



T/CECS G XXXX: 20XX

中国工程建设标准化协会标准

高速公路路堤塌毁光栅 阵列传感监测及预警技术规程

Technical Specification for Monitoring and Early Warning of
Highway Embankment Collapse Using Fiber Optic Bragg
Grating Array

中国工程建设标准化协会 发布

(空白)

征求意见稿

中国工程建设标准化协会标准

高速公路路堤塌毁 光栅阵列传感监测及预警技术规程

Technical Specification for Monitoring and Early Warning of Highway
Embankment Collapse Using Fiber Optic Bragg Grating Array

T/CECS G:

主编单位：武汉理工大学

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：20XX年XX月XX日

人民交通出版社股份有限公司

20XX 北京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发（2025 年第一批协会标准制订（修订）计划）的通知》（建标协函〔2025〕31 号）的要求，编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准共分 9 章，主要内容包括：总则、规范性引用文件、术语和定义、基本规定、系统设计、施工与安装、监测数据处理与预警、系统调试与验收、运行维护。

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。

本标准由中国工程建设标准化协会公路分会归口管理，由武汉理工大学负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给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），或武汉理工大学（地址：湖北省武汉市珞狮路 122 号德生楼，邮编：430070，传真：027-87651851，邮箱：wenbin_hu@whut.edu.cn）。

主 编 单 位：武汉理工大学

参 编 单 位：湖北交投科技发展有限公司

武汉烽理光电技术有限公司

湖北省智慧交通研究院有限公司

主 编：李 盛

主要参编人员：张再武 江 山 郭 凯 徐一旻 罗如意 宋 珂

陆 由 于晓贺 南秋明 胡文彬 李 凯 何光辉

胡 军 董志勇 马俊杰 蒋锦朋 王俊涛 涂群资

胡文字

主 审：姜友生

参与审查人员：

参 加 人 员：

目 次

1 总则	1
2 术语	2
3 基本规定	4
4 系统设计	5
4.1 一般规定	5
4.2 传感器选型与布设	5
4.3 解调仪选型与配置	8
4.4 数据传输与组网编码设计	9
4.5 软件系统平台	10
5 施工与安装	11
5.1 传感光缆敷设	11
5.2 解调仪安装	12
6 监测数据处理与预警	13
6.1 监测数据存储与传输	13
6.2 监测指标与算法	14
6.3 预警分级与阈值设定	16
6.4 定位与反馈处置	17
7 系统调试与验收	19
7.1 一般规定	19
7.2 系统调试	19
7.3 性能测试	20
7.4 工程验收	21
8 运行维护	23
附录 A 光栅阵列传感系统原理简介	24
A.1 原理简介	24
A.2 光纤制式	24
A.3 光缆制式	25
附录 B 监测系统验收记录表	26
B.1 光缆验收记录表	26
B.2 设备和机柜验收记录表	26
B.3 软件验收记录表	27
B.4 系统验收记录表	27
附录 C 数据保存和处理流程	28

C.1 一般规定	28
C.2 数据基本处理	28
附录 D 典型异常信号特征案例图示	30
D.1 监测链接中断异常	30
D.2 监测链接未中断明显异常	30

征求意见稿

1 总则

1.0.1 为规范光栅阵列传感技术在高速公路路基塌毁监测及预警中的应用，做到技术先进、安全可靠、经济合理、便于实施，制定本文件。

1.0.2 本文件适用于高速公路路基塌毁的光栅阵列传感实时监测及预警。

1.0.3 高速公路路基塌毁的光栅阵列传感监测及预警技术应用，除应符合本文件规定外，尚应符合国家现行有关标准及中国工程建设标准化协会现行相关标准的规定。

征求意见稿

2 术语

2.0.1 光栅阵列 fiber optic Bragg grating array

串联有多个光纤光栅传感器，兼具公里级长度的感知和传输功能的光纤传感元件。

2.0.2 光栅阵列振动传感光缆 vibration sensing cable of fiber optic Bragg grating array

以光栅阵列振动传感光纤为核心传感元件，结合特殊保护层和结构封装设计，具备感知并传输外部振动及声波变化信息的铠装光缆。

2.0.3 光栅阵列振动解调仪 vibration interrogator of fiber optic Bragg grating vibration sensing array

将光栅阵列振动传感光缆所感知的外部振动、声波变化的模拟光信号，转换为可识别、可量化的数字电信号，并通过标准接口以标准协议对外输出的解调设备。

2.0.4 光栅阵列数据处理单元 fiber optic Bragg grating array data processing unit

软硬件一体化的专用数据处理设备，应与光栅振动解调仪配套使用，对光栅阵列传感数据进行数字滤波、数据增强和特征提取等预处理操作。

2.0.5 监测链路 monitoring link

由光栅阵列振动解调仪各个通道中配置的光缆链路构成，宜包括通信传输光缆、光栅阵列振动传感光缆及接续点。

2.0.6 路基塌毁 subgrade collapse

公路路基在其自身重力、行车荷载、自然因素作用或地基承载力不足等情况下，导致结构失稳、发生局部或整体坍塌、滑移或破坏的现象。

2.0.7 路基脱空 subgrade void

路基由于水土流失、材料劣化或荷载作用等原因，在面层与基层之间、基层内部或基层与路床之间形成的具有一定规模且未与外界直接连接通的空隙或分离现象。

2.0.8 耦合状态 coupling status

传感光缆与嵌入道路填筑材料之间的握裹连接状态，可分为固结良好、固结松动和完全脱离等不同状态。

2.0.9 沿道路能量分布特征 energy distribution characteristics along the road

在交通荷载持续激励下，通过对路段光栅阵列振动响应信号进行时域、频域及统计分析，提取的能够表征道路结构沿里程方向振动能量分布的特征曲线。

征求意见稿

3 基本规定

3.0.1 系统构成：监测及预警系统应由光栅阵列振动传感光缆、光栅阵列振动解调仪、数据传输、数据处理与监测预警软件平台及辅助设施组成。

3.0.2 功能要求：系统应具备实时监测、数据解析、特征提取、状态判断、分级预警、定位显示、信息反馈及系统自诊断等功能。

3.0.3 性能要求：系统应满足监测精度、定位精度、采样频率、传输距离、稳定性、耐久性和抗干扰性等要求。

3.0.4 安全要求：系统设备应具备防雷、防水、防尘及电磁兼容能力，保证在标准监控机房或野外环境下长期稳定运行。

3.0.5 本文件可适用于中国中温带、暖温带、亚热带、热带地区内，高原、平原、山区及高边坡等地理与地貌环境下的高速公路工程。其他气候地域及等级公路可参照使用。

4 系统设计

4.1 一般规定

4.1.1 系统方案应基于道路运行状态与路基结构组成进行专项设计，宜与道路既有机电系统统筹协调。

4.1.2 系统方案设计应包括以下内容：

- 1 传感选型与布设设计；
- 2 解调仪选型与配置；
- 3 数据传输与组网编码；
- 4 软件系统功能与架构。

4.1.3 布设方案应结合现场实际情况进行设计，并符合下列原则：

- 1 传感光缆应沿道路通长布置，实现对监测路段的连续、全覆盖监测；
- 2 传感光缆布设方案应结合道路运行特征及既有设施条件，设计光缆铺设、接续及设备安装方式。

