

UDC

中国土木工程学会标准

P

T/CCES 15-2020

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

2020-11-16 发布

2021-02-01 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 15-2020

批准单位：中国土木工程学会

施行日期：2021年2月1日

中国建筑工业出版社

2020 北京

中国土木工程学会文件

学标（2020）10号

关于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》的通知

现批准《桥梁健康监测传感器选型与布设技术规程》为学会标准，编号为 T/CCES 15-2020，自 2021 年 2 月 1 日起实施。

中国土木工程学会
2020 年 11 月 16 日

前 言

本规程根据中国土木工程学会《关于〈装配式混凝土结构施工及验收规程〉等 5 项土木工程学会标准立项编制的通知》（土标委（2019）7 号）的要求，由大连理工大学会同有关单位编制完成。

在本规程编制过程中，编制组广泛调查研究和总结了结构健康监测传感器选型和布设的经验，参考了国内外有关标准，并在广泛征求意见基础上，对具体内容进行了反复讨论、协调和修改，最后经审查定稿。

本规程的主要技术内容是：总则，术语与参考标准，基本规定，荷载作用与环境监测传感器，结构响应监测传感器，耐久性监测传感器。

请注意本规程的某些内容可能涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国土木工程学会学术与标准工作委员会负责管理，由大连理工大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有修改意见或建议，请寄送大连理工大学（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；邮政编码：116023；电子邮箱：yth@dlut.edu.cn）。

本 规 程 主 编 单 位：大连理工大学

本 规 程 参 编 单 位：香港理工大学

东南大学

长沙理工大学

哈尔滨工业大学

河海大学

厦门大学

中际物联科技（深圳）有限公司
中交路建交通科技有限公司
大连三维土木监测技术有限公司
福州大学
路安交科（北京）监测科技有限公司
中铁大桥勘测设计院集团有限公司
北京航空航天大学

本规程主要起草人员：伊廷华 夏 勇 郭 彤 王 磊
刘铁军 丁幼亮 杨东辉 周广东
曲春绪 唐福建 鲍跃全 陈志为
裴峰涛 王明飞 董小鹏 杨 斌
苏家战 王志国 蒋田勇 邹笃建
林世滨 梅大鹏 杜博文 刘 华
陈智成 赵瀚玮 杨 康 张硕玉
本规程主要审查人员：钟继卫 陈 波 刘 纲 叶肖伟
翁 顺 张纪刚 曾 敏
签 发：李明安

目 次

1	总则	1
2	术语与参考标准	2
2.1	术语	2
2.2	参考标准	4
3	基本规定	5
3.1	主要监测内容	5
3.2	传感器选型要求	13
3.3	传感器布设原则	14
4	荷载作用与环境监测传感器	15
4.1	车辆荷载	15
4.2	风荷载	16
4.3	地震动	16
4.4	环境温度	17
4.5	环境湿度	17
4.6	腐蚀介质	18
5	结构响应监测传感器	19
5.1	一般规定	19
5.2	主梁	20
5.3	拱圈	21
5.4	桥塔	21
5.5	缆索、斜拉索和吊杆	22
5.6	锚碇	22
5.7	伸缩缝	23
5.8	支座	23
5.9	桥墩和桥台	23

5.10 基础	24
6 耐久性监测传感器	25
6.1 混凝土构件	25
6.2 钢制部件	26
本规程用词说明	28
条文说明	29

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Reference Standards	2
2.1	Terms	2
2.2	Reference Standards	4
3	Basic Requirements	5
3.1	Main Monitoring Contents	5
3.2	Requirements of Sensor Selection	13
3.3	Principles of Sensor Placement	14
4	Sensors for Load Action and Environment Monitoring	15
4.1	Vehicle Loads	15
4.2	Wind Loads	16
4.3	Ground Motion	16
4.4	Environmental Temperature	17
4.5	Environmental Humidity	17
4.6	Corrosive Media	18
5	Sensors for Structural Responses Monitoring	19
5.1	General Requirements	19
5.2	Girders	20
5.3	Arches	21
5.4	Towers	21
5.5	Main Cables, Stay Cables and Suspenders	22
5.6	Anchorage	22
5.7	Expansion Joints	23
5.8	Supports	23
5.9	Piers and Abutments	23

5.10 Foundations.....24

6 Sensors for Structural Durability Monitoring25

6.1 Concrete Members.....25

6.2 Steel Components.....26

Explanation of Wording in This Regulation.....28

Explanation of Provisions29

1 总 则

1.0.1 为规范桥梁健康监测系统传感器的选型与布设，提高监测系统的建造质量，做到安全可靠、技术先进、操作方便和经济合理，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥健康监测系统中传感器选型、测点布置、传感器安装和保护。

1.0.3 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、功能和性能，宜兼顾施工监控和成桥荷载试验的要求进行一体化设计。

