UDC

中国土木工程学会标准

P T/CCES\*\*-2019

桥梁健康监测传感器选型与布设技术规程Technical Regulation on Sensor Selection and Placement for Bridge Health Monitoring

**（征求意见稿）**

2019–XX–XX 发布 2019–XX–XX 实施

中国土木工程学会 发布

**中国土木工程学会标准**

桥梁健康监测传感器选型与布设技术规程

Technical Regulation on Sensor Selection and Placement for Bridge Health Monitoring

**T/CCES\*\*-2019**

批准单位：中国土木工程学会

施行日期：2019年 月 日

中国建筑工业出版社

2019 北 京

**前 言**

根据中国土木工程学会标准与出版工作委员会关于发布《2018年中国土木工程学会标准研编计划（第一批）》（土标委[2018]2号）通知的要求，制定本规程。

本规程在编制过程中，编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国际标准和国内外先进标准，并广泛征求意见，最后经审查定稿。

本规程共分五章，主要技术内容包括：基本规定、环境与荷载监测传感器、结构监测传感器。

本规程由中国土木工程学会标准与出版工作委员会归口管理，由大连理工大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送解释单位（地址：辽宁省大连市甘井子区凌工路2号，大连理工大学土木工程学院，邮编：116023），以供今后修订时参考。

主编单位：\*\*\*

参编单位：\*\*\*

主要起草人：\*\*\*

主要审查人：\*\*\*

目 次

**1** 总则

**2**  术语和符号

**2.1**  术语

**2.2**  符号

**3** 基本规定

**3.1** 主要监测内容

**3.2**  传感器选型原则

**3.3** 传感器布设要求

**4** 环境与荷载监测传感器

**4.1** 车辆荷载

**4.2**  环境温度

**4.3** 环境湿度

**4.4** 风荷载

**4.5**  地震动

**4.6** 腐蚀介质

**5**  结构监测传感器

**5.1** 主梁

**5.2** 桥拱

**5.3** 桥塔

**5.4** 缆索和吊杆

**5.5** 锚碇

**5.6** 伸缩缝

**5.7** 支座

**5.8** 桥墩和桥台

**5.9** 基础

本规程用词说明

附：条文说明

Contents

**1 General provisions**

**2 Terms and symbols**

**2.1**  Terms

**2.2** Symbols

**3 Basic requirements**

**3.1** Main monitoring contents

**3.2**  Principles of sensor selection

**3.3** Requirements of sensor placement

**4 Sensors for environment and load monitoring**

**4.1** Vehicle loads

**4.2**  Environmental temperature

**4.3** Environmental humidity

**4.4** Wind loads

**4.5**  Ground motion

**4.6** Corrosive media

**5 Sensors for structure monitoring**

**5.1** Girders

**5.2** Arches

**5.3** Towers

**5.4** Cables and suspenders

**5.5** Anchorages

**5.6** Expansion Joints

**5.7** Supports

**5.8** Piers and abutments

**5.9** Foundations

**Explanation of wording in this technical regulation**

**Addition: Explanation of provisions**

1 总则

**1.01** 为规范桥梁健康监测系统传感器的选型与布设，提高系统的设计和施工质量，做到安全可靠、技术先进、经济合理、便于维护，制定本规程。

**1.02** 本规程适用于大跨径梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥健康监测系统中传感器的选型、定位、安装和保护。

**1.03** 桥梁健康监测系统传感器的选型与布设应主要满足运营期监测的目的和功能，宜兼顾施工监控和成桥荷载试验的要求，进行一体化设计。

**1.04** 桥梁健康监测传感器的选型与布设，除应执行本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

**2.1.1** 结构健康监测 structural health monitoring

利用现场的、无损的、实时的方式采集环境与结构信息，分析结构反应的各种特征，获取结构因环境因素、损伤或退化而造成的改变。

**2.1.2** 伸缩缝 expansion joint

为适应材料膨缩或结构变形的需要而在桥梁结构中设置的间隙。

**2.1.3** 伸缩装置 expansion device

为使车辆平稳通过桥面并满足桥梁上部结构变形的需要，在桥梁伸缩缝处设置的由橡胶和钢材等构件组成的各种装置的总称。

**2.1.4** 支座 bearing

将桥梁上部结构承受的荷载和变形（位移和角转）可靠地传递给桥梁下部结构的支承和固定桥梁上部结构的部件。

**2.1.5** 主缆 main cable

以桥塔及支墩为支承、两端锚固于锚碇，并通过吊索悬挂加劲梁的缆索。

**2.1.6** 吊杆（索） hanger cable

悬索桥中连接主缆与桥面系或拱桥中连接主拱与桥面系的构件，一般可用钢丝索、钢绞线或钢丝绳制作。

**2.1.7** 索股 cable strand

由高强镀锌钢丝组成的丝股，可预制或空中纺制而成，是主缆的组成部分。

**2.1.8** 传感器频响范围 sensor frequency range

传感器在此频率范围内，输入信号频率的变化不会引起其灵敏度和相位发生超出限值的变化。

**2.1.9** 锚碇 anchor block

锚固主缆索股，承受主缆拉力，支承于地基上（或嵌固于岩体中）的结构。

**2.1.10** 绕流 flow

指流体绕物体外部的流动

**2.1.11** 自由场 free field

均匀各向同性的媒质中，边界影响可以不计的场

**2.1.12**沉降 settlement

桥墩（台）、基础及地面在荷载作用下产生的竖向移动，包括下沉和上升。其下沉或上升值成为沉降量。

**2.1.13**冲刷 scouring

因桥孔压缩水流以及桥墩（台）阻碍水流，导致桥墩（台）周围河床的冲刷。

2.2 符号（注：报批前从正文中拷贝）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 符 号 | 定 义 | 位置（节） |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

3 基本规定

3.1 主要监测内容

**3.1.1** 监测内容应根据监测系统成本、运营环境复杂性、桥梁重要性、桥梁力学特征、桥梁易损性分析结果、安全评估需求和运营维护需求综合确定。

**3.1.2** 监测内容应包括荷载监测、结构响应监测、几何变形监测和耐久性监测。

**3.1.3** 荷载监测宜包括车辆荷载、环境温度、环境湿度、风荷载和地震动。

**3.1.4** 结构响应监测宜包括振动、应变、结构温度和索力。

**3.1.5** 几何变形监测宜包括变形、位移、沉降和倾角。

**3.1.6** 耐久性监测宜包括氯离子浓度、混凝土裂缝、混凝土侵蚀深度、钢筋锈蚀和基础冲刷深度。

**3.1.7** 梁桥的监测内容应按表3.1.7进行选择。

表3.1.7 梁桥的监测内容

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 类 别 | 内 容 | 参 数 | 要 求 |
| 荷载 | 车辆荷载 | 断面交通流、车辆总重、轴重、轴距、轴数、车型、车速 | ■ |
| 温度 | 箱型梁内部温度 | ■ |
| 梁外部温度 | ■ |
| 梁内部温度 | △ |
| 日照强度 | △ |
| 太阳辐射强度 | △ |
| 湿度 | 箱型梁内部湿度 | ■ |
| 梁外部湿度 | ■ |
| 梁内部湿度 | △ |
| 风荷载 | 风速、风向 | △ |
| 地震动 | 承台顶或桥墩底部加速度 | △ |
| 结构响应 | 主梁 | 竖向加速度 | ■ |
| 横向加速度 | △ |
| 纵向加速度 | △ |
| 应变 | ■ |
| 温度 | ■ |
| 桥墩和桥台 | 应变 | △ |
| 几何变形 | 主梁 | 竖向变形 | ■ |
| 横向变形 | △ |
| 伸缩缝 | 位移 | ■ |
| 支座 | 位移 | ■ |
| 桥墩和桥台 | 沉降 | △ |
| 倾角 | △ |
| 基础 | 沉降 | △ |
| 耐久性 | 腐蚀介质 | 氯离子浓度 | △ |
| 主梁 | 混凝土裂缝 | △ |
| 混凝土侵蚀深度 | △ |
| 钢筋锈蚀 | △ |
| 桥墩和桥台 | 混凝土裂缝 | △ |
| 钢筋锈蚀 | △ |
| 基础 | 基础冲刷深度 | △ |
| 注：“■”为应监测参数，“△”为宜监测参数。 | | | |

