CS 03.100.50

C 01

**DB13**

河 北 省 地 方 标 准

DB13/T XXXX-2025

城市轨道交通隧道结构智能健康监测技术规程

Technical Specification for Intelligent Monitoring of Structural Health of Urban Rail Transit Tunnels

（网上征求意见稿）

2025 - XX - XX 发布 2025 - XX - XX 实施

河 北 省 市 场 监 督 管 理 局 发 布

目 次

[前 言 II](#_Toc195685434)

[1 适用范围 1](#_Toc195685435)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc195685436)

[3 术语和定义 1](#_Toc195685437)

[4. 基本规定 3](#_Toc195685438)

[5 监测内容与方法 6](#_Toc195685439)

[6 监测数据获取 13](#_Toc195685440)

[7 监测数据处理 20](#_Toc195685441)

[8 预警 21](#_Toc195685442)

[9 监测数据管理 24](#_Toc195685443)

[10 监测系统管理与维护 26](#_Toc195685444)

[附录 A 29](#_Toc195685445)

# 前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由河北省住房和城乡建设厅提出并归口。

本文件起草单位：石家庄铁道大学、河北冀科工程项目管理有限公司、石家庄市交通投资开发有限公司、中铁隧道局集团有限公司、北京市政建设集团有限责任公司、河北省市场监督管理局技术评价中心、石家庄市轨道交通有限责任公司、石家庄市高速公路集团有限公司、石家庄市衡昔高速公路建设管理有限公司、河北省公路事业发展中心、太行城乡建设集团有限公司、石家庄市公路桥梁建设集团有限公司第二分公司。

本文件主要起草人：吴立朋、郭建明、白雪飞、胡指南、刘志春、张建超、张全秀、宋俊岭、焦剑、王永刚、徐飞、张骞、翟江、刘志永、刘强、王文正、梁肖然、娄金佩、韩伟歌、张志伟、杨会军、贾世迎、马凯蒙、何红员、张立欣、张世清、张振波、冯丽霞、程海维、姚舜元、于华宾、牛跃辉、林雪冰、刘康、高尚、李彪、郄兵伟、张志强、管海宁、马识途、王明亮、王鑫、高军伟、崔向兵、樊浩博、高新强、孙明磊、柳进峰、张艳青、宋翔宇、吕栋、王义超、管忠正。

城市轨道交通隧道结构智能健康监测技术规程

# 1 适用范围

本文件给出了城市轨道交通隧道结构设施运营期的智能健康监测内容与方法，规定了监测数据的采集与处理、监测预警以及监测数据的储存与管理等方面的技术要求。

本文件适用于河北省城市轨道交通隧道结构设施运营期的智能健康监测，除应符合本规范的规定以外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。其他行业隧道的智能健康监测可参照此文件执行。

# 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 7408.1 日期和时间 信息交换表示法 第1部分：基本原则

GB/T 30269 信息技术 传感器网络

GB/T 31168 信息安全技术 云计算服务安全能力要求

GB/T 32630 非结构化数据管理系统技术要求

GB/T 34068 物联网总体技术 智能传感器接口规范

GB/T 50308 城市轨道交通工程测量规范

# 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

## 3.1

城市轨道交通 **Urban rail transport**

采用轨道结构进行承重和导向的车辆运输系统，依据城市交通总体规划的要求，设置全封闭或部分封闭的专用轨道线路，以列车或单车形式，运送相当规模客流量的公共交通方式。

## 3.2

主体结构 **main structure**

隧道用于承担外部荷载的主要构件，主要是混凝土或钢管片。

## 3.3

隧底结构 **bottom structure**

隧道底部支撑列车运行的结构构件，主要是道床板及轨枕。

## 3.4

附属设施 **ancillary facilities**

隧道内满足疏散、逃生、指示等功能的非主要受力构件，主要是联络通道、疏散平台、烟道板、口子件、中隔墙等。

## 3.5

常规监测 **routine monitoring**

为全面掌握运营隧道结构的变化情况，在隧道全生命周期内开展的隧道结构监测工作。

## 3.6

特殊监测 **special monitoring**

为掌握隧道结构病害段及隧道结构受保护区工程影响段的变化情况，在一定周期内开展的隧道结构监测工作。

## 3.7

智能监测 **intelligent monitoring**

采用测量仪器或传感器，以自动或人工辅助方式获取监测数据，通过数据传输、智能处理及大数据分析，实现城市基础设施安全状态识别或预警的过程。

## 3.8

隧道结构智能健康监测系统 **intelligent health monitoring system for tunnel structures**

利用布设于隧道现场和监控中心的各类传感器、数据采集与传输、数据处理与管理、数据分析与应用的硬件设备和配套的软件模块，实时获取隧道服役环境、作用、结构响应与结构变化数据，借助人工智能、大数据技术，实现隧道结构异常状况自动化预警，以及结构状态和安全智能化评估的系统。

## 3.9

周边环境 **surrounding environment**

影响城市轨道交通隧道结构正常运营的建（构）筑物、道路、桥梁、隧道、地下管线、河流湖泊以及其他公共设施和市政设施的总和。

## 3.10

边缘存储与计算 **edge storage and computing**

将监测数据存储和计算放置在靠近采集端或用户端的工作方式，可以提高数据处理效率，并满足实时性、安全性和隐私保护的需求。

## 3.11

采集网关 **acquisition gateway**

连接由传感器网络结点组成的区域网络和其他网络的设备，可以把传感器采集到的数据，经过处理后将数据转换成适合传输的格式，并通过有线或无线方式将数据发送到后端系统或云平台。具有协议转换、控制设备管理、数据处理与格式交换、边缘计算处理等功能。

## 3.12

数据预处理 **data preprocessing**

指在监测数据计算与分析之前，对数据进行的一系列必要操作，主要包括数据转换、数据提取、数据清洗、数据校验等过程。

## 3.13

预警策略 **forewarning strategy**

指基于城市轨道交通隧道结构监测数据处理与分析结果，按照相应预警标准要求，发现异常或危险状况并进行预警的流程方法。

## 3.14

控制值 **controlled value**

为保障城市轨道交通隧道结构安全，监控监测对象的状态变化，针对监测数据变化量所设定的异常或危险状态的限制值。

# 4. 基本规定

4.1 城市轨道交通隧道结构健康智能监测旨在运用适当的监测方法，并经过监测数据获取、处理及管理等监测过程，实现结构安全的智能预警，其组成结构见图1：



图1 城市轨道交通隧道结构健康智能监测组成结构

城市轨道交通隧道结构智能健康监测组成结构描述如下：

a) 监测对象的结构安全监测内容包括环境参数、外部作用、结构响应与变化等类别，如温度、湿度、降雨量、地震、撞击、竖向位移、水平位移、变形、应力等；

b) 监测方法包括接触式测量法、非接触式测量法、内埋式测量法等类别，如智能全站仪测量、全球卫星导航系统(GNSS)测量、分布式光纤测量、三维激光扫描测量、视觉测量、合成孔径雷达测量等；

c) 智能监测过程包括：数据获取、数据处理、监测预警、数据管理等组成部分，各部分描述如下：

1) 监测数据获取：采用仪器设备得到监测数据的过程；

2) 监测数据处理：将监测原始数据转换为成果数据的过程，包括数据预处理、数据计算、数据分析等；

3) 预警：监测数据的特征指标达到或超过超限阈值时，按策略发出警报并采取相应措施的工作；

4) 监测数据管理：对原始监测数据、处理过程数据、预警数据的管理工作，涵盖数据存储、质量检查、数据共享交换、数据安全等方面。

4.2 下列城市轨道交通隧道工程项目宜开展结构智能监测：

a) 周边环境存在大面积降水、结构受力变化、地表荷载变化、土体扰动、振动、地质灾害等情况，对隧道结构安全有可能造成影响的；

b) 自身结构发生变形，存在结构安全风险的；

c) 所需监测的隧道作业环境复杂，需要监测的内容多、数据量大、数据处理分析要求高，不适于人工监测或通过人工手段无法满足轨道交通隧道监测频率要求的；

d) 大型城市轨道交通隧道的常态化结构安全监测；

4.3 城市轨道交通隧道结构智能监测宜根据工程设计要求、结构类型、周边环境风险影响程度、安全管理要求、现场工况以及成本控制等条件，合理设置监测内容与方法，并构建以自动化为主、人工为辅的智能监测系统。

