

# 辽宁省地方标准

DB21/T XXXX - 2024  
备案号 J XXXX - XXXX

## 城市隧道结构健康监测技术规范

Technical Specification for Health Monitoring  
of Urban Tunnel Structures

(征求意见稿)

2024-XX-XX 发布

2024-XX-XX 实施

辽宁省住房和城乡建设厅

辽宁省质量技术监督局

联合发布

辽宁省地方标准

# 城市隧道结构健康监测技术规范

Technical Specification for Health Monitoring  
of Urban Tunnel Structures

DB21/T XXXX - 2024

备案号 JXXXX - 2024

主编单位：大连理工大学

批准部门：

施行日期：2024年XX月XX日

2024 大连

# 前 言

本规程根据辽宁省住房和城乡建设厅《关于印发 2023 年辽宁省工程建设地方标准制修订项目立项计划的通知》（辽住建科[2023]6 号）要求，由大连理工大学会同有关单位开展了《城市隧道结构健康监测技术规范》的编制工作。在对辽宁省顶管工程实践经验及相关科研成果认真总结的基础上，规程编制组充分调研，借鉴国内外相关技术标准的先进编制经验，广泛征求有关单位的意见，经过反复讨论、修改，制定本规程。

本规范共分为 10 个章节，主要内容包括：1 总则、2 规范性引用文件、3 术语、4 基本规定、5 监测内容、6 监测方法、7 系统实施、8 系统验收、9 系统运维、10 数据分析与管理。

本规程由辽宁省住房和城乡建设厅负责管理，由大连理工大学负责具体技术内容的解释。在本规程实施过程中，若发现有需要修改或补充之处，请将意见或建议寄至大连理工大学建设工程学部（大连市甘井子区凌工路 2 号，邮编 116024，联系电话：0411-84707232），以便今后修订。

**主编单位：** 大连理工大学

**参编单位：** 大连理工大学土木建筑设计研究院有限公司  
中国建筑东北设计研究院有限公司  
北京城建设计发展集团股份有限公司  
中铁十七局集团城市建设有限公司  
中铁七局集团第二工程有限公司  
大连大学  
辽宁交投科技有限公司

**主要起草人：**

**主要审查人：**

## 目 次

1 总则 .....	1
2 规范性引用文件.....	2
3 术语 .....	3
4 基本规定.....	4
5 监测内容.....	6
6 监测方法.....	9
7 系统实施.....	15
8 系统验收.....	21
9 系统运维.....	26
10 数据分析与管理.....	27

## 1 总则

1.1 为规范和指导辽宁省城市隧道结构健康监测系统的设计、实施、验收、运维、数据管理与应用，特制定本指南。

1.2 本指南适用于辽宁省所辖城市隧道结构健康监测系统建设。

1.3 隧道结构健康监测是指在《城市隧道养护技术规范》（DB50/T1093-2021）、《城市轨道交通设施运营监测技术规范》（GB/T39559.3-2020）中规定的初始检查、日常巡查、经常检查、定期检查、特殊检查和隧道评定的基础上，结合隧道的环境、作用、结构响应和运营养护状况，通过智能化监测技术，实现数据采集、传输、存储、分析、应用、管理，从而为隧道养护与管理工作提供技术支持。

1.4 隧道结构健康监测系统建设应遵循“科学、合理、先进、经济、稳定、耐久”的原则。

1.5 隧道结构健康监测宜积极稳妥地采用经验证的新技术、新装备。

1.6 隧道结构健康监测项目除应符合本指南外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

## 2 规范性引用文件

以下文件对于本文件的适用性至关重要，为本文件的引用文件。对于带有日期标记的引用文件，仅其标注日期的版本适用于本文件；对于未标注日期的引用文件，则其最新版本（包括所有修订单）适用于本文件。

- GB/T 8567 计算机软件文档编制规范
- GB/T 9386 计算机软件测试文档编制规范
- GB/T 15532 计算机软件测试规范
- GB/T 31167 信息安全技术 云计算服务安全指南
- 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 50311 综合布线系统工程设计规范
- GB 50343 建筑物电子信息系统防雷技术规范
- GB/T39559.3-2020 城市轨道交通设施运营监测技术规范
- JT/T 132 公路数据库编目编码规则
- JT/T 1037-2022 公路隧道结构监测技术规范
- CJJ 221-2015 城市地下道路工程设计规范
- JTG 2182-2020 公路工程质量检验评定标准 第二册 机电工程
- JTG/T 5122-2021 公路缆索结构体系隧道养护技术规范
- JTG/T H21-2011 公路隧道技术状况评定标准
- DB43/T 2449 公路隧道监控量测技术规程
- DB50/T1093-2021 城市隧道养护技术规范
- DBJ50 T-304-2018 隧道结构健康监测系统实施和验收标准
- DB/T29-208-2011 天津市隧道结构健康监测系统技术规程
- T/CECS 765-2020 结构健康监测系统施工及验收标准
- T/CECS 529-2018 大跨度隧道结构健康监测系统预警阈值标准
- T/CECS 652-2019 结构健康监测系统运行维护及管理标准

### **3 术语**

#### **3.1 隧道结构健康监测**

隧道结构健康监测技术，系一种集多学科于一体的综合性手段，旨在实现对隧道关键参数的连续、自动化测量与记录。

#### **3.2 隧道结构健康监测系统**

一种基于网络集成技术的电子信息系统，旨在将分布于隧道现场与监控中心的多种传感器、数据采集与传输设备、数据处理与管理软件模块、数据分析与应用工具及其配套设施全面整合。

#### **3.3 分布式数据采集**

在同一隧道内，部署有多个数据采集子站，这些子站负责采集、传输多种监测参数的数据，并配备有相应的电源设备。

#### **3.4 集中式数据采集**

在同一隧道内，仅设置有一处数据采集子站，该子站集成了多种监测参数的数据采集、传输以及电源等设备的功能。

#### **3.5 作用**

隧道所受的直接或间接荷载。

#### **3.6 结构响应**

由直接或间接荷载引起的隧道结构的静、动力响应。

#### **3.7 结构变化**

以隧道结构在某一规定时刻状态为基准，隧道结构在使用中几何形态和表观、结构性能发生的相对变化。

#### **3.8 环境影响**

影响隧道使用功能以及安全的自然环境因素。

#### **3.9 超限阈值**

对隧道环境、作用、结构响应、结构变化可能出现的各种级别的异常或风险，各监测点所设定的临界状态警戒值。

#### **3.10 超限报警**

监测数据的特征指标达到或超过超限阈值时，系统自动发出相应级别的警报。

## 4 基本规定

4.1 隧道结构健康监测系统的建设过程，涵盖了系统设计、系统实施、系统试运行、系统验收、系统运维和监测数据应用六个阶段。

4.2 隧道结构健康监测应综合考虑环境和结构特性、营运状况等因素，科学合理地选择监测内容。在系统建设完毕后，针对隧道运营过程中出现的病害或识别的关键风险点，可增设相应硬件设备，实施有针对性的监测措施，以确保隧道结构的安全性和稳定性。

4.3 隧道监测测点的布设需经过严谨的考量，深入分析所处地区的环境特点、作用变化规律、结构响应及变化特征。在此过程中，应充分考虑各特征值之间的内在联系，确保测点布设位置的合理性，以最大限度地反映隧道结构的响应与变化特征值。

4.4 在传感器的选型过程中，须考虑其准确性、稳定性以及使用寿命这三个核心要素。对于预埋在结构内部的传感器而言，其设计使用寿命应确保不低于 20 年；对于附着安装在结构上的非埋入式传感器，其使用寿命则需至少达到 5 年；针对关键监测参数的传感器，其使用寿命必须达到或超过 10 年。

### 条文说明：

传感器使用寿命是指，在规定的使用年限内，传感器需确保其监测数据的可靠性与稳定性。针对关键监测参数的传感器，应遵循此原则以确保其性能与准确性。

4.5 在隧道结构健康监测系统正式实施之前，须组织现场踏勘活动。依据实际现场条件，对既有的设计方案及安全与施工组织方案进行调整与优化。

4.6 在系统验收前，务必确认传感器的安装位置是否恰当且稳固，以防外部环境因素对数据传输链路造成潜在干扰。同时，需对监测数据的完整性、稳定性及准确性进行全面检验，以确保传感器所采集的数值准确无误，并与后台记录的数据保持高度一致。

