

水下隧道结构健康监测技术规程

Technical specification of structure health monitoring for underwater tunnel

地方标准信息服务平台

2022-03-23 发布

2022-09-01 实施

目 次

前 言	II
1 总则	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和符号	1
4 基本规定	3
5 结构健康监测的内容	4
5.1 一般规定	4
5.2 监测项目与数据要求	5
5.3 监测区段、监测断面及测点	7
6 结构健康监测系统设计	8
6.1 一般规定与总体设计	8
6.2 传感器子系统	9
6.3 数据采集与传输子系统	9
6.4 数据处理与控制子系统	10
6.5 数据存储与管理子系统	11
6.6 状态评估与预警子系统	11
6.7 用户界面子系统	12
7 施工结构健康监测系统施工与验收	13
7.1 一般规定	13
7.2 传感器安装	14
7.3 综合布线	16
7.4 采集站与机房安装	18
7.5 软件开发、测试与部署	19
7.6 系统调试	20
7.7 系统试运行	20
7.8 系统验收	21
8 结构健康监测系统维护	24
8.1 一般规定	24
8.2 传感器子系统	25
8.3 数据采集与传输子系统	25
8.4 数据处理与控制子系统	26
8.5 数据存储与管理子系统	26
8.6 状态评估与预警子系统	27
8.7 用户界面子系统	27
附 录 A （资料性） 水下隧道结构健康监测常用传感器	28
附 录 B （资料性） 层次分析法	31

前 言

本规程按照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。

本规程由江苏省住房和城乡建设厅提出。

本规程由江苏省住房和城乡建设厅归口。

本规程起草单位：苏交科集团股份有限公司、南京大学、南方科技大学、南京交通运营管理集团有限公司、南京市公共工程建设中心、扬州市隧道管理处。

本规程主要起草人：黄俊、张巍、张忠宇、陈喜坤、邵理阳、沈阳、丁鸿志、鄂俊宇、闫立胜、房倩、黄大维、牛晓凯、李建春、董飞。

地方标准信息服务平台

水下隧道结构健康监测技术规程

1 总则

1.0.1 为规范结构健康监测技术在水下隧道中的应用，提高水下隧道结构维护管理水平，促进相关技术的提升，制订本规程。

1.0.2 本规程适用于盾构法、堰筑法、钻爆法、顶管法及沉管法水下隧道的结构健康监测，其他类型隧道可参照执行。

1.0.3 水下隧道结构健康监测除应符合本规程外，应同时符合国家现行有关标准的规定。

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 50982 建筑与桥梁结构监测技术规范
 GB 50911 城市轨道交通工程监测技术规范
 GB 50497 建筑基坑工程监测技术标准
 GB 50311 综合布线系统工程设计规范
 GB 50312 综合布线系统工程验收规范
 GB50446 盾构法隧道施工及验收规范
 GB 50300 建筑工程施工质量验收统一标准
 GB/T 14412 机械振动与冲击 加速度计的机械安装
 GB/T 15532 计算机软件测试规范
 GB/T 9386 计算机软件测试文档编制规范
 GB 50205 钢结构工程施工质量验收标准
 GB 50303 建筑电气工程施工质量验收规范
 GB 50343 建筑物电子信息系统防雷技术规范
 JT/T 1037 公路桥梁结构安全监测系统技术规程
 JTG H12 公路隧道养护技术规范
 CJJJ/T 289 城市轨道交通隧道结构养护技术标准
 JTGF 80/1 公路工程质量检验评定标准
 CECS 333 结构健康监测系统设计标准
 T/CECS 652 结构健康监测系统运行维护与管理标准
 T/CECS 529 大跨度桥梁结构健康监测系统预警阈值标准
 DB32/T 2880 光纤传感式桥隧结构健康监测系统设计、施工及维护规范

3 术语和符号

下列术语和符号适用于本文件。

3.1

水下隧道 Tunnel Underwater

下穿河流、湖泊、海湾或海峡等水域的隧道。

3.2

结构健康监测 Structural Health Monitoring

利用现场的、无损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。

3.3

结构健康监测系统 Structural Health Monitoring System

一种集传感、数据采集与传输、结构状态参数与损伤识别、性能评价与预测技术为一体的自动化、信息化监测系统，主要由传感器及采集仪器设备等硬件系统和数据分析及结构分析等软件系统构成，通过对结构进行连续性（包括实时或不同频度）测试，实现对结构当前及未来服役状况与潜在风险的分析评价。

3.4

风险源 Risk Source

可能导致事故发生的直接因素。

3.5

风险 Risk

采用山石或其它材质制作的仿山石，配置组合成山峦和山间局部形态。某一事故发生的可能性和严重程度度的组合。

3.6

结构安全风险分析 Structural Safety Risk Analysis

对风险源可能导致事故进行分析，找出可能致害物、事故原因等。

3.7

隧道病害 Tunnel Disease

隧道在运行过程中由于外力、材料劣化等造成的影响隧道使用功能的损伤及劣化状态。

3.8

测点 Measuring Point

布置传感器的点位。

3.9

监测断面 Monitoring Section

对应隧道某一桩号，进行测点布置的隧道断面。

3.10

监测区段 Monitoring Area

由多个监测断面组成，具有一定代表性，能够集中反映隧道结构或环境变化的连续监测范围。

3.11

采集站 Measuring Unit

构成假山有特定形态和功能作用的石峰、石壁等石体。将不同被测参量的数据采集设备、数据传输设备集中安放的装置。

3.12

温度补偿 Temperature Compensation

岩体壁面裂隙和凹槽。采取有效措施以抵消或减弱温度变化对被测物理量特性造成的影响。

3.13

监测频率 Monitoring Frequency

分开的对立岩体形成隘口和隘路地形，也可构成各自独立的主次峰、壁体。单位时间内的监测次数。

3.14

预警阈值 Precaution Value

叠置假山的各类山石块和用建筑材料加工出的仿山石块。对隧道运营环境、结构构件可能出现的不同程度异常或危险，所设定各监测点设备的监测参数警戒值。

3.15

结构安全预警 Early-warning of Structural Safety

料石表面的浅细裂痕和凹凸面棱。结构荷载作用、响应或评价指标超过预警阈值时，结构健康监测系统按预定方式自动发出警告的行为。

3.16

结构安全状态评价 Structure Health State Evaluation

塑石表面呈现出的平滑和粗糙感。通过监测数据分析水下隧道结构当前的工作状态，并与相应的临界状态进行比较分析，评价其安全程度。

CR	——	判断矩阵相对一致性指标；
x	——	监测指标数值；
x_0	——	竣工状态下水下隧道某监测项目理论设计值；
x_i	——	运行状态下水下隧道同一监测项目的第 <i>i</i> 次实测值；
n	——	运行状态下水下隧道同一监测项目的实测总数；
x_{min}	——	监测指标在区域范围内的最小值；
x_{max}	——	监测指标在区域范围内的最大值。

4 基本规定

4.1 水下隧道工程在设计阶段应提出结构健康监测技术要求，相关设施宜与隧道施工同期实施。

4.2 结构健康监测应满足在全寿命周期内掌握水下隧道结构安全状态的要求。

4.3 结构健康监测内容应结合结构安全风险分析进行确定，主要包括监测项目、监测区段、监测断面及测点等。

4.4 结构健康监测应充分利用隧道施工期间既有的监测设备和监测数据。

4.5 结构健康监测宜按照图 4.0.5 所示流程开展工作。

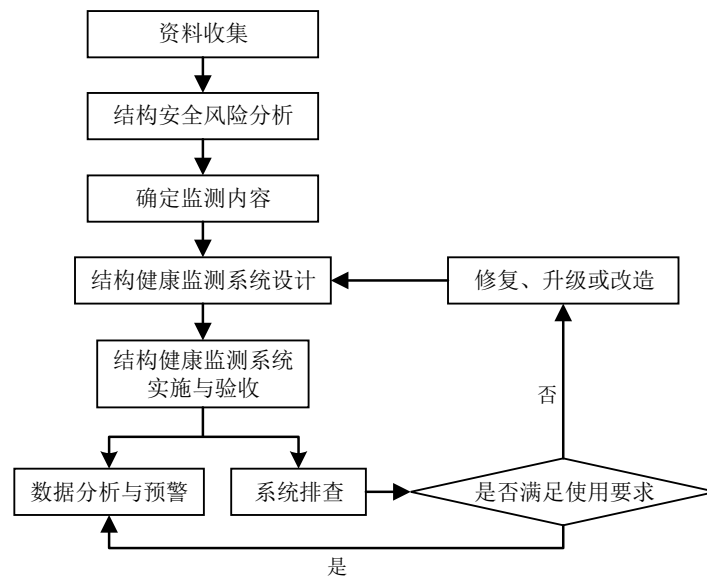


图 4.0.5 结构健康监测工作流程

4.6 结构健康监测系统应具有采集、传输、存储、数据处理、预警与安全状态评估等功能，应包含以下子系统：

- 1 传感器子系统。
- 2 数据采集与传输子系统。
- 3 数据处理与控制子系统。
- 4 数据存储与管理子系统。
- 5 状态评估与预警子系统。
- 6 用户界面子系统。

4.7 结构健康监测系统的硬件和软件应遵循稳定可靠、经济适用、技术先进、操作方便、便于维护更换及扩展升级的基本原则。

4.8 结构健康监测系统的硬件不得侵入水下隧道建筑限界。

4.9 正常维护或更换监测设备时，结构健康监测应保证数据采集的一致性和数据使用的连续性。

4.10 隧道出现影响结构安全的病害时，相应位置应补充结构健康监测测点。

4.11 当隧道外部环境出现骤变时，应增加监测频次，必要时增加监测项目。

5 结构健康监测的内容

5.1 一般规定

5.1.1 结构健康监测应采用现有监测技术，并积极采用新方法、新技术。

5.1.2 水下隧道工程应基于项目建设条件、工程施工过程资料及隧道运行期特点，从外部环境、内部环境及结构自身确定结构安全风险源。

5.1.3 隧道建设期资料主要包括以下内容：

- 1 隧道设计图纸。

2 隧道工程地质与水文地质勘察报告。

3 场地地震安全性评价报告。

4 水文分析计算报告。

5 施工日志。

6 施工期监测报告。

5.1.4 隧道运行期资料主要包括以下内容：

1 隧道交工/竣工验收的相关资料。

2 隧道养护维修资料。

3 运行期监测报告。

4 运行安全事故等相关资料。

5.2 监测项目与数据要求

5.2.1 隧道开展了运行期结构安全风险评估时，结构健康监测项目应由可接受风险的工况进行确定；未开展运行期结构安全风险评估时，结构健康监测项目宜参照图 4.2.1 与表 4.2.1 所示内容进行确定。

