

山东省市政行业协会团体标准

结构工程分布式光纤监测 系统技术规程

**Technical specification for distributed optical fiber monitoring
system of structural engineering**

(征求意见稿)

主 编 单 位：哈尔滨工业大学

山东泉建工程检测有限公司

2021年8月

前 言

根据山东省市政行业协会《关于印发第一批团体标准制定计划的通知》（鲁市协字〔2020〕11号）要求，标准工作组经过深入调查研究，认真总结实践经验，参考国内外相关标准，在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准的主要技术内容是：总则；术语和符号；基本规定；系统方案设计；光缆施工与验收；系统集成与调试；系统运维。

本标准由山东省市政行业协会负责管理，由山东泉建工程检测有限公司负责具体技术内容的解释。

若执行过程中对本标准有任何意见和建议，请寄送山东泉建工程检测有限公司《结构工程分布式光纤监测系统技术规程》编制组(地址：济南市历下浆水泉路22号，邮编：250014，电话：0531-82979727，传真：0531-82970073，邮箱：quanjianjiance@126.com)，以供今后修订时参考。

本标准主编单位、参编单位、主要起草人员和主要审查人员名单如下：

本标准主编单位：哈尔滨工业大学

山东泉建工程检测有限公司

本标准参编单位：济南城建集团有限公司

济南城市建设集团有限公司

济南城市投资集团有限公司

中建八局第二建设有限公司

济南市市政工程设计研究院（集团）有限责任公司

青岛市政空间城市物业管理有限公司

山东普泰工程检测鉴定有限公司

山东北斗检测科技有限公司

济南海河建设项目管理有限公司

华泰永信工程咨询有限公司

中铁建山东京沪高速公路济乐有限公司

济南市市政工程建设集团有限公司

滨州市财政保障中心

疆海工程项目管理有限公司

济南易通城建集团股份有限公司

主要起草人员：刘 洋 许为民 许 庚 刘 锋 孙 杰 赵世超 李盘山
陈允泉 张提勇 贾 靖 赵 斌 徐 静 董艳涛 张 勇
周亚军 韩新占 李少华 窦松涛 王立明 李 莉 田 浩
宋广骞 曲 健 王亚男 赵树海 连亚楠 宋 静 刘瑞利
金士朋 杜海龙 王永亮 宋海荣 孔凡达 何 坚 孟照静
高庆飞 张绍逸 陈奂宇 蔡东晓 郭亚妮 王恩国 刘智江
邢玉姣 宋 佳 孟晓苇 郑开菊 赵如忠 王少菲

主要审查人员：xxx xxx xxx xxx xxx

目 录

1	总则	1
2	术语和符号	2
	2.1 术语	2
	2.2 符号	3
3	基本规定	4
4	系统方案设计	5
	4.1 一般规定	5
	4.2 传感子系统设计	5
	4.3 数据采集与传输子系统设计	9
	4.4 数据库子系统设计	10
	4.5 用户端子系统设计	10
5	光缆施工与验收	12
	5.1 一般规定	12
	5.2 光缆布设	12
	5.3 施工验收	14
6	系统集成与调试	15
	6.1 一般规定	15
	6.2 系统集成	15
	6.3 数据采集与处理	15
	6.4 系统调试	16
	6.5 系统验收	17
7	系统运维	18
	7.1 一般规定	18
	7.2 日常运维	18
	7.3 定期检查与保养	18
	7.4 异常状况处理	19
	本规程用词说明	20
	引用标准名录	21
	附：条文说明	22

1 总则

1.0.1 为规范土木工程分布式布里渊光纤监测系统的设计流程，确保监测系统的设计、实施、集成与维护的科学性和合理性，特制定本规程。

1.0.2 本规程适用于桥梁、道路、隧道、城市综合管廊和轨道交通等工程结构分布式布里渊光纤监测系统的设计、实施、集成与维护。

1.0.3 土木工程分布式布里渊光纤监测系统的设计、实施、集成与维护除应执行本规程外，尚应符合国家现行有关标准和规定。

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 布里渊散射 Brillouin scattering

入射光在光纤中传播时,与光纤介质中的不均匀结构发生碰撞改变传播方向而向空间散射的光学现象。

2.1.2 分布式布里渊光纤监测技术 Distributed Brillouin optical fiber monitoring technique

利用光纤中传输光波的布里渊散射,无需具体的传感探头,即可测量光纤沿线结构任意位置处应变与温度的监测技术,简称分布式光纤监测技术。

2.1.3 分布式布里渊光纤监测系统 Structural health monitoring system based on distributed Brillouin optical fiber sensing technique

以基于布里渊散射的分布式光纤监测技术为核心的结构安全监测系统,简称分布式光纤监测系统。

2.1.4 分布式传感光缆 Distributed sensing optical fiber

分布式布里渊光纤监测系统中既可以将被测结构的应变与温度等物理量转变为光信号又可以进行数据传输的光缆,简称传感光缆。

2.1.5 布里渊频移 Brillouin frequency shift

分布式光纤监测技术中光信号在布里渊散射试验中出现的散射峰频移。

2.1.6 光纤损耗 Optical fiber loss

光信号在每单位长度传感光纤上的强度衰减,单位为 dB/km。

2.1.7 光缆断点 Optical fiber breaking point

传感光缆断裂位置。

2.1.8 光纤熔接 Optical fiber splicing

利用光纤熔接机高压放电熔融光纤,将头尾两根光纤进行接续。

2.1.9 分布式布里渊光纤解调仪 Distributed Brillouin fiber demodulator

光纤监测系统中将光信号转换为电信号的仪器,简称光纤解调仪。

2.1.10 光纤熔接机 Optical fiber fusion splicer

利用高压电弧将两根光纤断面熔化并通过高精度运动机构平缓推进将两根光纤接续在一起,以实现光纤模场耦合的装置。

2.1.11 光时域反射仪 Optical time domain reflectometer

利用入射光在光纤中传播时产生的后向散射光来获取衰减的信息,用于测量光纤衰减、接头损耗、定位光纤故障点以及分析光纤沿长度损耗分布的仪器。

2.1.12 单模光纤 Single-mode optical fiber

中心玻璃芯较细,导致入射光在光纤内传播时,只能按一种模式通过的光纤。

2.2 符号

- ν —— 布里渊频移;
- ε —— 结构应变;
- T —— 结构温度;
- C —— 布里渊频移影响系数;
- E —— 弹性模量;
- G —— 剪切模量;
- γ —— 损伤诊断指标;
- \mathbf{R} —— 损伤特征矩阵;
- \mathbf{C} —— 损伤特征的矩的协方差矩阵;
- η —— 异常诊断阈值;
- $\{g\}_{95\%}$ —— 取统计数据 95% 置信概率的中位数;
- μ —— 损伤特征样本的总体均值;
- σ —— 损伤特征的总体标准差;
- $\Psi_{\alpha/2}$ —— 标准正态分布上的 $\alpha/2$ 分位点。

3 基本规定

- 3.1.1** 分布式光纤监测系统的设计、实施、运维应涵盖工程结构的监测全周期。
- 3.1.2** 分布式光纤监测系统应具有完整的传感、采集、解调、传输、存储、数据处理、结构损伤识别、损伤预警和状态评估等功能。
- 3.1.3** 分布式光纤监测系统硬件应具有良好的可维护性、可更换性，监测系统的软件应具有兼容性、可扩展性、易维护性，且与硬件相匹配。
- 3.1.4** 分布式光纤监测系统的设计及施工方案应根据监测目的、对象、数据精度需求、施工条件等因素综合确定。
- 3.1.5** 分布式光纤监测系统在实施安装前应结合管理方、设计方和施工方的综合意见确定实施方案，监测系统的安装不得影响工程主体结构安全。
- 3.1.6** 分布式光纤监测系统应根据监测需求设置监测结构应变与结构温度的传感光缆，传感光缆的耐久性与可维护性应满足监测要求。
- 3.1.7** 分布式光纤监测系统中传感光缆应采用单模光缆，适用于结构的应变测量及温度测量。
- 3.1.8** 分布式光纤解调仪应具备数据采集、分析和存储功能，并应根据被测结构应变与温度的监测需求进行选择。
- 3.1.9** 对同一工程结构，宜使用同一台光纤解调仪，若使用多台光纤解调仪，设备参数应根据各自连接的传感光缆分别设置。
- 3.1.10** 重大工程结构安全监测宜根据实际情况采用分布式光纤监测技术与其它点式监测技术相配合的监测体系。

4 系统方案设计

4.1 一般规定

4.1.1 系统方案应根据被测结构的类型、受力特点和易受损伤部位进行专项设计，宜与主体结构的设计统筹协调。

4.1.2 系统方案应结合现场实际情况进行设计，并遵循以下原则：

- 1 传感光缆应沿结构通长布置，对结构变形、内力进行全覆盖性的监测；
- 2 传感光缆布置方案设计时，应合理利用结构对称性，对结构非关键部位可适当减少传感光缆的用量。

4.1.3 系统方案设计应包括传感子系统、数据采集与传输子系统、数据库子系统以及用户端子系统等四部分。

4.1.4 系统方案设计应考虑长期性、稳定性、实时性、全面性、准确性和经济性等特性需求，并以最小成本为目的进行合理优化。

4.1.5 系统方案设计应考虑电力供应与网络通讯的需求，保障系统 24 小时稳定运行。

4.2 传感子系统设计

4.2.1 适用于桥梁、道路、隧道、城市综合管廊和轨道交通等基础建设结构设施的传感光缆应符合下列规定：

- 1 单个传感光缆回路布置的总长度不应超过 100 公里；
- 2 对于长距离大范围的结构静态或拟静态变形测量，传感光缆的测点空间分辨率应在 10cm~200cm 之间选择。

