公路长大桥梁结构健康监测系统

试点建设技术指南

二〇二一年 七月

前 言

根据交通运输部办公厅关于印发《公路长大桥梁结构健康监测系统建设实施方案》的通知（交办公路〔2021〕21号）的要求，交通运输部公路局组织技术支持单位中交公路规划设计院有限公司编制《公路长大桥梁结构健康监测系统试点建设技术指南》。

在编制过程中，编写组充分吸纳了我国近十年来公路桥梁结构健康监测系统设计与实施的经验，参考、借鉴了国内外相关的标准和规范，广泛征求了建设、设计、养护、管理等有关单位和专家审查的意见，经反复讨论、修改后定稿。

本指南共分为9章和4个附录，分别是：1总则；2术语；3基本规定；4监测内容；5测点布设；6监测方法；7监测系统；8监测数据；9数据分析与应用；附录 A 监测设备的技术要求；附录 B 桥梁监测系统数据字典定义；附录 C 监测项基本信息定义；附录 D 实时数据传输协议。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本指南日常管理组：地址：北京市东城区建国门内大街11号，交通运输部公路局养护处，邮编：100005，传真：010-65292222；地址：北京市东城区朝阳门内大街甲296号，中交公路规划设计院有限公司，邮编：100010，传真：010- 56950888，电子邮箱：yezhilong@hpdi.com.cn。

目 次

1 总则 ..... - 1 -

2 术语 ..... - 3 -

3 基本规定 ..... - 4 -

4 监测内容 ..... - 6 -

4.1 一般规定 ..... - 6 -
4.2 悬索桥 ..... - 6 -
4.3 斜拉桥 ..... - 9 -
4.4 梁桥 ..... - 11 -
4.5 拱桥 ..... - 13 -

5 测点布设 ..... - 16 -

5.1 一般规定 ..... - 16 -
5.2 环境测点 ..... - 16 -
5.3 作用测点 ..... - 16 -
5.4 响应测点 ..... - 17 -
5.5 变化测点 ..... - 18 -
5.6 测点布设图示 ..... - 19 -

6 监测方法 ..... - 24 -

6.1 一般规定 ..... - 24 -
6.2 感知方式 ..... - 24 -
6.3 数据采集方式 ..... - 27 -
6.4 数据传输方式 ..... - 29 -
6.5 数据存储方式 ..... - 30 -

7 监测系统 ..... - 32 -

7.1 一般规定 ..... - 32 -
7.2 系统设计 ..... - 32 -
7.3 系统实施 ..... - 36 -
7.4 系统交付 ..... - 39 -
7.5 系统维护 ..... - 40 -
7.6 系统安全 ..... - 42 -

8 监测数据 ..... - 44 -

8.1 一般规定 ..... - 44 -
8.2 数据标准 ..... - 44 -
8.3 数据处理 ..... - 47 -
8.4 数据管理 ..... - 47 -

9 数据分析与应用 ..... - 49 -

9.1 一般规定 ..... - 49 -
9.2 报警 ..... - 50 -
9.3 日常运营监测数据分析 ..... - 54 -
9.4 突发事件监测数据分析 ..... - 60 -
9.5 状态评估 ..... - 64 -
9.6 对策措施 ..... - 66 -
附表 ..... - 68 -
本指南用词用语说明 ..... - 74 -
附录 A 监测设备的技术要求 ..... - 75 -
附录 B 桥梁监测系统数据字典定义 ..... - 79 -
附录 C 监测项基本信息定义 ..... - 84 -
附录 D 实时数据传输协议 ..... - 86 -

1 总则

1.0.1 为提升公路长大桥梁安全耐久水平，指导和规范试点桥梁结构健康监测系统的建设、维护和应用，制定本指南。

条文说明

根据交通运输部办公厅关于印发《公路长大桥梁结构健康监测系统建设实施方案》的通知（交办公路〔2021〕21号）的要求，试点桥梁共有11座，见下表1.0.1所示。

表1.0.1 公路长大桥梁结构健康监测系统建设试点一览表

序号	省份	桥型	桥名	主跨径（m）	在役或新建	通车时间	有无监测系统
1	江苏	悬索桥	江阴长江大桥	1385	在役	1999年	有/改造试点
2	安徽	斜拉桥	铜陵长江公路大桥	432	在役	1995年	有/改造试点
3		拱桥	太平湖特大桥	352	在役	2007年	有/改造试点
4	浙江	多塔斜拉桥	嘉绍大桥	428	在役	2013年	有/改造试点
5	湖北	悬索桥	宜昌长江公路大桥	960	在役	2001年	无/新建试点
6	河北	拱桥	滹沱河特大桥	200	在役	2010年	无/新建试点
7	辽宁	斜拉桥	辽河大桥	436	在役	2010年	有/改造试点
8	贵州	悬索桥	坝陵河大桥	1088	在役	2009年	有/改造试点
9	四川	悬索桥	大渡河特大桥	1100	在役	2018年	有/改造试点
10	江西	拱桥	九江长江大桥	216	在役	1993年	有/改造试点
11	广东	斜拉桥	江顺大桥	700	在役	2015年	有/改造试点

1.0.2 本指南适用于公路长大桥梁结构健康监测系统试点桥梁，包含系统新建和改造升级。

1.0.3 公路桥梁结构健康监测系统，一般由传感器模块、数据采集与传输模块、数据处理与管理模块、系统软件及附属设施构成，通过实时采集桥梁环境、作用、结构响应和结构变化数据对桥梁状态进行监测、报警、分析和评估。

1.0.4 公路桥梁结构健康监测系统设计和构建应遵循“先进、适用、稳定、安全、经济、实

用”的原则。

1.0.5 单体桥梁结构健康监测系统应与省级长大桥梁结构健康监测平台、部级长大桥梁结构数据平台实现系统互联、数据共享，三级系统平台应统一数据接口、数据格式和传输协议。

1.0.6 监测系统应积极采用成熟的新技术和新产品。

1.0.7 监测系统应加强系统安全防护，保障数据安全。

1.0.8 监测系统的建设、维护、应用除应符合本指南要求，尚应符合国家和行业现行有关行政法规和技术标准的规定。

2 术语

2.0.1 结构健康 structural health

指桥梁结构和功能正常，具备良好的工作性能。

2.0.2 结构响应 structural response

由环境和作用引起的桥梁结构或构件的反应，如内力、变形、振动等。

2.0.3 结构变化 structural change

桥梁结构或构件发生的初始几何形态和初始表观状态发生的改变，如不可恢复的下挠、沉降、开裂等。

2.0.4 报警 alarming

监测系统在监测数据的特征指标达到或超过设定值时，发出异常警示的过程。

2.0.5 报警阈值 alarming threshold

对桥梁运营环境、荷载、行车安全状况、结构构件可能出现的不同程度异常或危险，各监测点数据的特征指标所设定的不同报警级别临界警戒值。

2.0.6 突发事件专项评估 special evaluations for emergency events and accidents

桥梁遭受洪水、流冰、漂流物、船舶或车辆撞击、滑坡、泥石流、地震、强风、海啸、火灾、爆炸和特殊车辆过桥、突发异常振动等突发事件后，确定桥梁结构整体或局部构件状态是否发生变化。

2.0.7 状态评估 state evaluation

分析监测系统所获取的数据，实现评估桥梁结构工作状态的过程。

2.0.8 健康度 structural health level

桥梁结构在正常维护条件下，保持初始成桥状态、满足预定功能要求能力的水平。

3 基本规定

3.0.1 为动态实时掌握公路长大桥梁结构运行状况，防范化解公路长大桥梁运行重大安全风险，提升公路桥梁结构监测和安全保障能力，按照“安全第一、预防为主、明确责任、分级管理、突出重点、分步建设、单桥监测、联网运行”的原则，推进公路长大桥梁结构健康监测系统建设或改造升级。

3.0.2 监测系统应对桥梁环境、作用、结构响应和结构变化进行监测、报警，对监测数据进行分析和评估。

3.0.3 监测系统应依据管理养护应用需求，结合长期性能的观测和基础研究，选择重要监测内容和关键监测测点，体现代表性，突出实效性，注重经济性。

3.0.4 监测系统应稳定可靠、数据精确、分析准确，能够动态掌握公路长大桥梁结构运行状况，提升桥梁管养应急处置和安全保障能力。

3.0.5 试点桥梁的监测系统新建和改造升级应进行方案设计和施工图设计，应编制施工组织设计，系统改造升级应用尽用既有条件和设备设施。

3.0.6 预埋在结构内部的埋入式传感器设计使用寿命不宜低于二十年；附着安装在结构上的非埋入式传感器设计使用寿命不宜低于五年，且应易于更换。

3.0.7 监测系统建设应不影响桥梁本体结构的安全性和耐久性。

3.0.8 监测系统应制定安全保护措施，可按照《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》（GB/T 22239）进行系统等保定级、备案、建设、测评和保护。

3.0.9 监测系统验收交付应满足设计文件的技术和功能要求。

3.0.10 监测系统应制定运行维护管理制度，编制年度维护计划，按计划维护与定期升级。

3.0.11 监测系统应对异常状况进行报警，分析监测数据，评估桥梁结构状态及变化。

条文说明

报警是桥梁结构健康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，桥梁管理部门亟需掌握桥梁在经历这些事件后的安全状态，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，可以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。在桥梁运营过程中，监测系统积累了大量桥梁日常运营状态的监测数据，通过按需分析数据定期掌握桥梁运营状态，为桥梁日常管理决策提供依据。

4 监测内容

4.1 一般规定

4.1.1 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。

4.1.2 监测内容应考虑各试点桥梁的不同监测需求。系统新建或改造升级时需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。

4.1.3 监测内容包含应选监测项、宜选监测项、可选监测项。对于试点桥梁，应监测项无建设条件的，经分析论证，可根据实际情况调整监测内容，但应在具备条件后补充相关监测项。

4.1.4 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。

4.2 悬索桥

4.2.1 悬索桥监测内容应符合表4.2.1的规定：

表4.2.1 悬索桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	环境温湿度	桥址区环境温湿度	●
		主梁内温湿度**	●
		主缆内温湿度	○
		锚室内温湿度*	●
		鞍罩内温湿度	●
		索塔内温湿度	○
作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、车速	●
		所有车道车流量	●
		所有车道的车辆空间分布	◎
	风荷载	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	○
		视频监控	○
	地震	桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度	●

结构响应	位移	主梁挠度	●
		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	塔顶截面倾角	◎
		梁端水平转角	●
		梁端竖向转角	●
	应变	主梁关键截面应变	●
		索塔关键截面应变	○
	索力	吊索索力	●
		锚跨索股力	○
	支座反力	支座反力	○
	振动	主梁竖向振动加速度	●
		主梁横向振动加速度	●
		主梁纵向振动加速度	○
		塔顶水平双向振动加速度	●
		索振动加速度	●
结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度	◎
	变形	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、承台混凝土侵蚀深度	◎
	断丝	吊索、主缆断丝	◎
	螺栓紧固力	索夹螺杆紧固力、高强螺栓紧固力	○
	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。 *仅适用于地锚式悬索桥； **若主梁是开口式的，无需监测。 悬索桥监测指标不仅限于表4.2.1中的内容，针对不同需求的桥梁，可根据实际情况增加其他监测内容，监测手段可包括实时监测和定期监测。			

条文说明

监测类别和监测内容的选择主要依据如下：

（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。

4.3 斜拉桥

4.3.1 斜拉桥监测内容应符合表4.3.1的规定：

表4.3.1 斜拉桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	环境温湿度	桥址区环境温湿度	●
		主梁内温湿度*	●
		索塔锚固区温湿度	●
	雨量	降雨量	◎
作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、车速	●
		所有车道车流量	●
		所有车道的车辆空间分布	◎
	风荷载	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	○
		视频监控	○
	地震	桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度	●
结构响应	位移	主梁挠度	●
		主梁横向位移	○
		支座位移	●
		梁端纵向位移	●
		塔顶偏位	●
	转角	塔顶截面倾角	○
		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	●
		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、承台混凝土侵蚀深度	◎

	断丝	斜拉索断丝	◎
	螺栓紧固力	高强螺栓紧固力	○
注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项。 *若主梁是开口式的，无需监测。 斜拉桥监测指标不仅限于表4.3.1中的内容，针对不同需求的桥梁，可根据实际情况增加其他监测内容，监测手段可包括实时监测和定期监测。			

条文说明

监测类别和监测内容的选择主要依据如下：

（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）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。

4.4 梁桥

4.4.1 梁桥监测内容应符合表4.4.1的规定：

表4.4.1 梁桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	环境温湿度	桥址区环境温湿度	●
		主梁内温湿度*	●
作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、车速	○
		所有车道车流量	○
		所有车道的车辆空间分布	◎
	风荷载	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	○
		视频监控	○
	地震	桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度	●
结构响应	位移	主梁挠度	●
		支座位移	○
		梁端纵向位移	○
		高墩墩顶偏位	○
	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	基础冲刷	基础冲刷深度	◎

变化	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、承台混凝土侵蚀深度	◎
	预应力	体外预应力	●
	螺栓紧固力	高强螺栓紧固力	○
注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项。 *若主梁是开口式的，无需监测。 梁桥监测指标不仅限于表4.4.1中的内容，针对不同需求的桥梁，可根据实际情况增加其他监测内容，监测手段可包括实时监测和定期监测。			

条文说明

监测内容的选择主要依据如下：

（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）梁桥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。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。

4.5 拱桥

4.5.1 拱桥监测内容应符合表4.5.1的规定：

表4.5.1 拱桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	环境温湿度	桥址区环境温湿度	●
		主梁内温湿度*	●
		主拱内温湿度**	●
作用	车辆荷载	所有车道车重、轴重、车速	●/○***
		所有车道车流量	●/○***
		所有车道的车辆空间分布	◎
	风荷载	桥面风速、风向	●/◎***
		拱顶风速、风向	●/◎***
	结构温度	混凝土或钢结构构件温度	●
		桥面铺装层温度	○
	船舶撞击	桥墩加速度	○
		视频监控	○
	地震	桥岸地表场地加速度	◎
		承台顶或桥墩底部加速度	●
结构响应	位移	主梁挠度	●
		主梁横向位移	○
		支座位移	○
		梁端纵向位移	○
		拱顶偏位	●
	应变	主梁关键截面应变	●
		主拱关键截面应变	○
	索力	吊杆力	●
		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	◎
		拱圈振动加速度	●
		吊杆振动加速度	●
结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度	◎
	变形	拱脚偏位	●
	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、承台混凝土侵蚀深度	◎
	断丝	索体断丝	◎
	螺栓紧固力	高强螺栓紧固力	○

注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项。
*若主梁是开口式的，无需监测。
**适用于箱形拱。
***对于中、下承式拱桥为应监测项；上承式拱桥为宜监测项或可监测项。
拱桥监测指标不仅限于表4.5.1中的内容，针对不同需求的桥梁，可根据实际情况增加其他监测内容，监测手段可包括实时监测和定期监测。

条文说明

监测类别和监测内容的选择主要依据如下：

（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。应变监测主要包括主梁关键截面、主拱关键截面等，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。

5 测点布设

5.1 一般规定

5.1.1 测点布设基于所确定的监测内容，应包括环境测点、作用测点、结构响应及结构变化测点，测点位置和数量依据桥梁所处环境、所受作用分布、结构构造特点、结构静力特性、结构动力特性、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。

5.1.2 测点布设应明确传感器的数量，安装位置、方向，宜可更换。对于不可更换的测点，宜做冗余设计。

5.1.3 对存在病害突出问题的桥梁局部构件，应针对性增加测点数量。

5.2 环境测点

5.2.1 桥址区环境温度和湿度的测点宜布设在桥梁跨中位置，可根据桥梁跨径、构造、联长增设测点。

5.2.2 对于桥梁构件所组成的封闭空间，应按第4.2.1~4.5.1条要求布设环境温度和湿度测点。

条文说明

桥梁构件所组成的密闭空间，主要指闭口截面箱梁内部、索塔内部、锚室、索鞍内部、拱肋内部、索体锚头锚固区等位置，此测点布设既服务于构件耐久性评估，也满足人工检查检测需要。

5.3 作用测点

5.3.1 车辆荷载监测测点应覆盖所有行车道，且宜选择在路基或有稳定支撑的结构铺装层内。

5.3.2 风荷载测点应选择在桥面上、下游两侧、塔顶、拱顶位置，安装位置应能监测自由场风速和风向。跨度小于1500m 悬索桥或小于800m 斜拉桥宜在主梁跨中上、下游两侧各布设一个测点；跨度不小于1500m 悬索桥或不小于800m 斜拉桥，宜结合风场空间相关性分析布设测点数量；对于中/下承式拱桥应在桥面、拱顶设置监测点；位于强风区横风作用显著的梁桥或上承式拱桥可进行风荷载监测。桥面风速仪安装位置如图5.3.2所示，截面形式为钢箱梁的，风速仪竖向立杆高度或外挑长度应大于1.0倍的梁高。

