



T/CECS G XXXX: 2026

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction  
Standardization

多年冻土地区路基自动化监测规程

Specifications for Automated Monitoring of Subgrade in  
Permafrost Regions

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization



中国工程建设标准化协会标准

## 冻土地区路基自动化监测规程

Specifications for Automated Monitoring of Subgrade in Permafrost  
Regions

T/CECS G:

主编单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司  
石家庄铁道大学

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202×年××月1日

人民交通出版社股份有限公司

北京

# 前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2025 年第一批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字[2025]22 号）的要求，由中交第一公路勘察设计研究院有限公司和石家庄铁道大学承担《冻土地区路基自动化监测规程》（以下简称“本规程”）的制订工作。

编写组基于公路路基自动化监测技术经验与相关科研成果，以提升多年冻土区公路建设与养护管理的数字化水平为目标，完成了本规程的编写工作。

本标准分为 6 章和 1 篇附录，主要内容包括：1 总则、2 术语、3 基本规定、4 监测内容、5 自动化监测系统设计与安装与处理、6 监测数据管理与应用，附录 A 常用自动化监测方法及传感器技术性能指标，附录 B 常用数据采集设备性能指标，附录 C 传感器安装保护示意图，附录 D 数据报表格式。

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

本标准基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本标准提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本标准相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本标准由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由吉林省松原市交通运输局或吉林中路新材料有限责任公司负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本标准日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或 XX（地址：XXXXX；邮编：XXXX；传真：XXXXX；电子邮箱：XXXXXX），以便修订时研用。

**主 编 单 位：**中交第一公路勘察设计研究院有限公司

石家庄铁道大学

**参 编 单 位：**中国科学院西北生态环境资源研究院

深圳大学

北京华益瑞科技有限公司

浙江托莫斯科技有限公司

兰州环科泰电子科技有限公司

绵阳铭宇电子科技有限公司

**主 编：**陈建兵，张玉芝

**主要参编人员：**穆彦虎 朱东鹏 袁 堃 王 柯 王 盟 刘通锋 叶 炜 姬育

黄亚飞 杜浩维 郑晨晨 张连振 李林超 李凌洁 张力杰  
王鼎 辛昭 江涛 彭怀进 何东明

**主 审：** 房建宏

**参与审查人员：** 张鲁新 李 宁 韩龙武 马 磊 张 泽 徐慧宁 李 珂

**参 加 人 员：**

征求意见稿

# 目 次

1 总则 .....	1
2 术语 .....	2
3 基本规定 .....	4
4 监测内容 .....	6
4.1 一般规定 .....	6
4.2 监测要素与指标 .....	6
4.3 监测等级 .....	7
4.4 冻土路基监测方案 .....	9
5 自动化监测系统设计、安装与处理 .....	15
5.1 一般规定 .....	15
5.2 自动化监测系统设计 .....	15
5.3 设备安装与保护 .....	18
5.4 系统调试 .....	21
5.5 数据处理 .....	22
5.6 系统验收 .....	22
5.7 系统维护 .....	23
第 6 章 监测数据管理与应用 .....	25
6.1 一般规定 .....	25
6.2 监测数据存储与管理 .....	25
6.3 监测数据质量控制与交叉验证 .....	26
6.4 监测要素分析、关键指标计算应用 .....	26
6.5 监测数据深度挖掘 .....	27
附录 A 常用自动化监测方法及传感器技术性能指标 .....	29
附录 B 常用数据采集设备性能指标 .....	33
附录 C 传感器安装保护示意图 .....	35
附录 D 数据报表格式 .....	35
本规程用词用语说明 .....	36
条文说明 .....	36

# 1 总则

**1.0.1** 为指导多年冻土地区公路路基自动化监测工作，保证监测质量，服务工程服役，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于多年冻土地区各等级新建和改扩建公路路基建设和运营期的自动化监测。

**1.0.3** 多年冻土地区公路路基自动化监测应根据监测目的，被监测对象所处的自然环境和地质条件、设计和施工方案等要素，制定监测方案，并组织实施。

**1.0.4** 多年冻土地区公路路基自动化监测除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

征求意见稿

## 2 术语

### 2.0.1 多年冻土 permafrost

冻结状态持续时间两年或两年以上的冻土。

### 2.0.2 总含水率 water content in frozen soil

冻土中所含冰和未冻水的总质量与干土质量之比。

### 2.0.3 多年冻土天然上限 natural permafrost table

天然条件下多年冻土层的顶面。

### 2.0.4 多年冻土人为上限 artificial permafrost table

人为条件影响下形成的多年冻土顶面。

### 2.0.5 地温年变化深度 depth of zero annual amplitude of ground temperature

地表以下，地温在一年内变化不超过 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的深度，也称年零较差深度。

### 2.0.6 年平均地温 mean annual ground temperature

年零较差深度处的地温。

### 2.0.7 自动化监测 Automated Monitoring

利用传感器和采集器等，通过软件自动持续地收集、分析目标对象的运行数据，无需人工干预即可完成状态监控、异常检测和报警，提升监测效率和实时性。

### 2.0.8 传感器网络 Sensor Network

传感器网络是由大量分布式传感器组成的监测网络系统，通过协作采集、处理和传输，得到环境或目标的感知数据（如温度、湿度、辐射等），广泛应用于监测领域。

### 2.0.10 远程监控中心 Remote Monitoring Center

通过通信网络（如互联网、专网）连接远程设备或监测点，实现数据采集、状态监视、异常报警、远程控制的集中管理平台，可实时掌握被监控对象的运行状态并进行干预。

### 2.0.11 分布式对象存储 distributed object storage

一种具备弹性伸缩、高可用性特征的存储架构，支持大规模非结构化监测数据的存储和管理。

### 2.0.12 数据完整性校验 data integrity verification

通过算法比对数据内容的一致性，检测监测数据是否在传输和存储过程中发生篡改或损坏。

### 2.0.13 数据趋势分析 trend analysis

通过统计或建模方法，识别监测数据随时间或空间尺度演化的长期变化趋势，如沉降加速、冻胀累积等。

### 2.0.14 温度响应 temperature response

因气温或地温变化引起的路基结构状态的缓慢演化，具有一定周期性特征。

#### 2.0.15 异常数据 abnormal data

不符合预期规律或数据模式的数据，可能为设备故障、外部干扰或结构突变所致。

#### 2.0.16 多格式数据支持 multi-format data support

监测系统支持包括文本、图像、视频、点云等多种数据类型的存储、调用与分析能力。

征求意见稿

### 3 基本规定

3.0.1 多年冻土地区路基自动化监测参与及实施责任主体应由委托单位、实施单位、监理单位和运维单位组成，各单位职责及作用应符合下列规定：

1 委托单位应对多年冻土地区路基自动化监测提出监测技术要求，包括监测目的、监测形式、监测设计年限、监测精度等。

2 实施单位应根据委托单位的监测技术要求，完成监测方案设计、监测设备安装、监测数据采集、数据分析等工作。

3 监理单位应在委托单位授权下，负责对监测系统安装、调试、验收及运行过程实施监督，对不符合要求的环节提出整改意见并跟踪落实等工作。

4 运维单位应在委托单位授权下，完成设备维护、故障排查、数据保障及数据分析工作，建立常态化运维机制，确保系统长期稳定运行。

3.0.2 监测应采用成熟、稳定、先进的技术手段，采用的监测设备应能可靠、及时、全面地采集到路基的温度、水分、位移等的的数据。监测实施期间应做好现场监测设备的维护、终端接收数据的校验工作，监测系统宜采用具有自动采集、传输、备份、分析与报警功能的自动化监测。

条文说明：

高海拔多年冻土区普遍存在海拔高（ $\geq 4500\text{m}$ ）、年均气温低（ $\leq -5^\circ\text{C}$ ）、缺氧、大风（年平均风速 $\geq 4\text{m/s}$ ）、暴雪/冻融频繁等问题，线性工程的监测点位分散、偏远，人工监测的交通、人力、时间成本极高，多年冻土地区采用自动监测，具有适配极端环境、提升数据质量、实时预警风险、降低综合成本的优势，在条件允许时优先采用自动化监测既解决了传统人工监测“测不了、测不准、测不勤、成本高”的痛点，又能实现冻土区工程安全运营、长期监测、生态保护的多重目标，是目前高海拔多年冻土区工程监测的主要监测方式。考虑到无线传输失效等极端情况，自动化监测路段仍需留有人工采集的接口和人工检校的手段，以确保数据的长期有效性和系统备份。

3.0.3 自动化监测系统应按照“目标导向、可靠精准、创新适配、动态调控、开放共享”的基本原则进行设计，设计应包括系统总体设计、监测内容设计、安装与验收方案设计、运维与保障方案设计等内容。

3.0.4 自动化监测设备的设计使用年限宜满足项目监测期限要求；设计使用年限无法满足时，应在系统总体设计阶段提出保证监测数据继承性的设备更换方案。

3.0.5 监测系统安装与运营应充分考虑对自然环境的影响，合理选择设备安装时间，不应影响监测对象的结构安全，妨碍主体工程的正常使用。

3.0.6 监测设备安装过程中应有完整的安装记录，暴露的点位及设备应设置

保护措施和明显标识。

3.0.7 实施单位应编制运维手册和应急处置手册，指导日常设备运维和应急事件处治。

3.0.8 监测系统建设完成后应由监理单位组织验收，并出具验收报告。

3.0.9 监测系统后期运行应由运维单位按年度编制系统运维报告、数据分析与成果报告，并应按要求归档。

征求意见稿

## 4 监测内容

### 4.1 一般规定

4.1.1 多年冻土地地区路基监测应考虑周边环境条件、多年冻土工程地质条件、工程重要程度等因素，合理确定监测等级。

条文说明：

多年冻土地地区路基监测目的在于追踪冻土地基水热状态与路基工程稳定性之间的动态变化，科学评估冻土路基服役性能演化过程，预测预警路基沉降、路面开裂、边坡失稳等病害风险，为路基工程养护决策提供数据支撑。

