 2 传感器布置应体现测点优化原则，合理利用结构的对称性，达到减少传感器的目的；
- 3 基于力学分析结果，选择最大位移、主要控制点或能推算结构几何状态变化的位置或构件；
- 4 选择最大应力分布的位置或构件，最大应力变化的位置或构件，应力传递明确的位置或构件；
- 5 应根据桥梁结构振动主要参与振型，合理选择结构模态分析所必须的振动监测控制点，且测得的模态信息能够与有限元分析的结果保持良好的吻合度；
- 6 对于桥梁检测报告中呈现的突出病害点、既有损伤及缺陷位置，增设传感器并进行重点监测；
- 7 所选测点位置应有较好的抗噪声干扰性能，同时考虑尽量减少信号的传输距离；
- 8 传感器的布设工艺与系统的其他施工工艺紧密配合，不出现矛盾，并兼顾相互补充与加强。

### 4.2 传感器性能参数

#### 4.2.1 环境监测类常用传感器性能参数要求。

- 1 环境温度传感器量程上限宜超出大气温度年极大值30℃以上，量程下限宜低于年极

小值20°C以上，最大允许误差 $\pm 0.50^{\circ}\text{C}$ ，分辨力小于等于 $0.1^{\circ}\text{C}$ ，且应符合《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982的相关规定。考虑我省温度变化剧烈，传感器量程宜大于年极值温度的1.5倍。

2 环境湿度监测传感器量程应为0-100%RH(非凝露)，最大允许误差 $\pm 3\%RH$ ，且监测方法应符合《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982的相关规定。

3 雨量监测传感器，应根据桥址处气候、气象条件选择雨量传感器类型、量程，分辨力不大于 $0.1\text{mm}$ ，最大允许误差 $\pm 4\%F\cdot S$ 。

4 结冰监测可采用超声波测试法、视频监测法，结冰厚度监测最大允许误差宜小于 $1\text{mm}$ ，摄像机技术参数和指标应符合《交通信息采集 视频车辆检测器》GB/T24726的相关规定。

#### 4.2.2 作用监测类常用传感器性能参数要求：

1 动态称重系统宜联合采用动态称重和视频图像监测设备，其中称重传感器参数和安装要求应符合《动态公路车辆自动衡器》GB/T 21296 相关规定；视频监测范围应覆盖全桥范围内的所有行车道，具备图像自动抓拍功能，且应符合《交通信息采集 视频车辆检测器》GB/T24726 的相关规定；

2 桥面风速风向监测宜采用三向超声风速仪，塔顶风速风向宜采用机械式风速仪或两向超声风速仪，风速监测量程应大于其安装高度处设计风速的1.2倍，最大允许误差 $\pm 0.3\text{ m/s}$ ，分辨率不小于 $0.1\text{m/s}$ ；且监测方法应符合《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982 的相关规定；

3 风压监测宜选择陶瓷型或扩散硅型微压差传感器，量程宜大于 $-1000\text{Pa}\sim+1000\text{Pa}$ ，最大允许误差 $0.5\%F\cdot S$ ；

4 桥面风速风向监测宜采用三向超声风速仪，塔顶风速风向宜采用机械式风速仪或两向超声风速仪，风速监测量程应大于其安装；

5 船舶撞击桥墩监测分为桥墩和主梁监测，桥墩监测宜采用加速度传感器或倾角传感器，主梁监测宜采用拉线位移传感器，并辅助视频监测，摄像机技术参数和指标应符合《交通信息采集 视频车辆检测器》GB/T24726 的相关规定，还宜具备低照度、透雾功能。

#### 4.2.4 结构响应监测类常用传感器性能参数要求：

1 振动监测宜采用加速度监测方法，宜根据桥梁结构振动主要参与振型，选择三向、双向或单向加速度传感器；传感器量程应大于计算分析振动响应最大值的1.2倍，且宜不小于 $\pm 1g$ ，横向灵敏度小于等于5%，频响范围 $0.14\text{Hz}\sim 100\text{Hz}$ ；振动监测方法应符合《建筑与

桥梁结构监测技术规范》GB50982 的相关规定。

2 主梁挠度监测宜选用基于连通管原理的压力变送器等，压力变送器监测最大允许误差宜不大于 2 mm，将安装、调试后监测仪器的初始值作为测量基准值，并应定期进行温度修正和补液，压力变送器技术指标宜符合《压力变送器检定规程》JJG882 的相关规定；对于大跨度桥梁，也可选用 GNSS 技术进行监测，或设置桥梁永久观测点固定测标进行定期量测；挠度监测方法应符合《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982 的相关规定。

3 应变监测应进行温度补偿，安装时应测量记录初始值；应变传感器的选择应充分考虑构件材料性质、量程、精度和服役环境等条件，静应变监测可采用光纤应变传感器、振弦式应变传感器，传感器量程应大于等于  $1000\mu\epsilon$ ，且静应大于等于被测量预计变化范围的 1.2 倍；动应变监测可采用光纤应变传感器、电阻应变传感器等，传感器量程应大于等于预测被测量变化范围的 2 倍，分辨力应小于等于  $1\mu\epsilon$ ；应变监测方法应符合《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982 的相关规定。

4 索力监测宜采用间接测力（频率法）或直接测力法。频率法宜选用加速度传感器，传感器量程应大于计算分析振动响应最大值的 1.5 倍，且宜不小于  $\pm 2g$ ，横向灵敏度小于等于 5%，频响范围 0.2Hz~100 Hz；直接测力法可采用磁通量传感器进行监测，传感器应在施工期间完成安装；索力监测方法应符合《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982 的相关规定。

5 悬索桥、斜拉桥和拱桥空间位移、塔顶偏位、主缆偏位宜采用 GNSS 监测技术进行监测，GNSS 监测宜采用北斗卫星导航技术，并配置永久观测基准站，监测数据应转换到大桥独立坐标系；水平方向测量误差应不大于 20 mm，垂直方向测量误差应不大于 50mm，技术指标应符合《低轨星载 GNSS 测量型接收机通用规范》GB/T 39410 相关规定。梁端、墩顶、塔顶的转角变位监测宜采用微电子倾角传感器，角度量程宜为  $-5^{\circ}\sim+5^{\circ}$ ，角度误差不大于  $0.01^{\circ}$ 。

6 支座位移、梁端纵向位移监测宜选用拉线位移传感器、磁致伸缩位移传感器、激光位移传感器，最大允许误差宜不大于 0.5%，技术指标宜符合《线位移传感器校准规范》JJF 1305 的相关规定；

#### 4.2.5 结构变化监测类常用传感器性能参数要求：

1 裂缝监测可采用振弦式裂缝传感器、电阻式裂缝传感器、长标距光纤式裂缝传感器、高清摄像机，量程应大于裂缝宽度的 5 倍，最大允许误差不大于 0.02 mm，分辨力小于等于 0.01mm，裂缝监测方法应符合《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982 的相关规定。