条文说明

本条规定了布设方案设计原则。传感光缆的布设应以有效监测路堤下边坡为目标。设计阶段应对山区分离式路基、错台式路基及半填半挖路段逐段进行横断面分析，逐幅判定下边坡所对应的车道（应急车道或行车道），并据此确定各幅传感光缆的布设车道。设计文件应以横断面图形式逐幅标注传感光缆所处车道位置。

4.1.4 系统设计应满足解调仪等设备的电力供应与网络通信需求，并应保障系统 24 小时不间断稳定运行。

4.2 传感器选型与布设

4.2.1 应选用光栅阵列振动传感光缆。

4.2.2 所选用光栅阵列振动传感光缆可分为常规型与耐高温型。

4.2.3 道路基层内布设时应选用常规型光缆，道路沥青层内布设时应选用耐高温型光缆。

条文说明

本条依据道路各结构层的服役环境差异，明确了光缆的差异化选型原则。道路基层无需考虑高温摊铺影响，选用常规型光缆可满足长期监测使用需求。而沥青层在施工中存在高温摊铺影响，常规型光缆易出现护套老化、光学损耗增大甚至损坏，因此沥青层选择采用耐高温型光缆，以适配高温工况，保障传感性能稳定与设备使用寿命。

4.2.4 常规型光栅阵列振动传感光缆和耐高温型光栅阵列振动传感光缆技术指标应分别不低于附录 A.3.1 和 A.3.2 技术指标。

4.2.5 传感光缆应在高速公路中主线道路范围进行布设，监测范围内涉及的桥梁和隧道宜选用通信光缆过渡连接传感光缆。

条文说明

本文件针对高速公路路基塌毁监测，桥梁、隧道路基监测内容不属于本文件范畴。因此，传感光缆优先布设于主线路基段落，跨越桥隧区域时，采用通信光缆过渡衔接前后传感光缆，保证全线传感链路贯通，实现路基段连续完整监测。

4.2.6 道路上下行方向应分别布设光栅阵列振动传感光缆，且每幅不应少于一条。传感光缆布设应遵循“下边坡优先、逐幅判定”原则，按以下规定执行：

1 布设原则：

- 1) 每幅车道的传感光缆应布设于该幅紧邻路堤下边坡一侧的车道；
- 2) 设计阶段应按单幅逐区间判定下边坡所在车道；
- 3) 常规断面与特殊断面在同幅路段内并存时（一幅为常规、另一幅为特殊），应逐区间在设计文件中标注。

2 新建道路：

- 1) 常规断面：当单幅车道的下边坡位于应急车道侧时，应将该幅传感光缆埋设于应急车道中心线，埋设层位宜位于中基层顶部，如图 1a 和 c 所示；
- 2) 特殊断面：当单幅车道的下边坡位于行车道侧时，应将该幅传感光缆埋设于该行车道中心线，埋设层位宜位于中基层顶部，如图 1b 和 c 所示；

3) 单幅差异化处理：当同幅内部分为常规断面、部分为特殊断面时，应分别按本列第1)项和第2)项执行。

3 既有道路：

1) 常规断面：当单幅车道的下边坡位于应急车道侧时，应将该幅传感光缆埋设于应急车道道路标线外侧，埋设深度应低于设计铣刨底面，如图 2a 和 c 所示；

2) 特殊断面：当单幅车道的下边坡位于行车道侧时，应将该幅传感光缆沿紧邻下边坡的行车道标线外侧，埋设深度应低于设计铣刨底面，如图 2b 和 c 所示；

3) 单幅差异化处理：当同幅内部分为常规断面、部分为特殊断面时，应分别按本列第1)项和第2)项执行。

4 改扩建道路应根据施工方式分段执行：

1) 分离新建侧：按本条第2列（新建道路）执行，逐幅逐区间判定常规/特殊断面，并分别处理；

2) 原老路不动侧：按本条第3列（既有道路）执行，逐幅逐区间判定常规/特殊断面，并分别处理；

3) 两侧拼宽侧（双侧拼宽新建路面）：按本条第2列（新建道路）执行，逐幅逐区间判定常规/特殊断面，并分别处理。

条文说明

本条规定的“下边坡优先、逐幅判定”布设原则，是针对山区高速公路复杂地形条件的针对性设计。

在平原微丘区，路基通常采用整体式断面，每幅的应急车道均位于道路最外侧即下边坡侧，光缆布设于应急车道即可有效监测下边坡。但在山区，受地形限制大量采用分离式路基、错台式路基及半填半挖断面。在此类断面中，单幅车道横断面常呈“半路堑半路堤”形式：靠山侧为路堑（上边坡），靠河/谷侧为路堤（下边坡），且由于上下行线路在不同高度错台布置，某幅的应急车道可能位于靠山侧（上边坡侧），而行车道反而位于靠河/谷侧（下边坡侧）。

因本文件监测对象为路堤下边坡，光缆须布设在紧邻下边坡侧的车道，可更为有效捕捉下边坡变形引起的路基响应信号。若某幅的应急车道位于上边坡时仍将光缆布设于应急车道，光缆距下边坡较远，将无法有效感知下边坡变形。因此，本文件要求“下边坡侧在哪个车道，光缆就布设于哪个车道”，且逐幅独立判定、逐区间标注。

新建道路与既有道路在特殊断面的布设位置要求存在差异：新建道路可在行车道内灵活选择横向位置；既有道路则受限于已成型路面，仅能在应急车道标线外侧切槽敷设，以减少对行车道承载结构的破坏。