**3.1.8** 拱桥的监测内容应按表3.1.8进行选择。

表3.1.8 拱桥的监测内容

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 类 别 | 内 容 | 参 数 | 要 求 |
| 荷载 | 车辆荷载 | 断面交通流、车辆总重、轴重、轴距、轴数、车型、车速 | ■ |
| 温度 | 箱型梁内部温度 | ■ |
| 梁外部温度 | ■ |
| 箱型主拱内部温度 | ■ |
| 主拱外部温度 | ■ |
| 日照强度 | △ |
| 太阳辐射强度 | △ |
| 湿度 | 箱型梁内部湿度 | ■ |
| 梁外部湿度 | ■ |
| 箱型主拱内部湿度 | △ |
| 主拱外部湿度 | △ |
| 风荷载 | 拱顶风速、风向 | △ |
| 桥面风速、风向、风压 | △ |
| 地震动 | 承台顶或桥墩底部加速度 | △ |
| 结构响应 | 主梁 | 竖向加速度 | ■ |
| 横向加速度 | △ |
| 纵向加速度 | △ |
| 应变 | ■ |
| 温度 | ■ |
| 桥拱 | 竖向加速度 | ■ |
| 横向加速度 | ■ |
| 纵向加速度 | △ |
| 应变 | ■ |
| 温度 | ■ |
| 吊杆 | 索力 | ■ |
| 桥墩和桥台 | 应变 | △ |
| 几何变形 | 主梁 | 竖向变形 | ■ |
| 横向变形 | △ |
| 桥拱 | 竖向变形 | ■ |
| 横向变形 | ■ |
| 纵向变形 | △ |
| 伸缩缝 | 位移 | ■ |
| 支座 | 位移 | ■ |
| 桥墩和桥台 | 沉降 | △ |
| 倾角 | △ |
| 基础 | 沉降 | △ |
| 耐久性 | 腐蚀介质 | 氯离子浓度 | △ |
| 主梁 | 混凝土裂缝 | △ |
| 混凝土侵蚀深度 | △ |
| 钢筋锈蚀 | △ |
| 桥拱 | 混凝土裂缝 | △ |
| 混凝土侵蚀深度 | △ |
| 钢筋锈蚀 | △ |
| 桥墩和桥台 | 混凝土裂缝 | △ |
| 钢筋锈蚀 | △ |
| 基础 | 基础冲刷深度 | △ |
| 注：“■”为应监测参数，“△”为宜监测参数。 | | | |

**3.1.9** 斜拉桥的监测内容应按表3.1.9进行选择。

表3.1.9 斜拉桥的监测内容

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 类 别 | 内 容 | 参 数 | 要 求 |
| 荷载 | 车辆荷载 | 断面交通流、车辆总重、轴重、轴距、轴数、车型、车速 | ■ |
| 温度 | 箱型梁内部温度 | ■ |
| 梁外部温度 | ■ |
| 桥塔内部温度 | △ |
| 桥塔外部温度 | △ |
| 日照强度 | △ |
| 太阳辐射强度 | △ |
| 湿度 | 箱型梁内部湿度 | ■ |
| 梁外部湿度 | ■ |
| 桥塔内部湿度 | △ |
| 桥塔外部湿度 | △ |
| 风荷载 | 塔顶风速、风向 | ■ |
| 塔顶风压 | △ |
| 桥面风速、风向 | ■ |
| 桥面风压 | △ |
| 地震动 | 承台顶或桥墩底部加速度 | △ |
| 结构响应 | 主梁 | 竖向加速度 | ■ |
| 横向加速度 | ■ |
| 纵向加速度 | △ |
| 应变 | ■ |
| 温度 | ■ |
| 桥塔 | 纵向加速度 | ■ |
| 横向加速度 | ■ |
| 应变 | ■ |
| 温度 | ■ |
| 斜拉索 | 索力 | ■ |
| 桥墩和桥台 | 应变 | △ |
| 几何变形 | 主梁 | 竖向变形 | ■ |
| 横向变形 | ■ |
| 桥塔 | 纵向变形 | ■ |
| 横向变形 | ■ |
| 塔顶倾角 | ■ |
| 伸缩缝 | 位移 | ■ |
| 支座 | 位移 | ■ |
| 桥墩和桥台 | 沉降 | △ |
| 倾角 | ■ |
| 基础 | 沉降 | △ |
| 耐久性 | 腐蚀介质 | 氯离子浓度 | △ |
| 主梁 | 混凝土裂缝 | △ |
| 混凝土侵蚀深度 | △ |
| 钢筋锈蚀 | △ |
| 桥塔 | 混凝土裂缝 | △ |
| 混凝土侵蚀深度 | △ |
| 钢筋锈蚀 | △ |
| 桥墩和桥台 | 混凝土裂缝 | △ |
| 基础 | 基础冲刷深度 | △ |
| 注：“■”为应监测参数，“△”为宜监测参数。 | | | |

**3.1.10** 悬索桥的监测内容应按表3.1.10进行选择。

表3.1.10 悬索桥的监测内容

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 类 别 | 内 容 | 参 数 | 要 求 |
| 荷载 | 车辆荷载 | 断面交通流、车辆总重、轴重、轴距、轴数、车型、车速 | ■ |
| 温度 | 箱型梁内部温度 | ■ |
| 梁外部温度 | ■ |
| 桥塔内部温度 | △ |
| 桥塔外部温度 | △ |
| 日照强度 | △ |
| 太阳辐射强度 | △ |
| 湿度 | 箱型梁内部湿度 | ■ |
| 梁外部湿度 | ■ |
| 桥塔内部湿度 | △ |
| 桥塔外部湿度 | △ |
| 风荷载 | 塔顶风速、风向 | ■ |
| 塔顶风压 | △ |
| 桥面风速、风向 | ■ |
| 桥面风压 | △ |
| 地震动 | 承台顶或桥墩底部加速度 | △ |
| 结构响应 | 主梁 | 竖向加速度 | ■ |
| 横向加速度 | ■ |
| 纵向加速度 | △ |
| 应变 | ■ |
| 温度 | ■ |
| 桥塔 | 纵向加速度 | ■ |
| 横向加速度 | ■ |
| 应变 | ■ |
| 温度 | ■ |
| 缆索 | 索力 | ■ |
| 锚碇 | 应变 | △ |
| 桥墩和桥台 | 应变 | △ |
| 几何变形 | 主梁 | 竖向变形 | ■ |
| 横向变形 | ■ |
| 桥塔 | 纵向变形 | ■ |
| 横向变形 | ■ |
| 塔顶倾角 | ■ |
| 伸缩缝 | 位移 | ■ |
| 支座 | 位移 | ■ |
| 桥墩和桥台 | 沉降 | △ |
| 倾角 | ■ |
| 基础 | 沉降 | △ |
| 耐久性 | 腐蚀介质 | 氯离子浓度 | △ |
| 主梁 | 混凝土裂缝 | △ |
| 混凝土侵蚀深度 | △ |
| 钢筋锈蚀 | △ |
| 桥塔 | 混凝土裂缝 | △ |
| 混凝土侵蚀深度 | △ |
| 钢筋锈蚀 | △ |
| 锚碇 | 钢筋锈蚀 | △ |
| 桥墩和桥台 | 混凝土裂缝 | △ |
| 基础 | 基础冲刷深度 | △ |
| 注：“■”为应监测参数，“△”为宜监测参数。 | | | |

3.2 传感器选型原则

**3.2.1** 传感器选型应技术成熟、性能先进、经济实用、安装维护方便和便于系统集成。

**3.2.2** 传感器选型应满足测量范围、测量精度、分辨率、灵敏度、线性度、重复性、动态频响特性、稳定性、耐久性和环境适应性要求。

3.3 传感器布设原则

**3.3.1** 传感器布设的内容应包括传感器的布设位置、安装要求及保护措施。

**3.3.2** 传感器的布设位置应遵循“代表性、经济性、实用性”的原则，宜根据桥梁荷载、桥梁振动、几何变形、结构响应及结构易损性的特点布设。

**3.3.3** 传感器的安装应从保障传感器的使用性能出发，可根据实际情况选择将传感器埋入结构内部或用螺栓连接及焊接方式固定在结构表面，但应保证安装固定方式牢固可靠。传感器安装应保证连线的便捷和数据传输的质量。

**3.3.4** 传感器的保护应从保障传感器的耐久性出发，可根据实际情况选择设置保护涂层、安装密封性保护盒等措施，宜定期清洁传感器外壳、清理内部灰尘，保证适宜传感器长期工作的环境。

4 环境与监测传感器

4.1 车辆荷载

**4.1.1** 桥梁车辆荷载监测项目应包括荷载速度、荷载大小、车辆轴距、车型，以及由单车荷载信息汇总的统计指标，包括交通流量、流向和平均车速。

**4.1.2** 使用车辆动态称重系统进行桥梁车辆荷载监测。根据车辆行驶速度，分为高速动态称重系统和低速动态称重系统。高速动态称重系统向下兼容低速车辆荷载监测。高速和低速动态称重系统的速度分界值一般在15~20km/h之间；桥梁的最高行驶速度一般高于该分界值，因此宜选择高速动态称重系统。

**4.1.2** 根据桥梁车辆荷载监测项目，车辆动态称重系统选型应考虑的技术指标有：速度范围、速度精度、最大称重、称重精度、轴距精度、车型分类精度、流量（计数）精度、工作温度和传感器类型。技术指标宜满足表4.1.3的要求。对于用途具有法律效力（限重执法、计重收费等）的动态称重系统，称重精度应高于95%。