2 悬索桥锚旋位移、梁桥桥墩沉降、拱桥拱脚位移监测宜采用自动监测或定期观测相结合的方式，自动监测宜采用 GNSS 北斗卫星导航监测技术，GNSS 监测应配置永久观测基准站，应符合《低轨星载 GNSS 测量型接收机通用规范》GB/T 39410 的相关规定；定期观测应安装永久固定金属测标，永久观测点设置应符合《公路桥涵养护规范》JTG 5120 的相关规定。对于桥墩不均匀沉降监测，可选用基于连通管原理的压力变送器等，且性能参数宜符合 4.2.4 挠度监测的规定。

3 腐蚀监测宜选用电化学方法，监测腐蚀电位、腐蚀电流、混凝土温度、腐蚀速率等参数，腐蚀监测传感器宜选择与桥梁结构钢筋及保护层匹配的安装方式，监测方法应符合《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB 50982 的相关规定。

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

## 5 采集传输

### 5.1 一般规定

- 5.1.1** 数据采集、处理、传输设备的稳定性是指设备长期使用后仍能保持正常的工作性能，且对工作环境具有较强的适应能力和抗干扰能力。
- 5.1.2** 应根据城市桥梁的规模、测点位置和数量、监测设备类型，合理设计智慧监测系统的数据采集、处理、传输方式。
- 5.1.3** 在满足监测系统需求的前提下，硬件性能指标设计宜预留一定的冗余度，硬件宜预留一定的可扩展空间，便于匹配可能提高的监测要求。
- 5.1.4** 采集传输线路的布设拓扑应依据监测系统具体需求、传感器类型和其传输距离衰减性能、各级采集设备的传输能力、各场所和通信网络的现有条件以及施工现场条件等进行综合性的设计。
- 5.1.5** 数据预处理应进行滤波降噪，方法一般包含低通滤波、带通滤波、高通滤波、数据平均处理等。
- 5.1.6** 传输线路的拓扑结构应符合国际和国家相关标准的要求。应考虑智慧监测系统和各结构、电气、机电、通信、安全等多方面的协调，应按相关标准设计安全可靠、高效便利的传输系统。
- 5.1.7** 数据采集与传输软件在整个监测系统中十分关键，采集的数据为分析桥梁结构状态提供直接依据，软件精确度、运行速度、传输质量、数据库设置、数据文件存取格式等均应符合严格的要求，保证数据采集和传输的可靠性、实时性及同步性。

### 5.2 采集

- 5.2.1** 对于信号同步性要求较高的监测项目，宜选用多类型传感器同步采集设备，实现硬件级信号同步。
- 5.2.2** 测点及监测设备较多且监测部位距离较远且相对分散的桥梁宜采用分布采集或混合采集；测点及监测设备较少且监测部位集中的桥梁，宜采用集中采集。
- 5.2.3** 集中采集：传感器系统空间分布较集中、传感器网络与采集站的距离较近时宜采用此方法，即仅设置单一的中心采集站，根据实际情况，中心采集站可安置于被测结构外，也

可以安置于被测结构内达到安置条件的区域。

**5.2.4 分布采集：**传感器系统空间分布较分散时，或集中采集方案传感器和采集站的连接距离超过传感器信号衰减传输性能所允许的最远距离时，宜设置多个子采集站，各子采集站与中心采集站直接或通过中继相连，其中需注意子采集站必须安置于具备设备安置条件的区域，传感器与采集站，子采集站与中心采集站的连接须可靠、稳定。

**5.2.5 混合采集：**指的是集中采集和分布式采集混合使用的方式。在同一桥梁结构的监测中，在传感器空间分布较为分散时，总体上可以设置多个子采集站进行分布式采集，而在特定局部可以用光纤传感网络直接连接中心采集站而采用集中采集。

**5.2.6 采集站安置位置**应能保证信号的传输质量，采集站与传感器间的传输距离应由信号传输衰减性能确定。

**5.3.7 桥梁智慧监测系统**在高频方式下采集的监测数据容量巨大。在采集软件设计时，宜根据桥梁结构特点和监测需求，不进行连续性全时的采集和存储，而是设置采集阈值来进行触发采集或存储，或采取分时段来确定采集、存储和发送的策略。

### 5.3 处 理

**5.3.1 数据分析处理系统**宜根据实际情况灵活设置多种组合形式，一般将数据采集设备、数据处理（预处理、后处理）设备、数据分析设备进行上下级布置，各级间通过网络传输连接；对设备较少的桥梁，也可将数据采集、数据处理到分析都集中在本地同一个终端中。

**5.3.2 在滤波器的设计和配置上**，可分别对数据采集设备、数据处理设备、数据分析设备都有单独的滤波器设计和配置，也可将数据采集、处理到分析设备进行统一的设计和配置。

**5.3.3 滤波器的设计**应遵循最大限度滤除噪声和最大限度保留有用信号的原则。当采集的数据中高频噪声较多时，宜在数据预处理阶段采用低通或带通滤波器进行滤波，当需要进行振动模态分析时，应在数据分析处理阶段对结构振动信号进行分析，同时利用处理软件的频谱分析滤波功能，消除趋势项。

**5.3.4 为保证数据的可靠性、实时性及同步性**，数据处理软件应具有补发功能，当数据通信与传输过程由于故障而中断，在故障排除后，宜利用数据通道空闲时段将中断时间段内所有数据发送到接收端，通过设置时限避免因应答等待、重发及补发影响正常数据发送。

### 5.4 传 输

**5.4.1** 数据传输应根据工程场地现场的各种条件，充分考虑到工程过程中可能遇到的各种问题，灵活选取合适的方式。

**5.4.2** 根据工程各阶段施工特点和需要组建临时通信网络的，尽量选择无线传输方式，便于布设和维护。

**5.4.3** 有线传输是指两个通信设备之间使用有形介质连接，将信号从一方传到另一方。常用的介质有双绞线、同轴电缆和光缆等，常用的接口有 RS232、RS422、RS485 和 RJ45 等。

**5.4.4** 无线传输是指两个通信设备之间不使用任何物理连接，将信号通过空间传输的一种技术。通常可分为无线广域通信网（无线公网）和无线局域通信网两种方式。无线广域通信网络可采用 GPRS 和 CDMA 等方式；无线局域通信网可采用 TCP/IP 协议。

**5.4.5** 异步传输是以字符为单位进行传输，传输字符之间的时间间隔可以是随机的、不同步的。但在传输一个字符的时段内，收发双方仍需依据比特流保持同步。异步传输方式实现简单，但需在每个字符的首尾附加起始位和停止位，因而它的额外开销大，传输效率低。这种方式主要用于低速传输的设备。

**5.4.6** 同步传输是指在一组字符（数据包、帧）之前加入同步字符，同步字符之后可以连续发送任意多个字符。同步方式中，数据传输额外开销小，传输效率高。但是同步方式实现复杂，传输中的一个错误将影响整个字符组（而异步传输中的同样错误只影响一个字符的正确接收）。这种方式用于高速传输的设备。

**5.4.7** 基于信号的同步技术采用基于时钟同步模块的时钟频率共享技术，每个采集设备中装有时钟同步模块，再用有线介质将各个设备相连，以其中之一作为主模块，其余的作为从模块，主模块内部的时钟信号通过电缆同步从模块内部的时钟信号。

**5.4.8** 采集设备的时间戳同步应采用同一网络时间服务器。基于时间的同步技术是系统各部分具有一个公共的时间基准参考，可以基于该基准时间生成事件、触发和时钟。对于长距离传输，可以利用包括 GPS、NTP、IEEE 1588 和 IRIG-B 等各种时间参考，借助绝对定时实现测量结果的关联与同步。

