

上海世博园地下综合管廊 健康监测项目技术方案

深圳市简测科技有限公司

二〇一六年四月

0 引言

城市地下管道综合走廊，简称为“综合管廊”或“共同沟”，是指将设置在地面、地下或架空的各种公用类管线集中容纳于一体，并留有供检修人员行走通道的隧道结构。即在城市地下建造一个隧道空间，将市政、电力、通讯、燃气、给排水等各种管线集于一体，设有专门的检修口、吊装口和监测系统，实施统一规划、设计、建设和管理，彻底改变以往各个管道各自建设、各自管理的零乱局面。各管线需要开通时，只需通知有关负责部门，接通接口即可，既便于修理，又节省了国家的资源。

由于共同沟将各类管线均集中设置在一条隧道内，消除了通讯、电力等系统在城市上空布下的道道蛛网及地面上竖立的电线杆、高压塔等，避免了路面的反复开挖、降低了路面的维护保养费用、确保了道路交通功能的充分发挥。同时道路的附属设施集中设置于共同沟内，使得道路的地下空间得到综合利用，腾出了大量宝贵的城市地面空间，增强道路空间的有效利用，并且可以美化城市环境，创造良好的市民生活环境。

由于综合管廊通常长度较长，在具体建设过程中往往需要设置伸缩缝、沉降缝，甚至采用预制拼接方法进行施工。管廊拼接处通常为薄弱位置，在环境荷载作用下可能会出现混凝土开裂、不均匀沉降、水平错动等诸多问题。这些问题不仅会严重削弱混凝土管廊的适用性和耐久性，还会对管廊内附属的各类管道造成不良影响。因此需要对混凝土管廊及附属管道进行结构健康监测，确保其安全稳定运行。

本项目将针对上海世博园内综合管廊为工程背景，针对管廊及附属管道的裂缝、沉降、水平位移等问题提出一整套监测方案。

1 工程概况

本工程位于上海世博园，该综合管廊纳入了通信、电力、给水、热力、垃圾输送管等管道，是 2010 年上海世博会永久性基础设施之一。本工程采用预制拼接工艺，图 1.1 和图 1.2 分别为管廊内部实景图及标准断面。



图 1.1 综合管廊内部实景

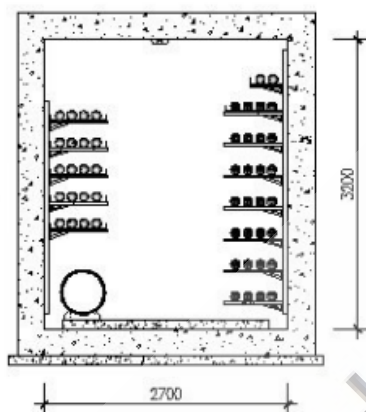


图 1.2 标准断面

2 本方案依据及原则

1. 《世博会园区综合管沟建设标准》DG/TJ08-2017-2007
2. 《城市综合管廊工程技术规范》GB50838-2015
3. 《结构健康监测系统设计标准》CECS333-2012

3 监测内容及技术方案

3.1 监测内容

本工程为国内首条采用预制拼接工艺的地下综合管廊，混凝土管廊的拼接缝处为薄弱位置。在周边环境的各类荷载作用下（如周边土体沉降、开挖、打桩等），该位置可能出现竖向裂缝、不均匀沉降和水平向的错动。此外，混凝土管廊的沉降和水平位移可能引起附属管道的变形。例如，图 1.1 中蓝色的自来水管通常固定在混凝土管廊上。当混凝土管廊变形时，自来水管相应产生较大变形，在法兰连接处会出现应变较大，可能出现裂缝。

为收集、反馈和分析综合管廊及内部管道的结构信息，确保其功能完好、安全可靠，计划针对如下四个方面进行结构健康监测工作：

- (1) 混凝土管廊拼接缝部位裂缝监测；
- (2) 混凝土管廊沉降监测；
- (3) 混凝土管廊水平位移监测；
- (4) 自来水管法兰裂缝监测。

3.2 混凝土管壁拼接缝处裂缝监测

拼接缝处为预制拼接管廊的薄弱部位。在温度变化、不均匀沉降等环境作用下，拼接缝部位可能出现裂缝，影响综合管廊的安全性、适用性和耐久性。针对管廊拼接缝处的裂缝监测，本项目将开发低温敏的长标距光纤光栅（FBG）传感器，并跨接布置在拼接缝处两侧的混凝土管廊上。由于采用低温敏型传感器，不需要进行温度补偿。

3.2.1 FBG 应变传感器测量原理

充分考虑本项目监测结构在服役阶段的环境条件，对于长期监测优先采用光纤光栅传感器；该产品基于一种光纤光栅应变增/减灵敏度的封装机制，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；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；同时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，如图 3.1 所示：



