GY

中华人民共和国广播电视和网络视听工程建设行业标准

GY/T5100-2026
备案号：J3450-2026

广播电视钢塔桅结构安全监测工程建设标准

Standard for steel tower and mast structures safety monitoring of engineering construction of radio and television

2026-02-09发布　　2026-03-01实施

国家广播电视总局发布

国家广播电视总局文件

广电发〔2026〕9号

国家广播电视总局关于发布《广播电视钢塔桅结构安全监测工程建设标准》一项工程建设行业标准的通知

各省、自治区、直辖市广播电视局，新疆生产建设兵团文化体育广电和旅游局，总局直属各单位，中央广播电视总台办公厅：

由国家广播电视总局规划财务司组织，中广电广播电影电视设计研究院有限公司主持制定的《广播电视钢塔桅结构安全监测工程建设标准》已经通过审查，现批准为广播电视和网络视听工程建设推荐性行业标准，予以发布，标准编号为GY/T5100-2026，自2026年3月1日起实施。

本标准内容在国家广播电视总局门户网站(www.nrta.gov.cn)公开，标准的管理、解释和发行工作由国家广播电视总局工程建设标准定额管理中心负责。

联系电话：（010）86094414

国家广播电视总局

2026年2月9日

住房城乡建设部司局函

建司局函标〔2026〕74号

住房城乡建设部标准定额司关于同意《广播电视钢塔桅结构安全监测工程建设标准》行业标准备案的函

国家广播电视总局规划财务司：

《国家广播电视总局规划财务司关于申请<广播电视钢塔桅结构安全监测工程建设标准>一项行业标准备案的函》（财资字〔2026〕48号）收悉。经研究，同意《广播电视钢塔桅结构安全监测工程建设标准》GY/T5100-2026作为“中华人民共和国工程建设行业标准”备案，备案号为J3450-2026。

住房城乡建设部标准定额司

2026年4月1日

前　言

根据国家广播电视总局2022年标准编制计划，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准的主要内容是：1 总则；2 术语和符号；3 基本规定；4 监测内容；5 监测方法；6 数据采集与分析；7 预警与评估；8 监测报告等。

经授权负责本标准具体解释的单位：国家广播电视总局工程建设标准定额管理中心。本标准在执行过程中如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄送国家广播电视总局工程建设标准定额管理中心。

地址：北京市西城区西便门外大街 2 号

邮编：100045

电话：（010）86094414

传真：（010）86094414

邮箱：bz@drft.com.cn

主编单位：中广电广播电影电视设计研究院有限公司

参编单位：西南交通大学

国家广播电视总局广播电视规划院

宁夏广播电视台

陕西广电融媒体集团（台）

江苏省广播电视局

浙江省中波发射管理中心

嘉兴市新闻传媒中心

内蒙古广播电视微波传输总站

中建三局云居科技有限公司

中广电（北京）塔桅安全科技有限公司

南京南瑞水利水电科技有限公司

国家工业建筑物质量安全检验检测中心

建研院检测中心有限公司

江苏科迪建设工程质量检测有限公司

北京塔卫智联科技有限公司

主要起草人：夏大桥　裘建东　邹东林　叶智武　谢 军　唐 坤　傅罗真　陈博洋　胡海涛

武惠宁　沈晓伟　于 坚　卢建成　李 建　孙伯明　蔡浩君　朱 正　唐广言

杨晓帆　陈子勇　张佳蕊　胡 丹　肖 辉　刘 洋　马思明　弓俊青　孔 捷

主要审查人：冯景锋　曹向东　方 欣　高志堂　马 晨　欧阳鼎立　王宝石　王 谦　王 涛
许家奇　张 帆

目　次

1　总则 1
2　术语和符号 1
2.1　术语 1
2.2　符号 1
3　基本规定 2
3.1　一般规定 2
3.2　监测要求 3
4　监测内容 4
4.1　一般规定 4
4.2　施工期间监测 4
4.3　使用期间监测 6
5 监测方法 8
5.1　一般规定 8
5.2　应变监测 8
5.3　变形监测 9
5.4　环境监测 10
5.5　振动监测 10
5.6　地震动及地震响应监测 11
5.7　风及风致响应监测 11
5.8　拉线拉力监测 12
5.9　螺栓松动监测 12
5.10　腐蚀监测 13
6　数据采集与分析 13
6.1　一般规定 13
6.2　数据采集 13
6.3　数据预处理 13
6.4　数据分析 14
7　预警与评估 14
7.1　一般规定 14
7.2　控制值 15
7.3　预警 16
7.4　评估 17

8 监测报告 18
8.1 一般规定 18
8.2 监测报告 19
附录 A 常用监测设备精度 20
附录 B 层次分析法 21
B.1 建立层次指标体系 21
B.2 监测指标标准化处理 22
B.3 监测指标的赋权 22
B.4 钢塔桅结构健康状态评分 23
本标准用词说明 24
引用标准名录 24
条文说明 25

Contents

1 General provisions 1
2 Terms and symbols 1
2.1 Terms 1
2.2 Symbols 1
3 Basic requirements 2
3.1 General requirements 2
3.2 Monitoring requirements 3
4 Monitoring items 4
4.1 General requirements 4
4.2 Construction monitoring 4
4.3 In-service monitoring 6
5 Monitoring methods 8
5.1 General requirements 8
5.2 Strain monitoring 8
5.3 Deformation monitoring 9
5.4 Environment monitoring 10
5.5 Vibration monitoring 10
5.6 Ground motion and seismic response monitoring 11
5.7 Wind and wind-induced response monitoring 11
5.8 Steel rope tension monitoring 12
5.9 Bolt loosening monitoring 12
5.10 Corrosion monitoring 13
6 Data acquisition and analysis 13
6.1 General requirements 13
6.2 Data acquisition 13
6.3 Data pre-processing 13
6.4 Data analysis 14
7 Forewarning and assessment 14
7.1 General requirements 14
7.2 Limit values 15
7.3 Forewarning 16

7.4 Assessment 17
8 Monitoring reports 18
8.1 General requirements 18
8.2 Monitoring reports 19
Appendix A Accuracy of commonly used monitoring equipment 20
Appendix B Hierarchical analysis 21
B.1 Establishing hierarchical indicator systems 21
B.2 Standardization of monitoring indicators 22
B.3 Weighting of monitoring indicators 22
B.4 Structural health assessment of steel tower masts 23
Explanation of wording in this standard 24
List of quoted standards 24
Explanation of provisions 25

1　总则

1.0.1　为规范广播电视钢塔桅结构安全监测活动，贯彻执行国家技术经济政策，做到技术先进、参数合理、数据可靠，制定本标准。

1.0.2　本标准适用于广播电视钢塔桅结构在新建、改建和扩建施工及使用期间的结构安全监测活动。

1.0.3　广播电视钢塔桅结构安全监测应符合广播电视和网络视听事业发展规划及安全播出的管理要求。

1.0.4　广播电视钢塔桅结构安全监测，除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2　术语和符号

2.1　术语

2.1.1　结构监测　structure monitoring

对广播电视钢塔桅的结构状态进行连续观察、测量、分析的活动。

2.1.2　变形监测　deformation monitoring

对广播电视钢塔桅的结构及其附属设施进行形体变化测量和分析的活动。

2.1.3　控制值　controlled value for monitoring

为满足广播电视钢塔桅结构安全及环境保护要求，控制监测对象状态变化，针对各监测项目监测数据变化量所设定的限值。

2.1.4　预警值　precaution value for monitoring

为保证广播电视钢塔桅结构及环境安全，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予以关注的预警参照值。

2.1.5　安全评估　safety assessment

通过监测数据分析广播电视钢塔桅结构当前工作状态，并与相应的临界状态进行比较分析，评价其安全状态。

2.2　符号

ε　——　修正后的应变值

ε'　——　修正前的应变值

r　——　导线电阻（Ω）

R　——　电阻应变计电阻（Ω）

RH —— 相对湿度

ICP —— 相对变形量

μ —— 近期监测数据分布均值

σ —— 近期监测数据分布标准差

H —— 基坑设计深度

f —— 构件的承载能力设计值

f_y —— 支撑、锚杆的预应力设计值

$F.S.$ —— 满量程

B_i —— 某一层指标 B 所支配的下一层指标

b_{ij} —— 甲指标对乙指标重要程度的赋值

m —— 判断矩阵的维数

CR —— 相对一致性指标

CI —— 一致性检验指标

λ_{max} —— 判断矩阵的最大特征值

RI —— 平均随机一致性指标

u —— 监测指标个数

$w_j^{(0)}$ —— 第 j 个指标权重

$w_k^{(0)}$ —— 第 k 个指标权重

x_j —— 第 j 个指标评价值

α —— 均衡系数

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 广播电视钢塔桅结构监测应分为施工期间监测与使用期间监测，当施工期间和使用期间均需要监测时，应统筹两个阶段的监测活动。

3.1.2 除设计文件要求或其他规定应进行施工期间监测的钢塔桅结构外，满足下列条件之一时，钢塔桅结构应进行施工期间结构监测：

1 安全等级为一级的；

2 施工过程中整体或局部结构受力复杂的；

3 施工方案对结构内力分布有较大影响的；

4 受邻近施工作业影响的；

5 其他需要在施工期间监测的。

3.1.3　除设计文件要求或其他规定应进行使用期间监测的钢塔桅结构外，满足下列条件之一时，钢塔桅结构应进行使用期间结构监测：

1　安全等级为一级的；

2　施工过程导致结构最终位形与设计目标位形存在差异在 30%以上的；

3　建设地点位于偏远地区、山区等较难实施日常维护的；

4　塔高 2 倍范围内有居民区的；

5　受到灾害、事故，产生明显损伤且未整改的；

6　其他需要在使用期间监测的。

3.1.4　钢塔桅结构施工期间监测与使用期间监测，应委托具备相应资质的单位进行。

3.1.5　对处于中、短波等强电磁感应环境中的钢塔桅监测传感设备及其他辅助材料，应对其所处环境进行危害性评估。

3.1.6　施工或使用期间发生过重大质量事故经检测、处理与评估后确认为安全的结构，宜对补救部位进行监测。

3.1.7　监测项目应包括应变、变形、温湿度、振动、地震动及地震响应、风及风致响应、拉线拉力和腐蚀、螺栓松动、环境，并分为静态监测与动态监测两类。

3.1.8　监测参数应选择与监测项一致或有直接函数关系的可测参数。

3.1.9　监测系统安装不应影响钢塔桅的安全性、耐久性及传输发射功能。

3.1.10　预埋在钢塔桅结构内部的埋入式传感器设计使用寿命不宜低于20年；附着安装在钢塔桅结构上的非埋入式传感器设计使用寿命不宜低于5年，且易于更换。

3.1.11　监测系统软件应有异常状况预警功能，且具有监测数据分析，结构状态评估等功能。

3.1.12　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。

3.1.13　监测系统的网络安全防护，可按照《广播电视网络安全等级保护定级指南》GY/T337进行系统等保定级、备案。

3.2　监测要求

3.2.1　监测点布设应符合下列规定：

1　能反映监测对象的实际状态及变化趋势，宜布置在监测参数值的最大位置；

2　监测点的位置、数量应根据钢塔桅结构类型、设计要求、施工过程、监测项目及结构分析结果确定；

3　监测点的数量和布置范围应有冗余量，重要部位应增加监测点；

4　便于监测设备的安装、测读、维护和替代；

5　不应妨碍监测对象的施工和正常使用；

6　应缩短信号的传输距离；

7　监测点应标识清晰，并采取有效的保护措施。

3.2.2　监测设备作业环境应符合下列基本规定：

1　信号电缆、监测设备与大功率无线电发射源、高压输电线和微波无线电信号传输通道的距离应符合《综合布线系统工程设计规范》GB50311 的相关要求；

2　采用卫星定位系统测量时，视场内障碍物高度角不应超过 15°。

3.2.3　数据采集方式应能保证监测数据的衔接连续性，并应符合以下原则：

1　施工期间监测数据采集方式宜根据工程需要确定；

2　使用期间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。

3.2.4　振动监测前，宜进行结构动力特性测试或结构动力特性计算分析。

3.2.5　监测数据应建立原始记录档案或数据库，并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永久存储；