4.2.2 传感光缆布置方案设计时，应根据结构静、动力特性分析结果，并结合结构或构件的重要性，确定结构内力、变形较大以及易受损伤的关键部位。

4.2.3 传感光缆的布设位置应根据被测结构的类型、受力特征、重要性以及易损性分析确定，并在结构关键受力区域、关键构件或已产生损伤的位置进行加密布设。

4.2.4 应变传感光缆应在结构变形缝或诱导缝处设置温度补偿松弛段，传感光缆松弛段长度根据光线解调仪空间分辨率确定，传感光缆松弛段间距不宜大于30m或小于2m。

4.2.5 桥梁结构传感子系统的设计应满足下列规定：

- 1 根据监测需求，分别设计桥梁上部、下部结构的传感光缆布置方案；
- 2 根据桥梁结构的温度梯度分布，设计温度传感光缆布置方案，被测结构各区域温度场；
- 3 根据不同的桥梁结构类型，传感光缆布置方案中应包含对表 4.2.5 中结构关键部位的监测。

表 4.2.5 不同类型桥梁应监测的结构关键部位

序号	桥型	结构关键部位	监测项目	
			温度	应变
1	梁桥、刚构桥	主梁	●	●
		桥墩（台）	○	○
		基础	○	○
2	拱桥	主拱圈	●	●
		桥面板	●	●
		桥墩（台）	○	○
		立柱	○	○
		吊杆	○	○
		系杆	○	●
		基础	○	○
3	桁架桥	上弦杆	●	●
		下弦杆	●	●
		斜杆	○	○
		竖杆	○	○
		桥墩（台）	○	○
		基础	○	○
4	斜拉桥	主梁	●	●
		斜拉索	○	○
		索塔	●	●
		桥墩（台）	○	○
		基础	○	○
5	悬索桥	主梁	●	●
		主缆	○	○

		吊杆	○	○
		索塔	●	●
		桥墩（台）	○	○
		基础	○	○
注：“●”为必选监测项，“○”为宜选监测项，应变与温度传感光缆均为沿监测构件长度方向布置。				

4.2.6 道路结构传感子系统的设计应满足：

- 1 根据道路类型、等级、地基以及水文条件的不同，综合设计传感光缆的布置方案；
- 2 根据道路具有多层介质的特征，应在各介质层底分别设计监测应变和温度的纵向、横向或纵横向交叉的传感光缆布置方案；
- 3 根据道路类型的不同，传感光缆布置方案中应包含对表 4.2.6 中的结构关键部位。

表 4.2.6 不同类型道路应监测的结构关键部位

序号	道路类型	结构关键部位	监测项目		
			温度	应变	
				纵向	横向
1	沥青道面	面层	○	○	○
		基层	●	●	○
		垫层	○	○	○
2	混凝土道面	面层	●	●	○
		基层	●	●	○
		垫层	○	○	○
注：“●”为必选监测项，“○”为宜选监测项，道路结构中传感光缆应沿结构纵向以及横向布置。					

4.2.7 隧道结构传感子系统的设计应满足：

- 1 根据隧道结构围岩等级以及水文地质条件的不同，综合设计传感光缆的布置方案；
- 2 设计沿隧道纵向通长布置应变传感光缆，若条件受限无法实现通长布置，应选择变形或内力较大处作为监测区域；
- 3 设计沿隧道纵向通长布置温度传感光缆，监测隧道结构温度场分布；

4 在隧道围岩等级较低、裂隙发育、隧道结构变形或内力较大处设计沿隧道断面通长布置应变传感光缆；

5 根据隧道施工类型的不同，传感光缆布置方案中应包含对表 4.2.7 中结构关键部位的监测。

表 4.2.7 不同类型隧道应监测的结构关键部位

序号	隧道施工类型	结构关键部位	监测项目		
			温度	应变	
				隧道结构纵向	隧道结构断面环向
1	盾构法 施工隧道	盾构管片	●	●	○
		道床	—	○	—
2	矿山法 施工隧道	拱圈	○	○	○
		边墙	●	●	
		仰拱	○	●	
		底板	○	○	
		锚杆	—	○	—
		道床	—	○	—
3	明挖法 施工隧道	顶板	○	○	○
		边墙	●	●	
		仰拱	○	●	
		道床	—	○	—

注：“●”为必选监测项，“○”为宜选监测项，“—”为不包含项。

4.2.8 城市综合管廊传感子系统的设计应满足：

1 根据管廊结构形式、功能分类、地质及水文地质条件的不同，综合设计传感光缆的布置方案；

2 沿管廊纵向通长布置应变传感光缆，在管廊结构关键部位沿截面通长布置应变传感光缆；

3 沿管廊纵向通长布置温度传感光缆，监测管廊结构温度场；

4 对于城市综合管廊，应变传感光缆布置方案中应包含对表 4.2.8 中结构关键部位的监测。

表 4.2.8 综合管廊应监测的结构关键部位

序号	结构关键部位	监测项目		
		温度	应变	
			管廊结构纵向	管廊结构断面环向
1	接缝	○	●	—
2	顶板	●	●	○
3	侧墙	●	●	
4	角隅	●	●	
5	底板	●	●	
注：“●”为必选监测项，“○”为宜选监测项，“—”为不包含项。				

4.2.9 对于轨道交通结构传感子系统的设计应满足 4.2.5 及 4.2.7 的要求，传感光缆布置方案中应包含对表 4.2.9 中结构关键部位的监测。

表 4.2.9 轨道交通廊应监测的结构关键部位

序号	类型	结构关键部位	监测项目	
			温度	应变
1	桥梁	同表 4.2.5		
2	隧道	同表 4.2.6		
3	车站	顶板	—	○
		侧墙	—	○
4	轨道设施	钢轨	○	○
		道床	—	○
注：“●”为必选监测项，“○”为宜选监测项，“—”为不包含项。				

4.3 数据采集与传输子系统设计

4.3.1 根据分布式光纤监测系统的数据采集需求宜采用集中式数据采集方式。

4.3.2 采集设备按照其采集的时间频度、频次和时间间隔等内容，可采取全时采集、定时采集、触发采集和混合采集四种模式，应依据分布式光纤监测系统需求和结构特点进行选择。

4.3.3 数据采集子系统应设计抗干扰措施，提高信号的信噪比。

4.3.4 数据采集子系统工作时宜进行数据、时间自校准，若无自校准，应定期进行检测并进行人工校准。

4.3.5 数据采集以及传输子系统的硬件设备应满足各部分间的连接牢固和数据的

传输稳定。

4.3.6 数据传输系统的设计应综合考虑数据传输距离、工程特点及现场条件、网络覆盖状况、已有的通信设施等因素灵活设计，选取合适的数据传输连接方式。

4.4 数据库子系统设计

4.4.1 数据库子系统应进行合理设计，数据格式应具备清晰、简明、标准化的特点，系统数据应进行分类归档。

4.4.2 数据库子系统应具备高速存储与读取数据的能力。

4.4.3 数据可设计存储于本地硬件设备或云服务器端，其容量应满足 6 个月的原始数据存储需求。

4.4.4 数据库应具备数据自动保存的功能，系统因意外故障停止运营时，可恢复已采集的数据。

4.4.5 数据库系统在使用时宜支持在线实时数据处理分析、离线数据处理分析以及两种工作方式的混合模式。

4.4.6 数据库的组成架构应与数据库的功能相对应，宜划分为监测设备数据库、监测信息数据库、结构模型信息数据库、评估分析信息数据库和用户数据库等。

4.4.7 数据库数据的管理系统应处于安全的物理环境，对数据库管理系统资源的处理应限定在可控制的访问设备内，禁止未授权的访问。

4.4.8 在应用程序调试完成后，应对数据库进行功能测试和性能测试，做好数据库的备份工作。

4.4.9 应预留数据库标准化对外接口，方便与其它系统的集成。

4.5 用户端子系统设计

4.5.1 用户端子系统界面应友好美观、功能齐全、信息完备、操作方便，可实现流畅的人机交互。

4.5.2 用户端子系统各模块应与数据库实时对接，实现数据库数据的高效调用以及分析结果的快速存储。

4.5.3 用户端子系统应分为主界面与子界面，主界面上宜显示结构安全监测的结果性、全局性及决策性信息，子界面上宜显示被测结构重要构件或关键区域的细节信息以及数据预处理与数据分析的详细信息。

4.5.4 用户端子系统应具备表 4.5.4 中所示的功能。

表 4.5.4 用户端子系统应具备的功能

序号	用户端子系统的功能	具体内容
1	数据预处理	具备数据异常点识别、误差消除、滤波降噪、趋势分析及断点截取等功能，进而降低后续计算成本并提升分析结果准确性。
2	结构状态诊断	具备对采集到的数据进行分析、剔除环境因素对监测数据的影响、诊断结构是否出现损伤状态的功能。
3	数据可视化	具备实时在线显示监测数据的功能，并可实现历史数据的回查，数据分析及结构状态诊断结果的可视化展示功能，进而直观展示结构实际运营状态。
4	结构风险预警	将采集到的实时数据和历史数据进行数据处理，并与阈值进行比较判断是否超限，实现对结构潜在风险的预警功能。

