

隧道监测实施方案

深圳市简测科技有限公司

二〇一五年六月

1 光纤光栅传感技术在隧道监测中的应用

重大工程结构(如隧道、桥梁和水坝等)的安全监测一直是国内外工程领域广泛关注的重要研究课题。其常规监测技术多以点式电测方式为主,而用于应变测量的传感元件主要为电阻应变片和钢弦计,但电阻应变片发生的零点漂移会使其长期测试结果失真严重;钢弦计的灵敏度较好,但因钢弦丝长期处于张紧状态,蠕变对其影响较大。此外,常规的电类传感器普遍存在寿命短、测量易受环境影响、易受电磁干扰、不能进行实时在线监测和不能实现分布测量等缺点。但工程结构的渐变性质决定监测系统不仅应具备高精度和长期稳定性,而且要求实时监测数据的准确性以及恶劣条件下测读数据的可靠性。由此可见,常规的电类传感器已逐渐不能满足对重大工程结构安全的长期监测要求。

光纤传感技术是继电测技术之后的新型传感技术。以光波为载体,光纤为媒质,具有抗电磁干扰、动态响应快、灵敏度和测试精度高、耐久性强及可实现远距离实时监测等优点,一些技术还可对结构进行分布式测量。这些优点决定其在工程结构安全监测方面具有很强的竞争力,并在航空航天、船舶、电力、桥梁、堤坝、边坡和隧道等工程结构及岩土工程的监测与诊断中获得广泛应用。

准分布式光纤监测技术的优点及作用:

相较于传统的常规传感器,近几年发展非常迅速的准分布式传感光纤具有显著的优势:有良好的耐久性、抗电磁干扰能力,特别是能够对沿光纤连续分布的环境信息和物理参量进行传感并加以定位,从而实现大范围的连续监测。由于传感光纤的耐久性,除施工期和竣工期起到检测、监测功能外,运营期仍可继续监测结构损伤,评价和诊断结构健康状况并做出相应的维护决策。适合长期实时监测土木工程结构。

2 监测内容

隧道里程长、穿过地质破碎带多,工程区地质构造复杂,拟根据设计单位提供的重点监测原则,重点监测以下部位(根据经验确定,仅供参考):

