

寒区桥梁结构监测技术规范

Technical specifications for bridge structure monitoring in cold
areas

(征求意见稿)

(本草案完成时间: 2022 年 12 月 7 日)

主要起草单位: 哈尔滨工业大学

联系人: 李顺龙

联系电话: 13796632245

联系邮箱: lishunlong@hit.edu.cn

在提交反馈意见时, 请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

目 次

前言.....II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 总则..... 1

5 总体设计要求..... 2

6 传感器子系统设计..... 5

7 数据采集和传输子系统设计..... 9

8 数据管理子系统设计.....11

9 数据分析和应用..... 12

10 系统验收和维护..... 16

附录 A（资料性） 测点布设示意图..... 18

附录 B（资料性） 寒区桥梁结构监测要点说明..... 20

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由黑龙江省交通运输厅提出并归口。

本文件起草单位：哈尔滨工业大学、中国铁路设计集团有限公司、哈尔滨市城乡规划设计研究院、黑龙江省公路勘察设计院、黑龙江省交通运输厅、黑龙江省交通运输信息和科学研究中心、哈尔滨市政府投资工程项目服务中心、清华大学、浙江大学、哈尔滨理工大学、黑龙江工程学院、哈尔滨职业技术学院、中海企业集团哈尔滨公司、中交基础设施养护集团有限公司、浙江数智交院科技股份有限公司、黑龙江省龙建路桥钢结构有限公司、黑龙江省交通投资集团有限公司、哈尔滨市城市道路桥梁服务中心、黑龙江省公路事业发展中心、哈尔滨市松北区建设工程服务中心、黑龙江省工程质量道桥检测中心有限公司、中铁第五勘察设计院集团有限公司、中国市政工程华北设计研究总院有限公司、哈尔滨市政工程设计研究院、黑龙江省林业设计研究院、黑龙江省交投建设工程有限公司、中铁建大桥工程局集团第四工程有限公司、黑龙江省龙建路桥第二工程有限公司、黑龙江省黑建一建筑工程有限责任公司、黑龙江省龙建路桥第一工程有限公司、黑龙江省龙建路桥第三工程有限公司、中铁五局集团有限公司、黑龙江同创勘测设计有限公司、黑龙江省鼎捷路桥工程有限公司、哈尔滨市思昱交通技术咨询有限公司、哈尔滨水桥科技有限公司、江苏东华测试技术股份有限公司。

本文件主要起草人员：李顺龙、李忠龙、高庆飞、郭亚朋、嵯一、张志国、齐琳、谢雄、郭云峰、董中英、于耀斌、于立泽、盛可鉴、李双、于微微、任凤军、纪伟、郭斌强、谭洪涛、于连成、徐浩、张熠、罗敏、许广鹏、刘成庆、齐奕巍、许德龙、关剑明、张明君、王海泉、刘玉双、王圣保、吴恩泽、王琦、张雪峰、滕书滨、李孟奇、吕宝伟、叶志峰、吕佳、陈晓伟、郑孝功、沈小雷、刘刚、王士全、姜久鸣、刘洋、李岩、杨大伟、张绍逸、刘昕、王鑫、田春河、杨永平、曾明鸣、李绪森、史伟鉴、杜鹏、李明、刘满、张伟、袁宏俊、姜云峰、李欣澄、徐伟量、张旭、王安冬、陈旻、申屠雅靖、牛津、崔洪涛、王杰、邴皓楠、葛思佳、王统、刘立东。

寒区桥梁结构监测技术规范

1 范围

本文件规定了寒区桥梁结构监测技术的总则、结构监测系统的总体设计要求、数据采集和传输系统的设计要求、监测数据管理方法、监测数据分析和应用方法以及结构监测系统的验收与运维。

本文件适用于寒区各类桥梁施工期和运营期监测系统设计、实施和运行管理，主要包括：

- a) 高速公路、一级公路及城市快速路上的大桥与特大桥；
- b) 桥梁采用特殊结构、特殊材料或特殊施工工艺或具有特殊要求的桥梁；
- c) 寒区其他桥梁结构监测亦可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 50982 建筑与桥梁结构监测技术规范
- GB/T 33697 公路交通气象监测设施技术要求
- GB/T 24726 交通信息采集视频交通流检测器
- GB/T 38894 无损检测 电化学检测 总则
- JTG 5120—2021 公路桥涵养护规范
- JTG/T 5122—2021 公路缆索结构体系桥梁养护技术规范
- JTG/T H21—2011 公路桥梁技术状况评定标准
- JT/T 1037—2022 公路桥梁结构监测技术规范
- JTG/T 3310—2019 公路工程混凝土结构耐久性设计规范

3 术语和定义

JT/T 1037—2022界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

冰激振动

大面积冰排在风和水流的作用下对桥墩产生交变性的动冰荷载，并引起结构发生振动的现象。

3.2

结构可靠度

结构在规定的时间、规定的条件下，完成预设功能的概率。

4 总则

- 4.1 寒区桥梁结构监测技术应考虑寒区环境对桥梁结构健康状态和监测系统硬件使用寿命的影响。
- 4.2 寒区桥梁结构监测技术应具有先进性，与北斗卫星导航、5G 移动通信、人工智能、深度学习与大数据等新技术和新设备有机结合。

- 4.3 桥梁结构监测系统应满足安全性、稳定性、经济性和适用性，且易于施工、后期维护和升级扩容。
- 4.4 桥梁结构监测系统应与桥梁管理系统等外部系统相兼容，实现互联互通、数据共享。
- 4.5 应利用桥梁施工监控全过程、桥梁成桥荷载试验和桥梁结构健康监测等数据，为未来寒区桥梁结构监测技术的升级改进提供基础数据和参考基准。

5 总体设计要求

5.1 一般规定

- 5.1.1 寒区桥梁结构监测内容应考虑寒区环境对桥梁结构的影响，主要包括大温差、降雪、结冰和冻融等对桥梁的影响，以及流冰作用于桥墩后的桥梁静、动力响应。
- 5.1.2 监测内容应按照不同桥梁结构型式和监测应用目标进行具体规定，并分为应选监测项、宜选监测项和可选监测项。
- 5.1.3 寒区桥梁结构监测系统应由传感器子系统、数据采集和传输子系统、数据管理子系统、数据分析和报警系统构成。
- 5.1.4 桥梁结构监测系统的设计，应综合考虑桥梁结构体系力学特性、荷载、偶然作用、监测需求、寒区温湿度、冰激振动、冻融作用以及经费预算等多方面因素，宜优先选用技术成熟可靠的产品。
- 5.1.5 桥梁结构监测系统硬件应具备适当的保护措施，各硬件的使用寿命应符合现行国家/行业设备标准，保证监测系统的持续可靠工作。
- 5.1.6 桥梁结构监测应贯穿桥梁结构施工期和运营期，监测系统的更换、维护和升级应保障监测数据的衔接与分析的连续性。

5.2 监测内容

- 5.2.1 梁桥监测内容除应满足本规范中表 1 的规定外，还应符合 JT/T 1037—2022 中关于梁桥监测内容的规定。

表1 梁桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	温度和湿度	桥址区环境温度、湿度	●
		主梁内温度、湿度 ^a	●
	结冰	桥面结冰	●
	降雪	降雪等级	●
	除冰盐	桥面系水体中氯离子浓度	○
	冻融	基础局部温度、湿度及结冰、水质情况	●
作用	结构温度场	混凝土或钢结构构件局部温度场	●
		桥面铺装温度梯度场	○
	冰撞击	撞击作用力	●
		桥墩、主梁横向振动加速度	●
结构响应	应变	主梁关键截面应变	●
	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	◎

表1 梁桥监测内容（续）

监测类别		监测内容	监测选项
结构变化	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、承台混凝土氯离子侵蚀深度	◎
注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项目。			
° 仅适用于封闭箱梁。			

5.2.2 拱桥监测内容除应满足本规范中表 2 的规定外，还应符合 JT/T 1037—2022 中关于拱桥监测内容的规定。

表2 拱桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	温度和湿度	桥址区环境温度、湿度	●
		主梁内温度、湿度 ^a	●
		主拱内的温度、湿度 ^b	●
	结冰	桥面结冰、吊杆结冰	●
	降雪	降雪等级	●
	除冰盐	桥面系水体中氯离子浓度	○
	冻融	基础局部温度、湿度及结冰、水质情况	●
作用	结构温度场	混凝土或钢结构构件温度场	●
		桥面铺装温度场	○
	冰撞击	撞击作用力	●
		桥墩、主梁横向振动加速度	●
结构响应	应变	主梁关键截面应变场	●
		主拱关键截面应变场	○
	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	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	◎
注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项目。			
^a 仅适用于封闭箱梁。			
^b 仅适用于箱形拱			