1.0.4 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 术语与参考标准

2.1 术语

2.1.1 桥梁健康监测 bridge health monitoring

利用现场的、无损的、实时的方式采集既有桥梁的输入与输出信息，分析桥梁性能的波动、劣化或损伤特征，并为管理和养护提供决策支持的技术。

2.1.2 作用与环境监测 action and environmental monitoring

将传感器埋入或固定在结构表面，实时地获取结构外部输入信息的过程。

2.1.3 结构响应监测 structural response monitoring

将传感器埋入或固定在结构表面，实时地获取结构动力和静力反应信息的过程。

2.1.4 耐久性监测 durability monitoring

将传感器埋入或固定在结构表面，实时地获取能够表征结构抵抗自身和自然环境双重因素长期作用能力信息的过程。

2.1.5 传感器选型 selection of sensor

根据结构健康监测系统功能和目标的不同，结合实际工程特点和工程造价，按照一定的原则确定传感元件类型的过程。

2.1.6 传感器优化布设 optimal sensor placement

按照一定的评价准则和优化算法，确定传感器的合理数量和布置位置，以使某种监测目标达到最优的过程。

2.1.7 传感器安装 sensor installation

将传感元件固定在待监测结构上的过程。

2.1.8 传感器标定 sensor calibration

将标准元件所体现的标准值，传递到传感元件的工作量程分度上，并对分度进行定度的过程。

2.1.9 传感器温度补偿 sensor temperature compensation

对传感元件由于温度影响发生漂移而引起的误差，进行修正的措施。

2.1.10 梁 girder

由支座支承的直线或曲线形构件，主要承受各种作用产生的弯矩和剪力，有时也承受扭矩。

2.1.11 拱 arch

由支座支承的曲线或折线形构件，主要承受各种作用产生的轴向压力，有时也承受弯矩、剪力或扭矩。

2.1.12 桥塔 bridge tower

支承悬索桥或斜拉桥的主索，并将荷载直接传给地基的塔形部件，也称索塔。

2.1.13 主缆 main cable

悬索桥的主要承重构件，由悬挂于塔顶、端部锚固于两个锚碇的钢丝绳、钢绞线索或平行钢丝索组成，又称悬索。

2.1.14 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，一般采用钢丝索、钢绞线或钢丝绳制作。

2.1.15 斜拉索 stay cable

斜拉桥中用来连接桥塔与桥面系的承重构件，一般由镀锌高强度钢丝索、高强低松弛镀锌钢绞线或钢丝绳制作。

2.1.16 索股 cable strand

主缆中由高强度钢丝预制或空中纺制而成的丝股。

2.1.17 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构件。

2.1.18 伸缩装置 expansion installation

为满足桥跨结构因气温变化、活荷载作用以及混凝土的收缩徐变引起的胀缩变形而设置的装置。

2.1.19 支座 bearing

支承上部结构并使上部结构固定于一定位置的部件。

2.1.20 桥墩 bridge pier

支承两相邻桥跨结构并将上部荷载传给地基的部件。

2.1.21 桥台 abutment

位于桥的两端与路基相衔接，承受台后填土压力并将桥上荷载传递到基础的构筑物。

2.2 参 考 标 准

- 1 《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB 50982
- 2 《动态公路车辆自动衡器》GB/T 21296
- 3 《自动气象站观测规范》GB/T 33703
- 4 《降雨自动监测仪技术要求及检测方法》HJ/T 175
- 5 《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》JT/T 1037

3 基本规定

3.1 主要监测内容

3.1.1 桥梁监测内容应根据监测目的、桥梁重要性、环境复杂性、桥梁力学特征、桥梁运营管理和养护的需求以及系统建造成本综合确定。

3.1.2 桥梁监测内容宜分为作用与环境、结构响应和耐久性，且宜分别包括下列项目：

1 作用与环境监测宜包括车辆荷载、环境温度、环境湿度、风荷载、地震动和腐蚀介质；

2 结构响应监测宜包括桥梁构件的振动、变形、位移、应力、索力、倾角、冲刷和结构温度；

3 耐久性监测宜包括混凝土构件的裂缝、氯离子含量、碳化和酸雨侵蚀，以及钢制部件的锈蚀和涂层脱落。

3.1.3 梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥的作用与环境监测参数、结构响应监测参数应分别符合表 3.1.3-1 ~ 表 3.1.3-4 的规定。

表 3.1.3-1 梁桥主要监测参数

监测内容	监测项目	监测参数	
作用与环境	车辆荷载	断面交通流、车辆总重、轴重、轴距、轴数、车型、车速	
	风荷载	风速和风向	
	地震动	承台顶部或桥墩底部振动	
	温度		箱梁内部温度
			梁外部温度
		太阳辐射强度	

续表 3.1.3-1

监测内容	监测项目	监测参数
作用与环境	湿度	箱梁内部湿度
		梁外部湿度
	腐蚀介质	氯离子浓度
		硫酸盐浓度
		酸雨 pH 值
结构响应	主梁响应	竖向振动
		横向振动
		纵向振动
		竖向位移
		横向水平位移
		纵向水平位移
		应变
		倾角
		结构温度
	伸缩缝响应	位移
	支座响应	位移
		反力
	桥墩和桥台响应	应变
		倾角
	基础响应	沉降位移
		冲刷

表 3.1.3-2 拱桥主要监测参数

监测内容	监测项目	监测参数	
作用与环境	车辆荷载	断面交通流、车辆总重、轴重、轴距、轴数、车型、车速	
	风荷载	风速和风向	
	地震动	承台顶部或桥墩底部振动	
	温度		箱梁内部温度
			梁外部温度
			主拱内部温度
			主拱外部温度
			太阳辐射强度
	湿度		箱梁内部湿度
			梁外部湿度
			主拱内部湿度
			主拱外部湿度
	腐蚀介质		氯离子浓度
			硫酸盐浓度
			酸雨 pH 值
结构响应	主梁响应	竖向振动	
		横向振动	
		纵向振动	
		竖向位移	
		横向水平位移	
		纵向水平位移	
		应变	
		倾角	
	结构温度		

续表3.1.3-2

监测内容	监测项目	监测参数
结构响应	拱圈响应	拱顶竖向振动
		拱顶横向振动
		拱顶纵向振动
		拱顶竖向位移
		拱顶横向位移
		拱顶纵向位移
		拱脚位移
		应变
		结构温度
	吊杆响应	索力
		振动
	伸缩缝响应	位移
	桥墩和桥台响应	应变
		倾角
	基础响应	沉降位移
		冲刷