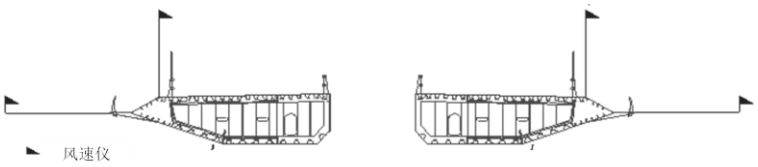


图5.3.2风速仪布设位置示意图

5.3.3 桥梁结构温度测点应在关键混凝土或钢结构构件上布设温度测点；宜在主梁铺装层布设温度测点；结构温度测点布置宜与应变监测的温度补偿测点统一设计；测点数量和位置应根据桥梁结构温度场分布特点并结合跨径、构件尺寸、铺装体系、日照情况等因素综合确定。

5.3.4 航道等级为I级~V级的桥梁宜进行船舶撞击监测，非通航孔桥宜在船舶撞击风险区进行船舶撞击监测；船舶撞击测点宜布设在船撞危险区的主梁、桥墩底部或承台顶部。

条文说明

航道等级应根据桥梁设计时通航批复文件或相关通航标准确定。

5.3.5 地震动测点应布设于承台顶或桥墩底部，可布设于桥梁两岸的自由场地；长度小于800m 的桥梁，至少布设一个测点；长度不小于800m 的桥梁，考虑地震地面运动非一致性，可相应的增加布设测点。

5.4 响应测点

5.4.1 响应测点布设应依据结构构造特点、结构静力特性、结构动力特性、结构病害分布区域，布设于各类构件的位移、转角、应变、索力、振动等特征点处。

5.4.2 结构整体位移和倾角测点布设，应根据最不利荷载组合作用下主缆、主梁、索塔、拱圈等关键构件的挠度、位移和倾角包络线，选择变形、位移和倾角极值点位置。

5.4.3 主梁挠度测点布设，根据跨径布置，应不少于主跨四分点处，边跨不少于跨中处；对于宽幅桥面、中央索面或其他具有扭转监测需求的主梁，应在同一断面左右幅外侧位置布设测点。

5.4.4 索塔、拱圈拱肋偏位测点应布设在索塔顶部、拱圈拱肋顶部。

5.4.5 支座位移、主梁梁端纵向位移测点宜布设在梁端支座处，并布设永久性人工观测点。

5.4.6 高墩桥梁或纵坡较大的桥梁墩顶纵桥向和横桥向偏位测点宜设置在桥墩顶部。

5.4.7 索塔、主梁、拱圈、拱肋、立柱、斜杆等关键构件截面应变测点位置和数量应根据结构计算分析，选择受力较大或影响结构整体安全的关键截面和部位；主梁顶板应变监测点，应布置在重车道或行车道车轮轮迹线对应位置；正交异性钢桥面板应变监测点宜布设在顶板、U 肋和横隔板等局部应变较大处；受力复杂的构件截面和部位，宜布设三向应变测点。

5.4.8 混合梁的钢混接合面处应布设应变测点，应布设在应变较大和应力集中处。

5.4.9 应根据吊索/拉索的布置形式、规格型号、索力、应力幅值等，确定索力及振动监测的吊索/拉索，宜对上、下游对称吊索/拉索成对布设测点；应根据主缆索股布置形式，确定锚跨张力监测的索股，基准索股应布设测点；应对系杆拱桥的系杆索力进行监测。

5.4.10 支座反力测点宜根据支座类型、构造、安装方式确定布设位置。

5.4.11 主梁横桥向和竖向振动测点应根据主梁振动振型确定，宜布设在振型峰值点处，测点位置应至少包括主跨跨中和四分点处。

5.4.12 索塔水平双向的振动测点应参考成桥状态索塔振动的振型确定。

5.5 变化测点

5.5.1 可进行基础冲刷监测，测点布设宜根据基础冲刷风险分析和专项评估确定桥墩测点位置。

5.5.2 悬索桥应对锚碇位移进行监测，测点宜利用沉降变形观测点，布设于锚体和前支墩角点；拱桥应对拱脚偏位进行监测。

5.5.3 技术状况为一类和二类的桥梁，宜选择代表性混凝土结构裂缝、钢结构裂缝进行监测；技术状况为三类和四类的桥梁，应选择代表性混凝土结构裂缝、钢结构裂缝进行监测。应依据定期检测评估结果确定测点位置和数量，宜对裂缝宽度的发展变化趋势进行跟踪观测。

5.5.4 可进行混凝土腐蚀监测，测点应布设在墩台水位变动、浪溅区的混凝土保护层内，可布设在大气区和钢筋混凝土梁受拉区的保护层内。测点位置、数量根据氯离子浓度梯度测试要求确定。

5.5.5 有体外预应力的梁桥应进行体外预应力监测，测点位置和测点数量宜依据结构构造特点和预应力布设位置、型式确定。

5.5.6 构件技术状况评定为3类或4类的索体可布设断丝测点，索体断丝测点应布设在索体锚头端部位置。

5.5.7 构件技术状况评定为3类或4类的悬索桥索夹宜布设索夹滑移和索夹螺栓紧固力测点，索夹滑移及索夹螺栓紧固力监测应根据索夹类型、索夹倾角以及螺栓布置型式确定需监测的索夹和螺栓。高强螺栓紧固力测点位置和数据宜根据检测结果和病害情况确定。

5.5.8 对重点部位表观病害，宜布设视频图像监测测点。

5.6 测点布设图示

5.6.1 为指导试点桥梁的测点布设工作，分别列出悬索桥、斜拉桥、梁桥、拱桥四类桥型的测点布设图示，各试点桥梁应遵循本指南进行详细设计。

5.6.2 悬索桥测点总体布设图示如图5.6.2所示。

5.6.3 斜拉桥测点总体布设图示如图5.6.3所示。

5.6.4 梁桥测点总体布设图示如图5.6.4所示。

5.6.5 拱桥测点总体布设图示如图5.6.5所示。

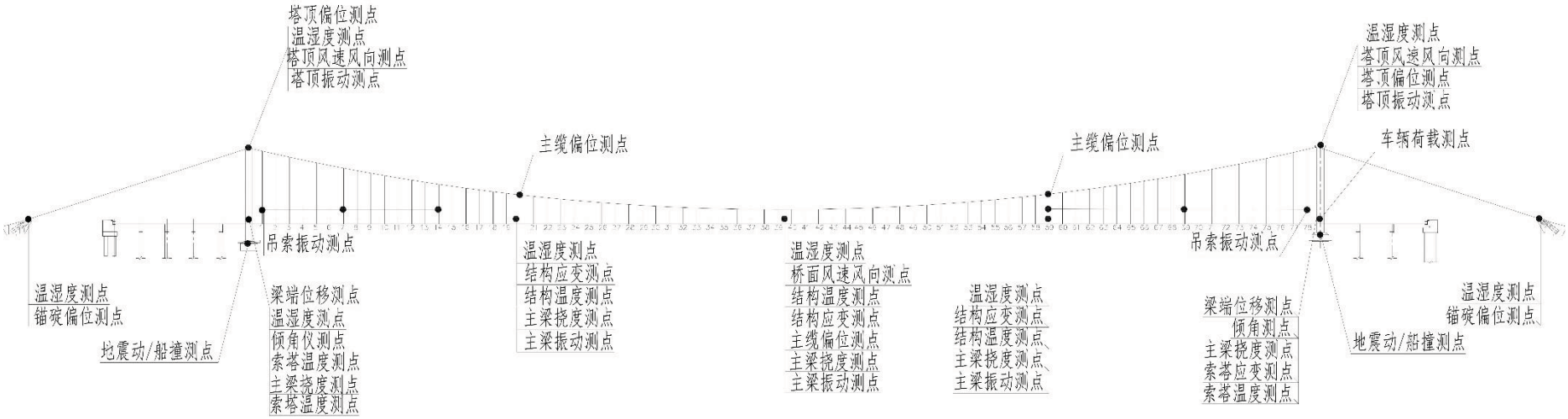


图5.6.2 悬索桥测点总体布设示意图

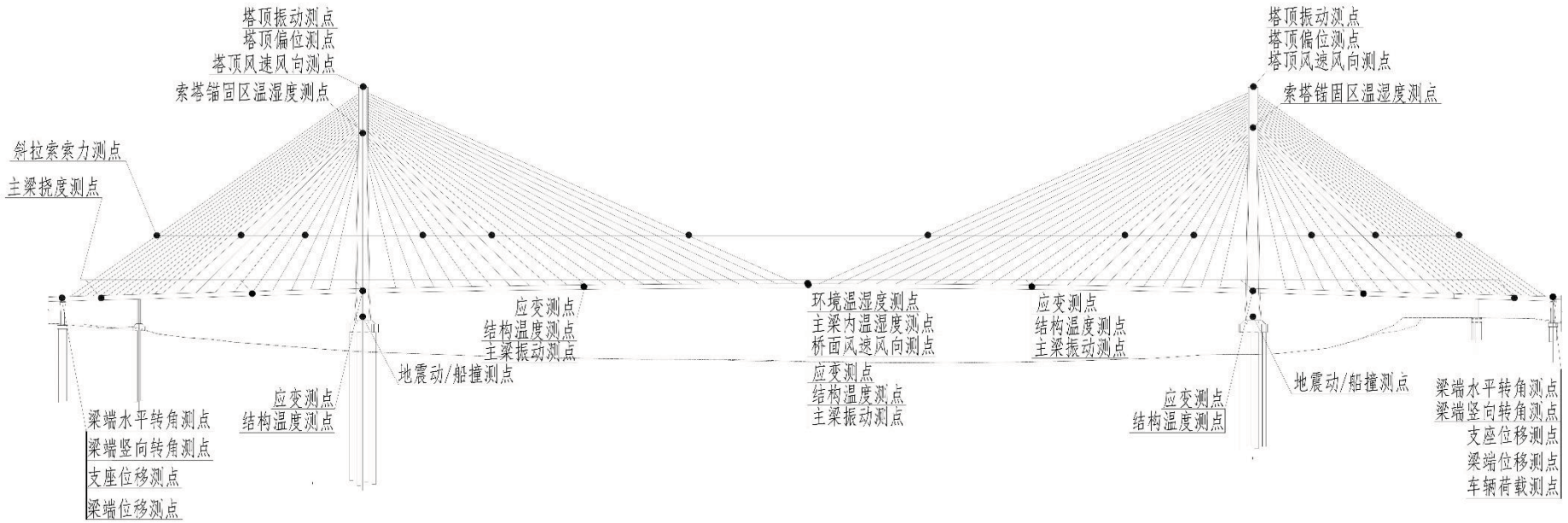


图5.6.3 斜拉桥测点总体布设示意图

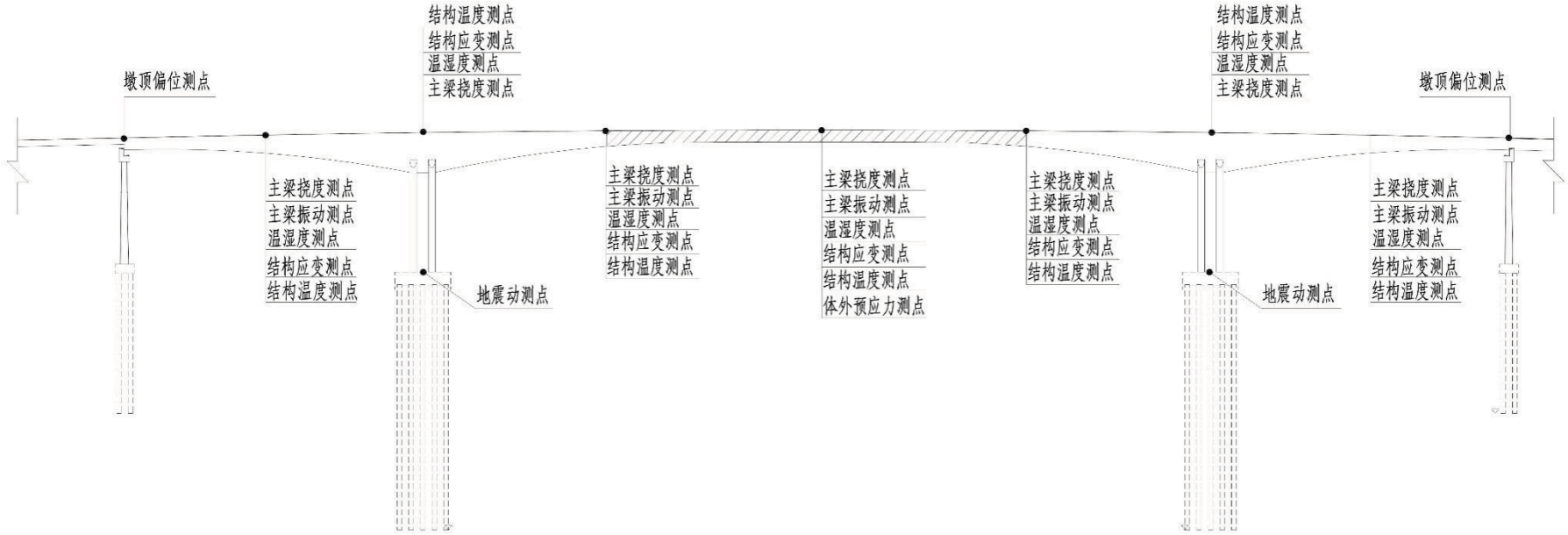


图5.6.4 梁桥测点总体布设示意图

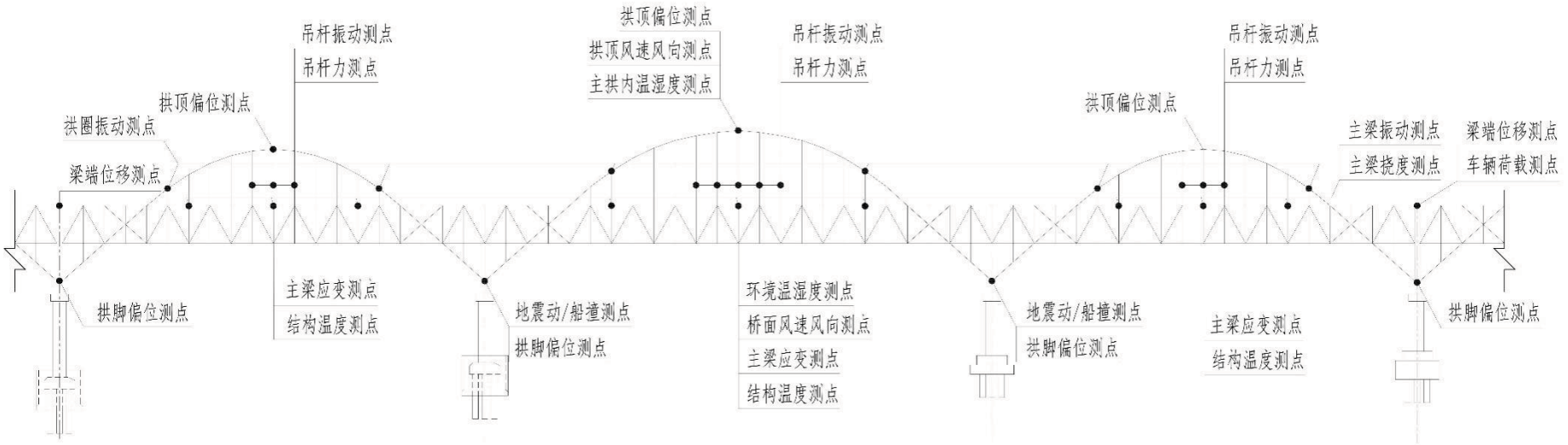


图5.6.5 拱桥测点总体布设示意图

6 监测方法

6.1 一般规定

6.1.1 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。

6.1.2 监测设备选型应与监测内容、测点布设和系统集成的要求相适配，传感器选型应满足量程、分辨力、精度、灵敏度、动态频响特性、环境适应性、稳定性和可靠性等要求。