5.2.3 斜拉桥监测内容除应满足本规范中表 3 的规定外，还应符合 JT/T 1037—2022 中关于斜拉桥监测内容的规定。

表3 斜拉桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	温度和湿度	桥址区环境温度、湿度	●
		主梁内温度、湿度 ^a	●
		索塔锚固区的温度、湿度	●
	结冰	桥面结冰、斜拉索结冰	●
	降雪	降雪等级	●
	除冰盐	桥面系水体中氯离子浓度	○
	冻融	基础局部温度、湿度及结冰、水质情况	●
作用	结构温度场	混凝土或钢结构构件温度场	●
		桥面铺装温度场	○
	冰撞击	撞击作用力	●
		桥墩、主梁横向振动加速度	●
结构响应	应变	主梁关键截面应变	●
		索塔关键截面应变	○
	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	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	◎
注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项目。			
° 仅适用于封闭箱梁。			

5.2.4 悬索桥监测内容除应满足本规范中表 3 的规定外，还应符合 JT/T 1037—2022 中关于悬索桥监测内容的规定。

表4 悬索桥监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	温度和湿度	桥址区环境温度、湿度	●
		主梁内温度、湿度 ^a	●
		主缆内的温度、湿度	○
		锚室内的温度、湿度 ^b	●
		鞍罩内的温度、湿度	●
		索塔内的温度、湿度	○
	结冰	桥面结冰、主缆结冰	●
	降雪	降雪等级	●
	除冰盐	桥面系水体中氯离子浓度	○

表4 悬索桥监测内容（续）

监测类别		监测内容	监测选项
环境	冻融	基础局部温度、湿度及结冰、水质情况	●
作用	结构温度场	混凝土或钢结构构件温度场	●
		桥面铺装温度场	○
	冰撞击	撞击作用力	●
		桥墩、主梁横向振动加速度	●
结构响应	应变	主梁关键截面应变	●
		索塔关键截面应变	○
	振动	主梁竖向振动加速度	●
		主梁横向振动加速度	●
		主梁纵向振动加速度	○
		塔顶水平双向振动加速度	●
		吊索振动加速度	●
结构变化	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、承台混凝土氯离子侵蚀深度	◎
注：●为应选监测项，○为宜选监测项，◎为可选监测项目。			
a 仅适用于封闭箱梁。			
b 仅适用于地锚式悬索桥。			

6 传感器子系统设计

6.1 一般规定

- 6.1.1 传感器选型应符合下列要求：
- a) 应使传感器在使用寿命内稳定可靠运行；
 - b) 应选用耐久性好和抗干扰性强的传感器；
 - c) 应选用技术成熟、性能先进的传感器；
 - d) 传感器应便于维护和更换；
 - e) 传感器应具有抗震性，尤其是支座、桥墩处的传感器应具有良好的抗震性；
 - f) 用于寒区桥梁监测时，传感器应具有良好的耐寒性，其工作温度应能达到-40℃且能在冻融作用下工作；
 - g) 在下部基础水位变动区不宜选用外贴式表面传感器；
 - h) 在满足监测要求的情况下，应优先选择造价低、易安装和更换的传感器。
- 6.1.2 传感器布点应符合下列要求：
- a) 传感器的布置应体现优化原则，利用尽可能少的传感器获取全面、精确的作用和结构参数信息；
 - b) 根据桥梁结构的受力特点，对其监测项目及监测部位进行分析和优化并确定测点，测点测量的参数指标应与模型的理论分析建立起对应关系；
 - c) 对结构构件进行重要性、危险性和易损性分析，将该分析结果作为传感器布置的重要参考指标；

- d) 对特殊、重要部位进行重点监测，监测结果应与理论计算结合，对重要构件的工作状态进行评估，建立与其他构件的相互关系，然后预测其内力分布和变化；
- e) 传感器数量和设备能力等应具有适度冗余，以确保系统的可靠性，并满足系统未来改进、扩充和系统升级；
- f) 传感器的布设工艺与平台结构的其他施工工艺紧密配合，不出现矛盾，并兼顾相互的补充与加强；
- g) 传感器的布设工艺不能损伤桥梁主体结构。

6.2 传感器的选择及监测方法

6.2.1 传感器的选择及监测方法除应满足本规范的规定外，还应符合 JT/T 1037—2022 中关于监测方法的规定。

6.2.2 环境监测应满足下列要求：

- a) 环境温度监测宜采用热电偶、热电阻、光纤温度传感器等，传感器量程上限宜超出大气温度年极大值 30℃以上，量程下限宜低于年极小值 20℃以上，最大允许误差 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，分辨力小于等于 0.1℃。温度监测方法应符合 GB 50982 的相关规定。路面温度传感器应符合 GB/T 33697 的相关规定；
- b) 环境湿度监测应采用湿度传感器，可选用氯化锂湿度计、电阻电容湿度计和电解湿度计等，量程应为 0~100%RH（非凝露），最大允许误差 $\pm 2\%\text{RH}$ ，监测方法应符合 GB 50982 的相关规定；
- c) 结冰监测可采用超声波测试法、视频监测法，结冰厚度监测最大允许误差宜小于 1mm。摄像机技术参数应符合 GB/T 24726 的相关规定；
- d) 降雪量检测采用在规定时间内将持续降雪量折算成降雨量进行等级划分。该标准一般采用持续时间 12 小时和 24 小时两种标准；可采用雨量筒进行采样测量；对于雪荷载，宜选用埋入式路面状况检测器；
- e) 拉索覆冰的量化监测方法可利用电容传感器、光纤传感器等感应拉索结冰后其表面发生的物理变化来推断结冰情况；也可利用无人机、巡检机器人、摄像机等图像辨识方法实现监测。管养部门也可以结合人工的方法进行监测；
- f) 寒区因除雪的需求导致桥面系结构受到了较大的融雪剂除冰盐腐蚀影响，腐蚀监测宜选用电化学方法，腐蚀监测传感器宜选用沿桥面铺装层深度安装多电极传感器或埋入式路面状况检测器，可监测腐蚀电位、腐蚀电流、混凝土温度、腐蚀速率等参数，监测方法应符合 GB 50982 的相关规定。技术参数宜符合 GB/T 38894 的相关规定；
- g) 水质监测的内容主要包括监测水中肉眼可见物、水样 pH 值、水样中 SO_4^{2-} 离子浓度、水样中 Cl^- 离子浓度、水样中微生物数量、水样中重金属元素，宜分别通过下列方法进行：
 - 1) 采用直接观察法观察采集水样中肉眼可见物；
 - 2) 采用玻璃电极法，根据测量电池的电动势得到 pH 值。该电池通常由饱和甘汞电极为参比电极，以玻璃电极为指示电极所组成。溶液每变化 1 个 pH 单位，电位差会有固定的改变量，在仪器上直接以 pH 的读数表示；
 - 3) 采用硫酸钡重量法得到水样的硫酸盐浓度，水样中硫酸盐与氯化钡会在盐酸溶液中生成沉淀，将溶液煮沸，对沉淀物进行烘干、冷却、称重，即可得到硫酸根离子含量；
 - 4) 采用离子选择电极法得到水样的氯离子浓度，根据离子选择性电极仅对特定离子有选择透过性这一特点，得到电压差后根据能斯特方程即可得到离子浓度；
 - 5) 采用流式细胞技术得到水样中微生物数量，将微生物细胞进行荧光标记后进入流式细胞仪的检测区域，在激光束作用下会产生散射光信号和荧光信号，这些光信号经转换后经分析可生成微生物数量；