4.7 新建隧道的结构健康监测系统应与机电工程同步设计、与施工监控同步实施、与交工荷载试验同步试运行、与土建工程同步验收；在役隧道的结构健康监测系统结合养护管理需求独立设计、实施与验收。

4.8 在隧道结构健康监测系统的运行维护过程中，针对现场设备，需定期检查，一旦发现问题，应立即进行维修或更换；软件系统的运行稳定状态也应定期检查，一旦发现异常，需迅速组织专业人员进行分析并处理；当监测系统采集的数据超出预设阈值并触发报警机制时，必须立即对隧道的运行状态进行全面的分析判断；系统软件应定期进行专业的维护。

4.9 隧道结构健康监测系统应充分考虑与现有隧道养护系统的兼容性，做到数据共享、综合



分析应用。

**4.10** 隧道结构健康监测系统应按照统一的数据标准与接口,实现与省部级平台的信息共享及业务协同。

**4.11** 隧道结构健康监测系统阈值设定应合理,并可依据监测数据分析结果进行调整。

**4.12** 隧道结构健康监测系统设计的工作重点为隧道现状分析、监测内容与测点布设、隧道结构健康监测系统选型集成与软件开发部署设计和数据应用。

**条文说明:**

隧道现状分析包含隧道运营阶段结构受力分析、病害分析、潜在风险分析及养护需求分析等。

**4.13** 隧道结构健康监测系统建设应建立全面的管理流程,明确管理职责。

## 5 监测内容

### 5.1 一般规定

- 5.1.1 系统的设计必须做到安全可靠，其中包括监测数据、分析方法以及系统软硬件。
- 5.1.2 应合理运用计算机技术和远程信息传输技术，保障系统的实时性。
- 5.1.3 应采用先进的硬件设备、网络平台以及开发技术，保证系统具有一定的超前性。
- 5.1.4 监测内容及测点选择应根据结构的形式、重要性、既有病害及风险、外部环境与荷载作用确定。
- 5.1.5 隧道结构宜选择合适的监测对象进行针对性监测内容设计。
- 5.1.6 监测内容、测点选择、设备选型、数据采集与传输、数据处理与管理及软件开发应满足数据分析、结构安全评估及预警的要求。
- 5.1.7 监测内容包括环境、作用、结构响应及结构变化，应根据隧道所处环境、所受作用以及结构构造特点、力学行为特性、状态评估需求、与常规检查的配合和养护管理要求等因素综合确定，监测选项包含应选监测项、宜选监测项、可选监测项。
- 5.1.8 系统宜考虑人工巡检 APP 的开发。
- 5.1.8 结构安全评估及预警应结合人工巡检、定期检测、特殊检测等检测结果进行结构综合状态评估和预警。
- 5.1.9 系统应满足用户的需求，系统软件应操作简便。
- 5.1.10 系统应能比较容易地实现扩展和升级。
- 5.1.11 系统应便于管理部门维护。

### 5.2 城市隧道监测内容及传感器选择

#### 5.2.1 监测内容设计

- a) 在测点选择时，应基于系统造价的考量，遵循代表性强、数量精简的原则进行。
- b) 监测内容与测点选择必须严格遵循以下规定：
  - 1) 针对荷载与环境的监测内容及其测点选择，需充分考虑荷载特性以及地质、水文等自然环境因素的影响；
  - 2) 在确定结构整体响应的监测内容与测点时，应依据结构振动与变形的特性、模态参数的识别需求以及安全评估的标准进行；
  - 3) 对于结构局部响应的监测内容及其测点选择，则需依据结构计算分析的结果以及易损性评估的结论来确定。

- c) 监测内容涵盖荷载与环境、结构整体响应、结构局部响应三大方面。在实际操作中，应根据不同隧道结构的特点，科学合理地选择监测项目。

### 5.2.2 传感器布置原则与方法

- a) 所选位置应确保能够全面且精确地获取结构参数信息；
- b) 所选位置需具备良好的抗噪和抗干扰性能；
- c) 所测得的模态信息应与有限元分析结果保持高度的一致性；
- d) 应具备合理增设测点，以便对特定模态进行重点数据采集的能力；
- e) 所选测点布置位置应对结构参数的变化有较高的敏感性；
- f) 测点应优先布置在结构响应最为不利或易于受损的位置；
- g) 测点的布置需考虑便于传感器的安装与更换；
- h) 应尽量减少信号传输距离，以优化信号质量；
- i) 所选位置应确保测量结果具有优异的可视性。

### 5.2.3 城市隧道监测内容

5.2.3.1 短距离隧道宜仅实施视频监控（长度 $\leq 500\text{m}$ ）。

5.2.3.2 长距离隧道（长度 $\geq 500\text{m}$ ）宜根据隧道规模及结构形式按照表 1 选择监测内容。

表 1 中等以上距离隧道监测内容

类别	监测参数	设备选型	盾构法 隧道	沉管法 隧道	矿山法 隧道	明挖/盖挖 法现浇隧 道
荷载与 环境	环境温湿度	温湿度计	▲	▲	▲	▲
	温度	温度计	★	★	★	★
	视频	高清摄像头	⊛	⊛	⊛	⊛
	空气质量	空气质量监测站点	▲	▲	▲	▲
	风速	风速仪	●	●	●	●
	光照度	光照度仪	●	●	●	●
	地震动及车辆碰撞	三向加速度计	▲	▲	▲	▲
结构整	结构竖向位移	挠度仪	★	★	★	★

体响应	结构水平位移	位移计	★	★	★	★
	地表沉降	位移计	★	★	★	★
	不均匀沉降	挠度仪	★	★	★	★
	结构纵向变形	位移计	▲	▲	▲	▲
	结构接缝扩展	裂缝计	▲	▲	▲	▲
结构局	结构内力	应变计/土压力盒	▲	▲	▲	▲
部响应	结构裂缝	裂缝计	★	★	★	★

注：☼表示必选监测项；★标志应选监测项；▲表示宜选监测项；●表示可选监测项

## 6 监测方法

### 6.1 一般规定

6.1.1 监测方法包括感知方法和数据采集方法，应与隧道环境、作用、结构响应、结构变化监测内容匹配。

6.1.2 传感器与数据采集设备选型应满足监测量程、分辨力、精度、灵敏度、动态频响特性、长期稳定性、环境适应性要求。

6.1.3 监测数据采集频率应满足数据分析和应用要求。

6.1.4 在满足隧道结构健康监测需求的前提下，应按照节约、便利、精简的原则，有针对性地选择不同类型、不同数据格式的监测设备。

6.1.5 监测设备工作环境适应能力应满足其所在隧道的环境条件，可按需配置温湿度控制和保护装置。

6.1.6 现场不具备市电供电条件时，可适当选择低功耗采集方式。

6.1.7 监测方法包括但不限于本指南所列传感器与数据采集设备。

### 6.2 监测方法

6.2.1 环境温度监测设备包括热电偶、热电阻、光纤温度传感器等，环境湿度监测设备包括氯化锂湿度计、电阻电容湿度计和电解湿度计等。

表 2 温湿度仪的技术要求

项目	技术要求
测量范围(相对湿度)	0~100%RH
测量误差(相对湿度)	≤±2%RH(在 20℃条件下)
测量范围(温度)	-40℃~+60℃
误差(温度)	≤+0.5℃
分辨力(温度)	≤0.1℃

6.2.2 风荷载监测设备包括超声波风速仪、机械式风速仪、皮托管等。风速风向宜采用机械式风速仪或二维超声风速仪，有风攻角监测需求的建议采用三维超声风速仪。

表 3 超声波风速仪的技术要求

项目	技术要求
测量参数	三个(或两个)正交方向的风速和风向

风速	测量范围：0~40m/s；分辨力≤0.1m/s
风向	水平测量范围：0~360°；俯仰测量范围：-60°~+60°； 分辨力≤0.1°；误差≤+2°(1-30m/s)，±5°(30-40m/s)

