

中国钢结构协会标准

钢结构监测技术标准

T/CSCS 033-2022

主编单位：中冶检测认证有限公司

批准单位：中 国 钢 结 构 协 会

施行日期：2022 年 12 月 1 日

前 言

根据中国钢结构协会《关于发布中国钢结构协会 2020 年第一批团体标准编制计划的通知》（中国钢协[2020]）第 10 号）文件要求，编制组经广泛调查研究，认真总结工程实践经验，参考国家、行业相关标准，并在广泛征求意见的基础上，编制了本标准。

本标准共 8 章，主要内容包括：1.总则；2.术语；3.基本规定；4.监测系统；5.施工监测；6.使用监测；7.监测数据分析与结构状态评估；8.监测评估报告。

本标准由中国钢结构协会负责管理，由中冶检测认证有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见和建议，请反馈至中冶检测认证有限公司（地址：北京西土城路 33 号）。

本标准主编单位：中冶检测认证有限公司

本标准参编单位：中建国际建设有限公司

北京工业大学

同济大学

中冶（上海）钢结构科技有限公司

中冶建筑研究总院有限公司

清华大学

中恒丰建筑集团有限公司

北京科技大学

北京市建筑设计研究院有限公司

长沙金码测控科技股份有限公司

中国建筑第三工程局有限公司

鄂尔多斯市康巴什区政府投资项目代建中心

中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所

国家工业建构筑物质量安全检验检测中心，

研院检测中心有限公司

中国钢结构协会钢结构质量安全检测鉴定专业委员会

江苏建科鉴定咨询有限公司，同恩（上海）工程技术有限公司

江苏省建筑工程质量检测中心有限公司

中建工程产业技术研究院有限公司

深圳生富检测股份公司

北京大兴国际机场航站楼管理部

江苏科迪建设工程质量检测有限公司

中国铁道科学研究院集团有限公司

北京首都国际机场股份有限公司

中国石化销售股份有限公司

国家钢结构质量监督检验中心

本标准主要起草人员：弓俊青 韦永斌 吴金志 夏 烨 刘明路 高未未 李大军 李 涛
仇安兵 杨文锦 叶智武 米维刚 宋 昊 高喜欣 王 晶 朱忠义
张 韬 郑 云 王永泉 唐 坤 马海英 刘洪兵 李贺贺 侯忠明
谢 军 王汉武 张 伟 鞠晓臣 杨 鑫 刘 栋 李 健 曹 振
颜子奇 陈立永 赵准 张华栋

本标准主要审查人员：罗永峰 李久林 耿树江 吴 体 张天申 陈桥生 董振平

目次

前 言	2
目 次	4
1 总则	1
2 术语	2
3 基本规定	3
3.1 基本要求	3
3.2 监测要求	3
3.3 结构状态评估	4
4 监测系统	5
4.1 一般规定	5
4.2 电测传感系统	5
4.3 振弦传感系统	8
4.4 光纤传感系统	9
4.5 测量机器人系统	12
4.6 图像式变形监测系统	12
4.7 GNSS 变形监测系统	12
4.8 环境监测系统	13
4.9 三维激光扫描系统	13
4.10 监测集成平台	14
5 施工监测	15
5.1 一般规定	15
5.2 大跨钢结构施工监测	15
5.3 多高层与高耸钢结构施工监测	16
5.4 桥梁钢结构施工监测	17
6 使用监测	20
6.1 一般规定	20
6.2 大跨钢结构使用监测	20
6.3 多高层与高耸钢结构使用监测	21
6.4 桥梁钢结构使用监测	22
6.5 工业建构筑钢结构使用监测	24
7 监测数据分析与结构状态评估	26
7.1 一般规定	26
7.2 监测数据分析	26
7.3 结构状态评估	28
8 监测评估报告	30
8.1 一般规定	30
8.2 报告要求	30
附录 A	31
参考标准	33
条文说明	34

目 次	35
1 总则	36
2 术语和符号	37
3 基本规定	38
3.1 基本要求	38
3.2 监测要求	39
3.3 结构状态评估	40
4 监测系统	41
4.1 一般规定	41
4.2 电测传感系统	41
4.3 振弦传感系统	42
4.4 光纤传感系统	42
4.5 测量机器人系统	44
4.6 基于图像的非接触变形监测系统	44
4.7 GNSS 变形监测系统	44
4.8 环境监测系统	45
4.9 三维激光扫描系统	45
5 施工监测	46
5.2 大跨钢结构工程施工监测	46
5.3 多高层与高耸钢结构工程施工监测	46
5.4 桥梁钢结构施工监测	46
6 使用监测	47
6.1 一般规定	47
6.2 大跨钢结构使用监测	47
6.3 多高层与高耸钢结构使用监测	48
6.4 桥梁钢结构监测	48
6.5 工业建构筑钢结构使用监测	49
7 监测数据分析与结构状态评估	50
7.1 一般规定	50
7.2 监测数据分析	50
7.3 结构状态评估	51
8 监测评估报告	52
8.1 一般规定	52
8.2 报告要求	52

1 总则

1.0.1 为规范钢结构监测工作，贯彻国家技术经济政策，做到技术先进、数据可靠、经济合理、保证监测工作质量，制订本标准。

1.0.2 本标准适用于钢结构施工与使用期间的结构状态监测与评估，钢结构的测试及试验可参照执行。

1.0.3 钢结构的监测与评估，除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 钢结构监测 steel structural monitoring

在监测对象的指定位置安装传感器系统、对钢结构的状况或响应进行连续性测试与量测的工作。

2.0.2 施工监测 construction monitoring

施工阶段的结构监测。

2.0.3 使用监测 serviceability monitoring

投入使用后，正常使用阶段的结构监测。

2.0.4 监测参数 monitoring parameters

传感器量测的物理或力学量，如应变、位置坐标、加速度、温度、风速等参数。

2.0.5 监测项 monitoring items

结构荷载或响应状态相关的力学或物理量，如轴力、弯矩、应力、索力、挠度、侧移、支座滑移等项。

2.0.6 监测集成平台 monitoring integration platform

由不同监测子系统按照统一架构集成的平台，可实现数据集中管理、可视化显示、协同分析与评估，具有自动报警等功能。

2.0.7 监测预警值 precaution value for monitoring

依据规范规定、设计要求、工程经验或施工过程结构分析结果等，设定的应引起相关单位以预警关注的参照值。

2.0.8 安全评估 safety assessment

通过监测数据分析钢结构当前的工作状态，并与相应的临界状态进行比较分析，评价其安全等级，安全评估包括一级评估、二级评估和专项评估。

2.0.9 状态一级评估 safety assessment: level 1

将各类监测参数特征值与预先设计计算分析设定的限值进行对比，分析钢结构安全的方法。

2.0.10 状态二级评估 safety assessment: level 2

根据监测数据、结构损伤和偏差修正结构计算分析模型，进行结构修正模型设计荷载下的计算分析，评估钢结构安全状态的方法。

2.0.11 专项检查 special inspection

使用专业技术手段为实现特定目的而开展的钢结构现状检查活动。

2.0.12 专项评估 special assessment

钢结构遭受地震、风灾、火灾、化学腐蚀等极端荷载或遭受突发事件后，为确定结构整体或局部安全状态而专门开展的评估工作。

2.0.13 结构重分析 structure reanalysis

使用修正后的有限元模型，选取监测荷载或设计荷载中的较大值，重新对结构进行静力分析和动力分析。

3 基本规定

3.1 基本要求

3.1.1 钢结构在施工和使用期间宜根据设计要求和工程实际需要对结构状态及变化进行监测，依据监测结果进行结构安全控制与状态评估。

3.1.2 钢结构监测可分为施工监测与使用监测，当需要分别进行施工监测和使用监测时，应统筹两个阶段的监测工作。

3.1.3 监测前应制定监测方案，内容应包括：项目概况、监测目的、监测项、测点布置、监测系统安装方法与防护措施、数据采集方式与处理模式、监测数据报送与报警方式。

3.1.4 监测参数宜选择与监测项一致或有直接函数关系的可测参数；否则，监测参数可通过其与监测项之间的几何、力学和物理关系，选择多测点可测参数或间接可测参数。

3.1.5 监测传感器技术应成熟、性能稳定，传感方式应根据监测现场环境、监测参数的性能指标要求、经济性综合选择，并在使用前对传感系统性能进行标定。

3.1.6 监测系统应稳定可靠，性能应满足监测要求，监测用硬件与软件应通过与监测现场环境相符的试验测试与验证。

3.2 监测要求

3.2.1 监测项宜包括环境荷载作用监测项与结构响应监测项，应根据监测内容、结构控制要求与可测性选择。

3.2.2 环境荷载作用监测项宜选择与相应荷载规范一致的特征代表值，也可按监测项的实际分布，选择可测且能正确反映其分布的特征值作为监测项。

3.2.3 监测点布置宜符合以下原则：

1 监测点宜布置在监测项空间分布的特征点处，且便于传感器的安装连接、维护和更换；

2 监测点数量应能满足监测项数据特征值统计与结构验算分析要求，且宜有冗余量；重要监测项与重要部位宜增加测点，施工过程中出现内力变号或短期应力可能超过结构安全预警值的构件应布置相应测点；

3 测点布置应有消除环境与次要因素影响的措施。

3.2.4 监测准备工作应包括以下内容：

1 监测系统功能调试，在系统工作正常后方可进行监测；

2 设置相应的监测预警值，预警值可按异常和危险状态设置，且应有相应的应急处理预案；

3 检查并记录监测初始状态对应的结构实际荷载状况和结构变形、振动、损伤缺陷等技术状况信息。

3.2.5 数据采集方式应能保证监测数据的衔接连续性，并宜符合一下原则：

- 1 施工监测数据采集方式应根据工程需要确定；
- 2 使用监测数据采集方式宜采用固定时间点或等间隔连续数据采集方式，进行台风、爆破、地震等偶然作用及其结构响应的监测时，动态数据采集宜采用触发启动与结束的机制；
- 3 当监测结构发生质量或安全事故、周边场地较严重沉降变形或影响结构安全的灾害事件时，应提高数据采集频次：

3.2.6 监测数据应建立原始记录档案或数据库，并应按下列要求进行保存和备份：

- 1 静态监测原始数据和分析数据宜永久存储；
- 2 动态监测原始数据保存时间不宜低于3个月或工程验收时间，分析数据宜永久存储；施工监测分析数据宜每季度备份一次，使用监测分析数据宜每半年备份一次；
- 3 对于存储量较大的动态实时监测数据，可根据监测项目需要按等时段覆盖或重点关注工况时段进行存储和数据分析。

3.2.7 监测数据出现异常时，应对异常测点传感器及监测子系统进行排查；当数据异常为监测系统故障或缺陷导致时，应对监测系统进行维护或完善；否则，应对荷载作用变化、结构变形或损伤状况进行排查，并应遵守下列规定：

- 1 当数据异常原因确定、且数据极值和变化未超报警值时，应继续进行监测，且宜提高采样频次和加强现场巡视检查；
- 2 当数据异常原因暂时无法确定、且数据极值和变化未超报警值时，应采取实时采样机制，并对结构进行详细检查、检测和分析验算，分析评估数据异常原因和结构安全性；
- 3 当数据极值或变化值达到或超出报警值时，应报警并启动应急预案。

3.2.8 监测期间应对监测系统的工作状况进行巡视检查与系统维护。

3.3 结构状态评估

3.3.1 可依据监测数据对钢结构设计符合性、施工偏差影响和结构状态进行评估。

3.3.2 结构状态评估可采用在线或离线方式，也可采用两者相结合的方式。

4 监测系统

4.1 一般规定

4.1.1 监测系统应能满足监测现场的条件，具有与监测期相适应的长期稳定性，需要长期监测的工程，应优先考虑自动化监测。

4.1.2 监测系统应根据监测需要及现场情况进行设计，并宜设置专用监控室，监测期间应对监测系统的有效性进行检查和维护。

4.1.3 采用自动化监测时，监测系统应具有完整的自检、采集、传输、存储、数据处理及控制、显示及预警功能，并宜具备状态评估功能。

4.1.4 采用非自动监测时，监测工作应具备完善的数据采集、记录、处理和存储工作流程。

4.1.5 监测系统应采用模块化、单元化、标准化设计，确保软硬件模块无缝连接，当系统包含多种传感子系统时，各传感子系统的数据采集和数据传输应相互独立。

4.1.6 监测系统宜对施工监测和使用监测统筹规划，并基于同一软件工具平台开发，硬件集成应考虑兼容性，系统扩容应具有便捷性，应方便智慧工地监测系统接入。

4.1.7 监测系统网络可采用有线、无线或有线与无线相结合的方式。

4.1.8 监测系统的安装应符合下列规定：

1 传感器安装应牢固可靠，应有消除或减少环境干扰的措施，具有适应监测现场环境保护功能，并应详细记录传感器的安装位置、编号、连接仪器和安装调试状态；

2 监测系统安装应按测点布置图、传感器与监测仪器联结关系图进行，传感信号线、电源线连接可靠，减少传输损耗，避免虚接、接头裸露。

4.1.9 监测系统运行前应进行参数设置和调试，并应符合下列规定：

1 监测传感器应在计量校准证书有效期内，新型传感器使用前应通过检定校准；

2 监测前应对传感器进行初始状态设置或调零，监测传感器应满足工程对量程、分辨力、线性度、灵敏度、迟滞、重复性、漂移、供电方式及使用寿命等要求，进行动态参数监测时，传感器响应频率应不低于被测钢结构特征频率的5倍；

3 监测系统的耐久性、稳定性、抗干扰能力应满足工程监测需要，具备适应监测现场环境的防雷、防静电、防电磁、防尘、防水等防护措施；

4 监测仪器应放置在方便维护和干扰小的场所，施工监测与施工作业有交叉时，应增加临时防护设施。

5 监测环境存在干扰信号时，应进行分析识别，采取有效预防、消除或补偿处理措施，安装在结构顶部的监测仪器、无线收发设备应配有避雷装置。

4.2 电测传感系统

4.2.1 用于钢结构监测的电测传感器及性能应符合下列要求：

1 电阻应变计可用于结构应变监测，其性能应符合现行国家标准《金属粘贴式电阻应变计》GB/T 13992的相关要求。

2 电位器式位移计、差动电阻式位移计和电容式位移计可用于结构变形数监测，传感器性能应分别符合国家现行标准《电位器式位移计》DL/T 1135、《差动电阻式位移计》DL/T 1603和《电容式位移计》DL/T 1017的相关要求。