- 6) 采用分光光度法,通过便携式分光光度计得到水样中重金属元素(如镉、六价铬、铅、镍、铜等)进行快速测定。
- h) 基础冻融主要受桥址温度、湿度、结冰及水质情况等环境因素影响,因此:
- 1) 基础温度监测的内容宜参考 6.2.2.a);
 - 2) 基础湿度监测的内容宜参考 6.2.2.b);
 - 3) 基础结冰监测的内容宜参考 6.2.2.c);
 - 4) 基础水质监测的内容宜参考 6.2.2.g)。
- 6.2.3 作用监测应满足下列要求:
- a) 结构温度场的监测宜与环境温度监测协同,采用热电偶、热电阻、光纤温度传感器等,技术参数应符合 6.2.2.a)的规定;
 - b) 冰撞击桥墩的加速度监测宜与地震动监测协同,采用力平衡式加速度传感器、强震仪,并且辅助视频监控,所采用的摄像机技术还宜具备低照度、透雾功能。
- 6.2.4 结构响应监测应满足下列要求:
- a) 考虑到寒区昼夜温差较大这一特性,在应变传感器的选取上充分考虑温度补偿,宜优先选用振弦式应变传感器或光纤应变传感器。对基础混凝土应变的监测宜选择大标距的应变式传感器,结构表面的应变测试使用表面式传感器,在混凝土表面安装进行监测,并做好相应保护措施;对基础钢筋应变的监测使用埋入式应变传感器,在施工期间混凝土浇筑前将传感器埋入待测部位并固定,并充分做好输出信号线的保护工作。应变传感器选型满足下列要求:
 - 1) 应变传感器标距应与构件材料性质和被测参数精度要求匹配;
 - 2) 应变传感器量程应大于等于 $5000\mu\epsilon$,且静应变传感器量程应大于等于被测量预计变化范围的 1.2 倍,动应变传感器量程应大于等于预测被测量变化范围的 2 倍,分辨力应小于等于 $1\mu\epsilon$;
 - 3) 三向静态和动态监测应变测点可选择应变花或者三向加速度传感器;
 - 4) 应变监测应进行温度补偿,根据测试环境和条件选择合适的温度补偿方案,安装时应测量记录初始值。
 - b) 振动监测宜采用加速度监测方法,应根据桥梁整体及梁、塔、索结构的动力分析结果、基频、振型等选择传感器,确定振动加速度量程、频响范围、横向灵敏度。钢结构宜采用力平衡式加速度传感器或电容式加速度传感器,索和混凝土结构宜采用电容式或压电式加速度传感器,振动监测方法应符合 GB 50982 的相关规定,并满足下列要求:
 - 1) 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;
 - 2) 主梁、塔、主拱振动加速度传感器量程应大于计算分析振动响应最大值的 1.2 倍且不宜小于 $\pm 1g$,横向灵敏度小于等于 5%,频响范围 0Hz~100Hz,可选用力平衡式加速度传感器;
 - 3) 悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)等索构件振动加速度传感器量程应大于计算分析振动响应最大值的 1.5 倍,且宜不小于 $\pm 5g$,横向灵敏度小于等于 5%,频响范围 0Hz~100Hz,可选用电容式加速度传感器或压电式加速度传感器。
- 6.2.5 结构变化监测应满足下列要求:
- a) 裂缝监测宜采用自动监测、观测或相结合的方式,裂缝监测传感器量程应大于裂缝宽度的 5 倍,测量最大允许误差不大于 0.02mm,分辨力小于等于 0.01mm。可采用裂缝测宽仪、振弦式裂缝传感器、电阻式裂缝传感器、长标距光纤等光纤式裂缝传感器、高清摄像机。监测方法应符合 GB 50982 的相关规定;
 - b) 腐蚀监测宜选用电化学方法,腐蚀监测传感器宜选用沿混凝土保护层深度安装多电极传感器,可监测腐蚀电位、腐蚀电流、混凝土温度、腐蚀速率等参数,监测方法应符合 GB 50982 的相关规定。技术参数应符合 GB/T 38894 的相关规定;

- c) 基础混凝土的蜂窝麻面监测内容主要包括对蜂窝麻面的识别及蜂窝麻面的面积监测，其中对蜂窝麻面的面积监测可通过采集蜂窝麻面图像，对图像进行分割后得到蜂窝麻面的识别结果，开发图像面积计算方法进行监测：
 - 1) 在施工期间，混凝土蜂窝麻面的识别宜通过对蜂窝麻面的识别，由专业人员进行现场检查，直接近距离目测进行识别；
 - 2) 在使用期间，水下混凝土结构表面蜂窝麻面的识别宜通过水员或水下机器人进行水下作业。

6.3 传感器布点要求

6.3.1 传感器布点要求除应满足本规范的规定外，还应符合 JT/T 1037—2022 中关于监测测点布设的规定。

6.3.2 环境监测布点应满足下列要求：

- a) 桥址区环境温度和湿度的监测测点宜布设在桥梁跨中位置，可根据桥梁结构类型、联长、跨径、构造增设监测测点；
- b) 对于桥梁构件封闭空间，温度和湿度监测测点应布设于桥梁结构内、外温度或湿度变化较大和对温度、湿度敏感的部位，应根据截面温度梯度及结构整体升温 and 空间分布特点，布置在温度梯度变化较大位置，宜对称、均匀，反映结构竖向及水平向温度场的变化规律；同时宜与应变监测的温度补偿测点统一设计，实现数据对比；
- c) 降雪量监测测点宜布设在主桥 1/4 跨、跨中桥面开阔部位，且宜对称、均匀布置，能较准确的反映桥梁整体的平均降雪量；
- d) 桥面结冰监测测点宜与车辆荷载视频监测测点同位置，缆、索结冰视频监测测点可布设在近塔顶，吊杆结冰测点可布设于主拱；
- e) 除冰盐监测点宜选择受除冰盐侵蚀的典型区域和典型节点且宜在桥面对称、均匀取点观察除冰盐对桥面系的侵蚀程度；
- f) 环境水质监测点布设应准确反映桥址区水文特征；
- g) 基础冻融的监测与温度、湿度、水文、结冰等因素相关，对基础进行监测时，应符合上述测量要求。

6.3.3 作用监测布点应满足下列要求：

- a) 结构温度监测测点应根据桥梁结构温度场分布特点并结合结构类型、联长、跨径、构件尺寸、铺装体系、日照情况等因素综合确定。宜在主梁铺装层布设温度监测测点。结构温度监测测点宜与应变监测的温度补偿测点协同布设；
- b) 船舶和冰撞击监测测点宜布设在有船撞风险或冰排撞击风险的水位变动区的桥墩底部或承台顶部，视频监测测点宜在主梁上、下游两侧对称布设。

6.3.4 结构响应监测布点应满足下列要求：

- a) 应变监测测点符合下列规定：
 - 1) 主梁索塔、主拱等关键构件截面静态和动态应变监测测点位置和数量应根据结构计算分析和易损性分析，选择受力较大的关键截面、部位布设；
 - 2) 正交异性钢桥面板动态应变监测测点应选择在重车道或行车道车轮轮迹线对应位置，宜布设在顶板、U 肋和横隔板等疲劳热点；
 - 3) 受力复杂的构件截面和部位，宜布设三向静态和动态应变监测测点；
 - 4) 钢混接合段宜布设应变监测测点，可布设在应变较大和应力集中处。
- b) 结构振动监测测点符合下列规定：

- 1) 主梁竖向和横向振动监测测点应根据主梁振动振型确定，宜布设在振型峰值点处，避开振型节点；测点位置应至少包括主跨跨中和 1/4、3/4 主跨；主梁纵向振动监测测点宜布设在塔梁连接处或支座位置处；
 - 2) 塔顶水平振动监测测点应在塔顶双向布设；
 - 3) 宜选择振动幅值大的悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索拱桥吊杆（索）等索构件布设振动监测测点，测点应根据索构件振动振型确定，避开振型节点；对索面内和索面外均存在较大振动的情况，可双向布设；
 - 4) 梁桥桥墩纵向和横向振动监测测点应在桥墩顶部布设；
 - 5) 主拱振动监测测点应根据主拱振型确定，宜布设在振型峰值点处，避开振型节点。
- 6.3.5 结构变化监测布点应满足下列要求：
- a) 混凝土结构和钢结构裂缝监测测点应依据检查（测）、技术状况评定、养护维修结果确定测点位置和数量，宜对裂缝宽度和长度变化跟踪观测。
 - b) 腐蚀监测测点宜布设在墩台水位变动、浪溅区的混凝土保护层内。测点位置、数量可根据氯离子浓度梯度测试要求确定；
 - c) 基础蜂窝麻面监测的测点应能对目标蜂窝麻面的边界轮廓进行完整的信息采集，实现面积的精确监测。除此之外，蜂窝麻面监测测点宜满足光照均匀的特点，并尽可能减少图像采集后多重背景带来的干扰，便于实现图像识别和特征提取。
- 6.3.6 梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥的监测测点布置图示见附录 A。

6.4 传感器布点优化

- 6.4.1 传感器布点可根据实际工程情况选择合适方法进行优化以提高监测效率和监测准确性，常用的传感器布点优化方法有模态功能法、特征向量乘法、模态分量加和法、有效独立法、MinMAC 法、模态矩阵的 QR 分解法等。
- 6.4.2 常用传感器布点优化方法可按表 5 选取。

表5 传感器布点优化方法

传感优化方法	特征和适用性
模态功能法	用于环境噪音较大、在较复杂的测点布置中初选传感器位置
特征向量乘法	用于小区域传感器布置，不适用于复杂结构
模态分量加和法	粗略计算较好的布置位置、用于初选传感器位置
有效独立法	用于传感器数量的精简、精确计算传感器位置
MinMAC法	在初选基础上精确计算传感器位置
模态矩阵的QR分解法	直接得出所需要的传感器数量、计算传感器位置

7 数据采集和传输子系统设计

7.1 一般规定

- 7.1.1 数据采集和传输子系统应包括数据采集硬件、数据采集软件、数据传输系统和配套工程。
- 7.1.2 数据采集和传输的硬件选型、软件设计应与传感器类型和桥梁环境、作用、结构响应、结构变化等监测内容相匹配。
- 7.1.3 采集和传输设备硬件在安装前应进行检查、校准、测试，确认是否满足国家相关规范或标准的要求。