4.1.2 多年冻土地地区路基监测应结合路基结构和采用的工程措施，对气象、温度、水分、变形、含盐量、结构空腔微风速等指标进行监测。

4.1.3 多年冻土地地区路基监测应将各监测要素与指标纳入同一数据采集系统内。

### 4.2 监测要素与指标

#### 4.2.1 气象监测

(1) 气象是冻土路基水、热状态变化的外在驱动力，开展气象监测可为冻土路基工程服役环境确定和长期服役性能预测提供依据。

(2) 气象监测指标包括气温、辐射、降水、风速、风向等。

#### 4.2.2 温度监测

(1) 温度可用于表征冻土路基结构内部季节冻融过程、路基下伏人为上限变化、多年冻土温度变化过程，监测目的在于掌握冻土路基温度场的时空演化过程，为路基沉降、路面开裂、边坡失稳等病害风险的预测预警提供依据。

(2) 温度监测内容包括天然场地土体温度、一般填土路基及特殊结构路基内部关键特征温度、多年冻土地基温度等。

#### 4.2.3 水分监测

(1) 水分监测可用于表征冻土路基内水分的空间分布和运移过程，及时掌握冻土路基内部水分场的时空演化过程，为路基冻胀、融沉、边坡失稳等病害风险的预测预警提供依据。

(2) 水分监测内容包括冻土路基及地基的含水量、含冰量、地下水位等指标。

#### 4.2.4 变形监测

(1) 变形监测可用于表征冻土路基工程的稳定性，科学评估冻土路基工程服役性能，为路基超限变形、差异变形、边坡失稳等病害风险的预测预警提供依据。

(2) 变形监测内容包括路基表面变形、路基分层变形、挖方路基边坡竖向、横向变形以及边坡分层竖向、横向变形等。

#### 4.2.5 结构空腔微风速监测

(1) 微风速监测可用于表征块石、通风管等对流换热类主动冷却结构的冷却降温过程。

(2) 微风速监测包括块石空隙微风速、通风管内风速等。

#### 4.2.6 含盐量监测

(1) 含盐量表征冻土中易溶盐的含量，其对于路基的冻结温度、冻胀和融沉变形以及整体热稳定性存在显著影响。

(2) 含盐量监测包括易溶盐含量等。

### 4.3 监测等级

#### 4.3.1 公路工程沿线多年冻土应按下列要求进行分类：

(1) 可按多年冻土的含冰量分为少冰冻土、多冰冻土、富冰冻土、饱冰冻土和含土冰层；其中少冰冻土、多冰冻土应划分为低含冰量冻土，富冰冻土、饱冰冻土和含土冰层应划分为高含冰量冻土；

(2) 可按多年冻土的年平均地温分为高温冻土和低温冻土，其中高温冻土年平均地温应不低于 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，低温冻土年平均地温应低于 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；

(3) 冻土的含冰特征描述和年平均地温测试应符合冻土工程地质勘察规范（GB 50324）的规定。

4.3.2 应根据冻土年平均地温和含冰量对冻土类型进行划分，可按表 4.3.1 进行。

表 4.3.1 公路工程多年冻土分类方案

年平均地温		含冰类型				
		低含冰量冻土		高含冰量冻土		
		少冰冻土	多冰冻土	富冰冻土	饱冰冻土	含土冰层
高温冻土	$\geq -1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	融沉稳定型		不稳定型		
低温冻土	$< -1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$			热稳定型		

条文说明：

本规定将多年冻土分为融沉稳定型、热稳定型及不稳定型多年冻土三类：

(1) 融沉稳定型冻土为低含冰量冻土，公路工程运营期间其冻土上限变化较大，但引发的沉降变形不大；

(2) 热稳定型冻土，其热惰性大，公路工程运营期内冻土上限变化缓慢，但容易引发沉降变形；

(3) 不稳定型冻土，其热稳定性差，公路工程运营期内冻土上限变化较大，

且容易引发较大的沉降变形，路基融沉、路面开裂、路堑边坡失稳等病害风险大。

4.3.1 多年冻土路基的气象监测指标除应符合气象观测规范的规定外，同时应满足表 4.3.2 的要求。

条文说明：气象指标应符合地面气象观测规范 空气温度和湿度（GB/T 35226-2017）、地面气象观测规范 风向和风速（GB/T 35227-2017）、地面气象观测规范 降水量（GB/T 35228-2017）、地面气象观测规范 辐射（GB/T 35231-2017）、地面气象观测规范 地温（GB/T 35233-2017）、地面气象观测规范 冻土（GB/T 35234-2017）、地面气象观测规范 地面状态（GB/T 35236-2017）、地面气象观测规范 自动观测（GB/T 35237-2017）等规定。

表 4.3.2 多年冻土路基监测指标的确定要求

监测内容	监测指标	单位	监测频率	监测精度	监测等级		
					一级	二级	三级
气象	气温	°C	≥1 次/h	±0.1 °C	应选	宜选	可选
	降水	mm	≥1 次/h	±0.1 mm	应选	宜选	可选
	风速	m/s	≥1 次/h	±0.1 m/s	应选	宜选	可选
	风向	°	≥1 次/h	3°	应选	宜选	可选
	辐射	W/m <sup>2</sup>	≥1 次/h	±5 W/m <sup>2</sup>	应选	宜选	可选
地温	路基温度	°C	≥1 次/日	±0.05 °C	应选	应选	应选
	天然场地温度	°C	≥1 次/日	±0.05 °C	应选	应选	宜选
	主动冷却结构层内温度	°C	≥1 次/日	±0.05 °C	应选	应选	宜选
水分	含水量	%	≥1 次/日	当体积含水量<65%时,为±6%	应选	宜选	可选
	含冰量	%	≥1 次/日	±10%	宜选	可选	可选
	地下水位	m	≥1 次/日	±0.01 m	宜选	可选	可选
竖向沉降	路基表面变形	mm	新建公路≥1 次/15 日, 其它公路≥1 次/月	高速公路及一级公路±2 mm, 二级公路±1 mm	应选	宜选	可选
	路基分层变形	mm	新建公路≥1 次/15 日, 其它公路≥1 次/月	±2 mm	应选	宜选	可选
边坡水平位移	地表水平位	mm	新建公路≥1 次/15 日, 其它公	高速公路及一级公路±2	宜选	可选	可选

	移		路≥1次/月（有失稳迹象是应动态调整监测频率）	mm，二级公路±1 mm			
	土体深层水平位移	mm	新建公路≥1次/15日，其它公路≥1次/月（有失稳迹象是应动态调整监测频率）	±2 mm	宜选	可选	可选
微风速	块石层、通风管内微风速	m/s	≥1次/h	±0.05 m/s	应选	宜选	可选
含盐量	路基易溶盐含量	%	在勘察期进行	±0.05%	宜选	可选	可选

4.3.2 多年冻土路基监测等级划分应综合考量周边环境条件、区域水文特征、多年冻土工程地质特性、工程重要程度，综合确定相应的监测等级。

#### 4.4 冻土路基监测方案

##### 4.4.1 一般填土路基

(1) 一般填土路基监测应按监测等级，选取合适的气象、温度、水分、变形等监测内容与指标。

(2) 监测断面应结合多年冻土工程地质条件，选取代表性断面；气象监测站点的选取应符合地面气象观测相关要求，宜采用自动气象观测站。

(3) 温度监测应在坡脚、路肩、天然场地等位置布置温度监测孔，孔深不宜小于 15m，天然场地监测孔与路基坡脚距离不宜小于 15m。条件容许时，可在路中布置温度监测孔，孔深不宜小于 15m。