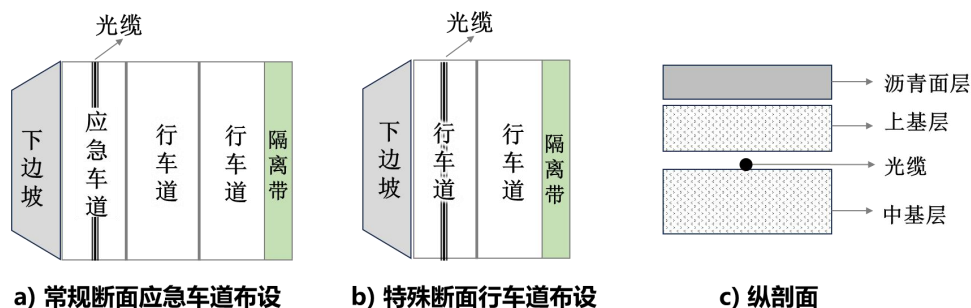


图 1 新建道路布设方案

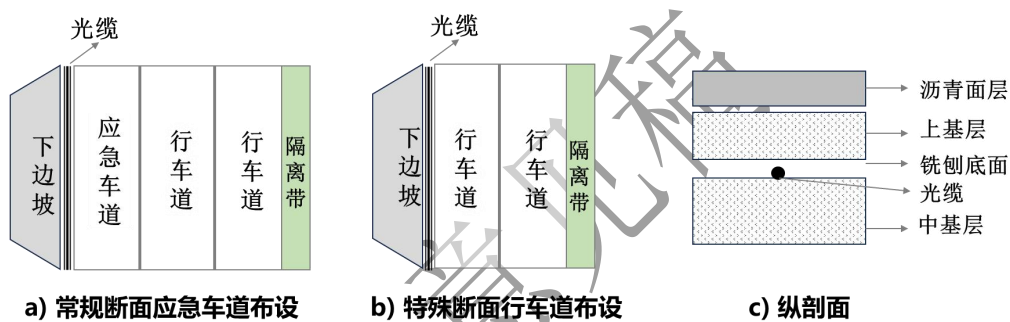


图 2 既有道路布设方案

4.3 解调仪选型与配置

4.3.1 光栅阵列振动解调仪设备通道数量应不少于 2 个，并宜预留备用通道。

4.3.2 每个通道所配接的监测链路应具备不低于 4000 个传感光栅信号的解析能力。

4.3.3 设备解调频率应不低于 1kHz。

4.3.4 设备对监测链路空间分辨率解析能力应不低于 3 m。

4.3.5 设备应符合 JT/T 817-2025 中的相关规定。

4.4 数据传输与组网编码设计

4.4.1 由光栅阵列振动传感光缆构成的监测网络应符合公路附属设施网络安全等级保护的相关要求。

4.4.2 多段传感光缆间应通过熔接或适用通信光缆接续的方式串联，形成一条连续的干线光缆。干线光缆可通过常规通信光缆或尾端传感光缆接入解调设备，如图 3 所示。具体连接方式应确保链路损耗满足 8.3.1 的要求。

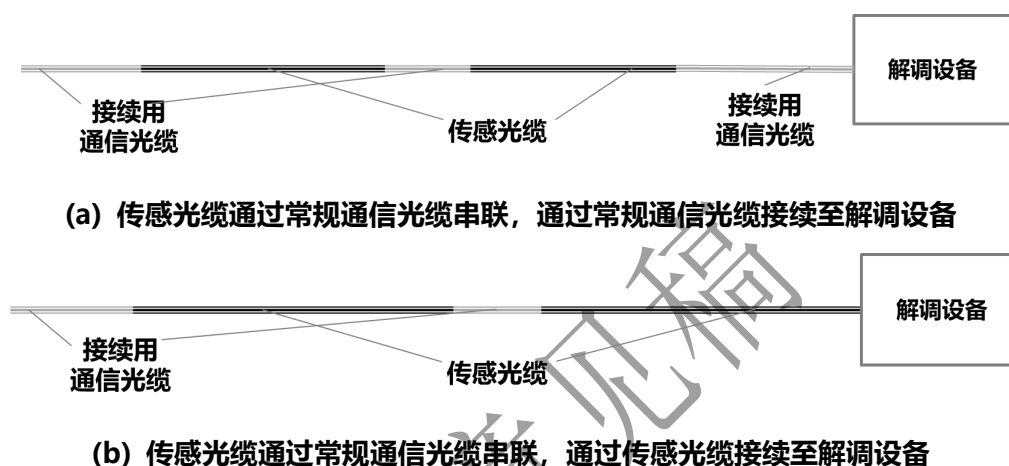


图 3 传感光缆与通信光缆串联及与解调设备连接方式

4.4.3 在无网络覆盖路段，应在采集信号解调器附近布设大容量数据存储设备，用于监测数据的本地存储。数据存储容量宜按不少于 30 天的监测数据量进行配置。

4.4.4 当道路沿线部署的解调仪数量超过 10 台时，应增设路侧汇聚接入设备，以实现监测数据的暂存、转发及预处理等功能。

4.4.5 传感光缆的有效测区编号应与道路里程桩号进行对应，并确保编码库中测区编码的准确性、唯一性及规则的一致性。

4.4.6 测区编码规则可参照[1]的相关规定进行制定，并考虑以下内容：

- 1 编码字段构成；
- 2 编码与道路里程桩号的对应关系；
- 3 编码的更新和校核机制；

条文说明

编码包含传感光缆所处的具体车道属性信息（如：应急车道/行车道），对于布设于行车道（快车道）的特殊段落，应在编码中予以区分，并在编码库备注字段中显著标注，便于养护巡查时快速识别和定位。

4.5 软件系统平台

4.5.1 软件系统平台应按照 GB/T 22239-2019、GB/T 25070-2019 的相关规定构建系统信息安全保护体系。

4.5.2 平台应采用模块化设计，各个功能模块之间应相对独立，便于升级维护以及扩容。

4.5.3 平台分为数据采集、数据处理与管理、人机交互界面模块。

4.5.4 数据采集模块应满足实时采集光栅阵列振动解调仪数据功能，断电重启、恢复数据采集和自恢复功能。

4.5.5 数据处理与管理模块应符合以下规定：

- 1 具备接收并解析原始数据，数据预处理和特征值提取功能；
- 2 具备数据自动备份能力，对系统关键数据实现定时备份功能；
- 3 采用分布式存储、时序数据库等技术，并保证数据存取效率和稳定性；
- 4 具备对后处理数据或图像在指定路段、时间段进行回放功能；
- 5 具备各类报表导出功能，导出格式应适合常用办公系统，且易于调用。