表4.1.3 车辆动态称重系统主要技术指标

|  |  |
| --- | --- |
| 技术参数 | 数值 |
| 速度范围 | 20~180km/h |
| 速度精度 |  |
| 最大称重 | 30t/轴 |
| 称重精度 | >93%（整车） |
| 轴距精度 |  |
| 车型分类精度 | >95% |
| 流量精度（计数） | >98% |
| 工作温度 | ℃ |
| 传感器类型 | 压电式传感器 |

注：各种车型的分类精度如下：1）小轿车95%；2）载重货物车98%；3）公交及大客车95%；4）铰接载重货物车99%；5）旅行拖挂车99%。

4**.1.3** 动态称重系统一般在施工过程中安装。安装应符合下列要求：

1. 安装位置宜为引桥混凝土主梁的路面铺装层内；

2. 安装路段宜笔直，纵向（行驶方向）坡度不超过3%，横向坡度不超过1%；

3. 系统基础框架应布设排水管，防止系统因积水和结冰造成测量精度降低。排水管宜取mm；

4. 应使用砂浆封闭电缆管/排水管和系统基础框架之间的空腔，并使用环氧树脂浇筑保护层；

5. 可在动态称重系统附近配套安装高清摄像机用于车辆外观记录。

4.2 环境温度

**4.2.1** 环境温度监测传感器应具有结构坚固、使用寿命长、稳定性好、功耗低、传输距离长、抗外界干扰能力强的特点。

**1** 健康监测系统中可选用热电偶、热电阻、电子式以及光纤光栅温度传感器对环境温度进行监测，宜选用热电阻、电子式温度传感器作为环境温度监测传感器。

**2** 温度传感器量程的选择应覆盖桥址区已有气象观测资料记录的极值。当缺少相应气象资料时，温度传感器的最低测量温度值不宜高于-50℃，最高测量温度不宜低于80℃。

**3** 用于监测环境温度的传感器应放置在气象观测专用的百叶箱中。百叶箱应放置在桥梁结构通风良好且不受日光直射的部位。

**4.2.2** 健康监测系统中用于日照辐射强度监测的传感器应具有使用寿命长、稳定性好、功耗低、传输距离长、抗外界干扰能力强的特点。

**1** 日照辐射强度监测宜选用硅光电池照度传感器。

**2** 日照辐射强度传感器的量程应不小于200000勒克斯。

**3** 日照辐射强度监测传感器的安装应确保传感器测试面板接受太阳辐射的角度与结构被测面接受太阳辐射角度保持一致。

4.3 环境湿度

**4.3.1** 健康监测系统中环境湿度监测宜选择电容式湿度传感器。

**4.3.2** 环境湿度传感器宜布置在气象观测专用的百叶箱中。百叶箱应放置在桥梁结构通风良好且不受日光直射的部位。

4.4 风荷载

**4.4.1** 风速风向仪选型应符合下列要求：

**1** 风速和风向监测宜选用三向超声风速仪，可选用机械式风速仪。

**2** 风速仪量程不应小于其安装高度的设计风速。

**3** 风速测量精度不宜小于0.5m/s。

**4.4.2** 风速风向仪位置和数量选择应符合下列要求：

**1** 已进行风洞试验的桥梁结构，宜根据风洞试验结果布置测点；对于未进行风洞试验的桥梁结构，宜选择自由场及对风致响应敏感的构件及节点位置。

**2** 风速仪应安装在工程结构绕流影响区域之外。

**3** 测点宜选择在跨中、塔顶、拱顶，其安装位置宜尽量保证各方向无遮挡，应能够监测自由场风速和风向。

**4.4.3** 风速风向仪安装、保护、标定应符合下列要求：

**1** 风速风向仪安装时中轴应垂直，宜安装在专用支架上，支架应具有足够刚度和强度，与桥体连接牢固，并满足抗风设计要求，支架伸出主体结构（主梁、索塔、拱顶等）边缘不宜少于3m。

**2** 防护要求：在符合《建筑物防雷设计规范》（GB50057）的环境下耐受雷击且不影响正常工作；防护等级达到IP65标准。

**3** 风向仪的定北标志方向与正北方的角度偏差应小于0.5°。

**4.4.4** 风压传感器选型应符合下列要求：

**1** 风压监测宜选用微压量程、具有可测正负压的压力传感器。

**2** 风压传感器测量精度宜在满量程的0.2%以内。

**3** 应能在雷雨环境下正常工作。

**4.4.5** 风压传感器位置和数量宜根据风洞试验的数据和结构分析的结果确定；无风洞试验数据情况下，可根据风荷载分布特征及结构分析结果布置测点。

**4.4.6** 风压传感器安装、保护应符合下列要求：

**1** 风压传感器的安装应避免对外观的影响。

**2** 为防止传感器受雨水和湿润空气的侵袭，宜对传感器采取防水保护。

4.5 地震动

**4.5.1** 地震动传感器选型应符合下列要求：

**1** 桥址处地震监测可选用力平衡式加速度传感器、压电式加速度传感器、电容式加速度传感器。

**2** 频响范围宜在0 Hz ~100 Hz，量程不宜低于±2g。

**4.5.2** 地震动传感器位置和数量选择应符合下列要求：

**1** 可布置在桥岸地表场地、承台顶或桥墩底部。

**2** 桥岸地表区域可将测点布设于护岸、锚淀锚室内、近桥址监控中心等自由场地上，水体区域可布置于人可到达的索塔和桥墩底部或承台顶部，并易于保护和维护。

**4.5.3** 地震动传感器安装、保护应符合下列要求：

**1** 传感器安装在安装盒内，传感器安装盒再固定在底座上，安装时，保证传感器的安装位置和方向正确无误；位置确定后，安装螺钉时使用螺纹锁固胶加以锁固，以保证传感器及其安装盒的安装牢固、可靠， 完成安装的传感器安装盒及底座应具有良好的防尘和防水功能。