2　动态监测原始数据保存时间大于验收时间 1 年以上，分析数据宜永久存储；施工期间监测分析数据每 3 个月备份一次，使用期间监测分析数据每 6 个月备份一次；

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。

3.2.6　监测数据出现异常时，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预警值时，应提高采样频次持续监测，并加强现场巡视检查；

2　当数据异常原因暂时无法确定且数据极值和变化未超预警值时，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预警值时，应报警并启动应急预案。

3.2.7　监测系统使用期间宜每 6 个月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。

4　监测内容

4.1　一般规定

4.1.1　钢塔桅结构监测对象应包括钢塔桅整体、构件和节点、荷载作用与环境。

4.1.2　使用期间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。

4.1.3　使用期间监测系统应能自动监测且不间断工作，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，遭遇极端天气或自然灾害后，应及时出具监测结果。

4.1.4　使用期间监测宜与广播电视安保监控共用，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。

4.2　施工期间监测

4.2.1　施工期间监测项目应结合钢塔桅结构体系、工程特点和施工工艺，按表 4.2.1 确定。

表 4.2.1　施工期间监测项目

结构体系	结构整体		构件和节点		荷载作用与环境		基坑支护监测
	变形	振动	应变	拉线拉力	温度	风荷载	
自立式	★	○	★	—	▲	★	▲
拉线式	★	○	★	★	▲	★	▲

注：★应监测，▲宜监测，○可监测。

4.2.2　除重要的受力节间外，可按一定的高度间隔取相应的结构节间进行监测，在重量达到总重的50%、75%和 100%时应至少各监测一次。

4.2.3　当采用整体提升、局部顶升等特种施工工艺时，应力和位移监测频率不宜低于每秒一次。

4.2.4　施工期间应变监测点布置应符合下列规定：

1　受力较大和传力路径复杂的构件和节点；

2　特征位置构件，包括转换塔段、伸臂桁架及其相邻塔段、拉线塔拉线、拉耳以及拉线节点上下塔段、拉线塔地锚拉杆；

3　施工期间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。

4.2.5　施工期间结构变形监测点布置应符合下列规定：

1　在转换塔段、伸臂桁架及其相邻塔段布置层间位移监测点；

2　在结构顶部、局部平面发生较大变化高度处布置水平位移监测点；

3　跨度或悬挑长度超过 20m 的局部结构应布置挠度监测点；

4　应在结构变形较大或变形反应敏感的区域布置监测点。

4.2.6　变形监测的频次宜符合下列规定：

1　局部相对变形与整体变形监测频次一致；

2　结构监测可从基础垫层或基础底板完成后开始；

3　首次监测宜连续进行两次独立量测，并取其中数作为变形量测的初始值；

4　当施工期间遇暂时停工，停工时及复工时各量测一次，停工阶段可根据具体情况进行监测；

5　监测过程中，监测数据达到预警值或发生异常变形时宜增加监测次数。

4.2.7　环境及构件温度监测应符合下列规定：

1　温度监测点应布置在温度特征代表点和温度梯度变化较大位置，宜对称、均匀；

2　相对独立空间应设 1～3 个点，当面积或跨度较大时，且结构构件应力及变形受环境温度影响大的区域，应增加监测点；

3　监测整个结构的温度场分布和不同部位结构温度与环境温度对应关系时，监测点宜覆盖整个结构区域；

4　监测频次应与结构应力监测和变形监测保持一致。

4.2.8　施工期间振动监测点，应根据结构施工全过程动力特性分析结果，布置在整体或部分结构振动敏感部位。

4.2.9　钢塔桅结构的沉降及变形监测，施工完成后第一年内每 3 个月宜不少于 1 次，第 2 年内宜不少于 2～3 次，第 3 年及以后宜每年不少于 1 次，并应满足《建筑变形测量规范》JGJ8 的要求。

4.2.10　对于环境监测数据和应力应变等关键数据，施工期间每 24 小时采集次数不应少于 3 次，使用期间每 24 小时不应少于 2 次；对于内力变化较大的重要施工期间（吊装、卸载等阶段）应适当增加采集次数，必要时应制定针对性监测方案。

4.3　使用期间监测

4.3.1　使用期间监测项目应按表4.3.1确定，有特殊要求的，可增加监测项目。

表 4.3.1　使用期间监测项目

结构体系	结构整体		构件和节点			荷载作用与环境					
	变形	振动	应变	拉线拉力	螺栓	温度	风荷载	地震动	湿度	腐蚀	地阻
自立式	★	▲	★	—	○	▲	★	○	○	▲	▲
拉线式	★	▲	★	★	○	▲	★	○	○	▲	▲

注：★应监测，▲宜监测，○可监测。

4.3.2　使用期间应变监测点布置应符合下列规定：

1　受力较大构件和节点；

2　特征位置构件，包括柱脚；塔体截面突变处的塔段；内外筒连接的部位；钢结构塔段与混凝土段连接的部位；伸臂桁架及其相邻塔段；拉线塔拉线、拉耳以及拉线节点上下塔段、拉线塔地锚拉杆；

3　其他重要部位和构件。

4.3.3　使用期间结构变形监测点布置应符合下列规定：

1　影响结构安全性的特征构件、变形较显著的关键点、结构突变处、主要构件斜率变化较大处；

2　结构体型之间的联系构件及不同结构分界处的两侧；

3　塔架基础部位不均匀沉降监测点；

4　结构顶部、塔楼边缘，拉线塔拉线节点处。

4.3.4　使用期间温湿度监测点布置应符合下列规定：

1　宜在结构的受阳光直射面、相对的结构背面、结构内部沿结构高度布置监测点，结构同一水平面上监测点不应少于 3 个；

2　温度监测点可单独布置于指定的结构内部或结合应变监测点布置；

3　结构内温度监测点可布置在结构内壁便于维修维护的部位，宜按对角线或梅花式均匀布点，并应避开洞口；

4　环境温湿度监测，宜将温度或湿度传感器布置在离地面或结构面 1.5m 高度空气流通的百叶箱内。

4.3.5　满足下列条件之一时，钢塔桅结构应进行地震动监测：

1　设防烈度为 7 度、8 度、9 度时，高度分别超过 350m、300m、250m 的；

2　抗震重点设防类的；

3　设计文件要求或其他有特殊要求的。

4.3.6　使用期间地震动及地震响应监测点布置应符合下列规定：

1　应布置在结构的基础部位、结构顶面及不少于 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；

2　根据设防烈度、抗震设防类别和结构重要性、结构类型和地形地质条件进行布置；

3　平移振动监测点宜布置在结构的刚度中心，扭转振动监测点宜布置在结构的四周边缘转动最大的点；

4　已进行振动台模型试验的钢塔桅结构，可根据振动台模型试验结果布置监测点。

4.3.7　接地电阻监测宜符合下列规定：

1　监测布点不少于 3 个；

2　监测周期应根据实际情况进行确定，宜每月监测一次，雷雨季节前后及雷击后应加测。

4.3.8　使用期间螺栓松动监测点布置应符合下列规定：

1　选择对结构稳定性影响较大的关键部位或对于易受到振动、冲击等外部因素影响的螺栓连接部位；

2　地脚螺栓松动监测，按照钢塔桅建设年份、设防烈度，确定每个塔脚监测布点数量，见表 4.3.8-1 地脚螺栓松动监测布点数量表；

表 4.3.8-1　地脚螺栓松动监测布点数量表

建设时长（年） 设防烈度（级）	＜5	5～10	10～20	20～设计年限	＞设计年限
＜5	1	1	1	2	2
5～7	1	1	2	2	3
＞7	1	2	2	3	4

3　重要连接处螺栓及变坡处螺栓松动监测，应评估螺栓对结构影响度，结合结构确定传感器布设数量。螺栓对结构安全性影响度评定和监测布点方案见表 4.3.8-2；

表 4.3.8-2　螺栓影响度评定和监测布点方案表

级别	评定标准	监测布点方案
一级	螺栓松动或拆卸后，严重影响钢塔桅整体稳定性	不少于总点位的 1/20，且应优先采用对称布点方案
二级	螺栓松动或拆卸后，影响塔段或局部稳定性	不少于总点位的 1/100
三级	螺栓松动或拆卸后，不影响或轻微影响局部稳定性	不监测

4　桅杆段底部螺栓松动监测，宜采用对称布点监测方法，且不少于 4 个监测点。

4.3.9　在受腐蚀影响较大的区域或有设计要求时，应进行腐蚀监测。

4.3.10　腐蚀监测应符合下列规定：

1　腐蚀监测点应根据监测目的，结合工程结构特点、特殊部位、结构连接位置、不同位置的腐蚀速率等因素确定；

2　监测点宜选择在力与侵蚀环境荷载分别作用的典型区域及侵蚀环境荷载作用下的典型节点；

3　当监测点的腐蚀有加剧趋势时，应提高腐蚀监测的频率；

4　监测腐蚀损伤构件厚度时，严重腐蚀部位的截面监测点数应选取 8～10 个。构件全面均匀腐蚀情况下，应沿其长度方向至少选取 3 个腐蚀较严重的区段。

4.3.11　振动监测点应选在钢塔桅结构振动敏感处；进行动力特性分析时，振动监测点应布置在需识别的振型关键点上，且宜覆盖钢塔桅结构整体。

4.3.12　监测靶标布设宜符合下列规定：

1　监测靶标宜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　每一扫描站的监测靶标个数不可少于 4 个，相邻两扫描站的公共靶标个数不可少于 3 个；