7.1.4 数据采集软件应具有数据采集、数据存储、数据访问、数据传输、数据处理、缓存管理和系统自诊断的功能。

7.1.5 数据采集和传输系统应能够在无人值守的情况下连续运行，满足长期稳定工作的要求。

7.2 数据采集系统硬件设计要求

7.2.1 硬件设备安装的设计方案应避免损伤桥梁主体结构。

7.2.2 数据采集设备应与传感器功能和数据采集软件功能相适配，考虑数据传输接口兼容、数据类型转换，实现同步采集、实时传输。

7.2.3 数据采集设备应明确“防雨、防雷、防尘、防寒”等指标要求。

7.2.4 数据采集设备应满足室外工作需求，应能够保障系统在桥梁所处温湿度、振动、电磁干扰环境下连续稳定运行。用于寒区桥梁监测时应能够在低温条件下稳定运行，对于无法适应环境温度的设备应配置温控机柜。

7.2.5 功耗器件宜预留冗余，以延长其使用寿命。

7.2.6 数据采集设备应易于更换且不影响软件使用。

7.2.7 投入使用的数据采集设备宜进行统一编号，并配备编号标签或二维码标签，使得通过编号或二维码可直接查询设备信息，方便管理及后期维护。

7.3 数据采集系统软件设计要求

7.3.1 数据采集软件设计应实现人机交互友好，操作便捷流畅。各软件模块之间相互独立、有序融合，优先采用统一的软件架构，方便后期维护、扩容和升级。

7.3.2 数据采集软件应具备各类传感器信号的自动化采集、自动化存储、及时反馈、实时上传功能。

7.3.3 数据采集软件应能够与现场监控中心工作站或数据中心进行通信与数据交换，并接受远程操控与参数调配。

7.3.4 数据采集软件应具备原始数据本地缓存功能，能够在网络故障和突发事件情况下将数据自动存储在本地计算机，并可在恢复后续传数据。

7.3.5 数据采集软件宜记录软件和设备运行状态，具备传感器设备状态和采集设备状态自诊断功能。

7.4 数据传输系统设计要求

7.4.1 数据传输方式分为有线和无线两种方式，在选择时应考虑建设成本、系统稳定性等因素，保证数据传输的稳定性和可靠性。

7.4.2 条件允许的情况下，数据传输方式宜优先选择稳定、可靠、低功耗的无线传输技术。

7.4.3 桥梁现场与现场监控中心工作站或数据中心的远距离传输宜采用光纤有线传输方式或者无线通讯网络。

7.4.4 大数据量传输时宜采用数据传输软件对数据进行分包压缩和解包复原。

7.4.5 数据传输系统应具有良好的鲁棒性，在某个传输线路发送故障时，能保证数据的完整性和可靠性。

7.5 配套工程设计要求

7.5.1 配套工程包括预留预埋、开孔开洞、线管桥架安装、供配电、防雷接地保护、设备安装和集成调试等，其设计应满足国家相关规范和标准。

7.5.2 配套工程的安装应避免影响桥梁主体结构安全。

7.5.3 配套工程应能保证采集、传输设备的正常使用，用于寒区桥梁或恶劣环境桥梁时应能够进行有效防护。

8 数据管理子系统设计

8.1 一般规定

- 8.1.1 桥梁结构监测系统数据管理子系统是承载数据并支撑统筹数据的存储、管理、应用、安全的基础信息平台，包括数据预处理、数据存储、数据库和数据安全。
- 8.1.2 数据管理子系统应确保数据的完整性、准确性、一致性、安全性、易维护性。
- 8.1.3 数据管理子系统的数据质量评估应符合国家规范和标准。
- 8.1.4 监测数据按其结构化程度和特征分为结构化数据和非结构化数据。结构化数据应包括桥梁基础数据、监测数据、特征值数据和超限值数据，非结构化数据应包括图像、文本、音频及视频。
- 8.1.5 数据管理子系统应具备快速存储归档、查询检索、报表生成、图形化展示、数据转出、备份与恢复等功能。
- 8.1.6 数据单位应采用国际单位制，同类型监测数据应采用统一的标准格式。

8.2 数据预处理

- 8.2.1 数据采集设备内置的数据预处理功能应将原始数据换算成反映桥梁环境、作用、结构响应、结构变化的特征数据。
- 8.2.2 应对传感器感知的信号应进行预处理，原始监测数据信号可选择阈值法、平均值法以及其他滤波算法等算法。
- 8.2.3 数据误差包括系统误差和随机误差，应根据各测点实际情况选择合适算法对误差进行处理。
- 8.2.4 从数据源中提取数据时应针对不同类型数据采取不同的抽取模式，支持数据抽取格式和流程的自定义配置。

8.3 数据存储

- 8.3.1 桥梁结构监测系统的数据存储按存储地点可分为桥梁现场采集站存储、监控中心或数据中心计算机机房存储和云存储。
- 8.3.2 监测系统应具备分布式数据存储的能力，并提供数据导入、导出和迁移功能。
- 8.3.3 结构化数据应统一存入数据库中，非结构化数据应采用文件形式存储至对象存储服务中，并将文件的基本属性、存储路径等描述信息以结构化数据的形式存入数据库中。
- 8.3.4 桥梁现场数据采集站内宜安装采集计算机，采用循环更新存储方式。在网络中断情况下，现场本地数据存储空间结构化原始数据应不小于 90 天，非结构化视频图像数据应不小于 30 天。
- 8.3.5 实时监测数据存储时间应大于 5 年，经处理后的特征数据、超限报警、评估结果等结构化数据存储时间应大于 20 年。
- 8.3.6 非结构化视频数据存储应大于 90 天，特殊事件数据应转移备份并永久保存。
- 8.3.7 应采用容灾备份机制，建立各类数据的压缩存储、异地备份和恢复机制。
- 8.3.8 宜采用双机集群、双机备热等手段保障数据存储的正常运行。
- 8.3.9 宜每年对监测系统存储数据进行一次全面检查，检查内容包括数据完整性、传感器技术参数、时间同步性等。

8.4 数据库

- 8.4.1 应采用数据库技术存储监测系统数据，包含查询检索、存储监控及存储管理可视化功能，保证存储数据的准确性、完整性和可靠性。
- 8.4.2 数据库宜采用模块化架构，各子数据库的信息数据均在桥梁结构监测系统数据管理中进行存储