表 4 机械式风速仪的技术要求

项目	技术要求
测量参数	水平风速、风向
风速	测量范围：0~100m/s；误差≤±0.3m/s
风向	测量范围：0~360°；误差≤±3

6.2.3 地震动及车辆碰撞宜采用力平衡式加速度传感器、强震仪、磁电式加速度传感器、压电式加速度传感器等开展监测。

表 5 加速度传感器的技术要求

项目	技术要求
测量范围	>±2g(XYZ 三个方向，可定制)
误差	≤1%
灵敏度	≥2.5V/g(可定制)
黄向灵敏度比	≤1%
频率响应	0~80Hz
动态范围	≥120dB

6.2.4 地表沉降、结构整体不均匀沉降及二次衬砌底板竖向位移可选用微波雷达挠度仪等非接触式测量设备开展位移监测，并对设备采取相应的安全保护措施。

表 5 微波雷达挠度仪的技术要求

项目	技术要求
探测范围	200m(可定制)
测量误差	≤0.1mm

6.2.5 隧道结构纵向变形宜采用拉线式位移传感器、磁致伸缩位移传感器、激光位移传感器等开展监测。

表 7 拉线式位移传感器技术要求

项目	技术要求
----	------

量程	1000mm(根据伸缩缝设计量程可定制)
线性度	±0.1%FS
重复性	±0.01%FS

表 8 磁致伸缩位移传感器技术要求

项目	技术要求
测量范围	2000mm(根据伸缩缝设计量程和支座大小可定制)
线性度	<0.05%F.S
重复性	<0.002%F.S

6.2.6 应变监测宜采用光纤应变传感器、振弦式应变传感器、电阻应变传感器，动应变监测宜采用光纤应变传感器、电阻应变传感器等。

表 9 应变计的技术要求

项目	技术要求
测量范围	-1500 $\mu$ 8~+1500 $\mu$ e
分辨力	≤0.5 $\mu$ e
误差	≤2p8

6.2.7 裂缝监测宜采用自动监测、人工观测或相结合的方式。自动监测设备包括振弦式裂缝传感器、电阻式裂缝传感器、长标距光纤等光纤式裂缝传感器、高清摄像机、导电涂膜裂缝监测传感器等。少量裂缝宜选用振弦式或电阻式裂缝传感器，大面积裂缝监测可采用导电涂膜裂缝监测传感器。

表 10 振弦式裂缝传感器技术要求

项目	技术要求
量程	5mm
误差	±0.01mm
分辨力	0.001mm

## 6.3 数据采集及传输设计

### 6.3.1 数据采集与传输模块设计

- a) 数据采集模块需具备在无人员值守的情境下，能够持续稳定地运行；
- b) 数据采集模块应集成连续采集、触发采集及定时采集等多种功能，以满足不同场景下的数据采集需求；

c) 数据采集软件应内置数据自动采集与缓存管理机制，确保数据的完整性与准确性；  
d) 数据采集模块应具备自启动功能，并支持远程操控，以提高系统的灵活性与便捷性；  
e) 为提升数据采集效率与连续性，数据采集模块应实现数据的同步采集，并具备断点续传功能；

f) 数据采集模块在设计时需充分考虑长期稳定工作的需求，以确保系统的长期可靠运行；

g) 数据传输模块应具备高效、可靠的数据接收、交换与传输能力，确保数据传输过程中的安全性、完整性与及时性；

h) 隧道现场传输设备应安置于符合标准的现场机柜中，并满足电力稳定供给、防火、防水（IP55 防护等级）等高等级防护要求，同时需确保内部温湿度环境满足设备工作要求。此外，隧道结构现场还需遵循防雷设计标准；

i) 数据传输模块的线路布局应符合设备安装的相关规范，并需采取必要的防护措施，以保障线路的安全与稳定；

j) 针对特殊突发情况，应制定详细的数据传输应急预案，以确保数据传输过程的连续性与安全性。

### 6.3.2 数据采集传输设备组网方式

a) 在进行数据采集与传输时，统一采用 RJ45 输出网络接口；

b) 若存在非 RJ45 输出网络接口的设备，应配置适当的转换器，将其接口转换为 RJ45 接口，并确保数据传输遵循 TCP/IP 或 UDP 协议；

c) 采集传输设备应依托以太网总线进行数据的整合与上传；

d) 网络设备之间的数据交互应采用不低于 CAT5E 标准的网线进行连接，以确保数据传输的稳定性和高速性。同时，为确保信号质量，传输距离应控制在不大于 100 米的范围内。

### 6.3.3 数据采集模块软硬件

a) 应根据传感器种类、数量、信号特征、采样频率及对信号的预处理等要求，确定数据采集硬件系统的基本方式和硬件设备选型；

b) 系统应遵循标准协议和标准接口，便于数据传输和存储；

c) 采集模块应具有较高的精度（不宜低于 16 位），并配置信号增益、滤波等功能；

d) 采集设备应具备实时采集、自动存储、自动传输功能，并保证现场采集数据的真实性、有效性、实时性和可用性；

e) 采集设备应便于更换且不影响软件的使用；



f) 不同种类的传感器数据采集，应采用统一的软件架构，提供一致的用户操作界面、规范的代码、统一的参数配置，以提高软件模块的可重用性；

g) 不同物理信号的采集模块，应配备相应的信号转换设备，实现统一组网方式；并可实现模块组合配置，以提高采集软件的可配置性、可扩展性；

h) 应提供统一参数配置界面，可以对所有采集软件进行远程参数配置；

i) 宜采用多线程技术编制采集软件，以提高采集软件的并发性，确保高频采集；

j) 采集软件应可记录软件和设备运行状态，并可定时将设备和软件运行状态写入状态数据库，以方便用户远程查看；

k) 宜采用二进制数据格式文件存储高频采样数据，以确保数据存储的完整性；宜采用标准数据库格式存储低频采样数据，提高采集软件的运行效率；

l) 数据采集站（机柜）布置方案应考虑传感器布置、信号传输距离、易于维护等要求，并预留与通讯、除湿、监控等其他机电工程的接入接口，并与大功率的设备（如抽湿机）的供电完全隔离。

### 6.3.4 采样频率

a) 采样频率应根据监测应用分析要求和功能要求自行设定，宜不低于下列规定：

表 11 荷载与环境采样频率

监测内容	采样频率
环境温湿度	1/600Hz
温度	1/600Hz
视频	实时采集
空气质量	1/600Hz
风速	超声风速仪：1/100Hz 机械式风速仪：1/600Hz
地震动及车辆碰撞	触发采集加速度：50Hz