3　同一扫描站监测靶标之间的距离宜至少有一个不小于扫描目标到扫描站的距离；

4　监测靶标不易设置区域，宜选择在点云中有明显特征的点、线等来代替靶标。

5 监测方法

5.1　一般规定

5.1.1　监测方法应符合监测对象的监控需求和现场条件，合理易行。

5.1.2　监测传感器选型应符合下列规定：

1　传感器应根据监测对象、监测项目和监测方法的要求选型；

2　采用具有抗干扰功能的传感器；

3　传感器应符合监测系统对灵敏度、通频带、动态范围、量程、线性度、稳定性、供电方式及寿命等要求；

4　传感器工作温度范围应满足-40℃～80℃；

5　系统使用的传感设备和辅助材料应不影响结构安全性、耐久性、对电磁感应强的钢塔桅部位应考虑电磁屏蔽措施。

5.1.3　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；

2　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；

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

4　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。

5.2　应变监测

5.2.1　应变监测可选用电阻应变计、振弦式应变计、光纤类应变计等应变监测元件进行监测。

5.2.2　应变计应符合下列规定：

1　电阻应变计主要技术指标应符合《金属粘贴式电阻应变计》GB/T13992 规定，电阻应变计的测量片和补偿片应选用同一规格产品；振弦式应变计主要技术指标应符合《大坝监测仪器 应变计 第2 部分：振弦式应变计》GB/T3408.2 规定；光纤类应变计主要技术指标应符合《土木工程用光纤光栅应变传感器》JG/T422 规定；

2　应变计量程应与量测范围相适应，监测值控制为满量程的 30%～80%；

3　混凝土构件应选择大标距的应变计；应变梯度较大的应力集中区域，应选用标距较小的应变计；

4　应变计应具备温度补偿功能，或采取有效措施消除温差引起的热输出。

5.2.3　选用不同类型的应变传感器应符合下列规定：

1　电阻应变计的测量片和补偿片应选用同一规格产品，并进行屏蔽绝缘保护；

2　振弦式应变计应与匹配的频率仪配套校准，频率仪的分辨率不应大于 0.5Hz；

3　光纤解调系统各项指标应符合被监测对象对待测参数的规定。

5.2.4　应变监测数据处理应符合下列规定：

1　采用电阻应变计量测时，按下列公式对实测应变值进行导线电阻修正：

当采用半桥量测时：

$$\varepsilon = \varepsilon'(1 + \frac{r}{R}) \qquad (5.2.4\text{-}1)$$

当采用全桥量测时：

$$\varepsilon = \varepsilon'(1 + \frac{2r}{R}) \qquad (5.2.4\text{-}2)$$

式中：ε——修正后的应变值；

ε'——修正前的应变值；

r——导线电阻（Ω）；

R——电阻应变计电阻（Ω）。

2　采用光纤类应变计及振弦式应变计量测时，应按校准系数进行换算。

5.3　变形监测

5.3.1　变形监测分为水平位移监测、垂直位移监测、三维位移监测、角位移和其他位移监测。

5.3.2　根据监测仪器的种类，监测可分为机械式测试仪器法、电测仪器法、光学仪器法及卫星定位系统法，精度等级参照《建筑变形测量规范》JGJ8 的要求。

5.3.3　变形监测应建立基准网，采用的平面坐标系统和高程系统可与施工采用的系统一致。局部相对变形测量可不建立基准网，但应考虑结构整体变形对监测结果的影响。

5.3.4　变形监测的结果应结合环境及效应监测的结果进行修正。

5.3.5　当监测参数包括水平位移与垂直位移时，两者监测频次宜一致。

5.3.6　变形监测仪器量程应介于监测点位移预估值或允许值的 2～3 倍；采用机械式测试仪器时，精度应不低于监测点位移预估值的 1/10。

5.3.7　变形监测标志应根据钢塔桅结构的不同特点进行设计，变形监测标志点应牢固、适用和便于保护。

5.3.8　基坑监测应按《建筑基坑工程监测技术标准》GB50497 的规定执行；当采用光学仪器法、卫星定位系统法进行变形监测时，应按《工程测量标准》GB50026 的规定执行。

5.3.9　根据现场条件和精度要求，三维位移可选择光学仪器法、卫星定位系统法进行监测。

5.3.10　倾斜及挠度监测应符合下列规定：

1　倾斜监测方法的选择及相关技术要求按《工程测量标准》GB50026 的规定执行；

2　重要构件的倾斜监测宜采用倾斜传感器，倾斜传感器可根据监测要求选用固定式或便携式；

3　倾斜和挠度监测频次应根据倾斜或挠度变化速度确定，与水平位移监测及垂直位移监测频次相协调，当发现倾斜和挠度增大时，应及时增加监测频次或进行持续监测。

5.4　环境监测

5.4.1　环境监测内容包括工况温度、湿度、接地电阻等。

5.4.2　温度监测可选用热电阻、热电偶等监测元件进行监测，精度宜不低于±0.5℃；湿度监测可选用湿敏电阻、湿敏电容等监测元件进行监测，精度宜不低于±2%RH，接地电阻监测可选用摇表式、钳口式接地电阻检测仪进行监测，精度宜不低于±0.1Ω。

5.4.3　环境温度监测应符合下列规定：

1　温度传感器宜选用监测范围大、精度高、线性化及稳定性好的传感器；

2　长期温度监测时，监测结果应包括日平均温度、日最高温度和日最低温度；结构温度分布监测时，宜绘制结构温度分布等温线图。

5.4.4　环境湿度监测应符合下列规定：

1　湿度宜采用相对湿度表示，湿度计监测范围为 12%RH～99%RH；

2　湿度传感器要求响应时间短、温度系数小，稳定性好以及湿滞后作用低；

3　大气湿度仪宜与温度仪、风速仪一并安装；且布置在结构内湿度变化大，对结构耐久性影响大的部位；

4　长期湿度监测时，监测结果应包括日平均湿度、日最高湿度和日最低湿度。

5.4.5　接地电阻监测应在无雨、无露、土壤干燥的条件下进行。

5.5　振动监测

5.5.1　振动监测应包括振动响应监测和振动激励监测，监测参数可为加速度、速度、位移及动应变。

5.5.2　加速度传感器应符合以下规定：

1　横向灵敏度比：最大横向灵敏度误差比不大于 5%；

2　稳定性：一年内参考灵敏度幅值的变化不超过±2%，并应符合传感器性能参数的规定；

3　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；

4　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%。

5.5.3　振动监测的方法可分为相对测量法和绝对测量法，传感器工作频率上限应不低于被测钢塔桅特征频率的 2 倍，谐振频率应不低于被测钢塔桅特征频率的 5 倍。

5.5.4　相对测量法监测结构振动位移应符合下列规定：

1　监测中应设置有一个相对于被测工程结构的固定参考点；

2　被监测对象上应牢固设置靶、反光镜等监测点标志；

3　测量仪器应选择自动跟踪的全站仪、激光测振仪、图像识别仪等。

5.5.5　绝对测量法宜采用惯性式传感器，以空间不动点为参考坐标，可测量工程结构的绝对振动位移、速度和加速度，并符合下列规定：

1　加速度量测可选用力平衡加速度传感器、电动速度摆加速度传感器、ICP 型压电加速度传感器、压阻加速度传感器；

2　速度量测可选用电动位移摆速度传感器，也可通过加速度传感器输出于信号放大器中进行积分获得速度值；

3　位移测量可选用电动位移摆速度传感器输出于信号进行积分获得位移值；

4　结构在振动荷载作用下产生的振动位移、速度和加速度，需量测一定时间段内的测量历程。

5.5.6　振动监测数据采集与处理应符合下列规定：

1　应根据不同结构形式及监测目的选择相应采样频率；

2　应根据监测参数选择滤波器；

3　应选择合适的窗函数对数据进行处理。

5.5.7　动应变监测宜符合下列规定：

1　动应变监测可选用电阻应变计或光纤类应变计；

2　监测设备量程应不小于量测估计值的 2～3 倍，分辨率应满足最小应变值的量测要求，确保较高的信噪比；

3　动态监测设备使用前应进行静态校准。监测较高频率的动态应变时，宜增加动态校准。

5.6　地震动及地震响应监测

5.6.1　监测参数主要为地震动及地震响应加速度，也可按工程要求监测力、位移、应变等其他参数。

5.6.2　结构地震动及地震响应监测应符合下列规定：

1　监测方案应包括监测系统类型、监测点布置、仪器的技术指标、监测设备安装和管理维护的要求；

2　监测点应根据设防烈度、抗震设防类别和结构重要性、结构类型和地形地质条件进行布置；

3　结合风、撞击、交通等振动响应统筹布置监测系统，并应与震害检查设施结合；

4　监测点布置应能反映地震动及上部结构地震响应；

5　监测设备主要技术指标应按《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982 执行。

5.7　风及风致响应监测

5.7.1　风及风致响应监测参数应包括风压、风速、风向及风致振动响应。

5.7.2　风压监测应符合下列规定：

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，也可选用专用的风压计，监测参数为空气压力；

2　风压传感器的安装应避免对结构外立面的影响，并采取有效保护措施，相应的数据采集设备具备时间补偿功能；

3　风压监测点宜根据风洞试验的数据和结构分析结果确定；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监测点；

4　进行表面风压监测的项目，宜绘制监测表面的风压分布图。

5.7.3　风压风速仪监测设备量程应满足结构设计风场的要求，主要技术要求参照《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982 执行。