图 3.1 光纤光栅应变传感器

光纤光栅就是一段光纤，其纤芯中具有折射率周期性变化的结构。根据模耦合理论，如式（3.1）所示，

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (3.1)$$

波长为 λ_B 的波长就被光纤光栅所反射回去（其中 λ_B 为光纤光栅的中心波长，

Λ 为光栅周期, n 为纤芯的有效折射率), 其结构如图 3.2 所示。

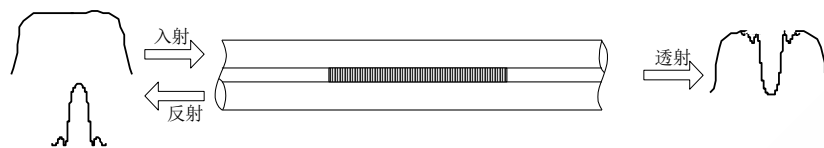


图 3.2 光纤光栅的结构

反射的中心波长信号 λ_B , 跟光栅周期 Λ , 纤芯的有效折射率 n 有关, 所以当外界的被测量引起光纤光栅温度、应力以及磁场改变都会导致反射的中心波长变化。也就是说, 光纤光栅反射光中心波长的变化反映了外界被测信号的变化情况。光纤光栅传感器的原理结构如图 3.3 所示, 包括: 宽谱光源 (如 SLED 或 ASE) 将有一定带宽的光通过环行器入射到光纤光栅中, 由于光纤光栅的波长选择性作用, 符合条件的光被反射回来, 再通过环行器送入解调装置测出光纤光栅的反射波长变化。当光纤光栅做探头测量外界的温度、压力或应力时, 光栅自身的栅距发生变化, 从而引起反射波长的变化, 解调装置即通过检测波长的变化推导出外界温度、压力或应力。

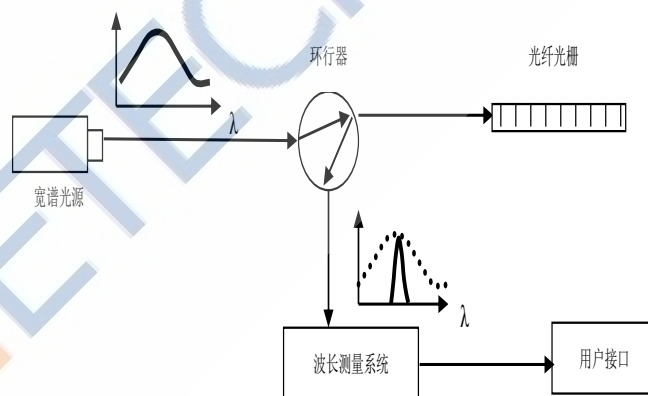


图 3.3 光纤光栅传感器原理

两端夹持式光纤光栅应变传感器的原理如图 3.4 所示。

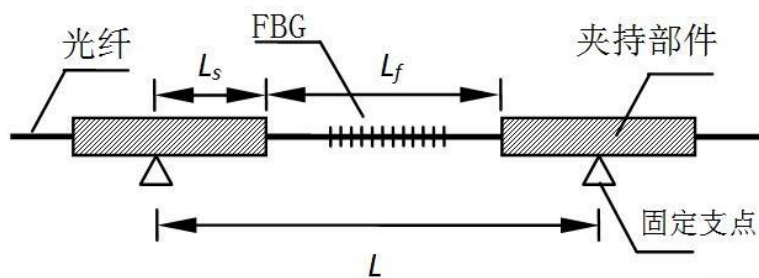


图 3.4 光纤光栅应变传感器原理图

从图中可以看出，夹持部件将光纤光栅固定在支点之间。夹持部件与光纤光栅之间用粘接剂固定（忽略粘接剂与光纤光栅之间的作用）；夹持部件所选用的材料为空心钢管，直径为 d ；设两端夹持部件的支点之间的距离为 L ，夹持部件内侧之间的距离为 L_f ；当整个机构受到外力作用时，机构整体会发生变形，设两端夹持部件支点之间的轴向变形为 ΔL ，根据材料力学基本原理和假设， ΔL 由两部分组成，分别为夹持部件的轴向变形 ΔL_s 和 ΔL_f ，如公式（3.2）、（3.3）所示：

$$\Delta L_s = \frac{P_s L_s}{E_s A_s} \quad (3.2)$$

$$\Delta L_f = \frac{P_f L_f}{E_f A_f} \quad (3.3)$$

式中， P 为传感器结构的内力； A_s 和 A_f 分别为钢管和光纤的截面积； E_s 和 E_f 分别为钢和光纤的弹性模量。根据结构内力处处相等的原则：

$$\frac{\frac{\Delta L_s}{L_s}}{\frac{\Delta L_f}{L_f}} = \frac{E_f A_f}{E_s A_s} \quad (3.4)$$