表 12 结构整体响应采样频率

监测内容	采样频率
结构竖向位移	1/3600Hz
结构水平位移	1/3600Hz
地表沉降	1/3600Hz

不均匀沉降	1/3600Hz
结构纵向变形	1/3600Hz
结构接缝扩展	动态：10Hz 静态：1/3600Hz 图像：每周 1 次

表 13 结构局部响应采样频率

监测内容	采样频率
结构内力	1/3600Hz
结构裂缝	动态：10Hz 静态：1/3600Hz 图像：每周 1 次

**条文说明：**

以上采集频率为最低频率要求，可根据现场实际要求提高采集频率。

b) 环境、作用和结构响应监测数据应同步采集，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：

- ①动态监测变量的数据采集时钟同步误差小于 0.1ms；
- ②静态监测变量的数据采集时钟同步误差小于 1ms。

c) 数据采集应采取抗干扰措施：串模干扰抑制、共模干扰抑制以及防雷接地技术和屏蔽技术，以提高信噪比。

**6.3.4 数据传输方案**

a) 数据传输方式的选择应考虑建设成本、系统稳定性及可靠性等因素，宜优先选择稳定、可靠、低功耗的无线传输技术；

b) 隧道现场与数据中心之间的远距离数据传输，宜采用光纤有线传输方式至数据中心，线路网络带宽（Mbps）不小于（摄像机数量+1）X4；

c) 隧道现场采集站、采集传输设备在距离接入点 $\geq 100\text{m}$ 时宜采用光纤线路进行数据传输；

d) 系统采用的网络采集器、网络转换器、网络传感器等应遵循 TCP/IP 或 UDP 协议。

## 7 系统实施

### 7.1 一般规定

7.1.1 系统现场实施工序宜分为硬件设备采购与测试、软件开发与测试、软硬件安装与联合调试，如图 1 所示。

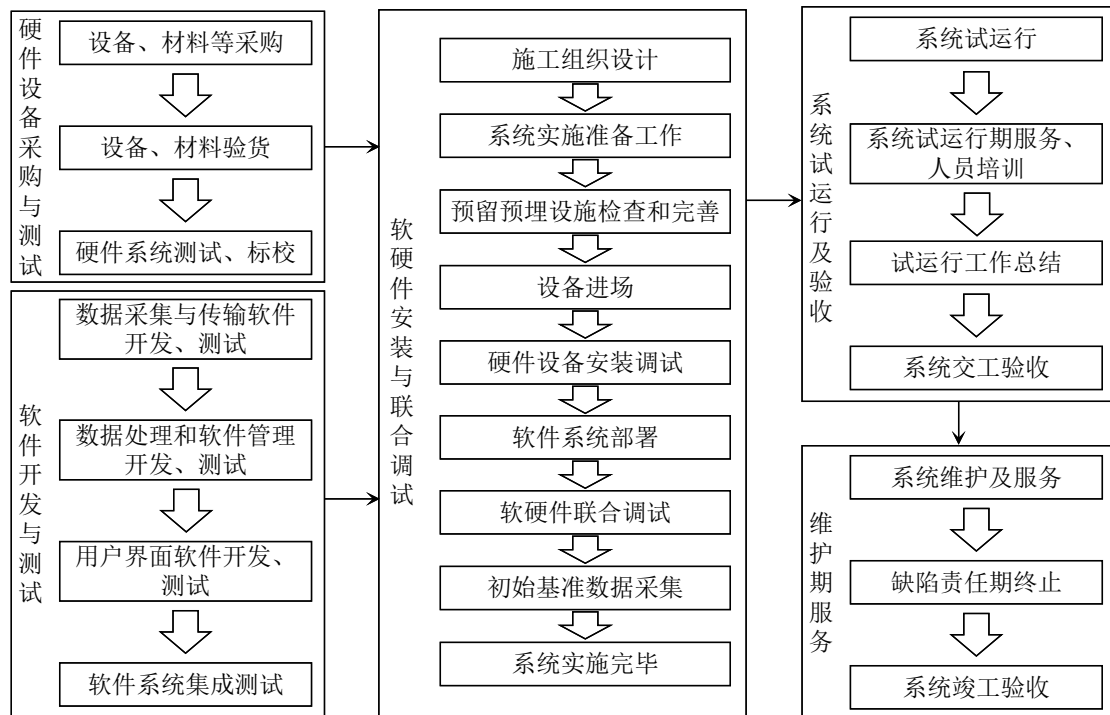


图 1 监测系统实施工序

7.1.2 项目实施前，应编制施工组织设计，并组织评审。

7.1.3 监测系统应制定安全保护措施，可按照《信息安全技术网络安全等级保护基本要求》（GB/T22239）进行系统定级、备案、建设、测评和保护。

7.1.4 监测系统实施现场应根据《公路隧道养护技术规范》设置养护检修通道。

### 7.2 硬件设备部分

7.2.1 应包括施工准备、施工组织设计、隧道外场和数据中心内场的设备、设施安装与调试。

7.2.2 系统采用的材料、设备应符合国家现行有关标准的规定，并附出厂检验合格证。

7.2.3 隧道监测系统的供电、通信、数据中心、预留预埋、开孔开洞，应同步纳入施工图设计文件。建设单位应协调确定监测系统与其他工程的工作界面。

7.2.4 监测系统实施准备应符合以下规定：

- 1) 施工准备应由技术准备和资源准备组成；

2) 技术准备包括工程资料收集、现场踏勘、施工组织设计、技术交底等;

3) 资源准备包括项目部组建、监测设备采购与进场报验、供电、通信、数据中心、预留预埋、开孔开洞等协调, 施工工具、机械准备、临时设施与安全防护设施搭建等工作。

#### 7.2.5 施工组织设计应符合以下规定:

1) 由系统实施单位在完成现场踏勘工作后进行;

2) 由施工技术方案、施工组织方案等组成;

3) 施工技术方案包括传感器、数据采集与传输设备、光电缆线路、数据中心、附属设施等的安装和调试方案等;

4) 施工组织方案应包括建设组织规划、建设进度计划、质量、环保措施等;

5) 现场施工应制定专项的安全施工方案, 在开工前做好安全培训, 对施工中可能出现的风险源进行辨识, 并制定详细的风险防控措施。

#### 7.2.6 安装调试应符合以下规定:

1) 传感器、数据采集与传输设备的安装位置应满足设计要求, 传感器应通过可靠方式与被测结构物牢固连接, 并采取适当的措施予以保护;

2) 安装调试过程应依据作业程序和要求开展, 按有关规定准确填写施工记录表, 记录、整理必要的设备编码、安装参数、初始数据和资料等;

3) 对于主体结构施工过程中的预安装传感器, 实施单位应对其进行核查, 对预安装传感器使用功能、完好状况进行评估, 若无法满足要求, 则由原预安装单位对相应传感器采用附着安装的非埋入式传感器进行替代;

4) 光电缆线应与隧道其他缆线保持必要的距离, 并采取必要的屏蔽措施。光缆敷设弯曲半径应大于光缆外径的 20 倍, 双绞线、同轴电缆、大对数线缆的弯曲半径应大于外径的 15 倍, 接头部位应平直, 避免受力;

5) 光缆接续时应尽量减少接续损耗, 每道工序完成后采用前向双程测试法测量接头损耗, 中断段光纤的平均接头损耗 $\leq 0.05\text{dB}/\text{个}$ ;

6) 供电、接地、防雷的建设应满足设计及相关规范要求, 当电压波动较大、供电不稳时, 应在供电设备输出端加设交流稳压装置, 稳压后对监测设备进行供电;

7) 系统现场传感器、数据采集设备安装到位后应采集初始值, 监测系统完工后应建立监测基准值;

8) 现场采用焊接方式安装时, 传感器温度应低于其允许的最高使用温度; 采用膨胀螺栓安装时, 应按传感器的技术要求选择螺栓规格, 不得使用塑料胀塞或木楔; 紧固件应采用镀

锌制品或与传感器配套的其他防锈制品；安装过程中不得猛烈敲打、强拉或抛扔传感器；

9) 布设传感器的截面应全隧道统一编号，并设置标志牌，标志牌内容应包含截面布设传感器的类型、型号、数量、编号及对应采集设备的编号及通道号；

10) 风向传感器的定北标志方向与正北方的角度偏差应不大于  $1.0^{\circ}$ ，风速风向传感器中轴应保持竖直，应在避雷措施的有效防护范围内；

11) 温湿度传感器不应安装在空气不流通的隧道结构或保护装置内的死角处；

12) GNSS 天线周围  $30^{\circ}$  仰角范围内应无建筑、铁塔等较大的遮挡物，且天线应在避雷针保护范围内；

13) 光图像位移传感器的光源器件、长焦摄像机与被测结构物牢固连接，光源器件在长焦摄像机中的成像清晰度良好；

14) 预埋式应变传感器宜采用结构钢筋或辅助钢筋进行传感器定位，并在传感器两端、中部分别绑扎牢固；表贴式应变传感器安装应先清除结构表面杂质，并将安装表面打磨光滑；