表 3.1.3-3 斜拉桥主要监测参数

监测内容	监测项目	监测参数
作用与环境	车辆荷载	断面交通流、车辆总重、轴重、轴距、轴数、车型、车速
	风荷载	风速和风向
	地震动	承台顶部或桥墩底部振动
	温度	箱梁内部温度
		梁外部温度

续表 3.1.3-3

监测内容	监测项目	监测参数
作用与环境	温度	桥塔内部温度
		桥塔外部温度
		太阳辐射强度
	湿度	箱梁内部湿度
		梁外部湿度
		桥塔内部湿度
		桥塔外部湿度
	腐蚀介质	氯离子浓度
		硫酸盐浓度
酸雨 pH 值		
结构响应	主梁响应	竖向振动
		横向振动
		纵向振动
		竖向位移
		横向水平位移
		纵向水平位移
		应变
		倾角
		结构温度
	桥塔响应	纵向振动
		横向振动
		塔顶纵向位移
		塔顶横向位移
		应变

续表 3.1.3-3

监测内容	监测项目	监测参数
结构响应	桥塔响应	倾角
		结构温度
	斜拉索响应	索力
		振动
	伸缩缝响应	位移
	支座响应	位移
		反力
	桥墩和桥台响应	应变
		倾角
	基础响应	沉降位移
冲刷		

表 3.1.3-4 悬索桥主要监测参数

监测内容	监测项目	监测参数	
作用与环境	车辆荷载	断面交通流、车辆总重、轴重、轴距、轴数、车型、车速	
	风荷载	风速和风向	
	地震动	承台顶部或桥墩底部振动	
	温度		箱梁内部温度
			梁外部温度
			桥塔内部温度
			桥塔外部温度
			锚碇室内温度
			太阳辐射强度
	湿度		箱梁内部湿度
梁外部湿度			

续表 3.1.3-4

监测内容	监测项目	监测参数
作用与环境	湿度	桥塔内部湿度
		桥塔外部湿度
		锚碇室内湿度
		主缆内部湿度
	腐蚀介质	氯离子浓度
		硫酸盐浓度
酸雨 pH 值		
结构响应	主梁响应	竖向振动
		横向振动
		纵向振动
		竖向位移
		横向水平位移
		纵向水平位移
		应变
		倾角
		结构温度
	桥塔响应	纵向振动
		横向振动
		塔顶纵向位移
		塔顶横向位移
		应变
		倾角
	结构温度	
	缆索响应	索力

续表 3.1.3-4

监测内容	监测项目	监测参数
结构响应	吊杆响应	索力
		振动
	锚碇响应	位移
	伸缩缝响应	位移
	支座响应	位移
		反力
	桥墩和桥台响应	应变
		倾角
	基础响应	沉降位移
冲刷		

3.1.4 桥梁结构的耐久性主要与材料相关，其监测参数应符合表 3.1.4 的规定。

表 3.1.4 耐久性监测主要参数

监测内容	监测项目	监测参数
混凝土构件耐久性	裂缝	宽度
		长度
		深度
	氯离子含量	浓度
	碳化 (CO ₂) 和酸雨侵蚀	混凝土 pH 值
钢制部件耐久性	混凝土里面的普通钢筋锈蚀	锈蚀电流密度
		锈蚀电位
		混凝土电阻率
		极化阻抗

续表 3.1.4

监测内容	监测项目	监测参数
钢制部件耐久性	预应力钢绞线锈蚀	锈蚀电流密度
	钢材锈蚀	锈蚀深度
		锈蚀面积
	涂层脱落	脱落面积

3.2 传感器选型要求

3.2.1 传感器的选型应面向桥梁监测参数，满足监测内容的要求。

3.2.2 传感器的选型依据应符合下列规定：

1 作用与环境监测传感器的类型应结合桥址区水文、气象、地形和地质资料，以及桥梁所处道路性质确定；

2 结构响应监测传感器的类型应结合桥梁结构动力和静力分析结果确定；

3 耐久性监测传感器的类型应结合水文和气象资料、桥梁建筑材料、力学性能分析结果和养护规范确定。

3.2.3 传感器的主要性能应符合下列规定：

1 应具有良好的耐久性，对于埋入传感器的使用寿命不应低于 15 年，对于非埋入式传感器的使用寿命不应低于 5 年；

2 应具有足够的采样频率，可按照现行行业标准《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》JT/T 1037 的有关规定确定传感器的参数；

3 应具有足够的量程储备量，对于监测冲击的传感器宜工作在满量程的 20% ~ 30%，对于其他监测量宜工作在满量程的 30% ~ 70%；

4 应具有良好的分辨率、稳定性、重复性、灵敏度、精度和环境适应性。

3.3 传感器布设原则

3.3.1 传感器测点布置应符合下列规定:

1 应选择荷载作用和环境条件具有代表性的位置,宜能反映监测量的空间分布;

2 应选择结构性能参数变化敏感的部位,宜进行测点位置优化布设,测点应具有代表性和一定的冗余性,可合理利用结构的对称性减少测点数量;

3 选取的位置宜便于传感器或标靶的安装、检修、维护和更换以及线缆敷设。

3.3.2 传感器安装应符合下列规定:

1 安装时不宜影响结构的正常运营,安装后不应降低结构的安全性、适用性和耐久性;

2 应根据现场工作条件,合理选择内部预埋、钻孔埋置、胶结固定、焊接固定、栓接固定、夹具固定或吸附固定安装方式,使用的预埋件、锚杆、基座、支架和夹具应具有足够的强度、刚度和耐久性;

3 安装应定位准确和牢固可靠,不应影响传感器的工作性能造成影响,引出线缆应具有足够长度;