**2** 防护要求在符合《建筑物防雷设计规范》（GB50057）的环境下可耐受雷击且不影响正常工作；防护等级达到IP68标准。

4.6 腐蚀介质

**4.6.1** 腐蚀介质监测的参数通常为氯离子浓度、硫酸盐离子浓度、pH值等，也可通过对混凝土电阻率、不同深度的电位、腐蚀电流等进行监测以掌握腐蚀情况。

**4.6.2** 腐蚀介质监测传感器的选取应符合下列规定：

**1** 腐蚀传感器应能分辨腐蚀类型、测定腐蚀速率。

**2** 腐蚀传感器应具有较强的抗腐蚀、电磁、温度和湿度干扰的能力。

**3** 氯离子浓度监测可采用由Ag/AgCl电极组成的氯离子含量监测传感器。

**4**  酸雨监测可采用酸雨pH值监测装置，其工作温度0~50℃，并应满足相关专业规范要求。

**5**  钢筋表面pH值监测可采用pH值传感器，漂移应≤0.01pH/24h，测量范围0~14pH，供电电压5~30VDC。

**4.6.3** 腐蚀介质监测传感器的安装应符合下列规定：

**1** 对于新建主梁，可在施工过程中将传感器埋入预定的位置。

**2** 对于既有主梁，可在拟监测部位设置外置传感器。

**3** 根据传感器工作要求和设计要求合理选择预埋深度和倾角。

5 结构监测传感器

5.1 主梁

**5.1.1** 主梁一般性监测项目应包括振动、变形、应变和温度，部分地区应进行腐蚀监测，见表3.1.5规定。

**5.1.2** 主梁振动监测应包括竖向、横向和纵向振动监测；监测参数可为加速度、速度和位移。

**5.1.3** 主梁振动监测方法可分为相对测量法和绝对测量法。

**5.1.4** 相对测量法应符合下列规定：

**1** 应在被监测结构外设置一个固定参考点。

**2** 在被监测结构的测点上或附近设有标靶、反光镜、三角反射器等标志。

**3** 测量仪器可选用激光多普勒测速仪、高速摄像仪、雷达扫描仪等。

**5.1.5** 绝对测量法应符合下列规定：

**1** 加速度测量可选用力平衡式加速度传感器、压电式加速度传感器、压阻式加速度传感器、电容式加速度传感器。

**2** 速度测量可选用电动位移摆速度传感器、磁电式传感器等。

**3** 位移测量可选用卫星定位系统。

**5.1.6** 主梁振动监测前，应进行结构动力特性分析，预估结构频率范围，从而选定适当的传感器。

**5.1.7** 主梁振动监测测点应符合下列规定：

**1** 振动监测测点应根据桥梁结构动力计算结果、振型特点以及所监测振型阶数进行确定。

**2** 振动监测测点宜布置在结构主要振型中振幅较大的位置上，并避开振型节点位置，一般布置在主跨跨中、1/4跨、3/4跨和边跨跨中。

**3** 宽桥面的梁桥和拱桥以及大跨径斜拉桥和悬索桥，测点宜上下游对称布置，并同时监测三个方向的振动。

**5.1.8** 加速度传感器的选取应符合下列规定：

**1** 对于基频较低的大跨径桥梁，宜选用低频性能优良的力平衡式或电容式加速度传感器，量程不宜小于±2g，横向灵敏度宜小于1%，频响范围宜在0 Hz ~ 100 Hz。

**2** 对于自振频率较高的桥梁，可选用电容式或压电式加速度传感器，量程不宜小于±20g，横向灵敏度宜小于5%，频响范围宜在0.1 Hz ~ 1000 Hz。

**5.1.9** 主梁振动监测传感器的安装应符合下列规定：

**1** 传感器安装位置表面应保持清洁与平坦。

**2** 传感器安装宜采用焊接的方式，也可采用螺栓锚固方式进行安装。

**3** 安装于结构表面的传感器应用不锈钢保护盒密封保护，保护盒与结构连接处用环氧树脂密封，保护盒应留孔穿线。

**5.1.10** 主梁振动监测传感器采样频率应大于所需最高频率的2倍，宜取5~10倍。

**5.1.11** 主梁变形监测参数包括主梁的竖向位移、横向及纵向水平位移、以及转角。

**5.1.12** 主梁变形监测方法可选用卫星定位系统、光学测试法、机械测试法。

**5.1.13** 主梁整体变形监测应采用平面坐标系统或大地坐标系统，并建立变形监测基准网。

**5.1.14** 主梁变形监测应符合下列规定：

**1** 对于小跨径梁桥和拱桥，可根据设计要求进行变形监测。

**2** 大跨径梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥应进行变形监测。

**3** 变形监测位置宜布置在主跨跨中、1/4跨、3/4跨和边跨跨中。

**4** 宽桥面的主梁和平面呈弧形的主梁应进行扭转变形监测，测点宜上下游对称布置。

**5.1.15** 主梁变形监测传感器应根据主梁及其附属设施的特点和监测要求来选取，可选用全球导航卫星系统、位移计、液压连通管系统和倾角仪。

**5.1.16** 主梁变形监测传感器的安装应符合下列规定：

**1** 监测基准站应选取在地基稳定、视野开阔、远离人为和电磁干扰的地方。

**2** 变形监测站应安装在能真实反映主梁变形的位置上，避免视线遮挡，且应远离人为和电磁干扰。

**5.1.17** 主梁变形监测传感器采样频率应符合下列规定：

**1** 水平位移与竖向位移的监测频率应一致。

**2** 动态变形监测采样频率应不小于结构最高频率的2倍，宜取5~10倍。

**3** 静态变形监测采样频率一般情况不宜小于1次/60min。

**4** 台风、洪水等特殊荷载时期，可增大采样频率。

**5.1.18** 主梁应变监测应符合下列规定：

**1** 对于混凝土桥梁，应重点监测底板、顶板、腹板等易开裂的地方。

**2** 对于钢结构桥梁，应重点监测底板、顶板、U肋焊接处、横隔板焊接处等易疲劳位置。

**3** 混凝土腹板和易疲劳位置应选用三向应变传感器。

**5.1.19** 主梁应变监测传感器可选用电阻式应变计、振弦式应变计、光纤类应变计等，可根据监测要求和被测结构或构件应力场及其动态特性综合确定。

**5.1.20** 主梁应变监测传感器应符合下列规定：

**1** 应变传感器量程应不小于最大预测值的1.5~2倍。

**2** 应变传感器应具有温度补偿功能。

**3** 当采用电阻式应变计时，应对导线电阻进行修正。

**5.1.21** 主梁应变监测传感器的安装应符合下列规定：

**1** 对于新建混凝土梁，宜在施工过程中将埋入式应变传感器固定在预定位置上，并有适当的保护装置防止浇筑混凝土过程中损坏传感器。

**2** 对于既有混凝土梁，应采用螺栓将应变传感器锚固在结构表面。

**3** 对于钢梁，应采用焊接方式将应变传感器固定在结构表面，并设置保护涂层或安装保护盒。

**4** 安装固定应变传感器后，必须记录传感器初始值以及当前温度值。

**5.1.22** 主梁应变监测传感器采样频率应符合下列规定：

**1** 动应变采样频率应不小于结构最高频率的2倍，宜取5~10倍。

**2** 静应变采样频率一般情况下不宜小于1次/60min。

**3** 应变采样频率宜与变形采样频率保持一致。

**5.1.23** 主梁温度监测的测点应布置在温度变化较大的地方及温度梯度较大的区域，应能够反映结构竖向及横向温度场变化规律。

**5.1.24** 主梁温度监测传感器的选取应符合下列规定：

**1** 温度传感器可选用热电偶、热电阻和光纤光栅温度传感器等，应根据监测部位和具体情况综合选定。

**2** 温度传感器的量程宜高于年最高温度极值20℃和低于年最低温度极值20℃，精度不宜低于±0.2℃，分辨率不宜低于0.1℃。

**5.1.25** 主梁温度监测传感器的安装应符合下列规定：

**1** 温度传感器安装前应进行校准，校准测试时间不得少于48h；若与标准温度计相差大于0.5℃，应更换温度传感器。

**2** 对于新建主梁，宜在施工过程中将埋入式温度传感器固定在预定位置上，并有适当的保护装置防止浇筑混凝土过程中损坏传感器。

**3** 对于既有主梁，可在拟监测部位布设外置式温度传感器，传感器应避免受太阳直射，并安装保护盒。

**5.1.26** 温度采样频率宜与静应变和变形的采样频率保持一致；一般情况下不宜小于1次/60min。

**5.1.27** 滨海地区和跨海桥梁应进行腐蚀监测，地处氯离子含量较高或受腐蚀影响较大的桥梁，如有设计要求时宜进行腐蚀监测。

**5.1.28** 主梁腐蚀监测应符合以下规定：

**1** 腐蚀监测参数包括不同深度电位、混凝土电阻率、耦合电流极值和腐蚀电流。

**2** 腐蚀监测方法宜选用电化学方法，可选用电流监测、电位监测，或结合电流和电位监测。

**3** 腐蚀监测位置应位于主梁关键受力区域。

**5.1.29** 主梁腐蚀监测传感器的选取应符合下列规定：

**1** 腐蚀传感器应能分辨腐蚀类型、测定腐蚀速率。

**2** 腐蚀传感器应具有较强的抗电磁、温度和湿度干扰的能力。

**3** 腐蚀传感器可选用阳极梯传感器、环状阳极监测传感器和三电极体系传感器等。

**5.1.30** 主梁腐蚀监测传感器的安装应符合下列规定：

**1** 对于新建主梁，可在施工过程中将传感器埋入预定的位置。

**2** 对于既有主梁，可在拟监测部位设置外置传感器。

**3** 根据设计要求合理选择预埋深度和倾斜角度。

**5.1.31** 腐蚀监测采样频率不宜小于1次/24h。

5.2 桥拱