- (1) 洞口部位 50 米
- (2) 隧道通过山体断层地段

2.1 隧道进出口部位 50 米

对于隧道进出口部位,考虑到围岩较破碎,地质条件较差,应重点加强监测进出口洞口边坡的变形,以避免大的边坡变形引发的滑坡、滚石造成的事故。在左右洞口边坡

处布置两条测线，每条测线 4 个测点，每个测点设置光纤光栅多点位移传感器，实施监测洞口边坡的变形。具体方式见图 2-1。

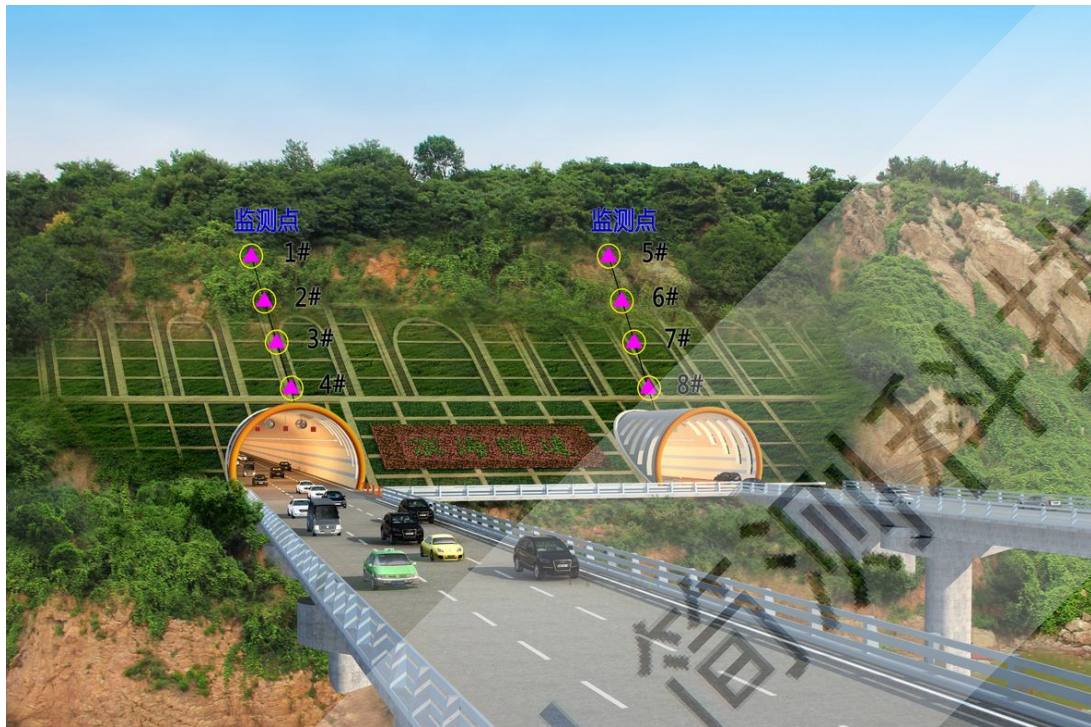


图 2-1 隧道出入口监测方式

2.2 隧道通过山体断层地段

对于通过山体断层的隧道段，初期支护重点监测锚杆受力和钢拱架受力，采用在锚杆表面和钢拱架表面粘贴光纤钢筋计的方式监测初期支护结构受力状态。二次支护重点监测衬砌混凝土应力应变状态及二衬混凝土表面裂缝情况，采用低温敏 FBG 光纤光栅应变传感器监测二衬混凝土内部应力应变状态，采用低温敏 FBG 光纤光栅应变传感器监测二衬混凝土表面应变及开裂情况。隧道典型代表断面（2 车道或者 3 车道）、D 断面具体光纤传感器的布置方式及数量见图 2-2、图 2-3。