4.5.6 人机交互界面模块满足下列要求：

- 1 应满足开放性与人性化原则，确保交互友好、操作流畅；
- 2 宜采用浏览器/服务器架构，满足多用户并发访问；
- 3 宜采用图表、曲线实时展示数据，具备高频数据的展示能力；
- 4 可提供 APP、小程序等适合移动端访问的数据展示能力。

5 施工与安装

5.1 传感光缆敷设

5.1.1 新建道路和既有道路传感光缆施工包含测线定位和光缆敷设。

5.1.2 新建道路行车道内布设应结合路面施工组织同步实施；既有道路行车道标线外切槽敷设应封闭该车道，并设置符合 GB 5768.4-2025 要求的临时交通安全设施后方可实施。严禁在未封闭交通的情况下进行既有道路行车道内的光缆切槽作业。

5.1.3 测线定位可采用尺规进行测线打点定位，测线横向定位偏差应小于 $\pm 10\text{ cm}$ 。

5.1.4 光缆敷设应确保与埋设道路结构具有良好的耦合状态，满足以下规定：

1 新建道路：应在道路中基层施工完毕、上基层摊铺前，沿测线将传感光缆使用专用卡箍固定于中基层顶面。卡箍的设置应以确保光缆在后续摊铺及碾压过程中不发生横向或纵向位移为原则，具体固定间距应根据单次摊铺长度、碾压设备参数等施工工况综合确定，并应在施工方案中予以明确。

2 既有道路：应沿测线切槽敷设，切槽宽度宜为 5 cm ，深度应以传感光缆敷设就位后其顶部距路表不小于 3 cm 为控制标准。应采用与原路面性能相同或更优的细粒式材料回填压实，以确保回填材料与原路面结构形成整体，保证光缆与路面结构的耦合状态。

3 改扩建道路：根据施工方式应按下列规定分区段执行：

- 1) 分离新建侧：应按本条第 1 款（新建道路）执行；
- 2) 原老路不动侧：应按本条第 2 款（既有道路）执行；
- 3) 两侧拼宽侧（双侧拼宽新建路面）：应按本条第 1 款（新建道路）执行。

条文说明

传感光缆敷设原则需保证与埋设道路结构具有良好的耦合状态，且能够监测到交通车流所致振动响应。敷设前进行测线测量是为了方便光缆的横平竖直。为避免在面层摊铺前及摊铺过程中的光缆出现移位需要通过卡箍固定光缆。对于既有道路行车道标线处切槽敷设的工况，回填材料采用与原路面性能相同或更优的材料，保证回填区

与原路面协同受力，确保光缆与路面结构长期耦合良好，避免因材料差异导致反射裂缝或光缆松动。

5.1.5 敷设固定后的传感光缆在填埋或道路继续摊铺过程中，应做好引出端光缆的保护措施，并及时进行信号质量检测，防止传感光缆受损。

条文说明

本条说明了传感光缆引出端的要求。既有道路行车道标线处切槽敷设的传感光缆，在回填完成、开放交通前，应进行一次完整的信号质量检测，确认光缆链路通畅、耦合状态良好后方可开放交通。检测记录应纳入施工档案。

5.2 解调仪安装

5.2.1 光栅阵列振动解调仪安装应符合下列规定：

- 1 现场具备监控机房条件时，就近设置于收费站内；
- 2 现场不具备监控机房条件时，采用现场立杆或共杆安装，并确保设备安全及环境适应性。
- 3 解调仪安装位置选择考虑监测信号覆盖范围，传感器末端与解调仪之间的传输距离不超过 20 km。

6 监测数据处理与预警

6.1 监测数据存储与传输

6.1.1 存储数据库包括原始监测数据库和长期备份数据库。原始数据体量庞大，宜 30 天循环覆盖，长期备份数据库应永久保存。

6.1.2 原始监测数据宜包括：

- 1 每测点的时序振动数据；
- 2 多测点时序数据拼接而成的时瀑图，处理方法见 6.2.4；
- 3 时序数据的时域和频域典型特征，以及沿道路能量分布特征，处理方法参见 6.2.2 和 6.2.5；
- 4 时间坐标对齐数据；
- 5 宏观交通流；
- 6 严重堵车、大型事故、极端天气等特殊事件的关联项目数据。

6.1.3 长期备份数据库宜包括：

- 1 沿道路能量分布特征数据：应保存经后处理的沿道路能量分布特征数据，每月专项存储，并长期保存系统运行初期建立的基准能量分布及每次更新的能量分布变化值；
- 2 系统信息数据：应存储传感器、数据采集和传输设备、数据处理与管理设备及软件的相关信息，包括设备安装位置、技术参数、品牌规格、安装时间及维修保养记录等；
- 3 统计分析数据：应存储经数理统计及各类数据分析处理后的分析结果，包括趋势分析、相关性分析及异常统计等；
- 4 安全评价与预警数据：应存储预警阈值、安全评价方法、评价结论及预警历史记录等，并宜与道路巡检养护管理系统实现数据共享与业务协同。

6.1.4 数据备份可选择本地存储和云存储方式。

6.1.5 监测系统数据库设计遵循以下原则：

- 1 数据表结构清晰，字段命名应具有唯一性和可追溯性；

- 2 数据库应具有海量时序数据的存储和检索能力；
- 3 数据存储结构应具备扩展性，传输考虑安全性、可靠性，满足未来新增数据类型的接入；
- 4 数据采集宜采用串模干扰抑制、共模干扰抑制以及接地技术和屏蔽技术等抗干扰措施提高信噪比；
- 5 数据库宜支持多源数据的整合与关联。

6.1.6 数据整合和关联项目可包括以下内容：

- 1 道路结构基础数据：包括道路材料特性、厚度、强度等设计参数；
- 2 实时环境监测数据：包括温度、湿度、降雨量、风速、气象预警事件等；
- 3 视觉监测实时数据：道路原有视觉摄像系统数据；
- 4 门架监测数据：ETC 车辆信息数据。

6.1.7 数据采样率应根据监测变量类型、监测要求以及系统数据采集、传输、处理和管理能力确定，并符合下列规定：

- 1 光栅阵列振动信号采集频率应不低于 1 kHz；
- 2 视觉监测实时数据和气象预警事件数据应采用触发采样。

6.1.8 数据传输软件符合下列规定：

- 1 应具备对数据进行压缩包处理和解包复原功能，宜以包为单位进行传输；
- 2 接入的气象、视频数据采集模数转换分辨率应满足传感器分辨率和监测要求，不宜低于 16 位；
- 3 宜基于 TCP/IP 协议进行数据交换和传输；
- 4 接入的气象、视频数字信号可选用基于 RS485、CAN 、Modbus、TCP 或 UDP 的分布式数据采集设备，并根据设计方案确定传输距离、传输带宽和速率。