(4) 温度监测孔内测点的布置间距应合理，其中活动层内布置间距不宜大于 0.5m，冻土层内布置间距不宜大于 1.5m。

(5) 水分监测宜在左、右路肩下分层布置监测点，应能反映路基及活动层内水分的空间分布和季节变化过程。条件容许时，可在路中下分层布置监测点。

(6) 路基表面变形监测宜在左右路肩、路中布置监测点，应能反映路基横断面内路基的总体变形及差异变形情况。

(7) 路基分层变形宜在左右路肩、路中表面监测的基础上，在路基底面、多年冻土人为上限位置分层布置监测点，应能反映路基填土、活动层以及多年冻土层的分层变形。

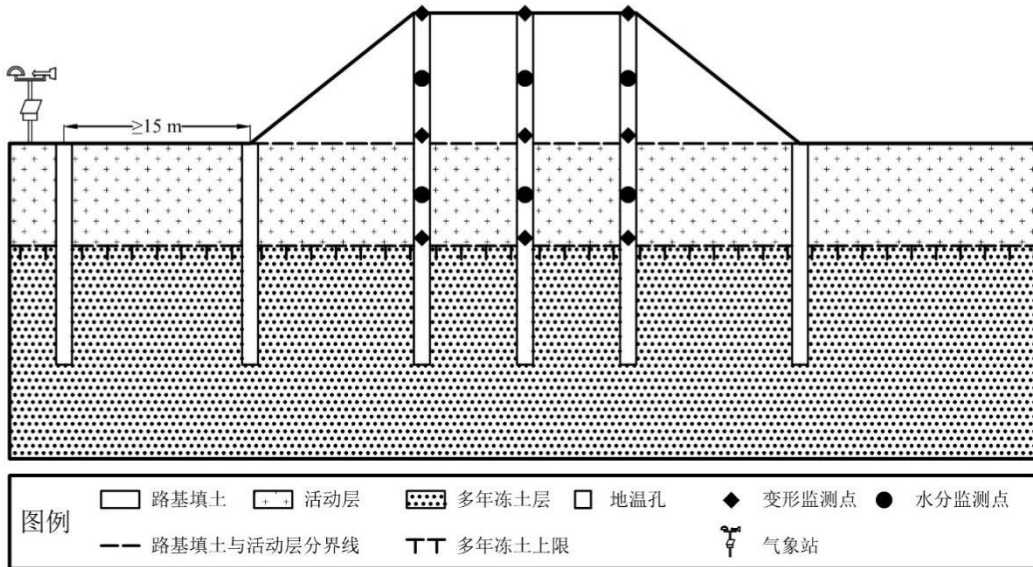


图 1 一般填土路基监测点布设方案

#### 4.4.2 特殊结构路基

##### 4.4.2.1 保温隔热路基

(1) 保温隔热路基的气象、温度、水分、变形等监测内容与指标，应参照本标准 4.4.1 一般填土路基相关要求执行。

(2) 在参考一般填土路基地温监测的基础上，应在保温板上下增设温度监测点，应能用于评估保温隔热效果。

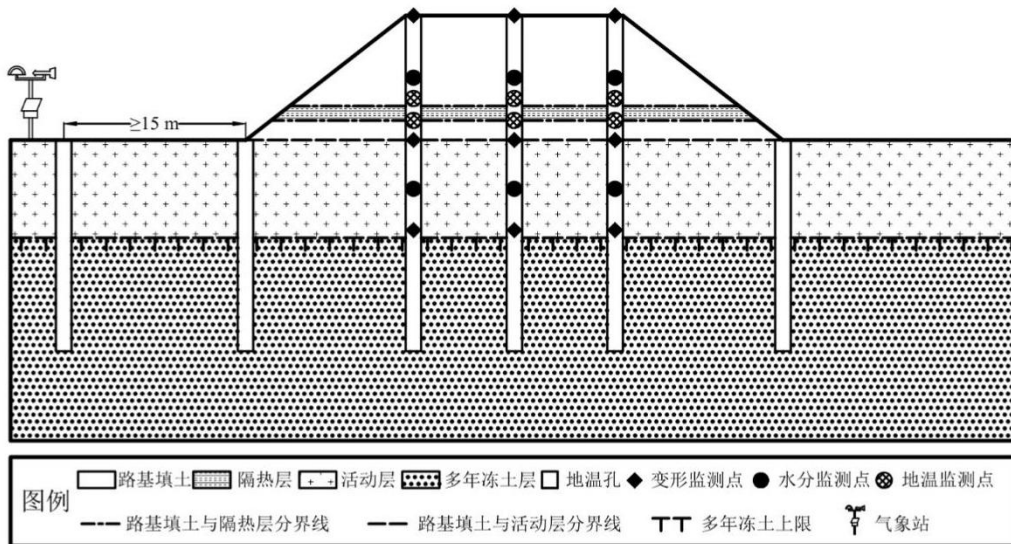


图 2 保温路基监测点布设方案

##### 4.4.2.2 块石路基

(1) 块石路基的气象、温度、水分、变形等监测内容与指标，应参照本标准 4.4.1 一般填土路基相关要求执行。

(2) 温度监测在参照本标准 4.4.1 一般填土路基温度监测要求的基础上，应在块石层顶底板增设地温监测点，用于评估块石层的冷却降温过程及效果。

(3) 块石路基应按监测等级，开展块石层内微风速监测；监测点宜布设在左右路肩及路中下部块石层中部，可通过监测块石层内微风速参数，评估块石层内对流换热效率。

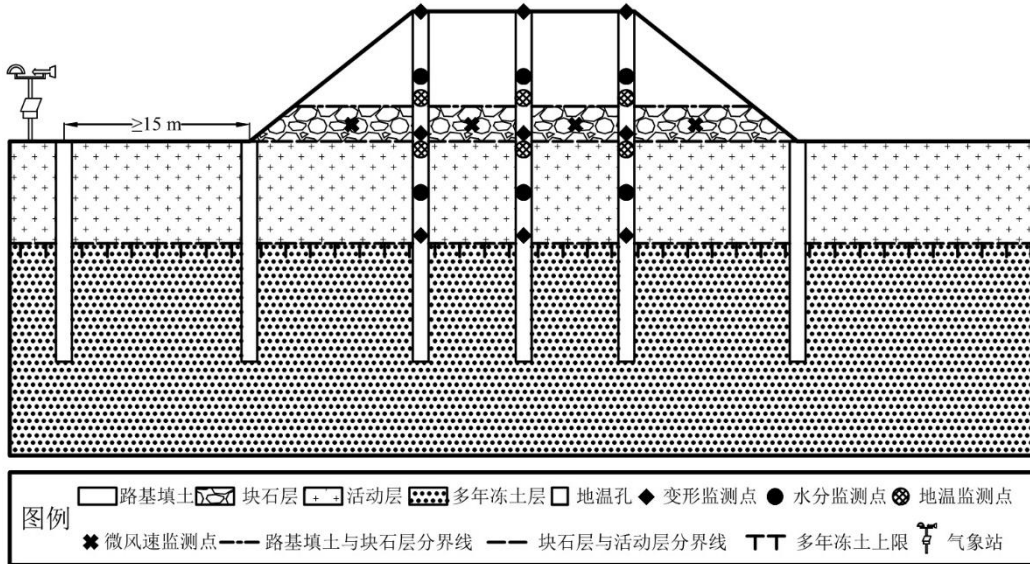


图 3 块石路基监测点布设方案

#### 4.4.2.3 通风管路基

(1) 通风管路基的气象、温度、水分、变形等监测内容与指标，应参照本标准 4.4.1 一般填土路基相关要求执行。

(2) 温度监测在参照本标准 4.4.1 一般填土路基温度监测要求的基础上，应在通风管内通风管周边加设温度监测点，用于评估通风管冷却降温过程及效果。

(4) 通风管路基应按监测等级，开展通风管内微风速监测；监测点宜布设在通风管进、出口和管中等位置，可通过监测通风管内微风速，评估通风管内对流换热效率。

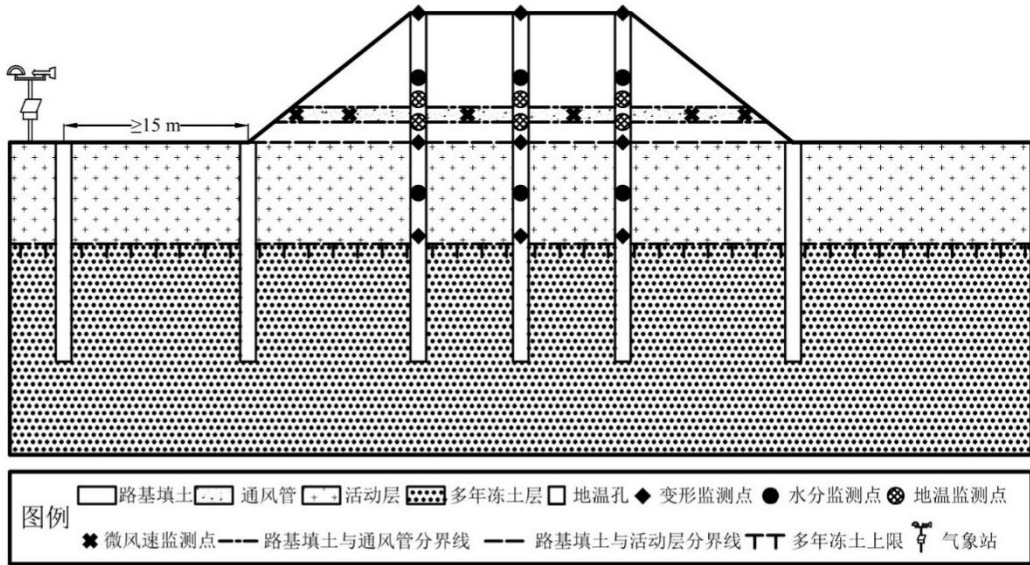


图4 通风管路基监测点布设方案

#### 4.4.2.4 热棒路基

(1) 热棒路基的气象、温度、水分、变形等监测内容与指标，应参照本标准 4.4.1 一般填土路基相关要求执行。

(2) 温度监测在参照本标准 4.4.1 一般填土路基温度监测要求的基础上，应在路基纵向方向增设温度观测孔，用于评估热棒的冷却半径及冷却效果。

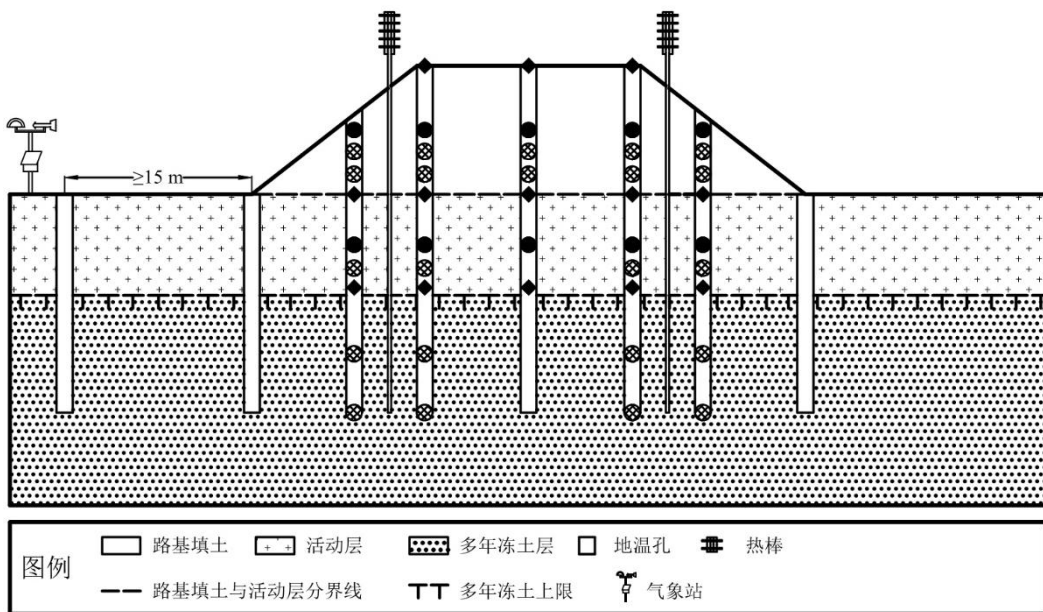


图5 热棒路基监测点布设方案

#### 4.4.2.5 组合类路基

组合类路基的监测内容与指标，应参照本标准一般填土路基和单一特殊结构路基相关要求组合执行。

#### 4.4.3 挖方路基

(1) 挖方路基的气象、温度、水分、变形等监测内容与指标，应参照本标准 4.4.1 一般填土路基相关要求执行。

(2) 针对挖方路基边坡，宜在天然地表、路基底面、多年冻土人为上限位置分层布设变形监测点，开展挖方路基边坡竖向、横向变形以及边坡分层竖向、横向变形监测，为边坡失稳等病害风险的预测预警提供依据。

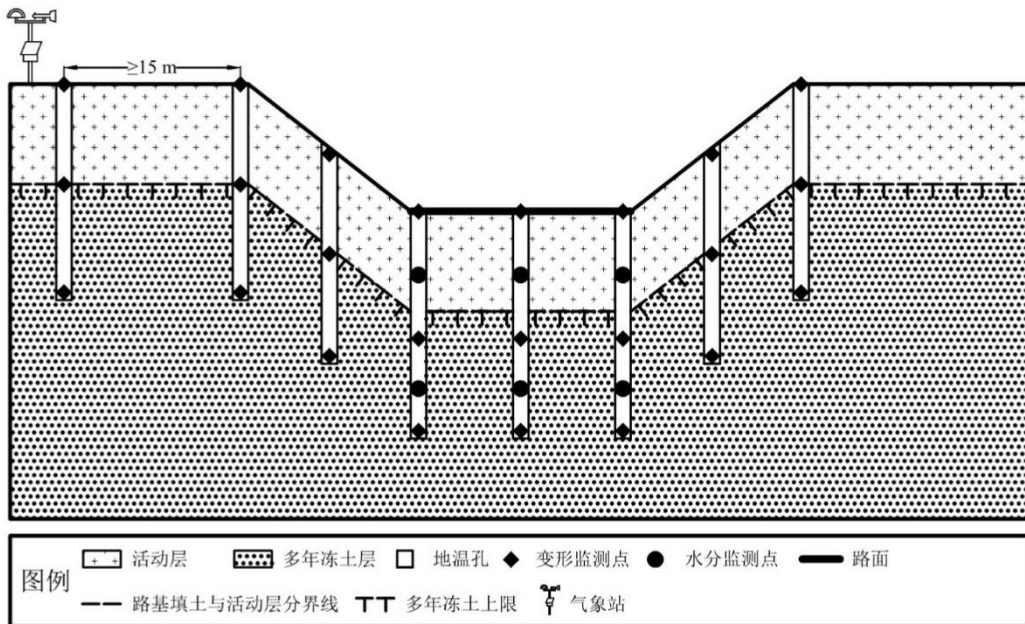


图 6 挖方路基监测点布设方案

#### 4.4.4 半挖半填路基

(1) 半挖半填路基的气象、温度、水分、变形等监测内容与指标，应参照本标准 4.4.1 一般填土路基相关要求执行。

(2) 针对挖空部分的路基边坡，参照本标准 4.4.3 挖方路基相关要求执行，且当陡峭斜坡存在时，应加强对边坡变形的监测；针对填埋部分的路基边坡，应加强地温、路基变形等参数的监测。

#### 4.4.5 过渡段

(1) 路桥、路隧、路涵过渡段的气象、温度、水分及变形等监测内容与指标，应参照本标准 4.4.1 一般填土路基相关要求执行。

(2) 过渡段范围内的温度监测，应根据监测目的另行设计。

