****

 **T/CECS xxx-202x**

**中国工程建设标准化协会标准**

**既有建筑天-空-地安全监测通用技术规程**

General technical specification for space-airborne-ground integrated monitoring of existing buildings

**（征求意见稿，20230925）**

**中国计划出版社**

**中国工程建设标准化协会标准**

**既有建筑天-空-地安全监测通用技术规程**

General technical specification for space-airborne-ground integrated monitoring of existing buildings

**T/CECS xxx-202x**

主编单位：深圳市城市公共安全技术研究院有限公司

中冶建筑研究总院（深圳）有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202x年xx月xx日

**中国计划出版社**

202X　北　　京

**前 言**

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2022年第一批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2022〕13号）的要求，编制组经过深入调查和试验研究，认真总结工程实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分7章和X个附录。主要技术内容包括：总则、术语、基本规定、天基广域筛查、空基区域巡检、地基单体监测、天-空-地一体化协同监测。

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

本规程由中国工程建设标准化协会归口管理，由深圳市城市公共安全技术研究院有限公司负责具体技术内容的解释。本规程在使用过程中如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（地址：深圳市罗湖区清水河街道清水河社区清水河一路博丰大厦，邮政编码：XXXXXX，邮箱：XXXXXX），以供修订时参考。

主编单位：深圳市城市公共安全技术研究院有限公司

中冶建筑研究总院（深圳）有限公司

参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1 总　　则 1

2 术语、符号和缩略语 2

2.1　术语 2

2.2　符号 3

2.3　缩略语 4

3 基本规定 5

3.1　一般规定 5

3.2 监测内容 6

4　天基广域筛查 7

4.1　一般规定 7

4.2　数据获取 7

4.3　数据处理 8

4.4 角反射器辅助监测 11

4.5 精度验证 13

4.6 广域风险筛查 13

5　空基区域巡检 15

5.1　一般规定 15

5.2　无人机系统技术指标 15

5.3　任务载荷技术指标 17

5.4　通信系统 20

5.5　测试误差及设备校准 22

5.6　定位与坐标建立 24

5.7　巡检计划及保障措施 25

5.8 精度要求 32

6　地基单体监测 34

6.1　一般规定 34

6.2　监测内容 35

6.3 监测技术 39

6.4 数据采集及处理 40

7 天-空-地一体化协同监测 42

7.1 一般规定 42

7.2 协同场景 42

7.3 协同数据管理 44

7.4 协同数据融合及评价 45

附录A　现有星载干涉SAR数据来源 47

附录B 角反射器制作、设计与安装 48

本规程用词说明 51

引用标准名录 52

条文说明 53

# 总　　则

**1.0.1**为提升我国广域既有建筑的快速监测技术，指导广域既有建筑“天-空-地”一体化多尺度安全监测方案的制定、实施、交付、运维和应用，实现既有建筑全域全时全息安全监测，制定本标准。

**1.0.2**本标准适用于我国广域既有工业与民用建筑（群）的“天-空-地”一体化多尺度安全监测系统的设计、实施、交付、运维和应用，其他建筑与基础设施可参考使用。

**1.0.3**既有建筑安全监测应遵循“因地制宜、先进适用、安全可靠、互联互通”的原则。

**1.0.4**既有建筑安全监测系统的建设、运维和应用除应符合本标准的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

# 术语、符号和缩略语

## 2.1　术语

**2.1.1** 健康监测 health monitoring

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

**2.1.2** 无人机 unmanned aerial vehicle

由遥控设备或自备程序控制装置操控，机上无人驾驶的航空器。

注：也称为无人航空器。

[来源：GB/T 38152-2019,2.1.1，部分修改] //无人驾驶航空器系统术语）

**2.1.3** 任务载荷 mission payload

无人机携带的完成指定任务的设备或装置。

注：也称为有效载荷。

[来源：GB/T 38152-2019,6.1.1] //无人驾驶航空器系统术语）

**2.1.4** 传感器 transducer/sensor

能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。

**2.1.5** 监测点 monitoring point

在监测对象上布设的能反映其变化特征的观测点。

**2.1.6** 传感器布置 sensor placement

利用尽可能少的传感器，将其布置在结构的适当位置，使其能够达到某一特定目标。

**2.1.7** 监测频率 frequency of monitoring

单位时间内的监测次数。

**2.1.8** 有线传输 wire transmission

在两个通信设备之间通过物理连接，将信号从一方传输到另一方的技术。

**2.1.9** 无线传输 wireless transmission

在两个通信设备之间不使用任何物理连接，而是通过电磁波传输的一种技术。

**2.1.10** 安全评估 safety assessment

通过各种可能的测试手段，分析结构当前的工作状态，并与其临界失效状态进行比较，评价其安全等级。

**2.1.11** 风振加速度 wind induced acceleration

建筑结构在风力作用下发生振动而产生的加速度。

**2.1.12** 风振舒适度 wind vibration comfort

人体对风致结构振动的主观感受，通常采用风振加速度作为衡量标准。

**2.1.13** 监测预警值 precaution value for monitoring

为保证工程结构安全或质量及周边环境安全，对表征监测对象可能发生异常或危险状态的监测量所设定的警戒值。

**2.1.14** 监测系统 monitoring system

由监测设备组成实现一定监测功能的软件及硬件集成。

**2.1.15 天-空-地一体化协同监测 Space-airborne-ground integrated monitoring**

通过联合应用天基卫星遥感技术、空基无人机技术、地基传感器技术，对城市建筑与基础设施的形变、缺陷、表观性态等进行协同监测和分析，以实现对城市安全的综合、全面、精准监测。

**2.1.16 数据级融合 data-level data fusion**

通过对传感器直接观测数据的融合，从中提取特征矢量并进行判断识别的过程。也称像素级融合。

**2.1.17 特征级融合 feature-level data fusion**

从每个传感器直接观测数据中提取特征，再将特征融合成单一的特征矢量，最后运用模式识别的方法进行处理作为进一步决策的依据的过程。

**2.1.18 决策级融合 decision-level data fusion**

首先每个传感器执行一次对目标的识别决策，然后将来自每个传感器的识别结果进行融合，按照一定的准则作出最优决策的过程。

## 2.2　符号

## 2.3　缩略语

AI Artificial Intelligence 人工智能

CAFFE Convolutional Architecture for Fast Feature Embedding 卷积神经网络框架

CPU Central Processing Unit 中央处理器

DEM Digital Elevation Model 数字高程模型

FPGA Field Programmable Gate Array 可编程阵列逻辑

GIS Geographic Information System 地理信息系统

GNSS Global Navigation Satellite System 全球导航卫星系统

GPS Global Positioning System 全球定位系统

GPU graphics processing unit 图形处理器

IMU Inertial Measurement Unit 惯性测量设备

SAR Synthetic Aperture Radar 合成孔径雷达

InSAR

PS-InSAR

PS/DS-InSAR

GPR-SAR、InSAR、微波SAR

# 3 基本规定

## 3.1　一般规定

**3.1.1** 既有建筑天-空-地安全监测应包括天基广域筛查、空基区域巡检、地基单体监测和天-空-地数据融合分析。

**3.1.2** 天基广域筛查范围宜包括全部既有建筑。

**3.1.3** 空基区域巡检范围宜包括以下建筑：

1 天基广域筛查未能识别建筑或未能判定其风险程度建筑；

2 天基广域筛查发现存在风险建筑；

3 其他被认定为需关注的建筑。

**3.1.4** 除设计文件要求或其他规定应进行运营期间监测的既有建筑外，满足下列条件之一时，宜进行运营期间地基单体监测：

1 天基广域筛查和空基区域巡检均未能识别建筑或未能判定其风险程度建筑；

2 空基区域巡检发现存在较高风险建筑；

3 高度超过150m的高层居住建筑和高度超过60m的风敏感高层住宅；

4 施工过程导致结构最终位形与设计目标位形存在较大差异的高层结构；

5 带有隔震体系的高层结构；

6 风洞试验结果与规范计算结果差异较大的既有建筑；

7 其他对结构变形比较敏感的既有建筑或被认定需要重点关注的建筑。

**3.1.5** 既有建筑天-空-地安全监测频率宜符合以下要求：

1 天基广域筛查频率不宜低于1次/月；

2 空基区域巡检频率不宜低于3次/月；

3 地基单体监测频率不宜低于1次/天；

4 天-空-地安全监测频率应结合现实需求及时调整。

**3.1.6**  既有建筑结构安全监测应设定监测预警值，监测预警值应满足工程设计及被监测对象的控制要求。

**3.1.7** 监测期间，应对监测设施采取保护和维护措施，未经建设单位和监测实施单位许可不得改变测点或损坏传感器、电缆、采集仪等监测设备。

**3.1.8** 监测系统宜具有完整的传感、采集、传输、存储、数据处理及控制、预警及状态评估功能。

**3.1.9** 监测期间，应对监测数据进行实时分析。当监测数据异常时，应及时对监测对象与监测系统进行核查，当监测值超过预警值时应自动报告管理人员。

## 3.2 监测内容

**3.2.1** 应根据建筑设计、施工及运维情况确定监测内容。

**3.2.2** 监测内容可参考表3.1.1，针对建筑环境作用、结构变化、结构损伤开展监测。

**表3.1.1 监测内容**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 类别 | 环境作用 | 结构变化 | 结构损伤 |
| 风 | 温湿度 | 周边环境 | 竖向变形 | 水平变形 | 层间位移角 | 几何形状变化 | 倾斜 | 应变 | 振动 | 裂缝 | 锈蚀 | 脱落 |
| 天基 |  |  | 应测 | 应测 | 应测 |  | 宜测 |  |  |  |  |  |  |
| 空基 |  |  | 宜测 | 应测 | 应测 |  | 宜测 | 应测 |  |  | 宜测 | 宜测 | 宜测 |
| 地基 | 应测 | 宜测 |  | 宜测 | 宜测 | 宜测 |  |  | 宜测 | 应测 |  |  |  |

注：建于不良地质条件区域或桩基础未到达稳定持力层的建筑应开展地基竖向变形监测。

# 4　天基广域筛查

## 4.1　一般规定

**4.1.1**天基广域筛查的步骤包括数据获取、数据处理、角反射器辅助监测、精度验证。

**4.1.2**天基既有建筑监测精度评价需要评价形变精度和定位精度。形变精度评价必须保证与对比测量数据的形变方向一致，定位精度必须包括散射点的水平定位和高程定位精度。

**4.1.3**精度评价外部对比数据需要采用精密水准测量、全站仪测量及GNSS测量手段进行检验。数据处理可根据实际场景需求和数据情况，采用PS-InSAR、D-TomoSAR、PS/DS-InSAR等技术进行处理。

## 4.2　数据获取

**4.2.1**在进行InSAR数据处理之前，应收集以下与监测区相关的资料：

1 星载SAR影像；

2 辅助数据：包括DEM数据、精密轨道数据、验证数据等。

**4.2.2**根据区域既有建筑物的特点，以及工作区现有SAR卫星观测情况，制定存档数据和编程数据获取计划，现有可获取星载数据源如附录A。SAR数据和辅助数据获取应满足以下要求：

1 SAR轨道：应获取同一轨道且覆盖相同研究区的SAR数据。

条文说明：同一轨道且覆盖相同研究区的SAR数据可以保证数据的一致性和准确性。

2 SAR空间分辨率：宜选择高分辨率的SAR图像（≤3米），以保证监测精度和效果。

3 SAR影像数量：获取覆盖同一区域的时间序列SAR图像数量应不少于25景。

4 SAR观测频率：应优先选择时间间隔较短的监测频率（≤1-2月），以降低时间失相干的影响。

5 SAR垂直基线：不同图像间的空间垂直基线长度应远小于临界空间基线。

条文说明：垂直基线超过临界空间基线会导致完全失相干，且对于InSAR形变监测，垂直基线需尽可能短。

6 SAR极化方式：在差分干涉过程中，通常选择同一极化方式的数据，如垂直极化（VV）或水平极化（HH）。

7 SAR卫星飞行姿态稳定：卫星经过运动补偿后，信号应保留内在的相位信息。轨道定位精度建议优于20 cm，X波段卫星要求更高。

8 SAR图像重叠率：上下相邻两景SAR图像的重叠率应大于或等于10%。

9 SAR观测条件：尽可能避免植被、雪覆盖等因素导致的失相干，或者避免在雨雪等天气条件下获取SAR数据。

10 DEM数据：应保证与SAR数据时相接近，以确保DEM的高程信息能反映出实际地面变形情况；有条件可收集等于或者优于SAR空间分辨率的DEM数据。

11 精密轨道数据：如果卫星提供精密轨道数据，需采用精密轨道参数参与后续干涉计算。

12 验证数据：获取用于后期精度评定的精密水准测量、全站仪测量或者GNSS测量资料。

## 4.3　数据处理

**4.3.1**数据处理方法选择

对既有建筑物监测，监测技术选择的优先级为：PS-InSAR > SBAS-InSAR > DInSAR。不同InSAR监测技术适用条件如表4.3.1所示。

**表4.3.1 不同InSAR监测技术适用条件表**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 监测技术 | 最少SAR数据需求(景) | 适用条件 | 监测精度 |
| DInSAR | ≥2 | 适用于时间间隔短、季节接近。 | cm |
| PS-InSAR | ≥25 | 适用于时间间隔长、天气状况差异大、部分区域相干性较低。 | mm |
| SBAS-InSAR | ≥8 | 适用于短时空基线高相干、长时空基线低相干。 | mm ~ cm |