和调用，以满足子数据库信息的交换和共享。

8.4.3 数据库可按功能分为桥梁信息子数据库、监测系统信息子数据库、实时数据子数据库、结构有限元模型子数据库、数据分析子数据库等。

8.4.4 桥梁结构信息子数据库应存储和管理桥梁设计方案、竣工图纸、采集设备信息以及相关的科研资料。

8.4.5 监测系统信息子数据库应监控数据管理体系的实施，存储异常数据，及时发现潜在的缺陷。

8.4.6 实时数据子数据库应存储和管理所有采集到的原始数据，适时更新以保证数据的最新状态。

8.4.7 结构有限元模型子数据库应存储和管理桥梁结构有限元模型。

8.4.8 数据分析子数据库应具备对数据进行多维统计和分析的功能，宜包括从时间、空间、指标等维度定义统计分析模型，以报表和图表等形式进行可视化展示及结果导出。

8.5 数据安全

8.5.1 数据安全应包含数据完整性、数据加密、数据访问权限控制和数据可审计性。

8.5.2 监控中心或数据中心服务器所放置的场所应符合国家规范和标准，满足计算机机房的要求及服务器本身的要求。

8.5.3 数据库服务器应当放置于单独的区域，控制数据库服务器所受到的物理访问。

8.5.4 服务器机柜应选择坚硬不易变形的材质，确保在各类荷载特别是地震荷载作用下的安全性和结构完整性。

8.5.5 对监测系统敏感字段或业务数据应加密存储。

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

8.5.7 应保障数据库系统的安全访问，确认合法身份和访问授权。

8.5.8 数据库应有网络防护功能、应用防火墙技术。

8.5.9 数据审计应具备监测记录外部用户访问监测数据行为的功能。

8.5.10 监测系统应具备数据访问权限控制功能，给予不同用户级别相应的权限。

9 数据分析和应用

9.1 一般规定

9.1.1 数据分析和应用应包括但不限于：监测数据分析，超限阈值与报警、安全评估。

9.1.2 应对结构各类监测参数建立明确的报警指标，并对其监测结果进行分级。

9.1.3 监测数据分析应支撑监测应用，应能够综合各种监测数据、检测信息、内力状态信息对结构进行综合评估。

9.1.4 应根据桥梁具体结构形式和工程情况，进行桥梁结构健康安全评估。

9.2 数据分析

9.2.1 宜结合监测数据和桥梁维护的检查数据进行综合分析。监测数据分析内容应包括环境、作用、结构响应和结构变化监测数据。

9.2.2 监测数据分析应基于预处理后的数据，监测数据分析方法可采用统计分析、相关性分析、趋势性分析、机器学习等方法。

9.2.3 监测数据分析符合下列规定：

- a) 温度监测数据应分析最高温度、最低温度、最大温差等；

- b) 湿度监测数据应分析最大值、平均值和超限持续时间等；
 - c) 雪量监测宜采用 12 小时或 24 小时降水量数据进行折算分析；
 - d) 桥面、缆、索、吊杆结冰超声波检测和视频监控数据宜分析结冰位置，范围和程度；
 - e) 除冰盐、水体等其他氯化物环境的监测数据宜分析作用位置、范围和程度。
 - f) 结构温度场监测数据应分析温度最大值、最小值、最大梯度和年极值。
 - g) 主梁竖向横向纵向、塔顶水平双向、悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、梁桥桥墩顶部纵向和横向、拱桥主拱和吊杆（索）振动监测数据应分析绝对最大值、均方根值、频谱，宜进行模态参数分析，模态参数应剔除环境等因素影响。
 - h) 混凝土结构和钢结构裂缝监测数据宜分析裂缝长度、宽度、数量、位置及其随时间变化规律，可分析裂缝与环境、作用和结构构造的相关性；
 - i) 墩身、承台混凝土腐蚀监测数据，宜分析氯离子浓度、侵蚀深度最大值、最小值、梯度及其变化趋势；
- 9.2.4 宜分析不同类型监测内容之间、相同类型监测内容之间数据相关性，可采用机器学习或其他可靠方法。

9.3 超限阈值与报警

- 9.3.1 超限阈值应分为三级，当监测数据超过各级超限阈值时，宜同步报警。
- 9.3.2 各级超限阈值宜根据监测内容历史统计值、材料允许值、仿真计算值、设计值和规范容许值设定，并宜考虑安全评估、特殊事件应急管理监测应用需求。
- 9.3.3 监测数据的超限阈值除参考本规范中表 6 的规定外，还宜参考 JT/T 1037—2022 中关于超限阈值的规定。

表6 超限报警阈值设定表

报警类别	报警内容	超限阈值 ^a	超限级别	桥梁类型			
				悬索桥	斜拉桥	梁桥	拱桥
环境	最高温度、最低温度、最大温差	到达1.0倍设计值	一级	●	●	●	●
		到达1.2倍设计值	二级	●	●	●	●
	构件相对空间内相对湿度 ^b	达到50%	一级	●	●	●	●
	降雪 ^c	降雪等级达到大雪~暴雪及以上	二级	●	●	●	●
	结冰	出现结冰	一级	●	●	●	●
	除冰盐、水体等其他氯化物环境的氯离子浓度 ^d	接触较低浓度氯离子水体(C1离子浓度： 100mg/L~500mg/L)，且有干湿交替	一级	●	●	●	●
		接触较低浓度氯离子水体(C1离子浓度： 500mg/L~5000mg/L)，且有干湿交替	二级	●	●	●	●
		接触较低浓度氯离子水体(C1离子浓度： >5000mg/L)，且有干湿交替	三级	●	●	●	●
作用	混凝土、钢结构构件温度场	达到设计值	一级	●	●	●	●

表6 超限报警阈值设定表（续）

报警类别	报警内容	超限阈值 ^a	超限级别	桥梁类型			
				悬索桥	斜拉桥	梁桥	拱桥
作用	桥面铺装层温度	大于60℃或者小于-20℃或者根据铺装体系材料力学性能随着温度变化关系确定	一级	●	●	●	●
	冰压力	达到0.8倍设计值	二级	●	●	●	●
		达到1.0倍设计值	三级	●	●	●	●
结构响应	主梁、索塔、主拱关键截面静应变	超过历史最大值	一级	●	●	●	●
		超过设计最不利工况计算值	二级	●	●	●	●
	主梁振动加速度	10min加速度均方根达到31.5cm/s ² 且持续时间超过30min	一级	●	●	●	●
		10min加速度均方根达到50cm/s ²	二级	●	●	●	●
		幅值持续增大呈现发散特征	三级	●	●	●	●
	悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆（索）振动加速度	10min加速度均方根达到100cm/s ²	一级	●	●	○	●
		10min加速度均方根达到300cm/s ² ，且频繁出现	二级	●	●	○	●
结构变化	裂缝	出现结构性裂缝	一级	●	●	●	●
		结构性裂缝宽度超过规范限值或发展加速	二级	●	●	●	●
	腐蚀	腐蚀深度达到保护层厚度	二级	●	●	●	●
冰激振动 ^e		10min横向振动加速度均方根值达到31.5cm/s ²	一级	●	●	●	●
		10min 横向振动加速度均方根值达到50cm/s ²	二级	●	●	●	●
		10min横向振动加速度均方根值达到80cm/s ²	三级	●	●	●	●
注：●为应报警项目；○为无须报警项。							
^a “超限阈值” 一系列中的“设计值”和“裂缝限值”等应根据实际情况，参考国家现行规范的相关规定取值和计算。 ^b 构件封闭空间为主梁内，悬索桥主缆、锚室和鞍罩内，斜拉桥索塔和索塔锚固区内，拱桥主拱内封闭空间。 ^c 降雪等级的分级标准宜参考附录 B。 ^d 除冰盐、水体等其他氯化物环境的氯离子浓度阈值依据 JTG/T 3310—2019 中相关规定制定。超限一级、二级和三级阈值分别对应 JTG/T 3310—2019 中的“IV-C 中度”、“IV-D 严重”和“IV-E 非常严重”。 ^e 冰激振动报警选取横向加速度均方根值作为报警指标、阈值取值的原则。依据已有桥梁发生冰激振动的加速度均方根值统计规律以及 ISO 2631—1 舒适性标准制定。超限一级、二级和三级阈值分别取为 31.5cm/s²，50cm/s²和 80cm/s²，分别对应 ISO 2631—1 中的“稍有不舒适”、“比较不舒适”和“不舒适”的下限。							

9.3.4 在桥梁监测数据超过超限阈值时，报警系统应能够通过亮灯、响铃、短信等多种方式进行报警。

9.3.5 报警的误报率应不超过 5%，报警应保证及时全面。

- 9.3.6 应根据监测数据分析结果和报警级别进行车辆通行管控并指导桥梁检查维护。
- 9.3.7 连续出现多项、多处三级报警时应给出相应的应急预案，并及时通知桥梁管理部门。

9.4 安全评估

- 9.4.1 桥梁结构的安全评估应综合利用人工巡检信息和监测数据，在结构可靠度理论的基础上对结构安全性进行评价。结构可靠度指标计算方法可采用概率干涉法、FORM 法、MCS 法和模糊可靠度理论。
- 9.4.2 桥梁结构的安全评估可分为桥梁安全性状态评估、桥梁适用性状态评估、桥梁耐久性状态评估。
- 9.4.3 桥梁结构的安全评估等级宜划分为五个等级：I 基本完好、II 影响外观、III 影响使用、IV 影响安全、V 危险状态。桥梁安全性、适用性、耐久性状态评定依据分别如表 7、表 8 和表 9 所示：

表7 桥梁安全性状态等级

安全等级	桥梁安全性描述	可靠度指标
I	完全满足设计要求，安全	≥ 4.7
II	基本满足设计要求，总体安全	4.2~4.7
III	主要构件有轻微损伤，基本安全	3.7~4.2
IV	主要构件缺损，需采取加固措施或降低功能使用	3.2~3.7
V	不满足安全要求	< 3.2

表8 桥梁适用性状态等级

安全等级	桥梁安全性描述	可靠度指标
I	结构未出现明显的损伤，功能完好	≥ 4.7
II	结构出现轻微外观损伤，比如出现细微裂缝	4.2~4.7
III	结构出现中等损伤，对正常使用有一些影响，如出现明显裂缝，钢筋出现明显锈蚀等	3.7~4.2
IV	结构出现严重损伤，危及桥梁安全	3.2~3.7
V	结构的损伤程度已经很严重，无法继续使用	< 3.2

表9 桥梁耐久性状态等级

安全等级	桥梁安全性描述	可靠度指标
I	桥梁结构构件完整，材料不发生劣化	≥ 4.7
II	桥梁结构构件发生少量缺损，材料少量劣化	4.2~4.7
III	桥梁结构构件发生中等缺损，材料部分劣化	3.7~4.2
IV	桥梁结构构件发生大量缺损，材料大量劣化	3.2~3.7
V	桥梁结构构件缺损严重，材料完全劣化	< 3.2

- 9.4.4 结合 9.2 的监测数据分析结果和安全评估结果，应定期形成桥梁安全分析报告，宜采用季报、年报和特殊事件专项报告，报告内容宜包括但不限于：
- a) 季报内容：9.2.3 中规定的季度内监测数据分析结果，超过限值的数量、比例、位置和时间，以及安全评估结果；
 - b) 年报内容：9.2.3 中规定的年度内监测数据分析结果，超过限值的数量、比例、位置和时间，以及安全评估结果；
 - c) 特殊事件专项报告内容：在特殊事件发生后快速提供专项报告。
- 9.4.5 桥梁安全分析报告应内容全面、格式规范，安全评估结果应明确、直观，面向多级桥梁管理人