5 光缆施工与验收

5.1 一般规定

5.1.1 系统实施宜与结构施工同时开展，系统运行宜与结构运营同步。

5.1.2 光缆的各类连接与操作，都应满足监测的光损需求。

5.1.3 传感光缆中光纤连接宜使用熔接连接，每个熔接点处的光损不宜大于 0.05dB，每个传感光缆回路的总光损不宜大于 10dB。

5.1.4 光缆施工过程中应减少熔接数量，熔接接头位置应避开结构应力、变形较大处，并避免在无尘及潮湿环境中进行熔接操作。

5.1.5 启封后的传感光缆应按照原有缠绕方向，按圈依次解开，避免受扭或受弯，光缆的弯曲半径应大于 5cm。

5.1.6 传感光缆与结构应粘接可靠，应注意保护光纤连接线。

5.1.7 应根据结构特征、监测内容及需求，合理选择传感光缆的布设方式。

5.1.8 传感光缆在布设时，应考虑运营期内传感光纤的可修复性，留有足够的接口，以便传感光缆的维护和更换。

5.2 光缆布设

5.2.1 光缆布设前应根据系统设计方案，通过划线、标记方式确定施工位置，计算光纤长度，并提前准备辅助安装器材，具体包括：

1 开槽机：用于结构表面的开槽处理，应具备足够切割强度；

2 光纤切割刀：用于切割光纤；

3 光时域反射仪（OTDR）：用于测量光纤衰减、接头损耗、定位光纤故障点以及分析光纤沿长度损耗分布；

4 光纤熔接机：用于光纤的熔接、保护以及断点的修复。

5.2.2 传感光缆的布设方式应采用粘贴法、开槽法、预埋法及模板预留槽法，且每种方法均应满足结构外表美观的要求。

5.2.3 根据被测结构类型的不同，传感光缆的布设应参考表 5.2.3 的方式。

表 5.2.3 不同结构传感光缆的布设方式

工程结构类型		传感光缆布设方式
桥梁	混凝土桥梁	粘贴法、开槽法及模板预留槽法
	钢结构桥梁	粘贴法
道路		预埋法
隧道	盾构法施工隧道	粘贴法及模板预留槽法
	矿山法施工隧道	开槽法
	明挖法施工隧道	开槽法
城市综合管廊		粘贴法、开槽法及模板预留槽法
钢轨		粘贴法

5.2.4 采用粘贴法布设传感光缆时，应事先打磨处理待粘贴结构的表面，并做表面抹平处理；粘贴过程中，宜将光缆间隔一定距离初步固定于结构表面；与结构连接时，应将粘结剂均匀地涂抹在光缆表面及其周围，确保光缆与结构的有效连接。

5.2.5 采用开槽法布设传感光缆时，应事先切割出或预留适宜光缆铺设的凹槽，并做表面抹平处理；粘贴过程中，宜将填充材料均匀涂抹于凹槽的底面及侧壁，确保光缆受力均匀，与结构连接紧密。

5.2.6 采用预埋法布设传感光缆时，需在结构浇筑施工之前，将传感光缆绑扎于受力钢筋的关键位置，并确保混凝土浇筑施工过程中不会影响传感光缆的工作性能。

5.2.7 采用模板预留槽法布设传感光缆时，需要依据支模方法预留出安装传感光缆的坑槽，待传感光缆安装在坑槽内之后，再浇筑填充材料，确保传感光缆连接的牢固性和耐久性。

5.2.8 传感光缆的布设施工过程中，宜利用传感光缆的米标，每隔一定距离进行记录，实现测点与所测结构位置的一一对应。

5.2.9 传感光缆布设过程中，传感光缆特殊记录点宜包括：传感光缆与跳线熔接点位置、结构监测的起点位置与终点位置、传感光缆的温度补偿段位置、传感光缆的各类拐点位置等。

5.2.10 传感光缆的温度补偿段宜选取大于光缆直径的套管进行套接，并做好套管两端的封堵，避免结构与松弛段光缆的直接接触，松弛段光缆长度不宜小于2m。

5.2.11 传感光缆的断点熔接段应采用套管保护，套管的放置应在光纤切割前完

成。

5.2.12 传感光缆断点熔接时，应将两端光缆轴线对齐以确保两端的完好连接，并对光缆熔接段进行保护。

5.2.13 传感光缆端点跳线熔接时，所采用的熔接跳线长度宜大于 2m，并应采用套管保护熔接段光缆。

5.2.14 利用 OTDR 进行传感光缆测通时，拨开跳线端头的扣帽后，应确保接头的洁净。

5.3 施工验收

5.3.1 粘接传感光缆的粘合剂应质地饱满、强度可靠，不应存在气泡、蜂窝、杂质区。

5.3.2 粘合剂凝固后的强度与变形协调能力应与被测结构相适应。

5.3.3 传感光缆布设完毕后，应连续采集应变测试数据，并利用前后数据的差值确定实际监测精度。

5.3.4 传感光缆布设完毕后，传感光缆两端的跳线长度应满足后续的传感光缆测通和初始数据采集需求。

6 系统集成与调试

6.1 一般规定

6.1.1 系统集成与调试应基于统一软件工作平台，兼顾系统后期更换或增减设备的操作便利性。

6.1.2 系统集成应采用网络技术，宜将有线网络传输方式和无线网络传输方式相结合，根据监测需求设计网络拓扑结构。

6.2 系统集成

6.2.1 系统集成将各子系统进行串联，应考虑系统网络、电力供应与数据传输的安全性，保障集成过程中各子系统的正常工作。

6.2.2 系统集成应采用模块化、单元化及标准化设计，确保软件与硬件模块的兼容性。

6.2.3 系统集成应实现数据可视化及人机交互，可通过用户端子系统展示传感光缆、设备与数据信息，并可在界面上直接修改各模块功能的参数。

6.2.4 系统集成后的光纤监测系统应满足高度自动化、智能化、实时化及网络化的要求。

6.3 数据采集与处理

6.3.1 应根据传感光缆的监测信号种类，设计、开发或选用合适的解调设备，并应设计与后续数据传输、存储与管理相兼容的接口。

6.3.2 应根据传感光缆输出信号类型、匹配性、兼容性、精度和分辨率等要求，对数据采集设备进行选型。

6.3.3 根据光纤监测系统的监测需求，数据采集模式应包括：实时采集、定时采集、触发采集和混合采集模式。

6.3.4 应根据传感光缆的信号特点，设计数据采集软件即用户端子系统，实现对数据库子系统进行数据转存。

6.3.5 数据处理前应进行初筛，剔除非结构变化引起的异常数据；并对数据进行

预处理，降低数据中的噪声干扰。

6.3.6 数据分析处理之前，应正确处理粗差、系统误差、偶然误差。

6.3.7 传感光缆监测点处的监测应变或温度可利用光波的布里渊频移分析计算，即按照式（6.3.7）计算：

$$\begin{aligned}\Delta T &= \frac{\nu(0,T) - \nu(0,T_0)}{C_T} \\ \Delta \varepsilon &= \frac{\nu(\varepsilon,T) - \nu(\varepsilon_0,T_0) - C_T \Delta T}{C_\varepsilon}\end{aligned}\tag{6.3.7}$$

式中： ν ——布里渊频移；

ε ——传感光缆监测点处结构应变；

T ——传感光缆监测点处结构温度；

ε_0 ——传感光缆监测点处结构初始应变；

T_0 ——传感光缆监测点处结构初始温度；

C_ε ——布里渊频移应变影响系数；

$\Delta \varepsilon$ ——相较于初始时的应变变化量；

C_T ——布里渊频移温度影响系数；

ΔT ——相较于初始时的温度变化量。

6.3.8 利用结构监测数据进行处理分析，宜分阶段对结构状态进行诊断与评估，包括结构损伤判别、损伤定位、状态评估。

6.3.9 利用应变数据进行结构状态诊断时，应先剔除环境因素对应变监测数据的影响。

6.3.10 对结构安全状态进行预警时，预警信息应包括：预警级别、预警测点位置、预警监测数值和阈值。

6.4 系统调试

6.4.1 系统的调试应满足下列规定：

1 应使用光时域反射仪（OTDR）检测传感光缆长度、断点以及光损耗等指标；

- 2 应对传感光缆的实际监测精度进行校准，确保满足系统设计要求；
- 3 应检查所布设传感光缆的光损，若光损超过 10dB，需对光损处进行传感光缆的重新熔接或更换光缆。

6.4.2 数据采集与传输子系统的调试应满足下列规定：

- 1 应对数据采集与传输设备进行检测，保证硬件的安装与连接满足设计要求，能够保障系统长期正常运营；
- 2 应通过系统试运行对数据采集与传输设备进行调试，保证数据采集与传输的实时性与完备性。

6.4.3 数据库子系统的调试应满足：

- 1 应通过实时数据的读入、读出及查询等步骤进行测试，确保数据库的数据读写率满足监测系统的需求；
- 2 应保证系统容量满足大数据存储需求，若不满足上述需求，需要定期转存数据并清理内存。