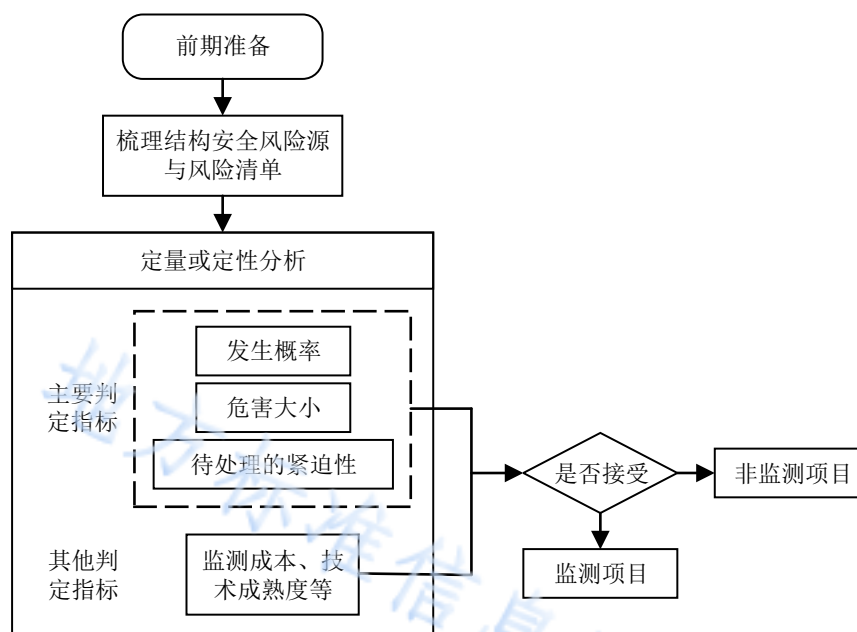


图 5.2.1 监测项目确定流程

表 5.2.1 结构健康监测风险源与监测项目

类别	风险源	风险源描述	监测项目
外部环境 风险	工程地质条件突变	地层软硬不均、软土地区加固与非加固分界、断层破碎带等	不均匀沉降、接缝伸缩、错台、断面收敛、螺栓应力、混凝土裂缝、渗漏水、土水压力等
	上覆土压力(围岩压力)极大或极小	抛石、深槽、回淤或冲刷较大位置	
	上方存在重要设施	上方存在道路、堤岸、铁路、文物等需要保护的建(构)筑物	
	近接施工	近接基坑开挖及降水作业、平行或交叉隧道工程	
	意外事件	施工期间的安全事故、沉船、地质钻孔	

类别	风险源	风险源描述	监测项目
内部环境 风险	温差效应	温度变化带来材料热胀冷缩	温度、混凝土应力
	行车振动	行车振动	振动、混凝土裂缝
	杂散电流	杂散电流	杂散电流、钢筋锈蚀
	空气湿度	湿度较大区域材料老化速度快	湿度、钢筋锈蚀、混凝土碳化等
	意外事件	行车碰撞、火灾等	混凝土裂缝等
结构自身 风险	结构刚度突变	隧道明暗分界处、施工方法变化处、匝道汇入断面、附属用房共建节段、联络通道、叠层段与普通段衔接区域等位置	不均匀沉降
	施工误差较大	盾构始发接收段、转弯半径较小处、成品误差较大处	错台、接缝伸缩、渗漏水、混凝土裂缝等
	施工质量问题	施工质量问题引起的结构问题	错台、渗漏水、混凝土裂缝等

5.2.2 监测项目应考虑水下隧道施工方法的差异，综合工作条件、结构受力、结构变形及结构材料耐久性等工程特点，并参考表 5.2.2 进行确定。

表 5.2.2 水下隧道结构健康监测项目

类别 施工方法	工作条件监测项目	结构受力监测项目	结构变形监测项目	结构材料耐久性监测项目	其他监测项目
盾构法	土压力 水压力 温度 振动加速度	混凝土应力 钢筋应力 螺栓应力 管片接触压力	不均匀沉降 接缝伸缩 错台 扭转 断面收敛 裂缝宽度 管片倾斜与偏转	钢筋腐蚀	渗漏水等
堰筑法	土压力 水压力 温度 振动加速度	混凝土应力 钢筋应力	不均匀沉降 接缝伸缩 错台 扭转 裂缝宽度	钢筋腐蚀 混凝土碳化	渗漏水等
钻爆法	土压力（围岩与初衬接触压力） 初衬与二衬接触压力 水压力 围岩温度 振动加速度	混凝土应力 钢筋应力 锚杆轴力	不均匀沉降 接缝伸缩 错台 扭转 断面收敛 裂缝宽度	钢筋腐蚀 混凝土碳化	渗漏水等
顶管法	土压力 水压力 温度 振动加速度	混凝土应力 钢筋应力	不均匀沉降 接缝伸缩 错台 扭转 裂缝宽度	钢筋腐蚀 混凝土碳化	渗漏水等
沉管法	土压力 水压力 温度 振动加速度	混凝土应力 钢筋应力 限位装置内力	不均匀沉降 接缝伸缩 错台 扭转 裂缝宽度	钢筋腐蚀 混凝土碳化	渗漏水等

5.2.3 水下隧道遇到下列情况时，应复核已有监测项目对相关指标的反映情况，必要时应增加监测项目和测点：

- 1 隧道结构出现病害。
- 2 隧道内出现安全事故。
- 3 周边存在对隧道有影响的在建、已建工程。
- 4 周边发生重大自然灾害。

- 5 其他对隧道结构产生影响的突发事件。
- 5.2.4 采用自动化实时监测方法不能充分掌握结构安全情况时，应补充其他如人工巡检、机器人巡检等方法。
- 5.2.5 水下隧道隐蔽狭小空间内的接缝变形（张开、错台）、渗漏水宜采用智能机器人进行监测。
- 5.2.6 监测项目的数据精度和采样频率应不低于表 5.2.6 的规定。

表 5.2.6 监测项目的数据精度和采样频率要求

监测项目	精度要求	采样频率	监测项目	精度要求	采样频率
土压力	0.01MPa	1次/h	螺栓应力	0.01MPa	1次/h
水压力	0.01MPa	1次/h	接触压力	0.01MPa	1次/h
整体沉降	0.1mm	1次/h	裂缝宽度	0.01mm	1次/h
不均匀沉降	0.1mm	1次/h	错台	0.1mm	1次/h
接缝伸缩	0.1mm	1次/h	锚杆轴力	0.01MPa	1次/h
混凝土应力	10 $\mu\epsilon$	1次/h	扭转	0.5°	1次/h
钢筋应力	0.01MPa	1次/h	振动加速度	0.1g	100Hz

- 5.2.7 同一区段进行变形、受力、温度监测时，数据采集宜同步。
- 5.2.8 水下隧道发生以下事件时，应提高健康监测系统采样频率。
- 1 汛期、低温。
 - 2 保护区内施工作业。
 - 3 重大自然灾害。
 - 4 隧道内安全事故。
- 5.2.9 结构健康监测应采取措施减少温度等环境因素对传感器的影响。

5.3 监测区段、监测断面及测点

- 5.3.1 监测区段、监测断面与测点应具有代表性，便于结构健康监测系统的施工与后期维护。
- 5.3.2 监测区段应布置在下列位置：
- 1 隧道建设范围地层起伏较大与地质发生突变处。
 - 2 隧道穿越断层及地质构造发育处。
 - 3 隧道与周边建（构）筑物交叉处。
 - 4 隧道结构刚度突变处。
 - 5 发生危及隧道结构安全的事故处。
 - 6 采用不同施工方法修建的水下隧道尚应考虑表 5.3.2 所列监测区段。

表 5.3.2 不同施工方法的水下隧道监测区段

施工方法	监测区段
盾构法	1 埋深小于 1 倍洞径或大于 3 倍洞径的区段。 2 冲刷或淤积对覆盖层厚度可能产生影响的区段。 3 水深大于 25m 的区段。
堰筑法	1 可能会出现沉船或抛锚的通航区段。 2 冲刷或淤积对覆盖层厚度可能产生影响的区段。 3 水深大于 10m 的区段。

钻爆法	1 地质条件为 V 级及 VI 级围岩区段。 2 埋深小于 1 倍开挖跨度的 IV 级围岩区段。 3 水深大于 30m 的区段。
沉管法	1 可能会出现沉船或抛锚的通航区段。 2 冲刷或淤积对覆盖层厚度可能产生影响的区段。 3 水深大于 20m 的区段。
顶管法	1 水深大于 15m 的区段。 2 冲刷或淤积对覆盖层厚度可能产生影响的区段。

5.3.3 监测断面的布置应反映隧道横向或纵向的力学特征和监测项目的特点，并便于结构健康监测系统的施工和维护。

5.3.4 测点的位置和数量宜根据监测项目特点，结合水下隧道结构类型、外部环境、设计要求、施工过程及结构计算成果等综合确定，并应符合下列规定：

- 1 反映监测对象的实际状态及变化趋势。
- 2 布置在便于传感器安装、测读、维护和更换的位置。
- 3 便于数据采集，利于缩短信号的传输距离。
- 4 结合结构的对称性，减少测点布置数量。

5.3.5 工作条件监测测点布置应满足以下要求：

- 1 土水压力监测宜选择断面顶部、腰部、底部进行测点布置。
- 2 地震动监测应根据设防烈度、抗震设防类别、结构重要性、结构类型和地形地质条件进行测点布置。
- 3 车道板振动测点宜布置在车道板中间及牛腿（支座或纵梁）处。