## 6 状态识别

### 6.2 模态参数识别

6.2.1 本条规定设备要求和测试要求。

1 设备要求：动力检测试验设备一般包括激振设备，振动控制设备，测量和记录仪器，数据处理设备；若量程设置过大，测试信号过低，信噪比将降低；反之，若量程设置过小，则容易过载。体积小，重量轻的激振器可以减小对被测试系统的影响。

2 测试要求：

(1) 模型测试的结构模型可参考《建筑抗震试验方法规程》JGJ101 中的相关要求制作；

(2) 若激振点正好选在结构某阶模态的节点上，则该阶模态不能被激发出来。即使激振点在节点附近，该阶模态的振动信号也很弱。如果激振点正好落在某阶模态的反节点附近，则激振力能有效激起该阶模态，但是由于反节点的振动幅值最大，可能超出测量仪器量程范围，并需要较大预应力才能使推力杆与力传感器（或结构）不脱离，这将增大预压力和传感器附加质量对结构的影响。

(3) 激振点的选取可由两种方法确定：

①根据经验确定。若结构有自由端，激振点宜选在自由端附近；若结构对称，则不宜选在结构对称面上。

②根据试验确定。在通过经验初步确定的基础上，可选定几个激振点进行激励试验，测量若干个频响函数，观察由哪几个激振点激励所得到的频响函数不丢失重要模态，则此点为最佳激振点。

6.2.2 工程结构模态参数识别方法可以分为三大类。

1 频域法

发展相对较早，它是随着傅立叶变换的问世而发展起来的，可分为单模态识别法和多模态识别法、分区模态综合法和频域总体识别法。对小阻尼且各阶模态耦合较小的系统，用单模态识别法可达到满意的识别精度。而对模态耦合较大的系统，应用多模态识别法。频域法的最大优点是利用频域平均技术，最大限度地抑制了噪声影响，使模态定阶问题容易解决。但也存在若干不足：一是功率泄露、频率混叠等。二是在识别振动模态参数时，虽然傅立叶

变换能将信号的时域特征和频域特征联系起来，分别从信号的时域和频域观察，但由于信号的时域波形中不包含任何频域信息，二者不能有机结合。另外，傅立叶谱是信号的统计特性，是整个时间域内的积分，没有局部分析信号的功能，完全不具备时域信息，在信号分析中就面临时域和频域的局部化矛盾。三是对非线性参数需用迭代法识别，分析周期长。由于必须使用激励信号，一般需增加复杂的激振设备。特别是对大型结构，尽管可采用多点激振技术，但有些情况下仍难以实现有效激振，无法测得有效激励和响应信号，比如对大型海工结构、超大建筑及超大运输机械等，往往只能得到其自然力或工作动力激励下的响应信号。

频域法可以进一步划分为以下几类方法：

### (1) 单模态识别方法

从理论上说，单模态识别方法只用一个频响函数（原点或跨原点频响函数），就可得到主导模态的模态频率和模态阻尼（衰减系数）。而要得到该阶模态振型值，则需要频响函数矩阵的一列（激励一点，测各点响应）或一行（激励各点，测一点响应）元素，这样便得到主导模态的全部参数。将所有关心模态分别作为主导模态进行单模态识别，就得到系统的各阶模态参数。单模态识别方法又包括：

①直接估计法。该方法认为系统的观测数据是准确的，没有噪声和误差，直接由其求取系统的数学模型，分为分量估计法及差分法。分量估计法利用单自由度系统频响函数各种曲线的特征进行参数识别，适用于单自由度系统的参数识别，对复杂结构，当各阶模态并不紧密耦合时，也可应用此法对某阶模态作参数识别。这种方法主要基于特征曲线的图形进行参数识别，所以有人也称为图解法。该方法识别精度差、效率低。差分法利用各振点附近实测频响函数值的差分直接估算模态参数，简单易行，便于编程处理。属于直接估计，且未考虑剩余模态影响，精度不高。

②最小二乘圆拟合法，属于曲线拟合法。其基本思想是根据实测频响函数数据，用理想导纳圆去拟合实测的导纳圆，并按最小二乘原理使其误差最小。此方法只用最小二乘原理估算出导纳圆半径或振型，而其他模态参数的估计仍建立在图解法的基础上，故精度不高。

### (2) 多模态识别方法

多模态识别方法是在建立频响函数的理论模型过程中，考虑耦合较重的待识别模态，用适当的参数识别方法估算。它适用于模态较为密集，或阻尼较大，各模态间互有重叠的情况。该方法包括：

①基于频响函数数学模型不同有两类方法：一类以频响函数的模态展式为数学模型，包括非线性加权最小二乘法、直接偏导数法；另一类以频响函数的有理分式为数学模型，包括

Levy 法（多项式拟合法）、正交多项式拟合法等。Levy 法做参数识别的数学模型采用频响函数的有理分式形式，由于未使用简化的模态展式，理论模型是精确的，因而有较高的识别精度，但计算工作量大。b.优化识别法。将非线性函数在初值附近作泰勒展开，通过迭代来改善初值，达到识别参数的优化。

### （3） 分区模态综合法

对较大型结构，由于单点激励能量有限，在测得的一列或一行频响函数中，远离激励点的频响函数信噪比很低，以此为基础识别的振型精度也很低，甚至无法得到结构的整体振型。分区模态综合法简单，不增加测试设备便可得到满意的效果，缺点是对超大型结构仍难以激起整体有效模态。

### （4） 频域总体识别法

它运用所有测点的频响函数来识别模态阻尼和模态频率，可以认为是一种总体识别。运用单输入多输出（SIMO）法识别模态阻尼和模态频率原则上也可以用各点的测量数据，并分别识别各点的留数值。但是根据单点激励所测得的一系列频响函数来求取模态参数时，可能遗漏模态，单点激励无法识别重根以及难以识别非常密集的模式。

### （5） 线性动态系统的（KL）方法

KL 方法是在频域内推导的，基于准确的系统响应和离散傅立叶变换表达式的方法。考虑分布函数在频域内导出的特征方程将产生的不同问题，对有效 KL 模态计算和利用 KL 特征模态构造降阶系统。KL 方法有如下优点：

①KL 过程利用快照方法，使获得大型系统特征模态的问题降为解决只有 100 阶矩阵的特征模态。

②提出了真实的优化模态。

③直接响应，不需要系统的动态模型表述，能应用于分析和实验模型。

④解决了线性系统及其伴随系统，有可能重新构造初始系统的特征模态。

## 2 时域法

可以只使用实测响应信息，无需对信号进行傅里叶变换，因此可以利用时域方法对连续工作的结构进行“在线”参数识别，能真正反映结构的实际动态特性。特别是对大型复杂结构，如飞机、船舶及建筑物等受到风、浪及大地脉动的作用，它们在工作中承受的荷载难以测量，但响应信号可以测得，直接利用响应的时域信号进行参数识别无疑是很有意义的。时域参数识别技术只需要响应的时域信息，减少了激励设备，大大节省了测试时间与费用。不足在于不使用平均技术，分析信号中包含噪声干扰。