6.1.3 监测设备工作环境适应能力应满足其所在桥址区或桥梁构件内的环境条件，可按需配置温湿度控制和保护装置。

6.1.4 监测设备宜使用可原位校准或自校准的产品和技术。

6.2 感知方式

6.2.1 车辆荷载监测宜选用动态称重系统，应符合《动态公路车辆自动衡器》（GB/T 21296）的有关规定，技术指标宜按本标准附录 A 的规定选择。

条文说明

动态称重系统传感器布设尺寸应考虑车道宽度，量程应根据桥梁车辆限载重量以及预测车辆荷载重量综合确定。

6.2.2 风速和风向监测宜选用超声风速仪或机械式风速仪，尽可能避免主体结构紊流对风速仪测试数据的影响，应符合《数字风向风速测量仪》（JB/T 11258）的有关规定。技术指标宜按本标准附录 A 的规定选择。

条文说明

处于台风区域的桥梁宜选择三向超声风速仪，测试参数应包括脉动风速、平均风速、风向和风攻角等。

6.2.3 桥址处地震动监测宜选用力平衡式三向加速度传感器，应符合强震动观测的要求，技术指标宜按本标准附录 A 的规定选择。

6.2.4 船舶撞击监测可与地震动监测、结构振动监测统一设计、数据共享，可辅助视频监控。

6.2.5 温度监测宜选用电阻温度计、数字温度计和光纤温度计，测量范围宜超出年极值最高

温度+20℃和年极值最低温度-20℃，误差≤±0.5℃。

6.2.6 湿度监测宜选用工业级湿度传感器，误差≤±2% RH，技术指标宜按本标准附录 A 的规定选择。

6.2.7 降雨量监测宜根据桥址处气象和气候特点选用翻斗式雨量计，误差≤3%，技术指标宜按本标准附录 A 的规定选择。

6.2.8 结构整体振动监测宜根据桥梁结构主要参与振动的振型选用三向、双向和单向加速度传感器，量程、灵敏度、误差和动态频响特性应符合桥梁结构振动监测的要求，技术指标宜按本标准附录 A 的规定选择。

条文说明

基频较低的大跨径桥梁，宜选用低频性能优良的力平衡式加速度传感器，基频较高的中小跨径桥梁或斜拉索、吊索、系杆等构件，可选用电容式加速度传感器和压电式加速度传感器。

6.2.9 位移和变形监测可选用位移计、连通管系统、全球导航卫星系统和倾角传感器等，传感器量程和误差应符合桥梁位移和变形监测的要求，全球导航卫星系统鼓励选用北斗卫星导航系统，位移计误差≤0.5%，连通管系统的误差≤1%，倾角传感器的误差≤±0.01°。技术指标宜按本标准附录 A 的规定选择。

条文说明

大跨径悬索桥、斜拉桥主梁横桥向变位、索塔偏位、主缆横桥向变位宜采用全球导航卫星系统（包括北斗、GPS 等）。长大桥梁根据实际条件，主梁挠度监测宜选用基于连通管系统的压力变送器或静力水准仪，其量程应根据管路最大高差计算确定。

表6.2.9 位移和变形监测方法选择

监测方法	桥型			
	悬索桥	斜拉桥	梁桥	拱桥
全球导航卫星系统	●	●		
压力变送器	●	●		

静力水准仪			●	●
位移计	●	●	●	●
倾角传感器	●	●	●	●
注：●为推荐选项				

6.2.10 应变传感器和裂缝传感器可选用光纤光栅应变传感器、电阻应变传感器、振弦式应变传感器，量程、误差和标距应符合桥梁结构应力和应变监测的要求，并应考虑温度补偿。技术指标宜按本标准附录 A 的规定选择。

表6.2.10 应变监测方法选择

监测方法	结构类型	
	钢结构	混凝土结构
光纤光栅应变传感器	●	●
振弦式应变传感器		●
电阻应变传感器	●	
注：●为推荐选项		

条文说明

应变传感器应根据被测构件的材料和构造特点选择合适的标距和传感器类型。不同传感器类型最高采样频率不同，振弦式应变传感器适合低频采样，电阻应变传感器、光纤传感器可应用于高频采样。

6.2.11 索力监测宜根据监测要求和被测拉索的特性选用加速度传感器（频率法）、力传感器、光纤光栅智能索力传感器等，监测误差≤3%。加速度传感器（频率法）的技术指标宜按本标准附录 A 的规定选择。

表6.2.11 索力监测方法选择

监测方法	桥型			
	悬索桥	斜拉桥	梁桥	拱桥
加速度传感器	●	●		●

力传感器	●	●	●	●
光纤光栅智能索力传感器		●		
注：●为推荐选项				

6.2.12 拉索断丝监测宜选用声发射传感器。裸露于空气中的钢索结构可选用谐振频率较高的声发射传感器，埋设于混凝土内的预应力钢索宜选用谐振频率稍低的声发射传感器。

6.2.13 支座反力监测宜选用测力支座，量程和误差应符合桥梁支座受力要求，误差≤5%。

条文说明

测力支座的技术要求应在主体结构设计文件中明确，由符合要求的支座厂家加工制作。

6.2.14 混凝土结构腐蚀监测可选用沿混凝土保护层深度安装多电极电化学传感器，电压测量范围宜位于-2000mV~+2000mV，电压误差≤±2mV，电流测量范围宜位于-2000*u*A~+2000*u*A，电流误差≤±2*u*A，监测混凝土保护层腐蚀侵蚀深度，判断钢筋的工作状态。

6.2.15 基础冲刷应根据桥址处水流速度、含沙量等水文参数以及设计允许冲刷深度综合选定监测设备，测量范围可选为0~100m（可根据实际需要定制），误差宜≤±0.1m，可选用声纳传感器。

条文说明

声纳传感器探头类型和数量应根据被测墩身基础类型、尺寸和水流特点确定；声纳探头位置可根据桥梁冲刷专题研究报告的桥墩（台）冲刷试验结果确定，圆形桥墩宜布设在桥墩上下游和两侧，圆端形桥墩宜布设在桥墩上游、下游以及在桥墩侧面最大冲刷位置，冲刷较严重情况宜在周边侧面同断面布设。

6.2.16 视频和图像监测宜选用工业一体化网络球型摄像机，图像分辨力≥200万像素，帧率≥30FPS，应配备以太网接口，并根据实际需要配备夜视功能或补光灯。

6.3 数据采集方式

6.3.1 数据采集方式应根据桥梁跨度、长度、空间尺度及结构特点、监测规模、传感器类型

进行选择，可分为分布式数据采集和集中式数据采集。

表6.3.1 数据采集方式选择

监测方法	桥型			
	悬索桥	斜拉桥	梁桥	拱桥
分布式	●	●		
集中式			●	●
分布式和集中式相结合	●	●	●	●
注：●为推荐选项				

条文说明

单孔长大桥梁空间尺度大、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。

6.3.2 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。

6.3.3 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，宜≥24位AD。技术指标宜按本标准附录 A 的规定选择。

6.3.4 光纤光栅信号采集应选用光纤光栅解调仪，应注意温度对光信号调制解调的影响，宜根据情况配置温控机柜。技术指标宜按本标准附录 A 的规定选择。

条文说明

光纤光栅解调仪的工作环境温度范围为℃~40℃，根据实际情况当不满足条件时应为其配置温控机柜。

6.3.5 数据采集应考虑时间同步，时间同步精度应满足数据处理、数据分析及状态评估的要求。动态信号的时间同步精度≤0.1ms，静态信号的时间同步精度≤1ms。

6.3.6 数据采集可选用连续采集、触发采集和定时采集等方式，采集频率应满足实时报警、数据分析及应用的要求，可根据监测需求参照表6.3.6进行设定、调整。

表6.3.6 数据采集频率

监测类别		采集频率
环境	温度	每10分钟1次
	湿度	每10分钟1次
作用	车辆荷载	触发采集
	风速、风向	三向超声风速仪≥20Hz 机械式风速仪≥10Hz
	温度	每10分钟1次
	船舶撞击加速度	50Hz
	地震	50Hz
响应	位移	动态：50Hz 静态：1Hz
	转角	1Hz
	应变	动态：20Hz 静态：每小时1次
	索力	压力传感器：1Hz 频率法加速度传感器：50Hz
	支座反力	1Hz
	振动	50Hz
变化	基础冲刷	在线：每小时1次 离线：每年1~2次
	锚碇位移	在线：每小时1次 离线：每年1~2次
	拱脚偏位	在线：每小时1次 离线：每年1~2次
	裂缝	动态：50Hz 静态：每小时1次
	腐蚀	在线：每小时1次 离线：每年1~2次
	拉索断丝	触发采集
	螺栓紧固力	在线：1Hz 离线：每年1~2次
	索夹滑移	在线：1Hz 离线：每年1~2次

6.4 数据传输方式

6.4.1 数据传输方式应根据桥址环境、监测规模、传感器及采集设备类型进行选择，可分为有线传输和无线传输。

6.4.2 数据传输应优先选用有线传输。当不具备条件或较为困难时，可考虑选用无线传输。

表6.4.2 数据传输方式选择

监测方法	桥型			
	悬索桥	斜拉桥	梁桥	拱桥
有线传输	●	●	●	●
无线传输			●	●
有线传输和无线传输相结合	●	●	●	●
注：●为推荐选项				

6.4.3 有线传输应选用带宽高、传输距离远、可靠性高、抗干扰能力强的光纤传输，传输网络宜采用基于 TCP/IP 协议的光纤专网。

6.4.4 无线传输应根据监测规模、监测需求及具备的网络条件选择适宜的无线通信网络，带宽、传输距离、时延应满足监测需求。

6.4.5 数据传输设施应高效、可靠、稳定的长时间运行，平均故障间隔时间应≥30000小时，平均 IP 包传输时延应≤100ms，IP 包丢失率应≤1×10^{-5}。

条文说明

平均 IP 包传输时延（Mean IPTD）是指一个数据流中所有 IP 包传送时延的算术平均值。IP 包丢失率（IPLR）是指丢失的 IP 包传送结果与所有 IP 包的比值。

6.4.6 数据传输协议和数据交换标准应统一设计，与外部系统之间数据交换宜采用数据服务接口形式。

6.4.7 采集到的监测数据应稳定可靠地传输到数据中心，宜采用消息认证、数字签名等技术保证数据传输的完整性、实时性、安全性和鲁棒性。

6.5 数据存储方式

6.5.1 对监测系统采集的各类数据应根据其重要程度、使用频率和数据量大小进行分级分类存储管理，存储方式宜分为在线存储和离线存储。

6.5.2 监测系统数据采集计算机应前置安装在桥梁现场，并具备≥180天的原始数据存储空间，

应能够实现在网络中断情况下原始数据的本地存储，并可在网络恢复后将数据回传至监控中心。

6.5.3 测点较少的监测系统宜选用 DAS 直连式存储模式，对数据存储容量大、数据可靠性和安全性要求高的系统宜选用 SAN 存储区域网模式。

条文说明

DAS(Direct Access Storage):直连式存储，该模式下存储设备直接连接于主机服务器的存储方式，每一台主机服务器都有独立的存储设备（即服务器磁盘），是一种结构简单、成本较小的存储模式。

SAN(Storage Area Network):存储区域网，通过高速光纤通道交换机连接存储阵列和服务器主机，组成专用存储网络。SAN 存储模式具有存储容量大、存取速度快、安全性高等特点，适用于大数据量关键数据的存储。

6.5.4 监测系统在线存储空间应满足原始数据存储≥3年，处理后的特征数据存储≥5年的容量要求，超过时限的数据可转存至低成本的离线存储介质上。

6.5.5监测数据离线存储可选用光盘、磁带或磁带库等低成本存储介质，对于离线存储数据应永久保存，以便查找追溯。

6.5.6 视频数据存储方式宜采用循环更新存储方式，普通视频存储宜≥1月，突发事件视频应进行转移备份存储并永久保存。

6.5.7 可考虑租用云服务商提供的云存储方式，云存储方案应综合考虑网络带宽、数据安全、存储容量等要求，确保满足应用要求。

6.5.8 监测系统数据存储应具备容灾备份机制，并具备数据压缩存储和异地备份功能，对关键数据宜定期进行异地备份。

7 监测系统

7.1 一般规定

7.1.1 监测系统涵盖的环节可分为系统设计、系统实施、系统交付、系统应用和系统维护，应利于维护、易于升级、便于扩展。

7.1.2 各级监测系统平台应设计采用统一数据交换传输标准、数据存储及数据管理标准，实现数据分级管理、归集与同步。

7.1.3 对于既有桥梁监测系统的升级、改造，应按照本指南规定的数据交换传输标准进行软件接口的设计、开发。

7.1.4 监测系统应进行安全认证，实现监测系统的身份鉴别、接入认证、访问控制和数据完整性、保密性管理。

7.2 系统设计

7.2.1 系统设计应包括下列主要内容：

1 系统构建基础性分析，主要包括环境和作用特点分析、结构特性分析、风险易损性分析、试点桥梁及既有监测系统状况分析、养护需求对策分析等；

2 系统总体设计，主要包括设计依据、架构组成、功能作用等；

3 系统详细设计，主要包括：

1）监测内容和测点布设；

2）监测方法，传感器选型、数据采集、传输、存储管理方案；

3）监测设备安装方案；

4）系统供电、接地、防雷、防护、预留预埋方案；

5）软件功能设计、性能要求和开发部署方案；

6）数据应用，报警、数据分析及状态评估方案。

4 系统与主体结构、数据中心、防雷接地、交通工程及沿线附属设施等工程界面的划分与衔接。

条文说明

系统设计的重点工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，具体流程见图7.2.1所示。各监测内容对应的监测目的目标、测点布设及监测方法可参见附表。

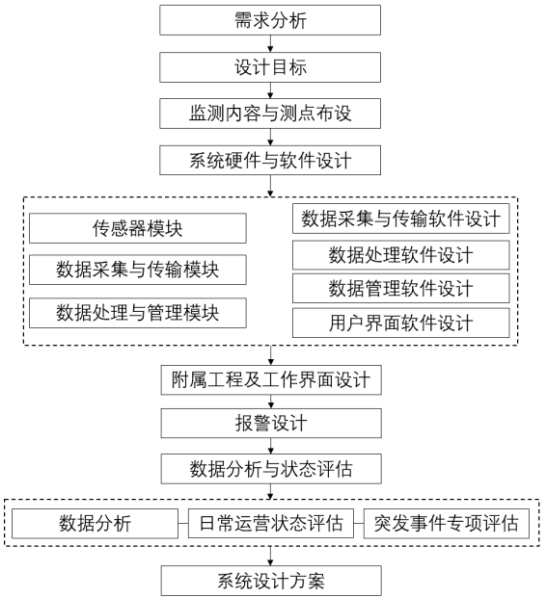


图7.2.1 桥梁结构健康监测系统设计流程图

7.2.2 传感器选型应与监测内容、测点布设和系统集成相适配，一桥一策，设计应给出环境适应性、量程、分辨力、精度、灵敏度、动态频响特性等技术指标要求。

条文说明

传感器选型时应考虑数据采集、数据传输、供电等的接口要求，满足系统集成的总体要求。

7.2.3 传感器量程应与量测范围相匹配，监测值宜控制在满量程的30%~70%。

7.2.4 传感器分辨力应与最小测量值相匹配，分辨力宜控制在监测值的1/15~1/8。

7.2.5 数据采集与传输模块包括数据采集与传输设备及光电缆线、数据采集与传输软件，应与传感器相适配，传感器信号数据应同步采集与实时传输。

7.2.6 数据采集与传输设备选型设计应一桥一策，综合考虑环境适应性、技术先进性、稳定可靠性给出技术指标。

7.2.7 系统设计应结合抗干扰、接地、防雷、防护措施配备保护机柜。监测设备防护设施应明确“防尘、防震、防水”指标要求。

条文说明

置于桥梁结构内部的保护机柜，其防护等级不宜低于 IP55，置于外部的不宜低于 IP65，并符合现行《电子设备机柜通用技术条件》（GB/T 15395）的有关规定。