**5.2.1** 桥拱的一般性监测项目应包括：变形、应变、温度和振动。侵蚀环境下或钢结构桥拱以及钢混结构桥拱应进行腐蚀监测。

**5.2.2** 桥拱的变形监测参数包括桥拱的竖向、纵向水平位移以及转角。其中，拱顶竖向位移，纵向水平位移，拱脚三向位移与转角应重点监测。

**5.2.3** 桥拱的整体变形监测宜建立基准监测网，观测点应选取土质坚实、安全僻静、观测方便且易于长期保存的地点。

**5.2.4** 大跨度拱桥的拱顶偏位宜采用全球导航卫星系统进行监测。

**5.2.5** 桥拱变形监测应符合下列规定：

**1** 对于中小跨拱桥，可根据设计要求进行变形监测。

**2** 大跨径拱桥宜结合有限元模型计算结果进行专项变形监测。

**5.2.6** 桥拱变形监测位置应包含拱顶、1/4跨、3/4跨和拱脚位置，大跨拱桥应适当增加监测断面；钢管混凝土拱桥宜增加对钢管拱变形的监测。

**5.2.7** 桥拱变形监测传感器的选型应同时满足量程、精度、分辨率、稳定性、耐久性的要求，可选用全球导航卫星系统、位移计、光学测量仪器和倾角仪等进行监测。

**5.2.8** 桥拱位移监测传感器的安装应符合下列规定：

**1** 位移传感器安装要牢固可靠，避免自身脱落变位。

**2**  位移测点采用钢钉式永久性观测点时钢钉顶部应有明显十字，也可采用反射片式半永久观测点。

**5.2.9** 桥拱应变传感器布设位置应满足下列规定：

**1** 监测断面至少包含拱脚、拱顶等截面。

**2** 钢桁拱桥测点宜包含上下弦杆与斜腹杆。

**3** 宜在易疲劳位置加装动应变传感器。

**4** 连接位置等受力复杂区域宜选用三向应变传感器。

**5.2.10** 桥拱应变监测传感器可根据监测需求选用电阻式应变计、振弦式应变计、光纤类应变计等。

**5.2.11** 应变传感器的量程宜大于预测值的2倍以上，同时应进行温度补偿。

**5.2.12** 桥拱应变监测传感器的安装应符合下列规定：

**1** 对于新建混凝土拱桥，宜在施工过程中将埋入式应变传感器固定在预定位置上，并有适当的保护装置防止浇筑混凝土过程中损坏传感器。

**2** 对于既有桥拱，应采用螺栓或焊接方式将应变传感器锚固在结构表面，安装应表面平整光滑并注意防水保护。

**3** 安装固定应变传感器后，必须记录传感器初始值并进行矫正。

**5.2.13** 桥拱动应变监测传感器采样频率应不小于结构最高频率的2倍；静应变采样频率不宜小于1次/30min。

**5.2.14** 温度监测断面根据温度梯度及整体升降温空间特点选取，应包含拱顶与拱脚断面。

**5.2.15** 应变测点位置处应同时布置结构温度传感器以进行温度补偿。

**5.1.16** 桥拱温度监测传感器的选取应符合下列规定：

**1** 根据监测需求与具体位置特点，温度传感器可选用热电偶、热电阻和光纤光栅温度传感器等类型。

**2**  温度传感器量程宜高于年极值最高气温的+50℃并低于年极值最低气温的-20℃，分辨率不宜低于0.1℃。

**3** 应满足连续监测的需求，频率不宜低于1次/30分钟。

**5.2.17** 桥拱温度监测传感器的安装与保护应满足如下要求：

**1** 安装在构件表面的温度传感器宜制作保护壳以避免阳光直射与雨水侵蚀。

**2** 温度传感器安装前应进行校准。

**5.2.18** 温度采样频率宜与静应变的采样频率保持一致。

**5.2.19** 桥拱振动监测加速度传感器宜选用低频性能优良的传感器，量程不小于±2g。

**5.2.20** 钢桁拱桥的桥拱宜适当加密振动传感器布置，拱顶截面应布置横纵双向振动传感器。

**5.2.21** 桥拱腐蚀监测采样频率不宜小于1次/24h；且应包含湿度监测。

5.3 桥塔

**5.3.1** 桥塔的一般性监测项目应包括：变形、应变、温度和振动。混凝土桥塔宜进行裂缝监测；侵蚀环境下或钢结构桥塔应进行腐蚀监测。

**5.3.2** 桥塔的变形监测参数应包括桥塔的沉降、塔顶高程、顺桥向与横桥向的偏位等。

**5.3.3** 桥塔变形监测宜选取大地坐标系，基准站应选址在地基稳定、视野开阔、远离电磁干扰的区域，观测点应选取安全僻静、观测方便且易于长期保存的地点。

**5.3.4**  大跨径斜拉桥与悬索桥桥塔变形宜采用全球导航卫星系统进行监测。

**5.3.5** 全球导航卫星系统塔顶安装时宜根据天线设备配套制作托盘、立柱以保证安装的牢固可靠。

**5.3.6**  桥塔应变传感器布设应符合下列规定：

**1**  包含但不限于上塔柱、中塔柱、下塔柱三个截面。

**2** 每个截面应变计的个数不宜少于4个，宜兼顾平面内各个方向。

**5.3.7** 索塔锚固区的钢锚梁或钢锚箱宜布设光纤光栅动应变传感器以监测疲劳应力。

**5.3.8** 应变监测传感器可根据监测需求选用电阻式应变计、振弦式应变计、光纤光栅应变计等。

**5.3.9** 应变传感器的量程宜大于预测值的2倍以上，同时应进行温度补偿。

**5.3.10** 桥塔动应变监测传感器采样频率应不小于结构最高频率的2倍；静应变采样频率不宜小于1次/30min。

**5.3.11** 桥塔应变监测传感器的安装应符合下列规定：

**1** 对于新建桥梁的混凝土主塔宜在施工过程中将埋入式应变传感器固定在预定位置上，并设置适当的保护装置防止混凝土浇筑过程中损坏传感器。

**2** 既有桥梁安装应变传感器时，应保证安装表面平整光滑，并进行防护处理。

**3** 安装固定应变传感器后，必须记录传感器初始值并进行矫正。

**5.3.12** 温度监测断面应根据温度梯度及整体升降温空间特点，可布置于桥塔上下横梁处。

**5.3.13** 桥塔温度监测传感器的选取应符合下列规定：

**1** 根据监测需求与安装位置特点，温度传感器可选用热电偶、热电阻和光纤光栅等类型的温度传感器。

**2**  温度传感器量程宜高于年极值最高气温的+50℃并低于年极值最低气温的-20℃，分辨率不宜低于0.1℃。

**3** 应满足连续监测的需求，频率不宜低于1次/30分钟。

**5.3.14** 桥塔温度监测传感器安装前应进行校准，既有桥梁安装外置式温度传感器时应避免阳光直射与雨水侵蚀。

**5.3.15** 温度采样频率宜与静应变的采样频率保持一致。

**5.3.16** 斜拉桥桥塔拉索锚固区与悬索桥鞍罩内宜布置湿度传感器；安装在索塔塔顶的空气温湿度计传感器与塔顶的竖向距离应大于0.5m。

**5.3.17** 桥塔的振动监测应包含主塔振动与地震船撞引起的振动。

**5.3.18** 桥塔振动加速传感器布置断面宜包含但不限于上下横梁处截面。下横梁处应设置三向加速度传感器，上横梁处可选取双向加速度传感器。

**5.3.19** 混凝土桥塔的裂缝监测宜包含锚固区、横梁附近区域，区分结构裂缝与非结构裂缝。

**5.3.20** 桥塔的腐蚀监测参考5.2.21一般规定。

5.4 缆索和吊杆

**5.4.1** 缆索和吊杆监测项目的选择应符合下列规定：

**1** 应对主缆、吊杆（索）的索力进行监测。

**2** 应对主缆的线形进行监测。

**3** 应对主缆、吊杆（索）的振动加速度进行监测。

**4** 宜对主缆、吊杆（索）的断丝进行监测。

**5** 宜对主缆、吊杆（索）及锚具进行腐蚀监测。

**6** 应对主缆、吊杆（索）的温度进行监测。

**5.4.2** 主缆、吊杆（索）索力监测宜采用振动频率法、磁通量测试法、锚碇板承压力测试法、光纤光栅测试法及其他不影响缆索和吊杆的安全等监测方法。

**5.4.3** 主缆、吊杆（索）索力监测宜选择有代表性、索力较大且应力变化较大的进行监测。

**5.4.4** 主缆、吊杆（索）索力传感器的选取应符合下列规定:

**1** 主缆索力可采用磁通量传感器或者压力传感器进行监测；吊杆（索）索力可根据监测要求和被测索体的特点宜选用加速度传感器（频率法）、磁通量传感器（磁通量法）、压力传感器（压力测试法）和光纤光栅应变传感器（光纤光栅测试法）等。

**2** 索力监测传感器精度不宜低于量程的1%。

**3** 索力监测的加速度传感器采样频率不宜低于50Hz；压力传感器的采样频率不宜低于1Hz；磁通量传感器的采样频率不宜低于1/600Hz。

**4** 加速度传感器测量范围不宜小于±5g、频响范围应覆盖索体振动基频，且应介于0Hz~80Hz之间；磁通量传感器测量范围宜介于0与测试索屈服应力之间；压力传感器标准量程宜介于500kN~4000kN之间；光纤光栅应变传感器波长范围宜介于1520nm~1570nm之间。

**5.4.5** 主缆、吊杆（索）索力监测传感器安装应符合下列规定:

**1** 传感器应在安装前进行校准、并在施工期间完成安装。

**2** 采用振动频率法监测时，传感器宜安装在远离拉索下锚点而接近拉索中点位置，布设位置距索端距离应大于0.17倍索长。

**3** 磁通量传感器宜安装在拉索的下预埋管内、锚具内的单根钢绞线上以及桥面自由段上。

**4** 压力传感器和光纤光栅应变传感器宜安装在锚垫板和锚具之间。

**5.4.6** 主缆线形宜采用全球导航卫星系统（GPS系统、北斗系统等）进行监测，且应满足下列要求：

**1** 主缆线形监测点宜布置在主跨与边跨最大垂度以及主索鞍、散索鞍位置的基准索股上。

**2** 基准站应选址在地基稳定、上方天空开阔、远离电磁干扰、易受保护及维修的区域；监测站应安装在被测结构或构件顶部，上方无遮挡，并远离电磁干扰。全球卫星定位系统的监测数据应可转换到大桥独立坐标系下（施工坐标系）。

**3** 静态基线精度不宜低于：水平：3mm+0.5ppm；竖向：5mm+1ppm。

**4** 采样频率不应低于20Hz。

**5** 工作温度范围不宜超过-30℃~60℃。

**5.4.7** 主缆、吊杆（索）振动监测宜选用加速度传感器，并满足下列要求：

**1** 宜根据桥梁结构主要振型，选择合适的单向、双向和三向加速度传感器。

**2** 对于振动频率较低的主缆、吊杆（索）等构件，宜选用低频响应特性优良的力平衡、电容式加速度传感器，量程不宜小于-2g~+2g，横向灵敏度宜小于1%，频响范围宜介于0Hz~80Hz之间。

**3** 对于自振频率较高的主缆、吊杆（索），可选用电容式加速度传感器和ICP型压电加速度传感器，量程不宜小于-20g~+20g，横向灵敏度宜小于5%；电容式加速度传感器频响范围宜介于0Hz ~100Hz之间,压电加速度传感器频响范围宜介于0.3Hz~1000Hz之间。