**4.3.2 数据处理步骤**

4.3.2.1 基本流程

针对既有建筑的InSAR监测技术的选择，优先考虑PS-InSAR技术，PS-InSAR技术数据处理基本流程如图4.3.2所示。



**图 4.3.2 PS-InSAR数据处理基本流程图**

4.3.2.2 数据预处理

1 主影像选取。计算所有SAR影像对的时间和空间基线，选择时间和空间基线居中的一景SAR影像作为PS-InSAR的主影像。

2 影像配准。确定主影像后，将所有辅影像与主影像配准，并满足方向和距离向配准误差均低于1/8个像元，且同名点在SAR影像上分布均匀。

3 影像裁剪。为避免重复配准造成数据处理效率降低，所有影像公共区域的裁剪宜在配准之后进行。

4 SAR坐标系与DEM坐标系转换查询列表生成。将外部DEM采样成与主影像一致的分辨率后，与主影像配准，并保证配准精度优于0.5个像元；利用配准关系式生成SAR坐标系与DEM坐标系转换的查询列表。

4.3.2.3 差分干涉处理

1 干涉图生成。将所有已配准辅影像与主影像组成影像对，并对影像对的主辅影像进行距离向频谱滤波和方位向公共频带滤波，而后进行共轭相乘，生成SAR影像干涉图集。

2 相干图生成。基于相干系数计算公式，预设窗口大小，逐像元估计差分干涉图中各相位的相干系数，生成相干图。

3 平地与地形相位移除。根据空间基线和参考椭球参数计算平地相位；利用生成的查询列表和多项式拟合方法，将DEM转至雷达坐标系下，并将其与空间基线结合模拟地形相位，将模拟地形相位从去平地干涉图中移除，生成原始差分干涉图。

4 空间基线精化。检查原始差分干涉图中是否存在长波条纹，若存在则利用多项式曲面模型估计空间基线残余相位，并将其从原始差分干涉图移除，生成精化差分干涉图。

5 高程相关大气误差去除。依据DEM和大气相位之间的关系，估计精化差分干涉图中大气误差相位，并将其从精化差分干涉图中移除。

4.3.2.4 PS点目标探测

1 一级PS候选点选取。针对不同波段SAR系统，根据振幅离差法、相干系数法、强度法、信噪比法、去旁瓣法或多种方法联合等方式，预设严格的阈值，筛选一级PS候选点，以提高不同场景下候选点的质量。

2 扩展PS候选点确定。在一级PS候选点的基础上，采用相同的选点方式，预设相对宽松的阈值，对PS点进行扩展，以增加PS点的密度。

3 DS候选点选取。对差分干涉图进行同质滤波，采用非参数双样本KS假设检验方法判断场景中每个点周围一定区域内的同质点，选取该点的同质点集合，利用这一点集合和相干矩阵估计法计算该点的复相干矩阵完成相位重建，获得优化后的相位信息。在此基础上预设时间相干系数阈值，将大于或等于阈值的点选定为DS候选点。

4.3.3.5 时空域形变估计

利用差分干涉图，通过形变模型构建、时空组网、稳健估计等去除大气、噪声等误差相位，获取时空域线性形变相位，如有要求还应考虑非线性形变相位，得到PS点目标的时序形变相位。PS-InSAR的计算步骤应满足以下规定：

1 一级PS点间参数估计。

1. 相邻点间参数估计。连接一级PS点，构成Delaunay三角网，并对剔除点间距离大于一定阈值的网络（阈值可设置为1000m），如若三角网密度不够，可对三角网进行加密，根据点目标间连接关系估计相邻PS点的相位差分。

条文说明：通常认为距离1000m以内的PS点的大气延迟效应一致，网络筛选的阈值可根据实际情况进行调整设置。

2) 线性形变和残余高程相位计算。根据空间基线和时间基线，建立PS点目标二维周期图，以此为目标函数模型估计相邻PS点间的线性形变速率和DEM误差，如有需求，可联合周期图法和稳健参数估计方法(如M估计)，以提高估计精度。

3) 非线性形变和大气相位估计。将2)中估计的相位从差分干涉图中移除，产生残余相位；对残余相位进行空间滤波，估计主影像大气相位，将其从残余相位中移除，得到新的残余相位；对新残余相位进行空间域低通滤波和时间域高通滤波，获得辅影像大气相位；将辅影像大气相位移除，分解出非线性形变相位。

2 扩展PS/DS点参数估计。与一级PS点估计类似，但扩展PS/DS点更加密集，构建弧段更多，易出现病态问题，宜采用正则化方法(如岭估计)进行参数估计。

3 时间序列形变相位计算。根据将(1)和(2)的线性形变速率和时间基线，估计每个PS点的线性形变时序相位，并与非线性形变时序相位相加，得到每个PS/DS点目标最终的时间序列形变相位。

## 4.4 角反射器辅助监测

**4.4.1 适用场景**

1 针对形变尺度较大、植被茂密等低相干甚至失相干研究区域的地表形变监测研究（道路边坡、地震、滑坡、地裂缝等）。

2 针对建筑物、大坝、桥梁等建构筑物形变监测，为了明确监测点位，提供稳定的监测点。

3 监测目标对监测精度要求高，通过角反射器辅助监测提高InSAR技术的监测精度。

**4.4.2 角反射器设计、制作与安装**

1 角反射器设计时需要根据反射雷达波的波长以及布设区域的环境特征，选择合适的角反射器类型和尺寸。

2 角反射器制作的需要综合考虑使用的材料、耐腐蚀性、平整度（详细见附录B）。

3 为了保障角反射器增强的效果，需要根据安装环境的背景反射强度、周边是否有干扰信号的物体、角反射器之间是否相互干扰等因素选择合理的布设安装点位，安装角反射器需要严格按照卫星的航向以及布设区域的地理坐标明确角反射器安装的朝向和方位向（详细见附录B）。

4.4.3 角反射器现场维护要求：

1 定期检查检查角反射器固定是否牢固、反射面是否保持整洁，编号是否清晰，角反射器内有无积水，对于存在积尘、积水的角反射器及时清理，并检查是否影响反射效果。

2 定期检查角反射器相邻反射面的夹角，角反射器法线朝向（需垂直卫星飞行方向）以及法线与水平面的夹角是否发生变化，角度变化超过1°时，需采取相关措施进一步加固角反射器。

3 对于损坏或失效的角反射器应及时更换，以确保监测数据的连续性和准确性。

4.4.4 基于角反射器的星-地交叉验证规则

1 角反射器布设的位置需要根据全站仪、GNSS等测量手段明确角反射器准确的地理坐标信息。

2 在卫星过境的当天进行地面测量，例如使用全站仪、水准仪或者GNSS测量设备对角反射器进行测量，得到地面测量数据，如天气等原因造成无法外业测量可在过境前后开展测量工作，测量时间与SAR影像获取时间控制在一周以内。

3 形变监测精度评估：将地面测量得到的角反射器沉降量与InSAR监测结果中提取的垂直沉降量进行对比，评估InSAR监测的形变精度。

4 定位监测精度评估：将测量得到的角反射器三维坐标与InSAR监测结果中提取的三维坐标进行对比，评估InSAR监测的定位精度。

对比分析结果，评估InSAR技术的形变监测精度与定位精度。如果地面测量数据和InSAR测量数据的结果非常接近，误差较小，则可以认为InSAR技术的测量精度较高；如果结果差异较大，误差较大，则需要进一步分析，找出误差来源并进行校正，以提高测量精度。

## 4.5 精度验证

**4.5.1** 利用地基实测数据对InSAR监测结果进行分析。地基实测手段理论精度应不低于InSAR数据处理理论精度。

**4.5.2** 精度验证宜选取地表监测点、既有建筑监测点两类分别开展。在已布设角反射器的条件下，宜优先选择角反射器地基实测数据进行精度验证，在未布设人工散射体情况下，为保证精度分析的客观和准确，约定邻近点原则（地表监测点宜设为80m，既有建筑监测点需根据高程信息及适当外扩的建筑矢量轮廓范围提取监测点），比较地基实测数据与InSAR监测结果的误差，精度评价指标包括：

1. 形变监测精度中误差应满足5mm/a。
2. 定位监测精度中误差应满足10m。

## 4.6 广域风险筛查

**4.6.1** InSAR监测技术宜优先选择房屋建筑以下部位的沉降数据进行分析：

a)单体建筑的外墙凸出处；

b)屋面与外墙交接处、屋面凸出处；

c)建筑抗震缝或沉降缝两侧的结构单元分隔处；

d)高低层建筑交接处。

**4.6.2** 结合InSAR技术特点及实际应用情况，本标准选取2项指标，即近3年累计沉降量、近2个月平均沉降速率，作为房屋建筑风险筛查标准，具体见表4.6.2。

表4.6.2 房屋建筑InSAR沉降监测风险筛查标准

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 筛查指标 | 规范值 | 筛查值 | 参考依据 |
| 1 | 近3年房屋累积沉降量/mm | / | 15～20 | 建议：填海区域、软弱覆土层较厚区域取高值；岩土条件良好区域取低值。 |
| 2 | 近2个月平均沉降速率/mm/月 | 4 | 2～4 | JGJ125-2016 危险房屋鉴定标准 |
| 累计沉降指房屋建筑PS点叠加后的计算最大沉降值； |

**4.6.3** 结合InSAR沉降监测结果，同时满足表4.6.1中2项指标的房屋建筑应进行现场核查，进一步确认安全风险。

# 5　空基区域巡检

## 5.1　一般规定

**5.1.1** 空基巡检监测内容划分如表5.1.1。

**表 5.1.1 空基巡检监测内容**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 类别 | 环境作用 | 结构变化 | 表观损伤 |
| 风 | 温湿度 | 周边环境 | 变形 | 几何形状变化 | 倾斜 | 裂缝 | 锈蚀 | 脱落 |  |
| 构件 |  |  |  | ☆ |  |  | △ | △ | △ |  |
| 单体建筑 |  |  | △ | ☆ | △ | ☆ | △ |  | △ |  |
| 建筑群 |  |  | △ | ☆ | △ | ☆ | △ |  |  |  |