### (1) Ibrahim 时域法

以粘性阻尼多自由度系统的自由响应为基础,根据对各测点测得的自由振动响应信号以适当的方式采样,建立自由振动响应矩阵及数学模型。求出系统的特征值与特征向量,最终识别出各模态参数。此方法概念简单,存在的问题是:

①位移、速度及加速度响应的测试是困难的;

②此法要求激励能量足够大,否则不足以使系统产生所需全部模态的自由振动响应信息;

③要求测试对应于系统  $n$  个自由度测点的自由响应,才能构成  $2n \times 2n$  阶的状态向量矩阵,测试工作量很大。

### (2) ITD 法

该方法属于 SIMO 参数识别,直接使用自由响应或脉冲响应信号。同时测得各测点的自由响应(位移、速度或加速度三者之一),通过三次不同延时采样,构造自由响应采样数据的增广矩阵,根据自由响应的数学模型建立特征方程,求解出特征对后再估算各阶模态参数。ITD 法的特点是同时使用全部测点的自由响应数据。

### (3) 最小二乘复指数法 (LSCE 法)

最小二乘复指数法也称为 Prony 法,属于单输入单输出 (SISO) 参数识别。LSCE 法直接使用自由响应或脉冲响应信号,基本思想是以  $Z$  变换因子中包含待识别的复频率,构造 Prony 多项式,使其零点等于  $Z$  变换因子的值。用最小二乘法求得 Prony 多项式的根。再由脉冲响应数据序列构造该测点各阶脉冲响应幅值的线性方程组,用最小二乘法求解,对各点均作上述识别,得到各阶模态矢量。与 ITD 法相比,LSCE 法在识别模态频率和模态阻尼时只用一个测点的脉冲响应数据,属于局部识别法。

### (4) 多参考点复指数法 (PRCE 法)

源于单点激励下的最小二乘复指数法,属多输入多输出 (MIMO) 整体识别法,数学模型为基于 MIMO 的脉冲响应函数矩阵。

### (5) 特征系统实现法 (ERA 法)

源于单点激励下的 ITD 法,属 MIMO 整体识别法。ERA 法以由 MIMO 得到的脉冲响应函数为基本模型,通过构造广义 Hankel 矩阵,利用奇异值分解技术,得到系统的最小实现,从而得到最小阶数的系统矩阵,以此为基础可进一步识别系统的模态参数。该方法理论推导严密、技术先进且计算量小,与 LSCE 法比较识别精度有较大提高,特别是能识别密集模态和重根情形,对大型复杂结构效果良好。

## (6) ARMA 时序分析法

是对有序的随机数据进行分析、研究和处理。时序法使用的数学模型（差分方程）主要是 AR 模型和 ARMA 模型，AR 模型只使用响应信号，ARMA 模型需使用激励和响应两种信号，两者均使用平稳随机信号。ARMA 属 SISO 参数识别，与 LSCE 法相同，只使用一个测点的 ARMA 模型，就可以识别出各阶极点，也属于局部识别法。

### 3 时频域识别方法

实际工程中的很多环境激励是非平稳的随机过程，处理这种非平稳的时变信号需要能同时在时、频两域进行局部分析的方法和技术。联合时频域方法既有频域法的优点又有时域法的优点，既利用了直观的频率分布信息，又利用了包含丰富结构信息的时程响应数据。联合时频域方法将结构响应在时-频两域展开，有利于识别非线性响应结构的特征，是一种很有前途的动力学系统辨识方法。

基于小波变换以及基于希-黄变换（HHT）的模态参数识别方法是两种主要的模态参数时频域方法，后者需要与经验模态分解（Empirical Mode Decomposition，简称 EMD）联合使用来识别模态参数，而 EMD 技术尚有许多问题需要解决，如端部效应、虚假模态。近些年一些学者提出了一些改进方法并获得中国国家发明专利，改进改进希-黄变换的结构响应分析方法、基于改进 EMD 和 ARMA 模型的结构响应分析方法和基于 ICA 的改进 EMD 过程中 IMF 判定方法。

基于小波变换或希尔伯特黄变换的联合时频域方法在处理非平稳激励下的模态参数识别方面得到了广泛的应用。基于小波的结构模态参数识别技术将信号变换到时-频域，这有利于识别结构的动态特征参数如频率、阻尼和振型。

## 6.3 损伤识别

**6.3.1** 本条定义了结构损伤识别的目标和结构损伤识别的 4 个层次。

**1** 可供利用的结构响应数据，包括静力响应数据和动力响应数据，然而由于结构静力加载十分不便，并且响应测量一般要求在工作状态下进行，因而在实际工作中，往往较多采用动力响应数据。

**2** 结构损伤识别的 4 个层次，即损伤判断、损伤定位、损伤定量、损伤评估，并针对不同情况提出了具体的要求。其中损伤定位可给出损伤位置的几何坐标，也可给出损伤单元或者构件的编号。

**6.3.2** 本条定义了损伤识别常用方法，具体方法内容如下：

**1 静力参数法**

静力参数法通常在单元层次上，利用参数的残差分析来识别损伤。在静力荷载作用下测得的挠度、应变等比较直观，也是结构状态评估目前普遍使用的方法。

**2 动力参数法**

结构的模态参数（模态频率、振型等）反应了结构固有的动力特性，是结构物理参数的函数。结构发生损伤后，结构的刚度（或质量、连接条件、边界条件等）将发生改变，从而使结构的模态参数发生相应变化，因而可以根据结构动力参数的变化来辨识结构的损伤。典型的动力参数法是将观察到的动力参数改变与基准参数比较，并选择其中最有可能的改变来判断结构的真实状况。

**3 模型修正法**

模型修正是利用结构实测数据（一般是模态参数）来修正结构的初始理论模型，使修正后的结构模型的响应与结构的实测响应相一致。而用模型修正法进行损伤识别时，应把有限元基准模型作为结构的初始理论模型，把损伤后的结构响应作为结构实测数据修正后的结构模型与初始基准模型的差异即反映为结构的损伤。

若有高精度的有限元基准模型可供利用时，可采用模型修正的方法进行结构物理参数辨识进而实现结构损伤识别的目的。模型修正法进行损伤识别是根据实测数据修正现有模型，修正后模型与原模型的差异即为结构损伤，因此在用模型修正方法进行损伤识别前，应具备与损伤前实测数据吻合的高精度有限元基准模型。模型修正方法已经较为成熟，可根据实际需要选用适当的方法。

此外，考虑到工程结构参数和响应往往带有不确定性，使得确定性模型修正方法的实用性大大降低。因此可以在模型修正过程引入概率统计或其他随机理论(如最小方差法、最大似然法、贝叶斯方法等)，通过构建随机模型修正过程，识别结构参数的统计特征值(如均值和方差)。最后通过识别统计特征值的变化，来判断结构是否发生损伤。

**4 其他方法：**

**(1) 神经网络法**

神经网络法是一种基于数据的非参数化非线性建模方法，其用于损伤识别的基本步骤，是构建结构的损伤数据集合，对神经网络进行训练，校验神经网络的有效性，利用训练得到的神经网络模型进行损伤识别。结构的损伤数据应根据用途划分为训练集、校验集、测试集。为了得到较好的结果，训练集一般应进行归一化。神经网络近年来在结构损伤识别中