4 安装前应进行传感器标定,安装后应采集初值,并建立固定标识和安装信息档案。

3.3.3 传感器的保护装置应符合下列规定:

1 不应影响传感器的正常功能和性能;

2 应具有足够的强度、刚度和耐久性,且应拆卸方便和便于维护;

3 应具有良好的防雷、防尘、防潮和防生物侵害措施。

4 荷载作用与环境监测传感器

4.1 车辆荷载

4.1.1 车辆荷载监测宜采用车辆动态称重系统，选型应符合下列规定：

1 宜采用高速动态称重系统，高速动态称重系统应兼容低速车辆荷载监测，可按 15 km/h ~ 20 km/h 的时速作为选择低速或高速动态称重系统的分界车速。

2 主要技术指标宜满足表 4.1.1 的要求。

表 4.1.1 车辆动态称重系统主要技术指标

参数	指标
速度范围	20 km/h ~ 180 km/h
速度精度	±1.5%
最大称重	30 t/ 轴
称重精度	不宜低于 90%
轴距精度	±2.0%
车型分类精度	不宜低于 92%
流量精度	不宜低于 95%
工作温度	-40 °C ~ 65 °C

注：称重精度指整车的称重精度，流量精度采用计数表示。

4.1.2 车辆动态称重系统监测测点布置应符合下列规定：

- 1 应选择具有稳定支撑的铺装层；
- 2 宜覆盖所有行车道且应避免开伸缩缝；
- 3 安装路段应笔直，纵向（行驶方向）坡度不宜超过 3%，横向坡度不宜超过 1%。

4.1.3 车辆动态称重系统的安装应符合现行国家标准《动态公路车辆自动衡器》GB/T 21296 的规定。

4.2 风 荷 载

4.2.1 风荷载监测应采用风速风向仪，选型应符合下列规定：

1 宜采用三向超声速风速风向仪，可采用机械式风速风向仪；

2 主要技术参数应满足下列要求：

1) 风速量程不应小于其安装高度 100 年一遇的设计基准风速，并应考虑阵风系数的影响；

2) 风速测量允许偏差为 $\pm 0.5\text{m/s}$ ；

3) 风向分辨率宜优于 0.1° 。

4.2.2 风速风向仪监测测点宜选择在主梁跨中的桥面两侧、桥塔顶部和拱顶部位布置。

4.2.3 风速风向仪的安装应符合下列规定：

1 宜采用专用支架安装，支架与主体结构边缘高度不宜小于 3m，外伸长度不宜小于 5m。可安装在主梁吊杆上，传感器离桥面高度不宜小于 8m；

2 安装时中轴应垂直，风向仪的定北标志方向与正北方角度偏差应小于 0.5° 。

4.3 地 震 动

4.3.1 地震动监测的传感器选型应符合下列规定：

1 应采用三向传感器；

2 宜采用强震仪，可采用力平衡式、压电式、压阻式或电容式加速度计；

3 主要技术参数应满足下列要求：

1) 量程宜覆盖 $-2g \sim 2g$ ；

2) 频响范围宜在 $0 \sim 100\text{Hz}$ ；

3) 分辨率应优于 0.1mg 。

4.3.2 地震动监测测点布置可选择桥岸场地地表、桥梁承台顶部或桥墩底部。

4.4 环境温度

4.4.1 环境温度监测的传感器选型应符合下列规定:

- 1 可采用热电偶、热电阻、电子式或光纤光栅温度计;
- 2 主要技术参数应满足下列要求:
 - 1) 量程应超出桥址区已有气象观测温度极值 $\pm 30^{\circ}\text{C}$ 。当缺少气象资料时, 最低温度测量值宜小于 -50°C , 最高温度测量值宜大于 80°C ;
 - 2) 分辨率宜优于 0.1°C 。当低于 50°C 时, 测量允许偏差为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 当超过 50°C 时, 测量允许偏差为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

4.4.2 温度监测测点布置应符合下列规定:

- 1 对于桥梁外部环境温度监测, 宜选择桥梁上通风良好且不受日光直射的部位;
- 2 对于桥梁内部环境温度监测, 宜选择箱梁、主拱、桥塔和锚碇室内部的几何中心位置。

4.4.3 太阳辐射强度监测宜采用总辐射计, 其量程宜为 $0 \sim 2000\text{W}/\text{m}^2$, 应安装在桥梁上四周空旷且感应面无遮挡部位。

4.5 环境湿度

4.5.1 环境湿度的传感器选型应符合下列规定:

- 1 宜采用电容式湿度计, 可采用电阻式湿度计;
- 2 主要技术参数应满足下列要求:
 - 1) 量程宜为 $0 \sim 100\%RH$;
 - 2) 当相对湿度不超过 80% 时, 测量允许偏差为 $\pm 2\%RH$;
当相对湿度超过 80% 时, 测量允许偏差为 $\pm 4\%RH$ 。

4.5.2 湿度监测测点布置应符合下列规定:

- 1 对于桥梁外部环境湿度监测, 宜选择桥梁上通风良好且不受日光直射的部位;

2 对于桥梁内部环境湿度监测，宜在箱梁、主拱、桥塔、锚碇室内部和主缆内部。

4.5.3 湿度传感器安装后应采取防尘措施。

4.6 腐蚀介质

4.6.1 腐蚀介质监测仪器设备选型应符合下列规定：

1 海洋环境下氯离子浓度监测宜采用氯离子监测仪，其工作温度宜为 $0 \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，测量允许偏差为 $\pm 10\%$ ，量程宜为 $0 \sim 20000\text{ppm}$ ；

2 硫酸盐离子含量监测宜采用硫酸盐监测仪，其工作温度宜为 $0 \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，测量允许偏差为 $\pm 2\%$ ，量程宜为 $0 \sim 2500\text{mg/L}$ ；