15) 加速度传感器的敏感主轴方向与设计方向保持一致；

**7.2.7** 应对附属设施进行设计和界面划分，与其他工程的界面划分应符合下列规定：

1) 主体结构上的预留预埋件、开孔开洞，由专业施工单位负责施工，对局部防腐涂装、安全防护造成的局部损伤应现场及时专业修复；

2) 系统专用的不间断供电接入点应设置专用动力电源柜；

3) 系统的通信光纤接入点应设在监测系统的数据采集机柜内；

4) 传感器的外部接线应整齐、美观，导线应绝缘良好、无损坏，标识应清晰，固定接线的螺栓和螺钉应拧紧，接线张紧程度应适中，不得使硬件内部收到额外应力；

5) 支架焊接不应有漏焊、欠焊、裂纹和咬边等缺陷；在钢筋混凝土构件上安装支架时应避开钢筋进行钻孔；各支架之间的距离应均匀，宜为  $1.5\text{m}\sim 3.0\text{m}$ ；

6) 线管不得有变形和裂缝，其内部应清洁干燥、无毛刺，管口应有保护措施，线管接头的连接应牢靠，无形变损坏。

7) 线缆敷设时强电、弱电应分离，防止信号传输干扰。

**7.2.8** 结合隧道所在环境，确定系统供电模式，优先采用市电供应。对无市电供应或市电接入距离较远的隧道，可配置满足系统供电需求的太阳能、风能及储电装置。隧道现场应配备电力稳压及储电装置。

### **7.3 系统软件部分**

**7.3.1** 系统软件应编制软件功能需求说明书，并进行专家论证。

7.3.2 软件系统包含软件开发、软件部署、软件测试。系统开发完成后应由第三方软件测试单位进行软件各功能测试，软件实施工序如下图所示。

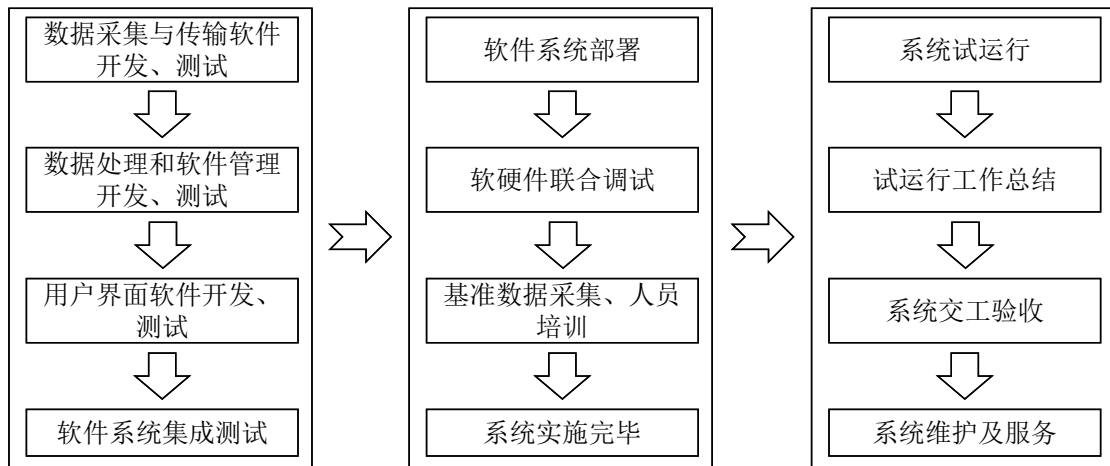


图 2 监测系统软件实施工序

7.3.3 系统设计符合下列规定：

- 1) 各软件模块之间应相对独立、有序融合、方便维护、扩容和升级；
- 2) 软件设计应基于开放性、人性化要求，人机交互友好，操作便捷流畅；
- 3) 数据采集和传输符合下列规定：
  - a) 采集软件宜前置安装运行在隧道现场采集端设备；
  - b) 应具备各类传感器信号的自动化采集和实时上传功能；
  - c) 应具备数据采集频率、采集通道、采集参数的自定义设置功能。
- 4) 数据处理与管理软件符合下列规定：
  - a) 应能接收并解析隧道现场采集的原始数据，并具备数据预处理、特征值提取以及数据持久化存储功能；
  - b) 应能够自定义设置、修改各类监测数据的配置参数、处理频率、输出数据格式等；
  - c) 应根据监测类别设置对应的处理算法，将处理前的原始数据换算成反映隧道环境、作用、结构响应、结构变化的特征数据；
  - d) 宜采用读写分离、分布式存储、时间序列数据库等技术提升数据存取效率和稳定性；
  - e) 音视频、图片、文档类非结构化数据，应设计完整的上传、检索、导出功能，并分类建立单独的存储目录结构。
- 5) 用户界面软件（UI）满足下列要求：

a) 宜采用视觉友好的数据看板，界面应能清晰直观反映数据变化，且符合用户特定使用习惯；

b) 宜采用浏览器/服务器（B/S）架构，满足并发访问需求；

c) 应具备高频采样数据的实时动态展示功能，宜采用图形化方式展示数据；

d) 应具备相关性分析、对比性分析、趋势性分析等统计分析结果展示功能；

e) 应具备超限管理提醒功能，提醒方式可采用颜色变化、消息推送、短信提示、声光报警等；

f) 应具备传感器设备状态自诊断功能，能够显示设备运行状态信息；

g) 对于有移动访问需求的用户，宜开发运行在手机、平板上的小程序、App 等应用软件，功能包含实时数据查看、统计数据查询、超限管理消息推送、车辆荷载监控等；

h) 应具备用户角色管理、权限控制功能，能够更加用户身份控制系统访问权限。

#### 7.3.4 系统软件开发应符合以下规定：

1) 各单条隧道系统软件平台的架构及功能尽量保持一致，应能与省级、部级平台高效衔接；

2) 采用主流的软件开发技术和框架，软件内部各模块应功能独立，模块之间耦合性低；

3) 软件编写遵循国际通用编码规范和注释规范，程序编码风格应简洁易读、结构清晰、易于调试维护；

4) 多方协同开发的软件模块，需使用软件代码版本控制工具；

5) 系统软件内部不应内置与业务功能无关的后门程序、加密模块；

6) 按照《计算机软件文档编制规范》（GB/T 8567）等计算机软件行业标准要求编写软件开发文档和接口文档；

7) 软件开发时选用的技术路线应包括安全性、可靠性和技术先进性，边缘计算、分布式处理、消息中间件、时序数据库等应做到技术先进可靠。

#### 7.3.5 系统软件测试应符合以下规定：

1) 软件开发完成后由具备相关资质的软件测评单位进行软件测试，测试内容包含单元测试、功能测试、性能测试、集成测试等；

2) 软件测试前应编写测试方案和测试用例，测试流程和内容应符合《计算机软件测试规范》（GB/T 15532）和《计算机软件测试文档编制标准》（GB/T 9386）相关要求；

3) 软件测试完成后由测评单位出具《软件测试报告》，报告应详细描述每个测试用例的测试结果，对于重大功能偏离、缺陷和逻辑错误，需经开发单位修复完善后再次提交测试，

最终测试通过率应不低于测试用例总数的 95%，软件功能完好率应达到 100%。

#### 7.3.6 系统软件部署应符合以下规定：

- 1) 软件部署前应编制软件部署建设指南，开发过程规范有序，开发完成后各功能完好；
- 2) 软件现场部署前，服务器、工作站、工控机等硬件安装完毕并接电稳定运行，数据中心网络、供电、通信、照明等应满足设计要求；
- 3) 操作系统、应用组件、数据库等应用支撑软件的安装和配置应满足软件设计文件的要求；
- 4) 软件安装和调试分步进行，软件部署完成后现场、数据中心同步功能确认。

### 7.4 软硬件联合调试

7.4.1 数据采集与传输软件部署完成后与隧道现场感知设施进行数据采集校验，确保数据输出通道、数据流、方向、精度等与外场设备安装保持一致。

7.4.2 数据处理与管理软件部署完成后，应确保数据接收、处理和存储等功能满足设计文件要求。

7.4.3 软硬件联合调试完成后，用户界面软件各项功能正常，监测数据展示准确，界面数据值、数据精度、数据单位应与设计文件和传感器输出一致。

7.4.4 各软件节点与外场传感器之间的时间同步误差、网络延迟误差、信号噪声量等满足设计文件规定。

7.4.5 系统建设软件功能完好率宜不低于 100%，数据完好率宜不低于 90%。数据完好率可采用公式（1）计算：

$$S = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^p t_i}{P \times T} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$S$ ——测点数据完好率；