6.4.4 用户端子系统的调试应包括软件各模块功能的测试，需满足系统鲁棒性高、兼容性好及运行流畅等要求。

6.5 系统验收

6.5.1 系统移交用户前，需对硬件及软件进行验收，验收内容参照 6.4 中系统调试相关内容。

6.5.2 系统验收工作须由专业人员完成。

6.5.3 系统验收后、正式运营前，宜根据实际情况设定试用期，检验系统的鲁棒性、稳定性、可靠性及安全性。

7 系统运维

7.1 一般规定

7.1.1 系统运维的主要内容应包括：日常运维、定期检查与保养和异常状况处理。

7.1.2 系统的日常运维宜每周进行一次，定期检查应每 3 个月进行一次，系统异常状况处理应在异常发生后 24 小时以内完成。

7.1.3 系统软件宜方便更新或升级，更新或升级前后的数据应具备连续性与一致性，应保证升级后的技术性能高于升级前。

7.1.4 系统硬件更换后应保证主要技术指标不低于更换前。

7.1.5 系统在进行日常运维、定期检查和异常状况处理时应填写相应的记录表并存档。

7.2 日常运维

7.2.1 系统的日常运维应检查系统数据的实时状态与后台进程是否正常，剩余存储空间是否满足系统要求，数据库日志是否完备，将结果进行记录并存档。

7.2.2 监控中心的日常运维应对设备的运行情况进行检查，对设备出现的掉电、计算机故障和系统通讯中断等异常情况应进行处理，将结果进行记录并存档。

7.2.3 系统应进行运行安全管理，对使用系统的人员或设备用户进行身份鉴别，未经批准禁止随意更改系统配置、增删软件和硬件、复制和传播数据文件。

7.3 定期检查与保养

7.3.1 传感光缆应进行光路检查，查看传感光缆有无损坏及断点，逐一检查所有传感光通道是否顺畅，必要时检测光通道的光强衰减，若出现光强衰减严重或光路不通的情况，需对传感光缆进行修复或者更换。

7.3.2 数据采集设备、传输设备、存储设备应进行性能检查，查看设备的数据采集及显示是否稳定，端口是否连接稳固，外接电源与设备内置电源是否工作正常，通讯状况是否良好。

7.3.3 数据采集设备维护保养时应断电操作，防止设备受损，定期送回厂家或计量机构进行检测，周期宜为一年；设备的内置电池宜每半年进行一次完全充放电，当设备超过使用寿命年限或无法满足系统集成的功能时，应对设备进行更换或升级改造。

7.3.4 对数据存储设备的防尘过滤网应定期进行清理，保证通风散热良好；应定期对数据存储设备的磁盘空间进行检查，应保证剩余磁盘的空间不低于磁盘空间总量的 20%。

7.3.5 系统软件应定期进行病毒检测与软件匹配性检查，对软件的注册码和密码应当妥善保管，避免泄露给其他人员。

7.4 异常状况处理

7.4.1 当系统出现异常时，应根据系统报警和系统故障两种异常情况分别制定响应机制和应急措施，处置过程中的时间、现象、措施、结果和人员均应详细记录并保存。

7.4.2 当系统的数据传输设备出现故障时，应对异常原因进行分析和处理，填写异常状况登记表并存档。通知技术人员进行数据通讯测试，确定原因后对异常设备或零件进行更换或维修，并做好数据传输异常时间、处理过程、处理结果和异常原因分析的详细记录，建立异常处置档案。

7.4.3 当系统中传感光缆或通讯光缆出现断裂时，应采取以下应急处置措施：

- 1 通过光时域反射仪（OTDR）确定光损严重或断裂破坏的部位；
- 2 对断点进行熔接修复；
- 3 对连接处进行封装与保护；
- 4 对光缆修复和更换做好记录并存档。

本规程用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

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：

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，在条件许可时首先这样做的：

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，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《混凝土结构设计规范》 GB50010
- 2 《钢结构设计标准》 GB 50017
- 3 《光缆总规范 第1部分：总则》 GBT 7424.1
- 4 《光缆总规范 第2部分：光缆基本试验方法》 GBT 7424.2
- 5 《光纤传感器 总规范》 BS EN 61757-1
- 6 《光纤熔接机通用规范》 GB / T 17570
- 7 《无损检测：基于光纤传感技术的应力监测方法》 GB / T 33213
- 8 《结构健康监测系统设计标准》 CECS 333
- 9 《结构健康监测系统运行维护与管理标准》 T/CECS 652
- 10 《建筑与桥梁结构监测技术规范》 GB 50982
- 11 《国家公路网重点桥梁和隧道监测评价规程》 T/CECS G E41-04
- 12 《城市轨道交通工程监测技术规范》 GB 50911
- 13 《基于光纤传感的管道安全预警系统设计及施工规范》 SYT 4121
- 14 《综合布线系统电气特性通用测试方法》 YD/T 1013

条文说明

目 录

1	总则	24
3	基本规定	30
4	系统方案设计	28
4.1	一般规定	28
4.2	传感子系统设计	28
4.3	数据采集与传输子系统设计	29
4.4	数据库子系统设计	30
4.5	用户端子系统设计	30
5	光缆施工与验收	32
5.1	一般规定	32
5.2	光缆布设	32
6	系统集成与调试	35
6.1	一般规定	35
6.2	系统集成	35
6.3	数据采集与处理	35
6.4	系统调试	43
6.5	系统验收	44

1 总则

1.0.1 针对土木工程结构服役周期长，运营环境复杂，结构损伤具有强随机性、高隐蔽性及突发性等问题，充分利用分布式布里渊光纤监测技术具有超高测点密度及超长监测距离的特点，规范土木工程结构分布式布里渊光纤监测系统的设计、实施、集成及运维，制定适用于桥梁、道路、隧道、城市综合管廊和轨道交通等土木工程结构的《结构工程分布式光纤监测系统技术规程》。

1.0.2 分布式布里渊光纤监测技术可广泛应用于桥梁、道路、隧道、城市综合管廊和轨道交通等土木工程结构，既可以用于短期检测也可以用于长期健康监测。

1.0.3 分布式布里渊光纤监测技术已在国内取得较大发展，与现有光纤监测系统标准相比：本规程将侧重于土木工程结构分布式布里渊监测系统的设计、实施、集成及运维。除本规程外，分布式布里渊光纤监测系统在应用过程中遵循的现行标准可参照本规程引用标准目录。

3 基本规定

3.1.1 分布式光纤监测系统的设计应遵循长远规划的原则，使用阶段应涵盖结构规划、设计、施工、运营维护在内的结构监测全周期。

3.1.3 实际使用过程中部分监测硬件设备可能出现不同程度的损坏，因此，对关键参数和重要部位的监测，应配置多个相同类型或不同类型的硬件设备，避免出现硬件损坏导致监测数据测量不准或无法测量等问题。监测系统软件应与硬件相匹配，具有良好的用户使用性能。

3.0.4~3.0.5 分布式光纤监测系统安装应在不影响主体结构施工进度及质量的前提下进行，因此，系统安装位置应结合结构主体施工方案综合进行确定。分布式光纤传感监测系统的总体设计目标是通过直接或间接监测结构的局部或整体参数综合评价结构性能及损伤状况，监测的目的包括但不限于以下：

- 1) 验证结构设计、分析和试验时的假定及参数；
- 2) 保证施工过程的安全、确保施工质量，确保结构尽可能服从设计要求；
- 3) 为结构的日常管理和维护提供建议，保障结构安全；
- 4) 在结构状态出现异常时及时进行预警；
- 5) 当发生灾害或意外情况后，评估结构状态，进行安全评定；
- 6) 为发展新方法、新技术提供参考和借鉴价值。

3.1.6 分布式光纤监测系统应保证在结构全监测周期内正常运行，传感光缆应具有良好的耐久性和可维护性。除特殊位置的传感光缆外，大部分重要的传感光缆应考虑耐久性及其后期维护和更换的可行性，如果发现光缆断点，应在最短时间内完成更换。传感光缆应设置标识和采取必要的防护措施，避免暴雨雷击、动物侵害、人为损害等影响。对易受环境影响或安装在结构表面的传感光缆，应考虑日照、雨淋、冰冻、风沙等恶劣天气的影响，必要时应采取特殊防护措施。同时，应定期检查传感光缆工作和运行状况，定期进行保养、检定，发现问题时应及时校准、维修或更换。

影响传感光缆的耐久性主要包括如下因素：

- 1) 使用环境温度、湿度；
- 2) 大气压力；

- 3) 潮湿环境腐蚀；
- 4) 日晒、雨淋、冰冻、风沙等；
- 5) 动物损害、人为损害等。

为保证传感光缆耐久性与可维护性条件，应对传感光缆做好相应的防护及维护措施，包括：

- 1) 防水：潮湿环境对传感光缆危害很大，使光纤产生附加损耗，降低光纤长度。在操作中应采用防护等级为 IP68 的保护层防水；
- 2) 防腐：及时进行修补防腐处理，使光纤达到密封条件；
- 3) 防雷：定期对光缆护套进行接地测试，须在雷雨季节对防雷装置进行全面检查，保证防雷装置的合格；
- 4) 定期检查：定期对光缆线路进行巡视，检查光缆线路是否发生变化，及时发现危及光缆安全的因素，预先采取相应的措施进行防范。

为保证传感光缆耐久性能，应满足以下要求：

表 1 传感光缆耐久性指标

指标名称	指标要求
设计使用寿命	20 年
使用环境温度	-40℃~80℃
相对湿度	25%~75%
大气压力	53kPa~106kPa
防护等级	IP68
检测频率	每年