**5.4.8** 主缆、吊杆（索）振动监测加速度传感器的安装满足下列要求：

**1** 加速度传感器安装在安装盒内，传感器安装盒固定在基座上。

**2** 传感器安装盒应具有良好的防尘和防水功能且需对传感器设备接触端做好保护。

**5.4.9** 主缆、吊杆（索）的断丝监测宜选用声发射传感器，且应满足下列要求：

**1** 声发射传感器的谐振频率量程宜在100kHz~400kHz范围内，灵敏度不宜小于60dB[相对于1V/(m/s)],在监测带宽和使用温度范围内灵敏度变化不得大于3dB。

**2** 声发射传感器宜安装在主缆索股或者吊杆（索）的锚固端，与被测结构之间保持电绝缘，并屏蔽无线电波及电磁干扰。安装前应对被测索构件进行衰减特性测量，以确定监测所需传感器数量。

**3** 损伤源定位宜先进行断铅试验，确保每个传感器接收断铅信号幅值相差不超过3dB。

**5.4.10** 主缆、吊杆（索）的腐蚀监测传感器应能分辨腐蚀类型、监测腐蚀速率，宜选用磁质伸缩超声导波法，腐蚀监测位置宜选择在侵蚀环境与荷载相互作用的典型区域及典型节点上。磁质伸缩导波法监测腐蚀时应满足如下要求：

**1** 磁质伸缩传感器宜用于监测直径为10mm~185mm束状构件表面和内部的腐蚀缺陷。

**2** 磁质伸缩传感器的分辨率应达到10mm，截面损失率的最小分辨率应不小于5%。

**3**  磁质伸缩传感器的工作温度应介于-10℃~550℃。

**5.4.11** 主缆、吊杆（索）的温度监测点的布置应符合下列规定：

**1** 主缆温度测点宜布设在主缆跨中断面四周、主缆1/2垂度断面四周和两索塔附近断面。

**2** 吊杆（索）宜选取温度试验索，其测点宜布置在索截面中心位置处。

**5.4.12** 主缆、吊杆（索）的温度传感器选取应符合下列规定：

**1** 温度传感器宜采用热电偶点温计、铂式热电阻温度传感器和光纤光栅温度传感器等，且应根据监测位置的具体情况和要求综合选定。

**2** 温度传感器的量程宜超出年极值最高温度+50℃和年极值最低温度-20℃，精度不宜低于±0.2℃，分辨率应达到0.1℃。

**5.4.13** 主缆、吊杆（索）的温度传感器安装应符合下列规定：

**1** 宜采用环形不锈钢带固定于主缆、吊杆（索）表面。

**2** 对于受太阳照射的温度传感器，宜需安装专用防护罩。

5.5 锚碇

**5.5.1** 锚碇监测项目的选择应符合下列规定：

**1** 应对锚碇的水平位移进行监测。

**2** 应对锚碇内部变形、应力应变进行监测。

**3** 应对锚碇内部的渗流进行监测。

**4** 应对锚碇所处的环境量进行监测。

**5.5.2** 重力式锚碇的沉降位移监测点应设置在重力式锚碇四个角点处；宜采用数码位移计进行监测，量程应达到100mm，精度宜为0.01mm。

**5.5.3** 重力式锚碇内部应力监测宜选用混凝土钢弦式应变传感器，应根据实桥锚固区域的具体情况在锚碇内锚固区主缆的上、下方布置应变传感器。

**5.5.4** 重力式锚碇应变传感器的安装应符合下列规定：

**1** 安装角度偏差不应超过规定的误差范围。

**2** 安装时应采用焊接或栓接方式安装。

**3** 混凝土浇筑前后应逐个确认传感器的有效性、确保其正常工作。

**5.5.5** 重力式锚碇温度监测测点布置应符合下列规定：

**1** 监测点的布置范围应以所选混凝土浇筑体平面图对称轴线的半条轴线为测试区，在测试区内监测点按平面分层布置在锚碇内部混凝土的表层、中心、底层以及中上、中下部以及温度梯度变化较大位置处。

**2** 测点布置应能反映锚碇结构竖向及水平向温度场变化规律。

**3** 测点布置宜与应变监测的温度补偿测点统一设计、数据共享。

**5.5.6** 重力式锚碇混凝土的温度监测应在锚碇混凝土达到初凝状态之后进行，宜采用无线温度传感器，其性能指标应符合如下要求：

**1** 测温范围宜介于-30℃~130℃，测量精度应不小于±0.3℃。

**2** 无线传输距离对于空旷地不应小于1000m。

**3** 温度传感器的工作温度应介于-20℃~80℃，工作湿度宜小于95%RH。

**5.5.7** 重力式锚碇混凝土的温度监测频率宜与结构应力监测和变形监测保持一致。

**5.5.8** 隧道式锚碇位移监测点宜沿前锚面的外边缘以及散索鞍支墩处均匀布设。

**5.5.9** 隧道式锚碇位移监测宜选用光栅式位移传感器、红外线激光位移传感器、数码位移计等，量程应介于测点位移估计值或允许值的2倍~3倍，机械式位移传感器的精度不应超过测点位移估计值的1/10。

**5.5.10** 隧道式锚碇位移监测项目应包括水平位移与垂直位移，且两者监测频率宜一致。

**5.5.11** 隧道式锚碇内部变形、应力应变监测参数应包括围岩内部变形监测、锚塞体应力应变监测、锚碇与围岩接触面位错监测以及锚体水平错位监测等。

**5.5.12** 隧道式锚碇围岩内部变形宜通过布置电感式多点位移计进行监测，位移计量程不宜小于50mm，灵敏度不得低于±0.01mm，精度不得低于量程的1%，使用环境温度范围不宜超过-10℃~+70℃。

**5.5.13** 隧道式锚碇围岩内部变形测点布置应符合下列规定：

**1** 电感式多点位移计宜布置在围岩内锚轴线上下左右侧。

**2** 地形条件允许时应沿锚轴线及其两侧地表钻探竖直钻孔布置多点位移计，以更好地监测围岩内部变形情况。

**5.5.14** 隧道式锚碇锚塞体应力应变监测宜采用弦式数码应变计，应变计的量程应与量测范围相适应，监测值宜控制为满量程的30%~80%；灵敏度不得低于1*με，*且不得低于量程的0.5%，分辨率不宜低于量程的0.2%。

**5.5.15** 隧道式锚碇锚塞体应力应变测点布置及传感器安装应符合下列要求：

**1** 弦式数码应变计应沿拉力方向和沿径向布置，每条测线均应设置一定数量的测点。

**2** 结构应变监测传感器埋设位置与监测截面位置、方向角度的偏差不应大于规定值。

**3** 结构应变监测传感器安装前应进行标定和编号，导线端部还应做好防护措施。

**5.5.16** 隧道式锚碇与围岩接触面相对位移监测宜采用数码式位错计，位错计量程范围不宜小于0mm~200mm，灵敏度不得低于±0.01mm，精度不得低于量程的1%。

**5.5.17** 数码式位错计宜布置在锚碇与围岩接触面之间锚体的上下壁和侧壁上。

**5.5.18** 锚体水平错位可通过铅直向埋设于锚碇上方地表的测斜仪进行监测，且应符合下列基本规定：

**1** 测斜仪的系统精度不宜低于±0.25mm/m，分辨率不宜低于±0.02mm/500mm。

**2** 测斜仪应具备连续读数、自动记录及传输的功能且电缆长度应大于测斜孔深度。

**5.5,19** 隧道式锚碇内部温度监测宜采用温度传感器，且应满足以下要求：

**1** 温度监测的测点宜布置在锚碇内部温度变化大或对结构耐久性影响大的位置。

**2** 可根据监测部位的具体情况和要求选用热电偶、热电阻和光纤光栅温度传感器。

**3** 监测锚碇内部温度的传感器，量程宜超出年极值最高温度+50℃和年极值最低温度-20℃。

**4** 锚碇结构内部温度传感器精度不宜低于±0.2℃，分辨率不宜低于0.1℃。

**5.5.20** 锚碇内部湿度监测宜选用湿度传感器，并满足下列要求：

**1** 湿度监测测点宜布置在锚碇内部湿度变化大、对结构耐久性影响大的位置。

**2** 湿度传感器可选用氯化锂湿度计、电阻电容湿度计和电解湿度计等，应根据监测构件和部位具体情况和要求综合选定。

**3** 湿度传感器要求响应时间短、温度系数小，稳定性好以及时滞后作用低，湿度传感器监测范围宜为12% RH ~99%RH，精度不宜低于3%RH。

**5.5.21** 锚碇渗流监测参数应包括扬压力、渗流量，宜采用振弦式渗压计，读数应在满量程的1/3~2/3范围内；传感器可根据实际情况布设在施工质量不太好或明显出现渗流的区域。

**5.5.22** 锚碇处的雨量监测参数宜包括降雨量和降雨强度；应依据桥址处历史记录的最大降雨量确定雨量传感器的量程和精度，安装空间较小时，宜选用体积较小的电容雨量传感器或红外散射式雨量传感器，对于台风频袭地区的锚碇结构，可选用不易损坏的单翻斗雨量传感器；雨量计的安装方向应尽量保持竖直。