$p$ ——故障测点数量；

$t_i$ ——第  $i$  个故障测点故障时间，单位为天（ $d$ ）；

$P$ ——总测点数量；

$T$ ——检查周期时间，单位为天（ $d$ ）。



## 8 系统验收

### 8.1 一般规定

8.1.1 系统调试应由机电、结构和软件专业技术人员组成调试小组，根据设计文件和产品技术文件进行。

8.1.2 系统调试前应做好如下准备工作：

- 1) 系统调试前应制定调试方案并采取必要的安全防护措施。
- 2) 系统调试应进行单项调试和联合调试，并出具调试报告。
- 3) 系统验证使用的计量仪表和检测器具应在规定的使用期内且检定合格，仪表和器具的测量精度应不低于相应传感器的测量精度。
- 4) 按照施工资料查验已安装硬件和软件的规格、型号、数量和标识位置，应正确无误：
- 5) 查验接地系统和接地电阻符合设计要求；当无设计要求时，接地电阻应小于  $4\Omega$ ；
- 6) 断开不同接地系统的公共连接点后，不同接地系统之间的绝缘阻值应大于  $50M\Omega$ ；
- 7) 查验引入电源是否符合设计或设备电源要求，包括电源种类、电压、负载能力等。

#### 8.1.2 单项调试

1) 供电调试：

a) 电源设备的带电部分与金属外壳之间的绝缘电阻应满足产品设计要求，当无设计要求时，用兆欧表测量时不应小于  $500M\Omega$ ；

b) 市电 220V 电压波动不应超过  $\pm 10\%$ ，当超过该范围时，应加装稳压设备；

c) 60V 以上的直流电源电压波动不应超过  $\pm 10\%$ ，60V 以下的直流电源电压波动不应超过  $\pm 5\%$ ；

d) 不间断电源宜进行自行切换性能试验，切换时间和切换电压值应符合产品技术文件的规定。

2) 信号调试：

a) 检查各传感器采集参数设置是否满足设计要求；

b) 当设计要求多种采集策略时，应针对每种采集策略分别测试传感器能否正确返回测试信号；

c) 单个传感器采集数据的响应时间应满足设计和产品技术文件的要求；

d) 需要同步采集的传感器其同步精度应满足监测需要。

### 3) 数据调试:

- a) 传感器的编号及数据在现场数据库及远程数据库中应完全对应;
- b) 传感器数据应与其物理位置对应;
- c) 数据存储精度应不低于传感器的分辨率;
- d) 各传感器的测量数据不应超过传感器测量范围和设计文件规定的测量范围。

### 8.1.3 联合调试

#### 1) 隧道结构安全监测系统的功能调试包括:

- a) 自动和人工实现数据采集、传输和存储功能;
- b) 数据显示、回放和统计功能;
- c) 隧道安全监测系统报警和预警功能;
- d) 隧道安全监测系统评估功能;
- e) 设计文件要求的其他功能。

#### 2) 隧道结构安全监测系统的时钟每月最大计时误差小于 5s。

#### 3) 在试运行期间隧道结构安全监测系统的可靠性应满足下列要求:

a) 设备每月平均无故障工作时间应大于每月总时长的 95%，统计时宜排除网电等外部因素影响;

- b) 系统自动采集数据日均数据缺失率应不大于 5%。

#### 4) 试运行期间隧道结构安全监测系统的稳定性应满足下列要求:

a) 在监测点与人工测试点相同或邻近条件下，系统自动采集数据与相应时间人工测试数据的规律一致，变化幅值接近;

- b) 监测数据具有较好的周期性，无明显的系统性偏移。

### 8.1.4 系统验证

#### 1) 系统验证抽样的传感器数量应满足设计文件的规定。

2) 对可采用参考计量仪器进行验证的被测参量，系统实测数据与同时同条件人工比测数据的偏差应小于抽样传感器测量精度的 3 倍。

#### 3) 系统安装完成后，可采用车辆实施加载试验对系统进行验证。

#### 4) 在相同截面处，隧道定期观测位移与监测系统位移测试的变化趋势应吻合。

## 8.2 验收要求与评分办法

### 8.2.1 分项工程验收要求

#### 1) 分项工程内设备安装完成，符合设计文件和本规范的规定时，可向监理和业主提交

书面申请进行分部分项验收。

- 2) 分项工程验收时, 应提交下列文件:
  - a) 安装和质量检查记录;
  - b) 隐蔽工程记录;
  - c) 硬件和材料的产品质量合格证明。

### **8.2.2 分部工程验收要求**

1) 文件范围内传感器安装、线缆敷设以及软件部署完毕, 监控机房安装完成后, 可向监理和业主申请分部工程验收。

- 2) 分部工程验收时, 应提交下列文件:
  - a) 分项验收所提交资料;
  - b) 调试试验记录;
  - c) 硬件清单;
  - d) 软件清单。

### **8.2.3 单位工程验收要求**

1) 系统正常运营 90 天、经验证合格及完成档案验收后, 可向监理和业主申请竣工验收。竣工验收按期举行确有困难的, 经工程验收主持单位同意, 可适当延长期限。

- 2) 提交竣工验收报告前应完成下列事项:
  - a) 历次检查和监理发现的问题已全部处理完毕;
  - b) 归档资料符合工程档案资料管理的有关规定。

3) 系统竣工验收前整体性能达到验收要求

- a) 监测数据必须有效传输至隧道管理部门监控中心, 统一维护管理;
- b) 系统应保证 24h 连续工作;
- c) 系统应满足实时监测、定期远程监控、特殊环境状况下的应急监测需求;
- d) 系统应满足人工控制启动功能;
- e) 必须提供系统完整的帮助文档和操作手册。

4) 工程资料清单包括:

- a) 竣工验收申请报告;
- b) 竣工图;
- c) 工程决算书;
- d) 图纸会审记录, 设计变更洽商记录;

- e) 材料、硬件的质量合格证明；
- f) 施工记录。包括必要的检验、试验记录；
- g) 中间交接记录与证明；
- h) 工程质量事故发生和处理记录；
- i) 工程变更单；
- j) 其它有关该项工程的技术决定和技术资料；
- k) 系统使用说明书；
- l) 系统维护说明书；
- m) 系统硬件、软件清单；
- n) 系统审批资料：本规范规定的在软件实施过程中形成的文档；
- o) 软件测试报告；
- p) 系统试运行报告。

#### 8.2.4 分项工程质量评分

1) 分项工程质量检验按检验批对分项项目进行评定，检验批检验内容包括基本要求、实测项目、外观鉴定和质量保证资料四个部分。

2) 只有在其使用的原材料、半成品、成品及施工工艺符合基本要求的规定，且无严重外观缺陷和质量保证资料真实并基本齐全时，才能对检验批质量进行检验评定。

3) 检验批的评分值满分为 100 分，按实测项目采用加权平均法计算。存在外观缺陷或资料不全时，须予减分。

检验批得分= $(\sum[\text{检查项目得分} \times \text{权值}]) / (\sum \text{检查项目权值})$  检验评分值=检验批得分-外观缺陷减分-资料不全减分

4) 分项工程的评分值满分为 100 分，按实测项目采用加权平均法计算。

分项工程得分= $(\sum[\text{检验批评分} \times \text{权值}]) / (\sum \text{检验批权值})$

#### 8.2.5 分部(单位)工程质量评分

进行分部工程和单位工程评分时，采用加权平均值算法确定相应的评分值。

分部(单位)工程评分值= $(\sum[\text{分项(分部)工程评分} \times \text{权值}]) / (\sum \text{分项(分部)工程权值})$