3.1.7 分布式传感光缆应采用单模光纤，根据我国对传感光缆的要求，传感光缆可以用于监测结构应变及温度。铠装应变传感光缆可用于监测混凝土结构应变；紧套单芯应变光缆可用于监测钢结构应变；螺旋铠装测温光缆可用于监测结构温度。根据不同光缆的用途以及现有的技术指标，传感光缆技术要求应满足表 2 的规定：

表 2 分布式光纤监测系统中传感光缆技术要求

光缆类型	铠装应变传感光缆	紧套单芯应变传感光缆	螺旋铠装温度传感光缆
光学衰减	≤0.4dB/km (1310nm)	≤0.3dB/km (1550nm)	≤0.3dB/km (1550nm)
机械抗拉强度	长期 ≥700N	≥5N	≥750N

	短期	$\geq 2000\text{N}$	$\geq 10\text{N}$	$\geq 1500\text{N}$
机械抗压强度	长期	$\geq 1000\text{N}/10\text{cm}$	$\geq 100\text{N}/10\text{cm}$	$\geq 100\text{N}/10\text{cm}$
	短期	$\geq 3000\text{N}/10\text{cm}$	$\geq 200\text{N}/10\text{cm}$	$\geq 200\text{N}/10\text{cm}$
环境使用温度		$-40^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$	$-40^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$

3.1.8 分布式布里渊光纤解调仪技术要求应满足表 3 的规定：

表 3 分布式布里渊光纤解调仪技术要求

类型	工作原理	测量指标	性能指标
高空间分辨率分布式布里渊光纤温度和应变分析仪	DPP-BOTDA	温度与应变	最高传感距离：20km； 空间分辨率：2-20cm； 应变精度： $\pm 20\ \mu\epsilon$ ； 温度精度： $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ； 工作温度：0-40 $^{\circ}\text{C}$
长距离分布式布里渊光纤温度和应变分析仪	DPP-BOTDA	温度与应变	最高传感距离：100km； 空间分辨率：0.5-2m； 应变精度： $\pm 20\ \mu\epsilon$ ； 温度精度： $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ； 工作温度：0-40 $^{\circ}\text{C}$
动态分布式布里渊光纤温度和应变分析仪	DPP-BOTDA	温度与应变	最高传感距离：2km； 空间分辨率：0.5m； 应变精度： $\pm 30\ \mu\epsilon$ ； 温度精度： $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ； 工作温度：0-40 $^{\circ}\text{C}$
双端高精分布式光纤应变解调仪	BOFDA	温度与应变	最高传感距离：50km； 空间分辨率：0.2m； 应变精度： $\pm 2\ \mu\epsilon$ ； 温度精度： $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ； 工作温度：0-40 $^{\circ}\text{C}$
长距离分布式布里渊光时域反射分析仪	BOTDR	温度与应变	最高传感距离：60km； 空间分辨率：1m-20m； 应变精度： $\pm 30\ \mu\epsilon$ ； 温度精度： $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ； 工作温度：0-40 $^{\circ}\text{C}$

3.1.10 包含交通工程结构在内的大型、复杂土木工程结构，由于影响损伤、劣化的因素较多，需要综合考虑各种因素的变化，才能保证参数识别和损伤诊断结果的准确性。因此，需要结合其他类型的监测技术对结构状态进行综合评估。

4 系统方案设计

4.1 一般规定

4.1.1 对本条中各子系统设计时需要考虑的要素进行补充说明：

- 1) 数据采集与传输子系统设计时需要考虑数据采集方式以及数据传输方式；
- 2) 数据库子系统设计时需要考虑数据存储格式、数据查询方式以及数据库管理办法；
- 3) 用户端子系统设计时需要考虑数据界面外观、数据预处理方法、状态诊断方法、预警指标以及输出显示结果。

4.1.3 系统设计的具体内容如下所示：

- 1) 传感子系统：由监测结构应变与结构温度的传感光缆组成；
- 2) 数据采集与传输子系统：由调制解调设备以及数据传输设施组成；
- 3) 数据库子系统：由数据存储库以及其管理软件组成；
- 4) 用户端子系统：由数据预处理、结构状态诊断及结构潜在风险预警等模块组成。

4.1.4 传感光缆的布设需要考虑优化问题，该优化问题涉及多种因素，主要体现在对分布式光纤监测系统的要求上，如实时性、全面性、准确性以及经济性等。在优化设计时，应根据实际需求，进行合理规划，确定传感光缆的布设方案。

4.1.5 系统的电力供应与网络通讯应满足以下内容：

- 1) 应配备 UPS 作为备用电源，系统所在线路发生故障时，备用电源应自动启动，可满足系统 24 小时的用电需求；
- 2) 系统正常运行时，应保障备用电源的电力充沛；
- 3) 应保障系统电路的安全性，确保系统及操作人员安全工作；
- 4) 系统网络通讯可通过有线传输与无线传输两种方式，应满足快速、可控、稳定可靠的通信质量，保障实时数据传输的连续不中断。

4.2 传感子系统设计

4.2.1 分布式布里渊光纤监测技术主要包括布里渊光时域分析（BOTDR）、布里渊光时域反射技术（BOTDA）以及布里渊光频域分析（BOFDA），分布式光纤监测技术的一般原则应满足下列规定：

- 1) 单个传感光缆回路不宜过长，否则将导致光损过大，监测数据精度下降；
- 2) 受限于目前分布式光纤监测技术的技术指标，故测点空间分辨率不宜小于 10cm；测点空间分辨率过大，会导致监测系统精度较低，故空间分辨率不宜大于 200cm。

4.2.2 应根据结构监测数据的种类及要求，选取满足对应指标参数的传感光缆类别。

4.2.3 结构在不同的应用条件下出现损伤和破坏模式不同，因此，在设计传感光缆布设方案时，应全面对被测结构的受力、易损性特征等进行分析，确定需要监测的结构关键部位并进行传感光缆布设。

4.2.4 利用传感光缆监测结构应力时，应通过测量环境温度或设置温度补偿段对测量结果进行温度补偿。

4.2.6 对本条文中表 4.2.6 作如下说明：道路面层为主要受力结构，光纤可布设于面层下端监测温度与应变。但沥青道面刚度较小，变形较大，故其面层设置为宜选项；而混凝土道面刚度较大，变形较小，故其道面设置为必选项。

4.3 数据采集与传输子系统设计

4.3.2 数据采集模式的具体内容为：

- 1) 全时采集：采集设备进行全时（实时）连续的采集；
- 2) 定时采集：采集设备进行非全时工作，仅在指定某时间内全时（实时）连续采集，既可以是周期性的，也可以是非周期性的；
- 3) 触发采集：采集数据触发预设阈值时采集设备进行全时（实时）连续采集；
- 4) 混合采集：采集数据未触发预设阈值时采用定时采集，触发阈值时采用触发采集。

4.3.3 数据采集时能同时采集到光纤传感器中的中心波长信号和噪声信号，而噪声信号的能级一般远低于光纤中心波长的能级，因此，通过设置合理的阈值，

满足噪声信号能级小于阈值即可认为采集数据受噪声干扰较小。

4.3.4 零点温度漂移和时间漂移会对信号放大以及 A/D 信号转换产生影响，导致数据采集精度的下降，需要通过自校准程序调整数据采集精度，具体流程如下：

- 1) A/D 调零：A/D 转换器的两个输入端短接后接到参考电压负端；
- 2) A/D 增益校准：A/D 转换器的两个输入端分别接至参考电压的正负端；
- 3) 通道调零校准：A/D 转换器的两个输入端短接后接输入信号的负端；
- 4) 通道进行 A/D 转换：A/D 转换器的两个输入端分别接至输入信号的正负端。

4.3.5 数据采集与传输设备应符合设计要求，具备设置在潮湿、带静电及磁场环境之中的相应防护等级，无此防护等级的设备不能置于此类环境中或应改善安置环境。

4.4 数据库子系统设计

4.4.1 数据库设计应满足可靠性、先进性、开放性、可扩展性、标准性、数据共享性等要求，保障存储数据的有序存档、快速查询、实时在线或离线处理，方便数据查询与调用，保证用户方便、快速、准确地检索到所需的信息。

4.4.2 数据库的存储与读取速度应大于数据的采集与输出速度，并预留一定的冗余度，从而保证后期系统升级或测点增多后数据库仍能正常工作。

4.4.3 数据库存储、管理和操作的对象是海量的数据，进行系统数据库设计时需要根据光纤测点数量、采样频率、监测时间等因素估计数据库的容量，应保证数据库能够存储至少六个月的监测数据。

4.5 用户端子系统设计

4.5.1 用户端子系统应包含用户管理、数据实时展示、数据预处理、状态诊断、实时预警等功能，应显示被测结构的具体信息，包括名称、地理位置、结构形式等。界面的设计应采用统一的 UI 设计风格，保证配色、字体等元素的一致性。

4.5.2 用户端子系统的占用内存应小于服务器的容许内存，软件运行时应保证服

务器上其他程序的正常运行。

5 光缆施工与验收

5.1 一般规定

5.1.2~5.1.3 传感光缆的连接方式应以熔接为主，熔接又可分为热熔接与热熔接；其中热熔接光损较小、连接牢固，但现场操作难度较大；冷熔接与活动连接操作简单，但连接处光损较大、稳定性差，因此，现场条件允许的情况下宜采用热熔接。