即：

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_f} = \frac{E_f A_f}{E_s A_s} \quad (3.5)$$

传感器的各项参数如表 3.1 所示。将表中的参数代入式（3.5）中，可得：

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_f} = 0.0084 \quad (3.6)$$

表 3.1 光纤和中间层的机械性质

材料参数	符号	数值范围	单位
光纤的弹性模量	E_f	7.2×10^{10}	Pa
夹持部件（钢管）的弹性模量	E_s	2.1×10^{11}	Pa
夹持部件（钢管）的直径	d_s	0.8	mm
光纤的直径	d_f	0.125	mm

由公式（3.6）可以看出，钢管的应变远远小于光纤光栅的应变，因此，可以认为在整个光纤光栅传感器的结构中，可以忽略夹持部件的应变。夹持部件支点之间产生的形变主要是由光纤的形变引起的。光纤光栅传感器中心波长变化与外界作用引起的应变之间的关系为：

$$\varepsilon = \frac{L_f}{L} \varepsilon_f = \frac{L_f \Delta \lambda_{FBG}}{1.2L} \quad (3.7)$$

从公式（3.7）可以看出，对于相同的应变变化， L_f 与 L 的比值决定了光纤光栅传感器中心波长变化的范围，也就是通常所说的传感器灵敏度，调整传感器灵敏度的方法可以通过改变 L_f 与 L 比值的方式实现。

光纤光栅传感器具有其独特的优点：

- （1）传感器体积小、重量轻、外形可变，适合埋入大型结构中，可测量结构内部的应力、应变及结构损伤等，稳定性好，可重复使用；
- （2）与光纤之间存在天然的兼容性，易与光纤连接，光谱特性好，低损耗、可靠性高；
- （3）具有绝缘性，不影响待测结构，同时具有抗腐蚀、抗电磁干扰的特点，适合在恶劣环境中工作；
- （4）一根光纤可以串联多个光纤光栅传感器，由其构成传感阵列，与波分复用和时分复用系统相结合，实现分布式测量；
- （5）传感器灵敏度高、分辨率大。

其主要参数指标如表 3.2 所示：

表 3.2 光纤光栅应变传感器主要技术指标

光纤光栅应变传感器	
量程	$\pm 2000 \mu \varepsilon$
分辨率	$1 \mu \varepsilon$ （可定制）
波长范围	1510~1590nm
工作温度范围	-30~120
重量	4.1 克
规格尺寸	外径 4mm，测量标距 30mm（可定制）
尾纤规格	聚合物软管或铠装管（ $\Phi 3\text{mm}$ ）
连接方式	熔接或 FC/APC 连接头
安装方式	焊接、胶粘接、直接埋入

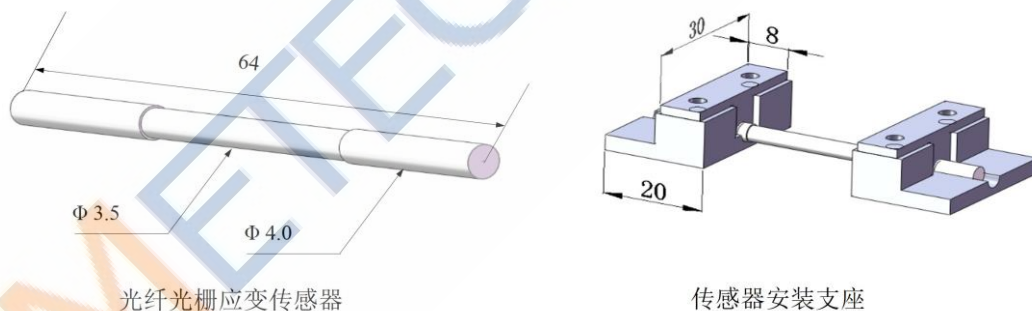


图 3.5 光纤光栅传感器封装形式及传感器安装支座

3.2.2 FBG 应变传感器设计

低温敏型传感器受温度影响特性小：光纤光栅能够随着温度变化自由延伸，不受封装工艺的影响。最大限度消除温度带来的光栅参数变化影响。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；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;同时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。

管廊拼接缝部位如产生裂缝,其形变量相对较大,应对应变传感器采用减敏机制进行设计封装,以满足监测需求。

3.2.3 FBG 应变传感器布置方案

此传感器将布置在管廊拼接缝两侧,如图 2 所示。当拼接缝处应变较大时可能出现纵向裂缝时(图中红色所示)。裂缝大小与此处应变相关。FBG 传感器通过采集此处应变可以得到裂缝信息。由于本方案采用低温敏型应变传感器,因此不需要进行温度补偿。