员。

9.4.6 可根据评估结果，对桥梁运营情况进行分析预测，指导桥梁后期运维和养护。

9.4.7 当安全评估结果达到 IV 级“影响安全”或 V 级“危险状态”时，应联合专家进行综合研判。

10 系统验收和维护

10.1 系统验收

10.1.1 系统试运行时间应不低于 90 天，试运行期间内应同步开展系统使用培训、设备校正等工作。

10.1.2 系统试运行期间能正常运营、经验证合格后可申请开展系统验收工作。系统验收宜分为交工验收和竣工验收。系统工程应根据国家规范、标准进行质量评分、评级。

10.1.3 监测系统验收内容应包含系统功能性验收和系统整体性验收。

10.1.4 系统功能性验收应满足下列要求：

- a) 传感器、数据采集和传输设备、设备的防护措施应按设计文件正确安装，信号线、电力线、插头等要求连接到位；
- b) 监测系统应保证 24 小时连续工作，在可预见的特殊事件发生时能保持正常工作；
- c) 监测系统应能正常采集、存储、处理监测数据，输入、输出和存储的监测数据应保证完整性和匹配性；
- d) 监测系统软件各模块功能、响应速度、数据刷新率应满足设计文件要求，使用人员应能正常完成软件数据调用、参数远程设置等基本操作；
- e) 监测系统数据的安全性应满足设计文件和网络信息安全相关技术的要求。

10.1.5 系统整体性验收应满足下列要求：

- a) 监测系统设备和材料的数量、规格型号、技术参数等应与合同文件、设计文件一致，说明书、合格证、出厂检验报告等应齐全；
- b) 应提供监测系统完整的帮助文档和操作手册；
- c) 合同相关资料、实施过程记录、技术成果资料等验收资料应检验其齐全性、规范性和一致性；
- d) 业主和设计单位的其他要求。

10.2 系统维护

10.2.1 系统维护应合理制订系统维护计划、建立维护所需备件备品清单、列支系统维护费用等。

10.2.2 系统维护内容应包含硬件设施和软件系统的日常检查、定期（专项）维护和应急维护。

10.2.3 硬件设施日常检查符合下列规定：

- a) 日常检查宜结合桥梁日常巡查工作开展，宜不低于每一周进行一次日常维护；
- b) 日常检查应对巡查路线上监测设备的表观完好性及稳固性进行检查；
- c) 对监控中心或数据中心机房计算机设备和工控机运行状态进行检查；
- d) 对巡查中发现的问题或系统自动反馈的问题进行记录，并通知专业单位进行处置。

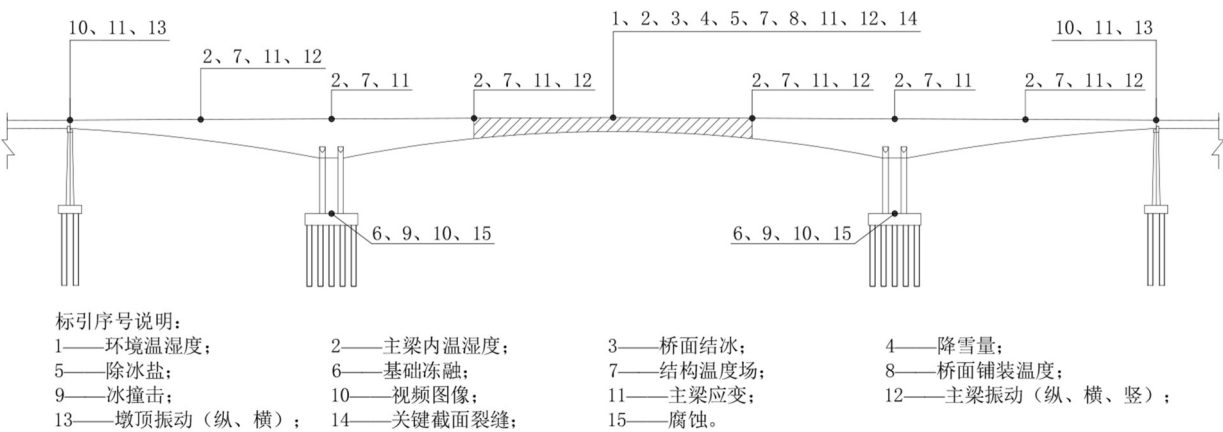
10.2.4 硬件设施定期（专项）维护和应急维护符合下列规定：

- a) 宜不低于每半年进行 1 次定期维护；
- b) 对强（台）风、强降雪等可预见的特殊事件发生前应对系统进行专项维护；
- c) 对不可预见的突发事件发生后应及时对系统进行应急检查维护；
- d) 应全面检查硬件设备的表观完好性及稳固性、检查硬件设备及其配套工程的固定情况、检查传输线路的接头紧固情况；

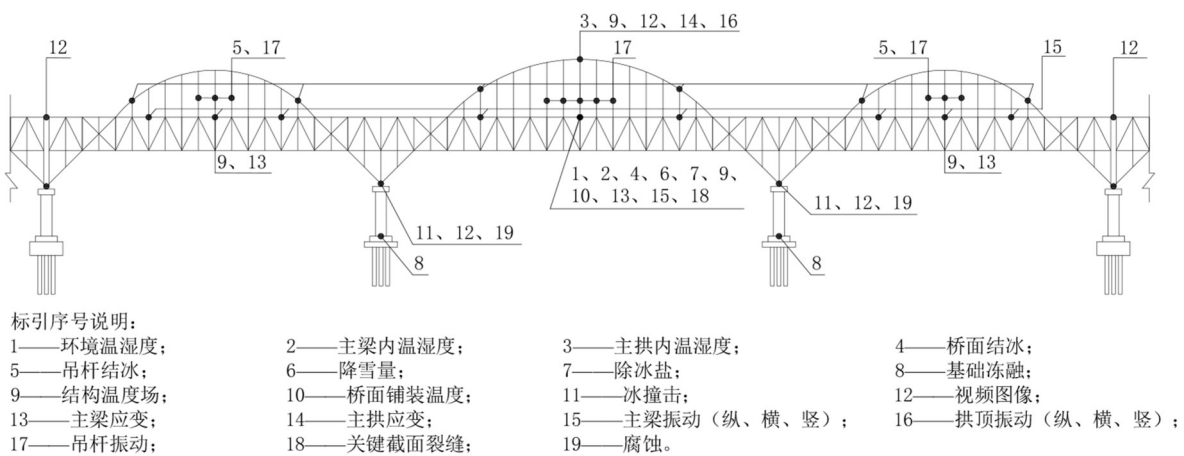
- e) 对易受灰尘影响的设备机柜等进行除尘维护、清理设备周围积雪、维护视觉类传感器屏幕的清洁、更换寿命超出期限的设备、补充硬件设备的消耗性材料至设计水平；
 - f) 对维护中发现的问题进行记录，并及时联合专业单位进行处置。
- 10.2.5 软件系统日常检查符合下列规定：
- a) 宜不低于每周进行一次日常检查；
 - b) 日常检查应包括各软件模块功能工作状态检查、数据传输与存储情况检查、超限数据确认等；
 - c) 宜在系统不停机状态下进行软件日常检查，对于确需停机维护的情况，应在系统访问低谷时间段开展。
- 10.2.6 软件系统定期（专项）维护和应急维护符合下列规定：
- a) 宜不低于每月开展 1 次定期维护；
 - b) 软件定期维护内容宜包括软件模块功能升级和优化、数据备份与磁盘空间清理、软件运行日志检查等；
 - c) 软件应急维护内容宜包括软件模块崩溃修复、数据异常诊断和修复，对于非软件因素造成的问题，应及时排查硬件设备问题并修复；
 - d) 对于软件的修改、更正、修复等操作，应提前做好备份，并在维护完成后做好日志记录和维护记录。