5.7.4　风速及风向监测结果应包括脉动风速、平均风速和风向。

5.7.5　风致响应监测应符合下列规定：

1　应对不同方向的风致响应进行量测；

2　风致响应监测点应布置量测不同物理量的多种传感器；

3　应变传感器应根据分析结果，布置在应力应变较大或刚度突变能反映结构风致响应特征的位置；

4　结构顶部宜布置位移传感器，位移传感器记录结果应与位移限值进行对比。

5.8　拉线拉力监测

5.8.1　拉线拉力监测的监测点应具有代表性，且均匀分布。

5.8.2　拉线拉力监测应符合下列规定：

1　监测方法可包括压力传感器测定法、振动频率法、应变法；

2　振动频率法监测拉线拉力的加速度传感器频响范围应覆盖拉线振动基频，采用实测频率推算拉线拉力时，应将拉线及拉线两端弹性支承结构整体建模共同分析；

3　拉线拉力监测系统在设计时，宜与结构内部管线、通信设备综合协调；

4　应确保拉力计的安装呈同心状态；

5　采用振动频率法监测时，传感器安装位置应远离拉线下锚点而接近拉线中点，量测拉线拉力的加速度传感器布设位置距拉线端距离应大于 0.17 倍拉线长；

6　日常监测时应避开不良天气影响，且在一天中日照温差最小时刻进行量测，并记录当时的温度与风速。

5.9　螺栓松动监测

5.9.1　螺栓松动监测宜采用扭矩检测法、振动监测法、螺母旋转监测法。

5.9.2　螺栓松动监测应符合下列规定：

1　根据螺栓部位采用适宜的监测方法，地脚螺栓宜采用螺母旋转监测法，塔上螺栓宜采用扭矩检测法或振动监测法；

2　采用螺母旋转监测时，螺母需提前预紧达到工程要求，螺杆丝扣露出至少 2 扣，根据螺栓规格选用匹配的传感器进行安装，安装后调准传感器零点；

3　螺栓松动监测的频率宜根据螺栓部位重要性来确定；

4　采用扭矩检测法检查时，检查频率应不低于每年两次；当钢塔桅遭受其设计风压或地震烈度的 80%工况后，也应进行一次检查；

5　采用振动监测法或螺母旋转监测法时，数据采集频率应不低于每小时一次。

5.10　腐蚀监测

5.10.1　腐蚀监测应符合下列规定：

1　腐蚀监测方案中应包括腐蚀监测方法、监测参数、监测位置和监测频次；

2　腐蚀监测宜选用电化学方法，电化学监测方法可选用电流监测、电位监测，也可同时采用电流和电位监测；

3　腐蚀监测参数可包括结构腐蚀电位、腐蚀电流；

4　腐蚀传感器宜能分辨腐蚀类型、测定腐蚀速率。

6　数据采集与分析

6.1　一般规定

6.1.1　数据采集与传输的软硬件及系统，应满足传感器监测要求，监测数据安全可靠，高效传输。

6.1.2　数据预处理应能纠正或剔除异常数据，处理后的数据应能反映结构的作用和效应状态变化和时空演化规律。

6.1.3　数据管理应具有标准化读写接口，应考虑数据的结构化、安全性、共享性以及使用便捷性。

6.2　数据采集

6.2.1　监测点及监测设备较多、监测部位距离较远或相对分散的结构，宜采用分布式或总体分布式与局部集中式的混合方式进行数据采集；监测点及监测设备较少且监测部位集中的结构，宜采用集中式进行数据采集。

6.2.2　数据采集可采用定时采集模式、触发采集模式或两者混合的采集模式，并应符合下列规定：

1　位移、内力、振动以及温度采用定时采集模式，采集时间根据施工情况和使用情况确定；

2　地震动及地震响应宜采用触发采集模式；

3　风及风致响应宜采用定时采集结合触发采集的混合采集模式。

6.3　数据预处理

6.3.1　监测数据应进行偶然误差与系统误差处理。

6.3.2　采集到的异常数据点，可通过拉依达准则（3σ准则）判定，当某个数据x_b符合下述条件时则认为该数据为异常数据，应及时进行复核并分析原因：

$$|x_b-\mu|>3\sigma \tag{6.3.2}$$

式中：μ——近期监测数据分布均值；

σ——近期监测数据分布标准差。

6.3.3　当温度造成的位移、内力变化较明显时，应对温度造成的趋势项进行分离，并采用去除趋势项后的监测数据进行异常数据的判定。

6.3.4　数据缺失的处理宜根据数据类型而定，并应符合下列规定：

1　对于湿度等无需连续采集的数据，可忽略缺失值；

2　对于应力应变、温度等连续采集的数据，当数据缺失期间荷载变化较小时，可采用平均值或线性插值方法进行修复；当数据缺失期间结构荷载变化较多，且后期评估对修复数据精度要求较高时，可基于不同数据之间的相关性，采用多元线性回归、K 最近邻法、神经网络、概率主成分分析等方法进行数据修复；

3　对于地震及风等具有稀疏特性的动态监测数据，可采用压缩传感方法进行缺失数据修复。

6.3.5　对于加速度等动态含噪信号，应进行滤波降噪、去直流、去趋势项、截取等处理。

6.4　数据分析

6.4.1　数据分析宜包括统计分析、对比分析和其他特殊分析，并符合下列规定：

1　统计分析包括最大值、最小值、平均值、均方根值、累计值、发展趋势等统计值情况；

2　对比分析包括自身变化对比与相关参数对比；

3　特殊分析包括风参数分析、模态分析等。

6.4.2　当采用多监测点同步监测应力应变时，可利用主成分分析获取应力随外荷载的变化模式，进行环境作用分离、缺失数据插补、异常数据识别等分析。

6.4.3　对于拉线拉力数据分析，应对监测拉线拉力与张拉成形拉线拉力、设计容许拉线拉力进行对比分析。

6.4.4　对基于加速度数据的模态分析，应包括结构的自振频率、振型、阻尼比等参数。

6.4.5　对于施工期间的监测数据分析，应结合施工方案及结构受力状态变化，对比分析监测数据结果与结构计算分析结果。

7　预警与评估

7.1　一般规定

7.1.1　钢塔桅结构监测应根据监测参数监测值与控制值对比制定监测预警等级。

7.1.2　钢塔桅结构安全状态宜设为绿色，预警设黄色和红色两级，并能通过电子邮件、短信、电话或 APP 推送等形式，将预警信息通知相关人员，预警信息包括监测项、监测点位置、预警等级、时间、当前监测数值、预警值等。

7.1.3　施工期间应结合设计要求、施工过程等进行阶段性评估，并根据评估结果给出结构评估等级和应急响应。

7.1.4　使用期间应定期将监测数据与控制值进行对比，进行结构安全常规评估，并根据监测要求给出结构评估等级和应急响应；当遭受台风、地震、雪灾、洪水等突发事件，应进行结构安全专项评估。

7.2　控制值

7.2.1　监测参数控制值的设置可根据设计值、规范限定值、专家经验等确定，定期对其进行检验、补充、修正和优化，并符合下列规定：

1　当监测数据为绝对值时，可设定监测项目控制值为设计值或规范限定值乘以折减系数，折减系数可根据监测点所在构件重要性、结构所处阶段以及预警等级进行设定；

2　当监测数据为相对值时，可设定监测项目控制值为$\mu \pm \beta\sigma$，其中，μ为近期监测数据的分布均值，σ为结构近期监测数据的分布标准差，指标β可根据监测点所在构件重要性、结构所处阶段以及预警等级进行设定。

7.2.2　风荷载作用下，水平变形控制为实时风速下监测点的水平位移计算值。

7.2.3　拉力、反（应）力参数控制值为材料强度设计值。

7.2.4　拉线拉力监测控制值应结合工程设计的上、下限值及监测对象的控制要求综合确定。

7.2.5　整体振动周期，控制值为结构第一振型周期。

7.2.6　基础沉降控制值应符合下列规定：

1　塔高≤200m，基础沉降控制值为 300mm；

2　200m＜塔高≤300m，基础沉降控制值为 200mm；

3　塔高＞300m，基础沉降控制值为 150mm。

7.2.7　相邻基础间的沉降差控制值为 0.003 倍的相邻基础间的距离。

7.2.8　地震动峰值加速度控制值按《中国地震动参数区划图》GB18306 取值。

7.2.9　腐蚀中的漆膜下锈蚀点（斑）数量及基体腐蚀速率等控制值宜按《广播电视钢塔桅防腐蚀保护涂装》GY/T64 取值，锈蚀点（斑）数量为每平方米 20 个，基体腐蚀速率为 200μm/y。

7.2.10　螺栓松动监测控制值应符合下列规定：

1　地脚螺栓、塔身重要部位螺栓松动或拆卸后，严重影响塔体整体稳定性的，螺栓松动控制值为 90°（累计旋转角）；

2　塔身一般部位螺栓松动或拆卸后，影响塔段或局部稳定性的，螺栓松动控制值为 180°（累计旋转角）。

7.2.11　接地电阻控制值为设计值，当塔体接地与机房接地连接时，应取两者中的较小值作为控制值。

7.2.12　施工期间监测中基坑支护监测项目控制值应根据工程地质条件、设计参数、工程监测等级及当地工程经验等确定，当无地方经验时，可按表 7.2.12 确定。

表 7.2.12　施工期间监测中基坑支护监测项目控制值

监测项目	支护结构类型	累计值		变化速率
		绝对值（mm）	相对基坑深度（H）	(mm/d)
支护桩（墙）顶竖向位移	土钉墙、型钢水泥土墙	50	0.5%	4～5
	钻孔灌注桩	20～30	0.15%～0.3%	3～4
支护桩（墙）顶水平位移	土钉墙、型钢水泥土墙	40～60	0.6%～0.8%	5～6
	钻孔灌注桩	40	0.6%	4
支护桩（墙）体水平位移	型钢水泥土墙	60	0.6%	6
	钻孔灌注桩	30～60	0.6%～0.8%	5
支撑轴力		最大值：（70%～80%）f 最小值：（80%～100%）fy		
锚杆拉力				
地表沉降		40～50	—	4～6
地表隆起		10	—	3

注：1　H—基坑设计深度，f—构件的承载能力设计值，fy—支撑、锚杆的预应力设计值；

2　累计值宜按表中绝对值和相对基坑深度（H）值两者中的较小值取用；

3　支护桩（墙）顶隆起控制值为20mm。

7.3　预警

7.3.1　施工期间结构监测预警值应符合下列规定：

1　当位移或变形大于 0.7 倍控制值时，应进行黄色预警；当位移或变形大于 0.9 倍控制值时，应进行红色预警；

2　当应力监测值超过 1.3 倍计算值且大于 0.7 倍控制值时，应进行黄色预警；当应力监测值大于 0.9 倍控制值时，应进行红色预警；

3　当监测对象振动周期与设计计算时结构第一振型周期正负偏差大于 10%时，宜进行黄色预警；当监测对象振动周期与设计计算时结构第一振型周期正负偏差大于 20%时，宜进行红色预警。

7.3.2　使用期间结构监测预警值应符合下列规定：

1　当位移或变形大于 0.7 倍控制值时，应进行黄色预警；当位移或变形大于 0.9 倍控制值时，应进行红色预警；

2　当拉力、反（应）力监测值大于 0.7 倍控制值时，应进行黄色预警；当拉力、反（应）力监测值大于 0.9 倍控制值时，应进行红色预警；

3　当钢塔桅整体振动周期与设计计算时结构第一振型周期正负偏差大于 10%时，宜进行黄色预警；当钢塔桅整体振动周期与设计计算时结构第一振型周期正负偏差大于 20%时，宜进行红色预警；