#### 8.2.6 评分流程

按照分项工程、分部工程、单位工程顺序，逐级计算工程质量评分。

- a) 根据分项工程质量评定的公式计算各分项工程评分；
- b) 根据分项工程评分，对各分部工程算出一个算术平均分；

c)采用已算出的各分部工程得分，按加权平均计算单位工程评分。

### 8.2.7 工程质量等级评定办法

工程质量评定等级分为合格与不合格，应按分项，分部，单位工程逐级评定。

#### 1) 分项工程质量等级评定

a) 分项工程合格标准必须同时满足以下条件：

①评分值不小于 90 分者；

②涉及结构安全和使用功能的重要实测项目为关键项目(在文中以“△”标识)，其合格率不得低于 100%，且检测值不得超过规定极值，否则必须进行返工；

③实测项目的任一单个检测值均不得突破规定极值，不符合要求时该分项工程为不合格。

b) 评定为不合格的分项工程，经加固、补强或返工、调测，满足设计要求后，可以重新评定其质量等级，但计算分部工程评分值时按其复评分值的 90%计算。

#### 2) 分部工程质量等级评定

所属各分项工程全部合格，则该分部工程评为合格；所属任一分项工程不合格，则该分部工程为不合格。

#### 3) 单位工程质量等级评定

所属各分部工程全部合格，则该单位工程评为合格；所属任一分部工程不合格，则该单位工程为不合格。

### 8.2.8 检验评定一般规定

1) 分项工程检查频率：承包单位为 100%；验收抽查不低于 30%，当项目测点数少于 3 个时，全部检查。

2) 分项工程各项实测项目的权值：关键项目为 2，非关键项目为 1。

3) 所采用的仪器设备、原材料、半成品和制成品，均应符合有关产品标准、规范或合同的要求，并应具有符合国家认可标准要求的质量检查机构出具的检验合格证和出厂合格证。

4) 监测设备的基础、法兰、地脚、支架等及其防腐处理均应符合相关规范和设计要求，连接牢固、可靠，并不得影响隧道的结构安全和使用功能。

## 9 系统运维

9.1.1 隧道管理部门应安排专职人员对隧道结构安全监测系统进行了日常维护管理，日常维护宜7天1次。

9.1.2 隧道管理部门宜聘请专业公司对隧道结构安全监测系统进行了定期维护管理，定期维护宜1年1次。

9.1.3 维护人员应掌握系统的硬件性能和技术参数，熟练操作系统各类软件；系统出现故障，系统维护人员进行处理时，应同时判断系统类型和故障级别，根据系统类型和故障级别，能独立处理系统可能出现的各类故障；在系统出现重大故障时应及时上报，并协助专业人员查明原因，处理故障。

9.1.4 养护人员应根据系统不同特点及养护质量要求，制定不同周期作业计划，并报系统管理部门审批。

9.1.5 宜定期组织系统养护技术培训、技术交流，提高养护人员管理和技术水平。

9.1.6 系统维护内容应包括现场采集传输硬件设备维护、配套网络维护、机房硬件设备与环境维护、应用软件维护四部分。

9.1.7 系统日常运行和维护管理，应实时监控系统运行状态，保证系统各类运行指标符合设计要求。

9.1.8 系统维护前应采取数据保护措施，如数据备份；数据备份、存储和管理应根据相关业务特性和需要制订养护作业实施步骤。

9.1.9 应详细、准确填写《系统维护记录》：维护原因、维护内容、维护前系统情况、维护后系统情况、维护起止时间、维护者、批准者；建立健全必要的技术资料 and 原始记录管理制度。

9.1.10 系统维护人员都应熟悉并严格遵守和执行信息安全保密相关规定。

9.1.11 监控中心机房环境应符合国家相关标准的要求(《数据中心设计规范》-GB50174)

9.1.12 系统建成后，建立系统维护制度，编制工作手册，并对隧道结构安全监测系统操作人员进行系统使用、维护、信息解读等培训。

9.1.13 当隧道结构遭遇地震、洪水、爆炸、火灾等突发性事故或灾害时，应对系统进行紧急检查，及时评估系统运行状态。

## 10 数据分析与管理

### 10.1 数据处理

10.1.1 监测系统软件应能够接收并解析隧道现场发送的各类监测数据，并具备数据预处理、二次处理、特征值提取以及数据持久化存储功能。

10.1.2 系统软件宜能够通过可视化界面远程进行数据处理参数设置。

10.1.3 应针对不同的监测项设计对应的处理方法，对数据进行滤波、特征提取、数据解耦、转换与统计等处理。

10.1.4 宜采用人工智能、深度学习等先进技术对数据质量诊断并开展数据分析处理研究。

10.1.5 应将先进的、适用的结构分析算法集成到监测系统中，深入分析、挖掘数据，实现数据分析和预警的自动化。

10.1.6 应明确定义处理后监测数据的数据单位、数据方向、数据精度。

10.1.7 数据处理宜采用多线程、分布式并行计算、Redis 等技术提升数据处理和存取效率，最大限度提升数据处理时效性。

10.1.8 数据采集设备内置的数据预处理功能应与传感器的分辨率、精度、抗电磁干扰等性能相匹配，应剔除错误数据并将原始数据换算成反映隧道环境、作用、结构响应、结构变化的特征数据。

10.1.9 传感器感知的信号应进行调理、预处理，并采用阈值法、平均值法以及其他滤波算法进行原始信号数据处理。

10.1.10 数据异构转换应支持感知控制设备或系统通信协议，支持解析指定的感知数据包和控制数据包，支持通过协议转换模块进行数据结构转换，实现感知控制设备与网关或系统之间数据互通。

10.1.11 从数据源中提取数据应支持全量抽取、增量抽取、基于日志抽取等抽取模式，可支持地理空间信息数据的抽取，支持数据抽取格式和流程的自定义配置。

10.1.12 对图像、音频、视频及文本非结构数据特征抽取应符合 GB/T 32630 的相关规定。

### 10.2 数据存储

10.2.1 宜采用数据库技术对结构化数据进行存储，并能以数据接口形式对外提供数据调用和查询功能。

10.2.2 数据库设计应遵循技术先进、架构合理的设计原则，宜按照不同的数据类型和功能进

行分类存储管理。

**10.2.3** 宜按照监测系统功能模块和业务类型划分为隧道结构信息数据库、监测系统信息数据库、结构有限元模型数据库、实时数据库、数据分析数据库、监测应用数据库等专项数据库。

条文说明：

数据库是一种在计算机内部长期存储的、经过系统组织的、可供多用户共享的数据集合。其中，隧道结构信息数据库主要包含隧道的基本概况以及历史检查记录等关键信息；监测系统信息数据库则详尽记录了监测系统的概况、具体监测内容、测点的布设位置以及所采用的传感器设备等核心要素；结构有限元模型数据库则专注于存储结构有限元分析的计算结果；实时数据库则聚焦于实时监测数据与视频监测数据的即时收集与存储；数据分析数据库则专注于对数据进行统计分析、相关性分析以及趋势性分析等深度挖掘；而监测应用数据库则涵盖了分析报告的生成、超限阈值与报警机制的设立、检查建议的提出以及特殊事件的应急管理等方面实际应用方面的内容。

**10.2.4** 应考虑数据量增长对于数据存取的压力，基于数据安全和存取效率，宜探索采用读写分离、视图机制、分布式存储、时序数据库等方式。

**10.2.5** 对于视频、图片、文档等非结构化数据，应设计完整的存入、检索、导出功能，设置适宜存储资源进行存储管理，不同数据类型应分类建立单独的存储目录结构。

**10.2.6** 应提供参数配置功能，能够对各类监测数据的配置参数、处理频率、输出数据格式等进行自定义设置、修改。

**10.2.7** 宜具备数据备份和故障恢复功能，并设置灾备机制对关键数据进行定期异地备份，对于故障支持自动和手工操作进行故障恢复。

**10.2.8** 对监测系统采集的各类数据应根据其重要程度、使用频率和数据量大小进行分级分类存储管理，存储方式宜分为在线存储和离线存储。

**10.2.9** 隧道现场数据采集站内宜安装采集计算机，采用循环更新存储方式。在网络中断情况下，现场本地数据存储空间结构化原始数据应大于等于 90d，非结构化视频图像数据应大于等于 30d。

**10.2.10** 监控中心计算机机房实时监测数据存储时间大于 5 年。经处理后的特征数据、超限报警、评估结果等结构化数据存储时间宜大于 20 年。

**10.2.11** 监控中心计算机机房非结构化视频数据存储宜大于 90 天，特殊事件视频数据应转移备份并永久保存。

**10.2.12** 可考虑租用云服务商提供的云存储方式，云存储方案应综合考虑网络带宽、数据安



全、存储容量等要求，确保满足应用要求。

**10.2.13** 监测系统数据存储宜具备容灾备份机制，并具备数据压缩存储和异地备份功能，对关键数据宜定期进行异地备份。

**10.2.14** 数据安全应包含数据完整性、数据加密、数据访问权限控制和数据可审计性。

**10.2.15** 数据完整性应包含数据传输完整性和数据存储完整性,并符合下列规定：

- 1) 数据传输完整性宜符合 GB/T 37025 的相关规定；
- 2) 应采用封装签名、测试字验证、引用约束等方式保证数据存储完整性,并提供非完整数据的解决措施。