3 压电式加速度计可用于钢结构的加速度监测，其性能应符合现行标准《压电式加速度传感器》JB/T 6822的相关要求。

4.2.2 采用电阻应变计进行钢结构应变监测时，传感器工作环境与性能应符合下列要求：

1 工作环境条件应符合以下规定：

- 1) 温度：（-40~60）℃；
- 2) 大气压力：（86~106）kPa；
- 3) 湿度：相对湿度不大于 95% RH。

2 应变计的量程、分辨力、稳定性、滞后性能均应满足以下规定：

- 1) 量程：（-10000~1000） $\mu\text{m/m}$ ；
- 2) 分辨力：1 $\mu\text{m/m}$ ；
- 3) 室温下稳定性：3 $\mu\text{m/m/h}$ 。

3 应变计的绝缘电阻应大于100 M Ω 。

4 应变计经过温度修正后，由于温度引起的测量误差均应不大于 $\pm 0.04\%$ F.S./℃。

4.2.3 采用位移计进行钢结构变形和滑移监测时，应根据结构特征和测试环境选择传感器，传感器工作环境与性能应符合下列要求：

1 工作环境条件应符合以下规定：

- 1) 温度：（-25~70）℃；
- 2) 大气压力：（86~106）kPa；
- 3) 湿度：相对湿度不大于 95% RH，或在其规定的水压力下。

2 位移计的分辨力、稳定性、滞后性能均应满足以下规定：

- 1) 分辨力：0.10%F.S.；
- 2) 滞后性：0.10%F.S.；
- 3) 不重复度：0.10%F.S.；
- 4) 非线性度：1.0%F.S.；
- 5) 稳定性：在正常试验条件下，位移计静置 30 d，其零点漂移应不大于 0.1%F.S.，最小读数的相对变化量不应超过 $\pm 2\%$ ，并应符合性能参数的规定。

3 室温下，应变计的绝缘电阻应大于 100 M Ω 。

4 应变计经过温度修正后，由于温度引起的测量误差均应不大于 0.04%F.S/℃。

4.2.4 采用压电式加速度计进行钢结构的加速度监测时，传感器工作环境与性能应符合下列

要求:

1 工作环境条件应符合以下规定:

- 1) 温度: $(-25\sim 70)^{\circ}\text{C}$;
- 2) 大气压力: $(86\sim 106)\text{ kPa}$;
- 3) 相对湿度: $(30\sim 85)\% \text{RH}$ 。

2 压电式加速度计的频响误差、灵敏度、线性度、稳定性均应满足以下规定:

- 1) 频响范围: $(0.2\sim 1000)\text{ Hz}$;
- 2) 横向灵敏度比: 最大横向灵敏度误差比不大于 5%;
- 3) 线性度: 用振动测量法灵敏度幅值线性度不大于 3%;
- 4) 稳定性: 一年内参考灵敏度幅值的变化不超过 $\pm 2\%$, 并应符合性能参数的规定;
- 5) 频响误差: 在小于五分之一谐振频率时, 参考灵敏度偏差不大于 0.5dB; 在小于三分之一谐振频率时, 参考灵敏度偏差不大于 1.0dB;
- 6) 灵敏度幅值线性度: 用振动测量法时不大于 3%; 用冲击测量法时不大于 10%。

3 室温下, 压电式加速度计的绝缘电阻应大于 $100\text{ M}\Omega$ 。

4 压电式加速度计经过温度型式检验, 温度响应符合产品技术条件的规定。

4.2.5 监测仪器应按下列要求选择:

1 电测传感监测仪器应根据监测参数要求, 按传感器类型、测试精度、测量范围、空间分辨力、采样速率、信号传输距离等指标选配;

2 电测传感监测仪器应能适应测试现场环境, 并且满足测点数目与长期工作稳定性要求;

3 电测传感监测仪器的选型应符合下列规定:

1) 电测传感监测仪器应能在环境温度 $-20\sim 60^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 30%~85%的条件下正常工作;

2) 电测传感监测仪器带电部位对外壳的绝缘电阻应不小于 $2\text{ M}\Omega$;

3) 电测传感监测仪器在频率为 50 Hz, 电压为 1500 V 的正弦交流电历时 1 min 的耐压试验中, 应无击穿、飞弧等现象;

4) 电测传感监测仪器应具有灵敏系数调节装置, 且该装置的刻度误差不大于 ± 0.5 ;

5) 电测传感监测仪器应具有自动读数或记录的平衡装置, 指示平衡时间应不大于 2s, 电阻平衡范围不小于 $\pm 0.5\%$, 电容平衡范围应不小于 2000 PF ;

6) 对于静态应变测量, 基本误差在灵敏系数 $K=2.00$ 时不应大于 $\pm (0.5\%+1\text{ }\mu\text{m/m})$, 4h 内零点漂移不大于 $\pm 2.0\text{ }\mu\text{m/m}$, 读数值变化不大于 $\pm 0.5\%$;

7) 对于动态应变测量, 线性误差不应大于 $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m/m}$, 标定误差不应大于 $\pm (0.5\%+1\text{ }\mu\text{m/m})$, 衰减误差不大于 $\pm 1.0\text{ }\mu\text{m/m}$, 频率相应误差不大于 $\pm 0.5\text{ dB}$, 信噪比不小于 40, 2h 内灵敏度变化不大于 $\pm 1.0\%$, 零点漂移不大于 $\pm 2.0\%$ 。

4.2.6 监测系统应满足下列要求:

1 电测传感测试系统的数据采样频次应满足测试要求，静态测量系统的最高采样频率不低于 1/60Hz/通道，动态测量系统的最高采样频率不低于 1000 Hz/通道；

2 测量导线应选用电阻率和电阻温度系数都比较小的材料，并在规定的工作温度范围内保证电性能的稳定性和绝缘电阻。宜采用屏蔽导线，以减少环境的电磁干扰。连接测量导线时，应保证连接处的接触电阻稳定，并将导线妥善地固定；

3 测试系统应能够实现全桥、半桥双臂、半桥单臂等多种桥路，以满足实际测试需求；

4 测试系统应能够接入电压、电流等信号，以满足实际测试需求；

5 测试系统应能够接入 PT100、PT1000 等温度传感器的信号，以满足实际测试需求；

6 测试系统应具备自动保存测试数据的功能。

4.2.7 传感器与监测仪器系统安装、防护、抗环境影响（补偿）措施应符合下列要求：

1 应变计及电测传感检测仪器各部分应连接牢靠，表面不应有锈斑、裂纹、明显的划痕及其他破损，引线、焊点不应有损伤，标识清晰；

2 应变计应按照规定的程序安装在试件上，并详细记录试件被测表面的清洁步骤、粘接剂的种类、固化处理和稳定化处理规程、应变计安装前后的电阻值及安装后应变计的绝缘电阻值；

3 应变计及其接头器件应有防护措施，监测期间不能破损；

4 压电式加速度计宜通过螺栓连接。

4.3 振弦传感系统

4.3.1 用于钢结构监测的振弦传感器可采用弦式应变计、弦式锚索计、弦式位移计及其他以振弦为敏感元件的传感器，传感器性能应符合下列要求：

1 振弦传感器性能参数应符合以下规定：

1) 分辨力： 0.1%F.S.；

2) 采样率： $\geq 1\text{Hz/通道}$.；

3) 滞后性： 1.0%F.S.；

4) 不重复度： 0.5%F.S.；

5) 非线性度/不符合度： 1.0%F.S.；

6) 综合误差： 1.5%F.S.。

2 工作稳定性应符合以下规定：

1) 短期使用的传感器平均寿命（MTTF）应不小于 40000 h；

2) 长期使用的传感器平均寿命（MTTF）应不小于 120000 h。

3 环境适应性能应符合以下规定：

1) 工作环境温度： $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；

2) 表面安装式传感器应能满足 IP65 防水等级的要求；

3) 水下工作的传感器，应能在工作水压 1.2 倍以上正常工作；

4) 传感器应能满足振动和冲击条件下的监测要求。

4 监测传感器应有标定参数和唯一性编号，宜具有电子编码功能。

4.3.2 振弦传感数据采集设备应与传感器量程、分辨力和性能相匹配，且应满足下列要求：

- 1 数据采集设备的测量范围应大于传感器量程，测量分辨力应不低于传感器分辨力。
- 2 环境适应性应符合以下规定：
 - 1) 非水下工作的环境温度范围为（-20~60）℃，相对湿度不大于 95%RH；
 - 2) 水下工作环境温度在（0~40）℃范围，外壳防护不应低于 IP65。
- 3 仪器的电气性能应符合以下规定：
 - 1) 电源：直流电压：（DC9~DC24）V；额定电流：≥1A；纹波与噪声：≤20 mVrms；
 - 2) 通讯接口：RS485/RS232/以太网；
 - 3) 屏蔽：仪器外壳采用金属壳体或者仪器放置在金属密封箱内；
 - 4) 接地：应保证供电系统和监测仪器可靠接地。

4.3.3 振弦传感监测系统设计与集成应符合下列要求：

- 1 振弦传感监测系统的数据采集可采用自动采集或人工方式；
- 2 监测系统可连接一台或集成多台振弦监测仪器。监测系统宜具有满足工程监测需要的冗余性、互联性和扩展性；
- 3 传感器至数据采集设备之间的信号传输线长度不宜超过 300 m，截面积宜选用 0.2 mm² 及以上；单个监测仪器之间的信号传输线长度不宜超过 500 m，截面积宜选用 0.2 mm² 及以上；
- 4 监测值宜控制在满量程的 30%~80%范围；
- 5 监测系统应有消除温差引起测量值偏差的有效措施；
- 6 振弦传感监测应有可靠的接地，对地电阻小于 0.1 Ω。

4.3.4 监测系统数据采集与传输设备应满足下列要求：

- 1 数据采集设备应具有数字/模拟量信号读取功能，可嵌入在监测设备内或者直接接在监测设备外进行监测数据的读取、转换；
- 2 数据采集设备宜实时同步采集检测数据，并应具有无线/有线传输功能；
- 3 数据采集设备不应低于 IP65 防护等级的要求。

4.3.5 监测仪器系统的安装、防护、抗环境影响（补偿）措施应满足下列要求：

- 1 传感器安装应符合下列规定：
 - 1) 振弦传感器安装应优先考虑表面安装，与构件可靠连接；
 - 2) 振弦传感器安装截面位置偏差不应大于 30 mm，安装方向角度偏差不应大于 2°。
- 2 应根据传感器工作环境，需要在外部增加保护罩，防止传感器受到外力作用而损坏。
- 3 应通过测读传感器温度值或增设补偿传感器的方式进行温度修正补偿。

4.4 光纤传感系统

4.4.1 光纤传感器可采用光纤光栅传感器与分布式光纤传感器,传感器可监测的参数可按表4.4.1确定。

表4.4.1 光纤传感器种类及可监测参数

传感器类型	可监测参数
光纤光栅 (FBG)	应变/应力、温度、力、振动、位移等
分布式光纤 (BOTDA、BOTDR、OTDR、OFDR等)	应变/应力、温度等

4.4.2 光纤监测传感方式应按以下原则选择:

1 光纤光栅传感器宜用于应变、温度、振动、位移以及压力等参数的高精度静、动态监测,其性能参数应满足下列要求:

- 1) 光纤光栅应进行退火处理,以保证其长期稳定性;
- 2) 传感器中心波长误差应在 $\pm 0.5\text{ nm}$ 之内;
- 3) 温度测量误差: $\pm 1^\circ\text{C}$;
- 4) 应变测量范围: $(-1500\sim 1500)\text{ }\mu\text{m/m}$;
- 5) 重复性: 1%;
- 6) 线性度: 1%;
- 7) 机械滞后: $5\text{ }\mu\text{m/m}$ (室温);
- 8) 蠕变应: $5\text{ }\mu\text{m/m}$ (室温)。

2 分布式光纤传感器宜用于长距离,施工期短,安装条件恶劣的应变、温度等参数测量,其测量参数应满足以下规定:

- 1) 测量温度范围: $(-40\sim 80)^\circ\text{C}$;
- 2) 应变测量范围: $(-1500\sim 1500)\text{ }\mu\text{m/m}$;
- 3) 温度精度: $\pm 1^\circ\text{C}$;
- 4) 应变精度: $\pm 20\text{ }\mu\text{m/m}$;
- 5) 空间分辨力: 当测量距离不大于10 km时,小于3 m。

4.4.3 光纤传感器解调仪器选配按以下原则进行:

1 光纤传感器解调仪器应根据监测参数要求,按调制解调原理、测试精度、测量范围、空间分辨力、采样速率、信号传输距离等指标选配。

2 光纤解调仪器应能适应测试现场环境,并且满足测点数目与长期工作稳定性要求。

3 光纤光栅解调设备的选型应符合下列规定:

- 1) 对于静态测量,波长测量重复性应小于3 pm,测量误差小于5 pm,波长年漂移量应低于30 pm;
- 2) 对于动态测量,波长测量重复性应小于10 pm,测量误差小于15 pm,波长年漂移量应低于60 pm;

3) 宜采用气体(HCN及C₂H₂)吸收光谱或高精度光波长计作为波长标准对光纤光栅解调设备进行准确性评定,监测期间应每年评定一次。

4 分布式光纤解调设备的选型应符合下列规定:

- 1) 最高空间定位精度: 1 m;
- 2) 应变测试精度: $\pm 20 \mu\text{m/m}$;
- 3) 可以查询历史数据, 可查询的历史数据不小于30天和10000条;
- 4) 根据用户要求, 可调整测量时间、测量距离、空间分辨力、空间定位精度、应变或温度测量范围;
- 5) 测量距离小于10 km时, 测量周期小于60 s。

4.4.4 光纤监测系统设计与组集按以下原则进行:

1 光纤光栅传感系统

- 1) 光纤光栅宜封装使用, 传感器使用前应根据实际需要预拉到相应的初始波长, 传感器应满足长期监测稳定性要求;
- 2) 光纤光栅单通道传感器串接数量应根据各测点监测参数变化幅度、采用速率与设备解调波长范围确定, 光纤光栅阵列波长应有足够的间隔, 确保监测期间各传感器之间的波长排序不变, 并留有一定的冗余度;
- 3) 监测解调设备的通道数量应与光纤光栅传感器阵列容量、采样速率等要求相匹配;
- 4) 系统长期监测稳定性应满足10 pm/24h。

2 分布式光纤传感系统

- 1) 监测光纤长度宜在50 km范围内;
- 2) 长距离分布式光纤应变监测仪的信噪比和空间分辨力应根据实际需求调整确定;
- 3) 通讯接口: RS232/RS485/以太网等;
- 4) 解调仪工作环境温度 (0~40) °C;
- 5) 普通传感光缆环境温度 (-40~80) °C。

4.4.5 光纤监测系统的安装和防护应按下列要求进行:

1 光纤光栅传感系统应符合以下规定:

- 1) 传感器宜采用螺栓连接、焊接或胶粘安装;
- 2) 传感器外壳需采用保护胶或封装进行防护;
- 3) 传感器安装点应选择无太阳光直射位置, 或采取遮挡措施;
- 4) 光纤和接头器件应有防护措施, 确保监测期间不被破损。传输接头的外壳应采用硅胶和密封胶进行密封; 光纤布设应避免弯折, 最小曲率半径不应小于25 mm, 光缆最小曲率半径不应小于50 mm;
- 5) 尾纤可作为信号传输的备用端。

2 分布式光纤传感系统应符合以下规定:

- 1) 传感光缆可采用胶粘、螺栓夹具或焊接安装;
- 2) 传感器外壳需采用保护胶或封装进行防护;
- 3) 用于监测应变时, 宜采用胶粘或夹具夹持方式安装, 光缆进行预张紧, 并同时

安装温度补偿光缆；用于监测温度时，宜采用胶粘或夹具夹持方式安装，光缆保持松弛；

4) 安装点宜选择无太阳光直射位置，或采取遮挡措施。

4.4.6 光纤传感监测系统应在标定后使用，可拆卸传感器均应进行标定，不可拆卸传感器应采用抽样的方式进行标定。

4.5 测量机器人系统

4.5.1 测量机器人系统可用于钢结构静态变形监测。

4.5.2 监测站、监测基准点、测点应依据施工现场环境和测量方案布置，可根据测量精度要求选用有棱镜或无棱镜模式。

4.5.3 监测期间应保证监测基准点稳定，测量机器人和监测基准点、测点之间应保持通视。

4.5.4 存在多个监测站观测同一棱镜时，宜使用360°棱镜。

4.5.5 应考虑监测现场的大气温度、气压、大气折射等参数，并对监测结果进行实时修正。

4.5.6 环境存在振动时，宜通过减振措施降低测量机器人自身的振动。

4.5.7 系统测角精度应不小于1"，分辨力应不小于0.1"。

4.5.8 系统采用棱镜模式的单次测距精度应满足0.6mm+1ppm的要求，采用无棱镜模式的单次测距精度应满足2 mm+2 ppm的要求。

4.5.9 系统通讯方式可采用蓝牙、RS232/RS485、数传电台、4G/5G DTU或更先进通讯方式。

4.5.10 测量机器人底座安装应牢固，基准点、监测点棱镜宜采用螺栓或焊接方式固定在测点位置，当有太阳光照影响测量精度时，应在仪器上增设遮阳罩。

4.5.11 监测期间应定期巡检和定期清理测量机器人镜头、棱镜。

4.6 图像式变形监测系统

4.6.1 监测相机应根据监测精度等级要求选择，可采用安防相机、工业相机或单反数码相机。

4.6.2 相机采样频率应根据工程监测需求设置，频率范围宜满足1/3600 fps~5000 fps，可采用连续拍照或摄像的方式获取监测图像。

4.6.3 系统变形监测精度应满足100 m距离±0.5 mm，25m距离±0.1 mm的要求。

4.6.4 相机应固定在专用支架上，监测时应保证相机稳定。

4.6.5 应根据相机设站位置与被监测对象位置选择相应焦距的镜头，相机自身应具备防抖功能。

4.6.6 光源补光宜根据工况确认，可选用可见光光源或红外光源。

4.6.7 监测靶标的大小应根据相机与靶标的距离选取，靶标图像应满足大于9个像素。

4.6.8 被测对象特征点明显时，可选用免靶标测量方式。

4.6.9 监测系统通讯方式可采用WIFI、RJ45网络、4G/5G DTU或更先进通讯方式。

4.7 GNSS 变形监测系统

- 4.7.1** GNSS变形监测系统应设有基准站和监测站，每个站点应设置GNSS接收机、天线、供电设备和防雷击设备。
- 4.7.2** GNSS接收机采样率不宜小于20 Hz，BDS/GPS/GLONASS组合定位处理后静态水平精度应优于2 mm+1 ppm的要求，竖向应优于3 mm+1 ppm的要求。
- 4.7.3** 基准站天线宜选用全频段3D扼流圈天线，监测站天线宜选用与接收机匹配的高精度测量天线。
- 4.7.4** 基准站应选址在地基稳定、距天顶15°无遮挡物、远离电磁干扰且附近应无GNSS信号反射物的区域。
- 4.7.5** 监测点应安装在被测结构的外部，距天顶15°范围内无遮挡物，且附近应无GNSS信号反射物，并远离电磁干扰。
- 4.7.6** 基准站和监测点宜采用带有强制对中装置的支架或监测墩。
- 4.7.7** 野外工作环境，宜选用太阳能或风能配合蓄电池供电。
- 4.7.8** 监测系统通讯方式可采用蓝牙、RS232/RS485、数传电台、4G/5G DTU或更先进通讯方式，应满足基准站、监测点与监测计算机的数据传输。

4.8 环境监测系统

- 4.8.1** 环境监测系统应设有现场监测站和数据中心。
- 4.8.2** 现场监测站宜涵盖温度、湿度、噪声、气压、风速、风向参数，其他参数可根据监测要求选择。
- 4.8.3** 监测系统采集频率应不低于1次/min。
- 4.8.4** 现场监测站安装应保证各传感器布设高度要求，监测设备在监测环境中应能安全和稳定工作，满足承重、抗弯、抗风、抗震、防霉、防腐等性能。
- 4.8.5** 现场监测站可选用市电、太阳能、风能、蓄电池或组合方式进行供电。
- 4.8.6** 系统通讯方式宜根据工况进行选择，可采用蓝牙、RS232/RS485、数传电台、4G/5G DTU或更先进通讯方式。
- 4.8.7** 监测系统应实时显示各现场监测站的监测数据、工作状态，能够管理分析异常数据并超限报警。
- 4.8.8** 系统应具有通过数据中心实现现场监测站远程参数设置、初始化等功能。

4.9 三维激光扫描系统

- 4.9.1** 系统设备应在检验校准合格有效期内，系统软件应通过测试。
- 4.9.2** 应根据扫描对象的不同和精度的具体要求设计合适的扫描路线、确定合理的采样密度、确定扫描仪至扫描物体的距离和设站位置。
- 4.9.3** 扫描仪设站应符合下列规定：
- 1** 扫描仪应设置在视野开阔、地面稳定的安全区域；

- 2 扫描仪扫描范围应覆盖整个扫描目标物，均匀布设，且设站数目尽量少；
- 3 对于目标物结构复杂、通视困难或线路有拐角的情况应适当增加扫描站；
- 4 必要时应搭设平台架设扫描站，应保证平台稳定和仪器、人身安全。

4.9.4 靶标布设应符合下列规定：

- 1 靶标应在相邻两扫描站连线的中点附近区域，均匀布置且高低错落；
- 2 每一扫描站的靶标个数应不少于4个，相邻两扫描站的公共靶标个数应不少于3个；
- 3 同一扫描站靶标之间的距离应至少有一个不小于扫描目标到扫描站的距离；
- 4 靶标不易设置区域，宜选择在点云中有明显特征的点、线等来代替靶标。

4.9.5 监测数据评价方法应按照现行国家标准《测绘成果质量检查与验收》GB/T 24356、《数字测绘成果质量检查与验收》GB/T 18316的规定进行。

4.9.6 仪器应避免长时间暴露于太阳强光照射环境中，并应采取遮阳措施。

4.10 监测集成平台

4.10.1 监测集成平台应有感知、传输、存储到管理、评估、预警的功能，实现信息共享、业务协同、高效管理。并应符合以下规定：

- 1 监测集成平台应设置规范的数据库结构和数据接口，可方便不同子系统的传感器模块化接入，实现多子系统的统一管理和调度；
- 2 监测集成平台应支持全自动监测数据及人工数据的接收，实现各子系统监测数据存储；
- 3 监测集成平台应有清晰直观的用户界面交互，可显示各子系统监测设备状态、数据采集传输状态和监测数据；
- 4 监测集成平台应能实现自动对各子系统的异常监测数据进行筛选、处理和评估，实时输出综合评估结果和安全预警信息，并对相关人员进行信息推送。

4.10.2 监测集成平台应合理设置账户管理权限、保证信息安全。

4.10.3 监测集成平台机房应具备符合标准的不间断电源设备、空调、通风、供电、供水、通信、抗震、防火及安保等设施，应确保设备的安全。

4.10.4 监测平台投入运行前，应基于钢结构工程监测特性，应对输入、输出的监测数据进行逻辑性、相关性和匹配性的检验测试。

5 施工监测

5.1 一般规定

5.1.1 大跨度、多高层、高耸及桥梁钢结构宜进行施工监测，监测内容应包括钢结构施工期间的环境参数、施工荷载作用下的结构响应。

5.1.2 施工监测前应根据监测要求、工程结构特点、施工方法工艺、结构施工全过程工况计算分析结果和现场环境条件制订施工监测方案，结构施工全过程计算分析应涵盖监测过程中的各种荷载与环境工况。

5.1.3 监测项应依据施工控制需要选择，测点位置宜根据施工方法、结构特点、监测项在施工过程中的分布与变化，布置在表征结构状态的关键构件与截面上。

5.1.4 施工监测频次应按设计要求、施工工艺、监测项在施工过程中的非线性特征、质量与验收控制等因素综合确定。

5.1.5 监测数据采集可采用人工采集或局部区域无线采集，采集时应记录数据对应的荷载环境与现场施工状况等信息。

5.1.6 施工监测应对监测项设置预警值，可根据安全控制与质量控制要求，分区、分级、分阶段设置相应的监测项限值及不同危险程度的预警值。

5.1.7 现场监测设备安装完成后应及时现场标识并绘制测点、采集设备布置图；

5.2 大跨钢结构施工监测

5.2.1 除设计文件要求或其他规定应进行施工监测的大跨钢结构外，满足下列条件之一时，大跨钢结构宜进行施工监测：

- 1 跨度大于 100 m 的网架、多层网壳或预应力钢结构；
- 2 跨度大于 50 m 的单层网壳结构；
- 3 悬挑长度大于 30 m 的钢结构；
- 4 采用新工艺、新技术、新材料建造或施工期间结构受力复杂的大跨空间钢结构。

5.2.2 大跨钢结构施工监测项宜按表 5.2.2 选择。

表 5.2.2 大跨钢结构施工期间监测项

结构类型	杆件应变	节点变形	支座位移	环境监测		结构振动特性	相连接构	索力	动力响应
				温度	风				
钢桁架、网架、网壳	★	★	▲	★	○	○	○	-	▲

预应力钢结构	★	★	▲	★	○	○	○	★	▲
临时支撑	▲	★	▲	○	○	-	-	-	▲
特殊结构	★	★	▲	★	○	○	▲	-	▲

注：1 ★ 应监测，▲宜监测，○可监测，-不测；

2 特殊结构指上述结构以外的结构类型。

3 施工中受动力作用的结构应当进行结构动态监测。

5.2.3 大跨钢结构施工监测应根据施工方法和控制要求，对下列内容进行监测：

1 采用分单元吊装施工时，临时体系在吊装阶段的受力和变形、临时支撑点和支座处结构在卸载阶段的受力和变形；

2 采用提升法施工时，各提升下吊点的同步性、提升上吊点结构的受力和变形、提升到位后受力体系转换阶段的关键杆件受力和关键节点变形；

3 采用滑移法施工时，各滑移轨道的同步性、榀与榀结构之间联系杆件的受力、滑移到位后结构受力体系转换阶段的关键杆件受力和关键节点变形；

4 采用旋转法施工时，旋转结构的节点位移、牵引索具的张力、牵引桅杆的关键受力和关键节点变形；

5 存在合拢段施工时，合拢段的节点位移、合拢期间的环境温度。

5.2.4 大跨钢结构的监测频次除符合第 3.2.5 条要求外，宜符合下列规定：

1 每一施工工况应至少进行 2 次数据采集，包括施工工况的初始态和完成态；

2 停工时和复工时应分别进行 1 次数据采集。

5.3 多高层与高耸钢结构施工监测

5.3.1 多高层与高耸钢结构工程施工监测应依据设计文件要求或其他规定进行，下列条件之一时，多高层与高耸钢结构宜进行施工监测：

1 建筑高度不小于 250 m 的高层与高耸结构；

2 施工过程中设有大型临时支撑、位移敏感、环境作用敏感的结构，宜包括特殊结构体系的整体或局部受力复杂的多高层与高耸钢结构；

3 整体或局部采用分块吊装、整体提升或顶升、整体起扳施工技术施工的多高层与高耸钢结构；

5.3.2 多高层与高耸结构施工监测项宜符合下列规定：

1 结构监测对象应包括结构整体、构件和节点、荷载作用与环境。

2 施工监测项应结合结构体系、工程特点和施工工艺，按表 5.3.2 确定。

表 5.3.2 多高层与高耸钢结构施工监测项目

结构体系	结构整体	构件和节点	荷载作用与环境
------	------	-------	---------

	支座反力	位移	变形	振动	应力和 内力	变形	温度	风荷载	地震动	湿度	气压
框架结构	○	★	★	○	★	★	▲	▲	○	○	○
筒体结构	○	★	★	○	★	★	▲	★	○	○	○
巨型结构	○	★	★	○	★	★	▲	★	○	○	○
钢塔架	○	★	★	○	★	★	▲	★	○	○	○
钢桅杆	○	★	★	○	★	★	▲	★	○	○	○
风力发电塔	▲	★	★	○	★	★	▲	★	○	○	○