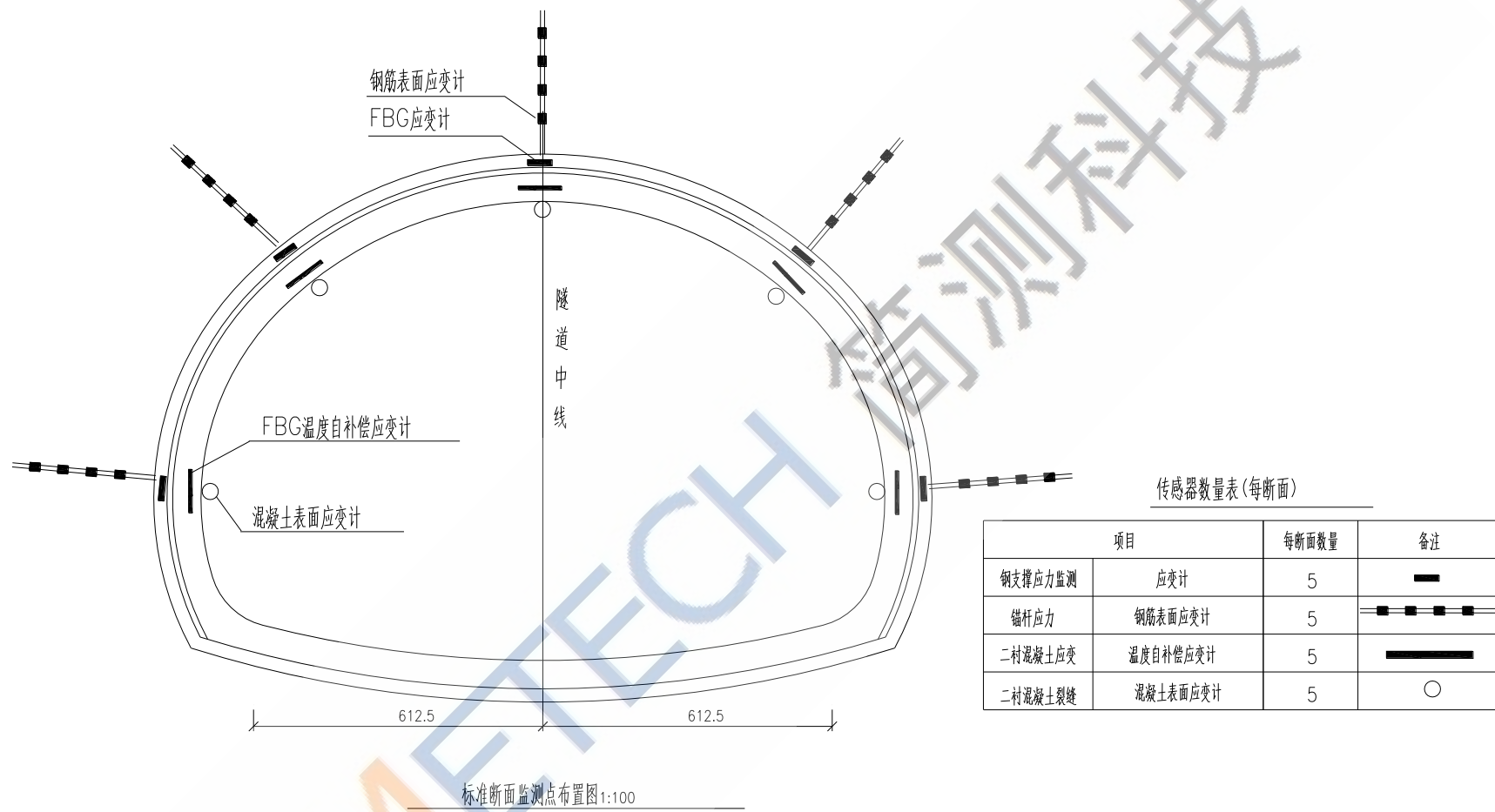
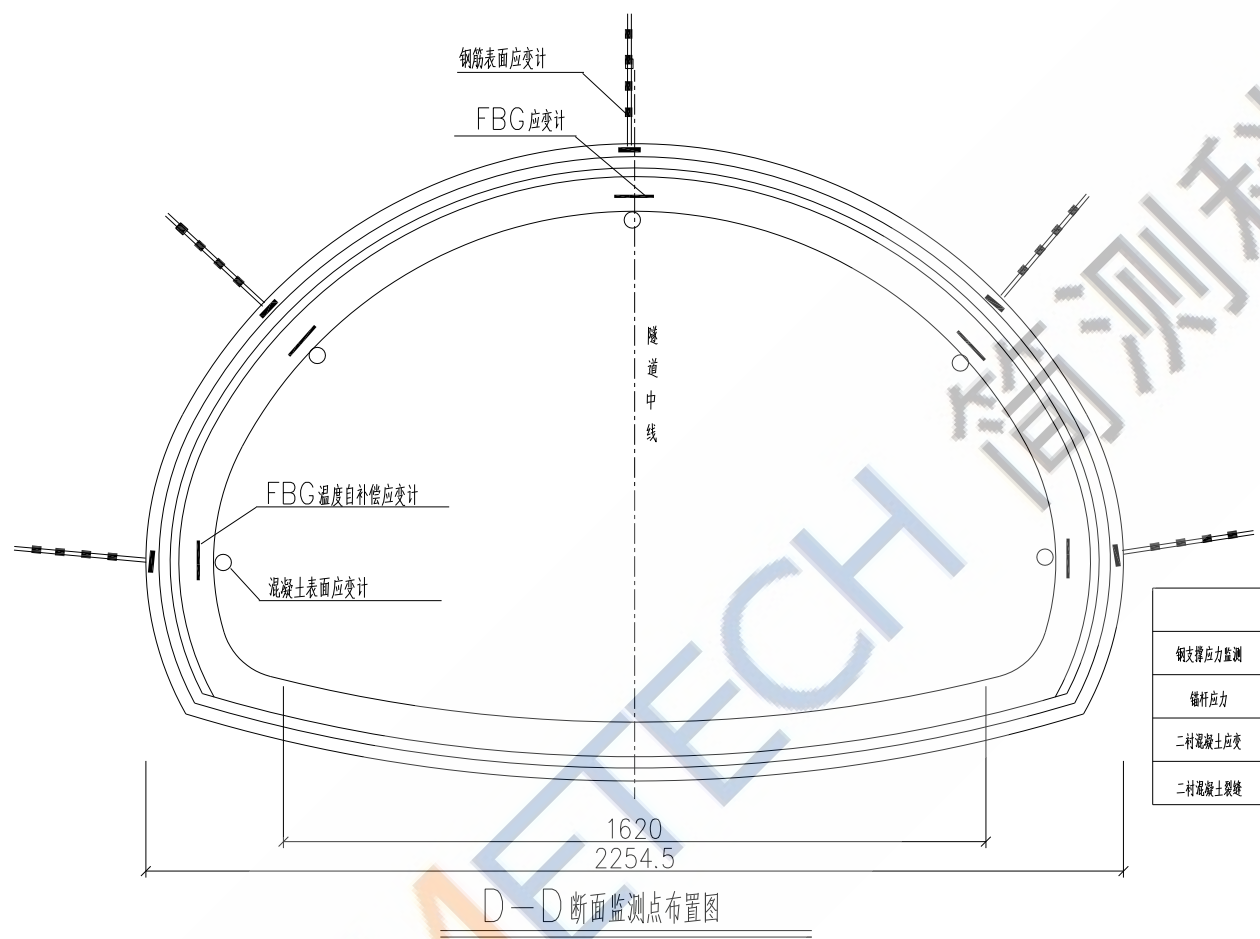


图 2-2 隧道典型代表断面监测点布置图



主要工程数量表(每断面)

项目		每断面数量	备注
钢支撑应力监测	FBG应变计	5	—
锚杆应力	钢筋表面应变计	5	—
二衬混凝土应变	FBG温度自补偿应变计	5	—
二衬混凝土裂缝	混凝土表面应变计	5	○

图 2-3 隧道 D 断面监测点布置图

2.3 光纤光栅传感器及解调系统功能要求

2.3.1 光纤光栅传感器

光纤光栅传感器应具备以下要求：

- (1) 具备增敏或减敏工作机制，灵敏度可调；
- (2) 为低温敏型光纤光栅传感器或温度自补偿型光纤光栅传感器
- (2) 线性相关度达到 0.999 以上
- (3) 波长范围 1510nm~1590nm
- (4) 工作温度-30~120 摄氏度
- (5) 安装支持焊接、粘接、直接埋入