注：☆为应监测项，△为宜监测项。

**5.1.2** 空基区域巡检系统应包括但不限于无人机系统、任务载荷、操作及通信系统。

## 5.2　无人机系统技术指标

**5.2.1** 无人机系统应配置无人飞行器、定位定姿系统、辅助系统，宜配置无人值守机库系统。

**5.2.2** 无人飞行器类型包括旋翼、固定翼和复合翼，驱动方式包括电池、燃料和混合驱动，基本技术指标应满足以下要求：

**1** 正常环境下任务载荷后滞空时间不少于30分钟；

**2** 除一体化机之外，搭载额外设备最大重量应不小于2.7kg；

**3** 升限不低于1000m，安全距离不小于3m，特种无人机设备除外；

**4** 旋翼和复合翼无人机具备悬停、上升、下降、前后移动及角度调整等动作功能，固定翼具备上升、下降、前后移动及角度调整等动作功能；

**5** 具备自动返航或自动降落功能。

**5.2.3** 定位定姿系统应配置全球导航卫星系统（GNSS）设备和惯性测量设备（IMU），技术指标应满足以下要求：

**1** 实时获得无人机系统的空间三维位置和姿态信息，延迟不超过1ms；

**2** 水平定位精度不低于0.05m，高程定位精度不低于0.08m；

**3** 平行飞行方向的角度偏差不超过90秒，垂直飞行方向的角度偏差不超过18秒。

**5.2.4** 辅助系统主要指三轴增稳云台，可包括辅助照明和安全防护系统。三轴增稳云台技术指标应满足以下要求：

**1** 支持俯仰、横滚和航向三个维度运动，定位准确度低于0.5秒；

**2** 最大承载重量不低于10kg；

**3** 工作环境温度指标为-20℃至60℃，湿度指标为95%不凝结，IP等级不低于无人机飞行器；

**4** 在任何姿态状况下，快装板不应滑出卡座；施加合适的力可将云台固定在任何角度；

**5** 其它性能指标满足《应用电视摄像机云台通用规范》（GB/T 15142-2017）要求。

**5.2.5** 无人值守机库技术指标应满足以下要求：

**1** 机库外壳具备防破拆、防盐雾能力，在如下环境条件下应能正常工作:

1. 环境温度:-20℃~50℃;
2. 相对湿度: 5%RH~95%RH:
3. 户外运行的机库防水防尘等级不低于 IP54。

**2** 机库应具备自检功能，包括机械控制、网络通讯、主备电源、环境感知、操控系统等项目，以及机库配套无人机自检项目。

**3** 任一项自检项目不满足要求时，应能定位故障部位或原因并生成自检日志，同时具备在机库控制系统发出提示和告警功能。

**4** 机库应具备环境感知功能，自动采集温度、湿度、雨量、风速、风向等传感器信息，可视频实时监控周边环境及机库工作状态。

**5** 机库应具备有线或无线通讯方式，宜具备多通道冗余通讯链路。

**6** 机库供电电源电压220V±10%，频率50Hz±2%。

**7** 机库连续无故障运行时间不应⼩于3000小时，正常维保状态下整体寿命不应⼩于 3 年。

**8** 机库应具备本地或远程升级功能，至少包含驱动程序和固件升级。

## 5.3　任务载荷技术指标

**5.3.1** 任务载荷采集的数据应满足后续技术处理的质量要求，否则应采取补测、重测等措施。

**5.3.2** 空基区域巡检系统中无人机任务载荷包括但不限于:

**1** 合成孔径雷达，包括GPR-SAR、InSAR、微波SAR等；

**2** 光谱采集设备，包括红外热成像、短波近红外多光谱及高光谱成像、近红外高光谱成像等；

**3** 高清相机，包括单目相机、双目相机、多相机组等；

**4** 激光设备，包括LiDAR、多普勒测振、激光介入诱导等；

**5** 云边缘计算组件。

**5.3.3** 合成孔径雷达技术指标应满足以下要求：

**1** 重量不应高于飞行硬件平台最大飞行荷载；

**2** 最高分辨率应优于（含）0.3m；

**3** 其他性能应满足表5.3.3要求：

**表5.3.3 合成孔径雷达性能基本要求**

|  |  |
| --- | --- |
| 指 标 | 传感器 |
| X波段InSAR | P波段SAR |
| 极化 | HH(或VV) | HH、HV、VH、VV |
| 作用距离 | ≥20km | ≥20km |
| 信噪比 | ≥7.5dB | ≥7.5dB |
| 峰值旁瓣比 | ≤-20dB | ≤-21dB |
| 积分旁瓣比 | ≤-13dB | ≤-16dB |
| 方位模糊比 | ≤-18dB | ≤-23dB |
| 距离模糊比 | ≤-20dB | ≤-23dB |
| 动态范围 | ≥70dB | ≥75dB |
| 后向散射 | ≤-20dB | ≤-23dB |
| 辐射校正 | ≤1dB | ≤1dB |
| 飞控定位精度 | 优于1m |

**5.3.4** 无人机搭载的短波近红外及近红外高光谱设备技术指标应满足以下要求：

**1** 光谱波长范围400~2500nm，光谱分辨率不低于20nm，像素扭曲不超过1像素；

**2** 设备重量不超过3kg，包含摆扫平台或摆扫镜头；

**3** 光谱采样间隔不超过2.4nm/像素；

**4** 数据传输采用硬件存储方式，待飞行任务结束后将数据从设备硬件中下载；

**5** 任务载荷的无人机飞行高度不低于30m，适于扫描的飞行速度控制在1m/s左右，最大飞行速度不超过7m/s。

**6** 红外热成像法检测建设工程质量缺陷用的红外热像仪，应能够自动检测目标表面的温度并形成热图像，热像仪应具备图像显示、存储和分析功能，使用户能够较为方便地生成检测报告。

**5.3.5** 无人机搭载的高清相机设备技术指标应满足以下要求：

**1** 高清相机的选择应根据摄区地形条件和成图精度要求确定，各类高清相机的基本性能宜符合表5.3.5规定；

**2** 拍摄静态目标物时，应使用光圈优先模式；拍摄动态目标物时，应使用快门优先模式。

**表5.3.5 机载高清相机的基本性能**

|  |  |
| --- | --- |
| 类 别 | 性 能 |
| 对焦方式 | 对焦无限远的定焦焦距镜头 |
| 快门速度 | ≥1/900s |
| 像元 | ≤10μm |
| 单个成像探测器面阵有效像素总数 | ≥2500万像元 |
| 航向60%重叠度的基高比（或旁向35%重叠度的宽高比） | ≥0.3 |
| 色差校正范围（波长） | 500nm～900nm |

**5.3.6** 无人机搭载的多普勒激光测振设备技术指标应满足表5.3.6要求：

**表 5.3.6 机载多普勒激光测振设备技术要求**

|  |  |
| --- | --- |
| 采样率 | ≥5MHz |
| 可检测振动频率 | 0~2.5MHz |
| 振动量测量能力 | 0~4.5m/s & 4.5m/s~20m/s |
| 振幅分辨率 | ≤40pm |
| 频率分辨率 | ≤0.01Hz |
| 激光测试波长 | 1310nm |
| 激光测试等级 | Class 1 |
| 可见光波长 | 655nm |
| 可见光等级 | Class 2 |
| 内置电池规格 | ≥4900mAh |
| 待机时间 | ≥4 hour |
| 工作环境温度 | 0~50u |
| 相对湿度 | 35%-85% |
| 可变焦调节 | 支持（手动） |
| PC联调 | 支持 |
| F28镜头 | 聚焦32~400cm，景深±10%焦距 |
| F28+F28镜头 | 焦距3.6mm，景深1mm |

**5.3.7** 无人机搭载的三维扫描激光雷达设备技术指标应满足以下技术要求：

**1** 测量坐标系统可采用国家坐标系、地方独立坐标系或假定坐标系。

**2** 测量相对航高应符合表5.3.7-1的规定。

**表5.3.7-1 机载激光雷达测量相对航高**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 成图比例尺 | 1:500 | 1:1000 | 1:2000 |
| 相对航高（m) | 10~500 | 500～1000 | 1000～2000 |
| 注：雷达的最小作用距离应大于1m。 |

**3** 机载激光雷达测量点间距和点云密度应符合表5.3.7-2的规定。

**表5.3.7-2 机载激光雷达测量点间距和点云密度**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 成图比例尺 | 测量点间距(m) | 点云密度/(点/m²) |
| 1：500 | ≤0.5 | ≥5 |
| 1：1000 | ≤1.0 | ≥3 |
| 1：2000 | ≤1.5 | ≥1 |
| 注：隐蔽或困难地区点云密度宜适当增加。 |

**5.3.8** 云边缘计算组件应满足以下技术要求：

**1** 支持跨平台部署，兼容Linux、Unix、Windows等主流操作系统；

**2** 计算能力应支持各种计算机硬件，包括但不限于CPU、GPU、FPGA等，支持数字、文本、图像等多种异构数据的处理和分析能力；

**3** 支持高性能计算和实时计算两种应用模式，支持计算节点扩展，能够实时对数据进行处理与分析；

**4** 支持各种深度神经网络框架，包括但不限于Caffe、TensorFlow、PyTorch、 PaddlePaddle等，可集成多个AI处理模块。

**5** 支持100/1000M自适应以太网、支持2.4G和5G 双频Wi-Fi，支持蓝牙5.0、4G、5G网络通信；

**6** 支持5ms以下的终端访问延时；

**7** 支持USB3.0、Type C、HDMI、串口等多种接口连接方式；

**8** 存储空间不低于32GB，支持存储空间扩展不低于512GB；

**9** 支持各种网络协议，包括MQTT、HTTP、TCP、UDP、WEBSOCKET；

**10** 具有防水、防尘、防震功能。

## 5.4　通信系统

**5.4.1**  通信系统应包括控制和非有效载荷通信(Control and Non PayloadCommunications,CNPC)，以及有效载荷通信。控制和非有效载荷通信包括飞行状态以及导航和遥测数据。有效载荷通信用于将有效载荷数据从无人机传输到地面。

**5.4.2**  通信数据链

**1** 无人机指挥控制 (command&control, C2)终端应包括机载数据终端（ADT）、地面数据终端（GDT）和天线。数据终端应包括射频通讯（RF）接收机和发射机、调制解调器；天线可使用全向天线或定向天线。

 通信接口要求：

**1** 接口通信包括常规接口通信、SDK 接口通信、飞行监管接口通信等。

**2** 接口之间通信宜采取特定协议进行封装，并具有数据校验功能和对流量、丢包与错包的监控功能。

**3** 对于某些需要防止恶意篡改的信息,如导航卫星信息、限飞数据等,系统应采取可靠的信息安全措施，如签名认证、信息加密等技术。

**5.4.3** 通信码率

**1** 旋翼无人机通讯链路的通信距离不应小小于无人机系统的有效作业距离，遥控遥测通信速率应≥9.6kbps，通信误码率应 ≤10-6，若通信受遮挡且无移动通讯信号，宜采用卫星通信链路，遥控遥测通信速率应≥9.6kbps。

**2** 固定翼无人机超视距、超链路作业应额外安置备份链路装置。

**5.4.4** 无人机通信信道频段宜采用2.4GHz，具体要求应采用符合工信部无线电管理局《无人机系统频率使用事宜》要求：

1 无人机系统的上行遥控链路应使用840.5～845MHz 频段，其中，841～845MHz也可采用时分方式用于无人机系统的上行遥控和下行遥测信息传输链路。

2 无人机系统下行遥测与信息传输链路应使用1430～1446MHz 频段，其中，1430～1434MHz 频段应优先保证警用无人机和直升机视频传输使用。无人机在市区部署时，应使用 1442MHz 以下频段。

3 无人机系统下行链路2408～2440MHz 频段，工作时不得对其他合法无线电业务造成影响，也不能寻求无线电干扰保护。

**5.4.5 通信协议**

无人机通信宜采用微型飞行器连接(Micro Air Vehicle Link，MAVLink)协议、远距离通信(Long Range Communication，LoRa)协议等通用协议。

**5.4.6** 起飞前应检查通信信号频段，一般情况下宜采用2.4GHz通讯链路，通信干扰比较大时宜采用窄带通讯链路。其他情况宜采用符合工信部规定无人机频段的通讯链路。通讯链路的通信距离不应短于旋翼无人机自主巡检系统的有效作业距离，遥控遥测通信速率应≥9.6kbps，通信误码率应 ≤10-6，若通信受遮挡且无移动通讯信号，宜采用卫星通信链路，遥控遥测通信速率应≥9.6kbps。

**5.4.7** 无人机超视距、超链路执行任务时应额外安置备份链路装置，确保可以实时监控无人机状态。

**5.4.8** 配置RTK功能的无人机应检查并确保无人机正常接入网络RTK服务。

**5.4.9** 作业现场不应使用可能对无人机巡检系统通信链路造成干扰的电子设备，作业中应检查是否存在对无人机巡检系统通信链路造成干扰的异常信号。

## 5.5　测试误差及设备校准

**5.5.1** 空基区域巡检结果由无人机定位与任务载荷测量结果联合解算获得，系统整体误差由无人机定位系统、任务载荷等子系统误差组成。

**5.5.2** 子系统测量误差由系统误差、测量随机误差和人为粗差三部分组成，误差计算公式如下：

$$Z\_{sys}=Z\_{fix}+Z\_{ran}+Z\_{gro}$$

**5.5.3** 减小子系统测量误差的措施应包括但不限于：

1. 按照规定定期校准或检定无人机系统中GNSS、IMU设备和搭载设备，减少系统误差；

2.选用合适的测量技术方法减少系统误差；

3.采用交换或抵消方式取二次往复测量平均值减少系统误差；

4.采用同一方法多次测量结果的平均值作为测量结果降低随机误差；

5.按照规定对采集的测量数据进行预处理，剔除人为粗差。

**5.5.4** 在规定时期内应对空基区域巡检系统进行综合性能校准和传感器一致性检测，根据测量中误差结果和技术精度要求评估设备状况、工作环境和操作人员的适合性。

**5.5.5** 多传感器一致性检测内容应符合以下要求：

1.检测前，应对单传感器辐射和几何性能进行检测;