5.1.4 由于熔接后连接处的光纤变得脆弱易断，应重点加强保护。

5.1.7 传感光缆的布设方式有四种，即粘贴法、开槽法、预埋法以及模板预留槽法，在设计传感光缆布设方案时，应根据监测工程的类型与体量来确定对应的传感光缆布设方式。

5.1.8 光纤解调仪可以同时监测传感光缆上的多个测点，但传感光缆一旦产生断点，可能会导致整个分布式光纤监测系统的瘫痪，因此在传感光缆布设设计时，应保证传感光缆的可修复性。

5.2 光缆布设

5.2.1 对本条第 2 款、第 4 款作如下说明：

1 传感光缆中光纤的切割工作，应遵循以下工序：

- 1) 用剥线钳将光纤树脂涂层剥除；
- 2) 采用酒精棉清洗干净；
- 3) 切割光纤，并确保光纤的端面与光纤垂直。

2 光纤的熔接及保护工作，应遵循以下工序：

- 1) 在光纤切割之前，须预先将光纤熔接的一端穿过热缩管；
- 2) 当光纤熔接后，将热缩管移至光纤熔接处，并对其进行热缩处理；
- 3) 光纤熔接时，应将两根光纤轴线对齐，以确保两个断面的完好连接。

5.2.2 粘贴法、开槽法、预埋法以及模板预留法布设光缆示意图如下所示：

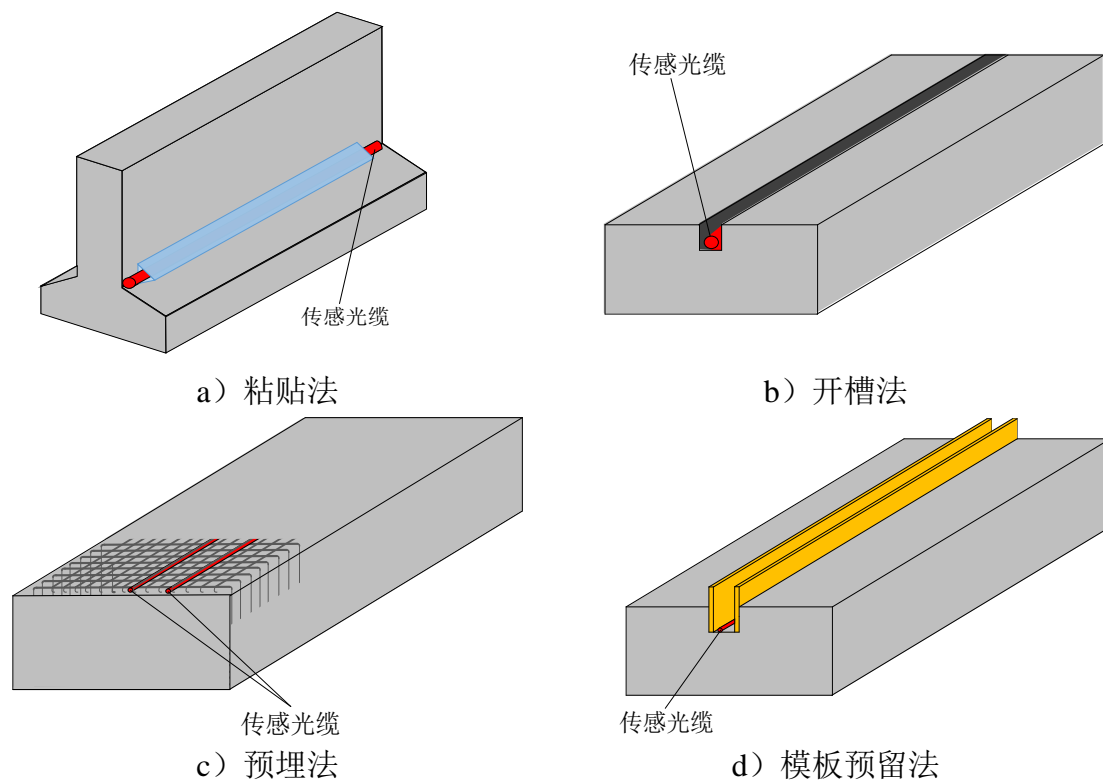


图 1 传感光缆布设方式

5.2.4 利用粘贴法对光缆进行安装时，需先对结构表面进行清理。对于混凝土结构，宜事先去除表面碳化层；对于钢结构，宜事先去除表面氧化层，再涂抹底胶，保障连接的耐久性。传感光缆粘贴可采用环氧树脂类粘接剂；粘接剂应满足以下几个特点：韧性好、抗腐蚀、无溶剂、粘度高。

5.2.5 利用开槽法对光缆进行安装时，需要预先准备开槽机，对结构表面进行开槽，然后再浇筑填充材料，保障光缆连接的牢固性和耐久性。

5.2.6 利用预埋法对光缆进行安装时，绑扎于钢筋上的光缆，要适当留有放松段，否则施工、养护阶段混凝土与钢筋将出现相对位移，导致光缆断裂。

5.2.7 利用模板预留法对光缆进行安装时，需要在结构设计图纸中合理规划光缆的布设位置，保证传感光缆监测数据信息的有效性。

5.2.8 传感光缆在布设过程中，难以保证光缆全程保持笔直状态，因此需要每隔一段布设距离记录结构位置与光缆米标，确保在后续长期监测过程中能准确定位结构异常位置。

5.2.9 记录特殊点米标的目的在于：

- 1) 在采集数据中准确找到结构监测开始与结束点；

2) 在采集数据中准确找出温度补偿段数据；

3) 在采集数据中准确找出非结构监测数据，使数据与结构位置一一对应。

5.2.12 光纤熔接时，影响光纤连接质量的因素较多，若光纤端面出现斜角面、圆角面、粗糙面等情况；或者光纤连接时存在横面交错、面面夹角、间隙等情况，都将导致光损过大，连接失效。

6 系统集成与调试

6.1 一般规定

6.1.1 为了保障系统集成的简便高效，提高人机交互的效率，应根据使用要求独立开发用户操作软件，且应对用户操作具备适当的提醒和容错机制。

6.1.2 系统集成的通信与传输网络，可采用多种拓扑结构，包括：结构群与结构群之间、结构群与单体结构间、传感网络与数据采集设备之间、同级的数据处理终端之间等。

6.2 系统集成

6.2.4 系统集成宜采用基于互联网的 B/S 架构，方便现场的技术人员、桥梁维护的管理者和决策者在内的多用户进行远程实时控制。

6.3 数据采集与处理

6.3.2 数据采集设备选择应按下表中要求进行选择：

表 4 数据采集设备技术要求

信号类型		传感光信号	通讯信号
设备类型		调制解调仪	
性能设计	主要考察指标及规格	接口标准	
		输入范围	√
		采样频率	√
		通道状况	√
		数据容量	√
		分辨率	√
		精度	√
		重复性	√
		传输率	√
		传输距离	
	在线模式	√	
可靠性设计	使用寿命	符合监测系统的具体要求	
	数据校准功能设计	自校准	优先采用
		定期人工校准	按需采用
抗电磁干扰设计	串模干扰抑制		

		共模干扰抑制
环境适应性设计	工作温度	符合监测系统的具体要求
	防护功能	高低温保护
		抗冲击和振动
		防潮湿和防盐雾
安全	必要安全防护	

6.3.3 数据采样频率应能够反映被测结构的行为和状态，并满足监测数据的应用条件。

6.3.4 数据采集软件应按下表内容进行设计：

表 5 数据采集软件技术要求

设计类目		基本要求	说明
质量检查	时间状态和同步	应可联网进行时间同步性校验	各测点采集数据的时间同步性一致，能保证数据实时性
	网络状态	应可进行传输质量校验	保证各级硬件间数据传输的准确和可靠
	传感光纤状态	应可检查光纤是否有断点，能否正常采集数据	保证光纤传感网络正常工作
软件性能	硬件数据接口适应性	宜可对上下级硬件设备进行指令控制	宜满足监测系统对采集设备自动化、批处理等的要求
		宜可对上下级硬件设备数据接口自适应匹配	宜开发针对各级设备的数据接口
	参数配置	宜可对上下级硬件设备进行采集模式、阈值、采样频率等参数的设置	宜符合监测系统对采集数据的具体要求
		各级采集硬件应可通过配置文件、配置信息数据库实现传感光纤和设备参数设置的共同配置	参数配置信息应可在各级设备间共享或同步配置，方便数据的导入和导出
		参数设置应包括采集设备运行与关闭以及阈值、定时等触发方式的设置	宜能适应非全时采集方式的需求
	采集指标	采样频率、分辨率、精度、范围等应符合要求	宜符合监测系统对采集数据的具体要求
	实时绘图	绘制监测信号的实时曲线	宜能绘制监测信号的时域曲线
信号调理与预处理	对信号进行符合监测要求的调理、预处理	宜设置阈值法、平均值法以及其他滤波方法	
预警管理	传感光纤异常 信号数据异常 设备异常	应根据监测系统需求和评估，预设合理的预警模式	可采用阈值预警法，阈值宜按监测和评估需求设立，并可根据实际情况进行调整，同时应

			保证预警信息能送达用户
易用性	人机交互设计	应设计简便高效的人机交互方式，且应对用户操作有适当的提醒和容错机制	建议针对不同用户设计多版本的终端软件
	数据分析	宜具备部分后端数据分析处理系统的功能，或留出便利的数据接口	建议集成数据分析系统的如前处理、除错、粗略判断等功能
性能效率	登录时间	软件登录时不卡顿	用户登录时间应小于 1 秒钟
	页面切换	页面切换时不卡顿	软件页面切换响应时间应小于 2 秒钟
	数据查询	数据查询操作时不卡顿	数据查询响应时间应小于 5 秒钟
	数据分析	数据分析操作时不卡顿	数据分析响应时间应小于 15 秒钟