注：★应监测，▲宜监测，○可监测。

5.3.3 多高层与高耸结构整体变形监测项测点布置，应符合下列规定：

- 1 筒体结构每隔 5~8 层布置筒体与外框架之间的不均匀沉降测点；
- 2 多高层钢结构布置在转换层、错层、伸臂桁架及其相邻层、层高突变层布置层间位移测点；
- 3 高耸结构宜在结构顶部、局部平面发生较大变化高度处布置水平位移测点；
- 4 多高层结构中跨度或悬挑长度超过 30 m 的局部结构宜布置挠度测点。

5.3.4 多高层与高耸结构应力监测应在下列位置布置测点：

- 1 受力较大和传力路径复杂的构件和节点；
- 2 多高层结构特征位置构件，包括巨柱、巨型支撑、转换层、错层、连体结构支座层、层高突变层、伸臂桁架及其相邻层；
- 3 施工过程中内力变化较大的构件和节点。
- 4 施工期间临时支撑和措施中受力较大和关键传力路径的构件。

5.3.5 多高层和高耸结构施工过程振动监测点，宜布置在整体或部分结构振动敏感部位。

5.3.6 高层和高耸结构施工过程温度测点布置应符合下列规定：

- 1 监测点应布置在温度梯度变化较大位置，且应对称、均匀；
- 2 高层结构梯度温度监测时，应沿结构高度在阳光直射面和相对背面、结构内部布置测点，结构同一水平面上测点不应少于 3 个；

5.3.7 高耸结构采用整体起扳施工时，施工监测应符合下列规定：

- 1 整体起扳工程应进行专项施工全过程模拟计算；
- 2 监测参数可包括结构变形、起扳速度、结构整体稳定性、关键位置的同步性、支点和起扳点处构件内力。

5.3.8 当采用整体提升、整体顶升、整体起扳法等特种施工工艺时，应力和位移监测频率不宜低于 1 Hz。

5.4 桥梁钢结构施工监测

5.4.1 钢结构桥梁工程施工监测应依据设计文件要求或其他规定进行，下列条件之一时，钢结构桥梁宜进行施工期间监测：

- 1 主跨不小于 100 m 的连续刚构桥；
- 2 主跨不小于 100 m 的连续梁桥；
- 3 主跨不小于 100 m 的拱桥；
- 4 斜拉桥；
- 5 悬索桥；
- 6 其他需要施工监控的桥梁。

5.4.2 钢结构桥梁施工监测项宜按表 5.4.2 确定。

表 5.4.2 桥梁施工监测项

结构体系	主梁/主桁				墩柱		主拱			拱座		索塔			斜拉索	主缆				吊杆	索夹
	标高	平面线形	应力	温度	应力	沉降	安装标高	已成部分关键应力	拱肋横梁标高	标高	水平位移	轴线	应力	位移	索力	线形	索股索力	索鞍偏位	温度	索力	位置
梁式桥	★	○	★	★	★	▲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
拱桥	○	○	○	○	★	▲	★	★	★	★	★	-	-	-	-	-	-	-	-	★	-
斜拉桥	★	○	★	★	○	▲	-	-	-	-	-	★	★	-	★	-	-	-	-	-	-
悬索桥	★	○	★	○	○	▲	-	-	-	-	-	-	★	★	-	★	★	★	★	★	★
钢桁架桥	★	★	★	★	○	★	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
其他类型	★	★	★	★	○	★	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

注：★应监测，▲宜监测，○可监测，-不测。

5.4.3 施工监测测点布置应符合下列规定：

- 1 桥梁墩柱、索塔轴线监测截面宜设在分段施工的自然顶面。
- 2 桥梁墩柱、索塔应力监测截面宜选择墩、塔底附近的应力较大截面，一个截面的测点不应少于 4 个。
- 3 节段拼装的钢主梁标高测点应设置在各梁段上表面的前端，一个截面的测点数量不宜少于 3 个。
- 4 主梁应力监测截面及测点布置应符合以下规定：
 - 1) 梁式桥主梁应力监测点布置在主梁根部、L/4、跨中以及其他控制截面上的下缘位置，每个测试断面测点不宜少于 4 个。

2) 拱桥主梁和主拱圈应力监测截面宜布置在拱脚、 $L/4$ 和跨中, 测点应布置在截面的上下缘位置, 每截面不宜少于 4 个测点。

3) 斜拉桥和悬索桥主梁应力监测截面应选择施工过程结构分析确定的控制截面, 主跨应力监测截面不宜少于 3 个, 一个截面的应力测点不宜少于 4 个。

5 主梁温度监测截面及测点布置应符合以下规定:

1) 钢箱梁温度监测截面宜设置在标准梁段位置, 测点应较均匀地布置在钢箱梁内表面的上、下、左、右位置, 一个截面的测点不宜少于 4 个。

2) 温度监测截面及测点布置可不单独设置, 可与应力监测综合考虑。

6 悬索桥主缆温度监测截面宜设在主跨跨中位置、主缆 $1/2$ 垂度和两索塔附近, 主跨较大时可适当增加数量。

7 悬索桥主缆线形监测点宜设置在主缆最大垂度截面的基准股上。

5.4.4 监测频次除符合第 3.2.5 条要求外, 尚宜符合下列规定:

1 轴线及标高监测频次:

1) 墩塔轴线监测应在墩塔节段施工前后各进行 1 次;

2) 主梁和主拱标高监测应在主梁节段施工前后各进行 1 次;

3) 斜拉桥主梁标高监测应在斜拉索张拉完成后进行 1 次。

2 应力监测频次:

1) 梁式桥主梁节段施工前后应进行 1 次应力监测;

2) 拱桥主拱节段施工前后、拱上建筑施工前后应进行 1 次应力监测;

3) 斜拉桥主梁节段施工前后、斜拉索张拉前后应进行 1 次应力监测;

4) 悬索桥主梁节段施工前后应进行 1 次应力监测;

5) 桥面铺装施工完成后应进行 1 次应力监测。

6 使用监测

6.1 一般规定

- 6.1.1** 钢结构使用监测应包括环境监测、荷载监测与结构响应监测。
- 6.1.2** 使用监测的传感器数量和测点位置，应根据工程条件、结构类型、监测目的、结构分析结果和传感器的性能参数确定。
- 6.1.3** 地震动及地震响应监测点应布置在整体结构的基础部位和大跨结构的支座部位，尚应结合结构振动测点，选择测点布置部位。
- 6.1.4** 风及风致响应监测点布置应符合下列规定：
- 1 已进行风洞试验的结构，宜参考风洞试验结果布置测点；
 - 2 未进行风洞试验的结构，宜选择自由风场及风致响应敏感的构件及节点位置，并宜与地震动及地震响应监测的测点布置相协调；
 - 3 风速仪宜高于结构顶部 1m，并处于避雷针的覆盖范围之内；环境风速监测仪宜安装在距结构约 100m~200m 外相对开阔场地，高出地面 10m 处；
 - 4 对风敏感的建(构)筑物有验证要求时，可监测建(构)筑物表面的风压分布情况。
- 6.1.5** 使用监测频次应满足数据分析和预警的需要。当结构遭遇极端天气、自然灾害或监测数据出现异常时，应提高监测频次，自动采样系统可设置触发模式转换采样频次。
- 6.1.6** 使用监测系统应能自动监测且不间断工作，宜具备人工干预采集与采集参数调整、自动生成监测数据报表的功能。当遭遇极端天气或自然灾害后，应及时出具监测结果。
- 6.1.7** 使用监测宜每半年进行一次巡视检查和系统维护。当遭遇极端天气或自然灾害后，应及时进行系统检查和维护。
- 6.1.8** 使用监测宜设专用监控室。监测系统安装完成后应及时进行现场标识，并绘制监测设备布置图，存档备查。

6.2 大跨钢结构使用监测

- 6.2.1** 除设计文件要求或其他规定应进行使用期间监测的大跨钢结构外，满足下列条件之一时，大跨钢结构宜进行使用期间监测：
- 1 跨度不小于 120 m 的各类钢结构；
 - 2 跨度不小于 60 m 的单层网壳结构；
 - 3 悬挑长度不小于 40 m 的钢结构。
- 6.2.2** 监测项应根据结构特点按表 6.2.2 确定，有特殊要求的，可增加监测项。

表 6.2.2 大跨钢结构监测项

结构类型	变形监测		应变监测	索力监测	振动监测	支座位移监测	基础沉降监测	环境监测		
	竖向	水平						风	温度	地震动

网架结构	★	○	▲	—	○	▲	▲	○	▲	○
网壳结构	★	○	▲	—	▲	★	▲	▲	▲	○
桁架结构	★	○	▲	—	○	▲	▲	○	▲	○
张弦结构	★	○	▲	★	▲	★	▲	▲	▲	○
索结构	★	○	▲	★	▲	★	▲	▲	▲	○
膜结构	★	○	▲	○	○	▲	▲	▲	▲	○

注：★应监测，▲宜监测，○可监测，—不需要

6.2.3 竖向变形监测点应布置在结构跨中或悬挑端外沿，跨度大于 60m 时，宜在 1/4 跨度处增加测点；水平位移监测点应布置在结构的支座、悬挑端部或水平位移最大的位置。

6.2.4 应变监测点应布置在支座附近和应力大的构件上。

6.2.5 拉索内力可采用压力表测定法、压力传感器测定法、频率法、张弦法和磁通量法等进行监测。

6.2.6 结构振动监测点应选在工程结构振动敏感部位和对结构振动有限制要求的部位；测点数量较多时，宜进行优化布置。

6.2.7 结构使用监测期间及结束后应提交相应的监测报告，可包括阶段性报告和项目总报告。

6.3 多高层与高耸钢结构使用监测

6.3.1 除设计文件要求或其他规定应进行使用监测的多高层与高耸钢结构外，满足下列条件之一时，多高层与高耸钢结构应进行使用期间监测：

- 1 建筑高度不小于 300m 的高层与高耸结构；
- 2 施工过程中导致结构最终位形与设计目标位形存在较大差异的多高层与高耸结构；
- 3 带有减震或隔震体系的多高层与高耸结构；
- 4 其他对结构变形、内力变化比较敏感以及结构体系复杂的多高层与高耸结构。

6.3.2 监测对象包括结构整体、构件和节点、荷载作用与环境。监测项应根据结构体系按表 6.3.2 确定，有特殊要求的，可增加监测项。

表 6.3.2 多高层与高耸钢结构监测项

结构体系	结构整体				构件和节点			荷载作用与环境					
	支座反力	位移	变形	舒适度	应力和 内力	变形	振动	温度	风荷载	地震动	湿度	气压	腐蚀介质
框架结构	○	★	★	▲	★	★	○	▲	▲	○	○	○	○
筒体结构	○	★	★	▲	★	★	○	▲	★	○	○	○	○
巨型结构	○	★	★	▲	★	★	○	▲	★	○	○	○	○
钢塔架	○	★	★	○	★	★	○	▲	★	○	○	▲	▲
钢桅杆	○	★	★	○	★	★	○	▲	★	○	○	▲	▲
风力发	▲	★	★	○	★	★	○	▲	★	○	○	▲	▲

电塔													
----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

其中，★应监测，▲宜监测，○可监测

6.3.3 结构整体变形测点应在下列位置布置：

- 1 影响结构安全性的特征构件、变形较显著的关键点、结构截面转变或突变处、主要构件斜率变化较大处；
- 2 连体结构的连接体及不同结构分界处的两侧。

6.3.4 应力测点应在下列位置布置：

- 1 应力变化显著或应力水平较高的构件和节点；
- 2 柱脚、首层、转换层、错层、连体结构的连接体、支座层、层高突变层、伸臂桁架及其相邻层中的构件；
- 3 巨型柱、巨型斜撑、竖向构件平面外收进以及竖向刚度分布不连续区域等结构不规则位置及相邻部位；
- 4 其他重要部位和构件。

6.3.5 温度测点布置应符合下列规定：

- 1 温度测点应布置在温度梯度变化较大位置，应对称、均匀；
- 2 温度监测点应沿结构高度在阳光直射面和相对背面、结构内部布置测点，结构同一水平面上测点不应少于 3 个。

6.3.6 舒适度监测点应根据结构动力特性分析结果，布置在整体或部分结构振动敏感部位以及舒适度控制区域。

6.3.7 地震动及地震响应监测点应布置在结构地下室的底面、结构顶层的顶面及不少于 2 个中间层位置。尚应结合结构振动测点，选择测点布置部位。

6.4 桥梁钢结构使用监测

6.4.1 除设计文件要求或其他规定应进行使用监测的钢结构桥梁外，满足下列条件之一时，钢结构桥梁应进行使用监测：

- 1 主跨跨径不小于 150 m 的梁桥；
- 2 主跨跨径不小于 300 m 的斜拉桥；
- 3 主跨跨径不小于 500 m 的悬索桥；
- 4 主跨跨径不小于 200 m 的拱桥；
- 5 结构特殊的其他桥梁结构。

6.4.2 监测项应根据结构特点按表 6.4.2 进行选择，有特殊要求的，可增加监测项。

表 6.4.2 桥梁结构监测项

桥梁类型	基础沉降监测	变形监测		应变监测	环境及效应监测				车辆荷载	动力响应	支座反力和位移
		竖向	水平		风	温度	湿度	地震			
梁桥	▲	★	○	★	○	★	○	▲	★	▲	▲

拱桥	▲	★	▲	★	○	★	○	▲	★	▲	▲
斜拉桥	▲	★	★	★	★	★	○	▲	★	▲	▲
悬索桥	▲	★	★	★	★	★	○	▲	★	▲	▲

注：★应监测，▲宜监测，○可监测

6.4.3 桥梁钢结构应对下列部位及变形项进行监测：

- 1 主梁跨中竖向位移；
- 2 拱脚竖向位移、水平位移及倾角，拱顶及拱肋关键位置的竖向位移；
- 3 斜拉桥主塔塔顶水平位移，各跨主梁关键位置竖向位移；
- 4 悬索桥主缆关键位置的空间位移，锚碇或主缆固定点的水平位移，索塔塔顶水平位移，各跨主梁竖向位移；
- 5 伸缩缝的位移。