5.6 伸缩缝

**5.6.1** 伸缩缝的一般性监测项目应包括桥端或伸缩缝整体位移监测，见表3.15规定；如有必要，可对伸缩部件之间的相对位移进行监测。

**5.6.2** 伸缩缝整体位移监测参数应包括桥端或伸缩装置移动端的纵向位移，可包括横向、竖向及平面转角。

**5.6.3** 伸缩缝位移监测方法可选用机械测试法、卫星定位系统、光学测试法，对应的传感器或仪器包括拉绳式（或拉杆式）位移传感器、全球导航卫星系统、智能全站仪等。应根据伸缩缝的极限位移量和所需的采样频率选择监测方法及传感器。

**5.6.4** 伸缩缝位移监测传感器的采样频率应符合下列规定：

**1** 当同时监测多个方向的位移量时，其采样应同步。

**2** 动态位移监测的采样频率应不小于伸缩缝最高运动频率的2倍，宜取5~10倍。

**3** 静态位移的监测采样频率一般情况不宜小于1次/60min。

**4** 对于台风等特殊荷载时期，可适当增大采样频率。

**5.6.5** 伸缩缝位移传感器的安装应符合下列规定：

**1** 当采用机械测试法时，传感器安装宜采用焊接的方式，也可采用螺栓锚固方式进行安装。应用防护罩或保护盒保护，防止生锈，并留孔穿线。

**2** 当采用卫星定位系统时，监测基准站应选取在地基稳定、视野开阔、远离人为和电磁干扰的地方。位移监测站应安装在能真实反映伸缩缝位移及平面转角的位置上。

5.7 支座

**5.7.1** 支座一般性监测项目应包括位移监测，见表3.15规定。

**5.7.2** 支座位移监测参数应包括纵向、横向位移，必要时可对竖向位移进行监测。

**5.7.3** 支座位移监测方法可选用机械测试法和光学测试法，对应的传感器包括包括拉绳式（或拉杆式）位移传感器、激光测距仪和转角仪等，应根据支座的极限位移量和所需的采样频率选择监测方法及传感器。

**5.7.4** 支座位移监测应符合下列规定：

**1** 各方向位移宜同步监测，机械监测装置宜分别呈90º安装。

**2** 监测装置宜分别连接到支座的两端。

**5.6.5** 支座位移监测传感器的采样频率应符合下列规定：

**1** 当同时监测多个方向的位移量时，其采样应同步。

**2** 动态位移监测的采样频率应不小于支座最高运动频率的2倍，宜取5~10倍。

**3** 静态位移的监测采样频率一般情况不宜小于1次/60min。

**4** 对于台风等特殊荷载时期，可适当增大采样频率。

**5.6.6** 支座位移监测传感器的安装应符合下列规定：

**1** 当采用机械测试法时，传感器安装宜采用焊接的方式，也可采用螺栓锚固方式进行安装。应用防护罩或保护盒保护，防止生锈，并留孔穿线。

**2** 当采用光学测试法时，发射口不应直接对准太阳，光线应与反射面垂直，并应保持激光发射窗和反光镜的光洁。应避免出现遮挡物阻挡光线，且应避免人眼直视发射口和光滑反射面。

5.8 桥墩和桥台

**5.8.1** 桥墩（台）监测内容主要包括沉降变形、墩顶位移、撞击和腐蚀监测，具体应符合下列规定：

**1** 应对特大型桥梁以及软弱地基桥梁的桥墩（台）进行沉降变形监测，宜对高速铁路桥梁桥墩（台）进行沉降变形监测。

**2** 宜对梁桥桥墩进行墩顶偏位监测。

**3** 宜对GB 50139-2014 规定的航道等级为І~V级的桥梁进行船舶撞击监测，宜对流冰、漂浮物撞击高风险区域桥梁进行桥墩（台）撞击监测。

**3** 宜对海洋环境、化学工业等氯离子高含量环境进行桥墩（台）钢筋锈蚀监测；宜对盐湖、盐碱地等硫酸根离子高含量区域进行混凝土劣化和钢筋锈蚀监测。

**5.8.2** 桥墩（台）监测测点选择应符合下列规定：

**1** 沉降变形监测布设观测点时应考虑工程规模、场地地质条件，能反映桥梁及地基变形特征，并应顾及桥梁完工后使用方便，测点宜布设于桥墩底部或桥台四角。

**2** 墩顶偏位监测测点宜设于代表性桥墩顶部易观测处。

**3** 撞击监测测点宜选择在易遭受船舶、流冰等漂浮物撞击的桥墩区域。

**4** 钢筋锈蚀监测应考虑水文地质环境，宜选择在代表性桥墩的水位变化区和浪溅区布设测点，桥墩迎水面测点数宜多于背水面；对于腐蚀性比较强的区域，可适当增加测点。

**5.8.2** 桥墩（台）监测传感器选型应符合下列规定：

**1** 沉降变形监测可选用全球导航卫星定位系统等，具体仪器型号可依据桥梁设计安全等级和精度要求按照JGJ 8-2016相关变形控制测量条款选取。

**2** 墩顶偏位监测可选用全球导航卫星定位系统等，具体仪器型号可依据桥梁设计安全等级和精度要求按照JGJ 8-2016相关变形控制测量条款选取。

**3** 撞击监测宜选用三向加速度传感器，主要技术指标应符合DB/T 10-2016的要求，撞击监测可与地震监测数据共享；对有汽车撞击风险的桥墩，加速度传感器量程不宜小于-50~+2000g，横向灵敏度宜小于5%。

**4** 钢筋锈蚀监测宜选用梯形阳极系统等多电极腐蚀传感器，宜给出不同保护层深度处的腐蚀电流密度或腐蚀电位，可判断不同保护层深度处钢筋起始锈蚀时间。

**5.8.4** 传感器安装、布设等注意事项：

**1** 全球导航卫星定位系统参考基准点宜设置在沉降变形影响范围外、视野开阔、接收卫星信号好且稳定的位置。

**2** 撞击监测加速度传感器宜埋入桥墩混凝土内部，宜固定于受力纵筋，传感器数据线宜沿受力筋方向走线并固定好，在浇筑等预埋过程中需注意对传感器的保护，危险情况下可用水泥砂浆或净浆给传感器做保护外壳。

**3** 多电极钢筋锈蚀监测传感器应以合理间距布设于混凝土保护层内，最外侧电极距混凝土表面应大于10 mm，在预埋过程中应保证传感器多电极位置之间的精确性。

5.9 基础

**5.9.1** 应对特大型桥梁以及软弱地基桥梁的基础进行沉降变形测量，宜对高速铁路桥梁基础进行沉降变形监测；考虑基础沉降变形监测的隐蔽性，宜用桥台沉降变形监测替代基础沉降变形监测，具体应符合 本规程5.8条规定。

**5.9.2** 桥梁基础冲刷深度监测应符合下列规定：

**1** 宜对水文环境、地址条件复杂的桥梁进行基础冲刷深度监测。

**2** 应根据结构分析和基础冲刷模型试验，将测点布置于冲刷深度或速率较大区域；在桥梁服役过程中，实际冲刷速率明显大于结构分析结果的区域要增加测点；对于声呐传感器探头安装位置，圆端形桥墩宜布设在桥墩上游、下游以及侧面最大冲刷位置，对于圆形桥墩宜布设在上游、下游和两侧；对于磁性标签石块宜布设于桥墩上游。

**3** 冲刷监测传感器选型应综合考虑桥址处水流速度、含沙量等水文参数和地质条件以及设计允许冲刷深度，可选用声呐传感器、磁性标签石块等；具体声呐传感器类型以及磁性标签石块的尺寸和重量应根据墩前水流特点、墩（台）、基础特点确定。

**4** 应根据冲刷试验结果确定声呐探头指向角度以及探头与桥墩之间的距离，应在桥墩施工过程中预埋声呐传感器的安装件，安装件应考虑水流速度、水压等环境参数进行合理设计，保证安装件与桥墩（台）长期固定连接，声呐探头与预埋件之间宜非固定连接，具有可替换性；应根据冲刷试验结果确定磁力梯度仪的安装位置，磁力梯度仪宜与桥墩预埋件牢固连接。