条文说明：过渡段范围内的温度监测孔设计可参考一般填土路基，沿线路纵向的温度监测孔一般可与变形监测设置于相同位置。横向构筑物，比如涵洞内的温度监测，可参考通风管等路基结构内的温度监测。

(3) 过渡段变形监测应在参考一般填土路基执行，重点关注过渡段范围内

的路基表面纵向差异变形，应沿线路纵向方向加设变形监测点，用于反映结构刚度差异引发的过渡段差异变形。路基表面纵向差异变形监测应依据《工程测量通用规范》（GB 55018）布设基准点。

条文说明：过渡段范围内的变形测点根据距过渡界面（如路桥过渡段台背）的距离，测点间距逐渐加大。监测范围一般为过渡段范围加 10-20m。根据实际工程需要，可增设分层沉降测点。

#### 4.4.6 其他类型路基

（1）针对路基宽度纵向变化的过渡段部分，应结合渐变段长度、路基宽度变化幅度等工程实际情况，合理设置监测方案。

（2）横向拼宽路基的气象、温度、水分及变形等监测内容与指标，应按照路基结构类型按照上述要求执行的同时，重点关注新旧路基的差异变形。

（3）针对改、扩建路基，应结合工程实际综合确定监测方案。路基改扩建过程中应积极保护原有监测设备，当原有监测设备无法继续使用或被破坏时，应在改扩建工程后及时恢复。

#### 4.4.7 风积沙灾害路段路基

（1）在风积沙灾害发育路段，宜结合风积沙灾害及其对冻土路基水热状态的影响综合确定监测方案。在一般填土路基气象、温度、水分及变形等监测内容与指标的基础上，应增设沙层厚度、温度、不同高度输沙通量等要素的监测。

（2）风积沙灾害发育的块石、通风管路路基路段，在一般填土路基监测内容与指标的基础上，应增设块石层内、通风管内风沙填充、堆积程度的监测，用于评估风积沙对块石层、通风管通风对流换热过程的影响。

#### 4.4.8 风吹雪灾害路段路基

（1）在风吹雪灾害发育路段，宜结合风吹雪灾害及其对冻土路基水热状态的影响综合确定监测方案。在一般填土路基气象、温度、水分及变形等监测内容与指标的基础上，应增设雪深及其沿线路横断面分布、密度等要素的监测。

（2）风吹雪灾害发育的块石、通风管路路基路段，在一般填土路基监测内容与指标的基础上，应增设块石层内外、通风管内积雪的监测，用于评估积雪对块石层、通风管通风对流换热过程的影响。

## 5 自动化监测系统设计、安装与处理

### 5.1 一般规定

5.1.1 多年冻土地地区路基自动化监测系统应包含传感器网络、数据采集与传输单元、远程监控中心三部分。

5.1.2 自动化监测设计应围绕监测需求开展，主要内容包括：监测指标选择、设备选型、采集装备布设、通讯网络设计、数据采集频率设定、供电及设备保护方案设计等；设计应结合路基的监测指标体系，选取与监测需求相适配的设备。

5.1.3 远程监控中心服务器应具备数据接收与存储功能，宜采用大容量存储设备并配置备份冗余技术；服务器应部署管理软件，可实现数据查询与分析功能。

5.1.4 监控软件平台应具备可视化界面，可实时显示监测数据变化曲线、图表；平台应设置阈值报警功能，并支持历史数据的查询与分析。

### 5.2 自动化监测系统设计

5.2.1 多年冻土区路基自动化监测系统的功能与性能应符合下列规定：

1. 自动化运行：系统应能自动完成数据采集、传输、存储与初步分析，实现无人值守联系运行。

2. 高精度监测：传感器精度应满足要求，能有效捕捉路基微小物理变化。

3. 远程实时监控：应通过网络通信实现数据远程传输与实时监控，便于数据归集、查看与管理。

4. 长期稳定性：软硬件应适配多年冻土地地区野外恶劣环境，保障长期稳定运行。

5. 数据分析与预警：应具备数据处理、分析功能，可构建预测模型，支撑病害风险研判与预警。

条文说明：

依据高海拔多年冻土区（如青藏高原）极端气温数据，该区域冬季极端最低温可达  $-40^{\circ}\text{C}$  以下，夏季路面最高温可达  $60^{\circ}\text{C}$ ，传感器需覆盖此温度区间保障全年稳定运行；针对极端低温低于  $-40^{\circ}\text{C}$  的区域，补充专用传感器选型建议，确保不同工程场景适用性。

5.2.2 路基自动化监测系统监测指标选择，应根据不同路基、断面类型，参照指标体系章节选择监测指标。

5.2.3 设备选型

(1) 气象监测设备应符合下列规定：

1 应支持  $-40^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$  工作环境温度，宜选用工作温度下限 $\leq -50^{\circ}\text{C}$ 的专用传感器。