6.2 监测指标与算法

6.2.1 应优先实时监测链路的完整性，并设定整条传感链路的光学长度与损耗阈值。当链路出现不可恢复的断点时，系统应反馈疑似光缆断缆初步判定，结合断点前的信号特征判断是否触发一级报警。

条文说明

本条涉及光缆断缆判断。光缆链路中断是与道路垮塌紧密相关的信号特征之一。然而，仅仅根据光缆链接的中断，若不结合断缆前的数据特征无法判断，可能无法判断道路垮塌。系统应调取断点发生之前一段时间内的传感信号特征开展综合研判，依据数据异常严重程度确定是否升级为一级告警，提高告警判定合理性。

6.2.2 应采用通用的信号处理算法对振动信号的时域和频域特征进行分析，监测指标应包括监测覆盖测区的能量、幅值、频率及频域幅值等。当某区域信号持续出现与背景噪声、车辆振动模式不符的异常高波动，且显著超出正常历史统计特征时，应判定为异常。

条文说明

系统进行异常判别时，应采用同车道的历史数据进行沿程对比。行车道与应急车道的车辆荷载、通行速度、振动能量存在显著差异，其基准沿道路能量分布特征值应分别独立统计与更新，优先使用相同车道沿程基准阈值进行异常判定。

6.2.3 应采用模式匹配、机器学习等智能分析算法，对全域振动信号特征进行分析和识别。所选用的智能分析算法中关键特征参数的设定应具有统计依据，并应根据现场验证结果进行动态优化与调整。

6.2.4 应对原始数据进行以下处理后，得到基本处理数据：

- 1 每测点波形图绘制；
- 2 波形和强度时瀑图绘制（附录 C.2）。

6.2.5 异常处理和识别宜采用以下方式：

- 1) 时序持续扰动异常（附录 D.2.1）；
- 2) 绕行异常（附录 D.2.2）；
- 3) 沿道路能量分布异常（附录 D.2.3）。

6.2.6 本文件给出的沿道路能量分布异常分析、识别与处置方法仅为典型示例，实际应用可采用其他等效可行技术手段。

6.3 预警分级与阈值设定

6.3.1 路堤塌毁灾害告警等级、病害类型、判定条件及响应时限应符合表 7.3.1 的规定。

表 6.3.1 路堤塌毁灾害告警判定原则和方法

告警等级	病害类型	判定条件	响应时限	初查结果	告警确认	处置要求	示例索引
一级	路堤垮塌	路径一：监测链路发生中断，且排除设备故障	2 小时内人工排查	异常确认	自动触发	声光报警或视频联动检查	D.1
一级	路堤垮塌	路径二：监测链路未中断，但时瀑图呈现光缆悬空（时序持续扰动）或车辆绕行异常，排除设备故障和路面普通路障	2 小时内人工排查	异常确认	自动触发	声光报警或视频联动检查	D.2.1、D.2.2
二级	路基内部异常	监测链路未中断，但下边坡对应车道沿道路能量分布异常，排除设备故障和路面普通路障	24~48 小时内人工排查	异常确认	推送至养护终端	现场人工排查	D.2.3

6.3.2 告警触发条件应符合下列规定：

- 1 一级告警（路堤垮塌）：符合下列条件之一时，应判定为路堤垮塌，触发一级告警：
 - 1) 链路中断型：当监测链路发生中断，且排除设备故障（附录 D.1）；
 - 2) 链路未中断型：光缆未发生断缆，但监测数据呈现光缆悬空（附录 D.2.1）或车辆绕行（附录 D.2.2），排除设备故障和路面普通路障。
- 2 二级告警（路基内部异常）：当光缆未发生断缆，但下边坡监测数据呈现沿道路能量分布异常（附录 D.2.3），排除设备故障和路面普通路障后，可判定路基存在深层沉降或内部脱空等结构性异常，触发二级告警。

6.3.3 路基内部沉降隐患隐蔽性较强，仅依靠现场目视检查容易出现漏判。初查结果判定为正常时，应标记为“疑似”状态，按二级告警处置时限执行，并增加仪器探测复核。

6.3.4 本文件所列二级告警识别算法异常判别逻辑仅作为通用参考依据，可根据行业技术迭代、现场环境工况及实际监测需求动态优化调整。

6.4 定位与反馈处置

6.4.1 系统应能对各级报警和预警事件进行精准定位，定位精度满足不小于 $\pm 3\text{ m}$ 。

6.4.2 软件平台应以电子地图方式显示定位位置，并标注里程桩号。

6.4.3 预警处置可按初查结果执行两类操作：

- 1 初查结果为正常：执行取消预警操作，路基内部类异常除外；
- 2 初查结果为异常：确认告警，按对应等级执行处置。

6.4.4 确认告警后的处置应符合下列规定：

1 一级告警（路堤垮塌）应能立即自动触发声光报警信号。当报警点存在联动视频系统时，需联动视频系统进行现场确认；当无联动视频系统时，值班人员应根据确认结果，利用可变情报板、路侧广播等手段，发布交通阻拦指令。声光报警的触发规则应与相关管理平台的技术规定保持一致。

2 二级告警（路基内部异常）应推送至养护管理人员终端或手机端，提示进行现场人工排查；

3 联动视频系统应在报警触发后 5 秒内自动弹出对应桩号视频画面，并保留不少于 30 秒的报警前后录像。

6.4.5 系统应能定期生成并输出路基状态统计报告，包括但不限于：

- 1 路段风险统计排序；
- 2 报警事件时间、位置、级别、处置情况记录；

- 3 系统误报率、漏报率；
- 4 平均响应时间；
- 5 设备在线率。

征求意见稿

7 系统调试与验收

7.1 一般规定

7.1.1 系统集成与调试应在统一软件工作平台上开展，并兼顾后期设备更换或增减的便利性。

7.1.2 系统集成应采用网络通信技术，传输方式应优先选用有线光纤通信。系统网络拓扑结构应作为工程设计的组成部分。

7.1.3 系统验收应包括硬件部分验收和软件部分验收。硬件与软件均验收合格，方可进行系统整体验收。

7.2 系统调试

7.2.1 传感光缆、解调仪、交换机、数据处理单元、边缘服务器等设备的连接应符合工程设计文件。

7.2.2 现场调试人员应熟悉紧急事件处理程序，调试过程中如出现异常或发生直接危及人身及设备安全等紧急情况，应立即中止调试。

7.2.3 系统调试阶段，应完成下列校准与核查工作：

- 1 系统识别出的每一条链路长度、光栅数量与工程设计文件的相对偏差不应超过 $\pm 10\%$ 。当偏差超过 $\pm 10\%$ 时，应及时联系设计、施工及设备供应商等相关单位，共同排查并解决问题；
- 2 应使用便携式振动源或敲击法，对沿线关键里程桩号（宜不少于每公里 3 个测点）处的光栅测点进行定位校准，确保软件平台显示的测点位置与实际里程桩号的绝对偏差不超过第 6.4.1 条规定的 $\pm 3\text{ m}$ 。