6.3.5 在利用采集得到的数据计算被测结构的温度与应变之前，需按下表要求对数据进行处理：

表 6 数据处理项目及方法

处理项目		处理方法	
粗差、异常点		应判断异常点产生原因，剔除系统自身的粗差	
误差	偶然误差	宜用平均值法消除	
	系统误差	宜修正仪器	
滤波降噪		平均值法	静态监测宜采用平均值法；动态监测宜按需设置各类滤波器。
		低通滤波	
		高通滤波	
		带通滤波	
		其他滤波	
去趋势项		按需进行	
截断		应截选离散非时限信号有限时长内的数据样本进行处理	

6.3.7 对式 (6.3.7) 进行进一步解释：

常用的光缆一般由内到外可以分为光纤、内保护层、刚性层、外保护层共四层，式 (6.3.7) 中获得的应变监测数据应考虑光纤保护层的影响。对于预埋法施工的光纤，光纤测得的应变与结构实际应变的比值可以通过下式计算：

$$\frac{\varepsilon_f(x)}{\varepsilon_m(x)} = 1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{k^2} = & \frac{1}{G_i} \left[\frac{E_f r_f^2 - E_i r_i^2}{2} \ln \frac{r_i}{r_f} + \frac{E_i (r_i^2 - r_f^2)}{4} \right] \\
& + \frac{1}{G_s} \left[\frac{E_f r_f^2 - E_s r_s^2 + E_i (r_i^2 - r_f^2)}{2} \ln \frac{r_s}{r_i} + \frac{E_s (r_s^2 - r_i^2)}{4} \right] \\
& + \frac{1}{G_o} \left[\frac{E_f r_f^2 - E_o r_o^2 + E_i (r_i^2 - r_f^2) + E_s (r_s^2 - r_i^2)}{2} \ln \frac{r_o}{r_s} + \frac{E_o (r_o^2 - r_s^2)}{4} \right]
\end{aligned} \quad (2)$$

式中： f ——表征光纤；

i ——表征内保护层；

s ——表征刚性层；

o ——表征外保护层；

E ——弹性模量

G ——剪切模量

r ——外边界距光纤轴心的距离；

x ——光纤某点的轴向坐标；

L ——光纤埋置长度；

$\varepsilon_f(x)$ ， $\varepsilon_m(x)$ ——分别为光纤测得的应变和结构实际应变。

对于粘贴法施工的光纤，光纤测得的应变与结构实际应变的比值可以按照下式计算：

$$\frac{\varepsilon_f(x)}{\varepsilon_m(x)} = \left(1 - \frac{\cosh(k_1 x)}{\cosh(k_1 L)} \right) \left(1 - \frac{\cosh(k_2 x)}{\cosh(k_2 L)} \right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{k_1^2} = & \frac{1}{G_o} \left(\frac{E_s A_s}{2\pi} \ln \frac{r_o}{r_s} + \frac{r_o^2 - r_s^2}{4} E_o - \frac{r_s^2}{2} E_o \ln \frac{r_o}{r_s} \right) \\
& + \frac{1}{G_a} \left\{ \left[\frac{E_s A_s}{D_a} + \frac{E_o \pi (r_o^2 - r_s^2)}{D_a} - E_a r_o \right] (r_a - r_o) + \frac{r_a^2 - r_o^2}{2} \right\}
\end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{1}{k_2^2} = \frac{1}{G_i} \left[\frac{(E_f - E_i) r_f^2}{2} \ln \frac{r_i}{r_f} + \frac{E_i}{4} (r_i^2 - r_f^2) \right] \quad (5)$$

式中： A_s ——刚性层横截面面积；

D_a ——粘贴横截面宽度。

6.3.8 在使用基于数据驱动的正常诊断算法进行结构损伤识别时，可利用结构健康状态下的损伤特征构建损伤诊断指标并定义异常诊断阈值，待诊断状态下损伤诊断指标超过阈值即被判断为异常。

在使用结构健康状态的损伤特征定义异常诊断阈值时，可采用基于马氏距离的方法。首先计算健康状态损伤特征的马氏距离作为损伤诊断指标，如下式所示：

$$\gamma_h = \sqrt{\text{diag}(\mathbf{g}) \left[(\mathbf{R}_h - \bar{\mathbf{R}}_h) \mathbf{C}_h^{-1} (\mathbf{R}_h - \bar{\mathbf{R}}_h)^T \right]} \quad (6)$$

式中： γ_h ——健康状态下的损伤诊断指标；

\mathbf{R}_h ——健康状态下损伤特征矩阵；

$\bar{\mathbf{R}}_h$ ——健康状态下损伤特征的均值矩阵；

\mathbf{C}_h ——健康状态下损伤特征的协方差矩阵。

异常诊断阈值可通过区间估计的置信度定义如下：

$$\eta = \partial \cdot \{\gamma_h\}_{95\%} \quad (7)$$

式中： η ——异常诊断阈值。

∂ ——保证系数，该数值根据具体结构的监测数据而定，可取 1.2；

$\{\mathbf{g}\}_{95\%}$ ——取统计数据 95% 置信概率的分位数。

在此基础上，比较待诊断状态下损伤诊断指标与阈值，进而完成损伤识别。待诊断状态下损伤诊断指标如下所示：

$$\gamma_d = \sqrt{\text{diag}(\mathbf{g}) \left[(\mathbf{R}_d - \bar{\mathbf{R}}_h) \mathbf{C}_h^{-1} (\mathbf{R}_d - \bar{\mathbf{R}}_h)^T \right]} \quad (8)$$

式中： γ_d ——待诊断状态下的损伤诊断指标；

\mathbf{R}_d ——待诊断状态下损伤特征矩阵。

另外一种异常诊断阈值定义方法为休哈特控制图法。其基本思想是：针对正态分布数据中的小概率事件，制定相应的阈值。假定损伤特征样本 \mathbf{E} 服从正态分布 $E \sim N(\mu, \sigma^2)$ ，当显著性水平为 α 时，任意 l 个误差样本的均值 \bar{E} 服从正态

分布 $E \sim N(\mu, \sigma^2 / l)$ ，概率表达式可如下式所示：

$$P\left(\frac{\bar{E} - \mu}{\sigma / \sqrt{l}} < \psi_{\alpha/2}\right) = 1 - \alpha \quad (9)$$

式中： μ ——损伤特征样本的总体均值；

σ ——损伤特征的总体标准差；

$\psi_{\alpha/2}$ ——标准正态分布上的 $\alpha/2$ 分为点。

当显著性水平为 α 时，损伤特征样本均值 在统计学意义上的取值范围为：

$$\mu - \psi_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{l}} < \bar{E} < \mu + \psi_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{l}} \quad (10)$$

除此之外，还可利用极值统计、似然比检验等其它基于概率的方法进行结构的异常诊断。

在利用应变监测数据进行结构损伤识别时，可采用模式识别方法，进行结构损伤的判别、定位以及损伤程度的计算。

常用的处理应变监测数据的模式识别方法可分为有监督的方法和无监督的方法。有监督的方法主要包括：线性回归、非线性回归、支持向量回归、自回归等回归方法和朴素贝叶斯、支持向量机、决策树、人工神经网络等分类方法。常用的无监督的方法主要包括：**K** 均值聚类、层次聚类、模糊聚类、遗传算法等聚类方法和相关分析方法等。

在采用静力荷载法进行结构损伤识别时，某点实测应变值与理论计算值的比值明显大于其它测点该比值时，可判断该位置发生损伤；同时，通过比较损伤位置与其它监测位置该比值的大小，可评估结构损伤的程度。

当温度可观测时，可采用多元线性回归、支持向量回归或人工神经网络等方法分离其成分；当温度不可观测时，结构响应中的温度成分可被看成潜变量，并由主成分分析、因子分析、非线性主成分分析、盲源分离等潜变量分析方法进行提取。下面简要介绍当温度可观测和不可观测时的多元线性回归方法、BP 神经网络和主成分分析方法。

多元回归方法即建立多个自变量与一个因变量的关系，该方法可建立温度应变关系模型。考虑到一个测点的应变是由多个测点的温度和温差共同影响，且应

变与多个测点的温度及温差具有相关关系,因此,可将结构温度及温差作为输入,将应变响应作为输出。通过给定的训练样本集 $D = [\boldsymbol{\varepsilon}_h, \mathbf{T}, \Delta\mathbf{T}]$, 采用多元回归分析建立输入和输出的模型如式 (11) 所示:

$$\varepsilon^*(T, \Delta T) = \sum_{i=1}^w (\alpha_i \cdot T_i + \beta_i \cdot \Delta T_i + c_i \cdot T_i^2) + b \quad (11)$$

式中: w ——监测点数;

α_i ——各测点温度所对应的拟合系数;

β_i ——各测点温差所对应的拟合系数;

c_i ——各测点温度的二次方所对应的拟合系数;

b ——常数项。

在此基础上,可计算拟合应变值与实测应变值的残差如下式所示,残差可认为不受温度变化的影响。

$$\mathbf{R}_h = \boldsymbol{\varepsilon}_h - \boldsymbol{\varepsilon}_h^* \quad (12)$$