4.4 宜依据自动化程度、数据处理决策能力等指标，将监测智能化程度分为三个等级：

a) 一级智能：需要通过人工辅助来完成操作或计算分析；

b) 二级智能：可以通过固定流程自动完成操作或计算分析，工作参数可根据工况配置；

c) 三级智能：可以通过配置流程自动完成操作或计算分析，工作参数可以根据工况自适应。

4.5 各监测过程的监测智能化等级划分见表1：

表1 监测智能化等级划分

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 监测过程 | 一级 | 二级 | 三级 |
| 数据获取 | 数据传感 | 通过人工读数或控制指令获得数据，无存储与数据计算功能 | 有数据存储与计算功能，支持成果计算、粗差剔除、数据过滤、数据压缩等边缘计算与数据边端备份存储 | 有自主学习与决策控制能力，根据关联数据的计算分析结果，自动调整工作参数，或具备故障自诊断与修复功能 |
| 数据采集 | 不具备数据计算储存功能，需要通过人工指令交互完成仪器设备的数据采集 | 有数据计算功能，支持监测数据边端预处理和传感器控制功能 | 支持机器学习和人工智能算法，通过不断学习和优化实现自适应采集监测数据 |
| 数据传输 | 非实时传输；单通信链路传输；需要人工辅助指示报警、修复故障 | 实时传输；支持通信链路传输质量指标参数的计算，并对传输故障进行指示报警 | 自适应传输；支持双通信链路，通信链路工作状态自动识别，并进行通信链路切换或故障修复后数据自动续传 |
| 数据接入 | 支持单一类型监测数据接入 | 支持多类型监测数据接入 | 监测数据自动识别接入 |
| 数据处理分析 | 数据预处理 | 人工辅助的数据预处理 | 处理流程与工作参数可配置的数据预处理 | 模型自优化的数据预处理 |
| 数据计算 | 单测项成果数据计算 | 多测项关联融合计算 | 可配置数据计算方案，多维度计算 |
| 数据分析 | 一维数据分析 | 多维度数据分析 | 可配置多类型、多维度数据分析 |
| 监测预警 | 单测项阈值预警 | 多测项组合预警 | 融合多专业知识模型的人工智能辅助预警 |
| 监测数据管理 | 数据存储 | 人工辅助完成监测数据备份与恢复 | 支持监测数据的自动备份与恢复；支持监测数据分级分类存储；支持监测数据分布式存储 | 基于数据特征自分析的优化存储；提供分布式弹性扩展，支持存储节点的动态管理 |
| 数据质量检查 | 人工辅助完成数据质量检查 | 工作流程固定的数据质量检查 | 工作流程与工作参数可配置的数据质量检查 |
| 数据共享交换 | 采用人工辅助的方式 | 数据共享交换自动化完成 | 支持数据共享源可参数化配置 |
| 数据安全 | 固定角色权限；具备日常数据安全的防护设备 | 可配置角色权限；具备敏感数据和重要业务信息数据的安全防护设备 | 具备核心数据和重要信息数据安全的防护设备；支持区块链的分布式数据安全；支持数据安全 风险的自动评估与报警 |

4.6 隧道开展监测前，应编制监测方案，监测方案宜包括下列内容：

a) 运营隧道概况；

b) 监测目的和依据；

c) 地质和环境条件；

d) 重点难点分析；

e) 监测对象、项目、精度要求、测点布设、方法、周期及频次、安全预警标准等；

f) 评价方法；

g) 监测信息反馈；

h) 监测应急预案；

i) 作业组织机构、人员、仪器设备；

j) 作业质量安全管理措施；

k) 附件，包括监测点布置图及大样图等。

4.7 应合理设置监测预警控制值，并根据监测数据对城市交通隧道结构进行安全性评估。

4.8 应综合调查城市轨道交通隧道结构年限、结构状况、地质条件、地质灾害、气象灾害等结构安全影响因素，进行城市轨道交通隧道结构安全风险评估，评估结果用于指导智能监测系统设计。

4.9 应建立统一的时间基准与空间基准，时间基准应采用北京时间，空间基准宜与CGCS2000坐标系、1985国家高程基准建立联系。

# 5 监测内容与方法

5.1 监测内容

5.1.1 监测内容应结合相关规范及行业要求，按照“针对性、适用性、经济性、可靠性、先进性”的原则，由管理部门、设计单位与监测单位共同确定。

5.1.2 监测内容设置的要求如下：

a) 监测内容应全面准确地反映城市轨道交通隧道结构运行状态以及周边环境对隧道结构产生的影响，满足对结构安全状态监控和预警的要求；

b) 监测内容之间宜进行相互验证，以确保监测数据的准确性和可靠性，提升监测过程的整体可靠性；

c) 根据周边环境和监测结构的变化情况、监测精度要求等，结合监测数据分析可动态调整监测内容。

d) 宜在城市轨道交通隧道结构设计阶段考虑建设期与运营期的监测工作，对需要智能监测系统的隧道结构，宜与隧道结构同时设计和施工，并同时投入使用。

5.1.3 城市轨道交通隧道结构监测可分为常规监测和特殊监测。

5.1.4 在下列位置应布设监测点或监测断面：

a) 地基或围岩采用加固措施的隧道区段；

b) 下穿或邻近重要建（构）筑物、地下管线、河流湖泊等的隧道区段；

c) 建设施工阶段发生过程较大扰动等区段；

d) 隧道洞门环内及环外应各布设1个竖向位移监测断面。

5.1.5 常规监测项目与监测点布设应符合表2 的规定.

表2 常规监测项目与监测点布设

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 对象 | 监测项目 | 监测点布设 | 监测断面间距 |
| 隧道结构 | 竖向位移 | 拱顶至少布设1个测点 | 盾构法隧道：10环～15环一个断面明（盖）挖法和矿山法隧道：竖向位移监测点每30m布设一个，变形缝两侧应布设监测点；净空收敛监测断面每60m布设一个 |
| 水平位移\* | 两侧边墙至少各布设1个测点 |
| 净空收敛 | 竖向或水平向至少布设1个测线 |
| 道床竖向位移\* | 道床两侧至少各布设1个测点 |
| 接缝变形 | - | - |
| 管节接头剪力键三向位移 | - | - |
| 联络通道、风井、泵站和迂回风道等附属结构 | 竖向位移 | 联络通道中部布设1个，联络通道和区间隧道连接处两侧各布设1个，风井、泵站和迂回风道等附属结构最少布设1个。 | - |
| 净空收敛 | 净空收敛监测断面在联络通道两端各布设1个。 | - |

注：带“\*”的内容为选测项目。

5.1.6 特殊监测项目与监测点布设宜符合表3 的规定。

表3 特殊监测项目与监测点布设

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 监测项目 | 监测点布设 | 监测断面间距 |
| 隧道结构 | 竖向位移 | 拱顶至少布设1个测点 | 盾构法隧道：5环一个断面明（盖）挖法和矿山法隧道：竖向位移监测点每30m布设一个，变形缝两侧应布设监测点；净空收敛监测断面每60m布设一个 |
| 水平位移 | 两侧边墙至少各布设1个测点 |
| 净空收敛 | 竖向和水平向至少各布设1个测线 |
| 道床竖向位移 | 道床两侧至少各布设1个测点 |
| 裂缝宽度 | - | - |
| 衬砌破损 | - | - |
| 钢筋锈蚀 | - | - |
| 应力应变 | - | - |
| 接缝变形 | - | - |
| 管节接头剪力键三向位移 | - | - |
| 振动 | - | - |
| 渗漏 | - | - |
| 塌陷 | - | - |
| 周边环境 | 温度 | - | - |
| 湿度 | - | - |
| 降雨量 | - | - |
| 地表沉降 | 垂直于隧道结构外边线两侧各50m范围内布设 | 5 m～10 m |
| 地下水位 | 各地下水层布设 | 15 m～25 m |
| 岩土体分层竖向位移 | 隧道影响范围内岩土层 | 与变形监测断面一致 |
| 岩土体深层水平位移 | 隧道影响范围内岩土层 | 与变形监测断面一致 |
| 爆破振动 | - | - |
| 地震动 | - | - |
| 联络通道、风井、泵站和迂回风道等附属结构 | 竖向位移 | 联络通道中部布设1个，联络通道和区间隧道连接处两侧各布设1个，风井、泵站和迂回风道等附属结构最少布设1个。 | - |
| 净空收敛 | 净空收敛监测断面在联络通道两端各布设1个。 | - |

5.1.7 特殊监测断面布设范围应覆盖隧道病害段，并至少向两侧各延伸20m。

5.1.8 特殊监测数据保持稳定三个月后，且控制保护区内无开挖卸载、堆载类施工时，可停止特殊监测。

5.1.9 监测频率应符合表4的规定

表4 监测频率

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 监测类型 | 隧道结构监测频率 | 周边环境监测频率 |
| 常规监测 | 安全等级 | 运营第一年1次/6月，运营一年后1次/12月 | - |
| 特殊监测 | 3级 | 1次/月 | - |
| 4级 | 1次/周 | 1次/周 |
| 5级 | 1次/天 | 1次/天 |
| 控制保护区施工期间 | 宜1次/天，不应少于1次/周 | - |

5.1.10 当遇到下列情况之一时，应提高特殊监测频率：

a) 监测数据变化速率持续增大；

b) 发生报警或突发结构病害等情况；

c) 地表、建(构)筑物等周边环境因不均匀沉降产生破损；

d) 暴雨、长时间连续降雨或隧道内因漏水导致洞内积水；

e) 在过江(河)隧道段，上部存在挖沙、疏浚河道。

5.2 主要监测方法

5.2.1 一般要求

5.2.1.1 应综合考虑项目特点、监测内容、监测精度及安全指标要求等因素，选用合适的城市轨道交通隧道结构智能监测方法，并按表1选用各监测过程适用的智能化等级。

5.2.1.2 监测方法的作业方式包括人工携带仪器量测、运动载体（无人机、无人车、遥感卫星等）携带仪器量测、现场埋设测量设备、人工巡视巡查等方式，宜根据工程需求选择适用的监测作业方式。