2.3.2 光纤光栅解调系统功能要求

- (1) 通道数量多，同步性高
- (2) 通道信号增益可调节
- (3) 光纤光栅反射光功率须达到-5dBm
- (4) 应支持 80nm 波长解调带宽
- (5) 系统解调应自校准，无需外部波长校准
- (6) 系统应支持远程工作方式
- (7) 系统能适应野外工作环境

3 监测系统

3.1 设计原则

隧道健康监测系统集传感器技术，结构分析计算、计算机技术、通信技术、网络技术等高新技术于一体，为使其成为一个功能强大的系统，能真正长期用于结构损伤和状态评估，满足隧道养护管理和运营的需要，同时兼顾经济和社会效益，现遵循如下设计原则：

- (1) 遵循简洁、实用、性能可靠、经济合理的原则；
- (2) 系统设置首先需满足隧道养护管理和运营的需要，立足实用性原则第一，兼顾考虑科学试验和设计验证等方面因素。

(3) 根据结构易损性分析的结果及养护管理的需求进行监测点的布设。

(4) 监测与结构安全性密切相关内容，主要监测一些有代表性的结构、必须进行监测的重要结构以及日常养护无法检查或检查非常困难的结构响应。

(5) 从应力、温度、变形、耐久性等方面对结构进行监测，力求用最少的传感器和最少的数据量完成工作。

3.2 系统体系结构

整个系统分为数据采集、数据分析和数据管理三大部分，将传统的分散、异构、分级的传感数据采集业务架构整合替换为物理分散、逻辑集中的数据中心架构，将不同地点、不同时期、不同规模的传感数据采集点整合为一个统一的信号“逻辑资源池”，实现统一分析、统一管理、统一监测、统一呈现。系统的体系结构如下图 3-1 所示：



图 3-1 系统体系结构图

根据现场采集的情况，大致分为三个模块：信号采集模块、信号解调模块、数据存储、分析与显示模块。首先是数据采集模块在工程现场采集到传感器信号，然后把信号通过解调模块生成实时监测数据传送到服务器，送入数据库进行分析和分类存储，对传感器信息进行显示和分析，满足用户的需求。

3.2.1 信号采集模块

信号采集为硬件系统，功能为感知结构的荷载和效应信息，并以电、光、声、

热等物理量形式输出，该模块是健康监测系统最前端和最基础的子系统，主要作用是获取结构工作状态的荷载及响应信号。针对隧道监测，数据量最大的为结构应变、温度，因此对主要的光纤光栅应变、温度传感器应具备以下要求和特点。

- (1) 采用独特封装工艺有效的消除了胶粘剂对传感器应变传递的影响；
- (2) 通过调节封装工艺中的参数，可以改变传感器的应变灵敏度系数；
- (3) 兼有细径管保护式和夹持式的优点，既可以直接埋入结构中也可以通过辅助构件构成夹持式传感器；
- (4) 具备增敏或减敏工作机制，可定制灵敏度；
- (5) 可根据工程需求灵活定制量程、分辨率和规格尺寸；
- (6) 用于工程结构表面安装时可重复利用；
- (7) 可根据工程需求灵活定制不同形状的传感器支座；
- (8) 具备温度自补偿功能，采用封装工艺将光纤光栅温度传感器与应变传感器结合在一根传感器封装体内，有效消除温度场不均匀造成的温度补偿误差；
- (9) 无需改变封装工艺，仅仅通过调节夹持部件距离，即可灵活改变应变传感器的应变灵敏度系数；

3.2.2 信号解调模块

针对监测中的传感器种类多、数量大、分布广、信号测量精度和同步性要求高、信号分析处理实时性强的需求，本项目拟采用基于 PAC 平台的嵌入式硬件平台架构，选择一种多信号采集解调系统，实现对不同传感器原始信号的有效采集。主要功能如下

- (1) 基于 FPGA 逻辑门阵列的实时信号采集、滤波和频域计算等，实现了无延时、高速、分布式的信号实时采集处理分析功能；
 - (2) 实现多路光通道间同步采集，实现多终端设备的精准同步采集；
 - (3) 基于波长扫描型光纤激光器的光纤光栅解调模块，可以满足结构健康监测的大容量、多通道、光信号解调动态范围大以及通道间同步解调的需求
- 光纤光栅解调仪具体参数要求见表 1。

表 1 传感信号综合同步解调仪具体参数

光路数量	15
波长范围	1510~1590nm

精度	1pm
稳定性	±2pm
光源	波长扫描型光纤激光器
光纤光栅反射光功率	-5dBm(Max)
动态范围	50dB
弱信号增益	20dB
扫描频率	2Hz
通道间同步采集	是
光学接头	FC/APC
光谱功能	全光谱
电源供应	19~30VDC
数据传输接口	以太网
功率	20W
工作温度	-20~55℃