BP 神经网络是一种按误差拟传播算法训练的多层前馈网络,它有输入层、输出层和隐含层组成。BP 网络模型将一组样本的输入输出问题变成一个非线性优化的问题。由于分布式布里渊光纤采集得到结构各个位置的应变和温度监测数据,它们之间存在非线性关系,因此,利用 BP 神经网络可有效建立多测点应变与温度监测数据的关系模型,进而有效剔除温度影响。

为利用 BP 神经网络建立结构应变与温度监测数据的关系,将监测样本集合 Φ 定义如下:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{\text{input}} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{output}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{T}_{\text{input}}$ ——温度监测样本,将其作为 BP 神经网络的输入层样本集;

$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{output}}$ ——应变监测样本,将其作为 BP 神经网络的输出层样本集;

将输入层与输出层样本集代入 BP 人工神经网络进行训练,建立输入层与输出层样本集之间的关系模型,如下式所示

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{output}} = L(\mathbf{T}_{\text{input}}) + \boldsymbol{\delta} \quad (14)$$

式中： $L(g)$ ——BP 神经网络的输入层与输出层之间的函数关系模型；

$\boldsymbol{\delta}$ ——参考状态下 BP 神经网络的残差矩阵，该残差可认为不受温度变化的影响。

主成分分析是一种多元统计方法，该方法对于消除结构损伤诊断时的环境温度影响效果很好。首先构造中心化处理后应变 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ ，并对该协方差矩阵进行特征值分解，如式（15）所示：

$$\boldsymbol{\Sigma} = \frac{1}{e-1} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^T \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{P} \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{P}^T \quad (15)$$

式中： $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ —— $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的中心化处理结果；

$\boldsymbol{\Lambda}$ ——协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的特征值矩阵，为对角矩阵；

\mathbf{P} ——协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的特征向量矩阵，为正交矩阵。

$\boldsymbol{\Lambda}$ 矩阵中特征值越大，其对应的主成分反应样本信息量越多，利用该特点将特征向量矩阵 \mathbf{P} 分成两部分，如式（16）所示

$$\mathbf{P} = [\mathbf{P}_1 \quad \mathbf{P}_2] \quad (16)$$

式中： \mathbf{P}_1 ——特征值排序较大部分对应的特征向量，为剔除温度对结构应变变化分量， \mathbf{P}_1 一般取第一阶主成分；

\mathbf{P}_2 ——除 \mathbf{P}_1 之外的其余特征向量。

在此基础上，利用下式即可计算出剔除温度影响的应变残差矩阵 \mathbf{R}

$$\mathbf{R} = \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_1^T \boldsymbol{\varepsilon} \quad (17)$$

在利用应变监测数据进行结构损伤识别时，宜利用原始数据提取对结构损伤敏感而对环境与运营荷载变化不敏感的损伤特征。

利用高密度应变监测数据提取的对环境与运营荷载变化不敏感的特征指标主要分为：统计特征、力学特征以及深度学习特征。统计特征可归纳为统计分布特征、统计模型特征和其他统计特征几类。较为通用的统计分布特征有均值、标准差、方差、峰态、斜度、极值、均方根值、分位数等；统计模型特征由统计建模的参数得到，例如由自回归模型定义的自回归系数、自回归系数的距离度量、

自回归残差等；其他类型的统计特征包括由相关性分析、主成分分析等方法获得的特征。

力学特征是在应变监测指标基础上由力学理论构建的特征，与其他类型的特征相比，力学特征受环境因素的影响程度更小。可提取的力学特征主要有曲率、中性轴、索力比、应变影响线等。获得中性轴和曲率的方法可通过如下方法：

在被测结构截面不同高度上分别布设应变光缆，利用应变比例关系或应变-高度坐标点可直接求解中性轴位置，即应变为零的位置，如下式所示：

$$h = \frac{|\varepsilon_1|}{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|} d \quad (18)$$

式中： ε_1 ——上部光缆的的监测应变；

ε_2 ——下部光缆的监测应变；

h ——上部光缆距离中和轴的高度；

d ——上部光缆和下部光缆之间的距离。

在此基础上，依据应变和对应的中和轴高度可计算曲率，如下式所示：

$$\phi = \frac{\varepsilon_1}{h} \quad (19)$$

深度学习特征主要指利用海量高密度应变监测数据提取的被测结构的复杂、非线性特征，可采用卷积神经网络、深度自编码器、深度限制波兹曼机提取。

6.3.9 在多级预警值设置时，可利用结构健康状态数据，采用统计方法建立的置信区间阈值作为黄色预警值；采用有限元模型计算的结构极限状态数值作为红色预警值。

6.4 系统调试

6.4.1 对本条第 1 款、第 2 款以及第 3 款作如下说明：

1 使用光时域反射仪（OTDR）检测光纤时，宜采用如下三种方法：

- 1) 后向测试法；
- 2) 前向单程测试法；
- 3) 前向双程测试法。

2 光时域反射仪（OTDR）使用前应进行如下参数设置，确保检测精度：

- 1) 测试波长选择：在单模光纤线路测试中，应选用波长为 1550nm；
- 2) 光纤折射率选择：应根据光纤生产厂家提供的实际值来精确选择；
- 3) 测试脉冲宽度选择：应根据被测光纤长度，先选择一个适当的测试脉宽，预测试一两次后，从中确定一个最佳值；
- 4) 测试量程选择：应根据被测光纤的长度选择量程，量程是被测光纤长度的 1.5 倍较好；
- 5) 平均化时间选择：综合考虑测试精度和测试速度，测试时间可在 0.5~3 分钟内选择。

3 使用光时域反射仪（OTDR）检测光纤时，应按照如下步骤：

- 1) 打开光时域反射仪（OTDR）电源，预热仪器；
- 2) 使用酒精棉擦洗尾纤接头，连接待检测光纤与测试仪法兰；
- 3) 启动光时域反射仪（OTDR），测试过程中确保接头连接牢固；
- 4) 测试光纤长度、衰减系数、平均损耗、总损耗、任意两点的损耗及衰减系数、活动接头损耗和熔点损耗等，记录测量数据并计算；
- 5) 分析测试曲线；
- 6) 结束检测，关闭设备电源。

6.5 系统验收

6.5.1 系统验收的项目应包括如下内容：

- 1) 数据采集单元验收。

表 7 数据采集单元验收内容

项次	检查项目	规定值和允许偏差
1	光缆安装轴线偏差	$\leq 5^\circ$
2	光缆弯曲半径	$\geq 5\text{cm}$
3	光缆与结构粘结	可靠粘结
4	光缆连接接头	钢管灌胶保护
5	结构表面	打磨、酒精清理
6	光缆安装施工后外观	美观整洁
7	解调仪读数	数据正常

- 2) 数据传输单元验收。

表 8 数据传输单元验收内容

序号	检查项目	技术要求	检查方法
1	设备安装位置及分布合理性	符合设计要求	长、宽用量具测量，埋深应核查隐蔽工程验收记录或实测
2	机柜的防腐涂层厚度	符合设计要求	量具或涂层测厚仪
3	绝缘电阻	强电端子对机壳 $\geq 50M\Omega$	500V 兆欧表测量
4	安全接地电阻	$\leq 4\Omega$	接地电阻测量仪
5	防雷接地电阻	$\leq 10\Omega$	接地电阻测量仪
6	UPS 安装与性能检测	符合合同要求	实际操作
7	工控机及采集设备检测	工作正常，符合监测或合同要求	实际操作
8	信号调理器检测	工作正常，符合监测或合同要求	实际操作
9	机柜温控（空调）系统	-10℃至 70℃范围内工作正常	实际操作
10	数据传输性能	24 小时观察时间内丢帧（失步）现象不大于 1 次或 BER $\leq 10^{-8}$	查日志或用数据传输测试仪

3) 数据库子系统验收

表 9 数据库子系统验收内容

序号	检查项目	技术要求	检查方法
1	数据存储	符合设计要求	实际操作
2	数据读取	符合设计要求	实际操作
3	数据分析	符合设计要求	实际操作

4) 用户端子系统验收

表 10 用户端子系统验收内容

序号	检查项目	技术要求	检查方法
1	数据调用	符合设计要求	实际操作
2	数据预处理	符合设计要求	实际操作
3	结构状态诊断	符合设计要求	实际操作
4	数据可视化	符合设计要求	实际操作
5	结构风险预警	符合设计要求	实际操作

5) 电缆验收。

表 11 电缆验收内容

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法
1	同轴电缆衰耗	符合设计要求	衰耗测试仪
2	同轴电缆内外导体绝	$\geq 500M\Omega$	用兆欧表 500V 档，在联

	缘电阻		接器的芯线和外导体之间测量
3	信号电缆绝缘电阻	$\geq 500\text{M}\Omega\cdot\text{km}$	用 1000V 兆欧表在线对之间测量
4	信号电缆直流电阻	$\leq 23.5\Omega/\text{km}$	用电桥或电缆分析仪测量
5	电力电缆绝缘电阻	$\geq 2\text{M}\Omega$	用 1000V 兆欧表在配电箱和用电设备两点间测量
6	光电缆埋深	符合设计要求	检查隐蔽工程记录,必要时挖开实测

6.5.2 系统验收人员宜由系统设计单位组织培训,掌握系统的基本概况、各部分的验收方法,并通过考核后方能进行验收工作。