

PERINNOV

桂林恒创智能科技有限公司

隧道结构健康监测

实施方案

目录

1 隧道结构健康监测必要性	3	5 设备功能及指标	8
		5.1 监测主机	8
		5.2 光纤光栅应变计	9
		5.3 光纤光栅温度计	10
		5.4 光纤光栅土压力计	11
		5.5 光纤光栅渗压计	12
		5.6 光纤光栅式表面裂缝计	13
		5.7 静力水准仪	14
		5.8 温湿度计	15
		5.9 三向加速度计	16
2 FBG 结构健康监测原理	4		
2.1 光纤布拉格光栅的基本原理	4		
2.2 结构健康监测中的应用原理	4		
3 监测方案的设计依据和原则	5	6 监测系统	17
3.1 设计依据	5	6.1 系统架构	17
3.2 设计原则	5	6.2 系统功能	17
		6.3 系统集成	17
4 隧道结构监测	6		
4.1 隧道风险分析	6		
4.2 监测内容	6		

1 隧道结构健康监测必要性

保障交通安全：预防结构失效引发事故：隧道长期受地质条件变化（如地层移动、水位波动）、交通荷载、自然环境侵蚀（如风化、腐蚀）等影响，可能出现结构变形、裂缝扩展、渗漏水等问题。若不及时处理，会使结构承载能力下降，引发坍塌等严重事故。如山岭隧道可能因围岩松动、变形而塌方，影响行车安全。通过健康监测能实时掌握结构状态，及时预警危险，避免事故发生。

减少交通事故隐患：结构损伤会影响隧道内路面平整度、照明及通风等设施正常运行，增加交通事故风险。监测可及时发现并修复相关问题，保障行车环境安全。

降低经济损失：减少维修成本：定期监测能及时发现隧道细微损伤，在问题恶化前采取维护措施，避免小问题发展成大故障，降低大规模维修和更换成本。如及时处理小裂缝可防止裂缝扩大导致衬砌加固或更换。

避免交通中断损失：突发结构病害可能导致隧道封闭维修，中断交通，给运输业和社会经济带来巨大损失。健康监测可提前预警，合理安排维修计划，减少交通中断时间，降低经济损失。例如城市地铁隧道若因结构问题突然停运，会严重影响市民出行和城市运转。

保障公共安全：隧道是交通网络关键节点，连接区域多、人流量车流量大，一旦发生事故易造成大量人员伤亡和财产损失，引发社会恐慌。健康监测为隧道安全运营提供保障，维护社会稳定。

2 FBG 结构健康监测原理

FBG（光纤布拉格光栅）结构健康监测主要基于光纤布拉格光栅的光学特性原理来实现。

2.1 光纤布拉格光栅的基本原理

反射原理：光纤布拉格光栅是一种在光纤纤芯内形成的周期性折射率调制的结构。当宽带光入射到光纤布拉格光栅时，根据布拉格定律，只有满足特定波长（布拉格波长， λ_B ）的光会被反射回来，布拉格定律表达式为 $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ 。其中， n_{eff} 是光纤纤芯的有效折射率， Λ 是光栅周期。

2.2 结构健康监测中的应用原理

- (1) 应变监测：在实际结构（如桥梁、建筑物等）中，将 FBG 传感器粘贴或嵌入到结构材料内部。当结构受到外力作用（如车辆荷载对桥梁的作用、风力对建筑物的作用等）时，结构会产生应变。FBG 传感器会随着结构一起变形，从而使布拉格波长发生改变。通过监测反射光波长的变化，就可以反推出结构所承受的应变大小。
- (2) 温度监测：由于 FBG 对温度敏感，同样可以用于监测结构的温度变化。在一些对温度有严格要求的结构（如大型化工设备、冷藏库等）中，FBG 温度传感器可以精确地测量结构不同位置的温度。并且可以通过温度补偿技术，区分应变和温度对 FBG 波长变化的贡献，从而更准确地获取结构的应变信息。
- (3) 损伤检测：当结构内部出现损伤（如裂缝的产生和扩展）时，损伤区域附近的应变场会发生突变。FBG 传感器能够感知这种应变变化，通过观察 FBG 传感器反射波长的异常变化模式，可以判断结构是否出现损伤以及损伤的大致位置。