4　当钢塔桅腐蚀中的漆膜下锈蚀点（斑）数量监测值或基体腐蚀速率大于 0.5 倍控制值时，宜进行黄色预警；当钢塔桅腐蚀中的漆膜下锈蚀点（斑）数量监测值或基体腐蚀速率大于 0.8 倍控制值时，应进行红色预警；

5　当螺栓松动超过 0.5 倍控制值时，宜进行黄色预警；当螺栓松动超过 0.8 倍控制值时，应进行红色预警；

6　雨季接地电阻超过 0.8 倍控制值时，宜进行黄色预警，超过 0.9 倍控制值时，应进行红色预警；旱季接地电阻超过 0.9 倍控制值时，宜进行黄色预警，超过 1 倍控制值时，应进行红色预警。

7.3.3　环境及其他监测参数预警值设定应符合下列规定：

1　当最高温度、最低温度、最大温差超过设计值时（设计有要求时），宜进行黄色预警；当最高温度、最低温度、最大温差超过 1.2 倍设计值时（设计有要求时），应进行红色预警；

2　当 10 分钟平均最大风速大于 0.8 倍设计基本风速时，宜进行黄色预警；当 10 分钟平均最大风速大于设计基本风速时，应进行红色预警；

3　当地震动峰值加速度大于基本地震动峰值加速度时，宜进行黄色预警；当地震动峰值加速度大于罕遇地震动峰值加速度时，应进行红色预警；

4　当构件内、外最大湿度值超过设计值时，宜进行黄色预警。

7.4　评估

7.4.1　除实时预警外，监测过程中应对钢塔桅结构进行施工期间评估和使用期间评估，根据评估结果做好应急响应。

7.4.2　钢塔桅结构施工期间评估等级、监测参数状态和响应可按表 7.4.2 确定。

表 7.4.2　钢塔桅结构施工期间评估等级、监测参数状态和响应

结构评估等级	监测参数状态									
	监测参数未预警	环境监测参数温度为黄色	塔桅结构封闭空间内相对湿度为黄色	环境监测参数风速参数达到 8m/s	基础沉降或变形监测参数出现黄色	塔段垂直度监测参数出现黄色	部分主要构件反（应）力监测值监测参数出现黄色	整体振动周期任一监测参数出现黄色	环境监测参数风速大于 20m/s	任意监测参数出现红色
一级	●	●	●	—	—	—	—	—	—	—
二级	—	—	—	●	●	●	●	●	—	—
三级	—	—	—	—	—	—	—	—	●	●

注：1　各等级判断，监测状态出现涵盖≥1 条即可判定；

2　结构评估等级一级：继续施工；

3　结构评估等级二级：谨慎施工，宜进行当前阶段结构性态评估，通知潜在危险性，检查临时加固措施的完整性；

4　结构评估等级三级：通知作业人员撤离，立即停止施工，立即采取临时加固措施；

5　●代表结构评估等级需满足的监测参数状态。

7.4.3　钢塔桅结构使用期间评估等级、监测参数状态和响应可按表 7.4.3 确定。

表 7.4.3　钢塔桅结构使用期间评估等级、监测参数状态和响应

结构评估等级	监测参数状态				
	监测参数未预警	环境监测参数温度为黄色	塔桅结构封闭空间内相对湿度为黄色	任意监测参数出现黄色	任意监测参数出现红色
一级	●	●	●	—	—
二级	—	—	—	●	—
三级	—	—	—	—	●

注：1　各等级判断，监测状态出现涵盖≥1 条即可判定；

2　结构评估等级一级：正常使用；

3　结构评估等级二级：可正常使用，宜重点关注参数异常的区域，咨询结构工程师的使用意见；

4　结构评估等级三级：通知使用人员撤离，立即采取临时加固措施；

5　监测参数包括：环境监测参数风速、地震水平加速度、基础沉降或变形、垂直度、部分主要构件反（应）力、水平变形、反（应）力监测值、整体振动周期等；

6　●代表结构评估等级需满足的监测参数状态。

7.4.4　当钢塔桅结构遭受台风、地震、雪灾、洪水等突发事件后，应对监测结构状态及监测数据进行及时检查，并检查下列内容：

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、频谱和最终值。

7.4.5　当钢塔桅结构遭受台风、地震、雪灾、洪水等突发事件后，应对钢塔桅结构的安全性和适用性等进行专项评估，并按下列要求进行：

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，应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。

7.4.6　钢塔桅结构使用过程评估也可通过结合监测的各项指标，采用层次分析法对结构整体进行综合评估。

8　监测报告

8.1　一般规定

8.1.1　监测成果应包括工程概况、监测方案、现场监测资料、计算分析资料、监测值或监测变化量历史曲线、图表、各种影像资料、监测报告等。

8.1.2　现场监测资料应包括监测原始数据、现场巡查记录等。

8.1.3　取得现场监测资料后，应及时对监测资料进行整理、校对和分析，形成成果文件提交至相关单位。监测数据出现异常时，应及时分析原因，必要时进行现场核对。

8.1.4　监测方案、监测报告、原始记录应进行归档，原始记录中应包括结构分析的计算、结构变形及应变监测的监测记录和对比分析结果，对异常情况的处理记录，预警报告及处理结果等。

8.2　监测报告

8.2.1　监测报告提供的内容应真实、准确、完整，并宜用文字阐述与绘制变化曲线或图形相结合的形式表达。监测报告应按时报送。

8.2.2　监测报告宜将监测数据以附件形式附于报告中。

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

8.2.4　阶段性报告应包括下列内容：

1　该监测阶段相应的工程、气象及周边环境概况；

2　该监测阶段的监测项目及监测点的布置图；

3　各项监测数据的整理、统计及监测成果的过程曲线；

4　各监测项目监测值的变化分析、评价及发展预测；

5　相关建议。

8.2.5　总结性报告应包括下列内容：

1　工程概况；

2　监测依据；

3　监测项目；

4　监测设备和监测方法；

5　监测点布置；

6　监测时间及监测频率；

7　监测预警值；

8　各监测项目全过程的发展变化分析及整体评述；

9　监测活动结论与建议。

附录 A　常用监测设备精度

表 A　常用监测设备精度

监测类别	监测传感器	监测精度	备注
应变	电阻应变片	±1%F.S.	—
	振弦式应变计		—
	光纤类应变计		—
变形	位移传感器	±0.1mm～±1mm	接缝、裂缝
	静力水准仪	±0.1mm～±1mm	沉降、挠度
	倾角计	±0.1%F.S.	倾斜
	GNSS 变形监测系统	±(2.5+0.5×10^{-6}×D)mm	静态水平位移
		±(5.0+0.5×10^{-6}×D)mm	静态竖向位移
环境	温度计	±0.5℃	结构、环境温度
	湿度计	±2%RH	环境湿度
	风速风向仪	±0.4%F.S.	风压 500hPa～1100hPa
		±2% F.S.	风速 0m/s～60m/s
		±3°	风向（0°～360°）
拉线拉力	加速度传感器	±5%F.S.	频率响应
	压力传感器	±3%F.S.	—
	应变传感器	±0.5%F.S.	—

注：1　表中监测精度为最低要求。特殊情况下，监测精度可根据实际情况，按设计要求确定；

2　混凝土接缝、裂缝取小值，土体和界面接缝、裂缝取大值，特殊情况下，按设计要求确定。

附录 B　层次分析法

B.1　建立层次指标体系

B.1.1　钢塔桅结构层次指标体系应包括三个层次：最高层、中间层、最底层。具体如表 B.1.1 所示。

表 B.1.1　结构层次

层次	内容
最高层	钢塔桅结构的最终预警目标
中间层	实现最终预警目标所涉及的中间环节需要考虑的中间指标
最低层	基本监测指标

B.1.2　钢塔桅结构层次指标体系宜按表 B.1.2 所示建立。

表 B.1.2　钢塔桅结构层次指标体系

最高层	中间层	最低层
钢塔桅结构的最终预警目标	上部结构	塔架位移
		静应变
		塔架加速度幅值
		塔架自振频率
		拉线拉力
		螺栓松动
		法兰间隙差
		腐蚀
		塔顶倾斜
	附属结构	主梁变形
		静应变
		倾斜
		振动加速度
	基础及支座	锚碇位移
		锚杆应力
		基础加速度
		不均匀沉降
		支座反力
		支座位移
		螺栓松动
		法兰间隙

B.1.3　钢塔桅结构层次指标体系的基本监测指标可在本标准 B.1.2 条基础上做适当增加，并应遵循以下原则：

1　可测性原则：指标应具有含义明确、具备现实收集渠道、便于定量分析、具有可操作性等特点；

2　完备性原则：指标应整体反映钢塔桅的使用状态；

3　独立性原则：各指标之间应相互独立，避免包容性，能从不同方面反映钢塔桅结构的性能特征，避免由于指标间的相交或重复而带来不便和分析误差；

4　一致性原则：各个指标应与分析的目标相一致，所监测的指标间不应相互矛盾；

5　简明性原则：基本监测指标应易于理解和接受，便于形成研究的共同语言；

6　敏感性原则：基本监测指标应选定为对结构异常变化较为敏感的指标。

B.2　监测指标标准化处理

B.2.1　对于单值型数值指标，应按照对监测对象的作用趋向分为正指标、逆指标、适度指标三种类型，并应采用线性百分制无量纲化数学模型进行标准化处理。

B.2.2　对于单值型数值指标为非线性的，应采用非线性百分制无量纲化数学模型标准化。

B.2.3　对于序列型数值指标，应考虑监测数据中存在的均匀变化和非均匀变化，采用序列型数值指标评价值=均匀变化得分×非均匀性变化系数的形式确定其评价结果。

B.3　监测指标的赋权

B.3.1　宜采用五级标度法确定钢塔桅层次指标体系同一层次各指标在体系中的“相对重要性”以及下层指标对上层目标的“相对重要性”。

B.3.2　对于部分钢塔桅结构采用本标准 B.3.1 条中五级标度法不足以描述清楚的，宜用 2、4、6、8 四个数值进行内插，形成九级标度法。

B.3.3　同一层次下的所有指标应建立如表 B.3.3 所示的两两比较判断矩阵。

表 B.3.3　两两比较判断矩阵

甲指标 / 乙指标	B_1	B_2	…	B_j	…	B_m
B_1	b_{11}	b_{12}	…	b_{1j}	…	b_{1m}
B_2	b_{21}	b_{22}	…	b_{2j}	…	b_{2m}
…	…	…	…	…	…	…
B_i	b_{i1}	b_{i2}	…	b_{ij}	…	b_{im}
…	…	…	…	…	…	…
B_m	b_{m1}	b_{m2}	…	b_{nj}	…	b_{mm}