5.2.1.3 根据工程监测的需求，也可采用本文件规定之外的其它监测方法。

5.2.2 全站仪监测

5.2.2.1 全站仪可用于水平位移、竖向位移、净空收敛、倾斜、变形等监测内容的测量。

5.2.2.2 全站仪测量系统主要包括测量机器人、控制处理系统、通讯供电组件等，技术指标要求如下：

a) 测量机器人测距和测角标称精度应满足监测精度要求，且具备自动照准和指令控制功能；

b) 控制处理系统应具备远程控制与重启、采集模式配置、远程数据通信等功能；宜具备边缘存储与计算的功能，支持限差配置、超限检校、数据质量评价、粗差探测及简易平差计算等功能；

c) 宜设置双通讯链路和备用电源。

5.2.2.3 全站仪测量系统要求如下：

a) 应根据监测精度选定测量机器人、设计观测方法，并根据项目与监测现场要求，结合相关技术规范确定监测坐标系，宜与结构主变形方向保持一致；

b) 测量机器人应根据监测现场的通视环境，应安装在最有利于观测隧道结构主变形的位置；

c) 基准点应布设于变形影响区域之外稳固的位置，至少应有3个基准点，基准网应每半年复测一次；监测点应布设于反映监测体变形特征的位置；

d) 宜具备测点观测顺序可配置、测点监测数据异常自动复测等功能；

5.2.2.4 全站仪测量系统数据处理要求如下：

a) 应具有基准点自动联测、基准网稳定性判断功能；

b) 应具有对观测数据进行温度、气压、仪器加乘常数与倾斜改正等功能；

c) 应具有观测数据自动检核，超限数据自动处理，不合格数据自动重测，观测目标被遮挡时可自动延时观测等功能；

d) 应具有变形数据自动处理和检验、平差计算、精度评定、分析预警等功能。

5.2.3 全球卫星导航系统（GNSS）测量

5.2.3.1 GNSS可用于竖向位移、水平位移等监测内容的测量。

5.2.3.2 GNSS测量系统主要包括GNSS设备、服务器、通讯供电组件等组成部件，技术指标要求如下：

a) GNSS设备应根据观测等级、监测精度等要求进行选定，宜选用支持北斗导航定位系统在内的多模接收机，内置软件宜支持边缘存储与计算、远程配置管理功能；

b) 服务器可部署解算软件，并应支持采集数据的接收、存储和计算等功能；

c) 通讯供电组件宜配备备用电源和双通讯链路。

5.2.3.3 GNSS测量系统要求如下：

a) 参考站和监测站宜布设于交通便利、地面稳定、远离大功率发射源和反射卫星信号的位置，且参考站应选择在变形区域影响范围以外，且距离变形监测点的距离不应超过3km；

b) 设备安装宜采取加固防震、避雷接地、防水防腐等措施；

c) 应根据观测等级要求，选择静态测量模式或动态测量模式；

d) 安装完成后，宜进行系统联调测试，并验证解算成果数据是否满足监测精度要求。

5.2.3.4 GNSS 测量系统的数据处理要求如下：

a) 原始监测数据应进行数据质量检查，保证数据具有完整性、正确性和可靠性，并根据检查结果进行粗差剔除、噪声滤波等预处理；

b) 应根据观测等级和工程特点选择单基线解算模式、多基线解算模式或整体解算模式；

c) 基线解算完毕后应进行网平差。

5.2.4 分布式光纤监测

5.2.4.1 分布式光纤可用于温度、结构变形、应力应变、振动等监测内容的测量。

5.2.4.2 分布式光纤测量系统主要包括传感光缆、光纤解调仪、通讯供电组件等组成部分，技术指标要求如下：

a) 传感光缆应采用专用光缆，且满足工作温度、湿度、防水、防腐蚀、工作量程、分辨率、信号接口等工作参数的指标要求；

b) 光纤解调仪应满足工作波长范围、波长分辨率、测量距离、采集工作频率等技术参数的指标要求，宜支持边缘存储与计算、远程配置管理、连续采集、触发采集、故障报警等功能；

c) 宜设置双通讯链路和备用电源。

5.2.4.3 分布式光纤测量系统要求如下：

a) 宜根据工程项目特点、测量指标要求等因素，进行光纤测量系统的方案设计；

b) 传感光缆宜布设于结构敏感位置，并根据监测要求选择外敷式或内嵌式的安装方式，光缆接头处应做密封处理，并尽可能避免温度、振动等外接环境的干扰；

c) 系统安装完成后，应对监测精度进行校准，确保满足系统设计要求；

d) 宜定期对系统进行维护，定期检查传感光缆光路，减少光路故障对测量精度的影响。

5.2.4.4 分布式光纤测量系统的数据处理要求如下：

a) 应对原始测量数据进行粗差剔除、滤波去噪、缺失插值等数据预处理；

b) 应根据光纤传感类型与监测对象，选择适用的公式将原始数据转换为监测成果数据，并进行补偿修正；

c) 应对监测成果数据进行特征提取，评估被监测对象的结构状态。

5.2.5 三维激光扫描监测

5.2.5.1 三维激光扫描法可用于水平位移、竖向位移、净空收敛和渗漏等监测内容的测量。

5.2.5.2 三维激光扫描系统主要包括激光扫描仪、搭载平台、处理控制系统、通讯供电组件等，并满足下列要求：

a) 三维激光扫描仪的测量精度、测程、点密度等参数应满足监测需求；

b) 控制处理系统应具备项目管理、点密度设置、采集控制、数据存储、数据预览等功能；

c) 地铁监测宜采用移动式激光扫描，其他区域宜选择架站式激光扫描。

5.2.5.3 三维激光扫描系统要求如下：

a) 需绝对空间定位时应布设单独控制网或利用现有控制网，控制网布设和测设要求应符合GB/T 50308中相关规定，监测相对形变时可不布设监测控制网；

b) 应按下列步骤进行外业采集：架设扫描站（或平台）、建立扫描项目、设置扫描范围、设置采集分辨率、启动扫描；

c) 采用架站式三维激光扫描时，扫描站应设置在无振动且通视条件好的安全区域，相邻扫描站点间有效点云的重叠度不应低于 30%；

d) 采用移动三维激光扫描监测时，移动平台应运行平稳，匀速前进；

e) 采用绝对位置定位时，架站式扫描每站标靶不应少于4个，相邻两站的公共标靶不应少于3个。采用相对位置定位时，标靶可选择点云中有明显特征的点、线等来代替。

5.2.5.4 三维激光扫描系统数据处理要求如下：

a) 三维激光扫描数据处理宜包括配准、抽稀去噪、建模、特征提取分析等内容；

b) 根据作业方法不同，点云数据可通过控制网、隧道特征点、标靶进行配准；

c) 应根据点云数量及质量采用自动滤波、人工交互等方法进行点云抽稀、降噪处理；

d) 需进行面状变形分析时，应采用三角化等方法进行建模，并采用孔填充、边修补、简化和细化、光滑处理等技术手段对初步模型进行优化；

e) 采用图像识别算法进行病害识别提取，应制作数字正射影像，图像应无明显配准畸变，色彩应接近真彩色，纹理应清晰，反差应适中。

5.2.6 视觉图像监测

5.2.6.1 视觉测量可用于水平位移、竖向位移、净空收敛、倾斜、裂缝等监测内容的获取。

5.2.6.2 视觉测量系统主要包括摄像装置、控制采集设备、靶标、安装支架、光源、处理软件等组成部分，技术指标要求如下：

a) 宜具备自动光圈、变焦、昼/夜转换功能；

b) 宜具备边缘计算与存储功能，处理速度及能力应满足采样频率、测量精度等要求；

c) 宜具备遥测功能，可通过指令获取现场图片或视频。

5.2.6.3 视觉测量系统要求如下：

a) 应根据景深、物方视场、视场角、精度、最小靶标尺寸、位置测点、周边环境等情况选取相机安装位置；

b) 宜在相机景深范围内选取稳固的位置布设一个位移参考点；

c) 相机与靶标间应无遮挡，并应满足通视的要求；

d) 应对相机焦距、曝光参数等进行调整并对系统进行校准。

5.2.6.4 视觉测量系统数据处理要求如下：

a) 视觉测量系统数据处理宜包括图像滤波、图像增强、特征提取、目标识别与分析等内容；

b) 应根据图像的特性和处理目标选择滤波器，滤波操作不能损坏图像的轮廓及边缘；

c) 图像增强应避免局部增强过度或过弱，增强后的图像应具有良好的视觉效果；

d) 特征提取算法应具有稳定性和鲁棒性，能够应对不同环境和条件下的图像变化；应根据监测需求，利用提取结果开展行病害识别、形变分析等工作。

5.2.7 合成孔径雷达监测

5.2.7.1 合成孔径雷达可用于位移、挠度等监测内容的数据获取。

5.2.7.2 合成孔径雷达测量系统主要包括雷达主机、天线、控制采集设备、通讯供电组件等组成部分，技术指标要求如下：

a) 雷达主机与天线应满足成像精度、大小、采集频率、电磁辐射限制等要求；

b) 控制采集设备宜具备边缘存储与计算、工作参数配置、本地化解算等功能；

c) 通信供电组件宜支持远程数据通信，并配备不间断供电电源。

5.2.7.3 合成孔径雷达测量系统要求如下：

a) 宜根据监测精度、监测时长、监测频次、雷达波长等因素选择雷达设备，搭建测量系统；

b) 监测精度要求较高的工程，宜在被测区域设置角反射器增强反射信号；

c) 系统测量数据异常时，宜采用其它测量手段进行验证。

5.2.7.4 合成孔径雷达监测数据处理要求如下：

a) 数据处理应包括影像选取与配准、干涉图生成、形变参数估计、形变量计算等关键流程；

b) 宜根据监测对象、监测精度要求，选择适合的干涉影像处理方法；

c) 宜将雷达视线方向的形变量，映射到被监测对象主变形方向的形变量。

# 6 监测数据获取

6.1 测量精度与设备

6.1.1 环境与外部作用类测量精度要求见表5。

表5 环境与外部作用类监测内容和测量精度要求

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 监测内容 | 测量精度要求 |
| 1 | 温度 | ±0.5℃ |
| 2 | 湿度 | ±2.0%RH |
| 3 | 降雨量 | ±4.0%FS |
| 4 | 地表沉降 | ±1mm |
| 5 | 地下水位 | ±0.5%FS |
| 6 | 爆破振动 | 灵敏度：±0.1V/(m/s2) |
| 7 | 地震动 | 灵敏度：±0.1V/(m/s2) |