得到了广泛应用。常用的神经网络模型有：BP 神经网络、RBF 神经网络，概率神经网络、自组织神经网络和模糊神经网络等。BP 神经网络由于具有较强的非线性映射能力而被广泛用于结构分析中，而且大部分采用三层构造，即 1 个输入层、1 个隐层和 1 个输出层。基于神经网络的结构损伤识别主要包括网络结构的确定、参数的选取、学习样本规格化、初始权值的选取和结构损伤检测等步骤。根据这种思想，输入一组训练好的神经网络模型，将测量获得的模态参数输入到这个训练好的神经网络模型，就能得到结构参数的变化量，进而识别结构损伤的位置和大小。神经网络的拓扑结构应根据所解决的问题来选择，也可采用试错法或遗传算法以及其他优化方法确定。

### (2) 遗传算法

遗传算法是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型，该方法是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。遗传算法将问题的求解表示成染色体(在计算机语言中一般用二进制码串表示)，从而构成一个染色体群，将他们置于问题的环境中，遵循优胜劣汰的原则，通过不断循环执行选择、交叉、变异等操作，逐渐逼近全局最优解。与经典最优化方法相比，遗传算法的优点有：遗传算法的编码操作保证了它在每一步迭代能充分利用每群解中的信息，同时遗传算法的并行处理计算效率高；遗传算法的编码操作使之能处理结构损伤检测中大量参数的问题；遗传算法对其目标函数既不要求连续，也不要求可微，仅要求可以计算，而且它的搜索范围始终遍及整个空间，操作方便，容易得到全局最优解。

### (3) 小波变换法

该方法先对采集的数据进行离散，再对局部信号放大和聚焦，可以检验出信号突变的位置，从而精确的指出损伤发生的时刻，非常适合于分析和识别结构响应中其他方法难以发泄的局部损伤信息。小波分析在损伤识别中的应用是多方面的，如奇异信号检测、信噪分离、频带分析等。目前小波分析在损伤识别中的应用主要是属于信号分析范畴，由小波变换得到的谱图中直接显示损伤的存在。以小波分析为工具，通过分析系统的时变性质来实现损伤识别，能揭示损伤的性质。

### (4) 希-黄变换 (HHT 方法)

希-黄变换是 Norden-E.Huang 在 Hilbert 变换的基础上发展的一种方法，是一种专门针对非线性、非稳态时间序列进行分析的时域分析方法，适合分析非平稳过程的信号处理。该方法主要分两步，首先对信号进行经验模态分解，得到一系列的本征模函数或称本征模信号，然后对 IMF 进行 Hilbert 变换，即可得到 Hilbert-Huang 谱。基于 Hilbert-Huang 变换的 Hilbert

谱比小波谱更能清晰地刻画信号能量随时间、频率的分布。该方法以瞬时频率为基本量，以本征模信号为基本时域信号，比以往的时域分析方法更能反应信号的时域特征。

结构损伤识别是一个正在蓬勃发展的新兴研究领域，大量的新的研究成果不断涌现，如 ARMA 模型方法、响应面法、奇异值检验方法等，因而，在实际工作中，也可采用其他的有效的损伤识别方法。模型数学的应用、智能诊断方法的应用、损伤信息处理技术的应用以及基于混合模型的损伤识别技术的应用，在未来可能具有重要意义。

## 7 智慧评估

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 通过智慧评估子系统对桥梁结构进行安全预警与性能评估的目的包括：首先是要对桥梁结构健康状况进行诊断，探测其有无异常出现，并根据需要做出预警，以便引起管理部门及养护部门、甚至是用户的注意，及时采取相应的措施来规避可能的风险；其次，在桥梁长期运营过程中，其结构性能会由于多种原因产生退化，通过对结构性能情况的长期持续评估，则可以分析其性能退化规律，寻求其退化的主要原因，有助于准确把握结构存在的本质病害；再者，在掌握结构性能退化规律的基础上，可以对结构将来的性能发展情况做出预测；最后，结构的性能评估与预测的一个很重要的目的是要为了对结构进行合理管养和维护而进行，结构管养的计划并不是一成不变的，而是要根据结构的性能状态水平和预测情况不断调整实施的。在结构的性能评估中，需要充分运用从桥梁智慧监测系统中获取的监测数据，以及结构检测包括初期检测、周期性检测和特殊检测的数据和分析报告，进行分析、评估和预测。对于基于监测数据的评估可设定合适的评估基准进行评估分析。

**7.1.2** 桥梁结构的异常分析与安全预警将根据结构的状态参数和损伤指标来确定，当监测指标超过预警值则直接进行报警，而当监测指标没有达到极限监测值，但也超过了某个值(或某一程度)时，则说明结构出现了异常，需要进行预警。因此对于结构的异常分析和安全预警需要针对相关指标设定阈值，即预警值。预警值需要根据结构的设计值、相关现行规范所规定的容许值，并结合结构的重要性等因素综合确定；一般来说，预警触发值的确定，对于如加速度等对损伤不敏感、变化比较小的全局变量指标，可取超过正常范围 5%对应的值，应变等比较敏感的局部指标可取超过正常范围的 10%对应的值，对于一些离散性大的变量可取超过正常范围 15%对应的值。另外，也可根据预警值进行一定比例的缩小或放大来确定，如应变预警值取极限报警值的 80%，具体取值可视具体情况综合多种因素决定。

### 7.2 数据展示

**7.2.3** 具有周期性特征的数据包括：温度、湿度、风速、风向、风偏角等环境监测数据，此类数据的周期多为 1 年。车辆荷载、车流量等交通相关数据也具有周期特性，其周期需要结合监测对象以及所在地域情况进行具体分析。

## 7.6 二级评估

**7.6.2** 结构模型修正就是通过对结构有限元模型的部分参数进行修正,使得实测的结构特征参数与理论计算参数之间的尽量吻合。根据试验加载方式和已知响应信息类型的不同,结构有限元模型修正分为基于动力(利用频率、振型等信息)和基于静力(利用位移、应变和曲率等信息)的方法。前者获得信息的方式比较方便,如直接在交通荷载下获得动态响应,受交通限制条件少,但是测量精度、对损伤敏感度等一直受到工程界质疑。相反,静态方法获取的数据可信度高,试验过程简单,容易被工程师接受,但静载试验费用高、对交通影响大等缺点,发展受限制。采用动、静态应变测量的方法,相应地解析出其他结构参数,如应变模态、频率、振型、挠度、曲率等,再将这些参数用于模型修正。本条例注重不同类型参数合理搭配使用,如应变模态/应变对局部刚度变化引起的损伤敏感,可用于修正这类损伤引起的模型变化;而频率/挠度对支座损伤等这类损伤敏感,用于修正这类参数变化。同时,动力修正存在自身的局限,就是动力参数往往只有前几阶,修正后的模型也一般适用于这几阶的动力预测,与实际情况差异大。因此,建议尽量使用动静态结合的模式修正方法。