由于混凝土管廊尺寸较大,裂缝可能出现在断面上的任意位置,而且管廊四角处容易出现应力集中,因此在每一断面布置 8 个 FBG 传感器,如图所示

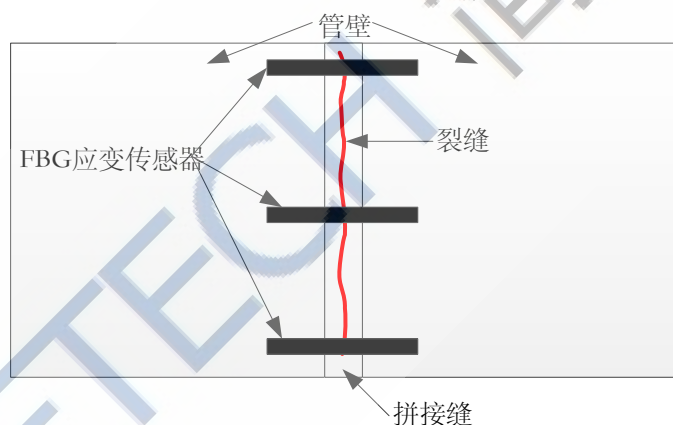


图 2.6 FBG 应变传感器布设示意图(平面图)

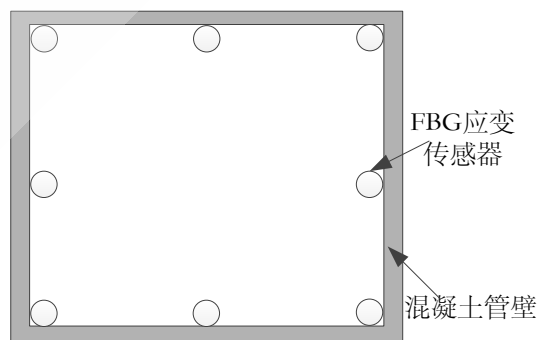


图 3.7 FBG 传感器布设示意图(断面图)

3.3 混凝土管廊沉降监测

混凝土管廊沉降监测采用一种基于光纤光栅静力水准的沉降监测系统，系统包括：多台光纤光栅静力水准仪以及基站监控设备；多台光纤光栅静力水准仪包括：作为基准设备的基准光纤光栅静力水准仪，以及作为监测设备的监测光纤光栅静力水准仪；多台光纤光栅静力水准仪，沿管廊走向合理布置，通过光纤光栅静力水准传感器实时监测管廊沉降的变化量。

3.3.1 测量原理

光纤光栅静力水准仪是测量两点或多点之间的差异沉降变化的高智能型工程测试仪器，是位移传感器的其中一种；静力水准仪是由一系列智能液位传感器及储液罐组成，储液罐之间由连通管连通。基准罐置于一个稳定的水平基点，其他储液罐置于标高大致不同的不同位置，当其他储液罐相对于基准罐发生升降时，将引起该罐内液面的上升或下降。通过测量液位的变化，了解被测点相对水平基点的升降变形。

3.3.2 布置方案

该地下管廊为预制管廊，标准单元为 20 米一联，每联的整体性较好，因此，每联设置一个光纤光栅静力水准仪以满足监测沉降的需求。

3.4 混凝土管廊水平位移监测

相邻的两段混凝土管廊可能在水平向出现相对位移。因此将在拼接缝处布置光纤光栅位移传感器监测水平位移。

3.4.1 光纤光栅位移传感器

光纤光栅位移传感器用于测量各种结构间的相对位移，也可用于实时监测裂

缝的张开与闭合，适用于各种隧道管片接缝、水坝坝体位移、土壤沉降、岩石、山体、边坡监测等。安装时将传感器和探头分别固定在移动物体和参考物体上。既可以进行长期监测，又可以作短期监测。该传感器可以重复使用。具有精度高、灵敏度高、寿命长等优点，可方便地与其他光纤光栅传感器一起组成全光监测网。光纤光栅位移传感器基于一种光纤光栅应变增/减灵敏度的封装机制，采用独特封装工艺有效的消除了其他材料对传感器应变传递的影响；通过调节封装工艺中的参数，可以改变传感器的位移量。