7.2.8 监测系统软件架构应考虑内部功能独立性和外部扩展性，应采用面向服务的软件架构(Service-Oriented Architecture)；

7.2.9 软件系统宜划分为数据采集与传输软件、数据处理与管理软件和用户界面软件。

7.2.10 数据采集与传输软件应与感知设施匹配，应符合以下功能要求：

1 具有灵活的兼容性和可扩展性，具备数据采集频率、采集通道、采集参数转换等设置功能；

2 实现各类传感器信号的自动化采集、原始数据本地存储功能，并将数据通过可靠网络发送至数据处理与管理软件；

3 具备完善的日志记录功能，能够记录常见系统运行故障，并具备故障自动恢复功能；

4 具备原始数据本地暂存功能，在网络故障情况下将数据自动存储在本地计算机，网络恢复后续传数据；

5 采集设备和软件支持远程集中控制，保证只有授权用户才可对设备和软件参数进行配置或变更；

6 采集软件前置安装运行在桥梁现场，能够在高温、高振动、高电磁干扰等复杂环境下连续稳定运行。

7.2.11 数据处理与管理软件应能够接收并处理数据采集与传输软件发送来的数据，实现数据解析、数据清洗、特征值提取、存储管理等功能。

7.2.12 用户界面软件应符合以下要求：

1 采用 B/S（浏览器/服务器）架构构建主体软件界面，满足多用户访问系统的需求；

2 直观反映桥梁结构状态变化，界面布局清晰合理，符合用户使用习惯。

3 软件能够实现高频数据的实时动态展示，采用时程曲线、数据列表、大屏驾驶舱等多种方式展示数据实时变化及规律；

4 具备在线数据分析功能，包含：相关性分析、对比性分析、趋势性分析等；

5 设置灵活的查询条件并支持结果导出功能；

6 具备超限警示提醒功能，应按照9.2章节规定计算并设置超限报警阈值，当数据超过报警阈值时宜通过颜色变化、界面闪烁、短信提示、声光报警等多种方式的选择提醒用户；

7 控制类操作界面响应时间不高于3s，查询类操作响应有明确的进度提示；

8 具备用户角色管理、权限控制功能，能够根据用户身份控制其界面访问和数据访问权限；

9 对于有特别移动访问需求的用户，能够附着开发运行在手机、平板上的小程序、APP 等应用软件，功能包含实时数据展示、历史数据查询、报警消息推送、视频信息监控等。

条文说明

B/S 架构是一种基于浏览器/服务器的软件架构模式，采用这种架构的软件实际上是一个 Web 网站，用户可通过网页浏览器访问系统，该架构具有对客户端电脑要求低、可多人同时在线访问等特点。

移动监测 APP 或小程序可大大提高桥梁安全监管的便捷性，移动终端设备可通过 WIFI、4G/5G 网络与监控中心应用服务器进行数据交互，实现数据获取与展示。

7.2.13 系统设计时应充分考虑与桥梁管养单位企业级、省级、部级桥群监测平台数据互联互通要求，宜采用 Web Service 技术开发数据交换接口。

条文说明

Web Service 是一个平台独立的，低耦合的，自包含的、基于可编程的 web 应用程序，可使用开放的 XML 标准来描述、发布、发现、协调和配置这些应用程序，主要用于开发分布式的交互操作的应用程序。

Web Service 能使得运行在不同机器上的不同应用无须借助附加的、专门的第三方软件或硬件，就可相互交换数据或集成。

7.2.14 监测系统设计应至少配备三台高性能服务器，分别安装数据处理与管理软件、中心数据库软件和平台应用软件，对于 GNSS、动态称重监测项应单独配备计算机设备，各设备性能指标要求应在设计文件中予以明确。

7.2.15监测系统升级改造设计应利用既有服务器等硬件设备，并应按需新增计算及存储设备以满足系统升级后运行要求。

7.2.16 监测系统应设计系统安全保护措施。

7.3 系统实施

7.3.1 系统实施应包含硬件实施、软件开发及软硬件联合调试三部分。

7.3.2 硬件实施应包括施工准备、施工组织设计、桥位外场和数据中心内场的设备、设施安装与调试，应按照相关行业规范执行。

7.3.3 硬件实施采用的设备材料应符合国家现行有关标准的规定，并应出厂检测合格。

7.3.4 桥梁监测系统的供电、通信、数据中心、预留预埋、开孔开洞需求，应纳入施工图设计文件。业主单位和监理单位应协调确定监测系统与其它工程的工作界面，并指定专业化施工单位协助配合。

7.3.5 监测系统实施准备应符合以下规定：

1 施工准备应由技术准备和资源准备组成；

2 技术准备包括工程资料收集、现场踏勘、施工组织设计、技术交底等工作；

3 资源准备包括项目部组建，监测设备采购与进场报验，供电、通信、数据中心、预留预埋、开孔开洞等协调，施工工具、机械准备，临时设施与安全防护设施搭建等工作。

7.3.6 施工组织设计应符合以下规定：

1 由系统实施单位在完成现场踏勘工作后进行；

2 由施工技术方案、施工组织方案等组成；

3 施工技术方案包括传感器、数据采集与传输设备、光电缆线路、数据中心、附属设施等的安装和调试方案等；

4　施工组织方案应包括建设组织规划，建设进度计划，质量、安全、环保的措施等。

7.3.7 安装调试应符合以下规定：

1　传感器、数据采集与传输设备的安装位置应满足设计要求，传感器应通过可靠方式与被测结构物牢固连接，并采取适当的措施予以保护；安装调试过程应依据作业程序和要求开展，按有关规定准确填写施工记录表，记录、整理必要的设备编码、安装参数、初始数据和资料等；

2　光电缆线应与大桥其他缆线保持必要的距离，并采取必要的屏蔽措施。光缆敷设弯曲半径应大于光缆外径的20倍，双绞线、同轴电缆、大对数线缆的弯曲半径应≥的15倍，接头部位应平直不受力；

3　光缆接续时应尽量减少接续损耗，每道工序完成后采用前向双程测试法测量接头损耗，中断段光纤的平均接头损耗≤0.05dB/个；

4　供电、接地、防雷的建设应满足设计及相关规范要求；当电压波动较大、供电不稳时，应在供电设备输出端加设交流稳压装置，稳压后对监测设备进行供电。

5　传感器安装前应进行必要的校验，安装到位后应采集初始值，监测系统完工后应建立监测基准。

7.3.8 应对附属设施进行设计和界面划分，与其他工程的界面划分应符合下列规定：

1　系统设计单位设计主体结构上的预留预埋件、开孔开洞，由专业施工单位负责施工，对局部防腐涂装、安全防护造成的局部损伤应现场及时专业修复；

2　系统专用的不间断供电回路，应与由交通机电专业施工单位联合设计并施工，供电接入点应设在监测系统的数据采集站内；

3　系统的通信光纤，应与交通机电施工单位联合设计并施工，光纤接入点应设在监测系统的数据采集机柜内。

7.3.9 综合布线的桥架宜采用热镀锌、不锈钢、铝合金材质的防火槽式桥架，穿线管宜采用包塑不锈钢软管、热镀锌钢管，光电缆的使用寿命应满足设计要求，并符合《综合布线系统工程设计规范》（GB 50311）的有关规定。

7.3.10 系统防雷应基于桥梁现有主体结构防雷体系，考虑区域强电防雷、弱电防雷、等电位连接及接地，符合《建筑物电子信息系统防雷技术规范》（GB 50343-2012）的有关规定进行新建或改造。

7.3.11 系统软件开发应包含软件开发、软件测试、软件部署以及与系统硬件的联合调试，应由第三方软件测试单位进行软件各功能测试。

7.3.12 系统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，软件内部各模块功能独立，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 对于需要多方协同开发的软件，使用软件代码版本控制工具；

4 未经业主单位允许，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《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，可采用边缘计算、分布式处理、消息中间件、时序数据库等先进可靠技术。

7.3.13 系统软件测试应符合以下规定：

1 软件开发完成后由具备相关资质的软件测评单位进行软件测试，测试内容包含单元测试、功能测试、性能测试、集成测试等；

2 软件测试前编写测试方案和测试用例，测试流程和内容应符合《计算机软件测试规范》（GB/T15532）和《计算机软件测试文档编制标准》（GB/T 9386）相关要求；

3 软件测试完成后由测评单位出具《软件测试报告》，报告应详细描述每个测试用例的测试结果，对于重大功能偏离、缺陷和逻辑错误，需经开发单位修复完善后再次提交测试，最终测试通过率应不低于测试用例总数的95%。

7.3.14 系统软件部署应符合以下规定：

1 软件部署前编制软件部署建设指南，开发过程规范有序，开发完成后各功能完好；

2 软件现场部署前，服务器、工作站、工控机等硬件安装完毕并接电稳定运行，数据中心网络、供电、通信、照明等应满足设计要求；

3 操作系统、应用组件、数据库等应用支撑软件的安装和配置满足软件设计文件的要求；

4 软件安装和调试分步进行，软件部署完成后大桥现场、数据中心同步功能确认。

7.3.15 软件安装完成后与外场硬件的联合调试，应符合以下规定：

1 数据采集与传输软件部署完成后与桥梁现场感知设施进行数据采集校验，确保数据输出通道、数据流、方向、精度等与外场设备安装保持一致；

2 数据处理与管理软件部署完成后与桥梁现场感知设施和数据采集与传输软件进行数据对接，确保数据接收、处理和存储等功能满足设计文件要求；

3 软硬件联合调试完成后，用户界面软件各项功能正常，监测数据展示准确，界面数据值、数据精度、数据单位应与设计文件和传感器输出一致；

4 各软件节点与外场传感器之间的时间同步误差、网络延迟误差、信号噪声量等满足设计文件规定。

7.3.16 系统建设软件功能完好率100%，数据完好率≥95%。

7.4 系统交付

7.4.1 系统具备交付条件时，应及时组织验收交付投入使用。系统验收应包括硬件验收、软件验收和资料验收三部分。

7.4.2 硬件验收应包含以下内容：

1 进场设备材料的数量、规格型号、技术参数等与合同文件、设计文件的一致性，合格证、质保卡、说明书及出厂检验报告等是否齐全；

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

3 数据采集设备处于正常工作状态，机柜内电力线、信号线、元器件等布线平直、整齐、固定可靠，插头牢固，标识清晰。出线管与箱体连接密封良好，机柜内无

积水、尘土、霉变；机柜接地连接可靠，接地引出线无锈蚀；

4 光电缆线路敷设与数据中心设备安装应满足《公路工程质量检验评定标准 第二册机电工程》（JTG F80-2）的有关要求。

7.4.3 软件验收应包含以下内容：

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

2 数据处理与管理软件功能完整性和一致性检查，正常接收、处理、存储、转发监测数据，各项功能指标满足设计文件要求；

3 用户界面软件功能完整性和一致性检查，各软件模块功能满足设计文件要求，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要求。

7.4.4 资料验收主要检查文档的齐全性、规范性和一致性，应包含以下内容：

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、设备设施检验资料；监理资料；有关会议纪要等；

3 交工验收资料：系统实施总结报告、系统竣工图、系统硬件手册、系统软件使用手册和系统试运行报告。

7.5 系统维护

7.5.1 应按年度组织编制系统维护计划，包含备品备件清单、数据分析计划、系统维护费用预算。

7.5.2 应对系统管理使用单位人员进行系统使用培训。

7.5.3应定期进行 系统检查和维护，及时维修或更换故障设备，建立设备维护台账。

7.5.4 系统硬件设施维护宜分为日常维护和定期维护。

7.5.5 系统硬件设施日常维护应符合下列规定：

1 日常维护的主体为桥梁管养单位，结合桥梁日常巡查工作开展；

2 系统的日常维护对巡查路线上监测设备的表观完好性进行检查，并对巡查情况进行记录；

3 每天对数据中心 UI 界面展示的监测数据以及机房计算机设备和工控机运行状态进行检查，并进行记录。

4 对巡查中发现的问题或系统软件反馈的问题，进行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；

7.5.6 系统硬件设施定期维护应符合下列规定：

1 定期维护主体为专业维护部门或机构，至少每半年进行一次定期维护，遇强风等可预报的应急状况发生前需对系统进行专项定向维护；

2 需对监测传感器、采集器等的表观完好性进行检查；对设备及防护罩的固定情况、以及传感器、采集器与传输线路的接头紧固情况进行检查；

3 对现场采集站、数据中心内等易受灰尘影响的设备及机柜进行除尘处理；

4 对基于连通管原理设备的液位情况定期检查，补充连通管内液体至设计液位；

5 需对维护中发现的问题24小时内快速处置。

7.5.7 软件系统维护宜分为日常检查、定期维护和应急维护。

7.5.8 软件系统日常检查应符合以下规定：

1 每周应开展≥1次日常检查；

2 日常检查内容包括各软件模块功能工作状态检查、实时数据及历史数据检查、超限数据检查确认等；

3 在系统不停机状态下进行软件日常检查，确需停机维护的，应提前告知桥梁管养单位，并尽量在夜间进行维护操作。

7.5.9 软件系统定期维护应符合以下规定：

1 每月应开展≥1次定期维护；

2 软件定期维护内容包括软件系统时间同步检查、磁盘存储空间检查及清理、数据库异地备份及软件运行日志检查等；

3　对于有配置参数修改、更正的维护操作，需应提前做好备份，并在维护完成后记录，按需向桥梁管养单位汇报。

7.5.10 软件系统应急维护应符合以下规定：

1　系统出现功能缺陷、突发故障、数据中断等情况时，或遭遇台风等可预测的应急状况发生前进行应急专项维护；

2　软件应急维护内容包括软件崩溃恢复、功能异常修复和数据异常更正等；

4　当发现软件功能故障、界面数据异常或中断、数据超限报警等情况时，及时通知软件维护单位进行处置和确认；

5　对于非软件功能、性能因素造成的数据异常或中断等，联合硬件维护人员联合排查、修复并记录。

7.5.11 应根据监测系统维护工作计划列支下一年度系统维护费用。

7.6 系统安全

7.6.1 单桥监测系统应从物理层、网络层、系统层、数据权限、数据库等方面考虑系统安全性要求。

7.6.2 系统数据中心应优先考虑桥梁现场管养中心机房和监控中心。机房需建立完备的物理安全保障措施，配备消防设施、防雷击和电磁干扰设备、视频安防和门禁系统，并配备恒温空调和 UPS 设备保证温湿度环境及供电要求。

7.6.3 数据中心应按照功能合理划分安全域，宜分为数据存储域、数据处理域、应用服务域和工作域，各安全域之间应能够进行有效隔离。

7.6.4 应采用防火墙技术实现核心应用层与互联网之间的安全阻断与隔离，各应用服务器应采取必要的安全防护措施以阻断木马程序、病毒的传播。

条文说明

防火墙技术能够有效隔离外部网络攻击，一般分为硬件防火墙和软件防火墙，硬件防火墙是通过硬件和软件的组合达到隔离内外部网络的目的，一般嵌入在路由器、交换机等设备中，软件防火墙一般集成在操作系统平台，通过纯软件方式实现内外网隔离。

7.6.5 各应用服务器、工作站应安装防病毒软件、安全审计系统等保证系统运行安全。

7.6.6 监测系统软件数据权限安全应符合以下规定：

1 软件系统设置基于角色的用户权限管理模块，能够通过角色实现界面权限和数据权限的授权访问；

2 系统登录具备用户密码复杂性校验功能，定期提示用户更换密码，用户密码需要进行加密存储；

3 系统内置超级管理员用户，具备密码重置及用户名单查询与导出功能；设计安全加密和分级授权策略，保证系统访问安全；

4 系统软件具备完善的日志记录功能，能够对用户登录、页面操作、配置修改、恶意攻击、系统故障等信息进行自动记录保存，能够事后统计和追查用户的访问操作。

7.6.7 应采用用户标识和鉴定、数据存取控制、视图机制、数据库审计等方式保证数据库系统安全。

7.6.8 采用云服务商公有云作为运行环境时，云服务商应按桥梁数据安全管理设计要求设置安全保护措施。

8 监测数据

8.1 一般规定

8.1.1 监测数据应客观真实、精确可靠显示监测项目各测点传感器的实时数据。

8.1.2 监测数据宜采用分布式存储、大数据分析、多源数据整合等技术进行存储、管理和应用。

8.1.3 监测系统应采取措施减少因信号噪声、信号衰减、传感器误差等因素造成的数据失真，提高数据的可靠完整性。

8.1.4 对于动态监测数据制定数据采集传输接口标准，对于静态数据应编制数据字典。

8.1.5 监测数据处理应剔除错误数据，提取反映监测内容的有效特征数据。

8.1.6 监测数据宜作为桥梁全寿命周期数字档案永久保存。

8.2 数据标准

8.2.1 监测数据应参照以下规则进行分类：

1 按照数据类型划分，监测数据宜分为桥梁基础数据、应急事件数据、监测点属性数据等业务类数据，以及实时监测数据、历史特征数据、车辆荷载数据、视频监控数据等监测类数据；

2 按照监测类别划分，监测数据宜分为环境类监测数据、作用类监测数据、响应类监测数据和变化类监测数据。

8.2.2 监测数据编码规则应符合以下规定：

1 应参照《公路数据库编目编码规则》（JT/T132-2014 ）要求对公路桥梁进行编码，公路桥梁代码应由“路线编号+行政区划代码+L(R/Z/K/Y)+四位数字编号”组成。

2 桥梁基础数据应包含桥梁名称、桥梁代码、桥梁结构基本信息、桥梁管理单位信息等内容，详细数据字典参见附录 B 中的表 B-1;