**10.2.16** 对监测系统敏感字段或业务数据应加密存储。

**10.2.17** 通过公网传输监测数据时，应根据管理要求进行加密传输，加密过程应使用国家密码管理部门批准使用的算法。

**10.2.18** 数据审计应具备监测记录外部用户访问监测数据行为的功能。

**10.2.19** 监测系统应具备数据访问权限控制功能，能够对用户访问权限进行分级管理。

### **10.3 系统安全**

**10.3.1** 应建立网络安全应急工作机制，对系统信息安全实行分级管理。

**10.3.2** 宜明确系统安全保护等级要求，可从物理层、网络层、应用层、系统层等方面构建多层次网络安全防护体系。

**10.3.3** 监控中心应建立物理安全保障措施，宜配备消防设施、防雷击和电磁干扰设备、视频安防和门禁系统，并配备恒温空调和 UPS 设备。

**10.3.4** 监控中心网络应按照功能划分安全域，宜分为数据存储域、数据处理域、应用服务域和工作域，且各安全域之间能够进行隔离。

**10.3.5** 应采用防火墙技术实现核心应用层与互联网之间的安全阻断与隔离，各应用服务器采取安全防护措施以阻断木马程序、病毒的传播。

**10.3.6** 各应用服务器、工作站应安装防病毒软件、日志系统、安全审计模块等。

**10.3.7** 系统数据库应采用用户标识和鉴定、数据存取控制、数据库审计、异地备份等技术保证数据存取安全。

**10.3.8** 系统软件应具备下列安全功能：用户角色管理、权限控制功能；用户登录密码复杂性校验功能，并定期提示用户更换密码；安全加密和分级授权功能；日志记录功能。

**10.3.9** 采用云服务技术的监测系统应符合 GB/T31167、GB/T31168 的相关规定。

## 10.4 数据分析、评估

10.4.1 应分析环境、作用、结构响应和结构变化监测数据，并宜结合隧道养护的经常检查、定期检查与特殊检查数据。

10.4.2 监测数据分析应剔除错误数据，监测数据分析方法可采用统计分析、相关性分析、趋势性分析、比对性分析、机器学习，也可采用其他可靠方法。

10.4.3 监测数据分析样本时长，宜根据监测内容的特征确定。

10.4.4 环境监测数据分析符合下列规定：

1) 温度监测数据应分析最高温度、最低温度、最大温差等，宜用于温度作用与效应分析；

2) 湿度监测数据应分析最大值、平均值和超限持续时间等；宜分析湿度时空分布以及单个测点湿度与累积持续时间的统计直方图。监测结果可反馈隧道相关部件附属机电设备（如除湿机）工作效率，用于针对性检查，指导管养，也可用于耐久性研究；

10.4.5 变化监测数据分析符合下列规定：

1) 混凝土结构裂缝监测数据宜分析裂缝长度、宽度、数量、位置及其随时间变化规律，可分析裂缝与环境、作用和结构构造的相关性；

2) 体外预应力监测数据宜分析其预应力变化程度和趋势。

10.4.6 宜分析不同类型监测内容之间、相同类型监测内容之间数据相关性，包括环境、作用与结构响应、结构变化之间的相关性，不同构件、测点的结构响应、结构变化之间的相关性等，进行相关性分析的测点可根据隧道力学分析选择。

10.4.7 对于环境特别复杂或结构形式特殊的隧道，建议采用多种形式的分析方法，以得到更为精准的、多维度的分析结论，包括但不限于以下分析方法。

表 14 监测数据分析方法

数据分析类型	数据分析方法	备注
相关性分析	皮尔逊相关系数法	衡量变量之间线性关系强弱的统计量，可以反映出两个变量之间的相关程度，对于建立模型、分析数据和预测趋势具有重要意义
	机器学习	通过分析特征之间的相关性,可以更加准确地选择具有高预测能力和独立性的特征,从而提高特征选择的效果和结果
模态参数分析	实时在线隧道模态参数自动识别	实现集数据采集、传输和分析一体化的模态参数自动识别系统框架，通过建立数据解析过程，保证实时在线模态识别的数据获取，

		并通过动态可变滑动数据窗，保证在线自动识别的实时性
车辆荷载分析	荷载校验系数法	可用于超载车辆管控、车流量预测、实测车辆荷载作用下的疲劳评估，可用于研究结构刚度长期退化规律
结构响应疲劳损伤指数	雨流法	通过雨流法计算结构累积损伤指数，评估结构疲劳损伤状态

**10.4.8** 隧道结构响应受到环境和运行条件变化的影响，它可能掩盖由于结构损伤引起的结构响应及自身特性的变化，因此建立应变、位移等结构响应与温度和交通荷载特征量之间的相关性模型，对于损伤识别是十分重要的。

**10.4.9** 系统的关联性不仅表现在内部子系统之间的相关性、子系统与整体之间的相关性，也表现在隧道系统与外界环境的相互作用，一般来说，隧道结构中各类参数之间的关联有以下几类：

- 1) 环境关联性：外部环境对测点传感器影响最大；
- 2) 结构关联性：系统由不同的子系统构成，位于不同的子系统上的结构参数之间的关联性也不同；
- 3) 位置关联性：同一系统中位置相近的传感器表现更强的关联性；
- 4) 时间相关性：各测点在同一时刻测得的数据关联度会比较大，这些数据表现出在时间上的关联性；
- 5) 类别关联性：系统中有不同类别的测试参数，系统测点之间的关联性是多种多样的，测点之间可能存在多种关联性，而且这种关联性可能会发生一定的变化。

**10.4.10** 隧道结构健康度包括结构整体健康度和结构构件健康度，等级宜划分为 I 基本完好、II 轻微异常、III 中等异常、IV 严重异常四级，评定依据见下表。

表 15 隧道结构健康度等级评定依据

健康度等级	结构构件	结构整体
I 基本完好	a) 中所列监测数据无超限	b) 中所列监测数据超限等级全部为一级或无超限
II 轻微异常	a) 中所列监测数据超限等级一级	b) 中所列其他监测数据与分析结果超限等级仅有 1 项为二级，无三级
III 中等异常	a) 中所列监测数据超限等级二级	b) 中所列监测数据与分析结果超限等级出现多项（2 项及以上）二级或 1 项三级；当锚碇位移出现一项或以上

		二级；或多项构件健康度中等异常
IV 严重异常	a) 中所列监测数据超限等级三级	b) 中所列监测数据与分析结果超限等级出现多项三级； 或多项构件健康度严重异常
<p>宜通过监测数据分析、并与超限阈值比较，进行隧道结构健康度评估，评估参数包括：</p> <p>a) 构件健康度表征评估参数：关键截面应变、裂缝、土压力等监测数据。</p> <p>b) 结构整体健康度表征评估参数：采用管片结构竖向位移和横向位移、净空收敛；二次衬砌拱顶沉降、底板沉降、净空收敛；地表沉降；结构纵向变形、接缝扩展。</p>		

**10.4.11** 当构件健康度或结构整体健康度为III级中等异常或IV级严重异常时，应进行专家研判。