注：B1，B2，...，Bn——某一层指标 B 所支配的下一层指标；

bij——甲指标对乙指标重要程度的赋值，即按照 B.3.1 条～B.3.2 条确定的赋值；

M——判断矩阵的维数。

B.3.4 判断矩阵中的 b_{ij} 应满足式 B.3.4-1 和式 B.3.4-2 所示条件。

$$b_{ij} = 1, \mathrm{i} = \mathrm{j} = 1,2,\ldots.,\mathrm{n} \qquad \text{（B.3.4-1）}$$

$$b_{ij} = \frac{1}{b_{ji}}, \mathrm{i}, \mathrm{j} = 1,2,\ldots.,\mathrm{n}, \mathrm{i} \neq \mathrm{j} \qquad \text{（B.3.4-2）}$$

B.3.5 判断矩阵应检验一致性，一致性的检验应根据式 B.3.5 中相对一致性指标 CR（Consistency Ratio）判断。

$$\mathrm{CR} = \frac{CI}{RI} \qquad \text{（B.3.5）}$$

式中：CI——一致性检验指标，$\mathrm{CI} = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}$，m 为判断矩阵的维数，$\lambda_{max}$ 为判断矩阵的最大特征；

RI——平均随机一致性指标，是多次（500 次以上）重复进行随机判断矩阵特征值的计算之后取算术平均得到的。

B.3.6 判断矩阵相对一致性指标 CR 应满足 CR＜0.1，如果 CR≧0.1，应对判断矩阵作适当修正。

B.4 钢塔桅结构健康状态评分

B.4.1 钢塔桅结构健康状态评分宜采用式 B.4.1 计算。

$$\mathrm{V}(x_1,\ldots,x_m) = \frac{\sum_{j=1}^{u} w_j^{(0)} x_j^{\alpha}}{\sum_{k=1}^{u} w_k^{(0)} x_k^{\alpha-1}}，\text{其中 } 0 < \alpha \leq 1 \qquad \text{（B.4.1）}$$

式中：u——监测指标个数；

$w_j^{(0)}$——第 j 个指标权重；

$w_k^{(0)}$——第 k 个指标权重；

x_j——第 j 个指标评价值；

α——均衡系数。

B.4.2 当对各指标的均衡问题考虑较多时，宜取均衡系数$\alpha \leq 1/2$；当比较能容忍某方面缺陷时，可取$\alpha > 1/2$。

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，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：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2）表示严格，在正常情况均应这样做的：

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，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4）表示有选择，在一定条件下可以这样做的，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……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

1 《中国地震动参数区划图》GB18306

2 《工程测量标准》GB50026

3 《综合布线系统工程设计规范》GB50311

4 《建筑基坑工程监测技术标准》GB50497

5 《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982

6 《金属粘贴式电阻应变计》GB/T13992

7 《大坝监测仪器 应变计 第2部分：振弦式应变计》GB/T3408.2

8 《广播电视钢塔桅防腐蚀保护涂装》GY/T64

9 《广播电视网络安全等级保护定级指南》GY/T337

10 《土木工程用光纤光栅应变传感器》JG/T422

11 《建筑变形测量规范》JGJ8

中华人民共和国广播电视和网络视听工程建设行业标准

广播电视钢塔桅结构安全监测工程建设标准

GY/T5100-2026

条文说明

目　次

1　总则 27
3　基本规定 27
3.1　一般规定 27
3.2　监测要求 28
4　监测内容 29
4.1　一般规定 29
4.2　施工期间监测 29
4.3　使用期间监测 29
5　监测方法 30
5.1　一般规定 30
5.2　应变监测 31
5.3　变形监测 32
5.4　环境监测 32
5.5　振动监测 32
5.6　地震动及地震响应监测 33
5.7　风及风致响应监测 33
5.8　拉线拉力监测 33
5.9　螺栓松动监测 33
6　数据采集与分析 34
6.1　一般规定 34
6.2　数据采集 34
6.3　数据预处理 34
6.4　数据分析 35
7　预警与评估 36
7.1　一般规定 36
7.2　控制值 37
7.3　预警 37
7.4　评估 37
8　监测报告 38
8.1　一般规定 38
8.2　监测报告 38

1 总则

1.0.1 在规范广播电视钢塔桅结构生产、设计、检测、维护等方面国家广播电视总局出台了一系列的规范标准，但缺少相应的施工和使用期间的监测技术标准。近年来随着广播电视钢塔桅结构在我国的不断发展，工程结构监测技术也取得了长足的进步，因此，为满足广播电视钢塔桅监测和依据监测数据对结构评估的需要，规范广播电视钢塔桅结构监测技术工作，专门针对广播电视钢塔桅结构的监测与评估编制本标准。

1.0.4 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的作用。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 施工期间监测应以施工安全或工程质量控制为基准，使用期间监测应以结构正常使用极限状态或结构适用性为基准。使用期间监测宜采用具备数据自动采集功能的监测系统进行，使用期间的监测系统宜集成施工期间的监测数据，并可进行对比分析。

3.1.2～3.1.3 依据《建筑结构可靠性设计统一标准》GB50068-2018 第 3.2.1 条，对于破坏后果很严重，可能对人员生命、经济、社会或环境造成重大影响的结构，其安全等级应定为一级。依据《高耸结构设计标准》GB50135-2019 第 3.0.5 条，特别重要的高耸结构（如省级以上广播电视塔）的安全等级应取为一级。此类结构涉及重大公共安全，应在施工及使用期间实施强制性安全监测。

3.1.4 监测应委托具备广播电视钢塔桅的设计、咨询或有相应注册结构工程师的单位，按结构工程的特点，结合现场及周边环境条件选择监测项目及合适的监测方法，并根据监测期、监测项目及方法选取合适的监测设备，针对不同监测项目采取具体实施措施及相应预警、告警策略。

3.1.6 监测内容应包括应力、应变、变形及其他。

3.1.7 静态监测包括静力荷载（作用）及其引起的结构应变、变形、拉线拉力，以及温湿度、腐蚀和环境等。动态监测包括动力荷载（作用）及其引起的振动、风及风致响应、地震动及地震响应、螺栓松动等。

3.1.8 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（拉线拉力）、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，监测中常采用多监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，将多点应变量测值经物理方程、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监测点的方法，如同截面多监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。

3.1.10　根据传感器市场调查和监测实践结果，目前生产厂商给出的传感器使用寿命一般均可超过5年;用于长期监测的预埋在结构内部的埋入式传感器的耐久性和可靠性一般也能保证为20年左右，综合考虑传感器技术和成本因素，规定预埋在结构内部的埋入式传感器设计使用寿命不宜低于20年；预埋在结构内部的埋入式传感器建议冗余布置，考虑存活率，附着安装在结构上的非埋入式传感器设计使用寿命不宜低于5年，这在技术上可行且成本合理。

3.1.12　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。

3.2　监测要求

3.2.1　监测点的布置是捕捉监测对象有效信息的关键环节，监测点要能反映监测对象的实际状态及变化趋势。在结合结构分析结果布置监测点时，宜对结构的内力分布、变形和动力特性等作全面的分析，选择结构静动力反应及变形较大的部位，并结合现场实际情况确定监测点位置；监测点的数量既要考虑到监测系统的可靠性，又要考虑经济性。

3.2.2 2　采用卫星定位系统测量时，视场内障碍物高度角示意图如下：

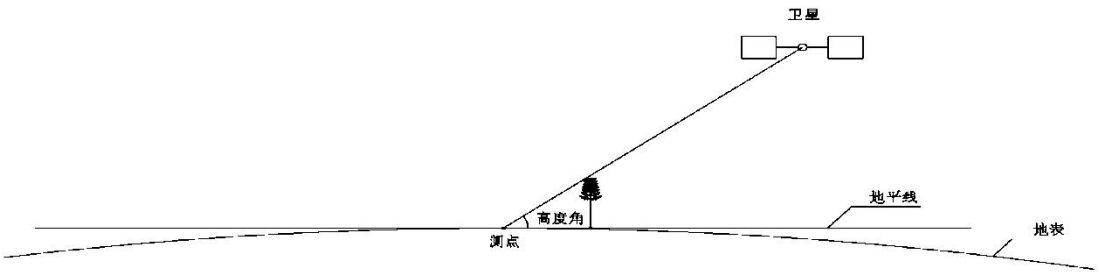


图1　障碍物高度角示意图

3.2.4　结构动力特性测试主要用于掌握结构动力特性（包括振型、频率、阻尼比等）及初始状态。动力特性测试数据的分析处理可采用频域分析法或时域分析法。对环境激励下的非平稳随机过程，也可同时在时、频两域进行联合分析。

3.2.5　监测数据包括原始记录与分析结果数据，是监测活动的主要成果，应对监测数据进行保存和备份。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。

3.2.6　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。

4　监测内容

4.1　一般规定

4.1.2　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结构最高目标截止监测频率的 2 倍，静力位移及应变的监测频率可以是每小时 1 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，启动高速采样模式进行采样；当特定参数低于触发值时，恢复原设定的采样模式。

4.2　施工期间监测

4.2.1　基坑支护监测的相关内容参考《建筑基坑工程监测技术标准》GB50497，监测内容有位移、支撑轴力、锚杆拉力、地表沉降、地表隆起等。

4.2.2　钢塔桅结构的高度一般可以按节进行分段，施工期间监测可根据施工进度按不同的节进行监测。

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

4.2.5　参考国内大型钢塔桅建设，为保证结构安全，应在跨度或悬挑长度超过 20 米的局部结构布置挠度监测点，如西部某新建电视塔塔楼外侧，大功率转动天线外侧等。

4.2.7　施工期间构件应力及变形受环境温度影响大的区域主要是针对温差引起构件应力及变形变化大的部位，为了反映其变化规律，宜增加监测点。

4.2.10　使用期间结构处于稳定状态下，从节约能耗的角度，一般为白天与夜晚各采集 1 次。

4.3　使用期间监测

4.3.1　钢塔桅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等；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、拉线拉力、弯矩、主应力等；荷载和作用监测项目中的风荷载参数包括风速、风向、风压等。

4.3.3　对于钢塔桅结构而言，可选定特征明显的塔尖、避雷针、圆柱（球）体边缘作为钢塔桅结构的变形监测监测点；沉降及变形，在施工完成后第一年内宜至少每 3 个月监测 1 次，第二年内宜至少监测 2～3 次，第三年以后宜每年至少监测 1 次。

4.3.4　温度梯度变化较大位置，如包封塔楼内部和塔楼上下构件，包封内筒内部和相连构件，应对称、均匀。

4.3.5　钢塔桅结构地震动及地震响应监测应形成地震动及地震响应监测系统，符合监测系统功能要求。特别重要的钢塔桅结构指安全等级为一级的广播电视塔，具体划分应根据工程结构的破坏后果，即危及人的生命、造成经济损失、对社会或环境产生影响等的严重程度确定，或参考其他广播电视相关标准确定。