2.检测过程应在符合要求的检测场内通过检测飞行获取检测数据，检测结果应通过一致性程度进行衡量和评价。

3.检测的主要指标内容应符合下表5.5.5的规定

表5.5.5 无人机低空遥感监测的多传感器一致性检测指标内容

|  |  |
| --- | --- |
| 一致性类型 | 指标内容 |
| 激光雷达辐射一致性 | 反射率中误差 |
| 光学遥感传感器辐射一致性 | 稳定性、重复性 |
| 多传感器辐射一致性 | 反射率相关性、反射率相对中误差 |
| 激光雷达几何一致性 | 测距相对中误差 |
| 光学遥感传感器几何一致性 | 平均重投影误差 |
| 多传感器几何一致性 | 平均标定误差 |

**5.5.6** 空基区域巡检综合性能校验分为室内和室外二种模式，室外校验场和校验基准点布设方式应满足以下技术要求：

* 1. 几何校验时在校验场内布置的定标器采用无源三角形三面角反射器，角反射器需根据雷达系统技术参数专门设计并进行试验；
	2. 角反射器应沿距离向等距布设5~8个，如布设条件欠佳可移位布设，但沿方位向偏离范围不宜超过800m；
	3. 角反射器点按GNSS D级点的观测要求施测，角反射器的点位点为其三轴线的顶点，具体指标按GB/T18314的规定执行；

**5.5.7**综合性能校准应选取合适测量手段或标具作为测量真值，按照以下公式计算测量中误差绝对值和相对值：

**1** 绝对中误差：

$∆\_{i}=|i−i^{'}|$ **(5.5.7-1)**

$m=\sqrt{\frac{\sum\_{i=1}^{n}∆\_{i}^{2}}{n}}$ **(5.5.7-2)**

**2**  相对中误差：

$δ=\frac{m}{L}×100\%$ **(5.5.7-3)**

式中：$i、i^{'}$—分别表示测量值，真实值；

$L$——表示测量距离；

$ m$、$δ$——分别表示绝对中误差，相对中误差。

**5.5.8**可利用室外校验场进行各种环境工况下测量结果的校验和一致性评价，根据积累的数据误差范围推定合理的测量精度。

## 5.6　定位与坐标建立

**5.6.1** 一个测区或一个摄影目标宜采用统一的平面坐标系和高程基准。单体建筑检测时坐标系可选用WGS84全球统一坐标系、国家大地坐标系、独立坐标系或假定坐标系。建筑群检测时应采用WGS 84全球统一坐标系或国家大地坐标系。

**5.6.2** 无人机的定位

**1** GNSS定位解算宜采用RTK或PPK方法，测量精度等级要求不高时可使用GNSS数据。POS数据处理应包括GNSS差分计算和POS联合平差计算；

**2** 应检查GNSS信号是否失锁，无人机应接收到不少于8颗导航卫星信号，时间信号是否重复或者丢失，IMU数据是否正常和连续；

**3** POS系统联合平差精度应符合表5.6.2的规定：

**表5.6.2 POS系统联合平差精度**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项 目 | 平面位置 | 高程 | 侧滚角 | 俯仰角 | 航偏角 |
| 中误差 | 0.05m | 0.08m | 18″ | 18″ | 90″ |

**5.6.3** 地物的定位

**1** 地物的几何尺寸和形变尺寸

地物的几何尺寸和形变测量绝对中误差应满足对应任务载荷规定的测量精度等级要求，测量相对中误差应在1/500~1/50000范围内，计算方式参照5.5.4。

**2** 地物空间坐标定位

空间定位测量绝对中误差参照5.5.1,包括无人机自身定位误差、任务载荷系统误差、随机误差和人为误差，空间定位测量精度计算应按公式5.6.3计算：

$ \left\{\begin{array}{c}\&m\_{x}=\pm \sqrt{\frac{\sum\_{i=1}^{n}Δx^{2}}{n}}\\\&m\_{y}=\pm \sqrt{\frac{\sum\_{i=1}^{n}Δy^{2}}{n}}\\\&m\_{z}=\pm \sqrt{\frac{\sum\_{i=1}^{n}Δz^{2}}{n}}\\\&m\_{t}=\pm \sqrt{m\_{x}^{2}+m\_{y}^{2}+m\_{z}^{2}}\end{array}\right.$ **(5.6.3)**

**式中：**$∆x$**、**$∆y$**、**$∆z$**——检查点真实三维坐标与测量三维坐标的差值；**

**n——监测点个数，利用该公式进行精度的评定。**

**3** 基于概率统计的估值分析方式测量精度在训练集数据的准确率应不小于95%，测试集样本准确率应不小于85%，避免训练学习得到的映射关系模型在应用中出现过拟合或欠拟合情况。

## 5.7　巡检计划及保障措施

**5.7.1** 空基区域巡检工作流程见表

****

**5.7.2** 一般要求

**1** 无人机飞行作业前应仔细检查设备的状态是否正常，检查内容应逐项进行并确认，每项内容须两名操作人员同时检查或交叉检查。

**5.7.3** 人员要求

**1** 无人机作业人员应具备1年及以上相关工作经验，掌握无人机相关专业知识，熟悉GB/T 26859的相关规定。

**2** 无人机作业人员应按中国民用航空局相关规定，经专业培训通过技术部门的技能考核或考试合格后持证上岗。若需开展超视距飞行应取得相应无人机驾驶执照。

**3** 无人机作业人员不得在饮酒、吸毒、药物麻醉、头晕、乏力、恶心等其他身体状态不佳或精神状态不佳的情况下操控工作。

**4** 现场作业人员应携带无人机系统的操作手册、简单故障排查和维修手册、应急预案等文件。

**5** 设备的检查、使用、维护应按照操作岗位分工负责并且相互配合，由具备相应资格、有实践经验、能力较强的操作人员承担。

**5.7.4** 环境要求

根据掌握的环境数据资料和设备的性能指标，判断环境条件是否适合无人机的作业，如不适合，应暂停或取消作业。环境条件主要包括：

**1** 海拔高度和地形地貌条件；

**2** 地面和空中的风向、风速；

**3** 环境温度和湿度；

**4** 气象条件（光照、云高、云量）；

**5** 电磁环境和雷电；

**6** 周边建筑分布情况；

**7** 军事管辖区或禁飞区。

**5.7.5** 作业安全要求

**1** 无人机作业现场管理应明确现场负责人及安全负责人，应预先编制紧急情况下的安全应急预案。作业中出现以下异常情况应立即采取应急措施：

1. 若无人机及任务载荷出现故障或遇到天气异常突变，立即终止本次作业并进行返航操作。
2. 若作业人员出现身体不适等情况，应及时操控无人机安全降落并使用替补作业人员；若无替补作业人员，应终止本次作业；
3. 若无人机出现状态不稳、航线偏大等故障时应及时采取措施恢复正常状态或控制无人机降落；
4. 若任务载荷设备出现故障无法恢复，且影响飞行作业时，应立即终止本次作业，操控无人机返航；
5. 若无人机RTK信号失锁应检查差分数据链路，连续失锁1分钟后立即终止本次作业并进行返航操作；
6. 当无人机电压低于设置电压时立即报警并终止本次作业并进行返航操作，或者紧急情况下在就近降落点自动悬停降落；
7. 若无人机出现失去动力等机械故障时，应控制无人机在安全区域内紧急降落；
8. 如无人机通信链路丢失或发生坠机事故，及时根据机载定位机模块返回的定位信息查找无人机，并妥善保管好地面站日志信息。

**2** 无人机起飞和降落时，作业人员应与其始终保持足够的安全距离，不应站在其起飞和降落的方向前，不应站在无人机巡检航线的正下方。

**3** 燃料驱动无人机的加油和放油操作不应在雷电天气下进行，操作人员应使用防静电手套。

**4** 设备应集中、摆放整齐，设备周围30m$×$30m范围设置明显的警戒标志，作业现场应做好灭火、防爆等安全防护措施，严禁吸烟和出现明火。带至现场的油料应单独存放。

**5** 无人机对构件及单体项目进行检测作业时，无人机平台与检测目标距离不宜超过300m，不应小于飞行平台防碰撞安全距离。

**6** 无人机平台相对航高应根据无人机飞行升限确定，旋翼无人机升限不宜超过1500m，最高不应超过2000m；固定翼及复合复合翼无人机升限不宜超过2000m，最高不应超过3000m。

**5.7.6** 作业前数据准备要求

**1** 航线设计基础数据预准备工作应包括：

1. 准备航线设计所需要的巡检目标坐标、目标物清单；
2. 准备满足精细化航线设计的三维模型数据；
3. 校准三维模型精度，具体包括：1）数据预处理完成后，应采用控制点检查的方式检查点三维模型数据的精度；2）编写三维模型数据精度报告，保证三维模型数据的准确性和可用性；3）对于精度校验不合格的三维模型数据，应当重新进行采集或者使用控制点进行校正；
4. 导入或上传三维模型数据及巡检对象坐标数据至航线规划系统，注意检查并设置正确的三维模型数据投影坐标系；
5. 标记拍摄的关键部位；
6. 生成自动飞行轨迹，并根据作业安全需要，增加辅助航点，确保作业过程中航点之间的轨迹与三维模型保持安全距离；
7. 根据作业需求调整航点顺序；
8. 应确保相机参数设置合理，保证图像清晰、曝光合理；
9. 精细化拍摄时应平视拍摄，相机俯仰角宜设定在-10°至10°，具体以现场实际情况为主；
10. 目标设备应位于图像中间位置。

**2** 利用三维模型数据进行精细化航线设计工作应满足以下技术要求：

1. 倾斜摄影建立的三维模型用于工程巡检时，宜采用RTK或者PPK技术进行解算，保证数据的绝对精度；
2. 倾斜摄影影像航向、旁向重叠度应不低于80%，宜采用覆盖式或环绕式航线，部分复杂工程应在自动航线的基础上进行手动补拍；
3. 航点相机焦距应设置为无限远，朝向目标工程。

**5.7.7** 航线规划要求

**1** 区域巡检项目应保证设置的航线区域完全覆盖巡检区域，宜正视于巡检监测对象；

**2** 位移、形变监测内容应采用RTK或者PPK定位解算，保证无人机定位的绝对精度，宜定点悬停监测或匀速定航监测，飞行速度不应超过7m/s，宜正视于监测对象。

**3** 无人机飞行控制平台航线规划功能应满足以下技术要求：

1. 应支持KML格式的航线文件导入；
2. 应支持包括航点飞行、建图航拍、倾斜摄影、航带飞行在内的多种模式；
3. 应支持航线三维预览及风险点碰撞检测。
4. 应支持航线整体复制后修改，支持航线与飞行航迹的合并预览，支持不同工程的航线合并。

**4** 无人机飞行控制平台航点飞行功能应支持在线任务录制：能够记录飞行器当前的位置、云台角度、拍照动作并生成航点；通过示教飞行方式可创建自动化巡检航线。

**5** 无人机控制平台应支持可自由定制飞行航点的相关参数，至少包含拍摄点三维坐标、拍摄距离、相机俯仰角、飞机航向角、相机焦距、安全校验距离等参数。

**6** 无人机航线规划用GIS数据应满足以下技术要求：

1. 所提供的卫星影像底图分辨率应不低于0.5m，高程DEM数据精度应不低于±12m。
2. GIS数据应包含所在城镇区域的矢量路网、行政区域、建设工程定位及名称等数据。
3. GIS数据应包含高精度、小时级别天气预报数据。
4. GIS数据应包含各类空域管制区域矢量数据。