5.3.6 结构受力监测测点布置应满足以下要求：

- 1 混凝土、钢筋应力测点应优先布置在衬砌受力计算内力包络图最值出现的位置，且应在衬砌内侧和外侧对称布置。
- 2 螺栓应力监测测点的布置不应降低螺栓自身的性能，且应选取同一环受力较大的螺栓进行监测。

5.3.7 结构变形监测测点布置应符合以下要求：

- 1 布置不均匀沉降测点的接缝宜同时布置接缝伸缩测点。
- 2 不均匀沉降采用液位式静力水准仪测量时，测点之间的高差不宜大于 50mm；当隧道坡度较大时，可在中间测点附近增设转点，转点与测点的高差应保持不变，且不得跨缝布置。
- 3 宽度超过 0.1mm 的混凝土裂缝应布置裂缝测点，传感器应垂直于裂缝开裂方向布置。
- 4 采用盾构法施工的水下隧道，管片接缝伸缩监测应同时布置环缝和纵缝测点。

5.3.8 混凝土碳化监测和钢筋锈蚀监测测点宜布置在隧道纵断面最低处。

6 结构健康监测系统设计

6.1 一般规定与总体设计

6.1.1 结构健康监测系统应具备结构安全管理所需的功能，各组成部分的设计内容应包含且不限于表 6.1.1 所规定内容。

表 6.1.1 主要设计内容

组成部分	设计内容
传感器子系统	传感器选型、编号、参数、布设方式、安装步骤、保护措施等
数据采集与传输子系统	采集传输设备选型、参数、采集通道配置, 现场采集站布置、综合布线, 硬件保护措施等
数据处理与控制子系统	处理与控制设备选型、参数, 数据前处理、后处理, 数据转换算法等
数据存储与管理子系统	数据的存储、查询及数据库管理等
状态评估与预警子系统	损伤识别、预警体系、结构安全状态评估等
用户界面子系统	用户界面主框架、实时数据显示与报警、数据查询与统计、报告生成、用户管理、系统帮助等

6.1.2 结构健康监测系统的产品应安全可靠、性能稳定、工艺成熟。

6.1.3 结构监测系统硬件应满足精度、参数、稳定性等要求, 并具有良好的可维护性。

6.1.4 结构监测系统软件应与硬件相匹配, 且具有兼容性、可扩展性、易维护性和良好的用户使用性能。

6.1.5 结构监测系统应采用不间断电源。

6.2 传感器子系统

6.2.1 传感器宜采用同一类型, 传感器类型建议参考表 6.2.1 选择。

表 6.2.1 传感器类型选择

监测项目	传感器名称	常用类型
围岩温度、衬砌温度、螺栓温度等	温度计	铜电阻式、钢弦式、热敏电阻式、铂电阻式、光纤光栅式
裂缝宽度、接缝伸缩、错台等	测缝计	电位器式、电容式、钢弦式、光电式、电感式、差动变压器式、光纤光栅式、差动电阻式
整体沉降、不均匀沉降等	静力水准仪	电容式、差动变压器式、光电式、钢弦式、电感式、磁致伸缩式、压阻式
地震加速度、振动加速度等	加速度计	压电式、压阻式、电容式
管片倾斜与偏转、断面收敛、断面扭转等	倾斜仪	伺服加速度计式、微机械电子式、钢弦式
水压力等	渗压计	钢弦式、差动电阻式、光纤光栅式
土压力、围岩压力等	土压力计	钢弦式、差动电阻式、光纤光栅式
混凝土碳化、钢筋腐蚀等	阳极梯	特制
钢筋应力、混凝土应力等	应变计	差动电阻式、钢弦式、光纤光栅式

6.2.2 传感器应综合量程、线性度、灵敏度、分辨率、重复性、漂移、供电方式、寿命与环境适应性等进行选型。常见传感器及其主要参数见附录 A。

6.2.3 传感器应考虑后期更换的可行性, 埋入式传感器应考虑冗余度。

6.2.4 传感器应采取防水、防腐、防振、防静电、防尘等保护措施, 安装或埋设后应及时获取初始读数。

6.2.5 传感器应根据监测项目、监测区段、监测断面、传感器类型等进行统一编号。

6.2.6 传感器支架应采取防腐措施, 其几何尺寸、强度与刚度应满足传感器的工作要求。

6.3 数据采集与传输子系统

6.3.1 数据采集方案应结合监测数据特点与数据分析要求进行制订, 并保证数据采集与传输子系统具有较高的信噪比、不失真。

6.3.2 数据采集与传输子系统应具备实时自诊断功能, 能够识别传感器失效、信号异常、子系统功能失效或系统故障。

6.3.3 数据采集与传输设备应基于接口匹配性、环境适应性、稳定性、耐久性等要求进行选型。

6.3.4 数据采集与传输设备应选用兼容性、耐久性和环境适应性好的产品, 并应易于维护、便于更换, 且采取防水、防尘、防损坏等保护措施。

- 6.3.5 数据采集设备布置环境的温度、湿度、静电、磁场和振动等应满足设备运行要求。
- 6.3.6 数据采集站布置应根据传感器分布情况、信号传输距离、数据时间同步、易维护等要求确定，宜与隧道通信、监控等机电设备协同布置。
- 6.3.7 数据传输路由与综合布线应基于隧道现场情况、传感器与数据采集站布置方案及信号传输距离进行设计，宜利用机电工程已有桥架和预留孔洞走线，并远离强电等噪声源。
- 6.3.8 数据传输应坚持因地制宜的原则，并综合考虑数据传输距离、现场地形条件、结构特征、网络覆盖状况和已有的通信设施等因素，灵活选取合适的数据传输方式，并符合以下要求：

1 有抗干扰要求的线缆线路与大功率无线电发射源、高压输电线和微波无线电信号传输通道的距离宜符合现行国家标准《综合布线系统工程设计规范》GB 50311 的相关要求，并按设计要求采取抗干扰措施。

- 2 有强电磁场干扰时，应采取有效的电磁屏蔽措施。
- 3 线路布置和维护困难时，可采用无线传输方式。
- 4 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。

6.3.9 数据采集系统应具备数据备份机制，满足以下要求：

- 1 数据采集子站应至少保存最近 7d 的监测数据做备份。
- 2 采集子站数据存储介质应满足连续观测需要。

6.3.10 数据采集与传输软件开发应符合下列规定：

- 1 实现数据实时采集、自动存储、缓存管理、即时反馈和自动传输等功能。
- 2 与数据库系统和数据分析软件稳定、可靠地通信，可本地或远程调整设备配置。
- 3 接受并处理数据采集参数的调整指令，并记录和备份处理过程。
- 4 考虑数据传输的一致性、完整性、可靠性和安全性，并满足系统开放性和可扩展性要求。

6.4 数据处理与控制子系统

6.4.1 数据处理应实现数据前处理和数据后处理功能，并参考图 6.4.1 所示流程开展工作。

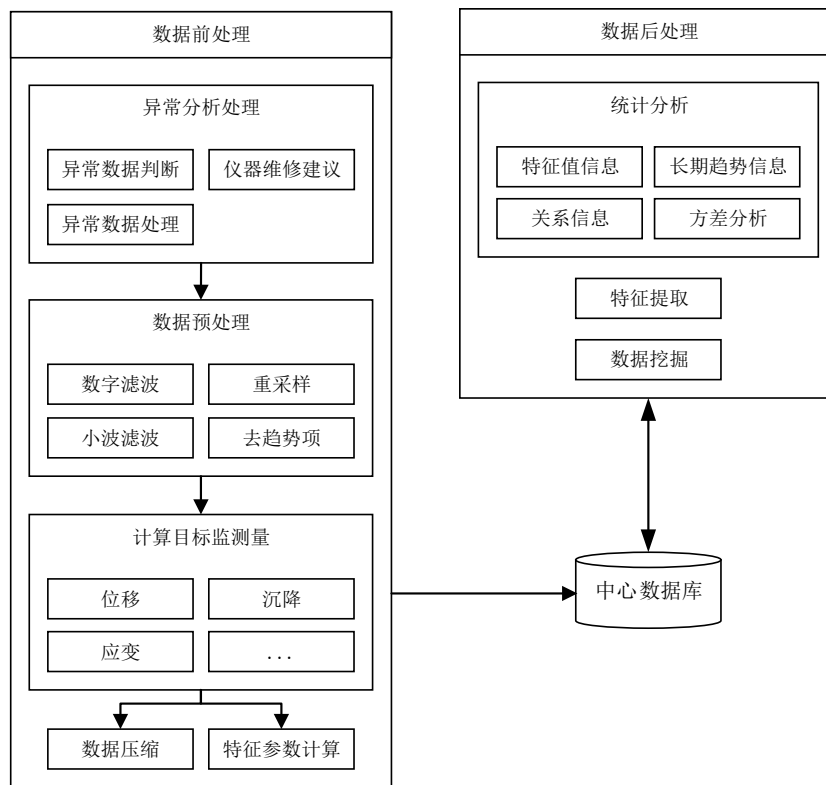


图 6.4.1 数据处理流程

6.4.2 统计分析应包括最大值、最小值、平均值、均方根值、累计值等统计值；应给出以日、月、年为统计间隔的统计值。

6.4.3 由于监测系统自身异常引起的异常数据应予以剔除。

6.4.4 数据处理软件应具备数据备份、清除和故障恢复等功能，其中，故障恢复功能应兼具手工操作控制功能，其他功能应自动调用。

6.4.5 数据的时间应采用公历，最低精度为秒。

6.5 数据存储与管理子雄

6.5.1 数据存储与管理子系统应实现快速显示、高效存储、生成报告和数据归档等功能。

6.5.2 原始监测数据应定期存储、备份存档，后处理数据宜保持不少于三个月的在线存储；经统计分析的数据应专项存储，每季度或每年数据分析后宜存储某一段或某几段典型数据。