2 具备气压补偿功能或受气压影响小，抗紫外老化，能适应强风、暴雪等恶劣天气。

3 体积重量适中、小型化，自带安装支架或夹具，可靠性高、易更换维修。

(2) 温度监测设备应符合下列规定：

1 宜选用耐低温、稳定性好的热敏电阻传感器，测量范围应覆盖 $-40^{\circ}\text{C}\sim +50^{\circ}\text{C}$ ，测量精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ；

2 应具有良好的抗压强度( $\geq 1.0\text{MPa}$ )和防水性(恒定温度条件下浸水 120h 后电阻率变化率 $< 1\%$ )；

3 应根据实际需要通过串联的方式，利用专用多芯电缆制作成温度电阻串并进行标定。

(3) 水分监测设备应符合下列规定：

1 土壤含水率监测设备的工作温度应覆盖 $-40^{\circ}\text{C}\sim +50^{\circ}\text{C}$ ，体积含水率 $< 65\%$ 时测量误差应 $< \pm 5\%$ (体积含水率)。

2 含冰量监测设备的工作温度应满足 $-40^{\circ}\text{C}\sim +50^{\circ}\text{C}$ 的要求，测量时平均温度扰动应有效感知区间 $< 0.2^{\circ}\text{C}$ ，非盐渍土体积含冰量感知精度 2% F.S。

3 地下水位监测设备宜选择耐低温、抗冻胀、耐腐蚀的渗压式水位计或超声波水位计，工作温度应满足 $-40^{\circ}\text{C}\sim +50^{\circ}\text{C}$ ，量程 0-50 米，精度 $\geq \pm 0.1\%FS$ 。

(4) 沉降变形监测设备可选用单点沉降位移传感器或分层沉降计，其工作温度应覆盖  $-30^{\circ}\text{C}\sim +60^{\circ}\text{C}$ ，量程 $> 400\text{mm}$ ，分辨率 $\leq 0.1\text{mm}$ 。

(5) 应力应变监测宜选用电阻式、振弦式等应变传感器，其工作温度应为 $-30^{\circ}\text{C}\sim +80^{\circ}\text{C}$ ，应变测量范围水平为 $-1500\sim 1500\mu\varepsilon$ 、竖向为 $-1500\sim 0\mu\varepsilon$ ，分辨率 $\leq 0.5\% F.S$ ，精度 $\pm 3\mu\varepsilon$ 。

常见冻土路基监测方法及相关传感器性能指标详见附件 A，选型时可作为参考。

(6) 数据采集仪设备应满足下列规定：

1 应兼容多种传感器接口，支持常规模拟与数字信号接入。

2 应具备数据处理能力，存储容量应能保存 1 年以上数据，宜支持外扩 SD 卡或硬盘等存储设备。

3 应支持宽温工作( $-40^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ )，并宜具备抗电磁干扰、防潮、防尘等环境适应性(常见冻土路基监测数据采集设备的详细性能指标及选型要求参见附录 B)。

(7) 通信模块设备应满足下列规定：

- 1 应依据通信基础设施选择无线通信模块或局域网络传输模块。
- 2 应满足系统数据传输要求，具备数据纠错、重传功能，保障传输稳定性。
- 3 应具备低功耗特性，宜配置电源管理功能，降低能耗。

#### 5.2.4 设备编码规则

##### (1) 编码分类与结构

参照 GB/T 30269.501-2014《信息技术 传感器网络 第 501 部分：标识：传感节点标识符编制规则》及 GB/T 36962-2018《传感数据分类与代码》相关要求，建立四级编码体系：

编码类型	编码方式	编码规则	备注
监测类型编码	2 位数字编码	01 - 位移 02 - 温度 03 - 振动 04 - 水分 05 - 含冰量 06-10 - 气象类气温、湿度、 风速、风向、辐射。	
监测设备编码	4 位数字编码	2 位类型码 + 2 位序号 如：0201 - 地温传感器、 0401 - 水分传感器；	
监测点编码	8 位数字编码	2 位区域码 + 2 位孔号 / 点位码 + 2 位深度码 + 2 监测量码	明确标识监测点位置与监测对象
监测数据格式编码	6 位数字编码	4 位时间码 + 2 位数据类型 码	关联数据采集时间与数据属性。

##### (2) 编码管理要求

编码体系应具备唯一性、可扩展性及兼容性，编码规则应在系统全生命周期内保持稳定，新增监测类型或设备时应按规则延续编码。

#### 5.2.5 系统数据采集与传输

采集频率：温度、湿度等气象参数，采集频率应不低于 1 次/小时；沉降、位移和应力等参数，采集频率应不低于 1 次/15 日。

数据传输：应根据地理环境与通信条件，选择对应的无线传输方式将数据传输至服务器端；对于传输要求较低的场景，可用 ZigBee 等短距离无线通信技术汇聚后，再统一传输至服务器端。

(1) 有信号区：优先采用 4G/5G 公网或光纤以太网传输；

(2) 无信号区：采用 LoRa（传输距离≥5km）或卫星通信方式，同时配置本地存储模块（容量≥16GB），支持数据断点续传功能；

(3) 远程运维功能：系统应具备远程配置（采样频率、传输参数等）、状态

查询（设备运行参数、电池电量等）及远程诊断功能。

### 5.2.6 供电方案

野外供电系统应以太阳能、风能或风光互补供电为主，供电设计应遵循《多年冻土区工程设计规范》（GB 50324）中的相关规定。

市电覆盖区：采用 AC220V 为主电源，配套设置交流控制器及免维护蓄电池（续航 $\geq 72$  小时），保障系统稳定供电。

野外无市电区：

1.太阳能板：宜选高效率的多晶硅或单晶硅太阳能板，安装于无遮挡、阳光充足区域，并根据当地纬度调整安装角度（当地纬度  $\pm 10^\circ$  范围内）。

2.蓄电池：宜选用低温型锂离子电池，若选用铅酸电池，宜采用胶体免维护型。蓄电池容量需满足系统 7 天连续运行能耗要求，应置于保温防护箱（底部架空 $\geq 30\text{cm}$ ），并配备低温充放电保护控制器。

3.风力电机：宜选用低风速启动、抗风能力强的小型风力电机。

4.风光互补系统：宜具有智能控制管理功能，保障核心监测项不间断运行。

供电保护要求：电源线路与信号线路间距应不小于 300mm，入口处需安装浪涌保护器（通流容量 $\geq 20\text{kA}$ ）；蓄电池设置深度放电保护（电压 $\leq 10.5\text{V}$ ）。

防雷系统设计：宜采用联合接地方式，接地电阻应 $\leq 1\Omega$ ，电源系统需安装电源防雷器（残压 $\leq 100\text{V}$ ），信号线路需安装信号防雷器，设备保护箱增设防雷接地端子。

条文说明

供电方案中低温型锂离子蓄电池  $-40^\circ\text{C}$  容量保持率要求，宜符合《高海拔多年冻土区交通基础设施新能源供电技术研究报告》（2024 年）的试验数据，该数据基于 3 种主流磷酸铁锂电池低温性能测试得出，采用石墨烯改性电极的产品可满足 60% 以上容量保持率，保障低温环境下供电稳定。

## 5.3 设备安装与保护

### 5.3.1 安装总则

系统安装应包括传感器安装、线缆布设、数据采集设备安装。安装需符合《自动化仪表工程施工及质量验收标准》（GB 50093）的相关要求及本规程“监测指标体系”章节中监测点布设要求进行。

### 5.3.2 设备安装布设与防护

#### 1. 气象及数据采集设备：

观测场内仪器的布置应按照 GB/T 35221 的要求进行，气象设备安装应严格按照《地面气象规范》GB/T35221 要求进行安装；

## 2. 地温监测:

1) 安装前准备: 采用专用设备对现场温度传感器进行全面检测, 将检测合格的温度传感器串入保护管内, 做好标识备用, 并完成管间及管头的封堵密封处理; 保护管可选用钢管或 PVC 管。

2) 钻孔施工: 安装宜采用钻孔法, 选用适配钻机, 采用低速干钻工艺钻进; 钻进深度应比设计深度深 200~300mm, 钻进过程中同步做好详细地质编录及取样工作。

3) 传感器安装与检测: 钻孔达到预定深度后, 将已穿好保护管的备用温度传感器串下放至设计深度, 标识并确认安装位置后, 对传感器串进行故障检测。故障检测可采用万用表或专用检测设备, 若传感器串故障率大于 5%, 应整体更换; 若故障率小于 5%, 宜根据故障点位评估其可用性。

4) 钻孔回填: 当检测位置及传感器性能均符合要求后, 采用原土(优先选用)、黏土或中粗砂等适宜材料回填钻孔, 回填过程中应适度分层压实。

5) 线缆处理: 地面外露线缆应采用挖沟埋设方式, 将线缆埋至地下后接入保护箱内的数据采集仪; 线缆埋设深度宜为 0.5~1.0m, 且应在沟槽沿线设置明显标识牌。

## 3. 水分监测:

### (1) 土壤含水量传感器

1) 埋设方法宜采用人工开挖或者钻孔法埋设, 埋设深度 < 3m 时宜采用人工开挖安装, 埋设深度 ≥ 3m 时宜采用钻孔法安装;

2) 安装时, 应将土壤水分传感器垂直或水平插入土壤中, 采用原土或黏土等材料回填钻孔;