6.1.2 结构响应与变化类测量精度要求见表6。

表6 结构响应与变化类监测内容和测量精度要求

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 监测内容 | 监测设备 | 测量精度要求 |
| 1 | 竖向位移 | 压力变送器、激光位移计 | ±2% |
| GNSS | 满足JGJ8 中GNSS 设备标称精度指标 |
| 静力水准仪 | ±0.1mm |
| 全站仪 | 满足JGJ8 中全站仪设备标称精度指标 |
| 机器视觉 | ±0.1mm |
| 三维激光扫描仪 | 单点测量：1mm@50m |
| 2 | 水平位移 | GNSS | 满足JGJ8 中GNSS 设备标称精度指标 |
| 全站仪 | 满足JGJ8 中全站仪设备标称精度指标 |
| 机器视觉 | ±0.1mm |
| 三维激光扫描仪 | 单点测量：1mm@50m |
| 3 | 净空收敛 | 收敛计、激光测距仪 | ±2mm |
| 全站仪 | 满足JGJ8 中全站仪设备标称精度指标 |
| 机器视觉 | ±0.1mm |
| 三维激光扫描仪 | 单点测量：1mm@50m |
| 4 | 道床竖向位移 | 全站仪、静力水准仪、电子水平尺 | ±0.1mm |
| 5 | 衬砌应力应变 | 光纤布拉格光栅传感器 | ±5με |
| 应变计 | ±0.5% FS |
| 6 | 结构裂缝、变形缝张开量 | 测缝传感器 | 裂缝宽度测量精度：0.1mm;裂缝长度和深度测量精度：1.0mm |
| 7 | 隧道管片接缝张开量和错台量 | 测缝传感器、分布式光纤传感器、三维激光扫描仪、测量尺 | ±0.1mm |
| 8 | 沉管隧道剪力键三向位移 | 位移计 | ±0.1mm |
| 9 | 振动 | 加速度传感器 | 灵敏度：±0.1V/(m/s2) |
| 10 | 衬砌破损 | 游标卡尺、机器视觉 | ±2% |
| 11 | 钢筋锈蚀 | 腐蚀监测传感器 | - |
| 12 | 渗漏 | 容器、测量尺、机器视觉 | ±2% |
| 13 | 塌陷 | 测量尺、机器视觉 | ±2% |

6.1.3 传感与测量设备的选型要求如下：

a) 设备的精度、工作量程、采样频率、灵敏度、分辨率、线性度等性能指标应符合监测需求，且具有良好的稳定性和抗干扰能力，信噪比符合监测需求；

b) 物理输入输出接口、通信协议宜兼容常用接口规范，具备双向通信功能，应符合GB/T34068规定的相关要求；

c) 宜具备数据计算与存储的能力，支持自组网、自动补偿计算、滤波计算、采样频率自适应、软件自动升级、故障自诊断等功能；

d) 使用寿命应符合方案设计年限要求；

e) 应适应监测现场温度、湿度、气压、水汽、粉尘等环境条件；要根据监测环境选取合适的设备安装配件；

f) 应由具备相应资质的单位进行检定，并在安装前进行必要的标定、校准。

6.1.4 数据采集设备的选型要求如下：

a) 数据采集通信接口可以兼容多类型传感与测量设备的动态接入与数据采集，用于人工测量的便携数据采集设备，宜支持与智能手机采集程序的数据通信；

b) 数据上报通信接口宜支持常用通信协议规范，包括但不限于消息队列遥测传输协议(MQTT)、超文本传输协议(HTTP)、约束应用协议(CoAP)、Modbus；

c) 宜具备边缘计算、处理与存储的功能，支持协议转换、数据融合、本地计算、边端备份存储等功能；

d) 宜支持本地或远程的方式管理设备，且支持参数配置、在线状态查看、监测数据查看、数据重传、固件维护、故障报警、电源管理、日志管理等功能；

e) 宜保证采集设备标识的唯一性。

6.1.5 设备的安装要求如下：

a) 应根据监测项目、设备特性、建设进度、运营条件制定设备的安装方案；

b) 应以减少周边环境干扰、便于恢复利用为原则，不得损坏设施结构，不得影响设施的正常运行和使用；

c) 安装位置和顺序应按照设计要求执行，确保准确无误，传感与测量设备的安装位置应避开阳光直射处、易于结霜处、有腐蚀性气体处等位置，以防止设备受损或测量数据失真。且避免通信线缆与电力线、动力线使用同一配线管或配线槽；以避免潜在的安全隐患。采集设备安装位置应综合考虑传感与测量设备的埋设情况、施工条件等多重因素；确保设备安装稳固可靠，运行正常。

d) 在进行焊接方式安装时，应避免高温对传感设备的影响，为了确保设备安全，必要时应采取隔热措施，如使用隔热材料或隔热罩等，以防止高温损坏传感设备或影响其性能；在进行水下安装传感器时，应充分考虑水压对传感设备量程、防护等级的影响；应选用能够承受相应水压的传感器，并确保其防护等级满足水下使用环境的要求，以保证传感器在水下能够正常工作并准确测量。

e) 宜安装保护涂层、密封保护盒等设备保护设施。

6.1.6 监测设备安装完成后，需开展以下工作：

a) 应进行工作性能调试检核，初始值的获取可采用以下方式：

1)传感器进入稳定工作状态后，将人工测量数据与自动化采集数据进行互检，取3次以上正常测量数据的平均值；

2) 传感器进入稳定工作状态后，采集传感器至少48小时监测数据作为样本，剔除粗差后取平均值。

b) 应布设数据校核装置，张贴设备标识牌，包括设备类型、检定日期、埋设日期、施工单位、维护人员及联系方式等信息；对于易受环境影响或施工破坏的，应加装保护装置，张贴警示牌；

c) 应将现场设备布置图存档，并根据工程环境特点、传感与测量设备及数据采集设备工作特性制定周期维护方案，维护对象包括供电设备、通信设备、传感与测量设备、采集设备等；能够确保设备安全、稳定的运行，并满足工程环境特点和设备的工作特性。

d) 宜将监测点位信息、设备工作参数、监测方案、通信布线方案等核心数据信息，集成于建筑信息模型（BIM）、城市信息模型（CIM）、地理信息系统(GIS)三维信息系统中，以便于维护与查阅。

6.2 数据采集

6.2.1 一般要求

6.2.1.1 监测数据采集应能反映监测对象的变化规律，并保证数据的连续、完整，宜结合传感器、测量设备及数据采集终端的选型，按表1设计智能化程度较高的数据采集系统。