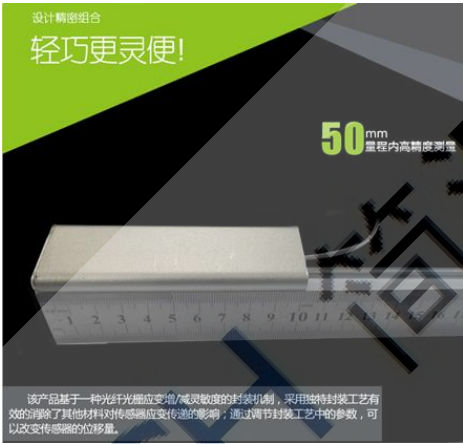


图 3.8 光纤光栅位移传感器

其突出特点如下：

- （1）无弹簧工作机制，有效解决无损耗应变传递机制
- （2）可根据工程需求灵活定制量程、分辨率和规格尺寸；
- （3）用于工程结构表面安装时可重复利用；
- （4）通过传感器支座可焊接或胶粘接在工程结构表面；
- （5）可根据工程需求灵活定制不同形状 of 传感器支座。

其详细参数指标如表 3.3 所示：

表 3.3 光纤光栅位移传感器主要技术指标

光纤光栅应变传感器	
量程	0-100mm
精度	0.1% F. S.

灵敏度	0.05% F.S.
波长范围	1510~1590 nm
工作温度范围	-30~120 ℃
光栅反射率	≥90%
安装方式	螺栓固定或焊接
尾纤规格	聚合物软管或铠装管（Φ3mm）
连接方式	熔接或 FC/APC 连接头

3.4.2 位移传感器布置方案

位移传感器将布置在拼接缝两侧，如图所示。图中黑色部分为位移转接板。转接板一端固定在左侧的混凝土管壁上。另一端跨过拼接缝，延伸至右侧的混凝土管廊内。在右侧管廊的相应位置将安装位移传感器。通过测量转接板与右侧管廊的相对距离，可以得到管廊的水平位移。

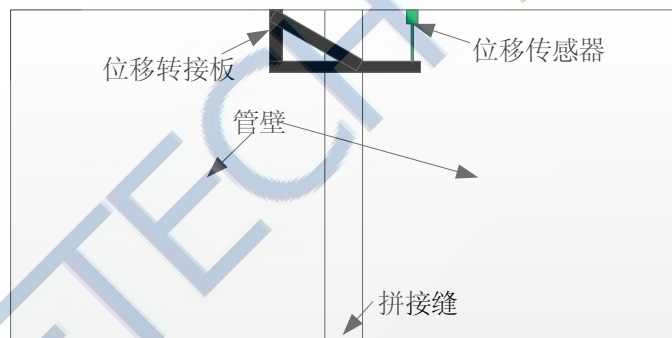


图 3.9 水平位移监测

3.4 自来水管道法兰裂缝监测

对于自来水管道法兰处裂缝的监测同样采用 FBG 应变传感器。传感器将固定在螺栓上，如图所示。

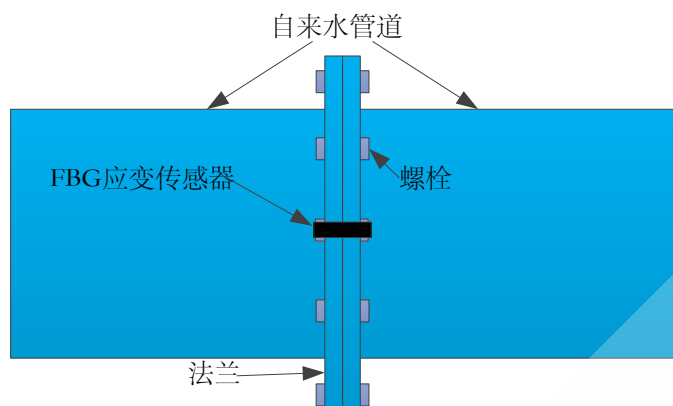


图 3.10 自来水管法兰处裂缝监测 FBG 传感器布设示意图

4 结构健康监测系统设计

4.1 设计原则

地下综合管廊健康监测系统集成传感器技术、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，满足地下综合管廊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) 从动力、静力、耐久性对结构进行监测，力求用最少的传感器和最少的数据量完成工作。