**7.6.3** 静力参数法通常在单元层次上,利用参数的残差分析来识别损伤。在静力荷载作用下测得的挠度、应变等比较直观,也是结构状态评估目前普遍使用的方法。结构的模态参数(模态频率、振型等)反应了结构固有的动力特性,是结构物理参数的函数。结构发生损伤后,结构的刚度(或质量、连接条件、边界条件等)将发生改变,从而使结构的模态参数发生相应变化,因而可以根据结构动力参数的变化来辨识结构的损伤。典型的动力参数法是将观察到的动力参数改变与基准参数比较,并选择其中最有可能的改变来判断结构的真实状况。模型修正是利用结构实测数据(一般是模态参数)来修正结构的初始理论模型,使修正后的结构模型的响应与结构的实测响应相一致。而用模型修正法进行损伤识别时,应把有限元基准模型作为结构的初始理论模型,把损伤后的结构响应作为结构实测数据修正后的结构模型与初始基准模型的差异即反映为结构的损伤。若有高精度的有限元基准模型可供利用时,可采用模型修正的方法进行结构物理参数辨识进而实现结构损伤识别的目的。模型修正法进行损伤识别是根据实测数据修正现有模型,修正后模型与原模型的差异即为结构损伤,因此在用模型修正方法进行损伤识别前,应具备与损伤前实测数据吻合的高精度有限元基准模型。模型修正方法已经较为成熟,可根据实际需要选用适当的方法。此外,考虑到工程结构参数和响应往往带有不确定性,使得确定性模型修正方法的实用性大大降低。因此可以在模型修正过程引入概率统计或其他随机理论(如最小方差法、最大似然法、贝叶斯方法等),

通过构建随机模型修正过程，识别结构参数的统计特征值（如均值和方差）。最后通过识别统计特征值的变化，来判断结构是否发生损伤。

## 7.7 评估方法

### 7.7.1 确定性方法

1 层次分析法是系统分析的工具之一，是一种定性分析与定量分析相结合的方法。层次分析法的基本思想，是将结构安全性指标按由粗到细、由整体到局部的原则分解为不同层次的详细指标，然后用求解判断矩阵特征向量的办法，求得每一层次各元素对上一层次某元素的优先权重，最后再利用加权和的方法递阶归并各详细指标的贡献而最终求得结构安全性指标。结构承载能力即第二类稳定问题的计算方法与非线性有限元是密不可分的。运用非线性有限元计算结构承载能力的关键，是在单元分析中引入几何非线性、材料非线性、极限荷载的求解方法。

2 极限分析法是指假设材料为理想塑性且结构处于小变形状态，研究在塑性极限状态下的结构特性。是塑性力学的一种分析方法。在极限状态下，结构内的应力与变形若同时满足极限条件、破损机构条件、平衡条件、几何条件以及给定的边界条件，由此得到的解即为极限分析的完全解。

### 7.7.2 本条可靠度分析法包括：

(1) 界限估算法，该方法是一阶方法，取两种极限状态作为体系可靠度的上下限，利用基本事件的失效概率来研究多重模式的失效概率。

(2) 串联及并联和混联体系法。当结构体系中任意杆件失效时，即引起结构体系失效，称为“串联体系”；结构体系中的若干构件失效，才会引起结构失效，称为“并联体系”；结构体系的失效模式由一系列并联体系所组成的串联体系，即为“混联体系”。

(3) 概率网络估算技术方法。把结构体系所具有的失效模式，根据其间的相关分析分成若干组，每组中的失效模式间具有很高的相关性，然后选取各组中失效概率最大的失效模式作为各组的代表，称为该体系的主要失效模式。

(4) 分枝界限法，通过分枝界限的途径，从众多的失效模式中，找出主要失效模式，计算结构体系可靠度的方法。分枝界限法包括分枝和界限两个步骤。

## 8 智慧平台

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 智慧平台软件系统主要是向相关人员提供城市桥梁管理及监测数据分析结果，满足城市桥梁管理人员管养应用的人机界面。

**8.1.2** 智慧平台应采用 B/S 结构，要求支持当前各流行浏览器的兼容性，确保在 IE9 能够正常浏览。在常用显示屏大小的情况下，有良好的显示状态。

**8.1.3** 智慧平台的设计要保持界面风格的统一性，统一性包括：使用相同的信息表现方法，如在字体，标签风格、颜色、术语、显示错误信息等方面保持一致。

**8.1.4** 智慧平台软件系统不同模块安装完成后，应进行联试和试运行，应由实施单位负责，监理单位监督，业主方指定用户单位参与，联试和试运行阶段的故障情况应有记录。

**8.1.5** 智慧平台自试运行起，应有不少于 6 个月的试运行期，以检验系统的可靠性和耐久性，试运行期间出现的问题，实施单位应该负责进行处理，处理结果应以书面的形式存档。

### 8.2 设计要点

**8.2.1** 智慧平台设计拟采用的软件技术应以保证系统的可靠性和实时性为基本要求，且应具有一定的扩展性和移植能力。

**8.2.2** 智慧平台软件主要包括操作系统、系统大屏、数据采集与传输软件、数据存储管理软件、数据分析处理软件等。

**8.2.3** 智慧平台的软件系统宜根据各模块功能的不同，设计软件系统在监测系统计算机网络中的部署方案。

**8.2.4** 数据采集软件应具有数据采集和缓存管理功能，宜提供在线预览、滤波、变换和同步统计处理等基本计算功能。

**8.2.5** 数据传输软件应能实现三类数据的传输通信：实时数据、历史数据，及系统参数数据。

**8.2.6** 数据存储管理软件应能实现对原始数据、处理后的导出数据和系统参数数据实现便捷高效的读写检索管理。

**8.2.7** 数据分析处理软件可选择实现如下内容：

- 1 基本数据的校验和预处理功能。
- 2 数据的基本统计分析及基本数据挖掘功能。
- 3 基于数据本身和结构力学模型的特征提取功能。
- 4 结构预警计算功能。
- 5 结构评估功能。
- 6 在线监测反演模拟功能。

### 8.3 开发原则

#### 8.3.1 可用性、实用性、可靠性

1 可用性是智慧平台设计的首要原则,在目标系统的设计上应具有良好的性能价格比、较高的应用、推广效益,采用多种实用的技术手段,并尽可能集成成熟软件产品。

2 实用性就是保证可用性的前提下能够最大限度的满足实际工作要求。

3 作为信息交互平台,除了在硬件体系上的可靠性外,在设计过程中还必须注意智慧平台的可靠性,同时要充分考虑数据的、传输的可靠性及对关键数据的备份等措施。

#### 8.3.2 伸缩性、扩展性

1 智慧平台应具有完备的扩展功能,为系统今后功能扩展、升级留有接口,并有利于系统的推广应用。它有两个层面的含义:一是监测内容的可扩展性;另一方面是业务功能上的可扩展性。

2 智慧平台的设计除了可以适应目前的监测内容外,还应充分考虑以后监测内容的扩充与数据分析手段的完善。

#### 8.3.3 管理及维护的简便性

1 一方面庞大的信息系统需要有效的管理和维护手段,另一方面由于桥梁健康监测系统中涉及的传感器设备种类繁多,且安装现场调试环境恶劣,因此在智慧平台设计中充分考虑对这些传感器设备的远程设置、控制机制。