6.2.1.2 监测数据采集应采取串模干扰抑制、共模干扰抑制、屏蔽技术、防雷接地技术等抗干扰措施，以提高信噪比。

6.2.1.3 宜在采集终端或服务器备份存储原始监测数据，以确保在出现故障时能够回溯分析数据。

6.2.2 采集方式

6.2.2.1 数据采集方式分为人工辅助采集方式和自动化采集方式，其中人工辅助采集是指监测过程中需要人工操作控制测量设备来收集监测数据。

6.2.2.2 人工辅助采集方式的设备或系统要求如下：

a) 宜具有工程现场数据检核、数据计算、数据传输等功能；

b) 三维激光扫描、机器视觉、合成孔径雷达等设备宜具有一键式完成海量数据采集、存储、预览等功能。

6.2.2.3 自动化采集方式的设备或系统要求如下：

a) 宜支持触发采集、定时采集、召测采集、同步采集等多种工作模式，满足周期性和实时监测，并宜兼容处理多种监测信号；

b) 宜支持远程控制、在线数据查看、自动重启等设备控制功能；

c) 宜具有边缘存储功能，支持监测点位信息、工作参数信息、监测采集数据、项目信息等内容的本地化存储管理；

d) 宜具有边缘计算处理功能，支持粗差剔除、异常捕获、超限预警、特征计算、数据补偿改正等功能；

e) 宜支持监测数据的本地自动加密与备份管理。

6.2.2.4 自动化采集的数据宜与人工测量的数据进行比对，对监测成果数据进行质量校验。

6.2.2.5 监测数据的同步采集宜采用北斗卫星导航时钟同步技术，同步精度宜符合下列规定：

a) 动态监测变量的数据采集时钟同步误差小于0.1ms；

b) 静态监测变量的数据采集时钟同步误差小于1ms。

6.2.3 采集内容

6.2.3.1 监测数据采集项、度量单位可根据监测要求，参考表7进行设置。

表 7 监测数据采集项与度量单位

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 监测类别 | 监测内容 | 数据采集项 | 数据单位 |
| 环境与荷载类 | 岩土体深层水平位移 | 位移值 | mm |
| 岩土体分层竖向位移 | 位移值 | mm |
| 温度 | 温度 | ℃ |
| 湿度 | 相对湿度 | 百分比(%) |
| 降雨量 | 降雨量 | mm |
| 地表沉降 | 沉降量 | mm |
| 地下水位 | 水位 | mm |
| 车辆撞击 | 振动加速度、主振频率 | 加速度：m/s2频率：Hz |
| 爆破振动 | 振动加速度 | m/s2  |
| 地震动 | 振动加速度、主振频率 | 加速度：m/s2频率：Hz |
| 结构响应与变化类 | 管片结构竖向位移 | 竖向位移 | mm |
| 管片结构水平位移 | 水平位移 | mm |
| 管片结构净空收敛 | 关键断面水平收敛和竖向收敛值； | mm |
| 二次衬砌拱顶沉降 | 沉降量 | mm |
| 二次衬砌底板竖向位移 | 位移值 | mm |
| 二次衬砌净空收敛 | 关键断面水平收敛和竖向收敛值； | mm |
| 道床竖向位移 | 竖向方向位移 | mm |
| 应变 | 应变值 | με |
| 应力 | 应力值 | MPa |
| 结构裂缝、变形缝张开量 | 张开量 | mm |
| 盾构隧道管片接缝张开量和错台量 | 位移值 | mm |
| 沉管隧道剪力键三向位移 | 位移值 | mm |
| 振动 | 竖向振动加速度、横向振动加速度、纵向振动加速度、振幅、频率 | 加速度：m/s2；振幅：mm；频率：Hz |
| 衬砌破损 | 破损位置、破损面积、破损深度 | 破损面积：mm2破损深度：mm |
| 钢筋锈蚀 | 混凝土电阻率、腐蚀电位、腐蚀电流密度 | 混凝土电阻率：Ω∙m腐蚀电位：mV腐蚀电流密度：μA/cm2 |
| 渗漏 | 渗水量、渗漏面积 | 渗水量：L渗漏面积：mm2 |
| 塌陷 | 塌陷位置、深度、面积 | 深度：mm面积：mm2 |

6.2.3.2 监测数据采集时间格式应符合GB/T 7408.1格式要求。

6.2.4 采集频率

6.2.4.1 监测数据采集频率宜结合监测需求、设计方案、监测方案、风险等级、监测类型以及数据采集、传输、处理和管理能力综合确定。

6.2.4.2 宜根据监测对象的风险等级、周边环境状况、施工进度、结构形式以及结构监测数据等因素，动态设定监测频率，运营期在确保结构安全的情况下可适当降低监测频率。

6.2.4.3 当发生下列情况时，应提高数据采集频率：

a) 变形量或变形速率出现超出控制值或超出变形预警值等异常变化；

b) 监测对象本身或周边环境出现影响结构安全的异常情况；

c) 监测对象周边发生地震、暴雨、台风等自然灾害。

6.3 数据传输

6.3.1 通信传输组网应遵循标准化、模块化和向下兼容的原则，且满足以下要求：

a) 综合通信距离、通信延迟率、网络带宽、采集频率、传输数据量、传输时长、现场环境、网络覆盖状况、经济成本等因素确定组网方式与组网拓扑结构，并符合GB/T30269规定的相关要求；

b) 宜支持自动上报与查询应答两种工作模式，并确保采集网关、控制采集器或遥测终端等边端控制采集设备与传感器、数据接入管理平台之间的双向通信需求；

c) 通信传输误码率高的场景，数据传输组网宜具备三级智能功能，支持双链路速率自适应通信传输、备份链路切换机制、通信超时重发机制等功能，保证在出现通信故障时能够及时修复故障或自动上报故障信息；

d) 不具备信号网络覆盖的环境，宜自主组建通信传输网；

e) 信号衰减严重的情况下应增加中继器，延长通信传输距离；

f) 应避免无线通信空间中的电磁交叉干扰；

g) 宜对传输数据进行自动加密处理。

6.3.2 数据传输方式按通信传输介质可分为有线传输方式、无线传输方式；其中，有线传输方式包括RS485总线、控制器局域网（CAN）总线、光纤、双绞线、电力线载波等；无线传输方式包括4G/5G、无线局域网（WLAN）、蓝牙、窄带物联网(NB-IoT)、卫星、ZigBee等。

6.3.3 数据传输方式的选择要求如下：

a)宜综合数据通信距离、通信速率、通信频率、功耗、成本与周边环境等因素，选择有线或无线通信传输方式进行数据传输；

b) 当监测现场传感器数据传输量较大、节点通信距离较近时，宜采用有线通信方式；

c) 在有线、无线通信方式均满足技术要求的情况下，宜优先采用无线通信方式；

d)在复杂的监测环境下，只采用一种通信方式不能满足技术要求时，可综合采用有线与无线组合的通信方式。

6.3.4 数据传输指令协议分为局域网通信指令协议、广域网通信指令协议，要求如下：

a) 通信传输指令应具有兼容性、可扩展性、可维护性，应根据这些原则制定适用的通信传输指令协议；

b) 局域网通信指令协议要求如下：

1) 宜支持主从应答工作模式，且通信帧格式宜包括起始符、地址域、控制域、数据域、校验码、结束符等；

2) 地址域宜包括设备类型、设备编号等信息，且在局域网内设备信息应具有唯一性；

3) 控制域宜具有开关机控制、数据读取、数据写入、地址和储存数据查询设置、工作参数设置查询、数据预警、帮助等功能码；

4) 数据域宜包括数据长度、数据类型、监测数据等关键信息；

5) 宜支持多种数据校验方式；

6) 宜支持定点传输、广播传输的通信工作模式；

7) 校验方式宜采取和校验、CRC校验、高字节在前，低字节在后等方式。

c) 广域网通信指令协议要求如下：

1) 宜支持采集网关、控制采集器或遥测终端等边端设备与云平台之间的双向通信，且通信帧宜包括地址域、控制域、消息负载等信息；

2) 地址域应包含采集设备地址、测量设备地址、测量设备通道号等信息；

3) 控制域应包含控制命令类型、命令参数、命令响应时间、命令响应状态等信息；

4) 消息负载可包含采集网关地址、传感器节点地址、控制指令、命令时间等；并宜支持多种数据校验。

6.4 数据接入

6.4.1 宜支持多种数据源和数据形式的接入，包括但不限于以下数据：

a) 自动化监测数据：包括感知采集设备上报的监测数据、第三方系统的推送数据等；

b) 人工监测数据：包括人工辅助测量数据、异常值的复测数据、定期检测数据、人工巡视巡查数据等；

c) 项目信息数据：包括项目名称、项目位置、监测单位、监测方案等相关数据。

6.4.2 接入数据类型分为结构化数据和非结构化数据，接入方式要求如下：

a) 结构化数据包括自动化监测数据、人工监测数据、项目信息数据等多种类型，可采用数据库表、可扩展标记语言（XML）文件、Web服务、中间库、文件等接入方式。

b) 非结构化数据包括图像、监控音/视频数据及文本数据等多种类型，其中对于音视频数据采用流媒体实时传输协议(RTP)、实时传输控制协议(RTCP)等方式接入，其他图像及文本非结构数据，其接入方式应符合GB/T 32630的相关规定。