3) 传感器线缆宜采用钢管或 PVC 保护管保护, 地表线缆引入保护箱后接入数据采集仪。

### (2) 含冰量传感器

1) 宜采用人工开挖法埋设探头;

2) 安装时, 应将含冰量传感器水平埋入土壤中, 开挖部位应采用原土或者黏土等材料回填;

3) 传感器线缆宜采用钢管或 PVC 管保护, 地表线缆引入保护箱后接入数据采集仪。

### (3) 地下水位

1) 监测点位宜沿冻土路基横断面布设, 宜选择路基中心、路肩、坡脚及坡脚外 10~20m 处布设。并应避免冻土区的冰椎、冻胀丘、融区等特殊不良地质地段, 宜选择地形相对平坦、土层均匀的区域, 且应远离路基施工扰动区。

2) 应采用干钻法, 钻孔深度应穿透冻土下限 1-2m, 孔内置入测压管, 且底部应位于稳定的饱水非冻土层中。测压管下部应加工孔径 5-8mm, 间距 10-15mm 的均匀分布滤水孔, 外部包裹孔径 0.1-0.2mm 的尼龙滤网。

4) 投入式水位计的安装, 应固定在测压管内滤水段中部深度, 传感器线缆沿测压管内壁布设, 管口处做好密封防水处理; 超声波水位计, 应安装在测压管顶部, 且垂直对准管内水面。

#### 4. 土壤盐度监测

土壤含盐量主要通过测定土壤电导率 (EC) 进行表征。传感器通过金属探针与土壤紧密接触, 实时输出土壤电导率及含盐量。

1) 监测点应布设在土壤质地、地形地貌、灌溉方式及盐分分布具有典型代表性的区域, 避开沟边、路边、局部积水点等非典型位置;

2) 宜采用人工开挖或者钻孔法埋设, 宜按土层深度分层布设。

3) 盐分传感器宜与土壤水分、温度传感器配套布设, 以便综合分析水盐运移关系;

#### 5. 沉降变形监测:

1) 宜采用钻孔法埋设, 钻孔直径  $\geq 110\text{mm}$ , 钻进深度比预定深度深 200-300mm;

2) 单点沉降位移传感器埋设时, 根据监测深度准备相应的延长杆, 将沉降盘固定在延长杆的一端, 将传感器和延长杆缓慢垂直放入孔中, 确保沉降盘置于预定深度;

3) 分层沉降计埋设时将多只单点沉降位移传感器按照设计要求串联, 缓慢垂直放入孔内至预定深度;

4) 传感器埋设完成后, 应用原土、黏土或者中粗砂等材料回填钻孔, 填筑时适度压紧, 避免传感器与土壤间留空隙; 回填完成后, 传感器成活率应大于 98%;

5) 传感器线缆宜采用钢管或 PVC 保护管保护, 线缆引入保护箱接入数据采集仪。

#### 6. 通风管应力应变监测:

1) 监测点布应采用管体内壁固定法, 宜对管体中间、两端断面处对管顶、管底、左右侧壁设置监测点。

2) 对管体监测点位进行打磨处理, 打磨方向与测量方向呈  $45^\circ$ , 无水乙醇清洗晾干。

3) 应变片宜涂专用胶粘贴, 轻压排气; 振弦式应变计应采用螺栓或环氧胶固定贴合紧密。

4) 传感器布设前应完成标定工作，传感器表面宜涂防水绝缘胶，外包防水胶带或热缩管；线缆宜穿 PVC 管引出，固定至采集箱。

5) 施工期间应对传感器及线缆设置围挡防护，避免碾压、掩埋损坏。

### 5.3.3 安装注意事项

1. 作业过程应避免对路基和冻土的扰动，线缆布设应遵循路径最短的原则，且应选用耐低温带屏蔽的线缆。数据采集设备应置于防护箱内，防护等级应达到 IP67 以上，箱体安装高度 $\geq 1.2\text{m}$ ，与其他电气设备保持安全距离 $\geq 0.5\text{m}$ 。

2. 设备防护箱安装，应采用钢结构或混凝土基础，确保稳固；保护箱底部离地高度 $\geq 300\text{mm}$ ；防水防尘等级不低于 IP67，且通过 48 小时盐雾试验验证；集成防雷接地端子，箱体接地电阻 $\leq 4\Omega$ ，具备防盗锁具及防冲击结构。

3. 各类传感器线缆均需采用钢管或 PVC 保护管全程防护，管体封堵严密、标识清晰，地表线缆优先采用挖沟埋设方式，避免裸露损坏；所有线缆接入防护箱前需做好密封处理，防止水分、灰尘进入防护箱损坏设备。

## 5.4 系统调试

5.4.1 硬件调试应按照现行《自动化仪表工程施工及质量验收标准》（GB 50093）的相关要求进行系统性能测试、参数设置、系统运行调试。数据传输指标应符合现行《公路工程信息化技术规范》（JTG/T 3370）对监测数据传输可靠性的要求。

5.4.2 软件调试应完成服务器软件环境本地部署，配置软件参数，达到系统设计应用要求。通过软件应能实时观测运行数据且可调取历史数据。

### 5.4.3 异常状态预警 / 报警设置

#### 1. 报警类型

报警类别	报警描述
设备故障报警	包括停机、数据停传、电池低压（ $\leq 11.5\text{V}$ ）、发电异常（太阳能板功率 $\leq$ 设计值的 30%）
数据异常报警	包括大规模异常数据（占比 $\geq 10\%$ ）、数据采集器内存空间不足（剩余容量 $\leq 10\%$ ）
运维预警	包括通信数据卡流量不足（剩余流量 $\leq 10\text{GB}$ ）、校准到期预警（提前 30 天）

#### 2. 报警响应

报警信息应包含报警类型、发生时间、位置及处理建议，支持短信、平台推

送等多渠道通知。

## 5.5 数据处理

### 5.5.1 信号与工程量换算

1. 前端传感器输出的模拟电压信号（如 0-5V、4-20mA），经 A/D 转换模块量化为数字量后，通过线性插值或多项式拟合算法，换算为温度、湿度、浓度等实际工程量；数字信号经字符分割与数据清洗后直接获取实际工程量。

2. 对于数字量，统一采用浮点数格式，保存小数点后 3 位。无效数据（如超量程、信号断路）需标记为“NAN”并纳入异常日志；

### 5.5.2 数据有效性校验

1. 实时自检：设备定时进行自我诊断，若检测到 ADC 转换值超出预设阈值，或数字信号分割校验位错误，数据应记为 NAN。

2. 漂移修正：针对温漂、时漂引起的换算误差，需调用厂家建议的漂移修正算法进行二阶补偿；确保实时显示值与标准器示值误差 $\leq$ 设备标称精度。

3. 断链处理：当通信中断导致数据连续丢失时，恢复传输后需按“空值”填充，不得通过虚构数据补全；断链时长超过阈值自动上报状态。

### 5.5.3 数据存储策略

1. 存储格式：宜采用“二进制”或“紧凑格式”存储原始采集数据，用于回溯分析；生成可视化报表时转换为字符型文本，确保可读性。

2. 存储周期：原始采样数据存储表格按照 30 天一个文件进行存储，采集器存储应满足 $\geq 1$ 年的存储要求，数据支持按时间戳进行秒级序列查询。

## 5.6 系统验收

### 5.6.1 验收流程

1. 前期准备：核查设计方案、校准报告等资料应完整，系统试运行应 $\geq 30$ 天；

2. 现场测试：开展系统性能验证、数据传输测试及环境适应性验证；

3. 数据审核：检查运行的 30 天数据，确认数据完整性；

4. 综合评定：出具验收报告，明确验收结论。

### 5.6.2 验收标准

验收内容包括硬件验收、软件验收、功能验收三部分：

1. 硬件验收：设备型号、规格参数应符合设计要求，安装质量应满足相关规范，产品资料应齐全。

2. 软件验收：软件功能应符合设计要求，软件稳定连续运行 72h 无崩溃、无卡顿，数据应符合数据格式要求。

3. 功能验收：应提交系统运行 30 天的数据，春夏季数据完整性 $\geq 95\%$ ，秋冬季数据完整性 $\geq 90\%$ 。

验收合格后应出具第三方验收报告，明确验收结论、存在问题及整改要求；验收报告应由用户单位、第三方机构、施工单位签字确认，作为系统移交的依据。

## 5.7 系统维护

5.7.1 维护周期：日常巡检周期 $\leq 90$  天，全面维护周期 $\leq 360$  天，恶劣环境下可缩短至 180 天。

5.7.2 校准技术要求：

### 1. 通用校准要求

校准周期：常规传感器校准宜 $< 24$  个月/次，恶劣环境下宜 $< 12$  个月/次；高海拔地下埋设场景可结合实际运行工况优化调整校准周期（不宜超过 36 个月/次）。

校准方法：采用标准器具或物质比对法，误差超出精度等级 1/3 时需返修或更换。

### 2. 专项校准

地温监测：应采用预留校核孔法，在监测孔旁 300-500mm 处预留校核孔，使用标准地温计（精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ）每 6 个月进行 1 次人工复检，比对误差 $\leq 0.5^\circ\text{C}$  为合格；结合地下埋设特殊性，可根据实际监测数据稳定性，适当调整复检频次（不得超过 12 个月/次）。

数据采集器校准：24 个月校准 1 次，验证时钟精度、通道采样精度及数据传输准确性。校准时连接标准信号源，对各通道输入标准信号，验证采集数据与标准信号的偏差；高海拔地下埋设场景可结合设备运行状态，在不影响数据准确性的前提下，灵活调整校准时间（不宜超过 36 个月/次）。