**5.7.8** 作业准备要求

**1** 应按照《一般运行和飞行规则》CCAR-91-R2要求提前向空域管理部门报备。

**2** 应根据作业项目和任务要求，选择合适机型，制定无人机作业飞行实施计划。

**3** 应根据作业项目需要，对作业区域及周围进行现场勘察，勘察内容包括地形地貌、气象环境、地表植被、周边机场、重要设施、建筑、障碍物等，为起降场地的选取、航线规划、应急预案制定、作业飞行实施等提供参考。

**4** 应提前做好巡检计划，充分掌握巡检线路及周边环境情况资料，检查巡检作业文件，对巡检航线进行仿真拟合。

**5** 应提前检查存储卡、电池、负载任务传感器健康状态以及无人机、遥控器等固件更新状态，应提前检查无人机以及支持作业的导航、基站、通信、动力和避障等系统是否正常。

**5.7.9** 现场作业要求

**1** 操纵旋翼、固定翼和复合翼无人机起飞后，作业人员应迅速远离无人机，单旋翼无人机螺旋桨旋转半径50m范围内不应有作业人员。

**2** 作业人员在视距内进行飞行操控时，应在视距范围内进行试飞，以观察无人机及任务载荷的工作状况；飞行时应密切观察无人机工作状况，监视无人机飞行参数，确保无人机及任务载荷工作正常，各岗位工作人员之间始终保持通信正常。

**3** 作业人员进行超视距飞行操控时，应密切监视无人机的飞行高度、飞行速度、飞行姿态等，同时应密切监视地面设备工作状态，一旦出现异常，应立即采取有效措施进行干预。

**4** 现场飞行作业应密切注意避障、大角度转角、急速升降等危险动作操作，在作业过程中应重点检查以下内容：

1. 检查无人机主动安全功能，确保没有被遮挡，且功能正常；
2. 对飞机各个模块进行检查，确保无异常且处于合适工作模式；
3. 确保电池温度高于15℃。

**5** 无人机返航降落时，应提前做好降落场地清理和飞行空域可能干扰源的检查工作，确保其满足降落条件。

**5.7.10** 作业完成后要求

**1** 无人机降落后应立即检查无人机、任务载荷外观及零部件状况，恢复储运状态并填写无人机系统使用记录。

**2** 燃油驱动无人机降落后应将邮箱内剩余油料回收并妥善存储，电池驱动无人机应将电池取出。

**3** 作业完成后应在现场对作业数据数量进行检查，核实有无漏拍错拍，如存在不合格数据宜修正航线重新执行巡检任务。

**4** 作业完成后应检查作业记录文件是否因光线、阵风影响而产生质量不佳等异常情况。

**5** 根据航线文件，结合照片GNSS信息，对所拍摄的影像文件重命名、分类归档，同时也应将审批文件、工作票单、航线信息库等资料一并归档。

**6** 无人机系统应定置存放，专人管理；系统各部分应定期进行维护保养，妥善保存维护记录。

**5.7.11** 其他

**1** 无人机巡检可定期巡检，构件变形、损伤监测每周至少一次，单体建筑巡检每月至少一次，建筑群巡检每季度至少一次，应根据工程需求和环境变化适当调整巡检频次；

**2** 地面基站使用注意事项应包括：

1. RTK基站的安装和摆放一定要保证与水平面相对水平，并且固定牢固；
2. 在开阔、不受无线电干扰的环境中使用RTK基站；
3. 在使用过程中应确保RTK基站天线水平面150°范围内无障碍物遮挡；
4. 基站架设完成后应对基站坐标设置进行校核。

**3** 应根据无人机及任务载荷的配置、性能指标及使用说明，编制无人机、任务载荷和主要部件的使用时间统计表，做好统计工作，防止因累积使用时间超过使用寿命二造成飞行事故。无人机主要部件使用时间统计表参见表格5.7.11

**表**5.7.11 **无人机飞行硬件平台主要部件使用时间统计表**

设备型号： 设备编号：

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 使用时间（年月日） | 飞行地点 | 任务性质 | 起飞时间 | 降落时间 | 飞行时间 | 时间累积 | 操控人（签字） |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 6 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| …… |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  备注： |
| 前期累积（h） |  | 本期累积（h） |  | 累积（h） |  | 审核人 |  |

5.8 精度要求

**5.8.1** 基于无人机倾斜摄影技术的违章建筑识别数据应符合下列要求：

**1** 识别空间分辨率不低于5cm，可识别最小违章建筑面积不低于1平方米。

**2** 每一航摄位置的影像数据至少包括一个俯视影像数据和多个侧视影像数据；

**3** 俯视影像数据的地面分辨率不低于表8中的数字正射影像数据地面分辨率，航向和旁向重叠度不小于65%;

**4** 侧视影像数据的像元尺寸不小于俯视影像数据的像元尺寸，倾角宜在30°～60°之间；

**5** 应提供必要的定位定姿参数；

**6** 影像清晰，色调均匀，色彩鲜亮，反差适中。

|  |
| --- |
| **表5.8.1 像控点和检查点点位测定精度要求** |
| 变形测量等级 | 点位中误差(mm) |
| 二等 | ≤1.0 |
| 三等 | ≤3.0 |
| 四等 | ≤6.0 |

**5.8.2** 基于无人机近景摄影测量技术的形变监测数据应符合下列要求：

**1** 影像数据应完整地覆盖像控点、检查点和监测点。单基线立体摄影时，两摄站点上的影像之间应100%重；多基线摄影时，同一摄线上的影像之间应至少 80%重叠，相邻摄线上的影像之间应至少 60%重叠。

**2** 摄取的影像应清晰完整，反差应适中，并应符合量测要求。

**3** 平面精度不低于2cm，高程精度不低于1cm。

**5.8.3**  基于机载LiDAR测量技术的形变监测数据应符合下列要求：

**1** 点云无明显异常噪声，满足应用要求。

**2** 平面精度不低于30cm，高程精度不低于20cm。

**3** 点云密度应符合表5.8.3要求，对于不符合要求的，将点云与影像套合进行复检。

 **表5.8.3点云密度质检窗口大小及窗口移动步幅**



**5.8.4** 采用无人机搭载高清相机进行建筑工程巡检的精度等级宜不低于表5.8.4的规定。

**表5.8.4 无人机搭载高清相机进行建筑工程巡检的精度等级及适用范围**

|  |  |
| --- | --- |
| 精度等级 | 适用范围 |
| 2 -10 mm | 建筑构件变形、损伤、裂缝、锈蚀程度等的监测 |
| 2-5 cm | 民用建筑、工业建筑、构筑物等单体建筑工程的巡检 |
| 0.5-2 m | 社区、街区、厂区、园区等建筑群规模的巡检 |

# 6　地基单体监测

## 6.1　一般规定

**6.1.1** 对既有建筑安全监测，可基于天基广域筛查和空基区域巡检的成果，对筛查出来的风险较高的单体建筑，开展地基单体监测。也可应建筑安全责任人或政府监管部门要求，直接对单体建筑开展地基监测。

**6.1.2** 在“天-空-地”安全监测技术中，地基单体监测是指利用固定在地表目标及周边或可在目标及周边移动的各类仪器设备及平台进行的监测。

**6.1.3** 地基单体监测适用的既有建筑，包括砖混结构、钢筋混凝土结构、钢结构和混合结构等结构类型，工业建筑、公共建筑和居住建筑等使用功能。

**6.1.4** 本章节为可与天基、空基协同工作的地基监测技术的要求，和天基的协同体现在建筑形变监测精度和频次上的协同，和空基的协同体现在对建筑表观属性和内在性态上的协同。本章未规定的地基监测技术，可参考相关规范执行。

**6.1.5** 地基监测测点应符合下列规定：

1 应反映监测对象的实际状态及变化趋势，且宜布置在监测参数值的最大位置；

2 测点的位置、数量宜根据结构类型、设计要求、施工过程、监测项目及结构分析结果确定；

3 测点的数量和布置范围宜有冗余量，重要部位宜增加测点；

4 可利用结构的对称性，减少测点布置数量；

5 宜便于监测设备的安装、测读、维护和替代；

6 不应妨碍监测对象的施工和正常使用；

7 在符合上述要求的基础上，宜缩短信号的传输距离。

**6.1.6** 地基监测设备应符合下列规定：

1 传感器的选型应根据监测对象、监测项目和监测方法的要求，遵循“技术先进、性能稳定、兼顾性价比”的原则；

2 宜采用具有补偿功能的传感器；

3 设备进场安装前，设备的合格证书、标定证书、铭牌标志、备件和附带技术文件应齐全；

4 应根据监测方法和监测功能的要求选择安装方式，安装方式应牢固，安装工艺及耐久性应符合监测期内的使用要求；

5 监测设备在投入使用前应进行初始值采集；

6 安装完成后应及时现场标识并绘制监测设备布置图，存档备查。

**6.1.7** 监测设备的性能参数应符合下列要求：

1 传感器的量程宜为满量程的80%~90%，且最大工作状态点不应超过满量程。

2 应根据监测参数和传感器类型选择适当的采样频率。当在对结构加速度等动态反应进行监测时，传感器采样频率应为需监测到的结构最大频率的2倍以上，采样频率宜为需监测到的结构最大频率的（3~4）倍。

3 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需要满足较高的线性度要求。

4 传感器应具有良好而稳定的灵敏度和信噪比。

5 传感器应具有良好而稳定的分辨率，且不应低于所需监测参数的最小单位量级。

## 6.2　监测内容

**6.2.1** 地基单体安全监测内容应综合既有单体建筑安全状态和应急处置所需的数据分析和评估等需求，以及所处的环境、地理位置和地质条件、使用功能以及重要性、结构型式、受力特点等因素综合制定监测方案，确定监测目的、监测内容、监测频率和持续时间。监测方案实施前应经充分论证。

**6.2.2** 监测工作宜按图6.2.2的实施流程进行。



图 6.2.2 监测实施流程

**6.2.3** 单体建筑监测内容可参考表6.2.3，对不同结构类型的代表性既有建筑，针对建筑环境作用、变形、应变及振动开展监测。

表 6.2.3 地基单体监测内容

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 环境作用 | 结构变化 | 表观与内部损伤 |
| 风 | 温湿度 | 竖向 | 水平 | 应变 | 裂缝 | 振动 |
| 老旧建筑 | △ | △ | ☆ | ☆ | △ | △ | △ |
| 高层建筑 | △ | △ | △ | ☆ | △ | △ | ☆ |
| 大跨空间结构 | △ | △ | ☆ | △ | △ | △ | △ |

注：☆为应监测项，△为宜监测项。

**6.2.4** 环境监测可分为风荷载监测和温湿度监测。

**6.2.5** 风荷载监测参数应包括风速和风向，可开展风压监测，并应符合以下要求：

1 风速仪应安装在工程结构绕流影响区域之外；

2 宜选取采样频率高的风速仪，且不应低于10Hz；

3 风速监测精度不宜低于0.1m/s，风速仪量程应大于设计风速，风向监测精度不宜低于3°。

1. 风压计的精度不宜低于满量程的±0.4%，且不宜低于10kPa。
2. 机械式风速测量装置和超声式风速测量装置宜成对设置。

**6.2.6** 温湿度监测参数应包括环境温度和湿度，并应符合以下要求：

1 温湿度测点宜共同布置，测点不宜少于2个；温度测点宜对称、均匀布置在温度梯度变化较大位置，宜反映结构竖向及水平向温度场变化规律；湿度计宜布置在结构内湿度变化大，对结构耐久性影响大的部位。

2 温度监测精度不宜低于±0.5℃，量程应不低于（-20℃，80℃），监测频率宜不低于1次/10分钟。

3 湿度监测精度不宜低于±2%RH，量程应不低于（12%RH，99%RH），监测频率宜不低于1次/10分钟。

**6.2.7** 变形监测可分为水平变形监测和竖向变形监测。

**6.2.8** 水平变形监测宜能及时、准确反映建筑水平方向变形，并符合以下要求：

1 水平变形可采用传感器监测、视觉识别监测等方法开展；

2 动态监测精度应不低于20mm，静态监测精度应不低于2.5mm，量程应不低于40cm，监测频率应不低于1次/天。台风期间，监测频率应不低于50次/秒。

**6.2.9** 竖向变形监测宜能及时、准确反映建筑整体及不均匀沉降，并符合以下要求：

1 竖向变形可采用静力水准和视觉识别等监测技术与方法开展，并宜结合建筑周边区域环境扰动情况进行测点布设；

2 监测点应不少于4个测点，有条件的情况下宜设置1个参考点，参考点宜布置于相对稳定区域；4个测点宜分别布置于4个角点，不规则建筑测点布置宜能实现对建筑各边界的监测。