#### 8.3.4 先进性

1 软件平台、技术实现手段的选型应符合主流的发展方向,在技术上采用当今较为成熟的技术同时保持相对的先进性,将先进和成熟的技术与现实相结合。

#### 8.3.5 开发式体系、模块化设计

1 采用开放式体系、模块化设计保证系统具有良好的可维护性和可扩充性。

## 9 验收与维护

### 9.1 验收

9.1.2 桥梁智慧监测系统硬件和软件包括的具体内容如下：

1 桥梁智慧监测系统硬件是指用于环境与结构信息感知、采集、传输、存储和显示的所有实体部件和设备的统称。

2 桥梁智慧监测系统软件是指用于环境与结构信息感知、采集、传输、存储和显示以及结构反应分析、结构改变获取、环境与结构信息显示的计算机指令集合。

9.1.22 分部工程验收提交的书面申请宜附录 A 填写，验收记录宜按照附录 B 填写。

9.1.24 竣工图是真实地记录已完成设备全部情况的资料。若竣工工程是按图施工，没有任何变化的，则可以施工图作为竣工图；若施工中发生变更，应重新绘制竣工图。

### 9.2 维护

9.2.1 异常处置是指对桥梁智慧监测系统的报警和故障状况所采取的处理措施。

9.2.2 本条规定日常管理的对象。

1 传感系统是指为获取桥梁运营过程中的环境状态、交通荷载、结构响应数据而安装在桥梁上的所有传感器的总称。

2 数据设备包括数据采集设备、数据传输设备、数据存储设备。

(1) 数据采集设备是指从传感器和其它测试设备中采集被测参数信号，并进行转换和预处理的仪器或装置。

(2) 数据传输设备是指将数据采集设备采集的数据传输到数据中心或者用户终端的仪器或装置。一般包括终端装置、网络互联装置、传输介质。

(3) 数据存储设备是指存储桥梁监测数据的仪器或装置，一般包括独立服务器、云服务器、离线存储器。

3 本条传感系统的日常检查包括对各类传感器的外观检查和一般性能检查。

(1) 传感系统的日常检查中的外观检查内容和要求：

①传感器安装牢固可靠，安装位置不应偏位；

②传感器保护装置密封情况完好，表面清洁无污，标记清晰完整，无腐蚀，并满足防水、

防高温、抗压、以及屏蔽功能要求；

- ③传感器表面清洁无污，无破损，无锈蚀，内部无积水，接线良好。
- ④传感器线缆无破损、绝缘保护层应完整；
- ⑤传感器隔热和冷却装置工作性能良好，满足隔热和冷却功能需求；
- ⑥传感器电源高低压参数在正常工作范围内。

(2) 传感系统的一般性能检查应包括以下内容：

- ①检查传感器的示数应正常；
- ②传感器实际量测性能应能满足监测工作要求。

对于埋入式传感器，可根据传感器输入量与输出量的关系进行检查。

(3) 传感系统应根据日常检查发现的问题进行维护，对不满足技术要求的传感器、保护装置、线缆、隔热或冷却装置、电源进行维护或者更换。一般应对传感器及其保护装置进行除尘、除湿、除锈；传感器示数或测量性能不正常时，应进行性能检验和率定，并进行维护或更换。

4 本条数据设备的日常检查包括对数据采集、传输、存储、显示设备的外观检查和一般性能检查。

(1) 数据设备的外观检查内容和要求：

- ①设备外观清洁无灰尘及污迹、无破损、无老化、无锈蚀、无积水、标识清晰；
- ②设备线缆无老化、无破损，输入和输出端接口无接线松动或脱落等导致接触不良的情况，线缆标识清晰；
- ③设备工作无过热现象、无异常振动、无烧蚀、无异响；
- ④设备外接电源正常、接地良好；
- ⑤保护装置安装牢固，清洁无污。

(2) 数据设备一般性能检查内容和要求：

- ①数据采集设备能连续采集量测数据，且数值在正常范围内、显示稳定、通讯连接正常、急供电保障能力满足要求。
- ②数据传输设备网络连接正常，传输响应时间满足要求，故障告警功能完好。
- ③数据存储设备存储和控制器指示灯无告警、控制器电池无故障、网口连接正常、存储连接无冗余；采用磁盘阵列的数据存储设备，磁盘柜电源正常。
- ④数据显示设备显示无异常、失真，不同画面的调取正常，功能键正常工作。

(3) 应对数据设备的供电情况进行检查，确保电源工作正常，电源指示灯正常、电

量充足、电源输入和输出电压、输出频率及零-地电压符合使用标准。

(4) 数据设备应根据日常检查发现的问题进行维护,对不满足技术要求的数据设备、保护装置、电源进行维护或者更换。一般应对数据设备及其保护装置进行除尘、除湿、除锈;对数据线缆、外接电源线、接地线缆的连接进行整理,确保连接良好;数据设备性能不满足要求时,应进行性能检验,并进行维护或更换。

5 本条桥梁智慧监测系统软件的日常检查应对软件设计和开发过程中以下文档资料的完整性进行检查:软件需求说明书,软件接口规格说明书,软件概要设计说明书,数据库设计说明书,软件用户手册,软件操作手册,软件产品规格说明书等。并按照相关文档要求开展日常检查与维护。

(1) 桥梁智慧监测软件系统的日常检查的内容及要求如下:

- ①应能正常打开程序并运行;
- ②程序界面不应出现乱码、花屏现象;
- ③数据库日志正常、完备;
- ④加密设备保管妥善;
- ⑤注册码和密码正确并保管妥善。

(2) 软件系统应根据日常检查发现的问题进行维护或者升级。软件维护或者升级宜由软件开发单位进行,升级过程中应保留原有监测数据。日常检查过程中,应卸载或修改导致兼容性问题的软件;应建立系统软件维护台账。

9.2.2 本条规定桥梁智慧监测系统定期检查与维护的对象。

1 传感系统的定期检查维护内容包括:

(1) 桥梁智慧监测系统传感系统的定期检查应对各类传感器的工作环境和传感器性能进行检查。

(2) 普通环境下工作的传感器应满足传感器工作温度、湿度要求;未做要求的普通传感器的工作环境温度宜为 $-10^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度宜为20%~80%。

(3) 应对传感器的防风、防雨雪、防雷、防尘、防晒、防冻、防腐蚀、防扰动等保护措施进行检查。

(4) 应对传感器的传输线进行检查,对有破损的传输线进行更换。

(5) 荷载与环境类传感器的定期检测内容和要求:

- ①风速仪风速和风向测量范围、分辨率、精度和防水性能,满足设计技术指标要求;
- ②温度、湿度和雨量传感器测量范围、分辨率、精度和灵敏度,满足设计技术指标要求;

③车辆荷载传感器承重范围、速度范围、称重精度、测速精度和温度范围，满足设计技术指标要求；

④数字摄像设备的照明、镜头、快门、信噪比、扫描范围满足设计技术指标要求；

⑤地震动监测传感器量程范围和频响范围满足设计技术指标要求。

(6) 结构响应类传感器的定期检查内容和要求：

①挠度传感器量程、精度、线性度和稳定性，满足设计技术指标要求；

②位移传感器量程、精度、线性度、分辨率、迟滞和漂移，满足设计技术指标要求；

③振动/加速度传感器量程范围、频响范围、动态范围、灵敏度、线性度、分辨率、迟滞和漂移，满足设计技术指标要求；

④倾角传感器量程、分辨率、线性度、灵敏度，满足设计技术指标要求；

⑤GPS/北斗传感器静态测量精度、动态测量精度、独立性和更新速度，满足设计技术指标要求；

⑥应变传感器测量范围、分辨率、精度、灵敏度，满足设计技术指标要求；

⑦索力传感器测量范围、频响范围、线性度、灵敏度，满足设计技术指标要求。

(7) 其它类传感器的定期检查应参考设计文件性能指标要求执行，设计文件未做要求的，应满足《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》JT/T1037 第 6.2 款的规定。