4.3.6　地震动监测，当条件具备时，也可在自由场上增加布置监测点，用于记录结构的输入地震动。

4.3.8　螺栓松动监测的监测点选取应遵循“关键部位优先，易松动部位补充”的原则，即优先选择对设备发射塔结构稳定性影响较大的关键部位，包括高度大于 100 米自立塔地脚螺栓和规格变化超过 20%的变坡处主柱连接螺栓；其次对于易受到振动、冲击等外部因素影响的螺栓连接部位，包括桅杆端底部固定螺栓和塔楼上部连接螺栓。

4.3.10　特殊部位即存在缝隙、呈突出或凹陷状态的区域；结构连接位置，如焊缝、螺栓连接处、受温度交替变化或应力循环变化的区域。力与侵蚀环境荷载分别作用的典型区域及侵蚀环境荷载作用下的典型节点，如拉线塔的地锚拉杆、地脚螺栓埋入混凝土部分、桅杆段底部塔柱连接焊缝。腐蚀监测位置确定时可考虑在预期最高、最低或中等腐蚀速率的部位进行监测。侵蚀环境区域可考虑工程中结构与环境（如水）接触的区域、不同材料接触区域、腐蚀监测设备安装触及区域等。

5　监测方法

5.1　一般规定

5.1.2　不同的监测对象，如不同类型的广播电视塔、中波塔、拉线塔等，不同的监测项目，如安装位置、采样频率、保护措施等，对传感器的要求也不同，因此监测传感器的选型需考虑监测对象、监测项目和监测方法等因素。选型中可参考下列指标：

灵敏度：传感器应具有良好而稳定的灵敏度和信噪比。

通频带：系统输出信号从最大值衰减 3dB 的信号频率为截止频率，上下截止频率之间的频带称为通频带。通频带应有足够宽的频率范围，足以覆盖被监测对象的振动频率。

动态范围：指灵敏度随幅值的变化量不超出给定误差限的输入机械量的范围。幅值范围指在此范围内，输出电压和输入机械量成正比，所以也称为线性范围。动态范围一般不用绝对量数值表示，而用分贝做单位，这是因为被测量值变化幅度过大的缘故，以分贝级表示使用更方便一些。监测仪器设备应有足够大的动态范围，以满足最大和最小监测幅值的需要。

量程：传感器的量程宜使被测量参数处在整个量程的 80%～90%之内，且最大工作状态点不应超过满量程。

线性度：传感器应具有良好而稳定的线性度，在对结构位移及应变等反应进行监测时宜满足较高的线性度要求。

稳定性：传感器应具有良好的稳定性，具有较强的环境适应能力。

供电方式：应根据实际情况和监测要求确定不同类型的传感器供电形式。

寿命：应根据结构监测期选择满足使用年限的传感器，并充分考虑置换方案和时间。

采样频率也是重要指标之一，通常情况下应根据监测参数和传感器类型选择适当的采样频率。

对于静态信号，采样频率可设置低于 1Hz；对于动态信号，采样频率宜为动态信号频率上限的 5～10 倍；此外，为进行数据间的相关性分析，一个监测系统应采用同类型传感器，各通道采样频率宜相同，或采用一定的倍频进行采集。监测系统的各组成部分应合理匹配，同时还应考虑传感器的动态特性，如传感器的传递函数和瞬态反应。

5.1.3　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，施工期间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。

5.2　应变监测

5.2.1　不同类型应变计技术特点可参考表 1。

表 1　应变计技术特点

类型 / 特性	电阻应变计	振弦式应变计	光纤类应变计
时漂	较高，可通过特殊定制减小	小，适宜长期量测	小，适宜长期量测
灵敏度	高	较低	较高（与调节仪精度有关）
对温度的敏感性	通过电桥实现温度补偿	需要修正	需要修正
信号线长度影响	需进行导线电阻影响的修正	几乎不影响量测结果	不影响量测结果
信号传输距离	短	较长	很长，可达几十公里
抗电磁干扰能力	差	较强	很好
对绝缘的要求	高	不高	光信号，无需考虑
动态响应	很好	一般	好
精度	高	较高	较高

5.2.3　电阻应变计的使用及技术规定按照《金属粘贴式电阻应变计》GB/T13992 执行；光纤类应变计按照光纤类应变计说明书的技术要求严格执行；标距误差及最小分度值等技术规定按照《混凝土结构试验方法标准》GB/T50152 执行。

5.3　变形监测

5.3.1　本条中变形包括倾斜、沉降、标高、挠度及收缩徐变等；其他位移指相对滑移、转角、倾斜、挠度、瞬时变形及日照变形等。

5.3.2　水平位移监测可选用机械式测试仪器法、电测仪器法、光学仪器法、卫星定位系统法等，也可同时采用多种方法；电测仪器法应选用电子百分表、电子倾斜仪、位移传感器等测量法；光学仪器法应选用激光准直法、基准线法（正倒垂线法、视准线法、引张线法）、边角法（三角形网、极坐标法、交会法）等。监测前，应分析预估监测点的位移方向，无法估计时，可选择相互垂直的两个方向进行监测。

垂直位移监测可选用机械式测试仪器法、电测仪器法、光学仪器法、卫星定位系统法。机械式测试仪器法应选用百分表、张线式位移计、收敛计等测量方法；电测仪器法应选用电子百分表、位移传感器、连通液位式挠度仪、静力水准仪等测量方法；光学仪器法应选用水准测量方法、三角高程测量方法等。

5.3.3　局部相对变形测量在下列情况下采用光学仪器法时，通常可不布置监测基准网：

1　监测结构局部或构件的相对垂直位移；

2　天线段安装顶升，构件吊装等短期监测。

5.3.4　修正是为了消除温度对结构变形特性的影响。使用期间变形监测应考虑此项修正，施工期间变形监测应根据监测期及现场条件确定。

5.3.8　基坑工程中的水平位移、竖向位移、倾斜、裂缝等监测的具体规定可按《建筑基坑工程监测技术标准》GB50497 执行；激光准直法、基准线法（正倒垂线法、视准线法、引张线法）、边角法（三角形网、极坐标法、交会法）等光学仪器法以及 GPS 等卫星定位系统测试方法的相关规定可按《工程测量标准》GB50026 执行。

5.4　环境监测

5.4.4　室内湿度监测点可参考温度仪，一并布置在结构内壁且便于维修维护的部位。对湿度传感器的要求参考《湿度传感器校准规范》JJF1076。

5.5　振动监测

5.5.1　本条主要适用于地震、风、人流等振动监测的一般规定。

5.5.3　相对测量法适用于位移振幅大、振动周期长的振动位移监测，绝对测量法适用于绝对位移、速度、加速度等动态参数的监测。

5.5.5　绝对测量法中对于钢塔桅结构在振动荷载作用下产生的振动位移、速度和加速度，需量测一定时间段内的测量历程，“一定时间段”并非一个固定值，而是根据测量目的、荷载特性和结构动

力特性综合确定的最小有效记录时长。它要求测量持续时间足够长，以覆盖振动的主要周期成分，并满足后续数据分析（如频谱分析、统计计算）的基本要求。

5.5.6　采样频率选择，当只作频域分析时，采样频率不宜低于被监测钢塔桅结构关注最高频率的 4 倍；只作时域分析时，采样频率不宜低于被监测钢塔桅结构关注最高频率的 5～10 倍；作频域分析又作时域分析时，采样频率不宜低于被监测钢塔桅结构关注最高频率的 8～10 倍；作失真度测试时，采样频率不宜小于被监测钢塔桅结构关注最高频率的 28 倍。

5.6　地震动及地震响应监测

5.6.2　地震动监测系统一般有两类：一类为无传输装置的监测系统，包含传感器和记录仪两部分，地震来临时该系统会自动记录，地震后可到现场将数据导出；另一类增加了数据发射与接收装置，可为有线或无线，地震后监测系统可自动将监测数据传输至设定的接收装置，无需到现场即可获得监测数据。

5.7　风及风致响应监测

5.7.1　风致振动响应指由风引起的结构振动响应，一般含风致加速度和风致位移。

5.7.5　风致响应监测包括顺风向响应、横风向响应和扭转响应，风致响应有位移、加速度、内力等。风速记录应包括 3 秒阵风风速、10 分钟平均风速、每小时平均风速、瞬时风速及风向；统计分析应绘制风玫瑰图、风速频谱图等。采样频率对极值风速监测结果有较大影响，采样频率高的仪器监测结果更为精确，应尽可能提高采样频率。工程结构高度 200m 以上宜进行风洞试验确定风荷载，特别重要或体型复杂的广播电视钢塔桅结构，宜由风洞试验或数值风洞计算确定。实际现场可进行风场实测与风洞试验结果对比研究，目前很缺少现场实测对比资料。对容易产生风致振动的广播电视钢塔桅，或采用气动特性状况不明确的广播电视钢塔桅结构型式时，宜布置风及风致响应测试设备。

5.8　拉线拉力监测

5.8.2　拉线拉力监测的方法较多，振动频率法一般适用于已张拉完成拉线的拉力检测。在脉动或简单扰动情况下，以检测拉线的一阶或二阶模态为主。

5.9　螺栓松动监测

5.9.1　监测方法可包括扭矩检测法、振动监测法、螺母旋转监测法。

扭矩检测：使用扭矩扳手或扭矩计对螺栓进行扭矩测试，比较测试结果与标准扭矩值，以判断螺栓是否松动；扭矩扳手或扭矩计精度要求不低于 3%。

振动监测：使用振动传感器对螺栓连接部位进行振动监测，分析振动信号的变化，以判断螺栓是否松动。

螺母旋转监测：利用监测设备对螺母旋转角度进行监测，通过螺母旋转角度变化，判断螺栓是否松动。

6　数据采集与分析

6.1　一般规定

6.1.1　监测期间数据采集与传输的软硬件应根据传感器输出信号类型、范围、兼容性、精度和分辨力等要求进行确定。

6.1.2　数据预处理应具备正确处理粗差、系统误差、偶然误差的功能，应能正确判断异常数据是由结构状态变化引起还是监测系统自身异常引起，且能剔除由监测系统自身引起的异常数据。对结构振动数据，还可采用数字滤波、去噪、截取等方法提高数据质量。预处理后的高质量数据进一步处理为更容易理解和使用的形式，及时计算或换算成监测对象的极值、累计变化值、变化速率等，并绘制成相应的时程曲线、等值线图等，便于分析结构的作用状态情况和响应状态情况，以及不同时间不同监测部位之间的相互联系及内在规律。