# 7 监测数据处理

7.1 数据预处理

7.1.1 数据预处理包括数据异构转换、数据抽取、数据清洗、数据校验等过程，宜支持预处理流程与工作参数的自定义配置。

7.1.2 数据异构转换宜包括以下内容：

a) 对异构数据进行解析，输出标准化的数据；

b) 对异构数据进行转换，包括对格式、类型和单位等进行转换。

7.1.3 数据抽取指从数据源中提取数据的过程，宜包括以下内容：

a) 对结构化数据可按需求进行分类、分阶段数据抽取；

b) 对图像、音频、视频及文本等非结构数据可进行特征抽取，抽取要求符合GB/T 32630的相关规定。

7.1.4 数据清洗宜包括以下内容：

a) 降噪处理：对数据进行去噪声、平滑处理；

b) 缺失处理：对数据缺失值进行插值处理；

c) 去重处理：对重复的数据进行删除处理；

d) 粗差处理：对数据进行粗差检测并剔除粗差。

7.1.5 数据校验宜包括以下内容：

a) 完整性：校验数据是否存在缺失及缺失程度；

b) 准确性：校验数据是否正确反映监测属性和业务过程，是否存在异常值、错误值；

c) 一致性：校验数据内容是否遵循统一规范；

d) 时效性：校验数据是否及时到达目标应用。

7.2 数据计算

7.2.1 按参与计算的数据源不同，数据计算可分为转换计算、统计计算、模型计算、图像计算等类型。

7.2.2 转换计算是指将原始采集数据经过特定的计算公式或流程，转化为反映对应监测内容特征监测数据的过程，应满足以下要求：

a) 应根据仪器设备的监测方法选择适用的监测数据计算公式与计算流程；

b) 计算数据应满足监测精度要求；

c) 对监测现场温度、湿度、气压等环境敏感的监测设备，应进行补偿修正计算。

7.2.3 统计计算应根据数据分析要求确定统计样本的范围和大小，宜包括以下计算：

a) 数据特征统计：如均值、极值、均方根、中位数、标准差等；

b) 数据变化统计：如累计变化量、本次变化量、变化速率等。

7.2.4 模型计算宜包括平差模型计算、最小二乘法模型计算、时频分析模型计算、模态分析模型计算等内容。

7.2.5 图像计算宜包括边缘检测、图像压缩、图像变换、特征区域提取、目标识别等内容。

7.3 数据分析

7.3.1 宜对监测数据进行统计特征分析、相关性分析、模型分析。

7.3.2 统计特征分析宜包括以下内容：

a) 集中趋势特征分析：评估监测样本数据的大小特征；

b) 离散程度特征分析：评估监测样本数据之间的差异程度；

c) 概率密度特征分析：分析监测样本数据的整体分布情况；

d) 极值特征分析：分析一段时间内监测样本数据的极值分布情况。

7.3.3 相关性分析要求如下：

a) 宜进行环境或外部作用类监测数据与结构响应与变换类监测数据之间的相关性分析；

b) 宜在时间尺度与空间尺度上，进行结构响应与变换类监测数据之间的相关性分析；

c) 宜对高度相关的监测变量进行线性回归分析或非线性回归分析；

d)宜根据工程项目应用领域、用途特点等因素，选择合适的数据相关性分析方法，如皮尔逊相关性分析法、支持向量机相关性分析法、机器学习分析法等。

7.3.4 模型分析宜包括以下内容：

a) 有限元修正模型分析：对结构静动力响应进行定量分析；

b) 机器学习模型分析：对结构安全状态进行模型预测与评估；

c) 时间序列模型分析：对结构响应进行模型描述与预测。

# 8 预警

8.1 一般要求

8.1.1 应根据监测对象类型的不同以及安全保障等要求，设置合理的监测控制值，并开展城市轨道交通隧道结构安全的分级监测预警。

8.1.2 宜采用多测项组合预警技术、融合多专业知识模型的人工智能技术，构建智能化的预警技术体系。

8.1.3 应根据工程特点、监测方法合理设计预警策略，并明确划分监测预警等级，当监测数据达到预警标准时，宜利用智能监测系统实现预警信息的自动、实时发布。同时应确保预警系统性能可靠，预警信息准确无误传达。

8.2 监测控制值

8.2.1 监测控制值根据工程特点、地质特征、设计要求及当地经验确定，并应满足城市轨道交通隧道结构安全状态得到合理有效控制的要求。

8.2.2 监测控制值按监测项目的性质分类，包括环境与外部作用类、结构响应与变化类。

8.2.3 监测控制值一般宜由设计文件确定，设计文件中未明确监测控制值时，以各行业现行规范标准为依据确定。针对重要的、特殊的或风险等级较高的交通基础设施，应进行现状调查与结构检测，通过分析计算或专项评估确定监测控制值。

8.2.4 应在监测工作进行前，由建设、设计、施工、监测等相关部门共同研究确定监测控制值，并将监测控制值列入监测方案。

8.3 预警策略

8.3.1 应根据工程风险等级、监测项目、结构特征、地质条件、周边工程活动性质等因素，按照监测预警等级要求，设计合适的预警策略对原始监测数据进行计算处理，及时发现异常或危险状况。

8.3.2 预警策略分为阈值预警、过程预警、巡查预警三类。阈值预警按照实测值与监测控制指标值的比值划划分为三个等级，过程预警和巡查预警不划分等级。

8.3.3 阈值预警应根据监测控制值划分预警等级，宜划分为“黄、橙、红”三个等级。其中，黄色预警值一般为控制值的70%，橙色预警值一般为控制值的85%，红色预警值一般为控制值的100%，预警条件符合表8的规定。

表8 阈值预警控制等级

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 预警等级 | 预警条件 | 预警响应 |
| 1 | 黄色预警 | 实测值达到控制值的 70%且未达到 85%时 | 监测预警：发送预警快报，加密监测频率 |
| 2 | 橙色报警 | 实测值达到控制值的85%且未达到100%时 | 监测报警：发送预警快报，加密监测频率，启动会商机制，分析预警原因，预判劣化趋势 |
| 3 | 红色预警 | 实测值达到控制值时 | 启动安全应急预案：发送预警快报，加密监测频率，并立即采取必要的处置措施 |

8.3.4 当阈值预警达到橙色级别以上、结构出现破坏迹象、周边环境出现可能影响结构安全的重要变化等情况时，应联合设计等单位共同确定增加变形速率预警控制，以双指标控制结构变形状态。

8.3.5 应根据监测数据曲线的形态，对数据的变化趋势进行分析研判，当发现有持续性上升或下降增大的数据变形趋势形态、变形速率持续向单一方向增大的数据应给予过程预警，并提示相关方需要重点关注。

8.3.6 应通过人工现场巡查发现相关结构或周边环境变形异常或出现破坏的迹象，巡查过程中出现下列情况之一时，应根据情况的紧急程度、发展趋势和造成后果的严重程度进行巡查预警及报送：

a) 结构出现鼓出、开裂、剥落，大面积渗漏，道床结构开裂、脱离，变形缝开合、错台等异常情况；

b) 结构邻近地表出现明显沉降、或较严重的突发裂缝、坍塌、地面冒浆等；

c) 结构邻近建（构）筑物、桥梁、地下管线等周边环境出现过大沉降、倾斜、裂缝等不正常状态等。

d) 结构邻近河湖水面出现漩涡、气泡，堤坡开裂；

e) 根据工程经验判断，出现其他必须进行警情报送的情况。

8.3.7 由预警策略发出的预警通知，应由人工及时核查后再发布。

8.4 预警发布与处置

8.4.1 应根据监测预警等级、预警标准、预警策略等，建立预警管理制度，包括不同预警等级的预警发布方式、预警内容、报送对象、发布时间、预警处置方式和流程等。

8.4.2 预警信息的发布符合以下要求：

a) 应通过监测系统信息发布、短信、电话、邮件、APP消息等方式实时推送建设及运营管理单位，并根据预警等级在规定时间内报送书面报告；

b) 宜明确预警时间、具体部位、现场风险状况、现场巡查信息、监测数据情况、初步原因分析、可能诱发的风险事件、处置建议等信息，包括预警级别、报警传感器编号和位置、报警监测值和控制值、相关部位的现场照片等预警内容；

c) 预警信息宜监测（巡查）实施单位通过监测管理平台发布，监测（巡查）实施单位应通过书面签证或电话联络等方式，确保警情处置单位等有关方已及时收到预警信息；

d) 预警信息宜通过声、光、电报警器等终端进行项目现场报警。

8.4.3 预警的处置方式和流程符合以下要求：

a) 预警信息发布后，应针对不同的警情，分别组织不同层级的现场分析和处置会议，同时，相关单位应立即成立风险处置小组，并启动应急预案，确保在紧急情况下能够迅速、有效地应对和处置；

b) 相关各方应对已发布预警的部位及外部环境加强监测和巡查，积极参加风险处置方案的制定、提供相关建议并采取必要的措施进行风险处理，排查风险源并研究处置措施，避免预警升级和安全事故的发生；

c) 对于处在预警期的设施，应在加密监测作业结束后在规定时限内提供监测评估结果；当监测过程中出现险情时，应在加密监测作业结束后立即提交监测评估结果；

d) 当监测数据变化速率减小并趋于稳定状态后，且预警险情已得到处置，达到消除安全隐患、具备解除预警条件的，可启动消警程序，消警需要警情处置单位提出申请，经各方确认无误后予以消警，并签署消警单。