3 桥梁监测点编号应按照固定的规则进行编码，编码规则应简洁易懂，宜由“桥名简称-监测项简称-构件类型-截面序号-构件序号-测点编号”组成；

4　实时监测数据应包含测点编号、数据采集时间、当前值、数据状态等信息，详细数据字典参见附录 B 中表 B-5;

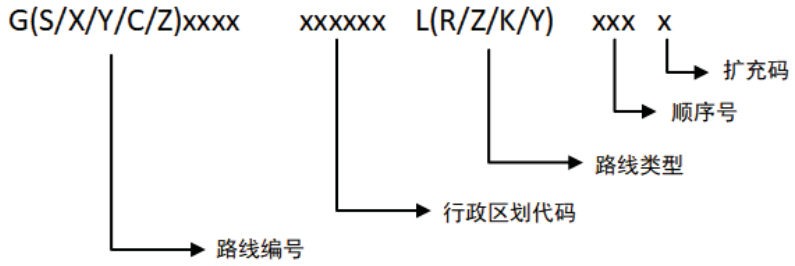
5　应将实时监测数据按照一定的时间间隔降采样统计为特征值数据，包含最大值、最小值、平均值、RMS 均方根值等统计方式，特征值统计时间间隔应可自定义配置，详细数据字典参见附录 B 中表 B-6;

6　超限报警数据应记录测点编号、超限级别、超限值、超限时间等信息，超限级别划分应与本指南中明确的报警级别保持一致，详细数据字典参见附录 B 表 B-9；

7　视频监控数据应以视频媒体文件形式压缩存储，每个视频文件应对应存储其属性信息，包含摄像头编号、采样分辨力、采集起止时间、摄像机方向、工作状态等信息。

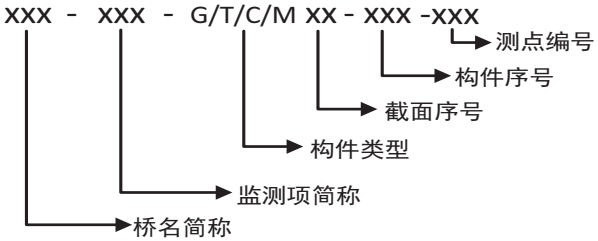
条文说明

（1）公路桥梁编码编码结构如下图所示：



比如嘉绍跨江大桥桥梁代码为“G15W330604L6710”，其中 G15W 表示大桥所在高速公路编号，330604为 GB/T2260 规定的国家行政区划代码，表示为浙江省绍兴市上虞区，L 表示为公路桥梁，671嘉绍大桥在 G15W 高速路段的桥梁顺序号，0为扩充码。

（2）桥梁监测点编号命名规则如下图所示：



上图中，桥梁简称为桥梁汉语拼音大写首字母组合，如西堠门大桥表示为 XHM,一般

由2-5位大写字母组成。监测项简称为不同监测项的英文简称，一般由三位大写字母组成，各监测项简称详见附表 B-1。构件类型表示当前传感器所在构件类型，L：梁结构，T：塔结构，S：索结构，D：桥墩，M：锚室。各字段之间应以中横线“-”加以分割，如监测点名称 XS-VIB-L05-001-01表示“秀山大桥主梁振动监测项 L05梁段第001构件第01个监测点 编号”。

8.2.3 监测系统实时数据传输协议应按照本指南附录 D 规定进行监测数据实时采集与传输。

条文说明

本指南附录 D 中规定了三类实时数据传输协议，分别为：

（1）通用报文协议，主要用于传输温湿度、位移、振动、风荷载、挠度、降雨量、倾角、索力、支座反力、冲刷等大多数监测数据；

（2）GNSS 报文协议，专门针对使用 GPS 和北斗作为监测设备的监测项，主要传输监测点的空间坐标相对变化量；

（3）车轴车速仪报文协议，专门针对 WIM 动态称重系统监测项，主要传输车型、轴重、车速等车辆交通荷载信息。

8.2.4 与其他业务系统进行数据交换共享的，应遵循以下规定：

1 与其他系统之间数据交换应采用数据接口服务的方式，有网络隔离要求的应采用中间存储介质的方式进行数据交换；

2 数据交换接口设计应充分考虑各子系统运行稳定性要求，应采取必要的权限验证和安全管理措施保证数据的安全性；

3 监测数据通过互联网传输时，宜采用通过传输加密和身份认证的 Https 协议，并在数据交换时采用动态秘钥进行权限身份认证。

8.2.5 监测系统接入企业级、省级监测平台和部级数据平台时，宜采用基于 IPSec 协议或 SSL 协议建立 VPN 专用网络连接，并需满足省部级平台对于网络安全等级保护的基本要求。

条文说明

IPSec 协议和 SSL 协议是目前主流的两种 VPN 网络加密协议，SSL 主要用于单点接入网络，IPSec 主要用于网络与网络之间的互联，实际使用时应根据网络传输要求选用相应的 VPN 加密协议。

8.3 数据处理

8.3.1 监测系统软件应能够接收并解析桥梁现场发送的各类监测数据，并具备数据预处理、二次处理、特征值提取以及数据持久化存储功能。

条文说明

由于传感器、数据采集、数据传输系统等原因，监测系统采集的数据时常出现错误，这些错误数据将严重影响监测数据分析结果正确性。因此，在进行数据分析前，需进行数据处理，将错误数据剔除。错误监测数据的剔除应选用成熟可靠的方法，例如基于深度学习和机器视觉的方法。

8.3.2 系统软件宜能够通过可视化界面远程进行数据处理参数设置。

8.3.3 应针对不同的监测项设计对应的处理方法，对数据进行滤波、特征提取、数据解耦、转换与统计等处理。

8.3.4 宜采用人工智能、深度学习等先进技术对大跨悬索桥涡振、拉索/吊索异常振动等开展数据分析处理探索研究。

8.3.5 应明确定义处理后监测数据的数据单位、数据方向、数据精度。

条文说明

数据单位采用国际标准单位，不同类型监测项数据单位及数据方向宜参照附录 B 规定。

8.3.6 数据处理宜采用多线程、分布式并行计算、Redis 等技术提升数据处理和存取效率，最大限度提升数据处理时效性。

8.4 数据管理

8.4.1 宜采用数据库技术对结构化数据进行永久性存储，并能以数据接口形式对外提供数据调用和查询功能。

条文说明

数据库是按照一定的数据结构来组织、存储和管理数据的仓库，是一个长期存储在计算机内的、有组织的、可共享的、统一管理的大量数据的集合。

8.4.2 数据库设计应遵循技术先进、架构合理的设计原则，宜按照不同的数据类型和功能进

行分类存储管理。

8.4.3 宜按照监测系统功能模块和业务类型划分为实时数据库、统计分析数据库、桥梁结构信息数据库、监测系统信息数据库、结构安全评估数据库等专项数据库。

8.4.4应考虑数据量增长对于数据存取的压力，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。

8.4.5 对于视频、图片、文档等非结构化数据，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。

条文说明

非结构化数据是数据结构不规则或不完整，没有预定义的数据模型，不方便用数据库二维逻辑表来表现的数据。包括所有格式的办公文档、文本、图片、XML, HTML、各类报表、图像和音频/视频信息等等。

8.4.6 应提供参数配置功能，能够对各类监测数据的配置参数、处理频率、输出数据格式等进行自定义设置、修改。

8.4.7 应具备数据备份和故障恢复功能，并设置灾备机制对关键数据进行定期异地备份，对于故障支持自动和手工操作进行故障恢复。

9 数据分析与应用

9.1 一般规定

9.1.1 数据分析与应用围绕桥梁安全与耐久，基于监测系统监测数据，利用各类数据分析方法，对桥梁运营和结构安全进行报警，并定期进行状态评估及诊断，支撑桥梁管养科学决策。

9.1.2 数据分析与应用应包括报警、日常运营监测数据分析、突发事件监测数据分析和状态评估。

9.1.3 数据分析、评估应专业可靠，宜采用比对分析和相关性分析等有效方法，获得环境与作用以及结构响应与变化的实际情况以及趋势规律，开展状态评估。

9.1.4 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警示报警。

条文说明

报警是桥梁结构健康监测系统的基础功能之一。由于监测系统可以24小时不间断地对桥梁的环境、作用、结构响应和结构变化进行全天候感知，当桥梁运营状态发生异常导致监测数据出现异常时，监测系统可以及时给出分级警示，提示桥梁管理部门及时采取针对性措施。监测报警可分为基于直接监测数据的报警和基于监测数据分析结果的报警两类。基于直接监测数据的报警通过设定监测变量的报警阈值，当实际监测量超过阈值时，进行报警。基于监测数据分析结果的报警，通过监测数据分析，提取与结构健康状态相关的特征指标，并根据这些特征指标的变化进行，进行桥梁结构异常状态报警。

9.1.5 桥梁日常运营监测数据分析应符合本指南9.3节的有关规定，定期形成数据分析报告。

条文说明

对桥梁日常运营中监测到的环境、作用、响应和变化等监测数据进行分析，形成数据分析报告（桥梁及监测系统的基本信息、分析项目、分析方法、分析结果、结论与建议等），用于桥梁健康状态评估。

9.1.6 当桥梁遭受洪水、流冰、漂流物、船舶或车辆撞击、滑坡、泥石流、地震、强风、海啸、火灾和特殊车辆过桥等突发事件时，应按本指南9.4节的有关规定进行突发事件专项评

估，形成专项分析报告。

9.1.7 当监测数据提示桥梁运营环境、结构状态异常时，应分析监测数据评估异常状态对桥梁结构安全影响，并提出相应的对策措施。

9.2 报警

9.2.1 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、船撞、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。

9.2.2 报警应分为蓝色警示、黄色和红色报警三级，应符合下列要求：

1 当监测数据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时，进行蓝色警示。蓝色警示阈值可根据养护管理规定和需求、桥梁结构特点、行车舒适度等因素确定阈值；

2 当监测数据超过桥梁正常使用条件界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时，进行黄色报警；

3 当监测数据接近桥梁结构安全界限值或者严重影响桥梁安全、正常使用和行车安全时，进行红色报警；

4 各监测项目应根据重要程度确定报警级别、采取适当的报警响应措施。

9.2.3 报警规则和报警阈值的确定应符合下列规定：

1 基于监测参数历史统计值、设计值和规范容许值设定报警阈值；

2 考虑监测数据动态特征、统计特性以及异常特征设定报警阈值；

3 兼顾试点桥梁定期检查及技术状况评定结果设定报警阈值；

4 依据桥梁使用状况和系统运行状况可对报警阈值进行动态调整；

5 日常运营状态下及在台风、地震等突发事件中的报警阈值设定，宜参照9.2.7条规定。

条文说明

监测数据动态特征包括主梁振动加速度、索振动加速度、索振动加速度、桥梁主要基频变化、振型MAC值变化等；统计特性包括最大平均风速、10分钟平均风速、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；监测数据异常特征指监测车辆总重或轴重、索应力等监测值过大，以及桥梁基频、振型MAC值、相关性模型参数变化过大等。当既有桥梁具有承载力检测评定结果时，可以采用桥梁承载力评定结果替代桥梁承载力设计值。

9.2.4 报警功能应符合下列规定：

1 具有实时和自动报警功能，需在监测系统软件界面显示报警信息；

2 报警内容包括报警级别、报警传感器编号和位置、报警监测值和报警阈值；

3 能发布、调整和解除报警；

4 报警阈值应能依据桥梁和系统运行状况动态调整。

条文说明

报警应该通过软件实现，除了在监测系统软件界面自动实时显示报警信息外，还可通过声光报警、邮件、短信、微信、APP 等形式发送报警信息。报警值指各报警内容在不同报警级别下的报警阈值。

9.2.5 当根据9.4.2条第1款规定发现大跨钢桥出现涡振时，应进行主梁涡振专项报警，报警指标宜选择主梁振动竖向加速度10分钟均方根值，报警阈值宜按表9.2.7取值。报警阈值可结合桥梁的运营环境、重要程度、涡振发生次数等进行适当调整。

条文说明

蓝色警示，提醒桥梁管养单位监控管理人员有涡振动发生，应持续关注；黄色报警，提醒桥梁管养单位发生强烈涡振，应进行交通流量管制；红色报警，提醒桥梁管养单位发生十分强烈涡振，应封闭交通，并进行桥梁结构安全评估。涡振应实时自动识别，识别方法宜综合考虑振动均方根值、能量比特征、风场参数等，增强涡振识别的可靠性。可采用基于聚类算法的大跨度桥梁涡振自动识别方法。

9.2.6 当大跨桥梁遭遇强/台风，应根据平均风速大小进行专项报警，报警等级分为蓝色、黄

色和红色三级，报警阈值宜按表9.2.7取值。

条文说明

蓝色警示：提醒桥梁管养单位封闭交通，应启动强/台风应急预案；黄色报警：提醒桥梁管养单位强/台风影响强烈，密切关注桥梁各构件的安全状态，强/台风过后应进行结构安全评估；红色报警：提醒桥梁管养单位主梁可能发生颤振失稳，密切关注桥梁各构件的安全状态，强/台风过后应对桥梁进行全面检查和结构安全评估。

9.2.7 日常运营状态下及在台风、地震等突发事件中的报警阈值设定宜符合下表9.2.7的规定。

表9.2.7 报警阈值设定用表

报警类别	报警内容	报警阈值	报警级别	桥梁类型			
				梁桥	拱桥	斜拉桥	悬索桥
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	蓝色警示	●	●	●	●
		大于1.2倍设计值	黄色报警	●	●	●	●
	构件封闭空间内相对湿度	大于50%	蓝色警示	●	●	●	●
作用	车辆总重或轴重	大于1.5倍设计车辆荷载	蓝色警示	●	●	●	●
		大于2.0倍设计车辆荷载	黄色报警	●	●	●	●
	强/台风	桥面10分钟平均风速大于25m/s	蓝色警示	-	-	●	●
		桥面10分钟平均风速大于0.8倍桥面设计风速	黄色报警	-	-	●	●
		桥面10分钟平均风速大于桥面设计风速	红色报警	-	-	●	●
	地震	大于设计 E1地震作用加速度峰值	黄色报警	●	●	●	●
		大于设计 E2地震作用加速度峰值	红色报警	●	●	●	●
响应	主梁振动加速度	达到舒适度限值、且持续时间超过30分钟	蓝色警示	●	●	●	●
		幅值持续增大、呈现发散特征	黄色报警	●	●	●	●
	索振动加速度	10分钟加速度均方根大于100cm/s^2	蓝色警示	-	●	●	●
		10分钟加速度均方根大于300cm/s^{2}且频繁	黄色报警	-	●	●	●

		出现					
	主梁挠度	大于0.8倍设计值	黄色报警	●	●	●	●
		大于设计值或一个月内发现10次以上黄色报警	红色报警	●	●	●	●
	索塔塔顶偏位	大于0.8倍设计值	黄色报警	-	-	●	●
		大于设计值或一个月内发现10次以上黄色报警	红色报警	-	-	●	●
	主缆偏位	大于0.8倍设计值	黄色报警	-	-	-	●
		大于设计值或一个月内发现10次以上黄色报警	红色报警	-	-	-	●
	支座位移、梁端纵向位移	大于0.8倍设计值	黄色报警	●	●	●	●
		大于设计值	红色报警	●	●	●	●
	索力	大于0.95倍索力设计值*	黄色报警	-	●	●	●
		大于1倍索力设计值*	红色报警	-	●	●	●
	锚跨索股力	基准值变化超过5%	黄色报警	-	-	-	●
		基准值变化超过10%	红色报警	-	-	-	●
变化	基础冲刷深度	大于0.7倍设计冲刷深度	黄色报警	●	●	●	●
		大于设计冲刷深度	红色报警	●	●	●	●
	锚碇位移	大于0.9倍设计值	黄色报警	-	-	-	●
		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	红色报警	-	-	-	●
	拱脚偏位	大于0.9倍设计值	黄色报警	-	●	-	-
		大于1.0倍设计值	红色报警	-	●	-	-
	裂缝	出现结构性裂缝	蓝色警示	●	●	●	●
		裂缝宽度超过规范限值或发展加速	黄色报警	●	●	●	●
	预应力	体外预应力相对损失超过5%	黄色报警	●	-	-	-
		体外预应力相对损失超过10%	红色报警	●	-	-	-
	索夹滑移	索夹出现滑移	黄色报警	-	-	-	●
		索夹滑移严重或较多数量索夹出现滑移	红色报警	-	-	-	●
	螺栓紧固力	个别螺栓轻微松动	蓝色警示	●	●	●	●
		部分螺栓松动	黄色报警	●	●	●	●
		较多螺栓发生严重松动或存在脱落风险	红色报警	●	●	●	●
主梁涡振专项报警		10分钟振动加速度均方根值大于31.5 cm/s^2	蓝色警示	◐	-	●	●
		10分钟振动加速度均方根值大于50 cm/s^2	黄色报警	◐	-	●	●