3.2.3 数据存储、分析与显示模块

对于大型结构安全运营远程监测与实时预警系统，该系统具有以下特点：

(1) 多信号实时同步采集

系统在一个 CompactRIO 机箱中同时使用光纤光栅解调模块和电类传感器调理模块，在上位机中同时同步显示多种信号，实现随时调用目标传感器。实时同步采集技术，对分析结构刚度、阻尼比、地震动响应、基准频率、高阶频率、荷载-位移等特性具有重要意义，为结构损伤识别和安全性评估提供宝贵的数据参考。

(2) 数据自动存储：

该系统的数据存储方式与以往相比具有较大不同，改变了以往人为操作触发存储的方式，存盘开始时间、结束时间、文件保存方式均作了存盘触发判断，均由系统自动识别完成。

该系统为数据存储路径做了特别设计，除用户指定的基本存储路径外，系统将按年-月-日-系统时间的顺序逐级建立子目录，保证文件不会被覆盖和重名，同时也方便用户在海量数据文件中调用需要的文件，如图3-2所示。

文件名配置

文件路径

D:\FBG Data

数据存储间隔

1

文件名

☒ 自动文件名

☐ 自定义

自定义文件名

test

数据存储设置参数

开始

Immediate

00:00:00

结束

☐ 固定时间长度

☒ 无限制

0

Null

采集参数

☒ 单一文件连续存储

☐ 自动更换文件名

存储长度

0

Seconds

图 3-2 系统数据存储设置

(3) 自动生成报表：

针对项目需要，为本系统设计了自动生成报表功能，日期发生改变时，自动建立 excel 报表文件。文件中加入了分析算法，自动分析数据，形成可视化的图表，形象的反应结构安全状态。系统每天会以 E-mail 电子邮件的方式自动发送生成的报表文件，实现高度自动化的实时监测。

(4) 多途径自动报警功能

该系统设计了多个结构安全指示灯，当结构某一部位发生危险时，该指示灯显示为红色，表示结构处于危险状态，需要启动相应的应急预案。该指示灯能正确表征结构发生危险的部位，对结构的维护、加固、抢修具有指导意义。报警信息通过手机短信和E-mail电子邮件的方式发送（如图3-3所示），保证了重要报警信息的及时性。

- 控件指示灯
- 手机短信
- E-mail 电子邮件



图3-3 系统报警机制

4 监测系统施工工艺

该监测系统安装施工工艺流程图如下所示，应严格按照工艺流程进行操作，确保监测系统安装无误：



图4-1施工工艺流程图

光纤光栅传感器为精密传感器，如现场环境恶劣以及安装保护措施不到位，将会严重破坏传感器及信号传输线缆，最终导致传感系统失效。光纤本身抗剪性能较差，出现较大弯折后信号衰减明显，光缆破坏后熔接操作难度大，因此要求制定适合在光纤光栅传感器的布置安装和光缆敷设方面合理有效的施工工艺来约束施工方法，保护传感系统，确保传感系统健康稳定运行。光纤光栅传感器安装施工特点如下：

（1）光纤光栅传感系统与传统传感系统相比，工程造价更低。光纤所用材质为玻璃纤维，不含金属成分，因此光缆价格比普通电缆价格更具优势。

（2）施工简单高效。光纤光栅传感器的固定方法灵活，可适用于多种情况的结构健康监测。光纤光栅传感器的固定方法有：1、粘接，直接粘结在结构表面；2、夹持粘接，通过夹持装置粘结在结构表面；3、夹持焊接，通过夹持装置

焊接在结构表面。传感器夹持装置可以根据不同需求采用不同的材质和形状。光缆重量轻，传输信号损耗小，布线施工方便灵活，施工成本低。结构健康监测中的传感器安装和线路敷设与弱电施工有所不同，存在交叉施工的现象，因此需要对光纤光栅传感器和线路进行保护。施工工艺采用必要的措施对传感器和线路进行保护，有效避免了传感器和线路的意外损坏。

(3) 低能耗、无污染。光纤光栅传感器无须电力驱动，信号由采集设备发出，并由采集设备进行解调，设备运行功率低至20W。安装传感器夹持底座时，如需焊接，则可以采用普通焊接设备，焊接工艺操作简单易行，功耗低。传感系统施工过程噪音低，不会产生粉尘或有害气体，不会对环境造成污染。光纤光栅传感信号采集系统体积小，布置灵活，节约空间。

4.1 光纤光栅传感器安装

根据光纤光栅传感器的特点、监测周期和待测结构的表面特性选择合适的安装方式。光纤光栅传感器的安装方式分为粘接和焊接，两种方法都是借助于传感器夹持底座来固定传感器。在短期监测和结构表面不允许焊接的情况下选择粘接，在钢结构表面允许焊接的情况下优先选择焊接，以保证焊接的夹持底座更耐久，所测的数据更精确。钢结构的组成构件可以分为梁、板、柱以及杆件。结构表面的几何形状分为弧面和平面两种。若将传感器固定在不统一的钢结构表面上需要借助不同的传感器夹持底座。如图4.2~5所示：