8.5 变形分析及预测

8.5.1 宜采用比较法、图表法、特征值统计及数学模型法进行变形监测数据分析，判断各监测物理量的变化趋势，确定隧道结构的不安全因素。

8.5.2 采用数学模型法做变形分析及预测时，可分为短时预测、中期预测、长期预测、专项预测，应符合以下要求：

a) 短时预测：对采样频率高于1Hz的数据及高风险设施，创建以分钟、小时为监测周期的预测模型；

b) 中期预测：对处于周期性变形的设施，创建以日、周、月为监测周期的预测模型；

c) 长期预测：对处于稳定期或结构变形缓慢的设施，创建以季度、年为监测周期的预测模型；

d) 专项预测：对处于一些特定场景下的设施，创建动态自适应预测模型。

# 9 监测数据管理

9.1 数据存储

9.1.1 数据存储包括并不限于以下内容：

a) 基础数据：隧道结构的空间位置、环境信息、结构状态、运维信息、工程信息、竣工验收、监测方案等数据信息，以及监测设备的安装位置、类型、工作参数、采集周期、监测起零值等数据；

b) 实时监测数据：隧道结构及周边环境监测传感与测量设备实时采集的数据；

c) 处理过程数据：监测预处理数据、累计变化值、变化速率、统计值、分析数据、评估数据、变形预测数据等；

d) 预警数据：隧道结构预警模型、预警控制值、历史故障或预警记录、预警处置等。

9.1.2 监测数据存储方式宜包括边缘存储或数据中心存储的数据存储方式，并符合下列要求：

a) 原始监测数据宜进行边缘设备端与数据中心同步存储，其中，边缘数据存储宜支持循环更新存储方式；数据中心常见监测数据表设计可参考附录A；

b) 宜支持不同类型监测数据的分级分类存储，并支持数据存储节点的动态管理；

c) 采用云存储的监测系统，宜符合GB/T 31168的相关规定；

d) 宜采用容灾备份机制，具备监测数据压缩存储和异地备份的功能。

9.1.3 数据中心数据存储时间要求：

a)监测数据存储时间不宜小于5年；

b)经处理后的特征提取数据、超限报警数据、特殊事件数据、评估评价结果等数据存储时间不宜小于20年；

c)原始影像数据存储不宜小于90天。

9.2 数据质量检查

9.2.1 应对原始监测数据、处理过程数据、预警数据等数据进行开展完整性、准确性、有效性、时效性、一致性等方面的数据质量评估，并符合以下评估要求：

a) 数据完整性：评估数据的缺失程度，宜采用数据缺失率、数据完备性等指标进行评估；

b) 数据准确性：评估数据是否存在异常或错误，宜采用相对误差、绝对误差等指标进行评估；

c) 数据有效性：评估数据遵循预定的语法规则或定义的程度，宜采用类型匹配、值范围约束或预定规则等进行评估；

d) 数据时效性：评估数据一定时间段内的价值属性；

e) 数据一致性：评估数据在不同数据表或数据集中信息属性是否相同，各实体、属性是否符合一致性约束关系，宜采用存在一致性、等值一致性或逻辑一致性等方式进行评估。

9.2.2 应支持多层级、多维度、多方式的数据质量评价方式，如单列分析（包括列值关键特征、最大值、最小值、均值、方差等）、跨列分析（不同列值之间的关联性分析、依赖分析）、跨表分析（不同类型数据之间的关联性分析）。

9.2.3 应支持数据质量检查结果的图形化展现和报告输出。

9.3 数据共享交换

9.3.1 数据共享交换方式包括库表方式、接口方式和文件方式，并满足以下要求：

a) 库表方式：宜支持通过读写关系型数据库或非关系型数据库的表或视图的方式进行数据共享；

b) 接口方式：宜支持通过RESTful、Web Service等服务接口进行数据共享；

c) 文件方式：通过文件传送方式将规范化的数据文件传送，包括但不限于可扩展标记语言（XML）、JavaScript对象简谱(JSON)、文档、图像、视频、音频等文件格式。

9.3.2 数据共享交换宜支持共享交换数据源参数化配置。

9.3.3 宜构建监测数据共享交换资源目录，包括数据名称、内容、格式、数据源、访问接口等内容，并通过资源目录的形式提供监测数据共享交换服务。

9.3.4 数据共享交换应采取权限验证和安全管理措施,通过互联网传输时应进行数据传输加密和身份认证。

9.3.5 数据共享交换应确保所共享交换数据的质量，包括数据的准确性和完整性。

9.4 数据安全

9.4.1 数据安全宜优先采用支持自主可控和国密算法的区块链平台，并符合国家及相关行业的保密安全要求。

9.4.2 监测数据采集安全要求如下：

a) 确保采集的监测数据的合规性，不应从非法渠道抓取数据，不应收集法律法规明令禁止的监测数据；

b) 宜对采集到的监测数据进行完整性和一致性校验。

9.4.3 监测数据传输安全要求如下：

a) 确保数据传输的完整性，传输时支持数据完整性校验；

b) 确保数据传输的可用性，对超时数据进行识别、重发机制；

c) 确保数据传输的容错性，对传输过程中存在的可接受误差进行判定；

d) 确保数据传输的保密性，传输过程中重要数据和敏感数据不能明文传输；

e) 无线数据传输的工作频率与发射功率等技术指标，应满足国家无线电相关规范的要求；

f) 数据跨域、跨网传输时，应保证数据始终是安全可控的，保证数据安全措施是同一级别的。

9.4.4 监测数据处理安全要求如下：

a) 宜采用基于用户权限的数据访问控制，限制只有授权用户才能访问和处理监测数据；

b) 宜制定监测数据处理的操作规程，明确数据处理的方法、流程和要求；

c) 宜对监测数据处理活动和操作步骤进行记录，便于追溯和审计。

9.4.5 监测预警信息安全要求如下：

a) 涉及通过界面展示数据的，应对展示的重要数据、敏感信息采取去标识化处理等措施；

b) 宜通过用户权限管理，管理和控制数据访问权限的策略和措施，保证预警信息发布访问安全。

9.4.6 数据管理安全要求如下：

a) 宜建立数据资产分类分级管理方法和操作指南，以及数据资产分类分级的变更审批流程和机制；

b) 宜建立数据资产清单，明确数据资产管理范围和属性；

c) 宜依据数据资产和数据安全分级要求，建立相应的标记策略、访问控制、数据加解密、数据脱敏等安全机制和管控措施，对监测数据坐标信息进行脱密处理；

d) 宜建立重要数据监控机制，具备对重要数据生命周期相关操作行为进行合规性分析的能力。

e) 宜对业务数据进行数据流监测、数据访问监控、异常检测、数据加密和脱敏等管理工作，确保数据的安全性和完整性。

# 10 监测系统管理与维护

## 10.1 一般规定

10.1.1 应制定监测系统运维计划，建立设备运维台账、设备备件清单、列支监测系统年度维护（含备品备件）预算。

10.1.2 监测系统维护管理人员应掌握监测系统硬件性能、技术参数，熟练操作监测系统软件。

10.1.3 监测系统的日常检查、定期维护和异常处置应分别填写完整的记录表并存档，宜每半年编写监测系统运行维护与管理的总结报告并存档。

## 10.2 监测系统运维管理

10.2.1 监测系统运维管理应包括硬件设施和软件系统的日常检查、定期维护。

10.2.2 硬件设施的日常检查应符合下列规定：

a) 维护人员应按照维护计划、巡查路线进行日常检查，宜结合隧道日常巡查工作展开；

b) 应对巡查路线上的监测设备表观完好性和稳固性进行检查，并对巡查情况进行记录并存档；

c) 对监控中心用户界面展示的监测数据以及监控中心机房计算机设备运行状态进行检查，并对检查情况进行记录并存档；

d) 对巡查中发现的问题或监测系统软件反馈的问题，应及时处置或通知专业单位进行处置，并对处置结果进行记录并存档；

e) 对反复出现的异常问题应列入定期维护计划中。

10.2.3 硬件设施定期维护应符合下列规定：

a) 硬件设施定期维护周期宜小于6 个月；

b) 对强降雨等可预见的特殊事件发生前应对系统进行专项维护；

c) 对传感器、线路、采集设备、摄像头等设备表观完好性进行检查，对设备及防护罩的外观、固定情况以及传感器、采集设备与传输线路的接头紧固情况进行检查；

d) 对现场采集站、监控中心等易受灰尘影响的设备及机柜进行除尘处理；

e) 检查静力水准仪或压力变送器设备的液位情况，定期补充连通管内液体至设计液位；

f) 对定期维护发现的问题应在24h 内快速响应并及时处置。

10.2.4 软件系统日常检查应符合下列规定：

a) 软件系统宜每周进行一次检查；

b) 日常检查内容包括各软件模块工作状态检查、实时数据及历史数据检查；

c) 对超限报警信息进行检查确认，宜根据现场监控视频、图像等信息进行报警确认；

d) 需要停机维护时，应在监测系统访问低谷时间段实施。

10.2.5 软件系统定期维护应符合下列规定：

a) 软件系统定期维护周期宜小于1 个月；

b) 软件系统定期维护内容包括软件时间同步检查、磁盘存储空间检查及清理、数据库异地备份及软件运行日志检查等；

c) 对于有配置参数修改、更正的维护操作，应提前做好备份，并在维护完成后做好日志记录。

## 10.3 监测系统异常处置

10.3.1 监测系统异常处置宜在异常发生后24 小时之内进行，监测系统异常处置应根据监测系统报警和监测系统故障分别制定响应机制和应急措施。

10.3.2 监测系统异常响应机制应包括下列内容：

a) 制定异常时间报告管理制度，规定异常事件的现场处理、事件报告和后期恢复的管理职责；

b) 根据监测系统的设计要求或异常事件对监测对象产生的影响程度，对异常事件进行分类和分级；

c) 对不同的异常事件制定相应的响应方式，包括报告程序、报告对象和报告方式等。

10.3.3 监测系统异常应急措施应包括下列内容：

a) 在统一的框架下制定不同异常事件的应急预案，框架包括：应急预案启动条件、应急处理流程、监测系统恢复流程、事后教育和培训等内容；

b) 定期对监测系统相关人员进行应急预案培训和演练；

c) 定期审查应急预案，根据实际情况对预案不断优化和完善。

10.3.4 隧道遭遇强降雨、地震、洪水、地质灾害、极端气候、撞击等特殊事件后，应对软、硬件监测系统进行紧急排查，重点检查室外安装的各类设备的工作状态，评估其对监测系统功能和性能的影响程度，必要时进行专项维护以免影响结构安全监测系统的正常运行。