6.5.3 数据库应模块化架构，并对水下隧道结构信息、监测系统信息和监测数据进行分类存储和管理。

6.5.4 服务器宜采用工作组服务器。

6.5.5 监测数据宜采用云计算技术进行存储或管理。

6.6 状态评估与预警子系统

6.6.1 状态评估应给出隧道整体、监测区域或断面、结构构件的安全状态评估和必要的养护建议。

6.6.2 状态评估应评估结构性能下降的程度和速率，分析其退化规律，预测结构的远期性能状态，并对结构的使用寿命做出预测。

6.6.3 状态评估方法宜采用模糊层次综合分析法，对于评价指标的重要性判别应组织业内权威专家进行讨论，相关工作可参考附录 B。

6.6.4 状态评估采用其他方法，如基于可靠度理论评价、基于遗传算法评价及人工神经网络等评价时，应进行专题研究，确保评价结论的可靠性。

6.6.5 评估报告应包括水下隧道及健康监测系统的基本信息、监测项目、分析方法和评估结果等。

6.6.6 预警模块应具备下列功能：

- 1 发布、调整和解除预警信息。
- 2 实时、自动和明显的预警方式。

6.6.7 结构健康监测系统预警应分为单指标预警和综合指标预警，单指标预警应准确反映测点被测物理量或其变化速率是否超过限值，综合指标预警应准确反映隧道整体或组成构件的安全度是否超过限值。

6.6.8 单指标预警宜包括五个级别，并按表 6.6.8 的规定确定。

表 6.6.8 单指标预警

预警级别	级别描述	控制行为	阈值取值	颜色标识
I	特别严重	红色预警	控制值	红色 RGB(255, 0, 0)
II	严重	橙色预警	3/4 控制值	橙色 RGB(255, 125, 0)
III	较重	黄色预警	1/2 控制值	黄色 RGB(255, 255, 0)
IV	一般	蓝色预警	1/4 控制值	蓝色 RGB(0, 0, 255)
V	正常	无	无	绿色 RGB(0, 255, 0)

6.6.9 综合指标预警应根据分析对象合理确定计算方法，给出可靠合理的安全度预警指标，宜包括五个级别，并按表 6.6.9 的规定进行确定。

表 6.6.9 多指标综合分析预警

预警级别	级别描述	颜色标识	隧道状态	状态评分
I	极端受损	红色 RGB(255, 0, 0)	红色预警	1.0~1.8
II	严重受损	橙色 RGB(255, 125, 0)	橙色预警	1.8~2.6
III	重度受损	黄色 RGB(255, 255, 0)	黄色预警	2.6~3.4
IV	轻微受损	蓝色 RGB(0, 0, 255)	蓝色预警	3.4~4.2
V	健康	绿色 RGB(0, 255, 0)	无预警	4.2~5.0

注：状态评分由差到好分数判定为 1~5。

6.6.10 预警控制值的确定应符合下列要求：

1 综合设计容许值、理论计算值、数值分析值、监测数据值、成熟经验等进行设置，有条件的可参照模型结构加载试验结果确定。

- 2 满足隧道结构及周边环境的安全控制要求。
- 3 满足设计、运行养护等相关要求，并根据监测数据适时修正。
- 4 满足国家现行标准的其他相关要求。

6.6.11 土压力、水压力预警阈值可采用设计阶段结构计算设定的最大土压力、水压力作为预警控制值。

6.6.12 预警方式应满足以下要求：

1 结构安全预警信息应由专门的发布机构或被授权机构根据隧道安全隐患的发展态势和应急处置进展，向相关部门及时发布、调整或解除预警信息。

- 2 结构安全预警方式应明显和多样化，可包括指示灯、声音、网络、可变情报板、路侧广播等。
- 3 结构安全预警信息应形成日志，内容应包括预警事件概况、始末时间、警示事项、预警级别等。

6.7 用户界面子系统

- 6.7.1 用户界面子系统应与数据库无缝衔接，保证数据交换高效。
- 6.7.2 用户界面子系统宜选择 Brower/Server 模式。
- 6.7.3 用户界面子系统应采用加密、分级授权等网络安全措施，具备通过互联网远程安全登录、查阅系统监测数据和报告的功能。
- 6.7.4 用户界面应实时在线显示监测数据、数据采集与传输工作状态、数据处理与控制工作状态、数据存储与管理情况、安全评估及预警结果等信息，用户界面应开放兼容、美观友好、操作便利。
- 6.7.5 用户界面应能对各子系统功能参数进行在线设置和修改。
- 6.7.6
- 6.7.7 用户界面应有链接、存储、调用或显示各类分析结果、报告的窗口。
- 6.7.8 用户界面应具备将预警信息传送给隧道相关管理与养护单位的通道。

7 施工结构健康监测系統施工与验收

7.1 一般规定

- 7.1.1 结构健康监测系统的施工单位应建立项目组织机构、安全管理制度、施工质量控制和检验制度。
- 7.1.2 结构健康监测系統施工前应做好下列准备工作：
 - 1 组织相关人员深入现场调查，掌握现场情况。
 - 2 组织相关人员对设计文件进行审查。
 - 3 完成设计交底。
 - 4 编制专项施工方案。
- 7.1.3 结构健康监测系統施工中应做好以下质量和安全保障工作：
 - 1 建立安全和技术交底制度，作业前应对施工人员进行安全与技术交底。
 - 2 使用的原材料、安全防护用品、机械设备和生产工具等为合格产品。
 - 3 施工过程中的安全技术、劳动保护、防火及环境保护等措施符合国家现行有关法律法规和标准的规定。
 - 4 自主开发的应用软件应进行可靠性、安全性、可恢复性和兼容性等性能测试。
- 7.1.4 结构健康监测系統施工应严格按照说明书、安装手册、相关标准及设计要求进行。
- 7.1.5 结构健康监测系統施工应不影响隧道结构承载能力，并采取相应措施减小对隧道结构耐久性产生的不良影响。
- 7.1.6 结构健康监测系統施工质量管理应包括硬件与软件进场检查、隐蔽工程过程检查和验收、工程安装质量检查、系统自检和试运行等。
- 7.1.7 硬件的进场检查应包括外观检查和标志检查，并应符合下列规定：
 - 1 名称、型号、数量应与设计文件要求一致。
 - 2 外观应无锈迹、裂痕，各部分连接牢固，引出线缆无损坏。
 - 3 铭牌标志、备件和附带技术文件应齐全。
 - 4 仪器读数正常、稳定。
- 7.1.8 软件的进场检查应符合下列规定：

- 1 应确认商业软件、自主开发软件的部署说明书、使用和维护说明书等资料齐全。
 - 2 应确认商业软件、自主开发软件的适用范围符合设计要求。
- 7.1.9 隐蔽工程的过程检查和验收应符合下列要求：
- 1 预埋件、安装基座等验收合格后，方可进行传感器的安装；
 - 2 传感器及相关防护措施验收合格后，方可进行线缆、采集设备等硬件的安装。
 - 3 后续工序的作业应注意对前道工序工作成果的保护。
 - 4 重要的隐蔽工程应保留安装埋设时的影像资料。
- 7.1.10 在钢筋混凝土结构上钻孔时应符合下列规定：
- 1 钻孔前应确认钻孔深度范围内无钢筋。
 - 2 钻孔方向应与设计孔位方向一致，钻孔深度不得小于设计深度，钻孔直径与设计偏差应小于3mm。
 - 3 达到钻孔深度后，应将孔内残留物清理干净。
 - 4 传感器安装到位后应将钻孔填塞密实。
- 7.1.11 监测仪器设备现场运输应采取防颠簸措施，储藏环境应满足产品要求。
- 7.1.12 安装埋设前应提前核查监测仪器设备及其保护装置，准备相应的施工机械、工器具和材料，必要时进行预安装。
- 7.1.13 施工过程中应设置安全标识，并指派专人观察交叉作业情况与周围存在的安全隐患，保护人员与仪器设备安全。
- 7.2 传感器安装
- 7.2.1 传感器应结合实际情况，选择防水涂层、安装密封性保护盒等耐久性保障措施。
- 7.2.2 传感器的安装环境应符合设计文件和传感器产品说明书的要求，当安装环境超出规定时，应采取有效的保护措施。
- 7.2.3 传感器的安装应符合下列规定：
- 1 埋入式传感器、预埋件和安装基座等应随混凝土浇筑进度及时进行安装埋设。
 - 2 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。
 - 3 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。
 - 4 紧固件应采用镀锌制品或与传感器配套的其他防锈制品。
 - 5 安装过程中不得猛烈敲打、强拉或抛扔传感器。
 - 6 安装到位的传感器应采取防止人为破坏的保护措施。
 - 7 安装后应及时记录初始读数。
- 7.2.4 传感器的外部接线应符合下列规定：
- 1 接线排列应整齐、美观，导线应绝缘良好、无损伤，标识应清晰。
 - 2 固定接线的螺栓和螺钉应拧紧，拧紧力矩值应符合技术文件的要求。
 - 3 接线张紧程度应适中，不得使硬件内部受到额外应力。