地下综合管廊监测内容包括混凝土管廊拼接缝部位裂缝监测、混凝土管廊沉降监测、混凝土管廊水平位移监测、自来水管法兰裂缝监测等监测系统的设计。

4.1.1 主要传感器类型

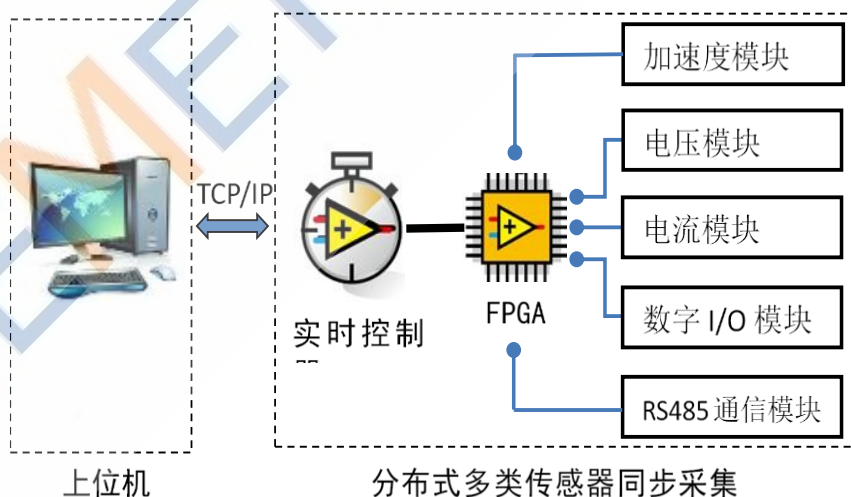
- (1) 应力应变监测传感器
 - a) 低温敏型光纤光栅应变传感器
- (2) 位移传感器
 - a) 光纤光栅位移传感器
- (3) 静力水准仪
 - a) 光纤光栅静力水准仪

4.1.2 设计原则

- (1) 实用性
- (2) 可靠性
- (3) 国际先进性
- (4) 可操作性和易维护性
- (5) 完整性和可扩容性

4.2 系统体系结构

4.2.1 硬件系统介绍



(1) 加速度、电压、电流、数字 I/O 模块：分别采集传感器输出的电压、电流和数字 I/O 信号。本仪器采用自主研发的工业级数据采集 I/O 模块实现高稳

定性高精度的数据采集功能；

(2) RS485 通信模块：本仪器采用自主研发的基于 RS485 通信协议的模块实现与其他系统的通信功能；

(3) 可编程逻辑门阵列(FPGA)：配置以及使用定时同步 while 循环读取数据采集模块，从而实现通道间同步采集功能，通过开发基于 FPGA 的实时信号滤波、频域计算和传感器信号阈值触发算法实现对传感器信号的实时分析，将采集到的数据和分析后的信号写入 FIFO 数据缓冲器中；

(4) 实时控制器：通过 FIFO 读取 FPGA 传输来的数据，读取并实时处理时钟同步信号和绝对时间戳以实现设备间同步采集，按照数据类型在内存中建立缓存池，实时的以“先入先出”机制将采集或分析处理后的数据通过 TCP/IP 协议发送至 PC 上位机，接收上位机命令并通过 FPGA 控制模块的数据采集参数；

(5) 上位机：实现人机界面的交互，显示并存储实时采样数据，通过逻辑命令控制仪器的数据采集参数。

4.2.2 软件系统功能介绍

(1) 多信号实时同步采集

该系统在一台数据采集设备中同时使用电流测量模块、电压测量模块、加速度测量模块、位移测量模块等采集电流、电压、加速度、位移等信号，在上位机中同时同步显示这几种信号，实现随时调用目标传感器。典型监测系统界面如图 4.1 所示。