本规程用词说明

**1** 为便于在执行本规程条文时区别对待，对执行规程严格程度的用词说明如下：

**1**）表示很严格，非这样做不可的：

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：

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，在条件许可时应首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不应”或“不宜”；

**4**）表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

**2** 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……规定”或“应按……执行”。

中国土木工程学会标准

**桥梁健康监测传感器选型与布设技术规程**

T/CCES\*\*-2019

**条文说明**

目 次

**4** 环境与荷载监测传感器

**4.1** 车辆荷载

**4.2**  环境温度

**4.6** 腐蚀介质

**5**  结构监测传感器

**5.4** 缆索和吊杆

**5.5** 锚碇

**5.6** 伸缩缝

**5.7** 支座

4 环境与监测传感器

4.1 车辆荷载

**4.1.3** 车辆动态称重系统的路面传感器布置采用压电传感器－感应线圈－压电传感器组合形式，其测试原理如下：压电传感器输出的电信号与对车轴施加压力或车辆压过的压力是相对称的，感应线圈输出的信号与车辆通过的数量对应，压电和电感线圈信号由控制器转换成电压，并与标准模型对比输出车辆轴重、速度、轴距、车型等信息。压电轴-感应线圈-压电轴传感器有两根相距3米轴传感器中间2米正方形感应线圈组成。每车道 2 条压电轴传感器用全长度传感器，全长传感器可覆盖整车道提供一个完整的轴载信息。

**4.1.3.1** 车辆动态称重系统容易造成桥面铺装损坏，宜安装在引桥，不宜安装在主桥；宜安装在混凝土梁，不宜安装在钢梁；

**4.1.3.3** 动态称重系统的基础框架可以安装在任何正常的公路上（沥青或混凝土）。框架（包括放在其中的弯板）高度为40mm（平均）。需要在坚硬层上施工，一般要求施工路面的压实层为160mm以上。地脚构插进的孔约200mm（若车速不超过20km/h，可不用地脚钩）。

4.2 环境温度

**4.2.1**

**1** 常用的温度传感器包括热电偶、热电阻、电子式以及光纤温度传感器三种。热电阻传感器又可以分为电阻式温度检测器（RTD）和热敏电阻器，其具有量程大、精度高、适用范围广的特点。电子式温度传感器具有体积小、功耗低、成本低的优点。热电偶传感器相比于前两种传感器，存在灵敏度较低的缺点。光纤光栅温度传感器多用于测量结构温度。

**2** 我国极端最高气温历史记录为1975年7月13日在吐鲁番民航机场观测到的49.6℃，极端最低气温为1969年2月13日在漠河观测到的-52.3℃。考虑桥梁结构表面热辐射效应对传感器监测温度的影响，在无观测记录的情况下温度传感器最低测量温度不宜高于-50℃，最高测量温度不宜低于80℃。

**4.2.2** 结构健康监测系统中对于日超辐射强度的监测通常采用光照强度进行度量。

**2** 一般情况下，夏季阳光直射条件下，光照强度可以达到60000~100000勒克斯。考虑极端情况下日照辐射强度传感器能够正常工作，其量程不宜小于200000勒克斯。

4.6 腐蚀介质

**4.6.1** 梯形阳极主要由浇入混凝土的一组钢筋梯段传感器、一个阴极和互连引出结构的导线组成。

**4.6.2** 酸性气体（酸雨）监测，应满足《酸雨观测规范》（GB/T 19117）要求。

5 结构监测传感器

5.4 缆索和吊杆

**5.4.1** 对缆索和吊杆一般性监测项目的监测方法进行了规定，内容包括监测测点的选取、传感器选型、安装以及采样频率的要求。

**5.4.2** 索力监测的方法较多，还有三点弯曲法、激光测振法等，比如直径不大于36mm的拉索索力可采用三点弯曲法量测，激光测振法是通过测定索的位移来监测索力。

**5.4.3** 索力监测的测点应具有代表性，且均匀分布；单根拉索或钢拉杆的不同位置宜有对比性测点，可监测同一根钢索不同位置的索力变化；横索、竖索、张拉索与辅助索均应布设测点。

**5.4.4** 应根据不同结构形式及监测目的选择相应采样频率。

**5.4.5** 安装完成后，各类传感器应与缆索、吊杆（索）保持可靠连接，防止在吊装或施工过程中松动脱落。

**5.4.6** 悬索桥的监测重点是主缆线形。

**5.4.7** 加速度监测的精度应根据振动频率及幅度、监测目的等因素确定。

**5.4.8** 加速度传感器安装时，应保证传感器的安装位置和方向正确无误，位置确定后安装螺钉时使用螺纹锁固胶加以锁固，以保证传感器及其安装盒的安装牢固、可靠。

**5.4.10** 侵蚀环境和荷载作用的典型区域和典型节点可根据工程结构特点、结构连接位置以及腐蚀速率等因素确定。

**5.4.12** 热电偶点温计、铂式热电阻温度传感器宜选在温度试验索进行温度监测，光纤光栅温度传感器宜选对主缆斜、吊杆（索）进行温度监测。

**5.4.13** 温度传感器安装的通风、散热、防撞、抗震等防护措施不可影响测量可靠性，且应具有可维护性。

5.5 锚碇

**5.5.1** 对锚碇结构一般性监测科目的监测方法进行了规定，内容包括监测测点的选取、传感器选型、安装以及采样频率的要求。

**5.5.3** 钢弦式应变传感器时漂小、抗电磁干扰能力较强，适合进行长期监测。

**5.5.4** 传感器安装应牢固，当采用胶体等粘结材料时应考虑其耐久性。

**5.5.5** 锚碇混凝土浇筑体内监测点的布置，应真实地反映出混凝土浇筑体内最高温升、里表温差、降温速率及环境温度。

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

**5.5.9** 量程因测量部位或用途而异，可根据情况，选择分辨率和精度参数。

**5.5.13** 隧道式锚碇围岩内部变形监测的钻孔应沿拉力方向延伸至工程影响范围之外，并将最深的锚固点作为多点位移计的基点。

**5.5.14**  围岩内部锚塞体应变监测应与变形监测基本同步，确保应力和变形监测数据可以对应。

**5.5.15** 在每条测试轴线上，监测点位宜不少于4处，应根据结构的几何尺寸布置。

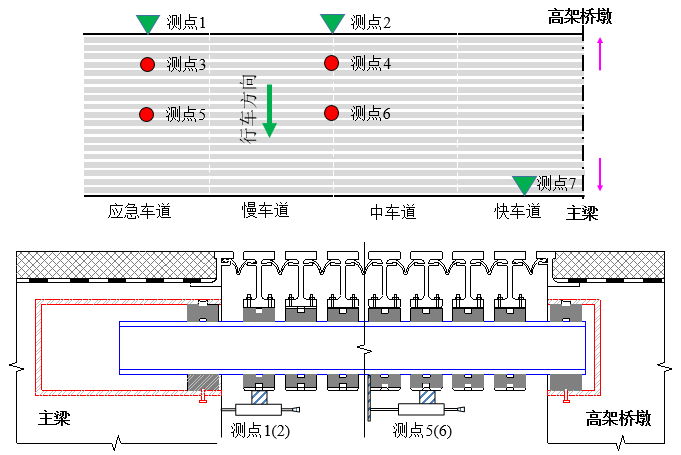
**5.5.19~5.5.20** 对结构构件耐久性影响大的区域主要是针对温差、湿度变化引起构件应力及变形变化大的部位。监测结构温度的传感器可布设于构件内部或表面。当日照引起的结构温差较大时，宜在结构迎光面和背光面分别设置传感器。

**5.5.22**  雨量计应依据桥址处气候和气象条件选择设备类型、量程和精度等。

5.6 伸缩缝

**5.6.1** 伸缩装置依据交通部JT/T327-2004文件定义，是指为使车辆平稳通过桥面并满足桥梁上部结构变形的需要，在桥梁伸缩缝处设置的由橡胶和钢材等构件组成的各种装置的总称。伸缩装置一般包括模数支承式伸缩装置、橡胶组合剪切式（板式）伸缩装置、钢制支承式伸缩装置（钢梳齿板型伸缩装置和钢板叠合型伸缩装置）、对接式伸缩装置和无缝式伸缩装置。不同类型伸缩装置的响应监测应根据具体监测响应和装置的构造确定，同时根据桥梁计算分析和测试结果确定测量精度、量程、防护等级等。

**5.6.2** 模数支承式伸缩装置模块同步变形情况宜采用多个拉绳式位移传感器并联布置测量，传感器应固定在桥塔横梁、桥墩横梁等相对不动点，伸缩端应连接到伸缩装置各测试模块，布设方案可参照下图；



5.7 支座

**5.7.1** 千斤顶顶力与支座变形的位移之间关系可在受测支座附近安装千斤顶，通过分级建立顶力获得顶力与位移之间的关系，分析比较可得出支座实际反力值。由于支座垫实状态不同，实际曲线与典型曲线可能有所不同。