7.2.4 系统调试完成后应及时编制调试报告，报告中应至少包括但不限于以下内容：

- 1 调试时间、地点及参与人员；
- 2 调试设备的名称、IP 地址、链路起止桩号、对应 ODF 架编号、链路长度及光栅数量；
- 3 调试过程链路原始光栅信号截图；
- 4 调试结论。

7.3 性能测试

7.3.1 光栅阵列振动传感光缆组网完成后，应使用 OTDR 检测仪对光纤链路进行损耗测试，技术指标应满足以下要求：

- 1 传输光纤在 1550 nm 波段下的衰减系数不大于 0.4 dB/km，在 1310 nm 波段下不大于 0.5 dB/km；
- 2 链路中各熔接点的损耗小于 0.3 dB/个；
- 3 光纤连接器的损耗小于 0.5 dB/个；
- 4 整条链路的总体损耗小于 9 dB。

7.3.2 系统调试完成后，应采用标准振动源进行定位精度测试。

7.3.3 报警性能测试应使用活动法兰连接器或其他方式模拟光缆中断及结构异常事件，测试应符合下列规定：

- 1 报警性能测试的持续时间不应少于 72 小时，或模拟报警事件次数不应少于 100 次；
- 2 报警正确率不应低于 95%；
- 3 报警延时时间从模拟事件发生至系统发出报警信号的时间间隔不应超过 5 秒；
- 4 报警定位精度应满足 7.4.1 条的规定。

7.3.4 系统联动功能测试参考下列规定：

- 1 报警触发后，系统可按设计要求自动联动相关设备，包括但不限于声光报警装置、视频监控系统、可变情报板及路侧广播等；
- 2 联动测试应与报警性能测试同步进行，逐项验证各项联动动作的准确性与时效性；
- 3 联动动作的响应时间、执行结果应自动记录于系统日志，并纳入测试报告。

7.3.5 系统测试完成后应及时编写测试报告，测试报告内容应包括但不限于以下内容：

- 1 测试时间、地点及参与人员；
- 2 测试设备名称、IP 地址、链路起止桩号、对应光纤配线架编号、链路长度、光栅数量及链路损耗值；
- 4 光栅测区定位校准记录，包括校准位置、实际里程桩号、系统显示位置及偏差值；
- 5 链路原始光栅信号截图；
- 6 报警测试统计：报警事件总数、正确报警次数、报警正确率、平均延迟时间及定位精度；
- 7 系统联动测试记录，包括联动设备名称、动作响应时间及执行结果；
- 8 测试结论。

7.4 工程验收

7.4.1 工程验收包括的光缆验收、设备和机柜验收、软件验收和系统验收，验收时应填写并提供《光缆验收记录表》、《设备和机柜验收记录表》、《软件验收记录表》和《系统验收记录表》。

7.4.2 光缆验收应包括以下项（见附录 B.1）：

- 1 外观检查；
- 2 系统链路的通断状态；
- 3 光缆长度，与设计值相对偏差不应超过 $\pm 10\%$ ；
- 4 光栅数量，与设计值相对偏差不应超过 $\pm 10\%$ ；
- 5 中心波长，与设计值相对偏差不应超过 $\pm 10\%$ 。

7.4.3 设备和机柜验收应包括以下项（见附录 B.2）：

- 1 解调仪表、服务器等设备在机柜内安装规范，线缆排列整齐、标识明晰，2 接地与防水措施可靠；
- 3 机箱、杆件及基础应安装牢固、结构稳定，防腐防锈处理符合要求；
- 4 所有设备须通电测试，其功能与性能指标合格，各类指示灯及显示屏状态正常。

7.4.4 软件验收规范应包括以下项（见附录 B.3）：

- 1 对软件进行功能性验证，确保数据采集与存储、数据调取、事件识别、报警及可视化等核心功能完整，运行稳定；
- 2 通过压力测试，检验多用户并发访问能力，并完成与上级平台的数据对接联调，确保通信协议畅通；
- 3 检查报警发生后的处置措施是否完备。

7.4.5 系统联调与试运行验收应包括以下项（见附录 B.4）：

- 1 系统联调：硬件与软件分别验收合格后，进行系统联调；
- 2 系统试运行：系统联调合格后，进行不少于 30 天的试运行，并进行模拟事件触发测试（如人工激振），验证系统从感知、传输、分析到预警全流程的准确性和时效性。

7.4.6 验收结论与报告应符合以下要求：

- 1 验收工作组应依据验收条目逐项审查，并出具验收意见；
- 2 验收结论可分为“通过”、“原则通过（需对少量非关键问题进行整改）”及“不通过”三种；
- 3 验收通过后，应编制正式竣工报告，并由验收工作组成员共同签署。

8 运行维护

8.0.1 对安装于道路上的检测设备和光缆汇集点应进行定期巡检。常规巡检应每月不少于 1 次，雨季和灾害天气应加密巡检频次。

条文说明

对于布设于行车道的传感光缆段落，应纳入重点巡查管理区段。巡检时应重点检查路面是否有车辙、拥包、裂缝等可能影响光缆及耦合状态的表观病害，发现上述病害时应及时进行信号质量检测，评估光缆功能状态。

8.0.2 运维部门应负责机房的定期巡检、维护，并形成相关记录，主要内容应包括但不限于：

- 1 设备运行指示灯是否异常熄灭；
- 2 设备故障指示灯是否异常点亮；
- 3 设备运行的环境温度、湿度是否存在异常，是否存在异味等。

8.0.3 运维部门应负责系统的定期模拟报警测试并进行记录，测试方法见 8.3.3。

8.0.4 当测试结果不满足要求时，应及时联系技术人员校准设备。

附录 A 光栅阵列传感系统原理简介

A.1 原理简介

A.1.1 光栅阵列传感系统利用刻写在拉制光纤内部的连续分布的光栅传感器阵列，感知光纤沿线各点光栅反射回来的光信号变化，来测量温度、应变、振动等物理量的空间分布和随时间的变化。