		10分钟振动加速度均方根值大于80cm/s^2	红色报警	◐	-	●	●
监测数据分析	数据分析结果	数据分析结果显示桥梁局部状态有变化	蓝色警示	●	●	●	●
		数据分析结果显示桥梁整体状态有变化	黄色报警	●	●	●	●

◐特殊情况下需设置，此处主要针对大跨度钢桥。

*索力设计值：一般采用破断索力/设计安全系数。

条文说明

表中监测车辆总重或轴重、最大平均风速、最高温度、最低温度、最大温差和最大温度梯度、强/台风、地震、主梁挠度、索塔塔顶偏位、支座位移、索力、基础冲刷深度报警内容的报警阈值参考《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》（JT/T1037）的相关规定。表中裂缝限值参考了《公路桥涵养护规范》（JTG H11）的相关规定。表中锚碇位移限值参考了《公路悬索桥设计规范》（JTG/T D65-05）的相关规定。

桥梁涡振报警选取主梁竖向加速度均方根值作为报警指标，阈值取值的原则依据已有桥梁发生涡振的加速度 RMS 值统计规律以及 ISO2361舒适性标准制定。蓝色、黄色和红色报警阈值分别取为31.5 cm/s^2、50 cm/s^{2}和80 cm/s^{2}分别对应 ISO2631国际标准中的“稍有不舒适”、“比较不舒适”和“不舒适”的下限。

9.3 日常运营监测数据分析

9.3.1 桥梁日常运营监测数据分析应根据监测对象，按照环境、作用、结构响应和结构变化按需分析，每类数据分析应满足本节相关规定。

条文说明

桥梁监测系统监测的数据类型复杂多样，造成监测数据分析的标准化较为困难。因此，在本指南中建议按照监测对象的性质，将监测数据按照环境、作用、结构响应和结构变化进行划分，对每一类数据进行分析。同时还宜进行同一类、不同类监测数据的相关性分析、比对性分析和趋势性分析。这样便于实现监测数据分析的条理化和标准化，从监测数据中寻求和总结规律，发现并解决问题。

9.3.2 桥梁日常运营监测数据应进行统计分析，并宜符合下列规定：

1　监测数据统计分析宜包括最大值、最小值、平均值、分位值、均方差、累计值等

统计值；

2 监测数据统计分析的时间长度应根据监测变量的采集频率和监测数据变化特征确定，并宜符合下列规定：

1）采集频率大于1Hz的动态监测数据，宜采用10分钟、日、月、年为统计分析时间段；

2）温湿度、静应变、静位移等静态监测变量，宜采用日、月、年为统计分析时间段；

3）风荷载、车辆荷载、时变索力等动态监测变量，宜根据变化特征确定统计分析时长；

4）基础冲刷、腐蚀等非实时监测变量，宜根据变化特征确定统计分析时长；

3 对于不同技术状况评定等级的桥梁，数据量和数据类型存在差异，可采用不同的统计建模方法；

4 对于不同技术状况评定等级的桥梁，应调整数据分析的重点，三类、四类桥梁宜逐步增加耐久性能和使用性能的数据分析内容。

条文说明

由于桥梁监测变量种类众多且监测变量的动态特性相差很大。例如，桥梁振动响应是变化很快的监测量，风荷载、车辆荷载、索力等动态监测变量变化较快，结构温湿度是变化较慢的监测量。因此，监测数据的统计分析时间段长短选择应根据监测变量的动态特性、变化特征和采样频率确定。

9.3.3 环境监测数据分析需符合下列规定：

1 温度监测数据分析应包括最高温度、最低温度和温度场；

2 湿度监测数据分析宜包括最大值、平均值、超限持续时间和湿度场等；

3 宜联合统计分析温度和湿度，评估对桥梁结构耐久性影响。

条文说明

温度监测数据分析主要集中于温度极值和温度梯度的极值。高温高湿将影响桥梁的耐久性，所以温度和湿度监测数据量宜共同分析。

9.3.4 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应符合下列规定：

1) 分析内容包括车流量、轴重、车重、标准车当量数的日、月、年最大值及其统计分布，以及超载车数量、车重、轴重和时间；

2) 将车辆荷载统计数据转化为疲劳荷载谱，用于桥梁疲劳损伤评估；

3) 结合动态称重系统所监测的车重和挠度数据，计算荷载校验系数；

条文说明

根据车辆荷载监测系统获得过桥车流量、车型、轴重、总重和速度等信息，从中提取出上述车辆荷载参数的日、月、年最大值及其统计分析值。由于超载车辆对于桥梁安全影响大，应特别关注超载车辆的数量以及车重等荷载信息进行分析。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，进行桥梁疲劳评估。

在车辆荷载识别、挠度监测数据精度足够的情况下，可选取典型时段内较重的车辆典型截面的结构挠度校验系数作为评价指标，可通过对校验系数的长期趋势性分析评价结构刚度的变化情况。

2 风参数监测数据分析宜包括十分钟平均风速和风向、风攻角、脉动风速及脉动风速谱、湍流强度、阵风因子等，并宜给出风玫瑰图；

3 地震监测数据分析宜包括下列内容：

1) 桥岸地表加速度的峰值、持续时间、反应谱；

2) 承台顶或桥墩底部加速度的峰值、持续时间、反应谱。

4 结构构件温湿度分析宜包括下列内容：

1) 桥面铺装层、主缆等结构构件温度最大值、最小值和最大梯度；

2) 锚室、鞍罩等易发生腐蚀部位湿度的最大值和持续时间。

9.3.5 结构响应监测数据分析需符合下列规定：

1 响应监测数据分析应包括桥梁变形、位移、转角、加速度、应变等响应监测数据

分析等；

2 位移数据分析应包括平均值和绝对最大值；对于结构静力位移和变形，应进行趋势变化分析；

3 转角数据分析应包括最大值和最小值；

4 索力时程数据分析应包括平均值、最大值、最小值等；应对监测索力与成桥索力、设计容许索力、破断索力以及定期检测索力进行对比分析；宜根据索的应力幅值计算疲劳损伤指数，宜结合腐蚀检测数据进行拉索状态评估；宜利用斜拉桥上下游成对拉索索力相关性，评估拉索状态；

5 锚跨张力数据应分析其最大值、累积变化值、变化趋势；

6 支座反力时程数据分析宜包括平均值、最大值、最小值、变化量等；

7 加速度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，宜进行结构振动与风速风向的相关性分析；

8 利用加速度监测数据，按照下列规定进行桥梁模态参数分析；

1） 桥梁模态参数应包括结构频率和振型，可包括阻尼比；

2） 桥梁模态参数识别应选用成熟可靠的模态识别方法；

3） 宜分析桥梁频率和振型识别结果与桥梁温度和风速等环境变量的相关关系；

4） 应分析桥梁模态参数随服役时间的变化规律；

9 应变时程数据分析应包括平均值、最大值、最小值、应力幅最大值和循环次数等；并宜采用雨流法和 Miner 准则计算构件疲劳累积损伤指数；疲劳分析宜考虑初始缺陷、初始残余应力以及腐蚀等对疲劳的影响；对于不出现拉应力的结构构件可不进行疲劳分析；

10 可采用机器学习和深度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特征变量，用于桥梁状态评估。

条文说明

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计

位移，宜进行梁端位移、支座位移与温度和车辆荷载相关性分析。宜分析锚碇位移的最大值和累计值等。分析加速度，包括绝对最大值和最大均方根值，宜进行结构振动与风速风向及车辆荷载的相关性分析。应变时程数据分析，包括平均值、最大值、最小值、应力幅最大值等，钢箱梁等钢结构宜根据雨流计数法和 Miner 线性损伤理论计算疲劳损伤指数。

公路钢结构桥梁承受汽车荷载作用，结构构件与连接的正应力和剪应力均不是固定值，在监测到钢结构桥梁结构构件与连接的疲劳应力谱后，需要利用“雨流计数法”按应力幅进行划分，并统计分析相应应力幅对应的循环次数，按照 Miner 线性累积损伤原理计算疲劳累积损伤指数。累积损伤指数。疲劳累积损伤指数可按照以下公式计算：

$$D=\sum_{i=1}^{N}\frac{n_i}{N_i} \tag{9.3.6}$$

式中： N_i ——是构件第 i 个应力幅所对应的疲劳极限循环次数；

n_i ——是构件监测的第 i 个应力幅所对应的疲劳循环次数。

在结构疲劳分析中，初始缺陷、初始残余应力以及腐蚀状态都会对结构疲劳寿命产生影响，因此在进行结构疲劳分析时，应对上述影响因素进行考虑。

9.3.6 结构变化监测数据分析需符合下列规定：

1 结构变化监测数据分析应包括基础冲刷、锚碇位移、裂缝、腐蚀、索力、支座反力、索夹螺栓紧固力、高强螺栓紧固力、索夹滑移等数据分析。应结合检测数据进行综合分析，并宜进行趋势项提取和分离；

2 主缆锚碇位移、拱脚偏位分析，宜包括位移最大值和累积值；

3 桥墩冲刷监测数据分析宜包括冲刷深度最大值及其变化规律，可包括各等级流速和流向统计值、冲刷深度与流速的相关性；

4 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、裂缝总数量及其变化规律，宜分析裂缝与重车荷载的相关性；

5 腐蚀数据分析宜包括腐蚀程度、腐蚀进程、氯离子浓度及其在构件内的浓度梯度；

6 索夹螺栓紧固力和索夹滑移数据应分析其平均值、最大值、最小值和累积变化值。

9.3.7 监测数据相关性分析需符合下列规定：

1 相关性分析内容宜包括不同类型监测变量相关性分析（主梁位移与风速、主梁挠度与温度、主梁挠度和索力等），以及同类型监测变量相关性分析（拉索索力、截面应变、索塔位移、支座位移等）；

2 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，也可采用机器学习和深度学习等人工智能方法；

3 宜根据相关性分析结果，判断桥梁状态是否发生变化。

9.3.8 桥梁日常运营状态的监测数据应进行定期分析，评估桥梁运行状态，并应形成桥梁日常运营状态监测数据分析报告，宜采用季报、半年报和年报的形式。

条文说明

监测数据应定期分析，并按照本指南相关要求编写监测数据分析报告，用于桥梁监管养护部门及时了解桥梁运行状况，为桥梁养护决策提供支持。

9.3.9 监测数据分析报告内容需包含下列内容：

1 季报的数据分析内容宜包括：监测变量的季度内统计分析及其超越监测系统报警值的数量、比例、位置和时间，监测变量的季度内变化趋势，模态参数分析，相关性分析；

2 年报的数据分析内容宜包括：监测变量的年内统计分析及其超越监测系统报警值的数量、比例、位置和时间，监测变量的年内变化趋势，模态参数分析，相关性分析，疲劳分析等。

条文说明

监测数据分析报告除了分析超越报警值的传感器数量、比例、位置和时间，还需要利用长时间监测数据分析监测变量的变化趋势，以及监测变量之间的相关关系。同时，将利用监测的振动信息，分析桥梁结构的频率、振型和阻尼比等模态参数。年度分析报告时间跨度更长，可以反映桥梁在一年不同气候条件下的运行状态。由于应变、位移、振动等多种监测变量都与桥梁所处温度、湿度和风速等自然环境因素有关，可以通过对一年内的数据分析上述监测变量随温度的变化趋势，揭示这些监测变量与自然环境因素的相关关系。通过分析一年内结构模态参数的变化，可以反映结构的模态参数与桥梁温度、湿度等环境

因素之间的关系。此外，利用长时间的结构应变监测数据，可以采用疲劳损伤指数分析结构构件的累积疲劳损伤。

9.4 突发事件监测数据分析

9.4.1 当大跨度悬索桥、斜拉桥遭受桥面10分钟平均横桥向风速大于0.8倍（新建和一类、二类桥梁）、0.75倍（三类桥梁）、0.7倍（四类桥梁）桥面设计风速的台风时，应进行桥梁结构静力和动力响应专项分析，分析内容需包括：

1 宜计算统计10分钟时距的平均风速、平均风向角，可计算分析平均风攻角、湍流强度、阵风因子和脉动风功率谱等风参数及其随时间的变化趋势；

2 应计算统计10分钟时主梁振动加速度和位移均方根值、振动频率和振型特征，并可分析与风参数的相关性；

3 宜计算分析在强风作用下10分钟时距的主梁变形、塔顶偏位、主缆偏位、索力等的最大值、最小值、变化幅值及其随时间和风速的变化趋势；

4 当在强风作用下桥梁频率参数发生3%以上或者振型 MAC 值发生5%以上变化或者主梁应力、主梁水平变形、塔顶偏位、主缆偏位、索力等超过设计值，应对桥梁进行专项检查。

条文说明

当空气绕过桥梁主梁结构时，在其表面产生风压，进而形成风荷载。大跨度桥梁由于结构较柔和阻尼较小，风荷载是其结构安全的控制荷载之一。风荷载包括静风荷载和动力荷载。在强台风作用下，桥梁产生显著的静力变形和动力响应。因此监测数据的分析主要针对自由场风场参数、桥梁变形和振动特征进行。

9.4.2 宜对悬索桥、斜拉桥、钢结构梁桥是否发生涡振进行判断；当发生涡振时且10分钟加速度均方根值大于31.5 cm/s^2且振动时间持续30分钟，应进行主梁涡振特性专项分析，分析内容宜包括：

1 首先进行涡振判定。宜采用加速度均方根值和振动能量比特征（第 1 主频与第 2 主频比值）双参数作为判定涡振的指标。

2　计算分析10分钟主梁加速度和位移均方根值、振动频率、振型和持时特征；计算分析涡振发生全过程中10分钟时距平均风速、风向、风攻角；对涡振和风参数进行相关性分析，获得现场桥梁涡振发生的风况条件，进行试点桥梁涡振专项研究；

3　根据主梁振动的10分钟加速度均方根值、频率、振型和持时评价行车舒适度；

4　当主梁发生10分钟加速度均方根值大于80 cm/s^{2}剧烈振动，分析涡振前后主梁模态参数特征以及连接构件状态特征，若桥梁结构状态发生变化，应对桥梁进行专项检查。

条文说明

当气流绕过桥梁主梁时，在主梁周围产生旋涡脱落（周期性的旋涡脱落，产生周期性的脉动力），当旋涡脱落频率与主梁某阶固有频率相近时，主梁将发生一种类似共振的大幅振动，称为涡振。涡振虽然是一种限幅的振动，但频繁和大幅的涡振将影响行车安全和容易对桥梁连接构件产生疲劳损伤，因此大跨度桥桥梁主梁涡振动专项分析十分必要。分析的主要内容应包括风场参数、振动特征及其相关性分析。

9.4.3 当桥梁拉（吊）索发生加速度均方根值大于300 cm/s^{2}大幅度振动且振动时间持续30分钟，应进行拉（吊）索异常振动专项分析，分析内容宜包括：

1　计算分析拉（吊）索异常振动加速度和位移10分钟时距均方根值、振动频率、振型和持时特征；

2　计算分析拉（吊）索异常振动发生全过程中10分钟时距平均风速、风偏角、风攻角和降雨量、主梁的振动和模态参数特征；

3　对拉（吊）索异常振动和风雨参数、主梁振动特征进行相关性分析，获得索结构的振动类型；

4　分析拉（吊）索异常振动频率、阻尼和索力变化特征，评估拉（吊）索锚固结构和阻尼器的安全和工作状态。

条文说明

桥梁拉（吊）索的大幅异常振动包括：斜拉索风雨振、驰振、高阶模态涡激振动、索塔尾流致振动和参数共振等。

9.4.4 当自由场水平地震动加速度峰值大于设计 E1地震作用（小震）加速度峰值时，应按下列规定进行桥梁震中监测数据分析、震前和震后监测数据对比分析。

1 震中监测数据分析包括：对桥址附近自由场地面加速度的峰值、均方根值、反应谱反应进行分析；对桥墩处加速度的峰值、均方根值、反应谱、频域反应进行分析；对桥梁上部结构的加速度响应、变形和位移响应等整体响应的峰值、均方根值进行分析；对桥梁关键部位的监测应变响应、支座反力、支座位移、索力等局部响应的峰值反应进行分析；

2 震前与震后监测数据对比分析包括：应对桥梁震前和震后的频率、振型和阻尼比进行对比分析；对桥梁上部结构、下部结构、支座位移等的震前和震后的静态位移和倾角响应进行分析，计算桥梁整体响应的残余变形；对桥梁主要构件震前和震后的应变平均响应值进行分析，确定构件的残余应变；对桥梁缆索构件震前和震后的索力值进行分析；