5.7.3 设备达到下列状态之一时，应进行更换：

- 1) 达到设计使用年限或累计运行时间超过制造商规定的寿命期；
- 2) 关键性能指标（如精度、漂移、响应时间）经校准或测试已超出允许范围且无法修复；
- 3) 出现物理损坏（如外壳破裂、接口断裂、密封失效导致进水/凝露）影响正常工作；
- 4) 经诊断存在永久性故障（如传感器无响应、数据输出锁定、通讯模块损坏）；
- 5) 监测环境或监测要素发生变化，原设备量程或参数不满足现行监测要求。

#### 5.7.4 设备更换应满足下列规定：

- 1) 采用同型号设备进行替换，使用前应进行校准。
- 2) 更换设备前备份数据、拷取设备参数；
- 3) 更换设备时间与设备采集时间错开、保证数据完整；
- 4) 当无法采用同型号设备时，应进行标定，确定不同型号设备间的换算关系。更换设备后采集数据与旧数据比对，误差±2%以内。

#### 5.7.5 路基施工后监测系统恢复

1) 路基修复施工期间，应采取有效措施保护原有监测点位、设备及附属设施，避免损坏或扰动。

2) 路基修复完成后，应按原有布设位置、技术要求及使用状态，恢复各类监测设备与设施；确需移位的，应保证监测断面及数据连续性。

3) 监测系统恢复后，应对仪器设备进行检查、调试与校准，确保工作状态正常、监测精度满足相关要求。

4) 应恢复原有监测基准、监测方法与监测频次，重新测定监测初始值，做好修复前后数据衔接。

5) 监测系统恢复完成后，应经检查合格方可投入运行，并形成完整的复位、调试及验收资料。

## 第 6 章 监测数据管理与应用

### 6.1 一般规定

6.1.1 本章接续第 5 章形成的监测物理量数据，对监测数据管理、数据质量分析、关键指标计算与工程应用提出要求。

6.1.2 监测数据管理与应用宜围绕气象、路基结构温度、水分、变形、含盐量等监测要素分别开展，并在此基础上进行综合分析。

6.1.3 监测数据管理与应用宜服务于路基状态识别、冻土核心指标计算、工程效能评价和监测方案优化。

6.1.4 本章的数据管理对象为第 5 章完成信号转换后的物理量数据，不包括原始电信号处理过程。

### 6.2 监测数据存储与管理

#### 6.2.1 监测数据接收与分类

1 监测数据记录应至少包含时间、空间位置（里程、断面、深度或高程）、监测量名称及单位、设备标识和数据质量标识等基本字段。

2 监测数据宜按监测线路或独立监测单元进行分区管理，并建立统一编码规则。

3 监测数据宜按原始物理量数据、处理结果数据、分析成果数据及报告图件等层级分类存放。

4 对图像、视频、报告等非结构化数据，可与结构化数据建立关联管理。

#### 6.2.2 存储、备份与交换

1 监测数据的存储、备份与交换应满足后续查询、复核、比对和工程应用需要，不再对具体数据库或存储架构作限定。

2 监测数据应定期备份，核心数据应保证可追溯。

3 对外数据交换应采用统一编码和接口格式，并保留必要的时间戳、位置和质量标识信息。

4 无信号或弱信号区域宜具备本地缓存和断点续传能力。

#### 6.2.3 历史数据与成果管理

1 历史数据、分析成果及数据处理记录应分类归档，并满足后续调用需求。

2 涉及数据修正、插值、平滑等处理时，应记录处理方法、处理范围和处理时间，实现全过程可追溯。

3 监测数据管理成果宜形成标准化报表、图件或专题分析成果，并与工程档案协调归档。

## 6.3 监测数据质量控制与交叉验证

### 6.3.1 数据预处理与异常识别

1 监测单位应制定数据预处理流程，对缺失数据、重复数据、时间格式和单位进行统一处理。

2 监测系统宜识别离群点、突变点和长期漂移等异常，并区分设备异常与工程响应异常。

3 对因设备故障、通信中断等形成的异常数据，应单独标识，不得直接用于工程状态判断。

4 数据预处理过程及参数设置应可追溯。

### 6.3.2 多源交叉验证与人工比测

1 针对关键路基监测断面温度、含冰量、变形等监测量，宜通过不同原理的传感器进行交叉验证。

2 对自动化监测结果，宜结合人工巡查和人工比测进行抽查验证，抽查频次应与路基重要性和监测等级相匹配。

3 当不同监测手段或不同测点间存在持续性系统偏差时，宜分析原因并对相关设备进行重新标定或更换。

4 交叉验证结果和人工比测记录应纳入数据管理系统，用于持续评估监测系统的精度和稳定性。

### 6.3.3 质量评估与追溯管理

1 监测系统运行单位应定期对数据质量进行评估，主要指标包括数据完整率、有效率、异常率、时效性等。

2 对涉及数据修正、插值、平滑等处理，应在系统中记录处理时间、处理人员、处理方法和处理范围，实现全过程可追溯。

3 对于质量评估不合格的监测点或设备，应制定整改措施，包括设备检修、更换或布点调整，并形成记录。

4 数据质量评估结果应作为监测系统运维考核的重要依据。

## 6.4 监测要素分析、关键指标计算应用

### 6.4.1 单要素分析

1 气象数据分析宜重点识别气温、降水、辐射、风速风向等外部边界条件的季节性与极值特征，为结构温度、水分与变形分析提供边界条件。

2 路基结构温度数据分析宜重点识别冻融起止时间、冻土上限位置、温度场分布及其年际平均地温变化。

3 水分数据分析宜重点识别含水量、含冰量、地下水位等变化过程及其空间

迁移特征；对不能长期在线监测的含盐量等指标，可结合定期取样检测结果进行补充分析。

4 变形数据分析宜重点识别累计变形、变形速率和差异变形特征，并与结构温度和水分变化过程进行对比分析。

5 针对特殊结构路基的结构空腔微风数据分析宜重点用于评价块石层、通风管等主动冷却结构的通风换热效能。

#### 6.4.2 冻土核心指标计算

1 应利用路基结构温度、水分及变形等监测数据，计算多年冻土上限、年平均地温、冻融界面、路基融沉变形等核心指标；具体计算方法见条文说明。

2 冻结、融化及过渡状态的判别可综合考虑温度、含盐量和含冰量等因素，避免仅以单一温度阈值进行判断。

3 关键指标计算可按测点、剖面、区段等不同空间尺度开展，并结合日、月、年等时间尺度进行趋势分析。

#### 6.4.3 综合分析与应用

1 在单要素分析和核心指标计算基础上，可开展结构温度、水分、变形等多要素关联分析，识别路基状态演化规律和主要控制因素。

2 综合分析结果可用于评价一般填土路基及特殊结构路基的服役状态、冷却结构工作效能、过渡段差异变形特征及典型病害发展趋势。

3 除直接状态评估外，还可利用长期监测结果开展趋势外推、参数校核、方案比选和监测布设优化等分析，为设计、养护和运维提供依据。

#### 条文说明

多年冻土上限可结合最大融深期 $0^{\circ}\text{C}$ 等温线深度或活动层厚度综合确定；冻融界面可结合结构温度随时间的变化过程进行判定；对含盐量等难以连续在线监测的指标，可采用室内试验或现场定期检测成果作为补充。

### 6.5 监测数据深度挖掘

数据深度挖掘宜在长期连续监测数据基础上，结合数理统计、时间序列分析和人工智能等方法开展，用于挖掘监测指标的异常特征、演化规律和变化趋势。

#### 6.5.1 异常识别与模式提取

宜利用温度、水分、变形等监测数据开展异常区段识别、变形模式识别和早期风险征兆判别。

#### 6.5.3 关键指标趋势预测

宜围绕多年冻土上限、年平均地温、冻融界面及路基融沉变形等关键指标开展演化趋势分析和状态预测。

#### 6.5.4 特殊结构效能评价

宜针对块石路基、通风管路基等特殊结构，结合结构温度及相关监测数据开展冷却效能评价。

#### 6.5.4 多源数据融合与决策辅助

宜强化监测数据与气象、水文、地质、养护及交通运行等多源数据融合，开展风险分区、监测优化和养护决策辅助分析。

#### 条文说明

人工智能方法的选用应结合数据规模、数据质量、监测对象特征和工程需求确定，分析结果宜与常规统计分析和工程经验相互校核。

征求意见稿

## 附录 A 常用自动化监测方法及传感器技术性能指标

序号	仪器名称	性能参数
1	风速传感器	量程：0~60 米/秒；启动风速：0.2 米/秒；精度：±1 %； 温度范围：-40℃~+85℃
2	风向传感器	风向范围 0~360°（机械与电子风向）；启动风速： 0.6mph；精准性：优于或等于±2°；温度范围：-50℃~ +65℃
3	降雨量传感器	降雨强度：0~4mm/min；分辨率：0.1mm；精准度：± 4%
4	空气温湿传感器	温度测量范围：-40℃~+75℃；温度精度：，±0.1℃ @ +20℃~+50℃时；湿度测量范围：0~100%RH；湿度 精度：1.5%
5	大气压力传感器	测量量程：50~1100hPa；测量精度：±0.20 hPa；工作 温度范围：-40℃~+60℃；工作湿度范围：0~100%
6	四分量辐射传感器	输出的信号数量：4 个信号（入射和反射的短波，向下 和向上的长波）；ISO 等级：二级辐射表（ISO/WMO）； 波长范围：4500~42000nm（长波）；305~2800nm（短 波）；工作环境：温度-40℃~80℃，相对湿度 0~100%； 防护等级：IP67
7	地表红外温度传感器	温度测量范围：-55℃~80℃；校准不确定性：0.2℃（-30~ 65℃）；响应时间：≤0.5s；视野：≤12°；工作环境： -55℃~80℃，0~100%RH；防护等级：IP68。