3 酸雨 pH 值监测宜采用在线酸雨监测系统，其工作温度宜为 $0 \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，测量原型偏差为 $\pm 0.05\text{pH}$ ，量程宜为 $0 \sim 14.00\text{pH}$ ，且应符合现行行业标准《降雨自动监测仪技术要求及检测方法》HJ/T 175 的规定。

4.6.2 腐蚀介质监测仪器设备的测点布置应符合下列规定：

1 对于位于海洋环境下的桥梁，氯离子监测仪应安装在桥墩和主梁氯离子侵蚀严重的部位；对于冬季采用除冰盐的桥梁，氯离子监测仪应安装在桥面板上以及桥面板与主梁搭接处；

2 对于位于硫酸盐环境中的桥梁，硫酸盐离子监测仪应埋入桥墩位于地下富含硫酸盐的部位；

3 对于位于酸雨污染严重地区的桥梁，酸雨监测系统应安装在桥梁上部结构易淋雨部位和积水区。

5 结构响应监测传感器

5.1 一般规定

5.1.1 桥梁结构各种响应监测传感器的选型应符合下列规定:

1 主梁、拱圈、桥塔、斜拉索、吊杆振动加速度监测可采用力平衡式、压电式、压阻式或电容式加速度计;

2 主梁、拱圈、桥塔、桥墩(台)应变监测传感器可采用电阻式、振弦式或光纤类应变计;

3 主梁、拱圈、桥塔结构温度监测传感器可采用热电偶、热电阻或光纤光栅温度计;

4 主梁、桥塔、桥墩(台)倾角监测传感器宜采用双轴倾角仪,可采用单轴倾角仪。

5.1.2 主梁、拱圈、桥塔变形、基础沉降监测传感器的安装应符合下列规定:

1 监测基准站应选取桥址区附近地基稳定、无遮挡、远离人为和电磁干扰的位置,变形监测站应安装在能够真实反映主梁变形的部位,且应避免人为和环境干扰;

2 光学测量仪的监测点处应安装永久性标靶,标靶上面宜有“十”字标识。

5.1.3 主梁、拱圈、桥塔、桥墩(台)应变和结构温度监测传感器的安装应符合下列规定:

1 对于新建混凝土结构构件,应在施工过程中将埋入式应变计和温度计固定在预定部位;

2 对于既有混凝土和钢结构构件,外置式应变计应固定在结构拟监测部位的表面,外置式温度计应紧密粘贴在结构拟监测部位的表面;

3 应变计安装后,应记录传感器的初始值和当前温度值。

5.2 主 梁

5.2.1 主梁振动监测可采用相对测量法或绝对测量法。

1 相对测量法应符合下列规定:

- 1) 应在被监测桥梁的桥址区附近设置永久参考点,宜在桥梁监测测点上或测点附近位置设置标靶、反光镜或三角反射器;
- 2) 可采用激光多普勒测速仪、光学测量仪或雷达扫描仪进行监测。

2 绝对测量法应符合下列规定:

- 1) 速度监测宜采用电动位移摆,可采用磁电式速度计;
- 2) 位移监测宜采用全球导航卫星系统。

5.2.2 主梁振动监测测点布置应符合下列规定:

- 1 测点位置应根据结构模态分析结果进行测点优化布设;
- 2 测点位置应包含结构主要振型中振幅较大的部位,且应避开振型节点。其中,对于宽桥面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,且应同时监测三个主方向的振动。

5.2.3 主梁变形监测传感器可采用全球导航卫星系统、光学测量仪、微波测量仪或液压连通管。

5.2.4 主梁变形监测测点布置应符合下列规定:

- 1 测点应布置在变形较大的部位。其中,对于桥面较宽或曲形的主梁,应进行扭转变形监测,测点宜上下游对称布置。
- 2 对于整体变形监测尚应建立工程变形监测基准网。

5.2.5 主梁应变监测的传感器主要技术参数应符合下列规定:

- 1 量程不应小于最大应变预测值的 1.5 ~ 2 倍;
- 2 应具有温度补偿功能。

5.2.6 主梁应变监测测点应布置在应力较大和易于出现疲劳开裂的部位。

5.2.7 主梁倾角监测测点应布置在倾角较大的部位,宜对称布置。

5.2.8 主梁结构温度监测传感器可采用热电偶、热电阻或光纤光栅温度计。

5.2.9 主梁结构温度监测的测点宜根据热传导分析结果，布置在温度变化较大和温度梯度较大的区域，应能反映结构竖向和横向温度场变化规律。

5.3 拱 圈

5.3.1 拱圈振动监测测点应布置在拱顶部位。

5.3.2 拱圈位移监测的传感器选型应符合下列规定：

1 拱顶位移监测宜采用全球导航卫星系统，可采用光学测量仪；

2 拱脚位移监测宜采用位移计。

5.3.3 拱圈位移监测测点布置应符合下列规定：

1 测点应布置在变形较大的部位；

2 对于中小跨径拱桥，测点位置应包含拱顶和拱脚部位；对于大跨径拱桥，测点位置除应包含拱顶和拱脚部位，尚宜在立柱或吊杆处的拱圈断面部位适当增加测点。

5.3.4 拱圈应变监测测点布置应符合下列规定：

1 测点应布置在应力较大的部位；

2 测点应包含拱脚和拱顶断面，对于受力复杂和易于出现疲劳开裂的部位应采用应变花。

5.3.5 拱圈结构温度监测的测点宜根据热传导分析结果，布置在温度变化较大和温度梯度较大的区域，且应包括拱顶与拱脚断面。

5.4 桥 塔

5.4.1 桥塔振动监测测点布置应符合下列规定：

1 测点位置应根据结构模态分析结果进行确定；

2 测点位置应包含桥塔主要振型中振幅较大的部位，且应避免开振型节点。

5.4.2 桥塔位移监测传感器宜采用全球导航卫星系统，可采用光学测量仪。

5.4.3 桥塔位移监测测点应选择桥塔顶部，每个桥塔不应少于1个测点。

5.4.4 桥塔应变监测测点布置应符合下列规定：

1 测点应布置在应力较大的部位；

2 测点位置应包含桥塔塔柱上、中、下断面；对于桥塔锚固区，宜增设动应变计；

3 每个应变监测断面的测点数量不宜少于4个。

5.4.5 桥塔倾角监测测点宜布置在桥塔顶部。

5.4.6 桥塔结构温度监测的测点宜根据热传导分析结果，布置在温度变化较大和温度梯度较大的区域，且应包括塔顶部位。

5.5 缆索、斜拉索和吊杆

5.5.1 缆索、斜拉索和吊杆的索力监测传感器宜采用磁通量传感器，可采用压力计。

5.5.2 缆索、斜拉索和吊杆的索力监测测点布置应符合下列规定：

1 应选择索力较大和索力变化较大的构件；

2 测点位置应包含上游和下游构件，宜均匀分布。

5.5.3 斜拉索和吊杆的振动监测测点布置应根据模态分析结果确定，且测点位置应远离被测构件的下锚点。

5.6 锚 碇

5.6.1 锚碇位移监测宜采用数码式位移计，可采用红外线激光位移计。

5.6.2 锚碇位移监测测点布置应符合下列规定：

1 对于重力式锚碇位移监测点，宜设置在锚碇四个角点及纵、横向轴线的端部；

2 对于隧道式锚碇位移监测点，宜沿前锚面的外边缘以及

散索鞍支墩均匀布设。

5.6.3 锚碇位移监测传感器当采用红外线激光位移计时，应保持激光发射窗和反光镜光洁，发射口应与反射面垂直，且应避免光线阻挡或太阳直射。

5.7 伸 缩 缝

5.7.1 伸缩缝位移监测可采用拉绳式或拉杆式位移计、全球导航卫星系统或智能全站仪。

5.7.2 伸缩缝位移监测测点布置应符合下列规定：

- 1 对于单伸缩装置的伸缩缝，测点宜上、下游对称布置；
- 2 对于多伸缩装置的伸缩缝，测点宜关于每个伸缩装置上、下游对称布置。

5.8 支 座

5.8.1 支座位移监测传感器宜采用拉绳式或拉杆式位移计，可采用激光测距仪。

5.8.2 支座位移监测测点布置应符合下列规定：

- 1 对于尺寸较大的支座，测点宜关于支座对称布置；
- 2 通过竖向位移监测支座反力时，竖向位移测点宜关于支座对称布置。

5.8.3 当采用激光测距仪监测支座位移时，传感器安装应按本规程第 5.6.3 条的规定执行。

5.8.4 支座反力监测可按照现行国家标准《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB 50982 的有关规定执行。

5.9 桥墩和桥台

5.9.1 桥墩（台）应变监测测点应布置在应力较大的桥墩（台）上，且宜沿横截面对称布置。

5.9.2 桥墩倾角监测测点应布置在倾角较大的桥墩顶部。

5.10 基 础

5.10.1 基础沉降监测宜采用全球导航卫星系统。

5.10.2 基础沉降监测测点宜布置在桥墩顶部，可布置在桥台上部四角。

5.10.3 基础冲刷监测传感器宜采用声呐传感器，可采用磁性标签石块。

5.10.4 基础冲刷监测测点布置应符合下列规定：

1 测点应结合结构分析或冲刷模型试验结果，选择冲刷深度或速率较大的区域；

2 声呐传感器探头应布置在圆端形（圆形）桥墩上游、下游和侧面最大冲刷部位，磁性标签石块应布置在桥墩上游。

5.10.5 基础冲刷监测传感器的安装应符合下列规定：

1 对于新建基础，应在施工过程中将声呐传感器或磁力梯度仪的安装基座固定在预定部位；对于既有基础，应在拟监测部位外侧安装声呐传感器或磁力梯度仪的安装基座；

2 声呐探头与预埋基座间宜采用非固定连接，应根据结构分析或冲刷模型试验结果确定声呐探头指向角度以及探头与桥墩间的距离。

6 耐久性监测传感器

6.1 混凝土构件

6.1.1 裂缝监测的传感器选型应符合下列规定:

- 1 可采用电阻式、电感式、机械式或光纤光栅裂缝计;
- 2 主要技术参数应满足下列要求:
 - 1) 量程不应小于测量区域最大变形预测值的 1.2 倍;
 - 2) 测量允许偏差为 ± 0.01 mm。

6.1.2 裂缝监测测点布置应符合下列规定:

- 1 对易因受力引起的裂缝, 测点应选择拉应力最大的部位;
- 2 对易因锈胀引起的裂缝, 测点宜选择混凝土桥面板、桥面板与主梁搭接处以及桥墩等易发生腐蚀的部位。

6.1.3 裂缝监测传感器的安装应符合下列规定:

- 1 对易因受力引起的裂缝, 传感器的安装方向应与混凝土表面拉应力方向平行;
- 2 对易因锈胀引起的裂缝, 传感器的安装方向应与主筋受力方向垂直。

6.1.4 氯离子监测传感器宜采用固态 Ag/AgCl 参比电极。

6.1.5 氯离子监测测点布置应符合下列规定:

- 1 对于冬季采用化冰盐的桥梁, 测点宜布置在桥面板上以及桥面板与主梁搭接部位;
- 2 对于处于海洋环境下的桥梁, 测点宜布置在桥墩的浪溅区及与海水接触区、桥面板, 以及主梁最大受力部位。

6.1.6 氯离子监测传感器的安装应符合以下规定:

- 1 对于新建桥梁, 应采取预埋式安装; 对于既有桥梁, 应采取钻孔埋入式安装;
- 2 传感器安装方向应与混凝土保护层的厚度方向一致, 其

沿深度间距不宜超过 10mm，水平间距不宜超过 50mm。

6.1.7 碳化和酸雨侵蚀监测传感器宜采用固态 pH 值参比电极。

6.1.8 碳化和酸雨侵蚀监测测点布置应符合下列规定：

1 混凝土碳化监测测点宜布置在构件受力最大部位；

2 酸雨侵蚀监测的测点宜布置在桥梁上部结构易淋雨部位或积水区。

6.1.9 碳化和酸雨侵蚀监测传感器的安装应按本规程第 6.1.6 条的规定执行。

6.2 钢制部件

6.2.1 混凝土中普通钢筋锈蚀监测宜采用电化学腐蚀传感器，可采用电阻式、电感式或光纤光栅非电化学腐蚀传感器。

6.2.2 混凝土中普通钢筋锈蚀监测测点的布置应符合下列规定：

1 对于桥梁上常年潮湿或易积水的部位，应布置腐蚀监测测点；

2 对于冬季采用化冰盐的桥梁，测点宜布置在桥面板上以及桥面板与主梁的搭接部位；

3 对于处于海洋环境下的桥梁，测点宜布置在桥墩与海水接触的部位、主梁拉应力最大部位，以及桥面板拉应力最大部位。

6.2.3 混凝土中普通钢筋锈蚀监测传感器的安装应符合下列规定：

1 对于新建桥梁，应采取预埋式安装；对于既有桥梁，应采取钻孔埋入式安装；

2 应安装在钢筋表面；

3 对传感器进行密封保护时不应改变混凝土表面的环境条件。此外，对于电化学腐蚀监测传感器，若因条件限制而安装在混凝土表面时，应进行混凝土电阻补偿。

6.2.4 预应力钢绞线锈蚀监测宜采用电化学腐蚀传感器。

6.2.5 预应力钢绞线锈蚀监测测点布置应符合下列规定：

- 1 对于后张预应力钢绞线，测点应布置在钢绞线的锚固端；
 - 2 对于先张预应力钢绞线，测点应布置在钢绞线锚固端和钢绞线拉应力最大部位。
- 6.2.6** 预应力钢绞线的锈蚀监测传感器的安装应按本规程第 6.2.3 条的规定执行。
- 6.2.7** 钢材锈蚀监测可采用电阻探针、超声波或电化学方法。
- 6.2.8** 钢材锈蚀监测的测点布置应符合下列规定：
- 1 应根据静力分析结果，布置在构件应力最大的部位；
 - 2 测点位置宜包含构件节点处、结构长期受紫外线照射部位和易积水的部位。
- 6.2.9** 钢材锈蚀监测传感器的安装应符合下列规定：
- 1 应确保传感器和钢材表面直接接触；
 - 2 传感器应与钢材表面保持垂直。
- 6.2.10** 涂层脱落监测宜采用薄片式电阻传感器。
- 6.2.11** 涂层监测的测点布置应按本规程第 6.2.8 条的规定执行。
- 6.2.12** 涂层监测传感器的安装应符合下列规定：
- 1 对于新建桥梁，传感器宜在涂层喷涂前预先安装在预定测点处；对于既有桥梁，应清除现有涂层再进行安装；
 - 2 传感器安装后的表面应平整，且其表面涂层厚度应与构件表面涂层厚度一致。

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”或“可”；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，采用“可”。

2 规程中指明应按其他有关标准执行时的写法为“应符合……的规定”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 15-2020

条文说明

制 订 说 明

《桥梁健康监测传感器选型与布设技术规程》T/CCES 15-2020，经中国土木工程学会 2020 年 11 月 16 日以学标（2020）10 号函文批准发布。

本规程制订过程中，编制组进行了深入的调查研究，总结了我国结构健康监测传感器选型与布设领域的实践经验，同时参考了相关先进技术法规和技术标准。

为便于广大检测、设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，本规程编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。需要注意的是，本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

目 次

1	总则	32
3	基本规定	33
3.1	主要监测内容	33
3.2	传感器选型要求	33
3.3	传感器布设原则	33
4	荷载作用与环境监测传感器	35
4.1	车辆荷载	35
4.2	风荷载	35
4.4	环境温度	35
4.5	环境湿度	36
5	结构响应监测传感器	37
5.1	一般规定	37
5.2	主梁	37
5.7	伸缩缝	37
5.8	支座	38

1 总 则

1.0.2 传统的公路及铁路桥梁一般可以分为四种结构类型，即梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥，本规程涉及传感器选型及布设的具体条款内容，均以四种桥梁类型的主要结构构件为基础进行规定。随着桥梁设计理论和建造技术的不断发展，包括斜拉悬索协作体系在内的多种特殊的桥梁结构形式不断涌现。针对特殊桥梁结构体系，其健康监测传感器的选型与布设应进行专题讨论，不在本规程适用范围内。

3 基本规定

3.1 主要监测内容

3.1.2 耐久性监测主要从构成桥梁结构的建筑材料层面考虑，以桥梁结构常用的混凝土和钢这两种主要建筑材料构成的结构构件、部件为监测对象，对腐蚀环境作用下的材料退化情况及其量化指标进行监测。