图4-2平面固定方式（粘接）

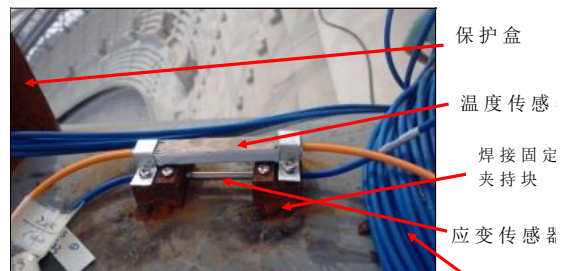


图4-3圆弧表面固定方式（焊接）

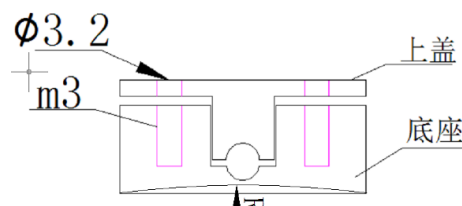
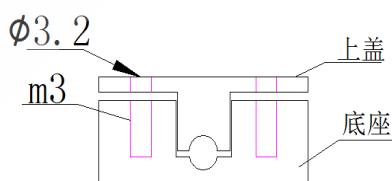


图4-4平面用加持底座示意图

图4-5圆弧表面加持底座示意图

由图4-4、5所示，圆弧表面弧度并不一致，通过改变半径（R）来适应不同圆弧表面的要求。

光纤光栅传感器安装操作要点如下：

（1）传感器安装夹持装置底座和盖板的制作需要选择精度高的线切割加工，保证加工精度。传感器夹持块的制作需要预留装配间隙，将传感器夹紧。设计传感器夹持装置时，应充分考虑装配公差。夹持块通常采用45#钢，其强度、硬度和可加工性非常适合夹持块的制作。装配图如下：

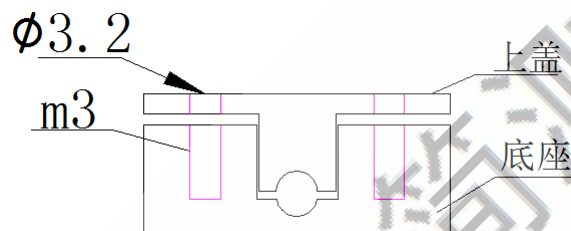


图4-6夹持块装配示意图

焊接夹持块时，需要控制焊接变形，保证同轴度公差小于0.02。依据JGJ81-2002《建筑钢结构焊接技术规程》的规范要求对传感器底座进行焊接，传感器底座现场焊接采用手工电弧焊，采用三角焊缝焊接，焊缝为三级（外观等级为二级）。

（2）定制光缆通常选用成品光纤线缆。根据现场实际情况和监测方案制定光缆长度和规格，由工厂进行加工和光纤接头制作。由于现场施工环境和条件有限，为确保光缆质量，尽量避免现场临时焊接光纤接头。

（3）结构健康监测所选用的工程材料应符合国家标准，应对每一批次材料进行质量抽查，严把质量关，确保材料质量合格。

（4）专业施工人员培训：施工人员在现场条件成熟后培训进场，开始具体环节的施工作业。施工人员选用固定的施工队伍，熟悉结构健康监测各个关节。施工进场前，针对具体工程的实际特点，须重新对施工人员培训方可进入施工作业，同时强调施工重点和注意事项，做到交底清楚。为保证施工质量，采用工程追责制度，明确工程责任。对于专业性强的施工环节，施工人员须持证上岗。

（5）结构健康监测施工的进场需要和相关的甲方负责人、监理负责人以

及存在交叉作业的各专业施工队相关人员建立沟通机制。各单位相互配合、及时沟通才能保证各项施工程序顺利进行。

(6) 光纤光栅传感器安装：将应变传感器预拉伸到统一数值后夹紧，拉紧力度通过传感器应变值和砝码双重验证和控制。将传感器接入采集设备，对其施加统一的预拉紧力，预拉紧力由砝码控制，监测传感器应变，精确控制预拉紧力和传感器应变变化。预拉紧力达到设计要求时，采用夹紧装置将传感器夹紧，撤去外力(砝码)观察应变值是否不变，否则认为夹紧失效，应重复预拉伸操作。无条件精确控制情况下，同样可以采用手动预拉伸后夹紧的简单操作，可按一个鸡蛋的重量（0.5牛）的力度控制即可。将预拉伸后并夹紧的传感器安装在夹持底座上，夹持底座的焊接距离以及弧面的同轴度要求精确控制，保证传感器顺利的安装。如图所示：