附录 A
(资料性)
测点布设示意图

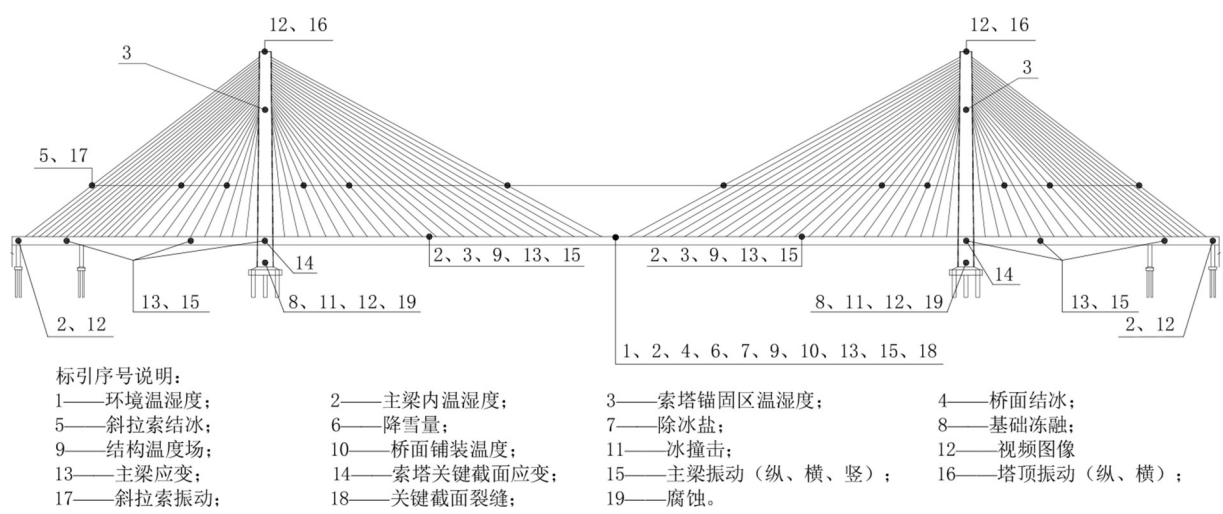
测点布设示意图见图A.1~图A.4。



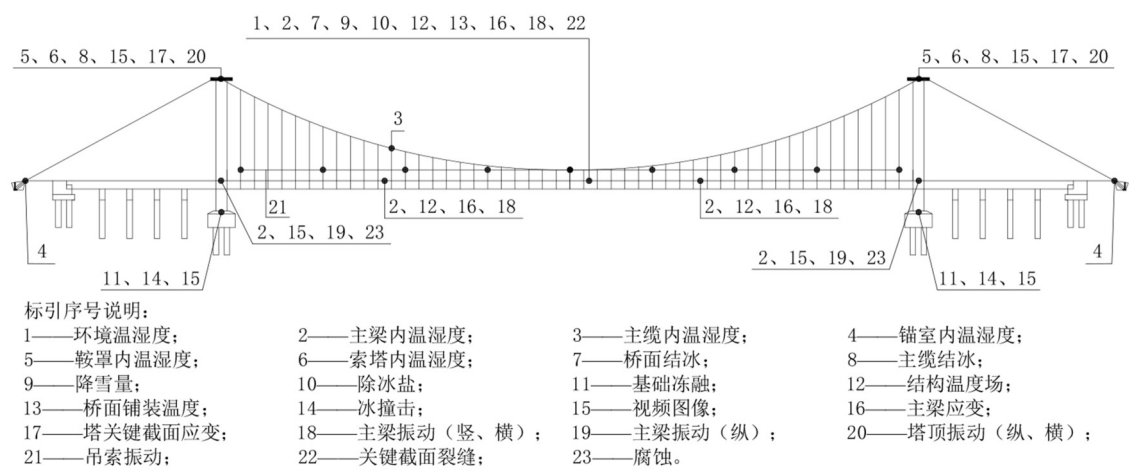
图A.1 梁桥测点布设示意图



图A.2 拱桥测点布设示意图



图A.3 斜拉桥测点布设示意图



图A.4 悬索桥测点布设示意图

附录 B
(资料性)
寒区桥梁结构监测要点说明

B.1 降雪等级标准划分

降雪等级标准通常是指在规定时间内持续降雪量折算成降雨量为等级划分的标准。该标准一般采用持续时间12小时和24小时两种标准。

降雪等级标准以24小时降水量为划分标准：降水量0.1~2.4毫米为小雪，1.3~3.7毫米为小到中雪，2.5~4.9毫米为中雪，3.8~7.4毫米为中到大雪，达到5.0~9.9毫米为大雪，7.5~14.9毫米为大到暴雪，降水量达到或超过10毫米为暴雪。

降雪等级标准以12小时降水量为划分标准：降水量0.1~0.9毫米为小雪，0.5~1.9毫米为小到中雪，1.0~2.9毫米为中雪，2.0~4.4毫米为中到大雪，达到3.0~5.9毫米为大雪，4.5~7.4毫米为大到暴雪，降水量达到或超过10毫米为暴雪。

表B.1 降雪等级标准划分表

降雪等级	12小时降雪量（毫米）	24小时降雪量（毫米）
小雪	0.1~0.9	0.1~2.4
小雪—中雪	0.5~1.9	1.3~3.7
中雪	1.0~2.9	2.5~4.9
中雪—大雪	2.0~4.4	3.8~7.4
大雪	3.0~5.9	5.0~9.9
大雪—暴雪	4.5~7.4	7.5~14.9
暴雪	>10	>10

B.2 拉吊索技术状况评定

B.2.1 吊索的评定指标及分级评定标准

- a) 渗水（吊索两端的锚固部位、冷铸锚头、横梁锚固构造、吊索管套、减震器等）评定标准见表 B.2；
- b) 覆冰评定标准见表 B.3；
- c) 锈蚀、腐蚀（钢丝、锚头、螺栓、钢管护套等）评定标准见表 B.4；
- d) 锚头损坏（松动、裂缝或破损）评定标准见表 B.5；
- e) 橡胶老化变质（吊索端部及减振器）评定标准见表 B.6；
- f) 掉漆、起皮评定标准见表 B.7；
- g) 防护套破坏评定标准见表 B.8；
- h) 吊索的防护层破坏（裂纹、破损、老化和积水）评定标准见表 B.9；
- i) 钢丝断丝评定标准见表 B.10。

表B.2 渗水

标度	评定标准
	定性描述
1	完好
2	有轻微渗水现象
3	个别构件防水渗漏装置损坏，明显渗水，构件有锈蚀现象
4	较多构件防水渗透装置损坏，多处构件明显渗水，构件有锈蚀现象

表B.3 覆冰

标度	评定标准
	定性描述
1	完好
2	有轻微覆冰现象
3	个别构件明显覆冰，构件有驰振现象
4	多处构件明显覆冰，构件有大幅驰振现象

表B.4 锈蚀

标度	评定标准	
	定性描述	定量描述
1	完好	—
2	表面有少量油脂和污垢，没有附着不牢的氧化皮、铁锈和油漆层，或表面有少量点蚀、锈斑，或镀锌钢丝出现锌腐蚀亮斑	—
3	表面普遍有点蚀、锈斑、锈坑，或氧化皮、油漆层因锈蚀面部分剥落或者可以刮除，或钢丝发生较严重锈蚀，或镀锌钢丝锌层出现铁腐蚀斑点和腐坑	锈蚀面积≤构件面积5%，或构件表面锈蚀孔洞≤2个
4	表面普遍有点蚀现象，氧化皮或油漆层因锈蚀而全面剥离，或钢丝发生较严重锈蚀并有一部分断裂，或镀锌钢丝严重腐蚀有开裂现象	锈蚀面积>构件面积5%，或构件表面锈蚀孔洞>2个

表B.5 锚头损坏

标度	评定标准
	定性描述
1	完好
2	个别锚头轻微破损
3	个别锚头破损、松动
4	较多锚头破损、松动或裂缝，个别冷铸锚头破损严重或裂缝超限，严重影响构件安全

表B. 6 橡胶老化变质

标度	评定标准	
	定性描述	定量描述
1	完好	
2	吊索端部及减振器部位橡胶轻微老化，表面有脏污；或减振措施极个别处表面轻微损坏	
3	吊索端部及减振器部位橡胶老化变形；或减振措施个别处出现松动或损坏	
4	吊索端部及减振器部位橡胶老化变形，并有破裂现象，局部还造成渗水；或减振措施出现较多处损坏，失去效用	

表B. 7 掉漆、起皮

标度	评定标准	
	定性描述	定量描述
1	完好	—
2	吊索表面局部面漆变色，起泡	累计面积≤构件面积的5%
3	吊索表面较大范围面漆轻微起皮起泡或剥落	累计面积>构件面积的5%且≤构件面积的15%
4	吊索表面较大范围面漆起皮、起泡或剥落	累计面积>构件面积的15%

表B. 8 防护套破坏

标度	评定标准	
	定性描述	定量描述
1	完好	
2	个别防护套及连接处轻微松动	
3	部分防护套以及连接处松动或套管顶没有密封	
4	较多防护套以及连接处松动或套管顶没有密封，局部造成渗水	

表B. 9 吊索的防护层破坏

标度	评定标准	
	定性描述	定量描述
1	完好	
2	个别吊索防护层轻微老化或破损	
3	个别吊索防护层老化、破损、裂纹	
4	吊索防护层老化、破损、裂纹或积水，造成局部渗水或锈蚀并伴有钢丝严重锈蚀现象	