A.1.2 光栅传感器阵列的制备是在单模光纤拉丝过程中，按一定的间隔，分布式地刻写光栅。

A.1.3 光栅传感器阵列振动光缆利用监测相邻光栅间光纤相位变化实现。当外界振动作用于相邻光栅间光纤某处时，该处光纤的物理长度和折射率变化导致光相位发生变化，最终表现为探测器接收到的信号强度干涉变化。

A.1.4 光栅阵列传感系统优势在于：

- 1 光栅阵列传感技术大容量、长距离、高精度的优势，可实现高速公路的全域监测；
- 2 拥有分布式检测优势，充分利用光栅阵列提高信号强度，利用光栅间长度实现全长度无遗漏监测；
- 3 改变传统光纤传感器现场安装时需逐点焊接组网的缺点，采用光栅阵列传感网络和高强度光缆，在路面铺装下进行传感光缆的施工埋设，实现传感器的现场高效安装与高存活率。

A.2 光纤制式

A.2.1 传感单元光栅谱形，应符合表 A.2.1 规定。

表 A.2.1 传感光纤光栅谱形指标

中心波长/nm	1550.12
中心波长偏差/pm	$\pm 200@25^{\circ}\text{C}$
反射率强度 (‰)	0.1 ~0.5
3dB 谱宽/nm	≥ 2

A.2.2 松套光纤参数，应符合表 A.2.2 规定。

表 A.2.2 松套光纤指标

松套管材质及颜色	PBT/本色
松套管外径/mm	2.5 ± 0.05
松套光纤余长/ $\%$	1~2@200g

松套填充	油脂
松套光纤衰减	无突变点, $AVG \leq 0.5 \text{dB/km@1310nm}$

A.2.3 为防止传感光纤端面反射,对传感信号造成不利影响,需要对传感光纤尾端进行处理,即将传感光纤末端绕成小圈,打结固定,然后用带有防水接头的盲管进行封装保护,要求达到 IP68 防护等级,且盲管需用工程塑料或不锈钢等防腐蚀材料制成。尾端处理器的安装,根据需要,选择在工厂安装,或者在工程现场安装。

A.3 光缆制式

A.3.1 光纤光栅阵列振动传感光缆性能应满足表 A.3.1 要求。

表 A.3.1 光纤光栅阵列振动传感光缆性能要求

抗拉强度/N		抗压强度/N		最小弯曲 半径/mm	防护 等级	衰减	存储 温度	工作 温度
长期	短期	长期	短期					
1000	3000	1000	3000	200	IP68	<0.4 @1550nm	-20℃~ +60℃	-40℃~ +80℃

A.3.2 耐高温光纤光栅阵列振动传感光缆性能应满足表 A.3.2 要求。

表 A.3.2 耐高温光纤光栅阵列振动传感光缆性能要求

抗拉强度/N		抗压强度/N		最小弯曲 半径/mm	防护 等级	衰减	存储温度	工作温度
长期	短期	长期	短期					
1000	3000	1000	3000	200	IP68	<0.4 @1550nm	-20℃~ +60℃	-40℃~ +160℃

附录 B 监测系统验收记录表

B.1 光缆验收记录表

基本信息				
检验项目	具体参数	检测方式	评估标准	检测结果
外观检查			外观完好无破损	
性能指标	光纤衰减 (dB)	OTDR		
	光缆长度	OTDR		
	OTDR 检测图			
	光栅数量	解调仪设备		
	中心波长	解调仪设备		
综合评价				
	检验员		检验时间	

B.2 设备和机柜验收记录表

基本信息				
检验项目	具体参数	检测方式	评估标准	检测结果
外观检查			外观完好无破损	
设备	线缆固定	OTDR		
	安装位置	OTDR		
	安装数量			
	通电测试	解调仪设备		
	机箱	解调仪设备		
	杆件			
综合评价				
	检验员		检验时间	

B.3 软件验收记录表

检验项目	具体功能	检测方式	评估标准	检测结果
软件功能	数据调取			
	数据采集和存储			
	事件识别			
	报警功能			
	可视化			
	报警后处置			
压力测试				
综合评价				
	检验员		检验时间	

B.4 系统验收记录表

检验项目	具体参数	检测方式	评估标准	检测结果
系统联调	光缆状态	目测/OTDR	外观完好，链路通畅	
	设备状态	通电测试	运行正常，指示灯状态正确	
	软件性能	功能验证	数据采集、存储、分析功能正常	
模拟事件	断缆模拟	活动法兰操作	正确识别并报警	
	结构异常模拟	标准振动源	正确识别并报警	
系统联动测试（根据实际选择）	声光报警联动	现场触发	报警信号触发准确、及时	
	视频系统联动	现场触发	报警点位视频画面自动弹出	
	情报板联动	现场触发	预警信息发布准确	
	路侧广播联动	现场触发	广播指令发布准确	
试运行	运行情况	连续观察	系统运行稳定无异常	
	事件处理	记录核查	处置流程完整、闭环	
	系统稳定性	日志核查	无异常重启或数据中断	
	检验员		检验时间	

附录 C 数据保存和处理流程

C.1 一般规定

保存数据包括以下类型：

- 1 原始监测数据：每测点时序振动数据、时瀑图数据等；
- 2 后处理数据：沿线能量分布特征、空间能量积分、频域特征等；
- 3 长期备份数据：基准能量分布、能量分布变化值、预警记录等。