6.4.4 变形监测频次不应少于定期检查的频次，特大桥宜进行实时监测。

6.4.5 应变监测点应根据结构的受力特点，布置在截面强度控制点或反映应力分布的特征点位置。

6.4.6 吊杆或吊索、斜拉索或主缆索力监测点选取应符合下列规定：

- 1 每种规格型号的索宜选取代表性索布置测点；
- 2 应选取应力最大、应力幅最大与安全系数最小的索进行监测；
- 3 测点布置宜包括上游、下游及中跨、边跨。

6.4.7 桥梁钢结构宜进行疲劳性能监测，监测项应包括应力幅值及结构温度。

6.4.8 结构动力监测项可包括加速度、速度和位移。

6.4.9 连续梁桥的墩台、拱桥的拱脚、斜拉桥或悬索桥的桥墩和索塔、高速铁路桥梁的墩台均应进行沉降监测。

6.4.10 结构支座反力与位移监测包括支座位移、支座反力或桥梁横向倾斜度，应符合下列规定：

- 1 易发生倾覆破坏的独柱桥梁、弯桥、斜桥、基础易发生沉降的桥梁及存在负反力的大跨径桥梁宜布置支座反力或偏载监测点；
- 2 支座反力的监测宜选用测力支座；使用前应重新设置零点，可采用在支座上加载标准重物修正支座参数；
- 3 支座位移监测项应能反映支座脱空工况，监测传感器量测方向应与支座反力方向平行。

6.4.11 结构环境及效应监测应符合下列规定：

- 1 风及风致响应监测的测点应布置在主跨桥面和索塔顶处，各个方向无遮挡。
- 2 温湿度监测点应布置在桥面、钢箱梁、索塔及锚室内部温湿度变化大或对结构影响大的位置。监测参数应包括环境温度、相对湿度及结构内相对湿度。
- 3 地震动及船撞响应监测点应布置在相对固定且接近大地的位置，宜安装在大桥承台顶部、索塔根部及锚碇的锚室内。

6.4.12 交通荷载监测应符合下列规定：

- 1 对车流量大、重车多或需要进行荷载静动力响应对比分析的桥梁结构，宜进行动态交通荷载的监测。
- 2 交通荷载监测项可包括交通流量、车型及分布、车速及车头间距。
- 3 动态称重监测系统应具有数据自动记录功能，并宜兼容与其他监测系统的软硬件接口，系统量程应按桥梁的限行车辆载重及实际预估车辆载重确定，其尺寸选型应考虑车道宽度和车辆轴距。
- 4 测点宜布设在主桥上桥方向振动较小的断面。车轴车速仪应与摄像头相配套，摄像头的监视方向为来车方向。

6.4.13 钢结构桥梁使用监测宜为长期实时监测，重要结构宜进行全寿命周期内的监测。

6.4.14 监测系统应能不间断工作，宜具备自动生成监测数据报表的功能。

6.4.15 钢结构桥梁使用监测宜进行结构分析模型修正，修正后模型应反应桥梁结构现状。

6.4.16 钢结构桥梁监测宜设置与结构安全性、适用性和耐久性相应的预警值，预警值应根据国家现行相关结构设计标准的要求设置。

6.5 工业建构筑物钢结构使用监测

6.5.1 工业建构筑物钢结构遇到下列情况之一时，应进行使用监测：

- 1 基础沉降或结构变形不稳定且变化趋势不明确。
- 2 结构荷载与受力状态复杂，在一般鉴定期间无法确定结构安全性和正常使用性评定所需要的参数范围与变化规律。
- 3 为保障结构安全和生产使用要求，需要对结构关键部位工作状态进行实时监控，或需要根据监测数据对结构进行维护、处理等。
- 4 当工业建构筑物钢结构整体或局部构件出现损伤，可能影响正常使用或结构安全，因特殊原因，尚需继续使用时。

6.5.2 工业建构筑物钢结构使用监测项应根据结构特点按表 6.5.2 进行选择，有特殊要求的，可增加监测项。

表6.5.2 工业钢结构监测项

结构类型	基础沉降 监测	变形监测		应变 监测	振动 监测	支座位 移监测	环境监测		
		竖向	水平				风	温度	湿度
工业厂房	▲	★	▲	○	▲	—	▲	▲	▲
吊车梁	—	▲	—	★	▲	★	—	▲	○
通廊	▲	★	○	★	○	○	▲	▲	○
风电塔架	▲	▲	★	★	▲	○	★	▲	○

注：★应监测，▲宜监测，○可监测，—不需要

6.5.3 工业建构筑物钢结构的监测点应布设在结构构件的关键位置、结构构件监测项的最大值位置、结构构件监测项变化敏感位置以及已出现安全损伤的位置。按以下原则进行：

1 竖向变形监测点应布置在结构跨中或悬挑端外檐；水平位移监测点应布置在结构的支座、悬挑端部或水平位移最大的位置。在可能发生螺栓松动、焊缝开裂的节点还应增设变形监测点。

2 应变监测点应布置在应力大、应力变化幅度大、重要构件截面以及可能发生疲劳裂纹的应力集中位置。

3 振动监测点应布置在结构构件振型极值点位置。

4 对已经出现裂纹的构件，可对裂纹宽度与长度、裂纹附近的应力、位移变化进行监测。

5 可能出现腐蚀损伤的构件位置宜进行腐蚀速率监测。

6.5.4 工业建构筑物钢结构监测系统硬件应根据现场环境选择，满足下列要求：

1 测点位置的最高或最低温度应在传感器正常工作温度范围内；

2 监测设备周边无高压电源干扰，否则应评估电场对设备使用的影响；

3 监测仪器设备应有保证其正常工作的防尘、防腐保护措施，监控室周边环境应无放射性气体；

4 监测系统和设备应有信号屏蔽和接地保护措施。

6.5.5 工业建构筑物钢结构的使用监测应根据结构受力与变形分析结果，设置结构安全性和使用性等级所对应的预警值。

6.5.6 监测应定期进行处理，给出生产荷载环境工况和监测数据的变化情况。当需要利用监测数据对结构的安全性、使用性进行评定时，应依据监测数据和相关规范要求进行评定。

7 监测数据分析与结构状态评估

7.1 一般规定

7.1.1 监测数据分析与结构状态评估可采用“在线方式”或“离线方式”进行。

7.1.2 依据监测数据评估结构状态宜在对原始监测数据处理后进行。监测数据分析应满足下列要求：

1 施工监测期间，监测数据分析应按实际工程需要进行，并形成相应的监测数据分析报告；

2 使用监测期间，每年应进行不少于 1 次的监测数据分析，并形成相应的监测数据分析报告。

7.1.3 结构状态评估包括状态一级评估、状态二级评估和专项评估，可按以下要求进行：

1 根据数据分析结果定期开展结构局部或整体状态一级评估，施工监测期间状态一级评估应满足工程需要；使用监测期间每年宜进行不少于一次状态一级评估；当监测数据或数据分析结果有异常时，应立即进行状态一级评估；

2 对于服役中后期或处于观察使用期的钢结构，每年不宜少于一次状态二级评估；

3 当钢结构工程或使用管理需要时，可依据监测结果对结构安全性或适用性等状态进行评估状态二级评估；

4 当结构遭受地震、风灾、火灾或特殊车辆过桥等突发事件后，应进行结构状态检查、监测数据检查与分析，必要时可进行结构安全性或适用性等状态的专项评估。

7.1.4 下列情况之一时，宜在状态一级评估的基础上进行状态二级评估：

1 结构整体响应异常；

2 结构局部响应异常，并且专项检查发现结构损伤；

3 荷载作用超过设计值。

7.1.5 有下列情况之一时，应进行专项检查：

1 结构局部响应异常；

2 构件监测点处钢构件发生腐蚀和削弱，判定监测点处腐蚀状态异常；

3 关键构件拉、压应力大于设计值，判定监测点处构件应力状态异常；

4 关键构件疲劳状态超过中等损伤，判定监测点处构件疲劳状态异常；

5 拉索、吊索、吊杆和系杆应力大于设计值，判定索体结构状态异常。

7.2 监测数据分析

7.2.1 监测数据分析和处理宜按下列原则进行：

1 监测数据分析前应进行检查、评判和必要的预处理，包括异常数据剔除、数据缺失修补、去趋势项、数字滤波降噪；

2 数据分析应根据需要包括统计分析和特殊分析, 统计分析包括最大值、最小值、平均值、均方根值、离散系数、累计值; 特殊分析包括荷载谱分析、风参数分析、模态分析、疲劳分析;

3 采样频率大于 1 Hz 的数据, 宜以 10 min、日、月和年为统计间隔获得统计值; 温湿度、静应变和静位移等监测变量, 宜给出以日、月和年为统计间隔的统计值。

7.2.2 荷载与环境监测数据分析应符合下列规定:

1 风参数分析宜包括风速、风压、风向、风攻角、脉动风速谱、湍流强度、阵风系数及各等级风速疲劳谱;

2 地震动数据分析宜包括加速度峰值、速度峰值、持续时间、频谱和反应谱;

3 温度数据分析应包括最高温度、最低温度、平均温度和结构温度分布场;

4 湿度数据分析应包括构件内/外湿度最大值、平均值和超限持续时间;

5 降雪量数据分析宜包括每小时最大降雪量、累计降雪量;

6 流速、水位数据分析宜包括日、月、年平均值、最大值及其统计分布;

7 钢结构使用荷载分析应包括最大值、最小值和平均值, 宜提取荷载的月、年最大值及其统计分布特征;

8 钢结构承受动力荷载时, 宜将动力荷载统计和模型转化为疲劳荷载谱, 桥梁结构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。

7.2.3 结构整体响应监测数据分析应符合下列规定:

1 结构整体响应监测数据应包括变形、位移、加速度(速度)、模态参数分析;

2 结构变形分析包括平均值和绝对最大值, 宜进行挠度与温度、荷载相关性分析, 横向位移和挠度与风荷载相关性分析;

3 大跨空间结构应分析支座位移、日照温差引起的偏移量及其变化规律;

4 桥梁结构应分析梁端位移、支座位移, 以及与温度和车辆荷载相关性;

5 基础沉降宜分析其累计值及变化规律, 并预测其发展趋势;

6 加速度(速度)分析宜包括绝对最大值和最大均方根值, 进行结构振动与风速风向及外荷载的相关性分析;

7 结构模态参数分析宜包括结构频率、振型和阻尼比, 长期数据评估时, 应考虑温度对自振频率的影响、风速对阻尼比的影响、振动幅值对自振频率和阻尼比的影响。

7.2.4 结构局部响应监测数据分析可按下列规定进行:

1 钢结构局部响应监测数据宜包括应变、裂纹、腐蚀、索力、支座反力;

2 应变时程数据分析宜包括平均值、最大值、最小值、应力幅最大值; 钢结构疲劳损伤指数宜根据雨流计数法或 Miner 线性损伤理论进行;

3 裂纹应对其位置、形态、长度、宽度和深度进行分析;

4 腐蚀数据分析应包括腐蚀深度最大值和腐蚀速率;

5 大跨空间结构和桥梁结构支座反力时程数据分析宜包括平均值、最大值和最小值、最大变化量;

6 索力时程数据分析包括平均值、最大值、最小值。

7.2.5 钢结构遭受突发事件后应对事件发生前后的监测数据进行对比分析。

7.3 结构状态评估

7.3.1 依据监测数据对结构进行状态一级评估时，应按下列原则进行：

1 依据应变监测数据进行钢结构疲劳状态一级评估应符合下列规定：

- 1) 可采用容许应力法或疲劳损伤指数法进行监测点处构件疲劳状态评估；
- 2) 采用容许应力法进行疲劳状态评估时，当应力幅最大值小于规范规定的构件疲劳容许应力时，监测点处构件疲劳状态正常；否则，应按设计标准进行结构疲劳状态评估。

2 缆索承重结构状态一级评估应符合下列规定：

- 1) 当拉索、吊索、吊杆、系杆应力小于设计值时，可判定索体结构处于正常状态；否则，判定索体结构状态异常；
- 2) 当拉索、吊索、吊杆、系杆应力大于规范容许疲劳应力时，可判定索体结构疲劳状态异常，应进行疲劳状态评估。

3 结构整体状态一级评估应按下列原则进行：

- 1) 结构整体状态一级评估应在结构计算分析的基础上，采用对比评估的方法进行；
- 2) 采用监测的环境、荷载计算结构整体内力和线形，与设计值进行对比；
- 3) 结构整体内力、线形或变位满足设计规范要求，判定结构处于正常状态；否则，判定结构状态异常。

4 结构动力特性进行状态一级评估应符合下列规定：

- 1) 对监测的速度或加速度数据进行模态分析，获取结构动力特性；
- 2) 将获取的结构动力特性宜与设计值进行对比；
- 3) 当监测获取的结构自振频率与设计理论计算频率的比值大于或等于 1，判定结构处于正常状态；否则，判定结构状态有异常。

7.3.2 状态二级评估应基于状态一级评估和专项检查结果进行结构损伤识别与模型修正，然后基于修正有限元模型进行结构重分析、极限承载力分析。

7.3.3 基于结构动力响应的损伤识别和模型修正应符合下列规定：

- 1 可采用模态参数进行损伤识别，亦可采用其他可靠的损伤识别方法；
- 2 损伤识别宜融合构件或局部损伤分析、多种识别方法、专项检查的结果和多传感器信息进行，可通过对比分析结构整体响应和监测点处的数据和状态进行综合判断；
- 3 模型修正宜采用有限元模型，也可采用其他等效模型进行参数修正；
- 4 根据模态参数进行模型修正时，宜采用模型与实测自振频率之差的平方和、模型振型与实测振型的模态置信因子（MAC）值、或两者的组合值来确定模型修正的优化目标函数，亦可采用其他与结构自振频率和振型相关的结构振动参数作为模型修正的目标函数；
- 5 模型修正优化求解前，宜选取对目标函数敏感的结构参数作为修正参数，并对模型

进行参数灵敏度分析。

7.3.4 结构重分析与状态二级评估宜按下列原则进行：

- 1 状态二级评估的输入荷载宜采用监测荷载环境工况分析结果与规范设计荷载的较大值，未监测荷载选用规范设计值；荷载工况宜按照规范要求选择最不利荷载组合；
- 2 状态二级评估的荷载效应宜选择最不利荷载组合作用下荷载效应值，按设计标准进行评估。