3 根据桥梁震前、震中和震后监测数据的分析结果发现桥梁状态发生变化，应对桥梁进行专项检查。

条文说明

桥梁在地震灾害下的监测数据分析与评估，主要分为震中数据分析评估与震前和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（例如：缆索）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，地震动输入时应考虑地震动行波效应。

9.4.5 车辆超载分析应符合下列规定：

1 当车辆荷载超过设计值时，应对监测数据进行直接分析并与设计值对比；宜利用修正的结构模型，进行桥梁在超载车荷载作用下的主梁挠度、支座反力、构件内

力/应力等验算；

2 当超载车辆过桥时，宜将监测的桥梁变形、支座反力、构件内力等响应与本条第一款中计算数值进行比较；当监测数值与计算数值存在较大差异时，宜对桥梁进行进一步检测。

条文说明

依据《公路桥涵养护规范》(JTG H11)和《城市桥梁养护技术标准》(CJJ 99)的相关规定，超重车辆通过桥梁时应监测桥梁的位移、变形和裂缝扩张等，并及时反馈悬索桥管养单位。超重车过桥时，应对桥梁挠度、关键构件内力、关键部位应变监测数据进行分析，并与理论计算值进行比较。当监测值明显大于理论计算值时，预示桥梁可能发生了损伤，提醒桥梁养护部门进行检查。

9.4.6 当桥梁遭受漂浮物或船舶撞后，需按下列规定进行监测数据分析：

1 应对视频数据分析，确定桥梁被漂浮物或船舶撞击的时间和位置；

2 应分析靠近漂浮物或船舶处桥墩底部、主梁、索塔顶部船舶撞击后20s内的加速度响应绝对最大值、均方根值和频谱及加速度响应衰减规律；

3 应分析漂浮物或船舶撞击后20s内结构变形和位移等整体响应监测数据的绝对最大值、均方根值和频谱，宜分析支座反力、支座位移、应变和索力等结构局部响应监测数据的绝对最大值和均方根值；

4 宜选择漂浮物或船舶撞击前后加速度监测数据进行模态分析；

5 当桥梁模态参数在船撞前后发生明显变化，或者船撞后桥梁结构关键构件/部位的位移和应变响应出现明显残余量时，应通知桥梁养管单位进行检查。

条文说明

船撞可以造成桥梁局部的严重损伤。船撞的监测数据分析集中于桥梁在船撞过程中的极值响应，判断其是否超超过限值。此外，还需要分析船撞前后的桥梁模态参数（频率和阻尼）以及桥梁关键构件/部位的位移和应变响应，当桥梁模态参数（主要是频率）发生明显变化，或者关键构件/部位由于船撞出现明显的残余位移和应变时，预示桥梁发生结构损伤，应及时通知桥梁养护部分进行结构检测。

9.4.7 当桥梁遭遇洪水时和洪水后，宜分析洪水期间桥墩冲刷深度变化量及变化速率；当桥梁冲刷深度达到0.7倍设计值且变化速率较快时，宜建议及时采取桥梁封闭或限行措施。

9.4.8 当桥梁遭遇滑坡、泥石流、海啸、火灾、山洪等突发事件，宜根据具体情况分专业分项目进行专项评估。

9.5 状态评估

9.5.1 应根据桥梁日常运营监测数据分析和突发事件监测数据分析结果，研判桥梁使用功能，评估桥梁状态。

9.5.2 桥梁状态评估即可基于监测数据分析，也可采用精确结构力学模型的桥梁状态评估方法，评估桥梁健康度。

9.5.3 桥梁健康度分为结构整体健康度和结构构件健康度。

条文说明

桥梁构件的类别可参照《公路桥梁技术状况评定标准》（JTG/T H21）相关规定。

9.5.4 基于监测数据的桥梁健康度评估，宜符合下列规定：

1 根据监测内容，反映桥梁状态的参数分为结构响应参数和结构变化参数，以表征结构整体健康度或结构构件健康度。结构响应参数和结构变化参数的划分应符合第4.2.1~4.5.1条要求；

2 基于报警情况对结构响应参数和结构变化参数进行异常程度分级，根据异常程度分级结果对结构构件健康度和结构整体健康度进行评估。

3 结构构件健康度和结构整体健康度等级划分为 I 基本完好、II 轻微异常、III 中等异常、IV 严重异常四级；

9.5.5 结构构件健康度评估结果为 III 中等异常或 IV 严重异常的，宜通过结构计算分析其对结构整体健康度的影响，并根据分析结果修正结构整体健康度。

9.5.6 结构响应参数的异常程度分级宜分为一、二、三级，分级标准宜按照表9.5.6执行。

表9.5.6 结构响应参数的异常程度分级标准

结构响应参数	异常程度等级			表征属性
	一级	二级	三级	

主梁挠度	–	出现黄色报警	出现红色报警	结构整体健康度
索塔塔顶偏位	–	出现黄色报警	出现红色报警	
主缆偏位	–	出现黄色报警	出现红色报警	
支座位移	–	出现黄色报警	出现红色报警	
主梁振动加速度	–	出现蓝色警示	出现黄色报警或红色报警	
梁端纵向位移	–	出现黄色报警	出现红色报警	结构构件健康度
索力	–	出现黄色报警	出现红色报警	
锚跨索股力	–	出现黄色报警	出现红色报警	
索振动加速度	出现蓝色警示	出现黄色报警	长时间或多次出现黄色报警	

9.5.7 结构变化参数的异常程度分级宜分为一、二、三级，分级标准宜按照表9.5.7执行。

表9.5.7 结构变化参数的异常程度分级标准

结构变化参数	异常程度等级			表征属性
	一级	二级	三级	
锚碇位移	–	出现黄色报警	出现红色报警	结构整体健康度
拱脚偏位	–	出现黄色报警	出现红色报警	
基础冲刷深度	–	出现黄色报警	出现红色报警	结构构件健康度
裂缝	–	出现黄色报警	出现红色报警	
预应力	–	出现黄色报警	出现红色报警	
索夹滑移	–	出现黄色报警	出现红色报警	
螺栓紧固力	出现蓝色警示	出现黄色报警	出现红色报警	

9.5.8 结构构件健康度等级划分，按照表9.5.8执行。

表9.5.8 结构构件健康度等级划分

健康度等级	评定依据
I 基本完好	表征结构构件健康度的结构响应参数和结构变化参数异常程度全部为一级或无异常
II 轻微异常	表征结构构件健康度的结构响应参数和结构变化参数异常程度仅有一项为二级、无三级

III 中等异常	表征结构构件健康度的结构响应参数和结构变化参数异常程度出现多项二级或一项三级
IV 严重异常	表征结构构件健康度的结构响应参数和结构变化参数异常程度出现多项三级

9.5.9 结构整体健康度等级划分，按照表9.5.9执行。

表9.5.9 桥梁整体健康度等级划分

健康度等级	评定依据
I 基本完好	表征结构整体健康度的结构响应参数和结构变化参数异常程度全部为一级或无异常
II 轻微异常	表征结构整体健康度的结构响应参数和结构变化参数异常程度仅有一项为二级、无三级
III 中等异常	表征结构整体健康度的结构响应参数和结构变化参数异常程度出现多项二级或一项三级
IV 严重异常	表征结构整体健康度的结构响应参数和结构变化参数异常程度出现多项三级

9.6 对策措施

9.6.1 当监测系统报警时，应根据监测数据的报警类型、报警位置和报警级别，评估其对于桥梁安全影响，确定相应的处置措施。

9.6.2 当日常运营监测数据分析结果显示桥梁状态出现异常时，应深入分析异常监测数据原因，评估其对桥梁安全影响，并按下列规定确定相应的处置措施：

1 当监测数据提示桥梁所处温湿度等环境条件不利于桥梁结构构件耐久性时，应提醒桥梁管理部门加强巡检；

2 当监测数据提示主梁、拉索、支座等关键结构构件应力或内力出现超过设计值的异常时，应要求桥梁管理部门安排专业工程师对相应构件进行检测；

3 当监测数据提示桥梁主梁挠度、塔顶偏位等整体变形指标出现异常时或者桥梁模态参数发生显著变化时，应进行桥梁整体模型分析，确定桥梁异常的原因。

9.6.3 当发生台风、桥梁涡振等突发事件影响行车安全时，应及时提醒桥梁管理部门根据实际情况采取限速限流乃至封桥等措施。

9.6.4 当突发事件监测数据分析结果显示桥梁状态异常，但无法确定导致桥梁损伤状态时，应建议桥梁管理部门派遣专业人员对桥梁进行全面检测，或者进行荷载试验评估桥梁剩余承载力。

9.6.5 当构件健康度为 III 中等异常或 IV 严重异常的，桥梁管理部门应进行相应构件的专项检查和处治；整体健康度为III中等异常或IV严重异常时，桥梁管理部门应进行全面检测、评估、处治。

附表

各监测内容对应的监测目的目标、测点布设及监测方法一览表

监测类别	监测内容	监测目的、目标	测点布设	监测方法
环境	桥址区环境温湿度	获取桥址区基础环境参数	宜布设在桥梁跨中位置，可根据桥梁跨径、长度增设测点。	宜选用电阻温度计、数字温度计和光纤温度计；工业级湿度传感器
	构件封闭空间内部温湿度	掌握桥梁内部空间温度，用于各类温度相关性分析；掌握桥梁内部空间湿度分布，辅助指导进行针对性的除湿等养护维修工作。	闭口截面箱梁内部、索塔内部、锚室、索鞍内部、拱肋内部等封闭空间，应布设环境温度和湿度测点。	宜选用电阻温度计、数字温度计和光纤温度计；工业级湿度传感器
	雨量	掌握桥址区降雨情况，用于斜拉桥拉索风雨激振的分析。	布设于斜拉桥主跨跨中。	翻斗式雨量计
作用	车辆荷载	车辆荷载为桥梁运营期承担的主要活荷载，且超载车辆是造成桥梁主要构件及附属设施等破坏、影响构件寿命的主要因素。 通过对各车道车流量、车重、轴重、车速等参数的监测，实现对超载车辆的在线报警；为桥梁校验系数分析及钢结构疲劳分析提供输入数据。	测点应覆盖所有行车道，且宜选择在路基或有稳定支撑的结构铺装层内。	宜选用动态称重系统

	风荷载	风荷载是大跨度桥梁的主要荷载之一。通过对风速风向等风参数的监测，为各类构件（主梁、拉索、吊索等）的风致振动评估提供数据，各类风场参数同时也是识别涡振等风致振动的关键参数。	应选择在桥面上、下游两侧、塔顶、拱顶位置，安装位置应能监测自由场风速和风向。	宜选用超声风速仪或机械式风速仪
	结构温度	结构温度本身是一种重要的可变作用，结构温度的实测数据是结构分析的重要输入参数。结构温度还可用于主梁纵向位移、主梁挠度相关性分析。通过温度监测数据，可用于温度修正和温度梯度的获取。桥面铺装层温度数据可用于指导铺装层的日常养护。	应在关键混凝土或钢结构构件上布设温度测点；宜在主梁铺装层布设温度测点；结构温度测点布置宜与应变监测的温度补偿测点统一设计。	宜选用电阻温度计、数字温度计和光纤温度计
	船舶撞击	通航桥梁存在船撞风险，通过加速度监测和视频监控，可以记录船撞发生时的结构响应，为船撞事件应急管理、结构灾后评估提供依据。	船舶撞击测点宜布设在船撞危险区的主梁、桥墩底部或者承台顶部。	力平衡式三向加速度传感器；视频监控
	地震	通过监测地震事件，纪录时程全过程数据，为报警、结构整体和局部的计算分析及灾后评估提供输入计算依据；为地震事件应急管理、结构灾后评估提供依据。	地震动测点应布设于索塔桥墩底部或承台顶部、可布设于桥梁两岸的自由场地。	力平衡式三向加速度传感器

结构响应	位移	大桥的空间几何变形，包括主梁下挠、主梁横向位移、梁端纵向位移、索塔偏位等是评判结构安全、整体稳定性、反映结构刚度的重要参数，其中部分参数也是反映行车舒适性和进行桥梁适用性评价的直接指标。	结构整体位移测点布设，应选择变形、位移极值点位置。 主梁挠度测点布设，根据跨径布置，应不少于主跨四分点处，边跨不少于跨中处；对于宽幅桥面、中央索面或其他具有扭转监测需求的主梁，应在同一断面左右幅外侧位置布设测点。 支座位移、主梁梁端纵向位移测点宜布设在梁端支座处。 高墩桥梁或纵坡较大的桥梁墩顶纵桥向和横桥向偏位测点宜设置在桥墩顶部。	可选用位移计、连通管系统、全球导航卫星系统和倾角传感器等
	转角	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。	倾角测点布设，应选择倾角极值点位置。	倾角传感器

	应变	通过应变监测数据可以确定关键截面的应力状态，可用于判断测试位置应力是否处于安全水平，也是评价钢结构疲劳的关键指标。	关键构件截面应变测点位置和数量应根据结构计算分析选择受力较大或影响结构整体安全的关键截面和部位；主梁顶板应变监测点，应布置在重车道或行车道车轮轮迹线对应位置；正交异性钢桥面板应变监测点宜布设在顶板、U 肋和横隔板等局部应变较大处；受力复杂的截面和部位，宜布设三向应变测点。 混合梁的钢混接合面处应布设应变测点，应布设在应变较大和应力集中处。	可选用电阻应变传感器、振弦式应变传感器和光纤光栅应变传感器
	索力	拉索/吊索是缆索体系桥梁的核心受力构件，拉索/吊索索力以及振动幅值的变化直接反映桥梁结构受力状态的变化，关系拉索/吊索的使用寿命以及整座大桥的安全。	应根据吊索/拉索的布置形式、规格型号、索力、应力幅值等因素，确定索力及振动监测的吊索/拉索，宜对上、下游对称吊索/拉索成对布设测点；应根据主缆索股布置形式，确定锚跨张力监测的索股，基准索股应布设测点；应对系杆拱桥的系杆索力进行监测。	可选用加速度传感器（频率法）、力传感器、光纤光栅智能索力传感器等
	支座反力	支座反力可以反应上部结构在荷载作用下的整体稳定性，也可反应支座脱空、变形等局部病害。	宜根据支座类型、构造、安装方式确定布设位置。	宜选用测力支座

	振动	振动监测可以计算出桥梁动力特性。桥梁动力特性（频率、振型、阻尼）是反映桥梁整体性能退化的关键参数。桥梁自振频率的降低、桥梁局部振型的改变可能预示着结构的刚度降低和局部破坏，或约束条件的改变。桥梁的振动水平反映桥梁的安全运营状态和行车舒适度。振动监测还可用于主梁涡振、拉索/吊索涡振及风雨激振等异常振动的识别。	主梁横桥向和竖向振动测点应根据主梁振动振型确定，宜布设在振型峰值点处，测点位置应至少包括主跨跨中和四分点处。索塔水平双向的振动测点应根据成桥状态索塔振动的振型确定。	三向、双向和单向加速度传感器
结构变化	基础冲刷	冲刷使得桥梁基础埋深减小，以致桩基承载能力显著下降，严重影响桥梁安全。对基础冲刷的监测可以及时了解冲刷深度，用于评估桥梁整体安全状态。	宜根据基础冲刷风险分析和专项评估确定桥墩测点位置。	可选用声纳传感器
	变形	变形包括锚碇位移和拱脚偏位，其变形有严格限制，反映悬索桥和拱桥整体稳定性。	锚碇位移测点应利用沉降变形观测点，布设于锚体和前支墩角点；拱脚偏位测点应布设于拱的端部。	可选用位移计、连通管系统、全球导航卫星系统等
	裂缝	通过跟踪监测裂缝长度、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。	技术状况为一类和二类的桥梁，宜选择代表性混凝土结构裂缝、钢结构裂缝进行监测，技术状况为三类和四类的桥梁，应选择代表性混凝土结构裂缝、钢结构裂缝进行监测。	可选用电阻应变传感器、振弦式应变传感器和光纤光栅应变传感器