图4-7 拉伸完成的传感器



图4-8 预拉伸夹持装置

传感器为精密仪器，撤去夹持装置时，避免对传感器和夹持装置施加太大的外力，安装过程注意对传感器进行保护。传感器安装完成完毕。如图4-9所示：



图4-9 撤去夹持装置

(7) 焊接传感器夹持装置的关键点是需要保证两个夹持块中心线的同轴度和间距。为保证连接夹持块中心线的同轴度和间距，设计了高强度的夹持底座定位装置。将该装置与夹持块装配完成后，焊接或者粘接在结构表面。

(8) 传感器保护：针对现场复杂的施工条件，设计了传感器保护盒，将其安装在传感器上方，保护传感器免受外界伤害同时也可以把留余的光纤安置在内。如图所示：

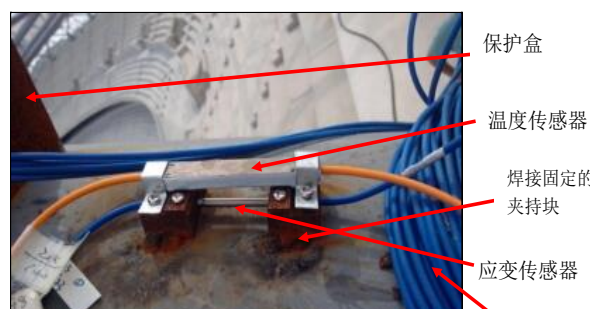


图4-10 传感器保护盒内部

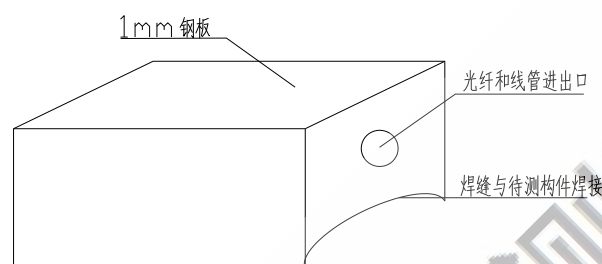


图4-11光纤光栅传感器保护盒示意图

(9) 分支光纤敷设采用穿线管对线缆进行保护。穿线管采用铝塑PPR管，其强度和韧性能够满足穿线需求，能够抵抗施工过程中的碰撞、拉伸和弯折，同时可以随意弯曲便于敷设光纤时绕过障碍物，其造价合理，成本控制压力相对合理。铝塑PPR管与传统的穿线铁管和波纹管相比，铁管虽然强度高，可抵挡交叉施工过程的破坏，但弯曲困难，遇到障碍物时绕行方案复杂，接头部位容易使光纤弯折过大，价格也相对较高。波纹管虽然可弯曲且价格低廉，但其强度低，容易损坏。总光缆通常采用两端封装的多芯光缆，总光缆敷设时，不应在线槽内拖行，要将光缆按顺序放入线缆桥架中，拖行会使端头受力过大从而损坏光纤和端头的封装。

4.2 综合布线

在工程中应用的线缆最好先测量精准的使用长度然后让生产厂家定做加工，减轻现场焊接和制作接头的难度，确保线缆的质量。线缆长度要精确测量，并留有一定的余量，防止突发情况导致线缆长度不够。通讯线缆的敷设分为分支光纤敷设以及汇总的线缆敷设。系统布线示意图如下所示：

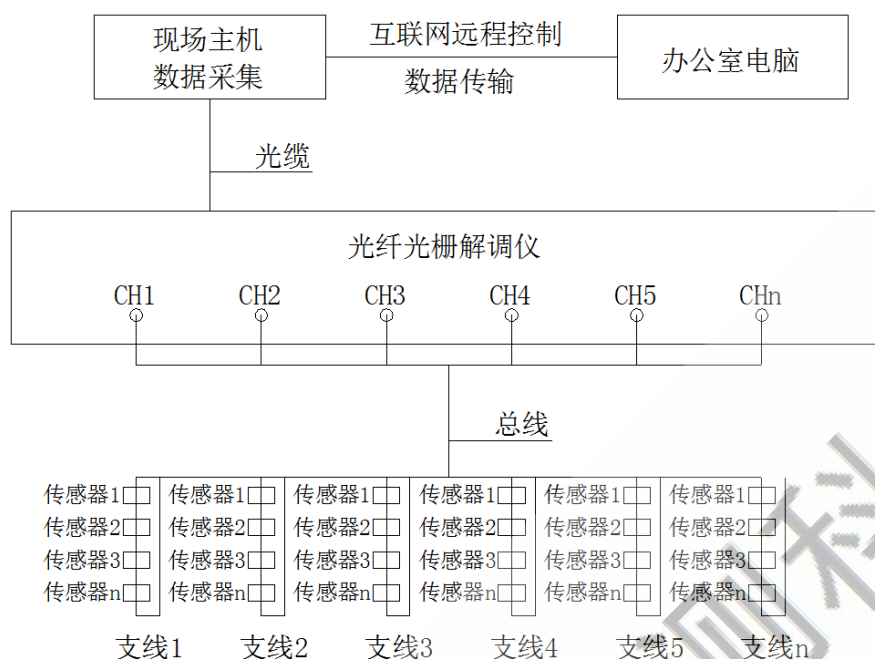


图4-11系统布线示意图

4.3 质量控制

4.3.1 易出现的质量问题

- （1）传感器安装定位偏差，数据不能正确反映结构变化情况。
- （2）传感器和线缆受到施工破坏。
- （3）焊接传感器夹持块底座引起位置偏移。
- （4）焊接部位对钢结构防腐漆膜造成破坏。
- （5）光纤端头和耦合器受到污染。
- （6）线缆敷设过程中出现弯曲半径过小。
- （7）性能调试过程传感器信号异常。