7.3.5 结构性能分析及安全评估应符合下列规定：

- 1 结构承载力分析评估应采用修正的计算分析模型，按照结构设计荷载工况进行加载分析，分析应考虑实际施工偏差、温度变形和施工荷载产生的不利效应影响；
- 2 结构变形和动态性能分析评估应采用修正的有限元模型，并计入施工偏差、温度变形和施工荷载引起的不利变形影响；
- 3 结构安全评估的可靠度指标应与结构设计依据的标准相一致。

7.3.6 结构状态评定，可按国家现行设计标准的规定进行，亦可按国家现行结构鉴定标准的规定进行。

7.3.7 当监测钢结构遭受地震、火灾、风灾、超载、撞击等突发事件后，应对监测结构状态及监测数据进行及时检查，检查内容至少应包括：

- 1 事件前后监测数据及变化、监测系统工作是否正常、现场结构变形与损伤状况；
- 2 事件过程中监测数据的最大值、极值、频谱特性与事件经历时间；
- 3 事件发生后结构响应监测数据的绝对最大值、均方根值和频谱，结构响应监测数据的最终值与塑性变形残余值。

7.3.8 事件后应对监测结构的安全性和适用性等进行专项评估，按下列要求进行：

- 1 结构计算分析，应采用修正的模型进行结构受力重分析和极限承载能力验算分析；
- 2 结构状态专项评估，应计入突发事件引起的损伤和残余变形影响；
- 3 结构专项评估内容，宜包括突发事件对结构的损伤程度评估、后期正常使用荷载作用下的安全性与适用性等评估。

8 监测评估报告

8.1 一般规定

8.1.1 监测评估报告应包括下列内容：

- 1 工程概况，包括结构设计概况、结构历史情况；
- 2 监测系统概况，包括监测参数、测点布置和设备型号；
- 3 监测数据及分析结果；
- 4 结构状态评定结果及依据；
- 5 结论和建议。

8.1.2 监测评估报告出具频次应符合下列要求：

- 1 施工监测状态一级评估应满足工程需要，使用监测每年不少于 1 次，可按年报、季报、月报的频次出具报告。
- 2 状态一级评估中发现异常情况时，可根据异常情况的类型，进行状态二级评估并出具报告。
- 3 突发事件发生时或发生后，应出具专项评估报告。

8.2 报告要求

8.2.1 监测评估报告评估中应明确数据分析方法、临界状态预警阈值的选取依据。

8.2.2 报告宜明确触发状态二级评估的异常情况，结构损伤识别和计算分析模型修正情况以及结构状态评定分类。

8.2.3 报告专项评估中宜包含以下内容：

- 1 突发事件前后的监测数据对比；
- 2 结构受力重分析；
- 3 结构极限承载能力分析及状态评定。

8.2.4 监测评估报告可将监测数据以附件形式附于报告中。

8.2.5 监测评估报告应根据要求，给出监测数据结果和相应的数据分析或状态评估结论。

附录 A

表A-1 典型光纤光栅传感器参数

参数	值	单位	备注
3dB 带宽	≤ 0.25	nm	
反射率	$\geq 70\%$	-	
边模抑制比	≥ 15 dB	-	
中心波长误差	± 0.5	nm	
温度测量范围	$(-40 \sim 80)$	$^{\circ}\text{C}$	
温度测量误差	$\leq \pm 1$	$^{\circ}\text{C}$	
应变测量范围	$(-1500 \sim 1500)$	$\mu\text{m/m}$	
重复性	$\leq 1\%$	-	
线性度	$\leq 1\%$	-	最小二乘法
机械滞后 (室温)	≤ 5	$\mu\text{m/m}$	
蠕变 (室温)	≤ 5	$\mu\text{m/m}$	

表A-2 典型光纤光栅传感解调仪参数

参数	值	单位	备注
波长范围	40	nm	1528nm~1568nm
通道数	4	-	采用 LC/APC or FC/APC 连接器
每通道理论最大传感器数量	30	-	
分辨力	1	pm	
波长准确性	$\leq \pm 1$	pm	
动态范围	≥ 25 dB	-	
扫描频率	100/250	Hz	
监测距离	10	km	
工作温度	$(0 \sim +40)$	$^{\circ}\text{C}$	
存储温度	$(-20 \sim 60)$	$^{\circ}\text{C}$	

表A-3 典型分布式光纤传感器使用参数

参数	值	单位	备注
测量温度范围	$-40 \sim 80$	$^{\circ}\text{C}$	
应变测量范围	$-10000 \sim 10000$	$\mu\text{m/m}$	
温度精度	± 1	$^{\circ}\text{C}$	
应变精度	± 20	$\mu\text{m/m}$	

表A-4 典型分布式光纤传感解调仪使用参数

参数	值	单位	备注
空间定位精度	≤ 1	m	
空间分辨率	3	m	

应变测试精度	$\leq \pm 20$	$\mu\text{m/m}$	
温度测试精度	± 1	$^{\circ}\text{C}$	
通讯接口	RJ45, USB3.0, HDMI	-	
测量周期	≤ 60	s	测量距离 10km

参考标准

- 1 《钢结构通用规范》 GB 55006
- 2 《钢结构设计标准》 GB 50017
- 3 《钢结构工程施工质量验收标准》 GB 50205
- 4 《工业建筑可靠性鉴定标准》 GB50144
- 5 《民用建筑可靠性鉴定标准》 GB50292

中国钢结构协会标准

钢结构工程监测技术标准

T/CSCSxxx-2022

条文说明

目 次

1	总则	36
2	术语和符号	37
3	基本规定	38
3.1	基本要求	38
3.2	监测要求	39
3.3	结构状态评估	40
4	监测系统	41
4.1	一般规定	41
4.2	电测传感系统	41
4.3	振弦传感系统	42
4.4	光纤传感系统	42
4.5	测量机器人系统	44
4.6	基于图像的非接触变形监测系统	44
4.7	GNSS 变形监测系统	44
4.8	环境监测系统	45
4.9	三维激光扫描系统	45
5	钢结构工程施工监测	46
5.2	大跨钢结构工程施工监测	46
5.3	多高层与高耸钢结构工程施工监测	46
5.4	桥梁钢结构施工监测	46
6	钢结构使用监测	47
6.1	一般规定	47
6.2	大跨钢结构使用监测	47
6.3	多高层与高耸钢结构使用监测	48
6.4	桥梁钢结构监测	48
6.5	工业构筑物钢结构监测	49
7	监测数据分析与结构状态评估	50
7.1	一般规定	50
7.2	监测数据分析	50
7.3	结构状态评估	51
8	监测评估报告	52
8.1	一般规定	52
8.2	报告要求	52

1 总则

1.0.1 钢结构一般具有跨度大、结构复杂、对变形与偏差敏感和安装施工技术要求高等特点，进行结构监测是保障结构在施工和使用期间安全性的重要手段，目前，进行监测的结构大多数为钢结构，但还缺少专门针对钢结构工程监测的标准或规范，因此，为满足钢结构工程监测和依据监测数据对结构评估的需要，规范钢结构工程监测技术工作，专门针对钢结构工程的监测与评估编制本标准。

1.0.2 本标准以建构筑钢结构和桥梁钢结构为主要监测对象，对其他钢结构工程的监测与评估，可参照本标准方法、程序进行；在结构检测测试、荷载试验、结构性能检验中，涉及参数与测点布置、测试系统与测试等过程可参照本标准执行。

1.0.3 根据标准编写及标准间关系的有关规定，本标准总则中应反映其他相关标准、规范的作用。

2 术语和符号

本节给出的术语和符号是参考现行国家标准《工程结构设计基本术语和通用符号》GBJ 132、《建筑结构设计术语和符号标准》GB/T50083 的规定，并结合本标准的具体情况给出的。

3 基本规定

3.1 基本要求

3.1.1 钢结构安装施工过程中，结构构件成型及内力状态与施工工艺相关，且在设计阶段这些工况也无法考虑到，安装偏差、温度与焊接变形、与设计使用荷载不同的施工荷载作用等导致结构安装附加内力和变形，对结构安全和施工质量造成不利影响；结构在使用阶段，也因腐蚀、损伤疲劳和无法预见的荷载作用等原因导致结构出现不安全状态。对结构状态进行监测是保障结构安全和施工质量的重要手段，虽然目前所采取的安装精细测量、优化施工工艺和加强使用维护等措施对保证施工质量与安全起到了重要作用，但对反映结构安全状态的内力、变形等参数状态与累积变化还无法获得，在有条件时宜通过监测手段掌握结构安全控制参数状态及变化，能够为结构状态与施工质量评定提供更多实测数据。

3.1.2 根据需要，钢结构工程监测可只针对施工期间结构状态进行监测，也可只针对结构在使用期间状态进行监测，施工监测与使用监测在监测周期、荷载工况、监测参数以及状态控制等方面有所不同，对传感器件性能、测点数量与布置、监测系统与软件等要求也不相同。因此，本标准进行了施工监测与使用监测的分类，对于既进行施工监测，也进行使用监测的项目，从监测数据的连续性和监测项目的经济性考虑，在监测系统与方案的设计中，应统筹考虑参数、测点布置、监测系统等。

3.1.3 为做好监测工作，需要制定监测方案，本条规定了监测方案必要与基本的内容，监测项、测点布置需要在对被监测结构进行监测前计算分析后确定的。监测系统应根据监测目的要求和现场环境条件设计。

3.1.4 监测参数为由传感器量测的物理或力学量，如应变、位置坐标、加速度、温度、风速等参数，监测项为结构荷载或响应状态相关的力学或物理量，如轴力、弯矩、应力、应变、温度、索力、挠度、侧移、支座滑移等项。由于传感器的监测参数有限，实际监测项较多，监测中常采用多测点监测参数与间接监测参数的方法实现。

在监测项中，只有少数监测项与监测参数之间为同一量或存在直接的对应关系，如一点的单向应变、一点的单向加速度、一点的温度，一点的坐标等，可直接通过监测参数得到监测项；而多数监测项与监测参数之间无直接的对应关系，需要通过多点监测参数、间接监测参数的量测值经微分、积分和物理关系变换而获得监测项，如：采用应变参数监测构件内力时，需要根据构件截面平面变形假设，将多点应变测量值经物理方程、截面积分变换运算获得轴力、弯矩等内力值；采用多点坐标变化监测值可以拟合出梁挠度曲线，进而可通过微分和物理关系变换获得构件各截面的转角、点应变、点应力、内力等值；采用多点转角监测参数，通过积分变换运算可获得墩柱、塔等构件的变形、内力和应力等监测项。

为消除或补偿次要因素对监测项影响，可采用监测参数的对称性布置测点的方法，如同截面多测点布置可补偿次要弯曲变形对构件轴力的影响、次要扭转变形对平面弯曲变形的影

响等。

3.1.5-3.1.6 监测传感方式的选择除应符合本标准原则外，还应考虑所采用的监测手段是否能满足监测项的精度与长期稳定性要求等因素，包括：

1) 按照监测系统的分辨力与监测参数在监测期内的变化范围比较，当其系统分辨力与监测参数变化幅度在同一量级时，监测项的准确性就会降低；

2) 按照监测系统长期漂移偏差与监测参数在监测期内的变化范围比较，当其系统漂移偏差值与监测参数变化幅度在同一量级时，监测系统的长期稳定性相对较差；

3) 当监测手段的量测精度与长期稳定性不能满足工程需要时，可考虑使用性能更好的监测系统、或使用间接监测参数传感系统、或采用机械转换放大传感器、或增大标距等方法进行。

监测测点布置设计中，传感器安装防护、监测仪器设备放置和电源信号线铺设等均为监测系统设计的重要内容。施工监测中，为避免在系统安装监测期间与工程施工交叉影响，造成对监测系统的破损，一般宜将监测系统安装统一纳入工程施工组织设计中。

系统现场标定一般采用施加荷载或利用温度变化等方式加载，通过测试和分析数据的变化量确定传感器或系统的工作是否正常。

3.2 监测要求

3.2.1 按照结构可靠性设计、控制与分析计算方法体系考虑，本标准将监测项分为环境荷载作用项与结构响应项两类，而对于施工监测，除上述两类监测项外，还应包括施工定位与尺寸偏差、变形方面的项，考虑到施工偏差为施工控制的范畴，且这些几何参数与结构变形、位移参数类似，可纳入结构响应监测项。

3.2.2 为便于根据设计规范标准进行结构状态计算和分析评估，环境荷载作用监测项宜尽量选择与荷载规范一致的特征代表值。而当针对特定的荷载环境进行监测和分析评估时，宜按实际分布的特征值作为监测项。

3.2.3 位移测点布置在结构变形曲线特征点，是基于根据特征点值和变形值可确定结构变形曲线方程，并通过几何与微分分析计算获得所需要的结构变形值（如挠度、截面转角、任意点应变等）；钢结构杆件截面应变监测参数布置中，应首先确定杆件主要变形特征（弯曲变形、拉压变形、扭转变形等），应变测点数量及布置原则为：应用监测点测试参数值与截面主要变形特征，通过截面应力积分获得截面主要内力，同时，也可利用对称性消除截面次要变形因素在积分运算中的影响。

3.2.4 在进行监测前，必须对监测系统是否工作正常进行调试，同时设置监测初始值。实际工程中，监测系统安装节点差异较大，初始值往往不是零状态（如使用监测前一般结构自重、施工荷载与偏差影响等已发生），因此，规定在监测前检测记录结构已有荷载及其他对监测结果的影响信息。

预警值设置一般根据结构监测期间的可靠性控制要求设定，在结构计算分析、监测前状

况和监测期间荷载环境变化评估等基础上,可按承载力极限状态、变形状态或偏差值等综合确定。

影响结构状态的因素较多,监测系统有限的参数与测点不能完全覆盖所有信息,标准强调在监测系统记录数据的同时,需记录其他结构相关信息,会在监测中(特别在施工监测中)发挥重要作用。

3.2.5 影响结构状态的因素较多,监测系统有限的参数与测点不能完全覆盖所有信息,标准强调在监测系统记录数据的同时,需记录其他结构相关信息,会在监测中(特别在施工监测中)发挥重要作用。