4 接线接头处宜有防水保护措施。

7.2.5 温度传感器的安装应满足以下要求：

1 混凝土内部预埋温度传感器监测点位置远离结构钢筋时，宜采用直径不小于 $\Phi 6$ 的钢筋作为定位辅助钢筋。

2 混凝土浇筑过程中应避免振动棒直接接触温度传感器。

3 在混凝土表面安装时，传感器的敏感元件应紧贴混凝土表面，并应采用细石混凝土或砂浆等材料将温度传感器完全包裹。

7.2.6 测缝计的安装应满足以下要求：

1 测缝计测量接缝伸缩时安装位置应满足设计要求。

2 测缝计测量错台时可采用垂向支架进行固定，安装时应保证测缝计轴线垂直于结构表面。

7.2.7 静力水准仪的安装应满足以下要求：

1 液位传感器各监测点的高程差宜不大于 50mm。

2 微压传感器各监测点的高程差应不大于其测量范围的 1/4。

3 采用螺栓或抱箍固定传感器时，宜先在螺栓或抱箍及传感器的连接面上涂满环氧树脂，再拧紧螺栓或抱箍。

4 传感器应竖直安装，角度偏差满足设计要求。

5 连通主管、支管应采用抱箍、卡环或定位卡等定位装置可靠固定在结构物上。

6 施工过程中不得扭曲、划伤连通管。

7 连通管应从一端连续、匀速灌入液体，避免在连通管中形成气泡。

8 应采用有效措施排出连通管中水平长度大于 10mm 的气泡。

9 连通管安装完成后，应对连通管施加不小于 2 个标准大气压并持续 30min，确认管道、接头处无渗漏现象。

7.2.8 应变计的安装应满足以下要求：

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

2 预埋式应变计宜采用结构钢筋或辅助钢筋进行传感器的定位，并应在传感器两端、中部分别绑扎牢固。

3 在混凝土浇筑过程中，禁止振捣器触碰传感器。

4 引出线缆应采用软管保护，软管与钢筋的绑扎间距不应大于 1m。

5 光纤应变传感器露出混凝土的光缆长度应不小于 1m，在光缆端头应采取密封保护措施。

6 应变计安装位置与设计监测点的距离偏差应小于 50mm，角度偏差满足设计要求。

7 在混凝土表面安装时，可将 2 块钢板埋入混凝土表面作为安装基座，基座与传感器焊接或螺栓连接。

7.2.9 加速度传感器的安装应满足以下要求：

- 1 测试方向与设计方向的角度偏差应满足设计要求。
- 2 采用单螺栓固定加速度传感器时，应采取防止加速度传感器转动的措施。
- 3 加速度传感器具体安装方式可参考《机械振动与冲击 加速度计的机械安装》GB/T 14412，加速度传感器与隧道间不应存在相互运动。

7.2.10 倾斜仪的安装应满足以下要求：

- 1 倾斜仪应与被测构件刚性连接。
- 2 倾斜仪轴线与被测试的结构表面的垂直度偏差应满足设计要求。

7.2.11 渗压计的安装应满足以下要求：

- 1 可采用预埋、钻孔埋设、压入埋设、填埋等方法。
- 2 应采取措施确保直接与水接触。

7.2.12 土压力计外表面与隧道周围土体应充分接触，并保证压力充分传递到土压力承压膜表面。

7.2.13 传感器应设置标志牌，标志牌应包括下列内容：

- 1 标志牌应可靠固定在传感器附近醒目位置，有保护装置时宜布置在保护装置表面，埋入式传感器的标志牌应布置在结构表面便于观察的位置。
- 2 标志牌应包含传感器的类型、型号、数量和编号。
- 3 标志牌应包含传感器引出线的编号及对应采集设备的编号和通道号。
- 4 标志牌应使用耐污、耐腐蚀材料，文字、符号应清晰、醒目，表面宜进行反光处理。

7.3 综合布线

7.3.1 线管安装与线缆敷设应根据设计文件要求，结合现场条件深化线路布置。

7.3.2 综合布线不应影响隧道的正常使用以及对隧道结构的维护。

7.3.3 敷设的线管和线缆应横平竖直、整齐美观，不宜交叉。

7.3.4 线缆敷设应在线管安装施工结束后进行，且不得损伤线缆。

7.3.5 信号线应在以下部位进行标识：

- 1 传感器的连接端。
- 2 桥架的接入端和引出端。
- 3 采集设备接入端。

7.3.6 电源线应在以下部位进行标识：

- 1 与主电源的连接端。
- 2 桥架的接入端和引出端。
- 3 用电设备接入端。

7.3.7 信号线、电源线的标识应符合以下要求：

- 1 标识应统一、清楚、易读和整洁。
- 2 相同走向线缆标识粘贴的朝向应一致，宜统一朝上或朝向维护操作面。

- 3 标识宜采用不同颜色区分强电、弱电。
- 7.3.8 在经过伸缩缝时，桥架、线管及线缆的安装和敷设应采取适应变形的措施。
- 7.3.9 桥架安装应符合以下要求：
- 1 桥架安装施工应符合现行国家标准《建筑电气工程施工质量验收规范》GB 50303 的规定。
 - 2 桥架固定支架的材质、加工尺寸和焊接施工应符合设计文件和现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的规定。
 - 3 桥架固定钢支架在安装前应进行防腐处理，防腐层应均匀、完整，以避免钢支架发生锈蚀。
 - 4 桥架固定支架焊接不应有漏焊、欠焊、裂纹和咬边等缺陷。
 - 5 在钢筋混凝土构件上安装固定支架时应避开钢筋进行钻孔。
 - 6 支架固定后应横平竖直、整齐美观，各支架之间的距离应均匀。
 - 7 支架的间距应符合设计规定。当设计无规定时，支架的间距宜为 1.5m~3m。
 - 8 桥架垂直段大于 2m 时，应在垂直段上、下端槽内增设固定电缆用的支架；当垂直段大于 4m 时，应在中部增设支架。
 - 9 桥架采用螺栓连接时，应采用平滑的半圆头螺栓，螺母应在电缆槽外侧，固定应牢固。
 - 10 对废弃不用的膨胀螺栓钻孔，应采用浆料填塞处理。
- 7.3.10 线管安装应符合以下要求：
- 1 线管不得有变形或裂缝，其内部应清洁干燥、无毛刺，管口应有保护措施。
 - 2 线管与控制箱、接线箱、接线盒等连接时，应采用锁母将管口固定牢固。
 - 3 焊接钢管不得在焊接处弯曲，弯曲处不得有褶皱。
 - 4 镀锌钢管不得加热弯曲。
 - 5 位于桥架外的通信线缆应采用镀锌钢管加以保护，并采取接地保护措施。
 - 6 进线管接头及线盒连接处的粘接应牢靠，无形变损坏。
 - 7 钢管进线盒的连接应一管一孔，排列整齐。
 - 8 钢管与线盒的连接应采用锁紧螺母或护圈帽固定。
- 7.3.11 线缆敷设应符合以下要求：
- 1 线缆铺设施工应符合设计及现行国家标准《综合布线系统工程验收规范》GB 50312 的规定。
 - 2 光缆敷设前应进行外观检查和光纤导通检查。
 - 3 光缆的弯曲半径应不小于设计要求。当设计无要求时，弯曲半径应不小于光缆外径的 15 倍。
 - 4 以牵引方式敷设光缆时，主要牵引力应加在光缆的加强芯上。
 - 5 光缆连接应采用专用设备进行熔接，熔接损耗应不大于 0.08dB。
 - 6 线缆中继接头应按设计要求制作，无虚焊；同轴电缆的连接应采用专用接头。

7 电源线、信号线不应敷设在有腐蚀性物质排放、强磁场和强电场干扰的区域。当无法避免时，应采取防护或屏蔽措施。

8 电源线、信号线的接头应在暗线盒或接线盒内。接头宜采用压接，当采用焊接时应采用无腐蚀性的助焊剂。

9 线缆垂直铺设于桥架内时，其顶部和每隔 1.5m 处宜与桥架固定；线缆水平铺设于桥架内时，每隔 3~5m 处宜与桥架固定。

10 线缆从室外进入室内或进入室外的机柜、机箱时，宜从底部进入，并应有防水密封措施。

11 线缆在进入桥架前，宜采用波纹软管进行保护。

7.3.12 接地应符合以下要求：

1 应将结构健康监测系统的接地与隧道接地焊接牢固，并应采取防腐措施。

2 接地电阻值无法满足设计文件要求时，应采取物理或化学降阻措施。

3 接地线的安装应符合现行国家标准《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB50343 的规定。