6.1.3　数据管理应遵循“独立性、模块化、一致性、可扩展性、标准化和可移植性”的原则，应提供对各类信息的访问接口，并宜支持多源异构数据库间互操作，实现在不同系统或模块之间传递信息，实现网络环境下信息的交互和共享。安全性应考虑监控系统机房的温湿度、电力供应以及电磁干扰等，符合设备正常运转条件，应配备不间断电源、空调和防雷防电磁干扰设备，以及保证软硬件系统的安全，特别是软件系统的信息安全。数据共享指系统所有用户可访问数据库中的数据，多用户共建共用，共享数据服务，有利于维护数据的一致性，监测系统宜预留与上级监测监管机构的接口及协议要求。

6.2　数据采集

6.2.1　数据采集方式的选择与广播电视钢塔桅结构规模、监测点位置、监测设备类型、传感器数量和分布密切相关，监测设备空间分布较分散时，应考虑分布式的数据采集方式，同时保证设备间的连接可靠、稳定。

6.2.2　数据采集方案应根据监测参数类型、监测要求以及系统数据采集、传输、处理和管理能力确定，可选择定时采集、触发采集、混合采集等采集方案。风及风致响应宜采用定时采集结合触发采集的混合采集模式，没有超过控制值时可采用定时采集，超过控制值时宜采用触发采集。

6.3　数据预处理

6.3.1　监测数据分析前应进行数据预处理、检查、评判来消除误差，以保证数据的精确性。误差包括偶然误差与系统误差。对采样频率较低的结构静态数据，可在每次采集时进行多次采样，取其平均值降低偶然误差影响；对采样频率较高的结构振动数据，可采用数字滤波降噪等方法降低偶然误差影响。系统误差可采用修正仪器或添加补偿等方法消除，如对传感器进行事先标定；对温度造成的应变采集误差可增加温度补偿片等。

6.3.2　监测数据的分布均值和标准差可采用移动窗的策略，选取一段近期监测数据进行直接统计，也可通过贝叶斯推断方法进行实时估计。当常规监测过程中位移、内力发生明显变化、个别监测点数据变化明显大于其他监测点、监测值接近或达到预警值异常时，可通过拉伊达准则（3σ准则）判定异常数据。当识别到异常数据后，宜补充采集一段附加数据，并结合监测部位附近其他监测点的

数据变化，判断异常数据是由结构状态变化引起还是监测系统自身异常引起。当数据异常判断为监测系统故障或缺陷原因时，应对异常监测点传感器及监测子系统进行排查，并及时进行维护或完善。

6.3.3　温度变化会引起监测点内力的大幅度波动，在异常数据判定中，若忽略这部分趋势项的影响，易造成误警，因而应最大限度对温度造成的趋势项进行去除。对温度引起的趋势项，当温度可观测时，可采用回归分析方法拟合应力应变与温度间的回归关系，并利用拟合得到的回归参数分离温度造成的趋势项；当温度不可观测时，可对多监测点数据进行主成分分析，得到温度造成的主要分量，并据此进行各监测点趋势项的分离。

6.3.4　多元线性回归法：通过建立数据缺失的监测点与附近若干监测点数据间的线性回归关系，利用后者对前者进行缺失数据修复。

K 最近邻法：在特征空间中寻找 K 个最相似的样本，根据这 K 个样本的分类情况或者属性值评估未知数据的分类或属性值。对于监测数据修复，可将每一次采样得到的各监测点数据看作多维坐标，在所有监测序列中选取与数据缺失点欧拉距离最近的 K 个样本，将这 K 个样本对应数据缺失点的值的平均作为缺失数据的修复结果。

神经网络：在缺失数据修复前，首先利用多监测点的完整数据训练神经网络模型，以表征各监测点数据间的非线性关系，再基于训练好的网络，采用数据完整的监测点对数据缺失的监测点进行修复。

概率主成分分析：主成分分析的一种概率形式，能够在完整数据较少时，利用最大期望算法找到各组数据间的隐式关系，进而对缺失数据进行修复，无需对完整数据进行训练。

压缩传感：在信号满足稀疏性或可压缩性的条件下，直接对信号进行压缩采样，通过复杂度较高的重构算法来重构原始信号。

6.3.5　滤波降噪可采用 FFT 带通滤波、小波降噪等方法。截取信号应选用合适的窗函数，以减少对信号精度的影响。针对含噪信号，应对噪声进行来源检查，并应采取有效措施进行处理：应先排除仪器内部等因素造成的干扰，对存在的干扰信号进行时频分析，确定其特征参数；最后可根据具体情况，通过滤波降噪、去直流、去趋势项、截取等信号处理方法，提高信号的信噪比。

6.4　数据分析

6.4.1　不同监测数据的分析方法一般不同，可参考表 2。

表 2　不同监测数据常用分析方法

监测项目	分析方法
位移	统计分析位移绝对最大值和累计位移，绘制位移变化曲线
应力、应变	统计分析应力应变最大值、最小值、应力增量应力幅最大值等，绘制关键构件应力、应变的时程曲线
拉线拉力	统计分析拉线拉力最大值、最小值、平均值等

续表 2

监测项目	分析方法
振动	统计分析加速度峰值、最大均方根值，绘制监测点加速度时程曲线，频域分析（模态特征、频谱特征、频响特征等），时频域分析（小波变换等）
螺栓松动	统计分析螺栓转角最大值和累计角度，绘制角度变化曲线、角度旋转模拟图
温度、湿度	统计分析最高温度、最低温度等特征值，绘制构件断面最大温度梯度、结构整体温度分布图等
风速、风向	统计分析最大风速、平均风速，绘制风玫瑰图
风压	统计分析风压最大值、平均值，绘制结构表面风压分布云图
接地电阻	统计接地电阻最大值、最小值、平均值等
地震作用	准确识别出地震的发生，统计分析地震中加速度峰值、速度峰值、持续时间等

7　预警与评估

7.1　一般规定

7.1.1　本条对监测预警等级和预警标准的制定工作进行了要求。

广播电视钢塔桅监测预警是整个监测活动的核心，通过监测预警能够使相关单位对异常情况及时作出反应，采取相应措施，控制和避免工程自身和周边环境等安全事故的发生。监测预警需有一定的标准，并要按照不同的等级进行预警，因此，广播电视钢塔桅监测应当制定工程监测预警等级和预警标准。目前，由于各地的建设管理水平、施工队伍的素质和施工经验，以及工程地质条件和施工环境不同，对监测预警的分级不尽相同，每级的分级标准也不完全一致。为便于预警工作的统一管理，通常由建设单位组织设计单位、施工单位、监理单位及相关专家，根据工程特点、监测项目控制值、当地施工经验等，研究制定监测预警等级和预警标准。

7.1.2　本标准预警系统设黄色和红色两级。当某监测参数出现黄色预警时，维护管理单位应加强关注，并进行跟踪观察；当某监测参数出现红色预警时，维护管理单位应连续密切关注，应查明报警原因，采取适当检查、应急措施，并应及时进行结构安全评估。

预警系统应服务于业主单位或日常管理与使用维护部门，实现安全状态的实时预警，自动处理预警信息，并根据需要将各种预警信息及时通知相关人员和相关单位采取措施，并向上级部门和有关单位及时报送。当预警涉及的安全隐患已经消除或突发事件不满足相应级别预警启动标准时，应及时降级转化或撤销安全预警。预警通知方式应明显且多样化，可包括指示灯、喇叭、网络、可变情报板、短信、路侧广播等。

7.1.3　评估系统应充分利用结构的监测数据，并结合结构日常、定期巡视情况和历史数据综合分析，实现对结构状态的定期常规评估。结构评估应准确反映结构的当前性能水平，及时提出相应的结构

养护和管理建议。对遭受特殊事件后的结构进行的结构安全专项评估，应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使用性等评估，必要时组织专家研判。

7.2 控制值

7.2.1 施工期间的控制值应结合施工过程设计值、规范限定值以及材料强度允许值等确定；使用期间的控制值应根据结构性能，结合设计值、规范限定值、材料强度允许值、长期数据积累等，提出与结构安全性相应的限值要求。

对监测数据进行处理也可以得到控制值，但应通过从服役起至少一年且结构未见异常的连续监测数据得到。随着结构使用年限的增加，控制值应根据环境变化、危险种类、结构状态、认知深入而不断补充、修正和优化，使其更加合理。

监测数据的分布均值和标准差可采用移动窗策略选取近期一段时间内的监测数据进行直接统计，也可通过贝叶斯推断方法进行实时估计。当监测数据中环境作用引起的趋势项较明显时，应以去除趋势项后的数据为对象，设定相应的预警值并进行预警判断。

7.3 预警

7.3.1 通过查阅相关论文，一般的钢塔桅的实际测量周期与理论计算值误差在 8.8%；参考《桥梁结构健康信息化监测技术规范》DB42/T1951-2023 可知，结构频率降低会出现健康状态的问题。

7.3.3 《建筑结构荷载规范》GB50009-2012 定义基本风速为“按当地空旷平坦地面上 10m 高度处 10min 平均的风速观测数据，经概率统计得出 50 年一遇最大值确定的风速”。

对于一般钢材来说，常温下的临界湿度在 60%～70%之间，相对湿度超过临界湿度时，钢的腐蚀速率显著增加。基本地震动峰值加速度在Ⅱ类场地基本地震峰值加速度的基础上根据场地类别进行选取，罕遇地震动峰值加速度在基本地震动加速度峰值和Ⅱ类场地基本地震峰值加速度的基础上进行选取。

7.4 评估

7.4.2 结构评估等级是根据各级监测参数预警参数状态划分的结构状态等级，等级越高，结构状态越危险。

7.4.6 基于层次分析法对结构进行评估的基本思想：将结构安全性指标按由整体到局部的原则分解为不同层次的详细指标，然后利用求解判断矩阵特征向量的办法，求得每一层次的各元素对上一层次某元素的优先权重，最后利用加权和的方法递阶归并各详细指标的贡献，最终求得结构安全性指标。也可采用专家评议法、德尔菲法、影响图法、蒙特卡洛法、神经网络法、模糊理论等其他综合评估方法对结构进行综合评估分析。

8 监测报告

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。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 监测报告

8.2.5 总结性报告是对整个监测阶段的总结，应对整个监测阶段的结构及监测系统的运行情况进行汇总，内容涵盖阶段性监测报告的全部主要内容，且有归纳和总结。工程概况应包含项目建设、设计及施工等单位、项目完成的起始时间，实际完成的工作量，施工进度、监测目的和要求等内容。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相应阶段的报告中。

GY/T5100-2026

中华人民共和国
广播电视和网络视听工程建设行业标准
广播电视钢塔桅结构安全监测工程建设标准

GY/T5100-2026

国家广播电视总局工程建设标准定额管理中心

地　　址：北京市西城区西便门外大街二号
联系电话：(010)86094414
邮政编码：100045

版权所有　不得翻印