3 动态监测精度应不低于20mm，静态监测精度应不低于5mm；量程应不低于40cm，监测频率应不低于1次/天。台风期间，监测频率应不低于50次/秒。

**6.2.10** 应变监测应实现对建筑关键受力构件应力增量的监测，宜结合新技术手段开展绝对应力监测。有条件的建筑，应结合施工监测或设计模型开展运营期应力监测。

**6.2.11** 应变监测应结合建筑计算分析开展，并符合以下要求：

1 监测点位数量应结合建筑重要性及设计文件开展，最不利受力构件、活荷载易引发较大应变变化构件及其他易损构件应布置应变测点。

2 监测精度应不低于10με，施工期布设的传感器量程宜不低于2000με，运维期布设的传感器量程宜不低于800με，监测频率应不低于1次/分钟。台风期间，监测频率应不低于20次/秒。

**6.2.12** 裂缝监测参数包括裂缝的长度和宽度。已发生开裂结构，宜监测裂缝的宽度变化；尚未发生开裂结构，宜监测结构的应变变化。

**6.2.13** 振动监测主要监测建筑正常使用期间的结构加速度，并基于加速度数据进行模态分析得到建筑结构动力特性参数。

**6.2.14** 加速度传感器的选用应满足以下要求：

1 对于基频较低的高层建筑，应选用低频动态频响较好的力平衡式或电容式加速度传感器；

2 对于自振频率较高的建筑，宜选用低频动态频响较好的力平衡式或电容式加速度传感器，亦可选用压电式加速度传感器。

**6.2.15** 加速度测点的布设位置应根据高层建筑动力计算结果和测试目的确定，并满足以下要求：

1 宜布置测点的位置：振幅最大和较大位置、各不同使用功能的最高楼层；

2 可合理利用结构的对称性原则，以达到减少传感器的目的；

3 宜避开结构振型的节点和反节点处；

4 已进行风动试验的高层结构，宜根据风洞试验结果布置测点。

5 加速度测点宜布置不少于2个楼层，宜选取顶层和转换层进行布置；每个楼层布置不少于3个测点，分别布置于楼层几何形心及两个主轴方向远端，对可能存在扭转效应的塔楼宜根据计算分析和风洞试验结果适当增加测点。

## 6.3 监测技术

**6.3.1** 地基监测技术分为接触式监测技术和非接触式监测技术，应综合建筑使用环境、监测内容和测点布设、数据分析与应用的要求选择确定。

**6.3.2** 风速和风向监测宜选用超声风速仪或机械式风速仪，处于台风区域的建筑宜选择三向超声风速仪，监测参数应包括脉动风速、平均风速、风向和风攻角等。

**6.3.3** 温度监测宜选用电阻温度计、数字温度计和光纤温度计，湿度监测宜选用工业级湿度传感器。

**6.3.4** 变形监测可选用位移计、静力水准仪、倾角传感器、视觉测量等方法法。

**6.3.5** 应变和裂缝监测可选用光纤类应变计、振弦式应变计、电阻应变计等应变传感器和视觉测量技术进行监测。其中，光纤类应变计适用于钢结构和混凝土结构，振弦式应变计适用于混凝土结构，电阻应变计适用于钢结构。

**6.3.6** 对于既有建筑群或单体建筑，可在无人机智能巡检的成果基础上，对关键位置处或宽度较大的裂缝采用传感器进行长期监测。

**6.3.7** 振动监测应包括振动响应监测和振动激励监测，振动监测的方法可分为相对测量法和绝对测量法。

**6.3.8** 振动监测相对测量法监测结构振动位移。

1）应设置有一个相对于被测工程结构的固定参考点；

2）被测对象上应牢固地设置有靶、反光镜等测点标志；

3）测量仪器可选择自动跟踪的全站仪、激光测振仪、图像识别仪。

**6.3.9** 振动监测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。

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；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；位移测量可选用电动位移摆速度传感器输出于信号放大器中进行积分获得位移值；

2）结构在振动荷载作用下产生的振动位移、速度和加速度，应测定一定时间段内的时间历程。

**6.3.10** 视觉测量技术通常由视觉感知器采集被测目标的特征图像后，依据先验知识或标准，对获得的被测目标特征图像通过图像处理分析得到的测量信息，做出判断和分析。包括单目视觉和双目（多目）视觉方法。

**6.3.11** 视觉监测宜选用工业一体化网络球型摄像机，图像分辨力不小于200万像素，帧率不小于30FPS，应配备以太网接口，并根据实际需要配备夜视功能或补光灯。

## 6.4 数据采集及处理

**6.4.1** 数据采集设备应考虑传感器的分辨率、信号类型、接口的兼容性，保证信号高信噪比、不失真，确保获得高质量、高精度的有效数据。动态信号应进行抗混滤波，满足采样定理。

**6.4.2** 数据采集可选用连续采集、触发采集和定时采集等方式，采集频率应满足实时报警、数据分析及应用的要求，可根据实际需求参照表6.4-1进行设置和调整。

表6.4-1 数据采集频率的选择

|  |  |
| --- | --- |
| 监测类别 | 采集频率 |
| 环境 | 温度 | 每10分钟1次 |
| 湿度 | 每10分钟1次 |
| 风速、风向 | 三向超声风速仪≥20Hz机械式风速仪≥10Hz |
| 响应 | 位移 | 动态：50Hz静态：1Hz |
| 应变 | 动态：20Hz静态：每小时1次 |
| 裂缝 | 动态：50Hz静态：每小时1次 |
| 振动 | 50Hz |

**6.4.3** 数据采集应考虑时间同步，时间同步精度应满足数据处理、数据分析及状态评估的要求。动态信号的时间同步精度不大于0.1ms，静态信号的时间同步精度不大于1ms。

**6.4.4** 数据传输宜优先选用稳定可靠的有线传输。当不具备条件或较为困难时，可考虑选用无线传输。有线传输应选用带宽高、传输距离远、可靠性高、抗干扰能力强的光纤传输，传输网络宜采用基于TCP/IP协议的光纤专网。

**6.4.5** 监测数据宜作为建筑全寿命周期数字档案永久保存。

**6.4.6**数据传输系统中应设计数据备份机制，以保证在传输线路故障时数据的完整性和可靠性。

（1）数据采集子站应至少保存最近30天的监测数据做备份。

（2）应设置足够存储容量的数据存储介质以满足连续观测需要，其容量应根据监测系统每天接收的数据量选取。

**6.4.7** 视频数据存储方式宜采用循环更新存储方式，普通视频存储宜不小于1个月，突发事件视频应进行转移备份存储并永久保存。

**6.4.8** 监测系统中存储数据的单位，宜采用国际单位制。数据的时间应采用公历，最低精度为秒。

**6.4.9**数据采集前，应对含噪信号进行降噪处理，提高信号的信噪比。

**6.4.10**数据分析处理之前，应正确处理粗差、系统误差、偶然误差等。

**6.4.11**应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，应剔除由监测系统自身引起的异常数据。

# 天-空-地一体化协同监测

## 7.1 一般规定

**7.1.1** 采用天基卫星遥感技术、空基无人机技术、地基传感器技术进行协同监测时，数据采集、处理等过程应分别满足第4章、第5章和第6章的相关规定。

## 7.2 协同场景

**7.2.1** 形变监测

**7.2.1.1** 采用天-空-地一体化协同进行形变监测时，应根据实际监测要求确定协同的监测手段种类及数量。可采用协同类型包括天-空协同、天-地协同、空-地协同和天-空-地协同等4种。

1. 对既有建筑进行建筑单体变形监测，宜采天-地协同、空-地协同或天-空-地协同。
2. 对既有建筑进行广域建筑群尺度变形监测，宜采用天-空协同、天-地协同或天-空-地协同。
3. 天-空协同由卫星遥感监测广域监测区域内整体形变，协同空基无人机在目标区域内细化监测形变，协同场景成果应满足城市广域显著形变快速筛选定位要求。
4. 天-地协同由天基卫星遥感监测广域监测区域内整体形变，协同建筑（群）周边或内部地面传感器进行遥感广域形变校验与修正得到建筑（群）连续形变，成果应满足建筑（群）连续中等精度形变监测要求。
5. 空-地协同由无人机监测建筑外观形变，协同建筑内部地面传感器监测建筑内观形变。协同成果应满足建筑单体内观及外观连续高精度形变监测要求。
6. 天-空-地协同由卫星监测广域整体形变，协同无人机进行目标区域细化外观形变监测，同时协同地面传感器监测目标区域建筑（群）内观形变，协同成果应满足广域建筑（群）大范围连续空间高精度形变监测要求。

**7.2.2** 缺陷识别

**7.2.2.1** 采用天-空-地一体化协同进行缺陷识别时，宜采用前置天基协同和空-地协同。

1. 当对可能导致既有建筑（群）产生缺陷的大幅变化区域进行筛查时，宜采用前置天基协同筛查。
2. 空-地协同由无人机监测建筑外观立面显著缺陷区域，协同可应用与建筑内部地面传感器量化监测建筑微小缺陷。协同成果应满足建筑（群）内观及外观缺陷识别监测要求。

**7.2.3** 表观性态识别

**7.2.3.1** 采用天-空-地一体化协同进行表观性识别时，应根据实际监测要求确定协同的监测手段种类及数量。可采用协同类型包括天-空协同、天-地协同、空-地协同和天-空-地协同等4种。

1. 对既有建筑进行建筑单体表观性识别，宜采天-地协同、空-地协同或天-空-地协同。
2. 对既有建筑进行广域建筑群尺度表观性识别，宜采用天-空协同、天-地协同或天-空-地协同。
3. 天-空协同由卫星遥感监测广域监测区域内建筑（群）几何形态及空间分布，协同空基无人机在目标区域内细化监测建筑群关键区域，协同场景成果应满足广域建筑群空间性态快速定位及建筑群局部细化形态监测要求。
4. 天-地协同由天基卫星遥感监测建筑（群）几何及空间性态，协同建筑（群）周边或内部地面传感器进行建筑（群）结构性态监测，成果应满足建筑（群）复杂结构性态广域快速监测要求。
5. 空-地协同由无人机监测建筑外观几何形态及振动性态，协同建筑内部地面传感器监测建筑精细化结构性态。协同成果应满足建筑单体整体高精度多参数结构性态监测要求。
6. 天-空-地协同由卫星监测广域整体几何及空间形态，协同无人机进行中观建筑（群）细化局部表观性态监测，同时协同地面传感器监测微观建筑（群）精细化结构性态监测，协同成果应满足广域建筑（群）大范围高精度表观性态监测要求。

## 7.3 协同数据管理

**7.3.1** 天-空-地一体化协同监测中各采集传感器应定期进行时间同步校正。校正周期宜根据传感器种类及协同监测系统传感器数量确定，不应超过6个月，宜为3个月。时间同步校正可通过监测协同系统内部时间进行或统一接入第三方时间同步平台。

**7.3.2** 卫星及无人机图像数据应统一各图像传感器基本格式，包括图像位深度及通道数。地面传感器数据应统一采集起始时间及信号采样间隔，即采样频率。

**7.3.3** 协同数据采集

1. 天基卫星遥感监测采集频率不应低于2~4周/次，总数量不应少于20幅。雷达遥感图像空间分辨率不应低于5米×5米，可见光图像分辨率不应低于3米×3米。
2. 空基无人机监测采集频率不应低于2~3天/次，搭载传感设备不宜低于3种。图像分辨率不应低于500万像素，视频采集帧率不应低于30FPS，激光雷达点云距离向误差不应超过厘米级。
3. 地基摄像头监测采集频率不应低于1小时/次，图像分辨率不应低于300万像素，视频采集帧率不应低于50FPS，位移计等传感器设备检测采集频率不应低于5分钟/次，GNSS等卫星定位设备通讯频率不应低于1分钟/次。