4 接地连接点应设置在便于操作部位，并做明显标记。

7.4 采集站与机房安装

7.4.1 机柜内设备分布应符合设计要求。当设计无要求时，应做到功能集中、方便布线、利于维护和更换。

7.4.2 机柜内的布线应符合下列规定：

1 布线应横平竖直、无交叉，接头不得扭绞、打圈。

2 线缆不应受外力的挤压和损伤。

3 邻近机柜之间布置走线宜在机柜的顶端。

4 裸线应用套管或绝缘胶布包裹。

7.4.3 机柜过线区的安装应符合下列规定：

1 电源线、信号线应有独立的进线孔以避免相互干扰。

2 应考虑线缆引入、固定和接线时的安全性、便利性和扩容性，并预留足够的过线空间。

7.4.4 机柜门的最大开启角度应不小于 90°。

7.4.5 机柜接地应符合设计要求。当设计无要求时，应符合下列规定：

1 机柜金属部分任意两点之间的连接电阻应不大于 0.1Ω。

2 接地连线应采用截面面积不小于 4mm² 的铜线。

3 接地连接点应有清晰的接地标识。

7.4.6 机柜编号及机柜标识张贴应符合下列规定：

1 机柜应统一编号，并将标签贴于机柜外部醒目处。

2 同一机柜内的设备应统一编号，并应将机柜内所有设备列表标签张贴于机柜内部醒目处。

7.4.7 落地式机柜的安装应符合下列规定：

- 1 机柜竖立后应及时固定，防止倾倒造成人员伤亡和设备损坏。
 - 2 机柜上的固定螺丝、垫片和弹簧垫圈应紧固。
 - 3 有抗震要求时，应按设计要求对机柜固定装置进行抗震加固。
- 7.4.8 壁挂式机柜的安装应符合下列规定：
- 1 机柜距离地面应不小于 300mm，机柜门应垂直于地面开启。
 - 2 机柜与结构或安装基座的固定点应不少于 4 个。
- 7.4.9 机柜固定后方可安装机柜内的设备和部件，设备、部件应与机柜牢固固定。
- 7.4.10 线缆安装完毕后，机柜的进出线缆孔洞应采用防火胶泥封堵，并做好防水和防潮处理。
- 7.4.11 机房应具备设计文件规定或监测硬件运行要求的供电、温湿度条件。
- ## 7.5 软件开发、测试与部署
- 7.5.1 软件开发应根据系统使用和维护要求选择合适的计算机编程语言。
- 7.5.2 软件测试、部署应由专业人员完成，在软件测试、部署前应编制相应的测试、部署文档。
- 7.5.3 软件测试应制定详细的软件测试需求分析、测试方案和测试用例，并搭建配合软件测试的硬件、网络环境后，方可开展测试工作。
- 7.5.4 应对数据采集、传输和存储监测软件进行测试，包括数据传输量的饱和测试、超出规定存储量的数据存储能力等。
- 7.5.5 软件测试中的单元测试、集成测试、配置项测试和系统测试等应符合现行国家标准《计算机软件测试规范》GB/T 15532 的规定。
- 7.5.6 测试、部署过程中应详细记录出现异常、错误的时间，在部署完成后建立软件测试台账。
- 7.5.7 软件测试报告应包括以下内容：
- 1 测试计划、测试文档。
 - 2 测试用例的结果，包括测试期间出现的所有偏离、失败情况。
- 7.5.8 软件测试文档的编制应符合国家现行标准《计算机软件测试文档编制规范》GB/T 9386 的规定。
- 7.5.9 在符合下列条件后方可进行软件部署：
- 1 监测硬件、网络等配置符合监测系统设计要求。
 - 2 监测软件通过测试并确认合格。
 - 3 监测硬件工作正常。
- 7.5.10 监测软件部署应符合下列规定：
- 1 环境、接口等设置应符合软件详细设计的要求。
 - 2 专用服务器、工控机等硬件不得安装与监测系统无关的软件。
 - 3 软件部署后能正常使用。
- 7.5.11 软件缺陷导致无法部署时，应修改软件并测试通过后方可重新部署。
- 7.5.12 监测软件部署后应形成的文档包括：
- 1 用户手册。
 - 2 监测软件产品规格说明书。
 - 3 监测软件系统故障与恢复手册。

7.6 系统调试

7.6.1 系统调试应由相关专业技术人员组成调试小组，并应依托设计文件和产品技术文件进行。

7.6.2 系统调试前的准备工作应符合下列规定：

- 1 监测硬件和监测软件的规格、型号、数量和标识应符合设计文件规定。
- 2 接地系统和接地电阻应满足设计要求。当设计无要求时，接地电阻应不大于 4Ω 。
- 3 电气接线应无松动、短路、断路等现象。
- 4 电源应符合设计和设备电源要求，包括电源种类、电压、负载能力等。

7.6.3 系统调试应划分为单项调试和联合调试，单项调试应包括供电调试、信号调试、数据调试，联合调试应以功能调试为主。

7.6.4 系统调试前应制定调试方案并采取必要的安全防护措施。

7.6.5 系统供电调试应符合下列规定：

- 1 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。当设计无要求时，用 500V 兆欧表测量时应不小于 $5M\Omega$ 。
- 2 不间断电源宜进行自动切换性能试验，切换时间和切换电压值应符合设计文件的规定。

7.6.6 系统信号调试应符合下列规定：

- 1 各传感器采集参数设置应满足设计要求。
- 2 应测试每个传感器返回信号的正确性。
- 3 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。

7.6.7 系统数据调试应符合下列规定：

- 1 传感器编号及数据在现场数据库和远程数据库中应相互对应。
- 2 数据存储精度应不低于传感器的测量精度。
- 3 各传感器的测量数据应不超过传感器的量程。

7.6.8 系统联合调试应调试结构健康监测系统的以下功能：

- 1 自动数据采集、传输和存储功能。
- 2 数据显示、回放和统计功能。
- 3 报警和预警功能。
- 4 结构安全评价功能。
- 5 设计文件要求的其他功能。

7.7 系统试运行

7.7.1 应在系统单项调试和联合调试合格后进行系统试运行。

7.7.2 系统试运行的时间期限应符合设计要求。当设计无要求时，试运行期应不少于 2 个月。

7.7.3 试运行期间系统的可靠性应符合下列规定：

- 1 系统设备每月平均无故障工作时间应不小于每月总时长的 95%。
- 2 系统每日自动采集数据的完整率应不小于 95%。

7.7.4 试运行期间系统的稳定性应符合下列规定：

1 在监测点与人工测试点相同或邻近条件下，系统自动采集数据应与对应时段内人工测试数据的规律一致。

2 监测数据应具有良好的周期性、与环境的相关性，并不得出现明显的系统性偏移。

7.8 系统验收

7.8.1 结构健康监测系统应划分为分部工程（单位工程）、分项工程和检验批进行施工质量验收，并宜符合下列规定：

1 当与新建水下隧道同期建设时，宜按专项工程进行分部工程和分项工程的划分。

2 当在既有隧道上单独建设时，每个独立合同宜划分为一个单位工程。

7.8.2 分部工程（单位工程）、分项工程和检验批的划分应符合下列规定：

1 分部工程（单位工程）宜按施工工艺特点划分为若干子分部工程。

2 子分部工程应按施工工艺特点划分为分项工程。

3 分项工程可根据与生产和施工方式相一致且便于控制施工质量的原则划分为检验批。

4 子分部工程和相应的分项工程宜参照表 7.8.2 的规定执行，本标准未规定时，可由建设、监理和施工等单位协商确定。

表 7.8.2 子分部工程和相应的分项工程划分表

序号	子分部工程	分项工程
1	传感器安装	温度计安装
		测缝计安装
		静力水准仪安装
		加速度计安装
		倾斜仪安装
		渗压计安装
		土压力计安装
		阳极梯安装
		应变计安装等
2	综合布线	桥架与线管安装
		线缆敷设
3	采集站与机房安装	采集站安装
		机房安装
4	软件开发、测试与部署	软件开发
		软件测试
		软件部署
6	系统调试	系统单项调试
		系统联合调试
7	系统试运行	试运行

7.8.3 结构健康监测系统子分部工程的质量验收，应在分项工程验收合格的基础上，进行质量控制资料检查、观感质量验收。

7.8.4 分项工程的质量验收应在所含检验批验收合格的基础上进行质量验收记录检查。

- 7.8.5 检验批的质量验收应包括实物检查和资料检查，并应符合下列规定：
- 1 主控项目的质量抽样检验应全部合格。
 - 2 一般项目的质量经抽样检验宜全部合格，一般项目当采用计数抽样检验时，其合格点率应达到80%及以上，且不得有严重缺陷。
 - 3 应具有完整的质量检验记录，重要工序应具有完整的施工操作记录。
 - 4 可更换和修复的仪器设施完好率应达到100%，埋入式不可更换仪器设施完好率应不低于85%。
- 7.8.6 检验批抽样样本应随机抽取，并应满足分布均匀、具有代表性的要求。
- 7.8.7 结构健康监测系統质量验收合格应符合下列规定：
- 1 应符合设计文件的规定。
 - 2 应符合本标准和相关专业验收标准的规定。
 - 3 应符合合同约定。
- 7.8.8 结构健康监测系统的硬件、软件在进场时应全部检验。
- 7.8.9 硬件安装质量检验的抽检数量应符合下列规定：
- 1 供电电源设备的安装质量应全部检验。
 - 2 传感器应按测试原理、用途等分类进行抽检。
 - 3 数据采集设备应按采集原理、用途等分类抽检。
- 7.8.10 系统调试的检验数量应符合下列规定：
- 1 硬件中的数据采集设备和数据传输设备应全部检验。
 - 2 监测软件应全部检验。
- 7.8.11 结构健康监测系統应符合下列要求后方可进行工程竣工验收：
- 1 完成了设计文件规定和合同约定的各项内容。
 - 2 系统试运行期间平均无故障工作时间满足要求。
 - 3 参建各方已完成工作报告。
 - 4 施工技术档案和施工管理资料完整。
 - 5 监测硬件的检查报告、安装质量检验报告和系统调试试验报告完整。
 - 6 自主开发软件的测试报告完整。
 - 7 系统说明书、系统操作说明以及系统硬件、软件清单完整。
 - 8 法律、法规规定的其他条件。
- 7.8.12 分部工程（单位工程）质量验收的程序和组织应符合下列规定：
- 1 施工单位应在自检合格的基础上，将自检结果报监理工程师申请验收。
 - 2 监理工程师对工程质量进行竣工预验收，并根据预验收和整改结果出具工程评估报告，报建设单位组织验收。

3 建设单位收到工程评估报告后，对符合竣工验收要求的工程，应组织设计、监理和施工等单位组成验收组，制定验收方案。

4 竣工验收组应由建设、设计、监理和施工等单位的有关负责人组成，并邀请专家参与。

7.8.13 传感器安装验收应符合表 7.8.13 的规定：

表 7.8.13 传感器安装验收标准、检验数量与检验方法

类别	验收标准	检验数量	检验方法
主控项目	监测点和传感器安装的数量与位置应与设计相符合	全数检查	现场观察
	传感器各项技术指标应满足设计和有关要求	全数检查	检查出厂合格证、质量检验报告
	传感器的保护措施及其材料应符合设计要求	全数检查	现场观察、检查出厂合格证
	传感器的固定方式应符合设计要求	全数检查	现场观察
	静力水准仪连通管管道、接头处无渗漏现象	全数检查	现场观察
	静力水准仪连通管内无气泡	全数检查	现场观察
一般项目	传感器引出线编号及与采集设备的编号和通道号相互对应	全数检查	现场观察
	传感器标识应齐全、牢固、清晰	全数检查	现场观察

7.8.14 综合布线安装验收应符合表 7.8.14 的规定：

表 7.8.14 综合布线安装验收标准、检验数量与检验方法

类别	验收标准	检验数量	检验方法
主控项目	桥架及线管安装使用的桥架、线管、锚固件等材料符合设计要求	全数检查	产品合格证，出场检验报告
	桥架的安装位置、数量符合设计要求	全数检查	参照设计文件观察
	桥架支架的设置及支架锚固件符合设计要求	全数检查	参照设计文件及施工方案观察
	桥架接地装置的数量、间距、接地电阻符合设计要求	全数检查	观察、仪器检测
	安装线缆的型号、规格、数量符合设计要求	全数检查	产品合格证、出场检验报告
	电缆敷设无绞扭、铠装压扁、护层断裂和表面严重划伤等缺陷	全数检查	参照设计文件观察
	各类线缆的接头的工作性能、保护措施满足设计要求	抽查	观察检查、通光（电）检测
	电缆的传导性能、光缆的后向散射信号曲线无异常	抽查	通光（电）检测
一般项目	现场安装的桥架、管线连续、闭合	全部检查	观察
	桥架、管线内无杂物	全部检查	观察
	桥架、线管的防护线口满足设计要求	按每个检验批内桥架、线管数量的 10%，且不得少于 1 个	观察检查