监测数据采集方式应能保证监测数据的衔接连续性,施工监测阶段一般可根据需要采取不同的数据采集频次;在使用监测阶段,当发生台风、爆破、地震等短时突发荷载作用时,人为改变数据采样频次无法满足实际需要,可由监测软件功能实现触发启动数据采集方式,达到监测数据采集的完整性。

3.2.6 监测数据包括原始记录与分析结果数据,是监测工作的主要成果,应对监测数据进行保存和备份。由于动态监测原始数据量大,考虑到海量原始数据的保存有困难,规定了最少数据保存要求,但分析数据量相对较少,宜永久保存和备份;对于结构状态平稳和数据变化较小的动态实时监测数据,在无异常变化的监测过程中,可按等时段覆盖或重点关注工况时段进行存储和数据分析。

3.2.7 根据以往的工程监测经验,经常发生由于现场施工对监测系统保护不当造成传感器或线路损坏、现场发生短时局部荷载或温度突变而未能监测到、个别传感器失效或接线断开、因现场电源不稳定引起软件无法正常运行等情况,导致了监测数据出现异常或不正确等情况,对监测数据正确性判断和应用造成较大影响。因此,本标准强调监测系统维护的重要性,目的是保证监测系统正常运行,排除减少因系统故障或损坏引起的监测数据异常影响,同时,详细记录监测现场的其他信息,有助于分析处理监测数据和正确判断结构状态。

3.3 结构状态评估

监测数据反映了结构在监测期内的状态变化,根据监测期间实际荷载与结构响应监测数据之间的对应关系,可以验证或修正结构设计计算的正确性和有效性。

当结构状态可以通过关键监测项数据判定、或通过结构计算分析可确定监测项与结构状态的关系时,可采用在线方式由监测软件及时给出结构状态信息。

当影响结构状态的影响因素复杂、监测数据有限、结构状态与监测数据之间无确定的关系、损伤缺陷的偶然性及局部性等影响时,有限的监测参数很难对结构状态做出全面和准确的评估,可采用离线方式对结构进行分析评估(此时,监测数据为结构状态评估的重要依据),给出结构状态信息。

4 监测系统

4.1 一般规定

4.1.1 自动化监测可提高监测结果可靠性，监测效率高，并且可实现全天候连续监测，降低人工劳动强度。

4.1.4 工程中存在一些工况难以自动化监测，可采用人工监测

4.1.5 监测系统应进行硬件、软件、网络等接口设计，确保各个模块的协同工作。

4.1.7 监测系统网络应视工况和监测要求进行搭建，可采用单一有线网络、单一无线网络或有线与无线相结合的方式。

4.1.9 传感器使用前应通过专业机构计量校准，且在有效期内使用，新型传感器应通过计量认证后使用。当监测现场环境（温度、风雨、电磁等）无法满足监测仪器正常使用条件时，应采取相应的防护与保护措施，施工监测系统安装宜在工程施工组织设计中统筹进行。监测系统应具备对监测结果初步分析评估的能力，系统将监测数据与结构分析数据进行实时对比，甄别虚假数据，及时对监测对象与监测系统进行核查与修正。

4.2 电测传感系统

4.2.1 电阻应变计、电位器式位移计、差动电阻式位移计和电容式位移计种类繁多，可根据结构状态及现场情况选择恰当的、满足相关标准要求的电测传感器即可。

4.2.2 稳定性、绝缘性能、温度影响均可按现行国家标准《金属粘贴式电阻应变计》GB/T 13992 上的相关方法进行测试。

4.2.3 滞后性、不重复度、非线性度、稳定性、绝缘性能温度影响均可按国家现行标准《电位器式位移计》DL/T 1135、《差动电阻式位移计》DL/T 1603 和《电容式位移计》DL/T 1017 上的相关方法进行测试。

4.2.4 横向灵敏度比、线性度、稳定性、频响误差、灵敏度幅值线性度、绝缘性能、温度响应等均可按国家线性标准《压电式加速度传感器》JB/T 6822 上的相关方法进行测试。

4.2.5 监测仪器的稳定性和耐久性应与监测周期相适应，施工期间监测的设备选择宜兼顾使用期间监测的需求，监测设备的耐久性、稳定性以及造价宜与使用期间的监测统筹考虑。当监测设备使用寿命短于结构寿命，应及时更换。

监测设备的稳定性不仅要求监测设备经过长期使用以后其工作特性保持正常，还要求其对工作环境具有较强的适应能力和抗干扰能力。安装方式应牢固，其耐久性应能满足监测期内的使用要求。

监测仪器应具备一定的兼容性，以满足不同种类的传感器需求。

4.2.6 监测系统宜具有完整的采集、传输、接收，对采集的数据处理及存储，实时报警及进

行状态评估的功能，并应具备根据发展而进行技术升级改造的功能，并应符合下列规定：

- 1) 具有安全新和可靠性；
- 2) 具有容错性和冗余性；
- 3) 具有开放性和兼容性；
- 4) 具有互联性和扩展性。

4.2.7 传感器要制订合理的安装方案，安装完毕后对钢结构表面漆膜造成的损坏要及时采用合理的防腐蚀保护方案。

测量导线应选用电阻率和电阻温度系数都比较小的材料，并在规定的工作温度范围内保证电性能的稳定和足够的绝缘电阻。必要时可采用屏蔽导线。以减少环境的电磁干扰。

连接测量导线时，应保证连接处的接触电阻稳定，并将导线妥善地固定。

4.3 振弦传感系统

4.3.1 振弦传感器的应用条件：

1) 静应变传感器量程应不小于预测最大值的1.5倍~3倍，动应变传感器量程应不小于预测最大值得2倍；

2) 疲劳测点应根据结构计算分析和结构易损性分析结果布设在易于或已出现疲劳破坏初期征兆的部位，应选用三向应变传感器；

3) 振弦式应变计应与匹配的频率仪配套校准，频率仪的分辨力应优于0.1Hz；

4) 应变监测应进行温度补偿。

4.3.3 监测系统宜具有完整的采集、传输、接收，对采集的数据处理及存储，实时报警及进行状态评估的功能，并应具备根据发展而进行技术升级改造的功能，并应符合下列规定：

- 1) 具有安全性和可靠性；
- 2) 具有容错性和冗余性；
- 3) 具有开放性和兼容性；
- 4) 具有互联性和扩展性。

4.3.5 1) 振弦传感器与监测仪器系统安装前，应编制安装方案。内容宜包括埋设时间节点、埋设方法、电缆连接和走向、保护要求、仪器检验、测读方法等。

2) 振弦传感器、监测仪器、导线和电缆宜采用适当的方式进行保护，发现问题应处理。

4.4 光纤传感系统

4.4.1 分布式光纤传感器有很多种，这里选择相对成熟的 BOTDA 和 BOTDR，目前 OFDR 的技术成熟度也在不断提高，将在技术成熟后在后续标准的修订中予以补充。光纤应变监测的应用条件见表 4.4.1。

表4.4.1 应变传感器的应用条件

应用条件	光纤光栅	分布式光纤
测量精度	高	较高
空间分辨力	高	一般
测量范围	较大	大
稳定性	高	高
信息传输距离	长	长
是否分布式	准分布式	分布式
温度变化的影响	大	大
采样频率	高	低

4.4.2 退火工艺可以改善光纤损耗衰减、翘曲特性以及光纤脆性,从而提高光纤传感器性能。

中心波长指光谱波长范围内能量最大的波长,常用单模光纤中心波长为 1510 nm~1590 nm。

一般光纤光栅敏感元件的测量范围均优于 (-4000~4000) $\mu\text{m/m}$ 。

线性度、重复性、机械滞后、蠕变等可经标准梁,按GB13992上的相关方法进行测试。

分布式光纤传感器的测量精度、空间分辨力和空间定位精度是相互制约的,用户可根据需求自行配置。

应变监测测点应结合构件的受力特点布置,监测反应构件受力特性的关键位置,受力复杂的局部位置,后根据监测测点受力情况,选择所需的传感器种类。

4.4.3 监测设备的稳定性和耐久性应与监测周期相适应,施工期间监测的设备选择宜兼顾使用期间监测的需求,监测设备的耐久性、稳定性以及造价宜与使用期间的监测统筹考虑。当监测设备使用寿命短于结构寿命,应及时更换。监测设备的稳定性不仅要求监测设备经过长期使用以后其工作特性保持正常,还要求其对工作环境具有较强的适应能力和抗干扰能力。兼容性一般要求监测系统中所有设备的接口使用标准接口。监测设备的安装方式应避免预埋传感器及导线损伤,同时应避免结构出现不可恢复的永久性损伤;安装方式应牢固,其耐久性应能满足监测期内的使用要求。

4.4.4 考虑到系统的长期稳定性验证需要较长的周期,这里只给出了可以短期验证的稳定性指标;但系统的长期稳定性应能满足15pm/30d的要求。

系统在实时监测时,如结构卸载、滑移、顶升时的实时监测,监测数据需及时快速反应结构的状态,监测系统的采样速率应满足监测需求。且监测系统中传感器的动态范围及监测系统对传感器数据的读取方式(串联或并联)应满足要求。

4.4.5 在短期监测和结构表面不允许焊接的情况下选择胶接,在钢结构表面允许焊接的情况下优先选择焊接,以保证传感器的夹持底座更加耐久,所测数据更加精准。

传感器要制订合理的安装方案,安装完毕后对钢结构表面漆膜造成的损坏要及时采用合理的防腐保护方案。

光纤走线过程中应尽量避免出现悬空状态,以防止光纤在监测过程中出现损坏。如不可避免,应尽量减小光纤与结构间的空隙,并使用硅胶将空隙填充。

敷设光纤时,光纤首端严格按照设计方案引出,不能倒向敷设,否则后期光纤测量数据

定位位置与光纤上实际位置不符；在光纤敷设过程中要尽量保证光纤的连续性，如现场环境复杂，敷设难度较高，分段敷设时应确保每段长度不小于规定最小长度。

4.4.6 一般情况下，应定期对所测数据进行分析 and 处理。

4.5 测量机器人系统

基于测量机器人的变形监测系统由伺服型测量机器人、棱镜（包括基准点棱镜和监测点棱镜）、数据传输模块、计算机和监测软件组成，系统通过逐点扫描各棱镜进行钢结构大范围静态变形监测。该系统可实现钢结构无人值守、全天候自动化监测。对于一些特征点激光反射度较高、不易安装棱镜的监测区域，可采用无棱镜模式。

测量机器人工作需要发射并接收返回的光束，测量机器人和监测基准点、测点之间应保持通视，且监测基准点、测点表面宜与测量机器人激光光路垂直。

监测系统的高程数据是通过三角高程法获得，监测现场的大气温度、气压、大气折射对监测数据造成影响，应进行实时修正。

测量机器人镜头和棱镜表面堆积的灰尘和其它污染物影响监测结果的精度，应定期维护。

4.6 基于图像的非接触变形监测系统

基于图像的非接触变形监测系统由相机、配套镜头、光源、靶标、数据传输模块、计算机和图像采集处理软件组成，通过相机连续采集图像，应用数字图像处理、人工智能等技术解析得到被测目标点位变形的数据。该系统可实现钢结构多个目标同步、实时变形监测。系统应按规定的方法或流程进行参数设置和调试，并应符合下列规定：

- 1) 根据监测要求选择合适的相机、镜头；
- 2) 相机采集照片时，需保证镜头与被监测对象之间光线强度稳定；
- 3) 靶标大小应根据相机与被测对象的距离选取，靶标在数字影像上清晰可见，应满足大于9个像素；
- 3) 应根据工程监测需求设置相机采样频率；
- 4) 图像采集处理软件应实现：图像采集，监测点位选取，像素标定，变形数据图形化显示，异常数据报警等功能。

4.7 GNSS 变形监测系统

GNSS变形监测系统包括GNSS接收机、高精度测量型天线、数据传输模块、防雷击设备、供电设备、监测终端和监测软件组成。该系统可实现钢结构全天候自动化变形监测，监测系统应按规定的方法或流程进行参数设置和调试，并应符合下列规定：

- 1) 监测站和基准站应按照要求选址和安装；
- 2) 环境存在振动时，宜通过减振措施降低环境的振动对测量结果的影响；

3) 监测期间定期对监测站和基准站及供电设备进行维护, 监测数据出现异常, 应分析原因。

4.8 环境监测系统

环境监测系统用来实现钢结构工程周边环境自动化监测, 实时掌握工程周边环境的变化, 系统应具备自动报警功能, 为施工决策提供依据。

4.9 三维激光扫描系统

三维激光扫描监测系统通过采集钢结构的三维激光点云数据快速重构三维模型, 并通过对点、线、面、体等数据后处理分析, 实现钢结构监测。

5 施工监测

5.2 大跨钢结构工程施工监测

5.2.1 根据 GB50982-2014 第 6.6.1 条归类需要进行施工期间监测的大跨空间钢结构。施工期间受力复杂的大跨空间结构是指受施工方案或施工顺序影响,施工期间结构受力状态或部分杆件内力或位形与一次成型整体结构的成型加载分析结果存在显著差异的大跨空间结构。

5.2.2 本条借鉴 GB50982 第 6.1.4 条,并结合施工期间监测的特点,提出预应力钢结构需要进行拉索索力监测,提出针对大跨结构使用期间用到的临时支撑宜进行应力和变形的监测。

5.2.3 本条结合大跨钢结构常用几种施工方法,对各类施工方法中监测关键参数进行了梳理,提出了具有针对性的监测控制要点。

5.3 多高层与高耸钢结构工程施工监测

5.3.3 多高层与高耸钢结构整体位移测点主要包括整体倾斜、结构顶部水平位移、层间位移、不均匀沉降等;结构整体变形测点主要包括伸臂桁架、转换桁架或局部大悬挑结构的挠度等。

5.3.4 构件应力测点宜选取构架内力控制截面布置,每个截面布置的应力测点应能换算该截面内力(轴力和弯矩)。复杂节点的应力测点可根据节点有限元分析结果确定。

5.4 桥梁钢结构施工监测

5.4.3 桥梁墩柱、索塔轴线监测测点的设置应能反映墩、塔实际倾斜情况。

主梁标高监测截面的测点布置,一般应根据主梁截面形式和截面宽度确定,对于钢箱梁及其他异形截面,应以能满足控制主梁截面总体标高为目的设置。

主梁应力监测截面布置,一般为主梁施工过程中的控制性截面,主要为墩顶附近截面、跨中截面和主梁截面变化处截面。主梁应力监测截面测点布置,主要根据截面形式和截面宽度确定,本条仅以常见的梁式桥单箱单室钢箱梁、斜拉桥和悬索桥钢箱梁为例给出,对于其他异性截面,应以能满足控制主梁截面总体应力为目的设置。