	腐蚀	混凝土腐蚀影响结构耐久性。通过腐蚀监测可以得到监测部位的混凝土氯离子浓度、侵蚀深度，用于评价结构的耐久性。	凝土腐蚀监测位置宜布设在墩台水位变动、浪溅区、大气区和钢筋混凝土梁受拉区的保护层内，测点位置、数量根据氯离子浓度梯度测试要求确定。	可选用沿混凝土保护层深度安装多电极电化学传感器
	体外预应力	预应力损失是大跨度梁桥长期下挠、整体性能退化的重要原因，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。	测点位置和监测数量宜依据结构受力特点和预应力布设形式确定。	可选用加速度传感器（频率法）、力传感器、光纤光栅智能索力传感器等
	断丝	主缆、拉索/吊索发生断丝，是直接的结构损伤，断丝监测用于结构安全评估。	构件技术状况评定为3类或4类的索体可布设断丝测点，索体断丝测点宜布设在索体锚头端部位置。	可选用声发射传感器
	螺栓紧固力、索夹滑移	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。	技术状况为三类和四类的悬索桥宜布设索夹滑移和索夹螺栓紧固力测点，索夹滑移及索夹螺栓紧固力监测应根据索夹类型、索夹倾角以及螺栓布置型式确定需监测的索夹和螺栓。高强螺栓紧固力测点位置和数据宜根据实际检测结果和病害情况确定。	可选用位移计、力传感器等

本指南用词用语说明

1 本指南执行严格程度的用词，采用下列写法：

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）表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

1）在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本指南的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定”；

2）在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》（×××）的有关规定”；

3）当引用本标准中的其他规定时，表述为“应符合本指南第×章的有关规定”、“应符合本指南第×.×节的有关规定”、“应符合本指南第×.×.×条的有关规定”或“应按本指南第×.×.×条的有关规定执行”。

附录 A 监测设备的技术要求

监测设备选型可根据实际情况按表 A-1至 A-14的要求执行。

表 A-1 动态称重系统的技术要求

项目	技术要求
整车称重误差	≤15%
荷载能力（单轴）	≥15吨
过载能力（单轴）	≥200%
车速范围	15~200km/h
车速误差	≤±2km/h
车流量统计准确性	≥95%

表 A-2 超声风速仪的技术要求

项目	技术要求
测量参数	三个正交方向的风速和风向
风速	测量范围：0~40 m/s（台风区为0~65 m/s） 分辨力≤0.1m/s
风向	水平测量范围：0~360º 俯仰测量范围：-60º~+60º 分辨力≤0.1º 误差≤±2º（1-30m/s），±5º（30-40m/s）
采样频率	≥20Hz

表 A-3 机械式风速仪的技术要求

项目	技术要求
测量参数	水平风速、风向
风速	测量范围：0~100m/s 误差≤±0.3m/s
风向	测量范围：0~360^0 误差≤±3^0
采样频率	≥10Hz

表 A-4 三向加速度传感器的技术要求

项目	技术要求

测量范围	-2g~+2g（XYZ 三个方向，可定制）
误差	≤1%
灵敏度	≥2.5V/g（可定制）
横向灵敏度比	≤1%
频率响应	0~80Hz
动态范围	≥120dB

表 A-5 温湿度仪的技术要求

项目	技术要求
测量范围（相对湿度）	0~100%RH
测量范围（相对湿度）	≤±2% RH （在20℃条件下）
测量范围（温度）	-40℃~+60℃
误差（温度）	≤±0.5℃

表 A-6 雨量计的技术要求

项目	技术要求
分辨力	≤0.1mm
误差	≤2%（降雨强度≤25mm/h） ≤3%（25mm/h＜降雨强度≤50mm/h）

表 A-7 加速度传感器的技术要求

项目	技术要求
测量范围	-2g~+2g（可定制）
分辨力	≤1*ug*
误差	≤1%
灵敏度	≥2.5V/g（可定制）
横向灵敏度比	≤1%
频率响应	0~120 Hz
动态范围	≥120dB

表 A-8 GNSS 接收机的技术要求

项目	技术要求
动态测量误差	水平方向：≤10mm+1ppm
	垂直方向：≤20mm+1ppm
静态测量误差	水平方向：≤3mm+0.5ppm
	垂直方向：≤5mm+0.5ppm
采样频率	≥10Hz

表 A-9 压力变送器的技术要求

项 目	技术要求
测量范围	0~6m 水柱（可定制）
误差	≤0.1%
过压影响	≤0.025% FSR/16MPa
稳定性	≤0.1% FSR/60个月

表 A-10 静力水准仪的技术要求

项 目	技术要求
测量范围	0~150mm（可定制）
分辨力	≤0.025%
误差	≤0.1%

表 A-11 应变计的技术要求

项目	技术要求
测量范围	-1500 με~+1500 με
分辨力	≤0.5 μ ε
误差	≤±2με

表 A-12 加速度传感器（频率法）的技术要求

项目	技术要求
测量范围	-2g~+2g（可定制）
误差	≤1%
灵敏度	≥2.5V/g（可定制）
频响范围	0~100 Hz

动态范围	≥70dB

表 A-13 数据采集设备的技术要求

项目	技术要求
测量范围	-10V~+10V（可定制）
分辨力	24位 AD
误差	≤0.01%
采样频率	≥100Hz（可定制）
时间同步	IEEE1588、卫星授时系统等
共模干扰	120dB

表 A-14 光纤光栅解调仪的技术要求

项目	技术要求
测量范围（波长）	1525～1565nm（可定制）
分辨力	≤0.1pm
误差	≤1pm
动态范围	≥50dB
采样频率	≥100Hz（可定制）

附录 B 桥梁监测系统数据字典定义

公路桥梁结构健康监测系统在设计时对于桥梁基本信息、监测项监测点属性信息、实时监测数据等重要数据进行必要的数据字典规范定义，具体定义见下表 A-1至 A-11，各建设单位可参照执行。

表 B-1 桥梁基本信息表（BridgeBasicInfo）

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

表 B-2 监测项基本信息表（MonitorTypeBasicInfo）

字段名称	数据类型	字段含义
ID	字符型	监测项唯一标识
监测项名称	字符型	本指南中规定的监测项全称

字段名称	数据类型	字段含义
监测项简称	字符型	三位大写字母，见附表 B
所属类型	字符型	环境与荷载监测、结构整体响应、结构局部响应
监测目的	字符型	描述该监测项主要监测部位和目的
传感器类型	字符型	使用的传感器类型
监测点数量	整型	本监测项测点数量
备注	字符型	

表 B-3 监测点基本信息表(MonitorPointBasicInfo)

字段名称	数据类型	字段含义
ID	字符型	监测点唯一标识
监测点名称	字符型	
所属监测项 ID	字符型	
通道编码	整型	该监测点通道编码，为整型数字，用于实时监测数据传输报文
传感器位置	字符型	传感器安装位置描述
数据单位	字符型	输出数据单位
数据精度	浮点型	数据保留小数点精度
红色报警阈值上限	浮点型	红色报警阈值上限
红色报警阈值下限	浮点型	红色报警阈值下限
黄色报警阈值上限	浮点型	黄色报警阈值上限
黄色报警阈值下限	浮点型	黄色报警阈值下限
蓝色警示阈值上限	浮点型	蓝色警示阈值上限
蓝色警示阈值下限	浮点型	蓝色警示阈值下限
是否启动报警	布尔型	是否启动超限报警功能
备注	字符型	

表 B-4 传感器基本信息表

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

字段名称	数据类型	字段含义
		维修,4:更换

表 B-5 实时监测数据表(RealTimeMonitorData)

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

表 B-6 特征值统计数据表(StatisticData)

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

表 B-7 车辆荷载监测数据表(VehicleMonitorData)

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

表 B-8 视频监控属性信息表(VedioAttributeInfo)

字段名称	数据类型	字段含义
ID	字符型	
视频编号	字符型	对应摄像头的名称

字段名称	数据类型	字段含义
桥梁 id	字符型	摄像头所属桥梁 id
IP 地址	字符型	对应摄像头的访问地址
端口	字符型	通过端口和 ip 访问摄像头
登陆用户名	字符型	摄像头登录页面用户名
登陆密码	字符型	用户名对应的密码
状态	整型	根据状态判断摄像头是否在工作
备注	字符型	

表 B-9 超限报警信息表(AlarmInfo)

字段名称	数据类型	字段含义
ID	字符型	
监测点 ID	字符型	该条报警数据所属测点
报警级别	整型	报警级别（1：蓝色警示；2：黄色报警；3：红色报警）
当前超限值	双精度浮点型	按照实际精度保留小数
报警开始时间	日期时间型	开始出现报警的时间
报警结束时间	日期时间型	报警结束的时间
已关注/未关注状态	整型	报警记录的关注状态（0：未关注；1：已关注；）
备注	字符型	

表 B-10 特殊事件信息表(SpecialEventInfo)

字段名称	数据类型	字段含义
ID	字符型	
桥梁 ID	字符型	该特殊事件所对应的桥 id
名称	字符型	特殊事件的名称
特殊事件类型	字符型	特殊事件所属的事件类型（例如：强风；地震；洪水；车祸...）
特殊事件开始时间	日期时间型	特殊事件发生的时间
特殊事件结束时间	日期时间型	特殊事件结束的时间
事件描述	长文本型	对特殊事件进行一个简述
录入人	字符型	录入事件的人员名称
录入时间	日期时间型	录入事件的时间
处置状态	整型	(0：未处置；1：已处置；)
处置建议	长文本型	上级部门反馈给出的处置建议
备注	字符型	

表 B-11桥梁评估报告信息表(AssessmentReportInfo)

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

上传时间	日期时间型	用户上传报告的时间
备注	字符型	

附录 C 监测项基本信息定义

表 C-1 各监测类别基本信息定义表

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

			塔顶偏位		x 为顺桥向方向、y 为横桥向方向，z 为水平面向上法线方向。
			主缆偏位		x 为顺桥向方向、y 为横桥向方向，z 为水平面向上法线方向。
	转角	INC	塔顶截面倾角	度(°)	/
			梁端水平转角		
			梁端竖向转角		
	应变	RSG	主梁关键截面应变	微应变（μ ε）	负值为压应变，正值为拉应变
			索塔关键截面应变		
	索力	VIC	吊索索力	千牛(kN)	/
			锚跨索股力		
	支座反力	STF	支座反力	千牛(kN)	/
	振动	VIB	主梁竖向振动加速度	m/s^2	/
			主梁横向振动加速度		
			主梁纵向振动加速度		
			塔顶水平双向振动加速度		
			索振动加速度		
变化	基础冲刷	SCO	基础冲刷深度	毫米（mm）	/
	变形	AND	锚碇位移	毫米（mm）	/
	裂缝	CRK	混凝土结构裂缝	毫米（mm）	/
			钢结构裂缝		
	腐蚀	COR	墩身、承台混凝土氯离子浓度	kg/m^3	/
			墩身、承台混凝土侵蚀深度	毫米（mm）	/
	断丝	BRK	吊索、主缆断丝	/	/
	螺栓紧固力	BTF	索夹螺杆紧固力、高强螺栓紧固力	千牛(kN)	/
	索夹滑移	CSP	索夹滑移	毫米（mm）	/

附录 D 实时数据传输协议

D.1 通用报文协议编码

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



图 D.1 通用报文协议结构组成

具体协议数据格式见下表：

表 D.1 通用报文协议数据格式定义

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注
报文类型	0	报文类型	BYTE	02代表通用报文	
预留位	1	预留	BYTE	预留，默认为0	
	2	方向	BYTE	0：下行信息，1:上行信息	
	3	网络通讯计算机编号	BYTE	默认为0	
	4	命令码	BYTE	命令码=1	
消息长度	5	长度低	INT	报文长度用两个字节表示，低字节在前，高字节在后	报文长度为 N*4+9,即7个时间字节和2个对象码字节，每个数据值占4个字节，一共 N 对。
	6	长度高			
时间戳	7	年	BYTE	年+1900	实际的年需要加上1900
	8	月	BYTE	月	
	9	日	BYTE	日	
	10	时	BYTE	时	
	11	分	BYTE	分	
	12	毫秒低	INT	毫秒用两个字节表示，低字节在前，高字节在后	用毫秒数除以1000得到的值就是秒数，余数就是毫秒数。
	13	毫秒高			
传感器通道	14	对象码低	INT	对象码用两个字节表示，低字节在前，高字节在后	对象码就是数据通道号，为1-32767的整数
	15	对象码高			

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注
传感器数据	16	数据值低	FLOAT	数据值用四个字节表示，此字节为低字节	从字节16开始，依次每四个字节表示一个数据值，一共 N 个。
	17	数据值		数据值用四个字节表示，此字节为次低字节	
	18	数据值		数据值用四个字节表示，此字节为次高字节	
	19	数据值高		数据值用四个字节表示，此字节为高字节	

D.2 GNSS 报文协议编码

GNSS 报文协议编码主要实现 GNSS 监测类型的数据实时传输，包含北斗、GPS 等，传输数据应为解算后的 X,Y,Z 坐标的相对变化量，协议消息体长度根据测点数量而变化，具体报文协议结构如下图所示：



图 D.2 GNSS 报文协议结构组成

GNSS 报文协议具体数据格式定义见下表：

表 D.2 GNSS 报文协议数据格式定义

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注
报文类型	0	报文类型	BYTE	报文类型=3，	03代表 GNSS 报文
预留位	1	预留	BYTE	预留，默认为0	预留信息
	2	方向	BYTE	0：下行信息，1:上行信息	预留信息
	3	网络通讯计算机编号	BYTE	默认为0，	预留信息
	4	命令码	BYTE	命令码=1，	预留信息
	5	数据类型	BYTE	数据类型=0	默认为0 表示坐标数据
测点数	6	测点个数	BYTE	本报文中包含测点数量	最小为1，最大255

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注
测点1数据	7	测点1的 dx 编号	INT	x 方向的数据通道编号	
	9	测点1的 dx 值	FLOAT	浮点数，占用四个字节，前低后高	
	13	测点1的 dy 编号	INT	y 方向的数据通道编号，二字节整数	
	15	测点1的 dy 值	FLOAT	浮点数，占用四个字节，前低后高	
	19-20	测点1的 dz 编号	INT	z 方向的数据通道编号，二字节整数	
	21-24	测点1的 dz 值	FLOAT	浮点数，占用四个字节，前低后高	
	25-32	测点1 采集时间	BYTE[8]	占用八个字节，前低后高。时间格式是年月日时分秒毫秒（毫秒两字节）	实际的年=1900+年
...	...				
测点 N 数据	26*(N-1)+7	测点 N 的 dx 编号	INT	x 方向的数据通道编号	重复测点1的字段

D.3 车轴车速仪报文协议编码

车轴车速仪报文协议编码主要实现 WIM 动态称重系统采集的车速、车重、车型等数据的实时传输，其网络连接采用 TCP 或 UDP 协议，其报文协议由一组固定长度为162字节的消息体组成，具体协议构成如下：



图 D.3 车轴车速仪报文协议组成

表 D.3 车轴车速仪报文协议数据格式定义

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注
报文类型	0	报文类型	BYTE	报文类型=4	04表示高速称重数据
预留位	1	预留	BYTE	预留，暂时为空	
	2	方向	BYTE	方向=1	1:上行信息
	3	网络通讯计算机编号	BYTE	计算机编号=1	称重系统计算机

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注
	4	命令码	BYTE	命令码=1	
	5	数据类型	BYTE	数据类型=1	全部数据内容放在一个结构体里。
车辆基本信息	6-9	图片编号	BYTE[4]	四字节图片编号	与本条数据对应的车辆照片的编号, 有抓拍功能的使用
	10	车道号	BYTE		
	11-16	检测时间	BYTE[6]	六字节，年月日时分秒	
	17	上下行	BYTE	BYTE， 0/1	0：上行 1：下行
	18	单轴数	BYTE	单字节整数	
	19	轴组数	BYTE	单字节整数	
	20-23	总重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	24-27	超限率	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	28	车型	BYTE	单字节车型编码	
轴重信息	29-32	左1轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	23-36	左2轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	27-40	左3轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	41-44	左4轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	45-48	左5轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	49-52	左6轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	53-56	左7轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	57-60	左8轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注
	61-64	右1轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	65-68	右2轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	69-72	右3轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	73-76	右4轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	77-80	右5轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	81-84	右6轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	85-88	右7轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	89-92	右8轮重	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	93-96	轴1、2间距	INT	整数值，四个字节，前低后高	
轴距信息	97-100	轴2、3间距	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	101-104	轴3、4间距	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	105-108	轴4、5间距	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	109-112	轴5、6间距	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	113-116	轴6、7间距	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	117-120	轴7、8间距	INT	整数值，四个字节，前低后高	

消息结构	字节序	字段	数据类型	内容描述	备注
其他信息	121-124	违例码	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	125	超限标示	BYTE	0:未超限，1：超限	
	126-129	车速	INT	整数值，四个字节，前低后高	
	130-133	加速度	FLOAT	浮点值，四个字节，前低后高	
	134-137	当量轴次	FLOAT	浮点值，四个字节，前低后高	
	138-157	车牌	NVCHAR	预留	有车辆抓拍功能的使用
	158-161	车牌颜色	NVCHAR	预留	有车辆抓拍功能的使用