8	土壤热通量板传感器	量程：-2000~2000W/m <sup>2</sup> ；灵敏度：50μV/W*m <sup>2</sup> ；工作环境温度：-30℃~70℃；温度依存度：<0.1%/℃；防护等级：IP67
9	含冰量传感器	双针热脉冲法（DHP）；非盐渍土体积含冰量感知精度：2%；测量过程平均温度扰动：<0.2℃有效感知区间；工作温度：-40℃至50℃
10	土壤多参数传感器	传感器输出参数：土壤温度摄氏度、土壤温度华氏度、土壤含水量、土壤电导率、介电常数实部、介电常数实部（温度补偿）、介电常数虚部、介电常数虚部（温度补偿）、温度校正后的土壤电导率。 介电常数：测量范围：1~80；精度：±0.5； 水分测量性能测量范围：完全干状态到饱和；测量精度：±0.03 水分体积含量； 温度测量范围：-30℃~55℃；测量精度：±0.3℃； 电导率测量范围：0~1.5S/m；精度：±0.03 S/m
11	时域反射土壤三参数传感器	测量类型：土壤电导率、体积含水量、土壤温度。 工作温度：-50° to +70° C 输出：SDI-12；RS-232 电导率：测量范围：0 to 8 dS/m 精度：±(5% 读数+ 0.05 dS/m) 体积含水量：范围：0 到 100% 精度：±1% @ EC<3ds / m； 土壤温度：范围：-50~+70℃,分辨率：0.001° C 精度：±0.1℃@0 至 40℃； ±0.5℃(全温范围)
12	温度链传感器	传感器类型：热敏电阻；测量温度范围：-50℃~50℃； 测量误差：≤±0.05℃；防水性能及其它：在恒定温度条件下，压力≥1MPa 浸水 24h,浸水前后，电阻值变化率不超过 5%；
13	土壤水势	水势测量范围：0~7pF (0 hPa~10,000,000 hPa)；水势分辨率：0.01 pF；水势精度：0.15 pF；

14	水位传感器	测量范围 0-50 米可选,精度±0.2%FS,分辨率 0.01%FS,工作温度范围 0-60℃。
15	土壤热导率传感器	测量范围 (λ) : 0.3~5 W/(m*K); 可选测量变量: 热扩散率和容积热容; 工作温度范围: -30℃~+80℃;
16	雨滴谱仪	降水类型: 可测 8 类降水(毛毛雨、细雨/雨、雨、雨夹雪、雪、雪粒、冻雨和冰雹); 输出: WMO 4680/4677 (SYNOP) 4678 (METAR) 和 NWS 代码表; 测量粒径范围: 液态 0.2~8mm, 固态 0.2~25mm; 颗粒分类: 32 种大小和 32 种速度类别; 波长: 650nm, 激光等级为 1 级; 温度范围: -40℃~70℃; 0~100%RH; 防护级别: IP65, 耐盐雾。
17	雪深传感器	测量距离范围: 0.5~10m; 精度: ±1.0 cm; 分辨率: 0.25mm; 测量范围: 30°; 工作温度: -40℃~50℃
18	应变传感器	测量范围: ±5000 μ ε; 动态响应频率: 2000Hz; 额定输出: 2mV/V(1500 μ ε); 准确度: < 1% FS; 非线性: < 1% FS; 工作温度: -50℃~+85℃
19	位移传感器	工作量程: 900mm; 线性±0.04%; 分辨率 0.01mm; 标准阻值: 10k Ω; 阻值公差: 20±%; 工作温度: -30℃~100℃
20	雨雪量计	测量原理: 称重式原位测量; 容量: 600mm; 收集口面积: 200cm <sup>2</sup> 灵敏度: 0.05mm; 精度: 0.1%FS; 可重复性: 0.1mm

21	风吹雪通量传感器	输出：雪粒子通量，撞击高度，对应高度平均风速；风速通量比例:0-70m/s；分辨率：10mv/0.28m/s；粒子通量比例:0-250g/m <sup>2</sup> /s；分辨率：10mv/0.28m/s
22	沙通量传感器	输出：动量；粒子通量，撞击高度，对应高度平均风速；信号类型：模拟电压型号（范围可调），SDI-12 信号，RS232/485 信号，脉冲信号；供电：6~30VDC；典型功耗：≤2.1mA，待机<1mA；工作温度范围：-40℃~80℃
23	自动集沙仪	测量精度：0.02%(FS)；量程：≥165g；响应时间：<1s；工作温度：-10℃~40℃
24	单点沉降位移传感器	量程：400mm；分辨率：0.2%F.S；测量精度：0.01mm；工作温度：-40℃~+85℃。
25	振弦式单点沉降计	量程：50mm / 100mm / 200mm / 300mm（可选） 分辨力：≤0.01mm、综合精度：≤±0.1%FS 输出信号：频率信号（500~5000Hz）、 温度范围：工作 -30℃~+80℃ 耐压性能：≥1.0MPa、防护等级：IP68，可长期埋设于土体、零点漂移：≤0.1% FS / 年
26	磁致伸缩分层沉降仪	测量深度：0~5m / 0~10m / 0~20m / 0~30m 分辨力：≤0.001mm、线性误差：≤0.01%FS 响应时间：<1ms、工作电压：12VDC / 24VDC 温度范围：-30℃~+85℃、防护等级：IP68
27	光纤光栅（FBG）沉降计	量程：50mm / 100mm / 200mm、分辨力：≤0.01mm 精度：≤±0.1%FS、中心波长：1525nm~1565nm 波长漂移：1με≈1pm、温度范围：-30℃~+80℃ 耐压：≥1.0MPa、防护等级：IP68

## 附录 B 常用数据采集设备性能指标

序号	数采名称	功能描述	主要参数
1	sd60	小型智能采集器	SDI-12 接口数量：12 个，可监测采集器内部温湿度；内存：16MB；内部集成太阳能充电控制器；内置 10Ah 可充电锂电池；内置 4G 数据通讯模块，运行环境：温度：-40~+60℃，湿度：0~100%RH
2	CR1000XE	多功能集成化采集器	最大扫描频率：优于等于 1000Hz；A/D 转换位:24 位；模拟量测量精度：±(0.04% 量程 + 偏移)@ 0℃~+40℃；模拟电压通道数量：不少于 16 个单端或 8 个差分接口，脉冲通道数量：10 个；电压激发端口：4 个；数字信号 I/O: 8 个；工作温度：-40℃~70℃
3	TR128	温度链采集器	温度测点数量：最多可接入 128 个测温通道；所接传感器匹配类型：Pt1000、NTC/PTC 热敏电阻；电阻值范围：50 Ω ~ 10000 Ω；电阻测量精度：优于 0.05%；数据端口：1 个 USB 接口、1 个 4G 无线网络接口；操作温度：-40℃~60℃
4	RM10/20	通道扩展板	可扩展通道数量：20 个差分电压模拟通道，供电要求：9.6~16Vdc（带负载），非调制；继电器最大激发时间：20ms；功耗：<5mA（静止状态），一般 26mA（激活状态）；最大开关电流：500mA。工作环境：-40℃~+70℃
5	MYJK-109	数据采集仪	通道数：24、64、128 和 256CH；输入信号：电阻、电压、电流或数字信号；采样速率：>2 次/秒；采集精度：0.01%；工作模式：定时采集、远程召唤、在线采集；定时采集：支持 24 小时整点自动开机，时钟误差≤20 秒/月；数据显示方式：电脑显示或宽温液晶显示；数据处理方式：自动对测量数据进行换算，直接输出待监测的物理量，并进行统计分析，剔除坏点；数据存储：自动存储、USB 或者 SD 卡存储；组网方式：Zigbee 现场组网或者通过 TCP/IP、GPRS/CDMA、北斗卫星等

			协议无线网络组成大型监测系统；取数方式：现场取数、GPRS/CDMA 或者北斗卫星无线数据远传网络取数；工作温度：-40℃~+80℃；工作电压：11V~15V DC；供电方式：蓄电池供电、风力供电或太阳能供电。
--	--	--	---

征求意见稿

### 附录 C 传感器安装保护示意图

提供传感器安装的标准示意图，指导现场施工。

### 附录 D 数据报表格式

提供日报、周报、月报的标准格式模板。

征求意见稿

## 本规程用词用语说明

1 本规程执行严格程度的用词，采用下列写法：

1)表示很严格，非这样做不可的用词，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用词，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用词，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用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

1)在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定”。

2)在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》(×××)的有关规定”。

3)当引用本标准中的其他规定时，表述为“应符合本规程第×章的有关规定”、“应符合本规程第×.×节的有关规定”、“应符合本规程第×.×.×条的有关规定”或“应按本规程第×.×.×条的有关规定执行”。

## 条文说明

对规程中的关键条文进行解释，提供编制背景和依据，帮助理解和应用，具体如下：

5.4.1 硬件调试中数据传输指标，应符合《公路工程信息化技术规范》（JTG/T 3370-2021）对监测数据传输可靠性的要求，同时区分核心与非核心监测项的延迟标准，兼顾数据完整性与系统灵活性，满足不同监测参数的实际需求。（如果属于规定，应放入条文。如果属于对条文的解释说明，注意不能出现“应、宜、可”等程度用语）