表B. 10 钢丝断丝

标度	评定标准	
	定性描述	定量描述
1	完好	
2	—	
3	钢丝少量锈蚀，无断丝	
4	钢丝锈蚀，防腐层有大量麻坑，甚至出现断丝	

表B.10 钢丝断丝（续）

标度	评定标准
	定性描述
5	吊索钢丝大量严重锈蚀或损坏，钢丝断裂，甚至主梁出现变形，造成安全隐患

B.2.2 拉索的评定指标及分级评定标准

- a) 拉索覆冰评定标准见表 B.11；
- b) 拉索锈蚀、断丝评定标准见表 B.12；
- c) 滑移变位评定标准见表 B.13；
- d) 涂层损坏评定标准见表 B.14；
- e) 护套内的材料老化变质评定标准见表 B.15；
- f) 锚区内损坏评定标准见表 B.16；
- g) 拉索线形异常评定标准见表 B.17。

表B.11 覆冰

标度	评定标准
	定性描述
1	完好
2	有轻微覆冰现象
3	个别构件明显覆冰，构件有驰振现象
4	多处构件明显覆冰，构件有大幅驰振现象

表B.12 拉索锈蚀、断丝

标度	评定标准
	定性描述
1	完好
2	钢丝有极少量锈蚀
3	钢丝少量锈蚀，钢丝无断裂
4	钢丝较多锈蚀或损坏，钢丝断裂，敲面出现削弱
5	钢索裸露，钢丝大量严重锈蚀或损坏，钢丝断裂，主梁出现严重变形，造成安全隐患

表B.13 滑移变位

标度	评定标准
	定性描述
1	完好
2	—
3	—
4	斜拉索出现异常位移变形，且无法复位
5	斜拉索异常位移变形过大，导致桥面线形、纵向位移伸缩量出现显著异常，结构振动或摇晃显著，影响结构安全

表B. 14 涂层损坏

标度	评定标准
	定性描述
1	完好
2	涂层有轻微损坏、裂纹、起皮或剥落
3	较大范围涂层有损坏、裂纹、起皮、剥落
4	大范围涂层有损坏、裂纹、起皮或剥落

表B. 15 护套内的材料老化变质

标度	评定标准
	定性描述
1	完好
2	护套内的材料轻微老化，表面有脏污
3	护套内的材料老化变形
4	护套内的材料老化变形，并有破裂现象，局部还造成渗水

表B. 16 锚固区损坏

标度	评定标准
	定性描述
1	完好
2	个别锚头或锚拉板出现轻微破损
3	个别锚头出现破损，松动或出现不密封现象，但未造成拉索锈蚀，个别锚拉板出现疲劳损伤状况
4	较多锚头或锚拉板出现破损、松动或裂缝，锚头锈蚀，锚固区有明显的受力裂缝
5	较多锚头或锚拉板出现严重破损、松动、裂缝，锚头积水锈蚀严重，锚固区有明显的受力裂缝，且缝宽>0.2mm

表B. 17 拉索线形异常

标度	评定标准
	定性描述
1	完好
2	—
3	—
4	拉索线形出现明显异常或有异常声音
5	拉索线形出现显著异常，桥面线形出现显著异常，结构振动摇晃明显，主梁出现严重变形

拉吊索技术状况评分计算应按现行《公路桥梁技术状况评定标准》（JTG/T H21）第4.1条执行。
拉吊索技术状况分类界限宜按表B.18规定执行。

表B. 18 拉索技术状况分类界限表

技术状况等级	1类	2类	3类	4类	5类
技术状况评分	95~100	80~95	60~80	40~60	0~40

B.2.3 拉吊索适应性评定

拉吊索适应性评定可按如下方法执行：

- a) 建桥时，可在拉索锚头或索体内埋入传感器直接测试索力；
- b) 成桥后，拉吊索索力测量可采用振动法，也可利用锚下预先安装的测力传感器直接测量。采用振动法检测时应事先解除索的阻尼装置并通过现场试验确定换算索长，并依据不少于前五阶特征频率计算索力的平均值；索的频率可通过加速度传感器测试法、激光测试法、短波雷达测试法以及图像测试法进行获取；宜通过多次测量、多次平均和提高分辨率以减少环境随机信号对索力测试的影响，提高计算精度；
- c) 索力偏差率 K_t 可按式（B.1）计算：

$$K_t = \frac{T - T_d}{T_d} \times 100\% \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

T ——实测索力值；
 T_d ——设计索力值。

- d) 拉吊索强度应按式（B.2）计算评定：

$$\frac{T_j}{A} \leq Z_1 [\sigma] \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

T_j ——计入活载影响修正系数的计算索力；
 A ——索的计算面积；
 $[\sigma]$ ——容许应力限值；
 Z_1 ——承载能力检算系数。

拉吊索承载能力检算系数 Z_1 宜按表B.19取值。

表B.19 拉吊索承载能力检算系数 Z_1 值

缺损状况评定标度	性状描述	Z_1 值
1	表面防护完好，锚头无积水，锚下混凝土无裂缝	1.00~1.10
2	表面防护基本完好，有细微裂缝，锚头无锈蚀，锚固区无裂缝	0.95~1.00
3	表面防护有少量裂缝，伴有少量锈迹，锚头有轻微锈蚀，锚固区有细小裂缝	0.90~0.95
4	表面防护普遍开裂，并有部分脱落，锚头锈蚀，锚固区有明显的受力裂缝	0.85~0.90
5	表面防护普遍开裂，并有大量脱落，钢索裸露，钢索锈蚀严重，锚头积水锈蚀，锚固区有明显的受力裂缝，裂缝宽度大于0.2mm	≤0.85

- e) 缆索结构体系桥梁的适应性评定宜按周期进行，设计未规定时，接养后首次评定时间宜为交工投入运营后 10~15 年，其后可根据评定结果每 3~8 年评定一次；
- f) 缆索结构体系桥梁评定的结果应与经常检查、预防养护周期、养护规划结合，并对其进行动态调整。

B.3 基础冻融的温湿度监测

针对寒区昼夜温差大这一气候特点，宜监测基础温度、湿度随时间变化的规律，主要对下列信息予以统计并记录，如表B.20所示：

- a) 日平均温度、湿度随时间的变化曲线的原始记录；
- b) 每日平均温度、湿度；

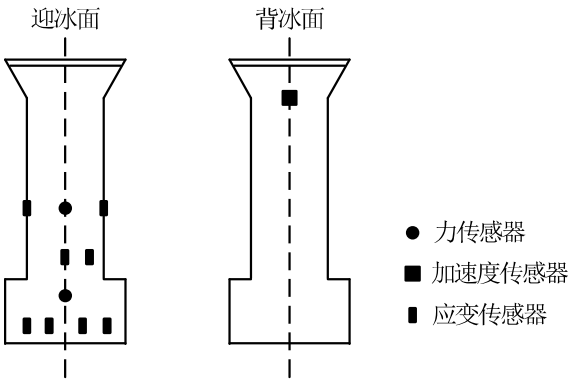
- c) 每日最高温度、最大湿度；
- d) 每日最低温度、最小湿度；
- e) 每日夜间温差骤降最大值；
- f) 温湿度极值及温差极值出现的位置。

表B. 20 基础温度、湿度统计记录表

寒区基础温、湿度监测每日记录表			
日 期	XXXX年XX月XX日		
监测参数	监测数值	出现位置	记录员
日平均温度			
日平均湿度			
日最高温度			
日最低温度			
日最大湿度			
日最小湿度			
日温差最大值			

B. 4 冰激振动监测方法

加速度传感器布置在模型桥墩的背冰面，力传感器和应变传感器布置在模型桥墩的迎冰面，传感器布置图和如图B.1所示。力传感器布置在撞击位置的正中间，根据数值模拟得到撞击位置附近的应变响应最大，所以将应变传感器布置在撞击位置的正下面。加速度传感器布置在背冰面的桥墩顶部，因为对于悬臂结构顶端的响应最大，同时不干扰冰排撞击过程。



图B.1 传感器布设示意图

宜采用10min加速度均方根值作为冰激振动判定指标，也可补充其他参数。按式（B.3）计算：

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中：
 S_a ——加速度均方根值，单位为米每平方秒（m/s²）；
 a_i ——主梁振动加速度，单位为米每平方秒（m/s²）；
 N ——10min加速度采样点数。

B. 4. 1 冰激振动超限阈值宜按表规定选取，检查建议宜符合下列规定：

- a) 超限一级，提醒持续关注；
- b) 超限二级，提醒采取车辆限速等管理措施；
- c) 超限三级，提醒封闭桥梁，按和的规定进行桥梁结构健康度评估。

B.4.2 应提供桥梁冰激振动事件分析报告，报告内容宜包括：事件全过程、冰激振动后数据分析结果。

数据分析宜符合下列规定：

- a) 分析河流上方 10min 平均风速、流域内 10min 平均流速、冰排速度；
- b) 分析主梁 10min 横向加速度均方根值、模态参数变化；
- c) 分析冰激振动全过程持续时间、风况条件、河流条件、加速度和位移均方根值、振动频率。