3.2 传感器选型要求

3.2.3

1 埋入式传感器一般以埋入式应变和温度传感器以及耐久性监测传感器为主。对于光纤光栅等耐久性较好的埋入式传感器，其稳定性和可靠性一般最长也仅能维持 15 年左右。该指标已经得到包括传感器生产商和多篇国内外研究报告的印证。相比于埋入式传感器，非埋入式传感器直接暴露在桥梁结构体外部，一般来讲其使用环境更加恶劣。目前常用的非埋入式传感器生产商给出的一般使用年限在 5 年左右。

综合考虑上述传感器技术因素和整体监测系统的成本因素，本规程给出埋入式传感器的使用寿命不应低于 15 年，非埋入式传感器使用寿命不应低于 5 年的规定在技术上是可行的，在成本上是合理的。

3.3 传感器布设原则

3.3.1

2 在结构健康监测中，测点优化布设主要指对用于动力性能监测的加速度计进行优化布设。对于其他类型的传感器一般都有特定的布设位置，如风速风向仪主要布设在桥塔顶部或主梁跨

中，应变计主要通过有限元分析确定极值或关键控制位置等。加速度计的优化布设主要依据结构动力学基本原理进行计算分析，包括三个步骤：

- 1) 获取模态数据和待选测点。基于结构设计资料，建立有限元模型进行模态分析，得到用于测点优化布设的基准模态数据。
- 2) 选择优化布设评价准则。根据监测数据分析需求和结构状态评估的目的，选择与结构健康监测目标相适宜的评价标准。测点优化布设评价准则分为结构响应强度评价准则、模态识别误差评价准则、模态重构精度评价准则三大类。其中，结构响应强度评价准则包括：模态幅值类准则（含模态向量加和准则、模态向量乘积准则）和模态能量类准则（含平均加速度准则、模态动能准则、模态应变能准则、驱动点残差准则、Guyan 缩聚准则）；模态识别误差评价准则包括：准则性准则（费希尔信息阵准则）、鲁棒性准则（条件数准则）、无偏性准则（表征最小二乘法准则）、确定性准则（模态信息熵准则）；模态重构精度评价准则包括：模态可视化准则（含切比雪夫准则、空间域采样准则、共有信息准则、信息差异准则、空间相关度准则）、模态独立性准则（含有效独立准则、QR 分解准则、模态保证准则）、模态保真度准则（含均方差准则、协方差准则、克里金准则）。
- 3) 进行布设方案求解分析。利用优化求解算法，从所有可能的测点布设方案中，计算出满足评价准则的适宜布设方案。

4 荷载作用与环境监测传感器

4.1 车辆荷载

4.1.1 车辆动态称重系统的主要技术指标是依据现行国家标准《动态公路车辆自动衡器》GB/T 21296 确定的。车辆动态称重系统的路面传感器布置一般采用压电传感器—感应线圈—压电传感器组合形式，其测试原理为：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—压电轴传感器由两根相距 3m 轴传感器中间 2m 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。

4.2 风荷载

对于建筑结构，其外围护结构易受风压破坏，有时需要进行风压监测。在桥梁健康监测领域，主要监测风速和风向，对风场风压的监测较为少见，故本规程不对相关内容进行规定。

4.4 环境温度

4.4.1

1 常用的温度计包括热电偶、热电阻、电子式以及光纤温度计三种。热电阻温度计又可以分为电阻式温度检测器和热敏电阻器，其具有量程大、精度高、适用范围广的特点。电子式温度计具有体积小、功耗低、成本低的优点。热电偶温度计相比于前两种温度计，存在灵敏度较低的缺点。光纤光栅温度计多用于监测结构温度。

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°C ，极端最低气温为 1969 年 2 月 13 日在漠河观测到的 -52.3°C 。考虑桥梁结构表面热辐射效应对温度计监测温度的影响，同时参考现行国家标准《自动气象站观测规范》GB/T 33703，在无观测记录的情况下温度计最低测量温度不宜高于 -50°C ，最高测量温度不宜低于 80°C 。

4.5 环境湿度

4.5.1 关于湿度计测量性能的有关规定可参考现行国家标准《自动气象站观测规范》GB/T 33703 第 5.1 和 5.4 节。

2 在 $-10^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 条件下，电阻式湿度计的测量范围为 10% RH \sim 90% RH，电容式湿度计的测量范围为 0 \sim 100% RH。

5 结构响应监测传感器

5.1 一般规定

5.1.1

2 振弦式传感器在使用过程中由于钢弦初张会发生轻微的蠕变,但这种传感器因具有价格低廉、安装和更换方便等优点,在实际监测工程中应用普遍,一般可通过每年标定一次来确保测量结果的可靠性。

5.1.2

2 本规程所述的用于监测主梁等变形的光学测量仪主要指全站仪。为了达到对被测物位移进行长时间连续观测的目的,该类光学测量仪需要在被测物上设置固定的标靶。

5.2 主 梁

5.2.6 对于混凝土桥梁,主梁应变监测宜重点考虑主跨跨中、四分之一跨、四分之三跨和边跨跨中的底板、顶板、腹板易开裂的地方;对于钢结构桥梁,宜重点监测主跨跨中、四分之一跨、四分之三跨和边跨跨中的底板、顶板、U肋焊接处、横隔板焊接处易疲劳部位;对于钢-混凝土组合桥梁,除了重点监测易开裂和易疲劳部位外,还应重点监测栓钉。混凝土腹板和易疲劳部位应采用应变花。

5.7 伸 缩 缝

5.7.1 伸缩装置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。

5.8 支 座

5.8.2

2 在受测支座附近安装千斤顶,通过分级施加顶力可获得顶力与位移之间的关系,分析比较可得出支座的实际反力值。由于支座的垫实状态不同,实际曲线与典型曲线可能有所不同。