3 监测方案的设计依据和原则

3.1 设计依据

在设计隧道施工期自动化监测方案时，必须遵循一系列基本原则和依据，以确保监测数据的准确性、可靠性和全面性。方案的设计应严格遵循国家和行业的相关规范和标准。国内隧道监测的主要规范包括《公路隧道施工技术规范》(JTG F60-2009)、《铁路隧道施工技术规范》(TB 10108-2002)、《公路隧道养护技术规范》(JTG H12-2015)、《城市轨道交通隧道工程施工质量验收规范》(GB 50299-2018)、《公路桥梁结构监测技术规范》(JT/T 1037-2022)。这些规范为隧道施工期监测提供了详细的技术要求和指导，确保监测工作科学、规范地进行。

3.2 设计原则

监测方案的设计应遵循以下原则：

- (1) 全面性原则：监测内容应涵盖隧道施工的各个方面，包括结构监测、气体检测、安防监测和渗水监测等，确保无遗漏。
- (2) 实时性原则：监测系统应具备实时数据采集和传输能力，能够及时发现和预警潜在风险。
- (3) 自动化原则：尽可能采用自动化监测设备和技术，减少人为干预，提高监测效率和精度。
- (4) 可靠性原则：监测设备和系统应具备高可靠性和稳定性，确保在恶劣施工环境下仍能正常工作。
- (5) 经济性原则：在满足监测要求的前提下，尽可能选择性价比高的设备和方案，降低监测成本。
- (6) 可扩展性原则：监测系统应具备良好的可扩展性，能够根据工程需要灵活调整和升级。

4 隧道结构监测

结构监测是隧道施工期监测的重要组成部分，主要目的是实时掌握隧道结构的变形、应力、应变等参数，确保隧道结构的安全性和稳定性。结构监测的主要内容包括隧道围岩变形、支护结构应力、衬砌变形和裂缝监测等。

4.1 隧道风险分析

- (1) U 型槽隧道主体及围护结构受到土压力、水压力等共同作用，随着隧道运营条件的变化，主体和围护结构受力状态发生改变。软弱土层对地震动有一定的放大效应。采用明挖法、盖挖法等施工的隧道结构，应考虑地震荷载作用。
- (2) 隧道主体结构长期受到温度荷载作用，同时在地表水和地下水干湿交替作用下，混凝土结构的承载力和耐久性逐步下降，导致隧道主体结构承载力不足或变形过大，影响隧道结构的使用性能，引发安全风险。
- (3) 地下水的长期渗流作用，使得防水系统出现漏洞，尤其在雨季，地下水流量与压力增大，易从伸缩缝、注浆孔等薄弱点渗入。渗漏易造成支护背后脱空，改变支护力学性能，造成结构开裂，同时地下水呈弱腐蚀性，会造成混凝土劣化，钢筋锈蚀等。
- (4) 隧道作为交通主干线且内部相对密闭，高峰期事故拥堵不可避免地带来有害气体及环境噪声的污染，特别是在隧道中部。隧道内长期高温、高湿环境易对内部构件造成侵蚀，极大地缩短了隧道及相关构件的运营寿命。

4.2 监测内容

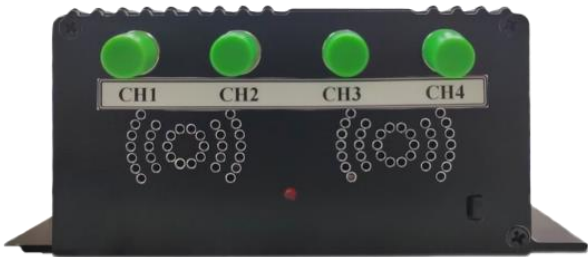
潜在风险		监测项目	备注
隧道周围荷载	土压力变化	围护结构土压力监测	土压力的变化导致隧道内力重分布
	孔隙水压力变化	孔隙水压力监测	孔隙水压力的变化导致隧道内力重分布
	地震灾害	地震监测	地震作用可能导致隧道出现裂缝、渗漏水，结构破坏

隧道环向受力	结构受力、材料性能退化引起结构性破坏	主体结构应力/温度监测	结构受环境、地表水和地下水等影响，混凝土和钢筋性能退化，造成结构承载能力降低
隧道纵向变形	纵向不均匀沉降，导致结构开裂	不均匀沉降监测	隧道底部地质差异、地下水压力变化等引起地基承载力变化
	伸缩缝工作性能是隧道较为薄弱环节	伸缩缝张合变形监测	车辆荷载、不均匀沉降等导致伸缩缝处工作性能退化
隧道内部环境	有害气体浓度超标及噪声污染	隧道内空气质量监测	机动车尾气排放，隧道通风不良，噪声
	隧道内异常温度、湿度变化	温湿度监测	高温、高湿度易对隧道内构件造成侵蚀