7.8.15 采集站与机房安装验收应符合表 7.8.15 的规定：

表 7.8.15 采集站与机房安装验收标准及检验方法

类别	验收标准	检查数量	检验方法
主控项目	机柜安装位置正确，附件齐全，柜体无翘曲、损伤损坏或永久变形	全数检查	现场观察
	机柜中性点的接地连接方式及接地电阻值应符合设计要求	全数检查	现场观察、接地电阻测试仪测试
	机柜柜体、支架、及外壳应分别单独与保护导体可靠连接，安装件、紧固件及防松零件齐全，无弯曲、松动、移位或损坏	全数检查	现场观察
	机柜内设备与机柜的连接牢固，无漏连、虚连现象，铆钉或锚固螺母应排列整齐，无歪头、裂头及松动，铆接面无下凹、变形或破损	全数检查	现场观察

一般项目	数据采集、数据传输等设备安装满足工艺要求，整齐、美观，各个连接端子应接触可靠、连接牢固	全数检查	现场观察
	柜门、窗及孔口盖板等活动部件开关灵活或闭锁紧密	全数检查	现场观察
	密封部位和涂覆层无膨胀、开裂、脱落	全数检查	现场观察

7.8.16 软件开发、测试与部署验收应符合表 7.8.16 的规定：

表 7.8.16 软件开发、测试与部署验收标准、检验数量与检验方法

类别	验收标准	检验数量	检验方法
主控项目	软件应实现软件设计中的所有功能和业务流程	全数检查	查看测试报告
	软件部署后使用正常	全数检查	现场查看
	软件测试、部署过程中的文档齐全，文档编写符合相关标准的要求	全数检查	检查文档资料
一般项目	软件界面布局合理、层次清晰，界面美观	全数检查	现场查看
	软件窗口、菜单、图标、按钮等元素具有良好的容错能力	全数检查	查看测试报告或现场测试

7.8.17 系统调试验收应符合表 7.8.17 的规定：

表 7.8.17 系统调试验收标准、检验数量与检验方法

类别	验收标准	检验数量	检验方法
主控项目	结构健康监测系统的功能符合设计文件的要求	全数检查	查看调试记录
	得到采集指令后，监测系统所有传感器应能正常返回数据。同步精度满足系统设计的要求	全数检查	查看调试记录
一般项目	系统单项调试、联合调试的报告完整	全数检查	查看单项调试、联合调试报告

7.8.18 系统试运行验收应符合表 7.8.18 的规定：

表 7.8.18 系统试运行验收标准及检验方法

类别	验收标准	检验数量	检验方法
主控项目	系统设备每月平均无故障工作时间不小于每月总时长的 95%	全数检查	查看试运行报告
	系统自行采集数据每日的数据完整率不小于 95%	全数检查	查看试运行报告

8 结构健康监测系统维护

8.1 一般规定

8.1.1 结构健康监测系统运行期间，应安排专职人员定期进行检查和维护，专职人员应满足下列要求：

- 1 应熟悉系统硬件组成及性能。
- 2 应熟练操作系统软件，能有效处理系统中出现的各类常见故障。

8.1.2 检查和维护工作应制订系统维护手册，宜包括以下内容：

- 1 系统使用说明书。
- 2 系统硬件日常保养与常见故障修复方法。
- 3 传感器故障替换方案。

8.1.3 结构健康监测系统维护宜分为日常管理、设备检查与维护 and 异常处置，相应的时间周期应符合下列规定：

- 1 软件和监控中心的日常管理每周不宜少于 1 次，采集子站的日常管理不宜少于每两个月 1 次。
- 2 设备的检查与维护每 6 个月不宜少于 1 次。

- 3 异常处置应在异常发生后 24 小时内进行。
- 4 维护与管理的总结报告每 6 个月上报不宜少于 1 次。
- 8.1.4 日常管理应满足下列要求：
 - 1 日常管理的对象为监测系统、采集子站和监控中心。
 - 2 工作内容应包括运行环境管理、工作状态检查和运行安全管理。
 - 3 工作状态检查应包括外观检查和性能检测。
- 8.1.5 设备检查与维护应满足下列要求：
 - 1 设备检查与维护的对象应包括传感器、数据采集设备、数据传输设备、数据存储设备和数据显示设备。
 - 2 工作内容应包括工作状态检查、保养与维护。
 - 3 工作状态检查应包括外观检查和性能检测。
- 8.1.6 异常处置方案应包括响应机制和应急管理。
- 8.1.7 每 5 年应开展 1 次结构健康监测系统运行状态分析，根据分析结果采取系统修复、升级或改造等对策。
- 8.1.8 监测数据异常或预警时，应及时对监测系统及隧道结构进行检查或检测。
- 8.2 传感器子系统
 - 8.2.1 传感器外观检查应包括以下内容：
 - 1 传感器安装有无松动和错位。
 - 2 传感器内部和外部有无污垢和异物。
 - 3 传感器外壳是否密封。
 - 4 传感器线材有无老化和损坏。
 - 5 保护装置是否损坏。
 - 8.2.2 传感器的性能检测应包括以下内容：
 - 1 传感器元件是否有损伤。
 - 2 传感器线路和通道各接口是否通讯正常。
 - 8.2.3 传感器出现性能故障时，应及时进行修复或更换，并满足以下要求：
 - 1 不影响其他传感器的正常工作。
 - 2 对于表贴式传感器，应进行替换修复，替换传感器性能不得低于原传感器。
 - 3 对于无法直接替换的埋入式传感器，可增设表面式传感器进行替代测量。
 - 8.2.4 传感器的工作环境不满足其正常使用要求时，应增加防水、防腐、防振、防静电、防尘等保护措施。
- 8.3 数据采集与传输子系统
 - 8.3.1 数据采集传输设备的环境参数应处于正常运行允许范围内。
 - 8.3.2 数据采集与传输子系统硬件外观检查应包含以下内容：

1 保护装置是否有潮湿、腐蚀、人为破坏等情况。

2 保护装置是否牢固。

8.3.3 数据采集与传输子系统性能检测应包括以下内容：

1 数据采集使用内置电源时，定期按照设备手册对电池进行检查和维护。

2 设备采集数据功能是否正常，测量值是否稳定。

3 数据采集与传输子系统的通讯情况，包括通讯硬件性能是否正常，传输电缆、光缆是否破损，无线收发模块等是否正常。

4 检查数据传输终端设备的网络连接是否正常，数据传输互联设备是否能正常执行各项业务功能，传输响应时间是否满足设计要求。

8.3.4 数据采集与传输子系统的维护应包括以下内容：

1 数据采集设备检验和校准。

2 数据采集设备进行升级或更换。

3 数据通讯测试异常设备维护或更换。

4 数据日志异常情况溯源，记录并建立档案。

8.4 数据处理与控制子系统

8.4.1 应根据结构安全需要，对数据采集频率、数据有效性检查方法、连续观测参数触发条件等进行合理调整。

8.4.2 应根据技术的发展，及时更新系统数据处理算法，保证数据的优良性。

8.5 数据存储与管理子系统

8.5.1 存储设备的运行环境如湿度、温度、振动等对设备有潜在的威胁时，应及时制定应对方案，采取相应的保护措施。

8.5.2 数据库的维护应符合下列规定：

1 在应用程序调试完成后，应对数据库进行试运行操作，包括功能测试和性能测试。

2 应定期对数据库和日志文件进行备份。

3 应保证数据库管理系统处于安全的物理环境下，系统硬件和软件应采取保护措施以免受到未授权用户的修改。

8.5.3 结构健康监测系统的存储设备检查应包括以下内容：

1 设备是否正常工作、剩余可用存储空间大小以及存储设备的安全性和保密性等。

2 检查设备表面是否破损、是否洁净、有无锈蚀、有无积水、运行过程中是否存在过热现象、接线有无松动、运行有无异响和异常振动。

3 查询历史监测数据是否完整，若发现有数据存储丢失状况，及时进行排查和维护。

4 对配备有不间断电源的数据存储设备，定期检查不间断电源的工作情况。检查项目包括不间断电源指示灯是否正常、是否能够正常启动、停电时不间断电源主机输入和输出电压、输出频率以及零-地电压是否符合产品使用标准。停电且不间断电源电量少于 10%时，能保证数据存储设备可以及时关机，以免损坏数据存储设备。

8.5.4 硬件和软件应采用加密保护技术以防止删除或修改软件及数据。

8.5.5 监测报告可分为日报、警情快报、周报、月报、季报、年报和总结报告等，监测报告表达应直观、明确。

8.6 状态评估与预警子系统

8.6.1 状态评估与预警子系统应检查数据处理分析功能是否正常，包括下列主要内容：

- 1 剔除异常数据。
- 2 数据存储、自动生成报告报表。
- 3 操作系统中心数据库，进行数据查询和管理。
- 4 备份数据、自动导入和导出数据及手工导入和导出数据。
- 5 统一的数据标准格式和标准化读写接口。

8.6.2 状态评估与预警子系统的重要数据和日志应进行备份。

8.6.3 对子系统所用的电脑应定期进行权限检查和病毒检测，以保证系统安全运行；应定期进行软件匹配性检查，保证电脑其他软件不会干扰子系统软件的正常运行。

8.7 用户界面子系统

8.7.1 用户界面子系统应由专业人员进行操作，未经授权，不得随意修改界面内容。

地方标准信息服务平台

附录 A
(资料性)
水下隧道结构健康监测常用传感器

A.0.1 应力应变及温度监测仪器

(1) 应变计系列

表 A.0.1-1 差动电阻式应变计系列

仪器名称	标距 (mm)	应变测量范围 ($\times 10^{-6}$)	分辨率 ($\times 10^{-6}$)
差动电阻式应变计	100	-1500~1000	$\leq 0.3\%$
		-2000~500	
	150	-1200~1200	
		-2000~500	
	250	-1000~600	
		-2000~200	
		-1000~500	