主梁温度监测的目的在于监测主梁的内外温差、日照温差及季节性温差,以便分析主梁线形及应力受各种温差的影响。

5.4.4 轴线及标高监测主要考虑轴线及标高发生相对较大变化的工况。

应力监测主要考虑截面应力发生相对较大变化的工况。

6 使用监测

6.1 一般规定

6.1.2 传感器布置一般应遵循的主要原则有：1) 应布置在拟监测参数的响应最大位置、关键控制位置或已损伤处；2) 应使测得的数据对实际结构的静动力参数及环境条件变化较为敏感，具有良好的信噪比；3) 测得的参数应能够与理论分析结果建立起良好的对应关系；4) 测点的数量和布置范围宜覆盖结构整体，能够反应结构整体及环境的状态；5) 测点布置应有冗余量，重要部位应增加测点，可利用结构的对称性来进行对比或减少传感器，达到对比和减少传感器布置的目的；6) 应便于安装、测读、维护和更换，便于添加传感器对重要部位进行数据重点采集；7) 传感器的数量、布置位置及安装方法应在监测方案中明确说明，传感器安装完毕后应及时记录测点实际位置，绘制测点布置图。

6.1.5 使用期间监测一般为连续监测。各监测项目的采样频率由监测内容及结构的响应确定，如振动监测的采样频率不低于感兴趣结构频率的两倍，静力位移及应变的监测频率可以是每小时一次。当遭遇地震、大风等自然灾害时，自动化监测系统可以设置触发启动方式，即在特定监测参数超过触发值时，启动高速采用模式进行采样；当特定参数低于触发值时，恢复原设定的采样模式。

6.2 大跨钢结构使用监测

6.2.1 本条借鉴 GB50982 第 6.1.3 条，原规定仅包括网架、网壳和悬挑大于 40m 的钢结构，本条包括各类空间结构，如网架结构、网壳结构、桁架结构、索结构、张弦结构、膜结构等等

6.2.2 本条借鉴 GB50982 第 6.1.5 条，增加了桁架结构、张弦结构，且对监测要求有所提高。对于有特殊要求的，可适当增加监测项目如湿度、环境的腐蚀性等。

6.2.3 本条借鉴 GB50982 第 6.3.1 条，增加了水平位移最大点的监测。

6.2.4 应变监测的目的是测量主要受力构件的应力状况，包括受力大的构件，也包括应力大的主要构件。支座附近杆件的应力往往较大，是常见的应变测点布置位置，对于大悬挑结构，其悬挑根部往往是受力较大的测点布置位置

6.2.5 拉索索力的测试是比较复杂和困难的，目前测试方法很多，其中压力表测定法、压力传感器测定法比较精确；基于拉索振动频率的频率法适用于细长索；采用手持式弓形张力仪的张弦法使用便捷，可应用于小直径索；磁通量法需要在加工厂进行安装和标定

6.2.6 振动传感器的优化布置准则有模态保证准则、模态矩阵的奇异值比准则、平均模态动能准则、Fisher 信息阵、模态可视化程度及表征最小二乘法准则等；优化布置方法有模态动能法、特征向量乘积法、原点留数法、有效独立法、改进的 MinMAC 法、QR 分解法以及特征值灵敏度法等；振动频率法测量索力的传感器布设位置与索端距离不应小于 0.17 倍索

长。

6.3 多高层与高耸钢结构使用监测

6.3.2 结构整体监测项目中的位移参数包括整体倾斜、层间位移和不均匀沉降；构件和节点监测项目中的应力和内力参数包括构件轴向应力、轴力、索力、弯矩、主应力；荷载和作用监测项目中的风荷载参数包括风速、风向、风压。

6.3.3 对于高耸结构而言，可选定特征明显的塔尖、避雷针、圆柱(球)体边缘作为高耸结构的变形监测测点；多高层与高耸结构的沉降及变形，在施工完成后第一年内宜至少每 3 个月监测一次，第二年内宜至少监测 2 次~3 次，第三年以后宜每年至少监测 1 次。

6.3.5 温度传感器可布设在构件内部或表面；当日照引起的结构温差较大时，应在结构迎光面和背光面分别设置传感器。

6.3.6 舒适度控制区域是指设计文件或业主对结构局部区域有舒适度要求的区域。

6.4 桥梁钢结构监测

6.4.1 本节适用于公路、铁路、市政钢结构桥梁使用期间监测。桥梁结构形式包括梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥等。

6.4.4 对特别重要的特大桥，应建立符合自身特点的养护管理系统和健康监测系统。

6.4.5 监测的关键构件及关键部位宜包括特征位置构件、吊杆或吊索、斜拉索、主缆，反映构件受力特性的关键位置，受力复杂的局部位置：1) 梁桥墩台根部截面、主梁跨中截面应变；2) 拱桥主拱拱脚、1/4 截面、1/2 截面应变以及主梁关键截面；3) 斜拉桥主塔根部截面、主梁关键截面；4) 悬索桥主塔根部截面、主梁关键截面；5) 吊杆或吊索、斜拉索、主缆。预警值应根据使用期间结构应变变化规律与结构计算结果综合确定。

6.4.7 疲劳监测是桥梁结构监测中的重要内容。1) 疲劳测点应布置在容易发生疲劳破坏及附近部位，根据结构易损性分析结果而定，由结构分析得到的应力变化为布置疲劳监测部位的主要依据；2) 钢结构桥应变传感器应与被测结构（构件）采用焊接形式固定，尽量避免采用胶粘方式；3) 疲劳监测传感器应具有较高的疲劳寿命，主要包括振弦式应变传感器和光纤类应变传感器等，应变传感器的选型主要考虑分辨率、量测精度、动态响应、线性度、温度、稳定性、最大量程、抗电磁干扰、耐久性等要求；在均满足精度和量程的要求下，宜优先考虑长期稳定性和抗电磁干扰能力；4) 通过应变传感元件监测结构高应力区的应变时程，然后对记录的应变时程采用一定的方法（如雨流法）进行分析来评估结构的疲劳状况，实应变时程中不同应变幅应区别对待处理。

6.4.10 负反力指由于采取压重措施而产生的力。

6.4.11 桥梁结构风速仪应安装在专门支架（桁架）上，支架伸出桥体长度或高度一般不少于 3m, 支架应具有足够的刚度，并与桥体连接牢固；若没有条件满足上述规定，桥面风速仪可安装于人行道或中间分隔带，安装立柱高度大于 4m(高货车的高度)；塔顶风速仪高于塔

顶 1m,并处于避雷针的覆盖范围之内。桥梁结构湿度仪应选择布置在桥面、钢箱梁内、索塔钢锚箱内。

6.4.12 车型及分布包含车的轴数、轴距、单轴重、总重及偏载。桥面铺装完成后,可在桥面进行切槽,埋设传感器。前期应在护栏及中间分隔带预埋传感器至机柜安装位置的通信管道,方便后期传感器走线。

6.5 工业构筑物钢结构使用监测

6.5.1 工业钢结构通常指工业厂房、烟囱、贮仓、通廊、管道支架、风电塔架、锅炉钢结构支架、除尘器结构等工业构筑物中的钢结构构件,由于其特殊的使用需求与普通钢结构建筑、桥梁不同的地方在于其主要是为工业生产和设备运行使用的,很多时候设备正常使用对建筑结构的要求远远达不到建筑的安全限值,所以对工业钢结构的监测时应综合考虑。

6.5.2 结构类型“工业厂房”是指工业厂房主体结构,当需要对工业厂房内“吊车梁”进行监测时应参考“吊车梁”的监测项目要求;其他平面构筑物钢结构构件监测内容可参照通廊监测项目要求,高耸构筑物监测可参照风电塔架监测项目要求;当钢结构构件(吊车梁、风电塔架等)出现裂缝且不能立刻更换时,需要进行加固处理后继续使用的,可对裂缝的发展情况进行监测。对存在腐蚀损伤或者特殊环境下的结构构件,可进行腐蚀监测。

6.5.3 厂房内部机器设备的运转产生的振动对结构的影响较大,长期处于振动作用下的结构构件会出现变形较大、连接节点开裂、螺栓松动、共振、循环应力等。

工业厂房内部环境恶劣,高温、高湿以及空气中的 S、P 等元素会对钢结构构件产生较大的腐蚀或锈蚀,特殊环境下钢结构的腐蚀监测能够有效了解结构安全现状

6.3.4 工业建筑内部环境相比民用建筑更加恶劣,例如局部温度可能超出普通传感器的适用温度范围,所以在选用传感器以及仪器时应充分考虑布置点的最高和最低温度,且个别监测设备可能放置在离高压电较近的地方,应充分评估设备电场对设备准确性的影响;高强腐蚀空气、粉尘以及水蒸气等也是对设备以及传输设备长期使用影响较大的因素,应长期考虑,确保设备能够长期稳定的工作;

6.3.6 当需要进行结构安全性、使用性等进行评定时,应对监测数据进行分析处理,依据《工业建筑可靠性鉴定标准》等对应的现行评判标准对构件或结构进行评定。

7 监测数据分析与结构状态评估

7.1 一般规定

7.1.1 使用监测期间，宜根据桥梁重要程度、服役年限或健康状况等实际因素确定监测数据分析频次。

7.1.2 结构状态一级评估应定期开展，当监测数据触发第 7.1.3 条规定时应进行状态二级评估，对于服役中后期或处于观察期的结构，每年不宜少于一次状态二级评估。结构安全状态评估流程按图 7.1.1 进行。

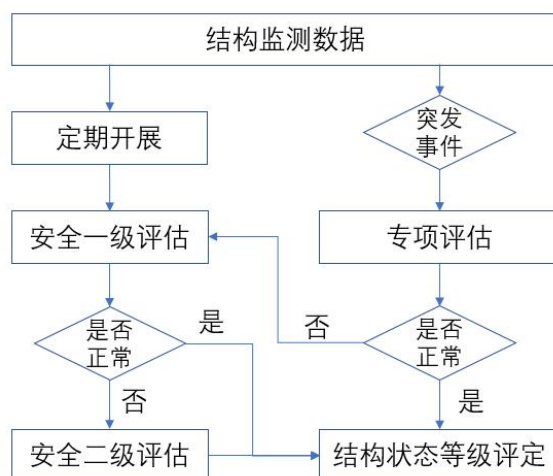


图 7.1.1 安全评估流程

7.1.3 结构整体响应异常可包括以下情况：变形大于或等于设计值；顺桥向梁端位移达到伸缩缝设计值的 80%或者梁端位移最大值达到设计值；锚碇、基础出现严重沉降或位移，达到或超出设计值；结构频率明显降低。

荷载作用超过设计值可包括以下情况：车辆荷载水平超过设计值；最高温度、最低温度、最大温差和最大温度梯度超过设计值；风荷载超过设计值；运营荷载结构校验系数大于 1。

7.1.4 特殊情况下需要的其他数据在桥梁监测实施方案中予以明确。

7.2 监测数据分析

7.2.1 监测参数准确性受测试环境、精度等多种因素的影响，其真伪需要结合理论分析与现场实际情况进行分析、修正与识别，以便为结构状态识别与反馈控制提供准确、可靠的监测数据。原始数据的处理包括但不限于缺失数据的补齐、异常数据的剔除，宜根据工程结构动力特性选取合适的滤波方法对完整的数据进行滤波降噪。

7.2.2 温度数据分析对结构标高、位移（变形）监测数据分析具有重要影响。体系温度变化对结构尤其是钢结构与缆索承重结构的几何状态、受力影响很大。对于一天来讲，可以在温

度数据分析的基础上，通过限制监测时间（如在凌晨 1 点-6 点温度稳定时段进行标高、位移（变形）测量）规避温度变化的影响，但对于一年来讲，难以做到在相同温度下进行测量，所以，需要将在非设计温度（控制标准温度）下监测到的数据换算到设计温度时的数据，以控制使用。

7.3 结构状态评估

7.3.1 本条借鉴《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》-JT/T 1037-2016 第 8.4.2 条规定。

7.3.3 结构模态参数识别可采用下列方法：

1 频域方法。可采用分量估计法、Levy 法等人工激励方法和峰值拾取法、频域分解法、增强频域分解法等随机激励法。

2 时域识别方法。可采用随机减量法、基于 ARMA 模型的时序分析法、经验模态分解法、NExT 法、随机子空间法、特征系统实现法。

3 时频域识别方法。可采用小波变换、希尔伯特-黄（HHT）等方法。

损伤识别宜由浅入深逐次进行，包括损伤判断、损伤定位、损伤定量、损伤评估。损伤判断应给出结构是否发生损伤的明确判断，并对判断的准则或阈值进行说明。损伤定位宜给出具体的结构损伤单元或构件发生的位置。损伤定量应给出发生损伤的单元或构件的损伤程度。损伤评估应对损伤后的单元或构件的性能退化做出综合评估。结构损伤识别也可采用神经网络方法、遗传算法、小波变换、希尔伯特-黄变换（HHT）、经验模态分解（EMD）、卡尔曼滤波等方法。

7.3.4 本条规定与《公路桥梁承载能力检测评定规程》-JTG TJ21-2011 中关于桥梁承载能力评定的要求是相同的，但本规范也适用于其它类型的钢结构；本条除了承载能力评定外，还包括结构安全状态评定。

7.3.6 结构状态评定，可按《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》（JT/T 1037-2016）等进行。

8 监测评估报告

8.1 一般规定

8.1.1-8.1.2 为监测评估报告应具备的基本内容，除此以外，根据报告类型的不同，宜补充相应内容，如：状态二级评估/专项评估报告中宜说明触发状态二级评估/专项评估的异常情况。

工程概况可将结构原始设计资料以附件形式附于报告中，结构历史情况包括结构曾经历的重大事故、重大灾害和大修等。

8.2 报告要求

8.2.1-8.2.5 对于由某些突发事件（如撞击、火灾等）引起的专项评估报告，如有影像记录资料，可将其以附件形式附于报告中。