4.3.2 保证措施

（1）钢结构待测杆件传感器夹持块底座安装定位存在偏差，主要取决于POM模具的精度和钢材表面质量。在定位时要对POM模具进行校核修正，对钢材表面进行处理，保证夹持块底座安装精度。

（2）交叉作业施工时，为避免其他施工对传感器和线缆的破坏，需要与其

他单位保持沟通渠道畅通，实时了解进度状态和现场情况，合理安排结构健康监测施工内容。

(3) 焊接过程中，温度变化剧烈，容易引起传感器夹持底座位置偏移，误差增大。应采用合理的焊接工艺，保证传感器夹持底座的安装精度。

(4) 传感器夹持底座安装焊接部位对钢结构防腐漆膜存在一定破坏，钢结构漆膜破坏容易造成钢材腐蚀，对结构安全造成隐患，对漆膜的损坏部分应做好防腐补漆工作。

(5) 施工现场粉尘油污等容易对光纤端头和耦合器造成污染，因此应对光纤端头和耦合器进行有效保护；对受污染的接头应及时清洗。

(6) 光纤光栅传感器有两个端头，每一个端头都能正常的工作。敷设光纤时，增加一根光纤（或者多增加一芯光纤）与另一个端头相连，作为传感器备用通信线路，降低通信线路破坏风险。光纤弯曲半径不得小于20倍直径，敷设过程要求线缆弧度平缓，不得出现硬折和V型弯折。

(7) 测试人员应对施工全过程进行监督、检查，对施工的各个环节进行测试，保证各系统的有效性，及时排查风险，保证系统运行稳定性。

4.4 安全控制

4.4.1 主要安全风险分析

- (1) 监测施工过程存在的安全隐患
- (2) 交叉作业过程人员安全风险。
- (3) 交叉作业光纤光栅传感器、线路、接头和设备存在被破坏的风险。
- (4) 监测施工对其他施工单位的人员和物品影响风险。

4.4.2 保证措施

操作流程应遵循以下国家、行业有关现行标准、规范的要求：

- a) 《建筑施工安全检查标准》
- b) 《建筑机械使用安全技术规程》
- c) 《施工现场临时用电安全技术规范》
- d) 《建筑施工高处作业安全技术规范》

e) 《职业健康安全管理体系规范》

操作人员应严格遵循下列原则进行施工。

(1) 参加施工的特工作业人员必须是经过培训，持证上岗。施工前对所有施工人员进行安全技术交底。进入施工现场的人员必须戴安全帽、穿防滑鞋，电工、电气焊工应穿绝缘鞋，高空作业必须系好安全带。

(2) 应采取安全措施，并加强现场警戒。

(3) 操作面应有可靠的架台护身，经检查无误再进行操作。构件绑扎正确，高处作业使用的工具、材料应放在安全地方，禁止随便放置。

(4) 作业区应设警戒线，做明显标志，并设专人负责。工作过程严禁非施工人员进入或其他影响威胁作业的交叉作业人员进入。

(5) 作业人员必须坚守岗位，服从命令听统一指挥，对不明确的信号应立即询问，严禁凭猜测进行操作。现场施工人员必须具备必要的安全知识，并熟悉有关规程、规范。

4.5 环保控制

施工操作流程虽然不会产生噪音、粉尘、建筑垃圾、有害气体和有害液体等污染。仍然应该遵守有关文件，严格约束施工行为。

(1) 严格按照环境管理体系标准（ISO14001）及公司的环境管理体系文件进行工程管理和施工操作，自觉遵守国家、省、市及地方有关环境保护的规定。

(2) 施工垃圾清运采用容器吊运或袋装，严禁随意凌空抛撒，地面适量洒水，减少污染。

(3) 加强对现场存放油品和化学品的管理，对存放油品和化学品的库房进行防渗漏处理，在存储和使用中，防止油料跑、冒、滴、漏污染水体。

(4) 每晚22时至次日早7时，严格控制强噪声作业。施工中支设、拆除和搬运时，必须轻拿轻放，构件安装修理晚间禁止使用大锤。

(5) 施工现场设立专门的废弃物临时贮存场地，废弃物应分类存放，对有可能造成二次污染的废弃物必须单独贮存，设置安全防范措施且有醒目标识。