**7.3.4**  协同数据配准

1. 协同监测场景下各基在满足监测要求采集后，应进行协同数据配准。
2. 天-空协同数据配准时，卫星图像数据与无人机遥感图像不同尺度下配准精度应高于遥感数据最低空间分辨率，协同监测时间配准应满足小时级。
3. 天-地协同数据配准时，卫星图像数据与地面传感器空间位置不同尺度下配准精度不应低于分米级，协同监测时间配准应满足小时级。
4. 空-地协同数据配准时，无人机图像数据与地面传感器空间位置不同尺度下配准精度不应低于厘米级，协同监测时间配准应满足分钟级。
5. 天-空-地协同数据配准时，宜满足7.3.4条第a)、b)和c)款的要求。但在特殊协同应用场景或数据量不足条件下，配准要求可放宽5%-10%。

## 7.4 协同数据融合及评价

**7.4.1** 数据融合级别

1. 天-空融合形变监测场景宜采用特征级融合，表观性态监测场景宜采用特征级或决策级融合。
2. 天-地融合形变监测场景宜采用特征级融合，表观性态监测场景宜采用特征级或决策级融合。
3. 空-地融合形变监测场景宜采用特征级融合，缺陷识别宜采用数据级或特征级，表观性态监测场景宜采用特征级或决策级融合。
4. 天-空-地融合在形变、缺陷及表观性态场景宜采用决策级融合。

**7.4.2** 协同监测融合

1. 协同监测融合应在保留原有数据及特征的基础上提供新的信息。宜在现有监测结论前提下提升空间监测点密度、监测点监测量精度或额外监测信息。
2. 除特殊规定外，协同监测数据融合均须对融合结果进行评价，对于协同融合不满足规范的结果，应舍弃并重新考虑协同方案或数据融合层次。

**7.4.3** 协同融合评价

1. 协同数据融合应进行数据融合评价。
2. 数据融合评价宜按表2的指标体系进行。宜分为大类指标、一级指标和二级指标三级。大类指标宜分为正常使用问题、耐久性问题、安全问题。
3. 当协同数据融合不满足表7.4.3的二级指标要求时，应调整协同方案，重新进行数据采集和融合，直到满足要求为止。

**表**7.4.3 **数据融合评价指标**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **大类指标** | **一级指标** | **二级指标** | **备注** |
| 正常使用问题：**缺陷识别类** | 融合速度 | 双模态单次数据融合时间8秒内 |  |
| 三模态单次数据融合时间12秒内 |
| 融合后性能变化（50）【针对二分类问题，多分类问题见备注3】 | 查准率应相对提升5%及以上，宜提升10% |
| 查全率应相对提升5%及以上，宜提升10% |
| F1度量值应相对提升5%及以上，宜提升10% |
| AUC相对提高5%及以上，宜提升10% |
| 耐久性问题：**剩余寿命预测类** | 融合速度（20） | 双模态单次数据融合时间8秒内 |
| 三模态单次数据融合时间12秒内 |
| 融合后性能变化率（50） | 正确率相对提升5%及以上， 宜提升10% |
| MAE（平均绝对误差）相对降低5%及以上，宜降低10% |
| MSE（均方误差）相对降低5%及以上，宜降低10% |
| 安全问题：**形变监测类** | 融合速度（20） | 双模态单次数据融合时间8秒内 |
| 三模态单次数据融合时间12秒内 |
| 融合后性能变化率（50） | 正确率相对提升5%及以上，宜提升10% |

# 附录A　现有星载干涉SAR数据来源

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 卫星 | 所属国家机构 | 运行时间 | 轨道高度（公里） | 波段 | 可否编程 | 极化方式 | 侧视角（度） | 轨道倾角（度） | 重复周期（天） | 地面分辨率（米） | 存档情况 | 幅宽（公里） |
| ERS-1/2 | 欧空局 | 1：1991-20002：1995-2012 | 785 | C | 否 | VV | 23 | 96.49 | 35 | 25 | 全球覆盖20次以上 | 100 |
| JERS-1 | 日本 | 1992-1998 | 568 | L | 否 | HH | 35 | 98.16 | 44 | 25 | 全球覆盖5次以上 | 80 |
| Radarsat-1 | 加拿大 | 1995-2013 | 790 | C | 否 | HH | 23~65 | 98.6 | 24 | 8~30 | 部分地区覆盖 | 50~500 |
| ENVISAT-ASAR | 欧空局 | 2002-2012 | 800 | C | 否 | HH VV | 15~45 | 98.55 | 35 | 25~100 | 全球覆盖25次以上 | 100~400 |
| ALOS-PALSAR | 日本 | 2006-2011 | 700 | L | 否 | 全极化 | 8~50.8 | 98.16 | 46 | 10~100 | 全球覆盖15次以上 | 20~350 |
| Radarsat-2 | 加拿大 | 2007- | 798 | C | 是 | 单极化、双极化、全极化 | 23~65 | 98.6 | 24 | 聚焦: 0.25超级条带: 3条带: 5其他: 16~100 | 中国东部2007—2013年间多期存档 | 聚焦: 18超级条带: 20条带: 50其他: 50~500 |
| TerraSAR-X  | 德国 | 2007.6- | 514 | X | 是 | 单极化、双极化、全极化 | 20~55 | 97.44 | 11（单） | 凝视: 0.25聚束: 1条带: 3扫描: 18.5宽扫描: 40 | 大部分地区需要编程观测 | 凝视: 10聚束: 20条带: 30扫描: 150宽扫描: 270 |
| COSMO-SkyMed星座（4） | 意大利 | 2007.6/2007.12/2008.10/2010.11 | 620 | X | 是 | 单极化、双极化 | 16.36~52.06 | 97.86 | 16（单），1（2/3）(TanDEM) | 聚束: 1条带: 3,1，5扫描: 30宽扫描: 100 | 大部分地区需要编程观测 | 聚束: 7~10条带: 30~40扫描: 100~200 |
| Sentinel-1A/B（2） | 欧空局 | 1A:2014-1B:2016-2022 | 693 | C | 需协商 | HH＋VV，VV＋VH | 20.0~45.0 | 98.18 | 12（单）6（双） | 聚束: 5条带: 5×20扫描: 20宽扫描: 20 | 全球观测计划，每6天/12天1次同轨观测 | 聚束: 20条带: 80扫描: 250宽扫描: 400 |
| ALOS-2（PALSAR-2） | 日本 | 2014.5- | 628 | L | 是 | 全极化 | 8.0~70.0 | 97.9 | 14 | 聚束: 1×3条带: 3、6、10扫描: 100 | 全球观测计划 | 聚束: 25条带: 30~50扫描: 350~490 |

# 附录B 角反射器制作、设计与安装

**1 角反射器设计与制作应满足以下要求**

1. 角反射器应该保证反射率高，角反射器的主要作用是发射雷达信号，因此需要具备高反射率，角反射器的反射面一般采用金属或金属涂层的材料，例如铝板，
2. 角反射器应该保证耐久性高，角反射器需要经受住长时间的暴露在自然环境中的考验，因此需要具有较高的耐久性，可以长期使用而不受损坏。可以采用耐腐蚀的材料、耐高温的涂层等设计，以抵抗自然环境中的氧化、腐蚀等因素。

注：根据项目需求，综合材料方面的散射效率的考虑，一般选择角反射器直角边长为 1m 铝质材料，因为铝具有很高的介电系数，厚度为3mm，边侧加2cm折边增加强度，同时外加镀锌铁皮（1mm厚）以保护反射面（铝板），相接处采用三角钢和铆钉固定角反射器，埋设于水泥墩，既起稳定作用，也起定位作用。

1. 角反射器反射面严防刮花，螺丝、三角钢等附属零件需注意防锈，焊接部位需保证牢固，稳定。
2. 角反射器表面要求平整度高、光洁度好、硬度强等特点；
3. 角反射器各边边长、相邻反射面之间的夹角应满足设计要求，边长误差不超过1cm，角度误差不超过1°；
4. 为防止雨天角反射器积水，导致雷达信号反射强度降低，在角反射器的顶点处应预留钻孔（需避开像元中心），可以使雨水、杂物自动流出。

**2 角反射器选点和安装环境应满足以下要求：**

2.1 角反射器选点需满足以下要求：

1. 为了更容易辨认图像上的角反射器点，背景的反射率要与角反射器有一定差距，从而形成对比。例如附近最好不要有裸露的岩石、房屋等永久散射体。

注：根据项目需要，如果必须建立在建筑物上，建议安装在建筑物顶部中心位置，安装位置周边需满足无强反射体干扰，可以通过人工布设低反射地物，这样可以最大限度地保证角反射器的反射效果。

1. 安装点应呈“十”字形或者“井”字形布设，滑坡（边坡）中轴线应至少布设3个以上角反射器点，距离滑坡体不大于1km的稳定区至少布设2个角反射器点，尽量使角反射器的强反射能突出的显示在图像上；
2. 角反射器点应选在具有变形代表性的区域。
3. 角反射器点位应远离大功率无线电发射源和高压输电线，距离分别不小于200m和100m，对于多路径散射物体，距离一般大于100m；
4. 角反射器点位附近不应有强烈干扰卫星信号的物体，并应远离镜面建筑物，正对的坡面强反射体。
5. 角反射器点位的选择需要注意避免遮挡和干扰，以保证其正常反射雷达信号。
6. 基于SAR数据处理识别的PS点，保证角反射器点之间或者角反射器点与相邻的原始反射器之前的最大距离保持在1km的范围。
7. 对于研究区需要布设多个角反射器点位，需要考虑角反射器点之间保持适当的距离，避免角反射器点在SAR影像中的成像重叠和角反射器点强反射器特性相互影响。
8. 角反射器点位的选择要考虑当前和未来建设、运营影响，以避免遭到破坏。

2.2 角反射器安装需要满足以下要求：

1. 角反射器的朝向与雷达视线方向保持一致，这样才能使雷达的RCS（Radar cross Section Area，雷达散射截面面积）达到最大。角反射器的方位角与卫星的轨道倾角、角反射器所在的纬度有关。查询监测区域的卫星过境轨道参数，调整角反射器俯仰角、方位角、高度，严格保证角反射器能够最大限度的增强雷达反射信号。
2. 建设角反射器观测墩，观测墩是安装、固定角反射器，实现长期稳定观测的基础。为进一步与传统监测相互验证，在角反射器观测墩上预先埋入螺栓，作为水准点，以便于其它测量手段扩展和加密。
3. 对于需要与GPS联合监测的角反射器，需保证角反射器顶点与GPS监测点对应，以便于数据校核和融合。
4. 为保障现场活动人员的安全，避免误碰、误撞，对角反射器安装防护围栏，安装应考虑现场地形、表层土体条件，做到稳固、可靠。

# 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：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2）表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3）表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

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. 《xxx》GB xxx
2. 《xxx》GB xx

**中国工程建设标准化协会标准**

**既有建筑天-空-地安全监测通用技术规程**

**T/CECS xxx-202x**

# 条文说明

# 1 总　　则

**1.0.1**目前面对大规模的既有建筑监测项目相关分类监测技术已形成若干规范标准，但综合利用天-空-地各层次技术体系尚未形成相关标准。在卫星监测方面，已有规范以雷达遥感InSAR技术监测房屋形变为主，侧重方向主要为数据处理的流程规范化，缺乏针对房屋风险筛查的标准，且天基领域监测既有建筑主要技术手段为雷达遥感技术，缺乏光学、雷达遥感与GNSS导航定位技术的融合协同。在航空摄影测量方面，以无人机航摄为主，尚未纳入通航飞机等技术。在地基领域监测方面，现行规范侧重于单体建筑的单项监测技术，对大范围建筑群的快速监测技术介绍不多。制订本标准，就是对已分别形成一系列技术标准的天基、空基、地基领域进行技术手段和适用范围的完善，提高监测的效率和质量，以保证“天-空-地”安全监测技术在既有建筑安全管理的正确和成功应用。这项工作既有利于天-空-地各层次检测和监测融合协同的研究，又对既有建筑安全监测工作有直接指导意义。

**1.0.2**本标准重点针对我国广域既有工业与民用建筑群，将囊括监测系统的设计、实施、交付、运维和应用各个环节。此外，本标准的编制对其他类型建筑与基础设施的安全监测也具有一定的示范作用。

**1.0.3**既有建筑的安全监测工作应充分考虑监测对象及其所处环境，有针对性设置监测内容。

**1.0.4**　本标准的编制已参考国家和行业相关标准的规定。

# 3 基本规定

## 3.1　一般规定

**3.1.1** 天-空-地安全监测应包括基于卫星遥感技术的天基广域筛查、基于无人机载体的空基区域巡检和基于物联传感的地基单体监测，彼此相互配合形成天空地一体化监测体系。

**3.1.2** 全部既有建筑是指所有管辖、负责范围内的既有建筑。

**3.1.3**  因为天基监测技术尚无法做到对全部既有建筑的准确监测，故而需要对天基监测未覆盖和天基监测发现风险的建筑进行重点巡检。

**3.1.4** 该条引自《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014 条文5.1.3要求。并参考《高层建筑风振舒适度评价标准及控制技术规程》DBJT 15-216-2021条文3.0.1条文说明，对于高度超过100m的高层建筑或者高度超过60m的风敏感高层建筑，结构风振舒适度问题会更为突出。