# 附录 A

（规范性）监测数据表设计

A.1 项目基础信息

项目基础信息表设计见表A.1。

表A.1 工程基础信息

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ProjName | 项目名称 | 字符型 |  |
| ProjCharge | 项目管理人员 | 字符型 |  |
| ProjNumber | 项目编号 | 字符型 |  |
| ProjType | 项目类型 | 字符型 |  |
| ProjAbbre | 项目简称 | 字符型 |  |
| ProjLongitude | 所在经度 | 双精度浮点型 | 单位：° |
| ProjLatitude | 所在纬度 | 双精度浮点型 | 单位：° |
| OwnerUnit | 业主 | 字符型 |  |
| DesignUnit | 设计单位 | 字符型 |  |
| SupervisUnit | 监理单位 | 字符型 |  |
| ConstructUnit | 施工单位 | 字符型 |  |
| SurveyUnit | 监测单位 | 字符型 |  |
| ProjDirector | 项目负责人 | 字符型 |  |
| ProjWorker | 作业负责人 | 字符型 |  |
| ProjAddress | 项目地址 | 字符型 |  |
| CreateDate | 创建日期 | 日期时间型 |  |
| ProjMap | 项目地图 | 字符型 |  |

A.2 监测点信息

监测点信息表设计见表A.2。

表A.2 监测点信息表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| PCollection | 监测工点 | 字符型 |  |
| MonitorObj | 监测对象 | 字符型 |  |
| PointType | 监测类型 | 整型 |  |
| PointName | 监测点名 | 字符型 |  |
| PtPerson | 负责人 | 字符型 |  |
| PointXCor | 监测点X 坐标 | 双精度浮点型 | 单位：m |
| PointYCor | 监测点Y 坐标 | 双精度浮点型 | 单位：m |
| PointZCor | 监测点Z 坐标 | 双精度浮点型 | 单位：m |
| PtLocation | 测点位置 | 字符型 |  |
| PtBeginTime | 开始时间 | 日期时间型 |  |
| PtEndTime | 结束时间 | 日期时间型 |  |

A.3 智能全站仪监测

智能全站仪监测表设计见表A.3。

表A.3 智能全站仪监测

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整形 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| Period | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 测量时间 | 日期时间型 |  |
| TPS\_XCor | X 坐标 | 双精度浮点型 | 单位：m |
| TPS\_YCor | Y 坐标 | 双精度浮点型 | 单位：m |
| TPS\_ZCor | Z 坐标 | 双精度浮点型 | 单位：m |
| Mark | 标识 | 整形 | 数据有效位标识 |

A.4 全球卫星导航系统(GNSS) 监测

GNSS监测数据表设计见表A.4。

表A.4 GNSS 位移监测

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整形 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| PeriodId | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 测量时间 | 日期时间型 |  |
| Longitude | 经度 | 双精度浮点型 | 单位：° |
| Latitude | 纬度 | 双精度浮点型 | 单位：° |
| Height | 大地高 | 双精度浮点型 | 单位：m |
| GNSS\_XCor | X坐标 | 双精度浮点型 | 单位：m |
| GNSS\_YCor | Y坐标 | 双精度浮点型 | 单位：m |
| GNSS\_ZCor | Z坐标 | 双精度浮点型 | 单位：m |
| Mark | 标识 | 整型 | 数据有效位标识 |

A.5 激光雷达监测

激光雷达监测数据表设计见表A.5。

表A.5 激光雷达监测

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整型 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| Period | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 监测时间 | 日期时间型 |  |
| LiDAR\_XCor | X坐标 | 双精度浮点型 | 单位：m |
| LiDAR\_YCor | Y坐标 | 双精度浮点型 | 单位：m |
| LiDAR\_ZCor | Z坐标 | 双精度浮点型 | 单位：m |
| ReflectionIntensity | 反射强度 | 双精度浮点型 |  |
| Mark | 标识 | 整型 | 数据有效位标识 |

A.6 合成孔径雷达监测

合成孔径雷达监测数据表设计见表A.6。

表A.6 合成孔径雷达监测

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整型 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| Period | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 监测时间 | 日期时间型 |  |
| DistChangeValue | 视线向变化量 | 双精度浮点型 | 单位：mm |
| Mark | 标识 | 整形 | 数据有效位标识 |

A.7 激光位移监测

激光位移监测数据表设计见表A.7。

表A.7 激光位移监测

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整型 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| Period | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 监测时间 | 日期时间型 |  |
| Temperature | 温度 | 双精度浮点型 | 单位:℃ |
| Distance | 距离 | 双精度浮点型 | 单位：mm |
| Mark | 标识 | 整型 | 数据有效位标识 |

A.8 静力水准监测

静力水准监测数据表设计见表A.8。

表A.8 静力水准监测

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整型 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| Period | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 监测时间 | 日期时间型 |  |
| Temperature | 温度 | 双精度浮点型 | 单位:℃ |
| Settlement | 沉降量 | 双精度浮点型 | 单位：mm |
| Mark | 标识 | 整型 | 数据有效位标识 |

A.9 钢筋锈蚀监测

钢筋锈蚀监测数据表设计见表A.9。

表A.9 钢筋锈蚀监测

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整型 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| Period | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 监测时间 | 日期时间型 |  |
| Temperature | 温度值 | 双精度浮点型 | 单位:℃ |
| RelativeHumidity | 相对湿度值 | 双精度浮点型 | 单位:% |
| ConcreteResistivity | 混凝土电阻率 | 双精度浮点型 | 单位：Ω∙m |
| CorrosionPotential | 钢筋腐蚀电位 | 双精度浮点型 | 单位：mV |
| CorrosionCurrentDensity | 腐蚀电流密度 | 双精度浮点型 | 单位：μA/cm2 |
| Mark | 标识 | 整型 | 数据有效位标识 |

A.10 裂缝监测

裂缝监测数据表设计见表A.10。

表A.10 裂缝传感

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整型 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| Period | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 监测时间 | 日期时间型 |  |
| Temperature | 温度 | 双精度浮点型 | 单位:℃ |
| CrackWdth | 裂缝宽度 | 双精度浮点型 | 单位：mm |
| WaterSeepage | 裂缝是否渗水 | 字符型 |  |
| RustTraces | 裂缝是否有锈迹 | 字符型 |  |
| Mark | 标识 | 整型 | 数据有效位标识 |

A.11 应力应变监测

应力应变监测数据表设计见表A.11。

表A.11 应力应变监测

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整型 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| Period | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 监测时间 | 日期时间型 |  |
| Temperature | 温度 | 双精度浮点型 | 单位:℃ |
| StrainValue | 应变 | 双精度浮点型 | 单位：*με* |
| StressValue | 应力 | 双精度浮点型 | 单位：MPa |
| Mark | 标识 | 整型 | 数据有效位标识 |

A.12 振动监测

振动监测数据表设计见表A.12。

表A.12振动监测

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整型 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| Period | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 监测时间 | 日期时间型 |  |
| Vibrate | 振动加速度峰值 | 双精度浮点型 | 单位:cm/s2 |
| VibrateFreq | 主振频率 | 双精度浮点型 | 单位:Hz |
| Mark | 标识 | 整型 | 数据有效位标识 |

A.13 降雨量监测

降雨量监测数据表设计见表A.13。

表A.13 降雨量监测

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整型 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| Period | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 测量时间 | 日期时间型 |  |
| RainFall | 降雨量 | 双精度浮点型 | 单位：mm |
| Mark | 标识 | 整型 | 数据有效标识 |

A

B

A.14 地下水位监测

地下水位监测数据表设计见表A.14。

表A.14 地下水位监测

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整型 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| Period | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 测量时间 | 日期时间型 |  |
| GroundwaterTableDepth | 地下水位 | 双精度浮点型 | 单位：mm |
| Mark | 标识 | 整型 | 数据有效标识 |

A.15 衬砌破损监测

衬砌破损监测数据表设计见表A.15。

表A.15 衬砌破损监测

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整型 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| Period | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 测量时间 | 日期时间型 |  |
| LiningDamageArea | 衬砌破损面积 | 双精度浮点型 | 单位：mm2 |
| LiningDamageDepth | 衬砌破损深度 | 双精度浮点型 | 单位：mm |
| Mark | 标识 | 整型 | 数据有效标识 |

A.16 塌陷监测

塌陷监测数据表设计见表A.16。

表A.16 塌陷监测

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整型 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| Period | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 测量时间 | 日期时间型 |  |
| CollapseArea | 塌陷面积 | 双精度浮点型 | 单位：mm2 |
| CollapseDepth | 塌陷深度 | 双精度浮点型 | 单位：mm |
| Mark | 标识 | 整型 | 数据有效标识 |

A.17 渗水监测

渗水监测数据表设计见表A.17。

表A.17 渗水监测

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 字段名 | 字段说明 | 数据类型 | 备注 |
| ID | 主键 | 整型 |  |
| PointID | 监测点 | 字符型 |  |
| Period | 监测期次 | 整型 |  |
| SurveyDateTime | 测量时间 | 日期时间型 |  |
| SeepageArea | 渗水面积 | 双精度浮点型 | 单位：mm2 |
| Mark | 标识 | 整型 | 数据有效标识 |