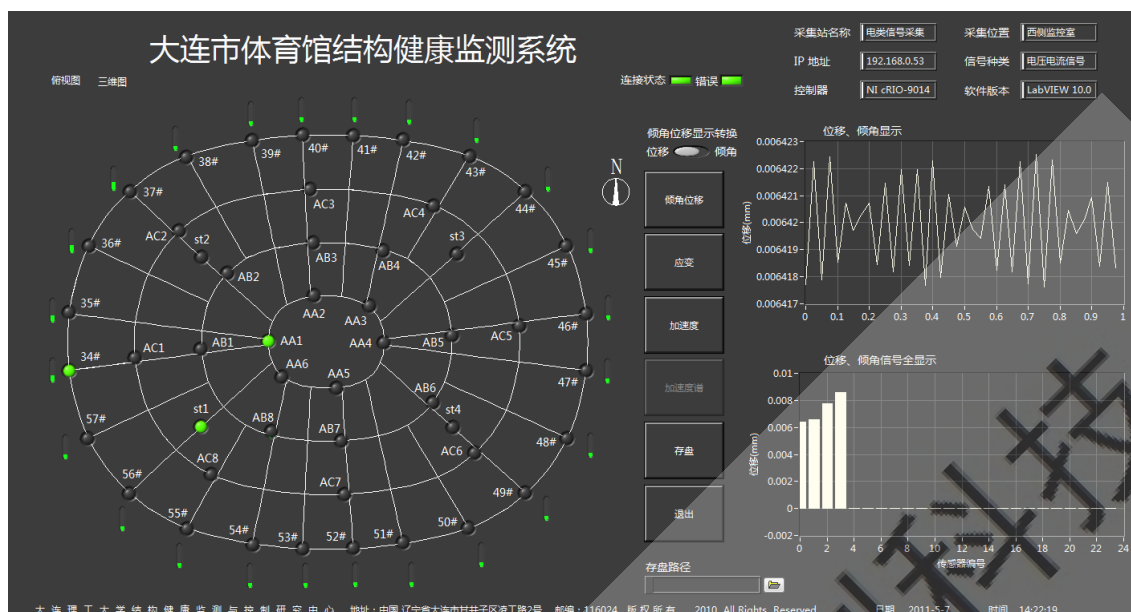


图 4.1 监测系统软件界面

Fig. 4.1 Monitoring system interface

(2) 数据自动存储功能

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,采用 24 小时不间断连续自动存储方式,当日期变化时,便建立新的数据文件,所有存储触发都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。

本设计针对三种不同类型的传感器,设计了两种不同的数据存储方式。电流、电压及位移传感器采用低速采集,采集频率为 1HZ,如果长期监测,产生的数据文件并不会占用太大的磁盘空间,因此采用 24 小时不间断数据存储;加速度传感器采集频率高,产生庞大的数据文件,对磁盘空间造成很大压力,而对结构真有意义的是振动信号,因此,为加速度传感器的数据文件存储设计了触发式数据存储方式:即预先设定一个对结构有意义的预值,如果超过预值,立即存储,如果低于预值,便挂起存储进程。

(3) 自动生成报表功能

针对监测项目的需要,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，生成的 excel 报表文件如图 4.2 所示。

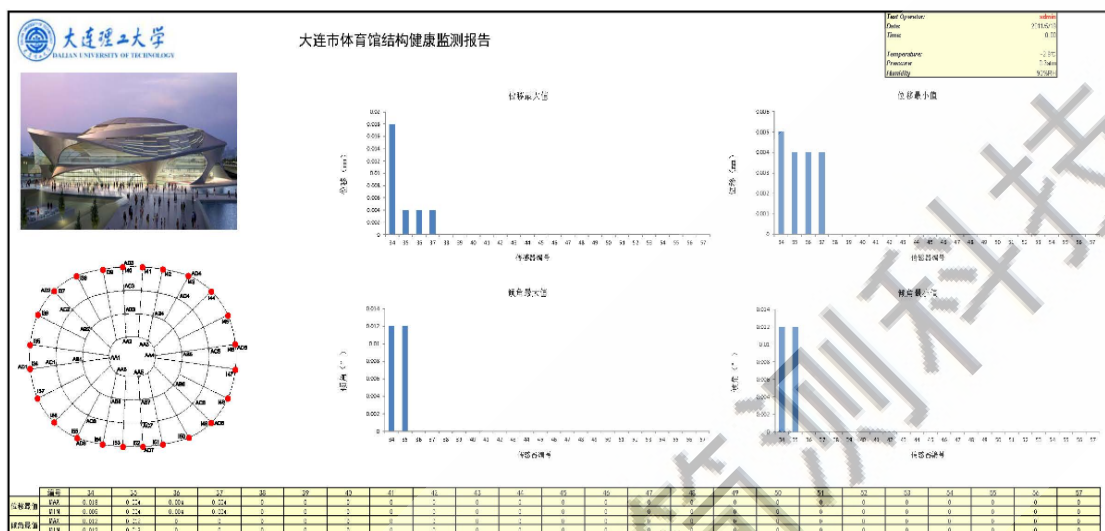


图 4.2 每日监测结果报表

Fig. 4.2 Daily monitoring report

(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 4.3 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 4.3 系统报警机制

(5) 三维模型动态显示功能

在监测系统的人机交互界面中加入了三维模型的动态显示功能,如图 4.4 所示,通过颜色的深浅变化来反映关键部位的运行状态,从而更加形象的反映了目前结构的健康安全状态,利用三维模型的动态显示功能还可以对模型进行移动、缩放、旋转操作,增加了系统的可视化程度。