5 设备功能及指标

5.1 监测主机

结构健康监测主机采用先进的可调谐光源，与传统光源相比，不仅精度更高，稳定性也更出色。此外，监测主机具备多通道并发监测，显著提升系统可靠性。



光通道数量	4 通道 / 8 通道 / 16 通道 / 32 通道 / 64 通道，可选
内置可调谐光源波长范围	1527nm ~ 1568nm
内置可调谐光源输出功率	≥ +10dBm (可选 +13dBm)
解调波长分辨率	0.1 pm
解调速度（跟随模式）	≥ 20Hz (单个传感器)
解调速度（固定模式）	≥ 2Hz
电源	DC 3.3V / 4A 电源模块（特殊型号可选+7~36V 电源输入）
通讯接口	RS232
工作温度	-5 ~ +45 °C
外形尺寸	175 x 148 x 63mm (宽高厚)

5.2 光纤光栅应变计

传感器埋设在隧道顶板、侧墙及底板（主体结构）中。对隧道受力状况进行监测，可直接判断测试位置应力是否处于安全水平、校验构件的疲劳应力，实时把握隧道结构局部受力状态。



量程	$\pm 1500\mu\epsilon$
分辨率	$\pm 1\mu\epsilon$
精度	0.2%F.S
重复性误差	$\leq 0.5\%$
中心波长	1528-1568 nm
反射率	$\geq 90\%$
标距尺寸	$\Phi 16*165\text{mm}$
应用对象	钢结构、混凝土表面
安装方式	焊接或螺栓拧接
连接方式	FC/APC
工作温度范围	-30℃至+85℃
用途	钢结构和混凝土结构表面应变测试

5.3 光纤光栅温度计

传感器埋设在隧道顶板、侧墙及底板（主体结构）中。结构温度的分布状况将直接影响到结构的变形和内力状态，结构温度场中的温差效应的实际分布为重要结构参数。对结构温度分布情况的监测可以用于分析结构温度场对结构静力响应的影响，并作为应变计的温度补偿。



量程	-40℃-120℃
分辨率	0.1℃
精度	0.3℃
重复性误差	≤0.5%
中心波长	1528-1568 nm
反射率	≥90%
标距尺寸	Φ8*70mm
应用对象	结构表面、内部，温补
安装方式	粘贴或捆绑
连接方式	FC/APC
工作温度范围	-40℃-120℃
用途	结构内部，外部及环境温度的测试、温补器

5.4 光纤光栅土压力计

传感器埋设在隧道顶板外侧及围护结构外侧。通过监测围护结构土压力的变化趋势，分析隧道外两侧及上部土体的压力变化状况。



中心波长	1460~1610 nm
量程	2000 Kpa
分辨率	<0.1% F.S Kpa
精度	<0.5% F.S Kpa
温度补偿	内置
封装材料	不锈钢
外形尺寸	Φ156 mmx20 mm
安装方式	埋入
光缆类型	Φ3mm/Φ6mm 铠装光缆，单端出纤 1 米，或定制
连接头	FC/APC,或定制
工作温度	-20℃~+80℃

5.5 光纤光栅渗压计

传感器埋设在隧道围护结构外侧，钻井埋设。隧道孔隙水压力随着时间、空间的分布不同，导致隧道结构受力重分布，整个 U 型槽隧道区域地下水位的变化，将直接引起隧址区周围土体的沉降变化，进一步影响隧道主体结构。



中心波长	1460~1610nm
量程	0.1~70MPa
分辨率	0.05% F.S MPa
精度	0.5% F.S. MPa
温度补偿	内置
封装材料	不锈钢或铬镍铁合金
外形尺寸	Φ26mm x137mm
安装方式	螺栓安装/直接嵌入
光缆类型	Φ3mm 铠装，单端双纤 1 米，或定制
连接头	FC/APC，或定制
工作温度	-20℃~+80℃、-40℃~+200℃

5.6 光纤光栅式表面裂缝计

传感器固定在隧道伸缩缝两侧，实时监测隧道伸缩缝纵向变形量。对隧道伸缩缝变形进行监测，伸缩缝张合量过大，导致伸缩缝开裂，会引发渗水等灾害。



中心波长	1460~1610nm
量程	10~150mm
分辨率	0.05% F.S. mm
精度	0.5% F.S. mm
温度补偿	内置
封装材料	不锈钢
外形尺寸	Φ22 mmx234mm
安装方式	机械固定
光缆类型	Φ3mm 铠装，单端出纤 1 米，或定制
连接头	FC/APC，或定制
工作温度	-20℃~+80℃

5.7 静力水准仪

传感器固定在隧道伸缩缝两侧防撞墙上，实时监测隧道伸缩缝两侧相对沉降量。软弱土层中的隧道，在交通荷载、底层扰动、区域地陷等因素作用下，易引发竖向的不均匀沉降，不均匀沉降导致结构开裂。