C.2 数据基本处理

C.2.1 原始数据即为沿线光缆测点的时序振动数据，拼接后可以得到时瀑图。时瀑图一般横轴为空间测点，纵轴为时间轴。一般包含两类时瀑图：

时瀑波形图：幅值以波形图表示。

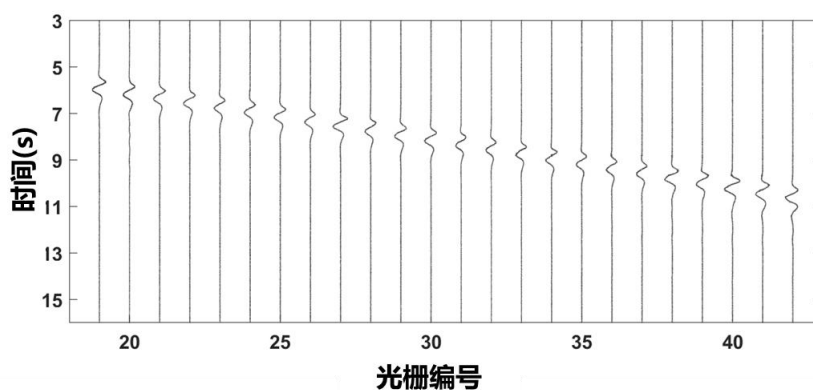


图 4 时瀑波形图

- 4 时瀑二维图：幅值以灰度或彩色颜色表示。

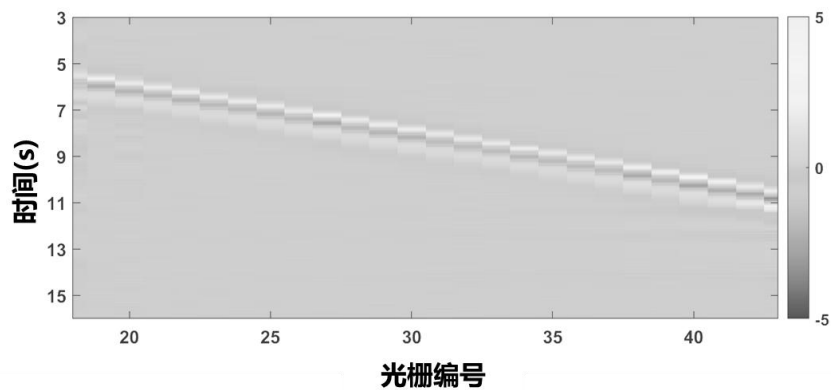


图 5 时瀑二维图

C.2.2 从光缆信号图可以发现光缆通断情况，根据通断情况，结合现场视频信号或人工核查可以判断路基是否严重塌毁。

C.2.3 当光缆未断时，根据时瀑图和数据处理方法识别异常信号。

附录 D 典型异常信号特征案例图示

D.1 监测链接中断异常

D.1.1 监测链接中断异常：实时检测反射光谱的数量和强度。若检测到长度与实际标定长度不一致，即诊断为光缆中断故障。根据信号断点，能够定位到断缆故障发生的位置和时间。

D.1.2 对于信号断点位置附近范围的前期时段完整信号进行追溯检测，

- 1 若未有明显异常，启动断缆检查程序，确定现场情况；
- 2 若有明显异常情况，启动断缆检查程序，初步评估严重塌毁事故，发布疑似严重塌毁事故报警，经现场检查结果确认后启动一级事故应急响应。

D.2 监测链接未中断明显异常

D.2.1 时序持续扰动：时瀑图纵向时间轴出现连续异常，表明该处光缆埋设质量异常，表现为光缆本身的长时间振动。与公路结构正常时期相比，竖向异常未出现明显改变，则表明该处光缆状态未变化；与公路结构正常时期相比，竖向异常出现明显改变，则表明该处光缆状态存在突然变化，可判定为光缆悬空事件（见图 6）。此时需及时报告，结合现场检查确定光缆情况，核查现场路堤状态。

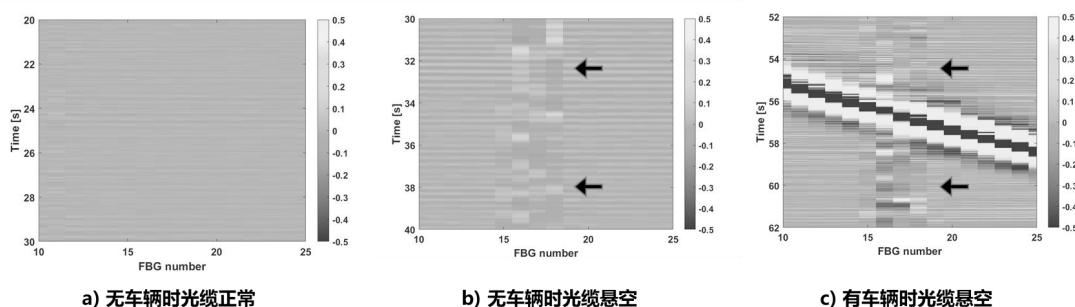


图 6 光缆正常与光缆悬空的典型时瀑图

D.2.2 绕行异常：当时瀑图中多条连续车辆轨迹在同一位置发生中断，且振动幅值无异常时，可判定该位置存在车辆连续绕行现象（见图 7）。应先排除已报备的施工占道及设施设置情形，经人工现场核查排除路障、路面拱起、路面遗留物等因素后，可认定车辆绕行由路面塌毁引起。

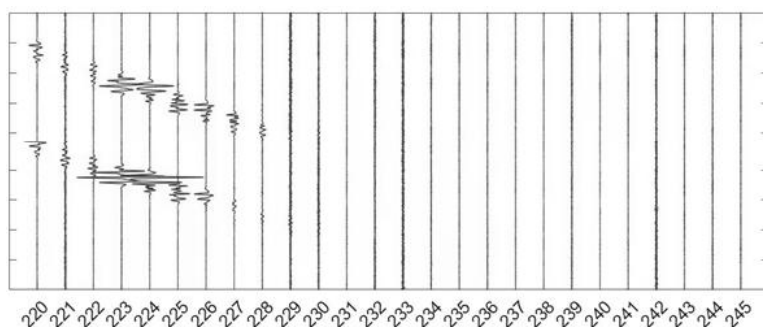


图 7 多辆车辆连续绕行时瀑图

D.2.3 沿道路能量分布异常：将下边坡对应车道划分为若干路基监测测区，对各测区单日车辆振动冲击能量叠加，以当日全部测区叠加能量的中位值为基准实施归一化，沿道路归一化能量和作为特征指标用于路基异常区段判定。与健康时期各测区归一化能量和进行对比，当部分测区对应的能量和升高时，可判定该测区出现异常（见图 8）。

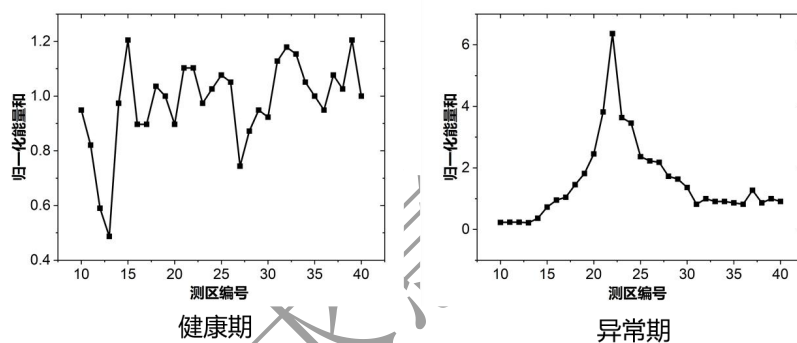


图 8 归一化能量分布健康期和异常期对比