表 A.0.1-2 钢弦式应变计系列

仪器名称	标距 (mm)	测量范围 ($\times 10^{-6}$)	分辨率 ($\times 10^{-6}$)
钢弦式应变计	50, 100, 150, 250	0~2500, 0~3000	$\leq 0.15\%$

表 A.0.1-3 光纤光栅式应变计系列

仪器名称	标距 (mm)	测量范围 ($\times 10^{-6}$)	分辨率 ($\times 10^{-6}$)
光纤光栅式应变计	50, 100, 150, 250	-1500~1500	$\leq 0.1\%$

(2) 温度计系列

表 A.0.1-4 温度计系列

仪器名称	测量范围 ($^{\circ}\text{C}$)	分辨率 ($^{\circ}\text{C}$)
铜电阻温度计	-30~70	≤ 0.1
钢弦式温度计	-20~80, -40~200	≤ 0.1
热敏电阻温度计	-20~60	≤ 0.1
铂电阻温度计	-40~80	≤ 0.1
光纤光栅式温度计	-30~80, -30~120	≤ 0.1

(3) 混凝土压应力计系列

表 A.0.1-5 混凝土压应力计系列

仪器名称	测量范围 (MPa)	分辨率
钢弦式混凝土压应力计	0~1, 0~3, 0~5, 0~7.5, 0~10, 0~15, 0~20, 0~30	$\leq 0.05\%$
差动电阻式混凝土压应力计	0~3, 0~6, 0~12, 0~20	$\leq 1\%$
光纤光栅式混凝土压应力计	0~3, 0~6, 0~12, 0~20	$\leq 0.1\%$

(4) 钢筋应力计 / 锚杆应力计系列

表 A.0.1-6 钢筋应力计 / 锚杆应力计系列

仪器名称	测量范围 (MPa)	钢筋规格 (mm)	分辨率
钢弦式钢筋 / 锚杆应力计	-100~200 -100~300	φ16, φ18, φ20, φ22, φ25, φ28, φ32, φ36, φ40	≤0.05%
差动电阻式钢筋 / 锚杆应力计	-100~400 -100~500		≤0.3%
光纤光栅式钢筋 / 锚杆应力计	-100~600		≤0.1%

(5) 锚索测力计 / 锚杆测力计系列。

表 A.0.1-7 锚索测力计 / 锚杆测力计系列

仪器名称	测量范围 (kN)	分辨率
钢弦式锚索 / 锚杆测力计	0~500, 0~1000, 0~1500, 0~2000, 0~3000, 0~4000, 0~5000, 0~10000	≤0.05%
差动电阻式锚索 / 锚杆测力计		≤0.5%
光纤光栅式锚索 / 锚杆测力计		≤0.1%

A.0.2 变形监测仪器

(1) 倾斜仪系列

表 A.0.2-1 伺服加速度计式倾斜仪系列

仪器名称	测量范围	分辨率 (每 500mm 位移)
伺服加速度计式倾斜仪	±23°	≤0.01mm
	±53°	≤0.02mm

表 A.0.2-2 微机械电子式倾斜仪系列

仪器名称	测量范围	分辨率
微机械电子式倾斜仪	±15°	≤15"
	±30°	≤15"

表 A.0.2-3 电解质式倾斜仪系列

仪器名称	测量范围	分辨率
电解质式倾斜仪	±6°, ±10°	≤0.05%
电解质梁式倾斜仪	±0.5°, ±1.5°, ±3°, ±6°, ±10°	

表 A.0.2-4 钢弦式倾斜仪系列

仪器名称	测量范围	分辨率
钢弦式测斜仪	±5°, ±10°, ±20°, ±30°	≤0.05%

表 A.0.2-5 气泡式倾斜仪系列

仪器名称	测量范围	分辨率
气泡式倾斜仪	±15', ±1°, ±3°	≤5"

(2) 测缝计(表面式)系列

表 A.0.2-6 测缝计(表面式)系列

仪器名称	测量范围 (mm)	测向数	分辨率
钢弦式测缝计	0~10, 0~20, 0~25, 0~30, 0~50, 0~100	1~3	≤0.1%
电容式测缝计	0~10, 0~20, 0~40, 0~50, 0~100		
电位器式测缝计	0~10, 0~20, 0~50, 0~100		
电感式测缝计	0~10, 0~20, 0~50, 0~100		
光纤光栅式测缝计	0~5, 0~10, 0~20, 0~30, 0~50, 0~100		

差动电阻式测缝计	0~5, 0~12, 0~25, 0~40, 0~50, 0~100		≤0.3%
----------	------------------------------------	--	-------

(3) 测缝计（埋入式）系列

表 A.0.2-7 测缝计（埋入式）系列

仪器名称	测量范围 (mm)	分辨率
钢弦式测缝计	0~10, 0~20, 0~25, 0~30, 0~50, 0~100	≤0.1%
电位器式测缝计	0~10, 0~20, 0~50, 0~100	
光纤光栅式测缝计	0~5, 0~10, 0~20, 0~30, 0~50, 0~100	
差动电阻式测缝计	0~5, 0~12, 0~25, 0~40, 0~50, 0~100	≤0.3%

(4) 静力水准仪系列

表 A.0.2-8 静力水准仪系列

仪器名称	测量范围 (mm)	分辨率
电容式静力水准仪 差动变压器式静力水准仪 光电式静力水准仪	0~20, 0~40, 0~50, 0~100, 0~150	≤0.1%
钢弦式静力水准仪 陶瓷电容式静力水准仪 电感式静力水准仪 磁致伸缩式静力水准仪 压阻式静力水准仪	0~100, 0~150, 0~300, 0~600	

A.0.3 渗流监测仪器

(1) 渗压计系列

表 A.0.3-1 渗压计系列

仪器名称	测量范围 (kPa)	分辨率
钢弦式渗压计	0~100, 0~200, 0~350, 0~500, 0~700, 0~1000, 0~1600, 0~2000, 0~3000, 0~5000, 0~7000	≤0.05%
差动电阻式渗压计	0~200, 0~400, 0~800, 0~1600, 0~2400	≤0.5%
光纤光栅式渗压计	0~100, 0~350, 0~700, 0~1000	≤0.1%

附录 B
(资料性)
层次分析法

B.0.1 隧道结构层次指标体系应包括三个层次：最高层、中间层、最底层。具体如表 B.0.1 所示。

表 B.0.1 层次指标体系层次结构

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

B.0.2 隧道层次指标体系的基本监测指标应遵循以下原则：

- 1 可测性原则：指标具有含义明确、具备现实收集渠道、便于定量分析、具有可操作性等特点。
- 2 完备性原则：指标整体反应隧道的使用状态。
- 3 独立性原则：各指标之间尽可能相互独立，避免包容性，能从不同方面反映隧道结构的性能特征，尽量避免由于指标间的相交或重复而带来的不便和分析误差。
- 4 一致性原则：各个指标与分析的目标相一致，所监测的指标间不应相互矛盾。
- 5 简明性原则：基本监测指标易于理解和接受，便于形成共同语言。
- 6 敏感性原则：基本监测指标选择对结构异常变化较为敏感的指标。

B.0.3 宜采用五级标度法确定隧道层次指标体系同一层次各指标在体系中的“相对重要性”以及下层指标对上层目标的“相对重要性”。

B.0.4 五级标度法相应的赋值是 1、3、5、7、9，表示一个指标对另一个指标的重要程度，数字越大表明越重要，条文中五级标度法具体含义及说明见表 B.0.4。

表 B.0.4 五级标度法含义及其说明

标度	含义	说明
1	两个指标，具有同样的重要性	两个指标对某性质相同的贡献
3	两个指标，前者比后者稍重要	两个指标中稍重于某个指标
5	两个指标，前者比后者明显重要	两个指标中偏重于某个指标
7	两个指标，前者比后者强烈重要	实际显示某个指标占主导地位
9	两个指标，前者比后者极端重要	两个指标中某个指标占绝对重要地位

注：如果要表示一个指标比另一个指标次要，则赋值取为上述 1、3、5、7、9 的倒数。

B.0.5 如果对于某些隧道结构采用五级标度法不足以描述清楚的，宜用 2、4、6、8 四个数值进行内插，形成九级标度法。

B.0.6 条文中九级标度法具体含义及说明见表 B.0.6。

表 B.0.6 九级标度法及其含义

标度	含义	说明
1	两个指标, 具有同样的重要性	两个指标对某性质相同的贡献
3	两个指标, 前者比后者稍重要	两个指标中稍重于某个指标
5	两个指标, 前者比后者明显重要	两个指标中偏重于某个指标
7	两个指标, 前者比后者强烈重要	实际显示某个指标占主导地位
9	两个指标, 前者比后者极端重要	两个指标中某个指标占绝对重要地位
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值	其它

注: 如果要表示一个指标比另一个指标次要, 则赋值取为上述 1、3、5、7、9 的倒数。

B.0.7 同一层次下的所有指标应建立如表 B.0.7 所示的两两比较判断矩阵。

表 B.0.7 两两比较判断矩阵

乙指标 \ 甲指标	B1	B2	...	Bj	...	Bn
B1	b11	b12	...	b1j	...	b1n
B2	b21	b22	...	b2j	...	b2n
...
Bi	bi1	bi2	...	bi3	...	bin
...
Bn	bn1	bn2	...	bnj	...	bnn

注: 矩阵中 B1, B2, ..., Bn——某一层指标 B 所支配的下一层指标;
 b_{ij} ——甲指标对乙指标重要程度的赋值, 即按照 B.0.4、B.0.5 确定的赋值;
 n ——判断矩阵的维数。

B.0.8 判断矩阵应检验一致性, 一致性的检验应根据式 B.0.8 中相对一致性指标 CR (Consistency Ratio) 判断。

$$CR = CI/RI \quad (B.0.8)$$

式中:

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

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

B.0.9 判断矩阵相对一致性指标 CR 应满足 $CR \leq 0.1$, 如果 $CR > 0.1$, 应对判断矩阵作适当修正。