中心波长	1460~1610nm
量程	200mm
分辨率	0.1mm
精度	1
温度补偿	内置
封装材料	不锈钢
外形尺寸	Φ76 mm x128 mm
安装方式	机械固定
光缆类型	Φ3mm/Φ6mm 铠装，单端出纤 1 米，或定制
连接头	FC/APC，或定制
工作温度	-20℃ ~+80℃

5.8 温湿度计

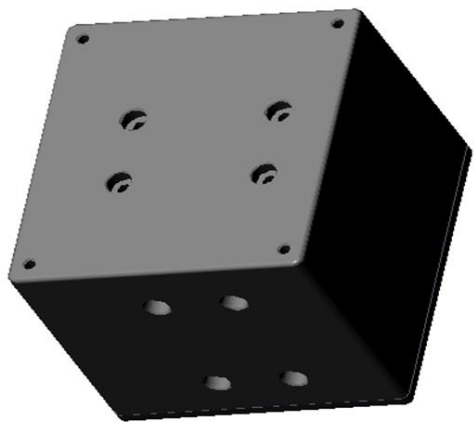
传感器固定在隧道侧墙上，实时监测隧道内环境温湿度。温度特别对隧道结构中的混凝土结构的变形和应力状态影响较大，由温度作用产生的隧道主体结构的应力和变形直接影响到混凝土结构的安全性、耐久性和实用性。潮湿环境将使主体结构的钢筋、隧道内仪器设备等发生腐蚀作用，需进行隧道内温湿度监测。



中心波长	1460~1610 nm
湿度范围	5~95%RH
湿度分辨率	0.25%RH
湿度测量精度	4%RH
温度分辨率	0.1℃
温度测量精度	+/-0.5℃
温度范围	-40℃~100℃
连接头	可制作
尺寸	Φ16 mm *72 mm
尾纤	3mm 铠装光缆

5.9 三向加速度计

传感器固定在隧道侧墙上，实时监测隧道主体结构三向振动加速度。



中心波长	1460 ~ 1610 nm
量程	低频: $\pm 1\text{ ms}^2$, 高频: $\pm 5\text{ ms}^2$
精度	0.5% F.S. ms^2
频率范围	低频: 0.5 ~ 40 Hz, 高频: 5 ~ 1000 Hz
封装材料	金属封装
外形尺寸	$\Phi 70 \times 65 \times 60\text{mm}$
安装方式	螺栓固定
光缆类型	$\Phi 3\text{mm}$ 铠装光缆，单端出纤 1 米（双纤），或定制
连接头	FC/APC, 或定制
工作温度	$-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$

6 监测系统

6.1 系统架构

隧道健康监测系统采用分层架构，主要包括数据采集层、数据传输层、数据处理层和应用层。

- (1) 数据采集层：由各类传感器和监测设备组成，负责实时采集隧道内的各种监测数据。
- (2) 数据传输层：通过有线或无线网络，将采集到的数据传输到数据处理层。
- (3) 数据处理层：对传输来的数据进行存储、分析和处理，生成监测报告和预警信息。
- (4) 应用层：为用户提供监测数据的可视化界面，支持实时监控、历史数据查询、预警管理等功能。

6.2 系统功能

- (1) 数据采集与传输：实时采集各类监测数据，并通过网络传输到数据处理中心。
- (2) 数据存储与管理：对采集到的数据进行存储和管理，支持大数据分析和历史数据查询。
- (3) 数据分析与预警：对监测数据进行分析，生成监测报告和预警信息，及时通知相关人员。
- (4) 可视化展示：通过图形化界面，实时展示监测数据，支持多维度数据分析和展示。
- (5) 系统管理与维护：支持系统的配置、管理和维护，确保系统的稳定运行。

6.3 系统集成

- (1) 硬件集成：将各类传感器和监测设备集成到统一的硬件平台，确保设备的兼容性和稳定性。
- (2) 软件集成：开发统一的软件平台，集成各子系统的监测数据，实现数据的集中管理和分析。
- (3) 网络集成：通过有线或无线网络，将各子系统的数据传输到数据处理中心，确保数据的实时性和可靠性。
- (4) 接口集成：提供标准化的数据接口，支持与其他系统的数据交换和共享。
- (5) 通过以上自动化监测系统的集成方案，可以实现隧道施工期监测的全面、实时、高效，提高监测数据的准确性和可靠性，确保隧道施工的安全性和稳定性。

持之以恒 · 创造智慧未来

PERiNOV

桂林恒创智能科技有限公司