(8) 传感器应根据定期检查发现的问题由第三方专业单位进行维修或更换。

(9) 定期检查过程中，一般应采取保护措施，使得传感器的工作温度、湿度满足要求，并对传感器的防风、防雨雪、防雷、防尘、防晒、防冻、防腐蚀、防扰动等保护措施进行维护，使保护装置满足功能需求。

(10) 传感器应由第三方专业单位每年校核一次；定期检查过程中，传感器数据异常的，应由第三方专业单位对传感器进行校核。

(11) 传感器定期检查应统计各类传感器的存活率，对于不能满足技术要求的传感器应进行维修或者更换，并建立传感器维护和更换台账。

2 数据设备的定期检查维护内容包括：

(1) 桥梁智慧监测系统数据设备的定期检查应对数据设备的工作环境和性能进行检查。

(2) 数据设备的工作环境应满足设计文件要求；未做要求的，数据采集、传输、显示设备运行环境温度宜为 0℃~40℃，相对湿度宜为 20%~80%；直径大于等于 0.5μm 的尘粒浓度应小于或等于 18000 粒/升；无线电干扰场强不应大于 126dB；数据存储设备工作环

境温度宜为 18℃~28℃，相对湿度宜为 35%~75%；直径大于等于 0.5μm 的尘粒浓度应小于或等于 18000 粒/升；无线电干扰场强不应大于 126dB，环境磁场场强不应大于 800A/m。

(3) 数据设备的机柜空调、热交换器以及风扇等温控设备工作状态应正常。

(4) 数据设备的定期检查内容和技术要求：

①数据采集设备根据采集界面可视化、测量值存储格式、远程传输模块、系统集成等需求进行数据采集软件系统升级。

②能进行特殊采集或人工干预采集；数据采集、数据预处理、缓存管理和实时自诊断功能正常；数据同步采集满足要求。

③数据传输设备传输的信息应准确实时：网络连接正常，传输响应时间满足要求，故障告警功能完好；传输设备的远程传输和共享情况正常，与其它设备和网络相协调，传输系统软件与操作系统应完全兼容。

④数据存储设备检查历史监测数据完整性，筛查数据存储丢包状况，评估存储设备工作性能；进行剩余存储容量检查，对原始监测数据、报告等数据进行转存备份，确保剩余容量满足需求。

⑤数据显示设备显示无异常、失真，不同画面的调取正常，功能键正常工作；显卡和驱动功能工作正常。

(5) 应统计各类监测数据的完整率，确保各类监测数据正常采集并储存，长期监测数据无丢失现象，数据值处于正常范围，对于不完整的数据应及时排查原因并进行维护。

(6) 数据设备应根据定期检查发现的问题由第三方专业单位进行维修或更换。

(7) 定期检查过程中，一般应对数据设备采取保护措施，使得数据设备的工作环境满足要求。

(8) 对不满足要求的电源、机柜空调、热交换器以及风扇，应进行维修或者更换。

(9) 定期检测后应对数据设备进行除尘、除湿；在野外运行环境中的设备应不受阳光直射、做好防水防潮措施、维护保护装置。

(10) 对于不能满足技术要求的数据应进行维修或者更换，数据设备进行拆卸和安装时应记录设备安装位置，宜进行影像机理。数据设备维护和更换应建立台账。

3 软件系统的定期检查维护内容包括：

(1) 桥梁智慧监测软件系统的定期检查内容和要求如下：

①数据采集系统软件运行状态工作正常；

②数据采集系统的数据库满足设计技术文件要求；

- ③数据分析软件能正常显示和存储数据分析报告；
- ④应用软件兼容性满足要求；
- ⑤软件安全防御系统工作正常。

(2) 软件系统应根据定期检查发现的问题进行维护或者升级。软件维护或者升级宜由软件开发单位或者第三方专业单位实施。

(3) 系统软件在定期维护时，不得随意删除或修改软件；升级过程中应保留原有监测数据，对重要数据加强备份保护；应定期进行系统软件的病毒监测和查杀；应卸载或修改导致兼容性问题的软件；应建立系统软件维护台账。

**9.2.4 桥梁智慧监测系统在经历台风、地震、船撞、火灾等特殊事件或者系统故障后，应启动异常处置机制，并组织特殊检查。**

**1 特殊检查的具体要求如下：**

- (1) 特殊检查应在经历特殊事件或者系统故障异常后 24 小时内进行。
- (2) 特殊检查应根据系统报警和系统故障的异常情况分别启动相关响应机制和措施。
- (3) 桥梁智慧监测系统特殊检查应在检查后一周内向上一级管理部门和负责人上报异常处置报告并存档。

(4) 当桥梁智慧监测系统传感器发生如下情况时，应进行传感器特殊检查：

- ①当传感器出现异常数据时，应判断数据异常原因，并对出现异常的传感器进行检查。
- ②在智慧监测系统发生重大故障后，应对所有传感器进行检查。
- ③当桥梁经历过台风、地震、船撞、火灾等特殊事件后，应对所有传感器进行检查。
- ④超出设计使用年限或者设备出厂使用寿命年限的传感器，应进行检查。

**2 对需要进行特殊检查的传感器，可依据本规程 9.2.3 条的相关规定进行。**

**3 传感器应根据特殊检查发现的问题由第三方专业单位进行维修或更换，相关技术标准要求可按照本规程 9.2.3 条执行，并建立特殊检查与维护台账。**

**4 桥梁智慧监测系统数据设备发生如下情况时，应进行数据设备特殊检查：**

- (1) 数据采集、传输、存储、显示出现异常。
- (2) 发生台风、地震等灾害或船撞、火灾等特殊事件。
- (3) 数据设备超出设计使用年限。
- (4) 不能满足数据采集、数据存储、系统集成等功能需求。

**5 数据设备的特殊检查，可依据本规程 9.2.3 条的相关要求进行。数据设备应根据特殊检查发现的问题由第三方专业单位进行维修或更换，相关技术标准要求可按照本规程 9.2.3**

条规定执行；并建立特殊检查与维护台账。

## 6 软件系统

(1) 桥梁智慧监测系统软件系统发生如下情况时，应进行软件系统特殊检查：

①当出现数据采集、传输、存储、显示等软件异常情况。

②桥梁智慧监测系统软件受到病毒攻击。

③桥梁智慧监测系统软件与其它软件不兼容、冲突。

(2) 软件系统的特殊检查，可依据本规程 9.2.3 条的相关要求进行。

(3) 软件系统应根据特殊检查发现的问题由软件开发单位或者第三方专业单位进行维修或更换，相关技术标准要求可按照本规程 9.2.3 条执行；并建立特殊检查与维护台账。