**3.1.5** 本监测频率为最低监测频率要求，各单项监测内容需根据实际需要制定不低于本条要求的监测频率。

**3.1.6**  该条引自《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014 条文3.1.8要求。在国家标准中，该条为黑体字，即为强制性条文，必须严格执行。

**3.1.7** 该条引自《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014 条文3.1.9/3.1.10要求。

**3.1.8** 该条引自《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014 条文3.2.2要求，用以明确监测系统的完整功能组成。

**3.1.9** 该条引自《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014 条文3.2.5要求，原文中为“适时”，本监测系统中可以做到“实时”。当建筑服役使用若干年出现结构性能劣化后，可结合监测参数，采用有限元模型修正等方法对监测预警值做出适当修正。

## 3.2 监测内容

**3.2.1** 监测内容确定前，需收集、分析该建筑设计方案，对已竣工建筑应收集、分析该建筑竣工资料，并结合该建筑运维计划开展监测内容。本项条款旨在确保监测内容与工程实际紧密结合，严禁在不熟悉建筑设计、施工及运维现状的情况下制定监测方案。

# 6　地基单体监测

## 6.1　一般规定

**6.1.1** 本条明确地基单体监测和天基广域筛查、空基区域巡检的工作协同关系。

**6.1.2** 解释在“天-空-地”监测技术语境中“地基”的概念，避免和土木领域通常理解的地基基础概念混淆。

**6.1.3** 明确本章节适用对象，和3.1节内容一致，并进一步细化补充。既有建筑按结构类型分为砖混结构、钢筋混凝土结构、钢结构和混合结构，是因为这几类结构的监测内容侧重点不同，如砖混结构建筑的安全问题多为违规改扩建、受周边扰动的不均匀沉降和倾斜等，钢筋混凝土高层乃至超高层建筑的安全问题多为幕墙脱落和风振晃动等，大跨空间等钢结构的安全问题多为杆件弯折、节点松动等关键构件失效，混合结构的安全问题多为粘结界面脱粘等。

**6.1.4** 明确本章节的内容边界，重点介绍可以和天基、空基协同的地基监测技术。考虑到常规监测技术在《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014中已有介绍，本章节不再赘述。

**6.1.5** 该条引自《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014 条文3.2.6要求，规定了地基监测传感器的布置原则。

**6.1.6**  该条参考《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014 条文3.2.7/3.2.8要求和《结构健康监测系统施工及验收标准》T/CECS765-2020条文3.2.6。

**6.1.7**  该条引自《结构健康监测系统施工及验收标准》T/CECS765-2020条文3.1.4。

量程是指传感器的测量范围，如果被测物理量的变化值超过传感器的量程（俗称“爆表”），则传感器测量值无法准确表征被测物理量的真实变化；相反，如果被测物理量的变化远小于传感器的量程，则可能造成传感器测量值的分辨率不足，亦不能有效表征被测物理量的变化。

采样频率是指每秒从连续信号中提取并组成离散信号样本的采样个数，单位为Hz，根据香农定理，如对加速度等结构动态响应进行监测时，采样频率至少应为结构拟监测最高频率的2倍，否则测不到，为了避免混频现象，采样频率一般取拟监测最高频率的3~10倍。

灵敏度是指传感器对被测物理量变化的反应能力，其量纲是输出量与输入量的量纲之比。提高灵敏度，可得到较高的测量精度，但灵敏度愈高，量程越小，稳定性往往也会越差。在选择传感器时，应综合考虑灵敏度、量程和稳定性这三个参数。

分辨率是指传感器可感测到输入量最小变化的能力。当输入量变化超过某一增量时，传感器才能够感测到输入量的变化，该增量即称为分辨率。

## 6.2　监测内容

**6.2.1** 单体建筑监测的用途广泛，包括结构安全使用评估、结构设计验证、结构模型校验与修正、结构损伤识别、结构养护与维修以及新方法新技术论证等。本章节的单体建筑监测聚焦既有建筑安全管控需要，即对影响既有建筑安全运行的风险和建筑结构关键工程参数进行监测，为结构状态评估和安全事件应急处理提供现场实测数据。

**6.2.2** 参考《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014图3.4.9.

**6.2.3** 针对砖混结构、钢筋混凝土结构、钢结构和混合结构等不同结构类型的建筑监测，选择若干具有代表性的建筑进一步细化监测内容，如老旧建筑、高层建筑和大跨空间结构等。其中，老旧建筑是指高度不超过100m、建于2000年之前及环境存在较大风险、结构存在重大安全隐患的既有房屋，高层建筑指高度超过100米的建筑，大跨空间结构指跨度大于120m的网架及多层网壳钢结构、跨度大于60m的单层网壳结构和结构悬挑长度大于40m 的钢结构。

**6.2.5** 本条主要参考《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014第4.7节风及风致响应监测。风荷载是高层建筑的主要荷载之一，建筑结构风参数应通过监测自由风场的风速和风向获得。

**6.2.6** 本条主要参考《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014第4.4节温湿度监测。一方面，温度是建筑荷载之一，温度的时空演化对建筑结构响应和耐久性都将产生较大影响。另一方面，一部分对温度较为敏感的传感器，需由温度传感器提供可靠的温度补偿，以剔除温度效应的影响。

**6.2.7** 变形是结构设计的重要控制参数。《混凝土结构设计规范》GB50010条文3.4.1规定，在正常使用极限状态下，对需要控制变形的构件，应进行变形验算；条文3.4.3规定了受弯构件的挠度限值。《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3条文3.7.3规定楼层层间最大位移与层高之比的限值。《危险房屋鉴定标准》JGJ125条文4.2.1规定，当单层或多层房屋处于自然状态时，地基沉降速率连续两个月大于4mm/月，并且短期内无收敛趋势，应评定为危险状态。

**6.2.8** 有建筑水平变形监测可采用基于计算机视觉的识别方法和基于传感器的监测方法，视觉识别方法是在近期快速发展的计算机视觉技术基础上，利用固定摄像头搭载智能识别算法来识别建筑水平变形；基于传感器的监测方法是通过倾角仪或加速度计等传感器识别的参数，结合结构特性换算得到。

在台风期间监测建筑振动位移，可用于识别建筑结构模态（频率、振型等），振动位移的采集频率应在被测物理量预估最高频率的5-10倍以上。

**6.2.9** 建筑竖向变形监测相对成熟的技术有水准测量技术和全站仪监测技术，新监测技术有基于计算机视觉识别方法的建筑沉降监测技术。

**6.2.10** 应变监测旨在通过监测构件在荷载作用下的应变量来实现对建筑整体受力状态的监测，现有监测技术已基本实现对建筑增量应力的监测。然而，仅监测增量应力并不能完成掌握建筑受力状态，结合施工监测情况开展建筑绝对应力监测具有现实意义。

**6.2.11**  应变监测测点布置宜通过数值计算确定，针对易损构件及重要性较高构件开展应变监测。

**6.2.12** 本条参考《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014条文4.3.15.通过监测裂缝长度、宽度和扩展速度，可以为建筑评级提供依据，同时反映结构局部刚度退化情况。

**6.2.14** 本条沿用《广东省标准高层建筑风振舒适度评价标准及控制技术规程》DBJ/T 15-216-2021第5.4.4条规定。

**6.2.15** 本条（1）-（4）点沿用《广东省标准高层建筑风振舒适度评价标准及控制技术规程》DBJ/T 15-216-2021第5.4.6条规定。第（5）点，广东省规程未明确“加速度测点宜布置不少于2个楼层，宜选取顶层和转换层进行布置”，本标准予以明确。

## 6.3 监测技术

**6.3.1**  介绍地基监测技术分类。接触式监测技术是指通过在被测结构物不同部位安装各类传感器，从而获得安装位置处相关测量信息的感知技术。非接触式监测技术是指在仪器的感受元件不与被测物体接触的情况下得到物体参数信息的测量技术。

**6.3.2**  本条参考《公路桥梁结构监测技术规范》 JT T 1037 2022条文8.2.2。

**6.3.3**  本条参考《公路桥梁结构监测技术规范》 JT T 1037 2022条文8.2.5、8.2.6。

**6.3.4**  本条参考《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014条文4.3.2、《公路桥梁结构监测技术规范》 JT T 1037 2022条文8.2.9。

**6.3.5**  本条参考《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014条文4.2.1、《公路桥梁结构监测技术规范》 JT T 1037 2022条文8.2.10。

**6.3.6**  介绍地基监测和空基监测的协同。

**6.3.7**  本条参考《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014条文4.5.1、4.5.2。

**6.3.8**  本条参考《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014条文4.5.3。

**6.3.9**  本条参考《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014条文4.5.4。

**6.3.11**  本条文参考《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T1037-2022条文8.2.16。

## 6.4 数据采集及处理

**6.4.1**  本条文参考《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T1037-2022条文8.3.2。

**6.4.2** 该条文参考《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T1037-2022条文8.3.6.

**6.4.3**  本条文参考《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T1037-2022条文8.3.5。

**6.4.4**  本条文参考《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T1037-2022条文8.4.2、8.4.3。根据工程实际需要，可选择一种或多种传输方式进行组合使用。

**6.4.5** 本条文引自《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T1037-2022条文10.1.6。在条件许可的条件下，监测数据宜永久保存，用于后期建筑结构性能变化后的对比分析。

**6.4.6**  本条文引自《结构健康监测系统设计标准》CECS 333-2012条文5.1.8。为保证数据传输线路故障时监测数据的完整性和可靠性，应设计数据备份机制。数据发送端应保存一定时长的监测数据作为备份。具体时长应大于故障发生后维护人员现场处理的时间。

**6.4.7**  本条文参考《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T1037-2022条文8.5.6。

**6.4.8**  本条文引自《结构健康监测系统设计标准》CECS 333-2012条文4.2.5/4.2.6.监测数据建议长度单位为米(m)，时间单位为秒（s），温度单位为摄氏度（℃）。

**6.4.9** 本条文引自《结构健康监测系统设计标准》CECS 333-2012条文4.2.1。

**6.4.10** 本条文引自《结构健康监测系统设计标准》CECS 333-2012条文4.2.2。粗差即粗大误差，是指比在正常观测条件下所可能出现的最大误差还要大的误差；系统误差，是在相同的观测条件下，对某量进行一系列观测，出现符号和大小均相同或按一定的规律变化的误差；偶然误差，是在相同的观测条件下，对某量进行一系列观测，出现符号和大小均不一定的误差。剔除粗差，保证监测数据的准确可靠；对于观测值中的系统误差，应尽可能按其产生的原因和规律加以改正、抵消或削弱；增加测量次数，减小偶然误差。数据净化，需要结合科学分析和经验判断并有确切依据，否则应慎重进行，避免损害正常信号。

**6.4.11**  本条文引自《结构健康监测系统设计标准》CECS 333-2012条文4.2.3。对短时间内频繁发生的异常数据进行报警，要求现场技术人员查看现场状况、检查传感器的工作状态以及相应传输线路和数据采集硬件的工作状态，但采集系统仍正常工作。在此过程中，对偶然的、瞬时的异常数据一般不作处理和存储。

# 7 天-空-地一体化协同监测

## 7.5 数据融合

7.5.3 1、如图1所示数据级融合过程直接在采集的原始监测数据层上进行融合，在多源数据未经预处理前进行数据关联和分析，融合之后进行特征提取，能够最大程度地保留原始数据的特征，也能提供较多的细节信息。2、如图2所示特征级融合过程分为三个步骤。首先对监测数据进行特征提取；其次，按照特征信息对多源数据进行分类、聚类和升维等综合处理，产生特征矢量；最后，采用特定的方法或技术融合这些特征矢量做出相关决策。3、如图3所示，决策层融合过程从具体决策问题需求出发，充分利用特征级所提取的各类特征信息，进一步进行分析、推理、识别和判决等。