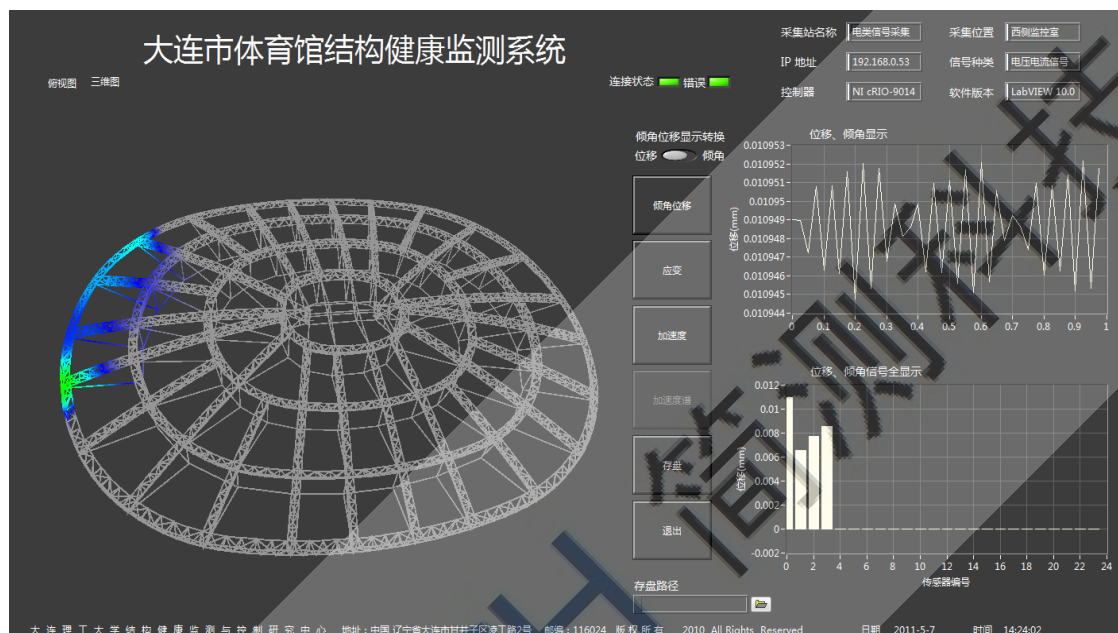


图 4.4 三维动态模型显示

(6) 基于云计算的数据监测平台

本仪器通信接口基于 TCP/IP 协议,可利用公网的有线通信方式或 4G LTE 宽带无线技术实现远程的数据传输及设备控制功能。利用本仪器可以建设基于云计算平台的新一代数据中心。基于云计算的数据中心将改变模式单一、重复建设、各自为阵的状态,消除异构化传感数据之间障碍,实时动态的监测数据,最终实现归一化管理。

5 施工工艺及质量控制

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:

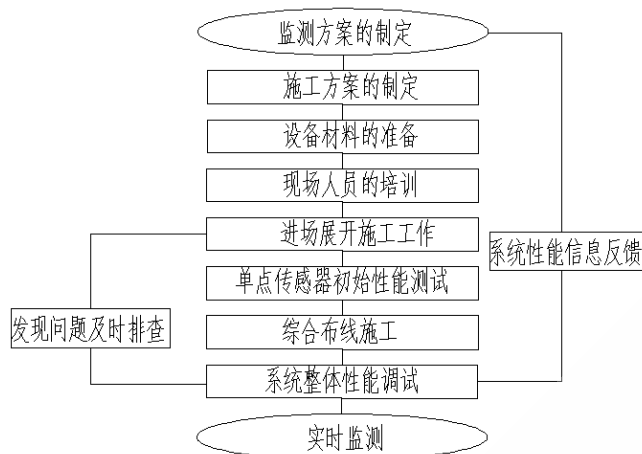


图 5.1 施工工艺流程图

光纤光栅传感器、加速度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钢结构健康监测。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。

5.1 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 5.2~5 所示：



图 5.2 平面固定方式（粘接）

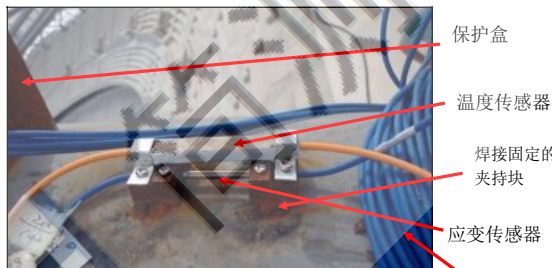


图 5.3 圆弧表面固定方式（焊接）

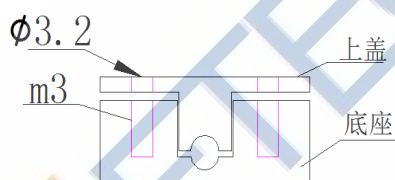


图 5.4 平面用加持底座示意图

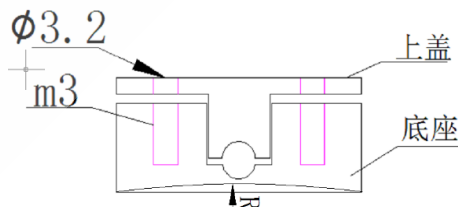


图 5.5 圆弧表面加持底座示意图

由图 5.4、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：

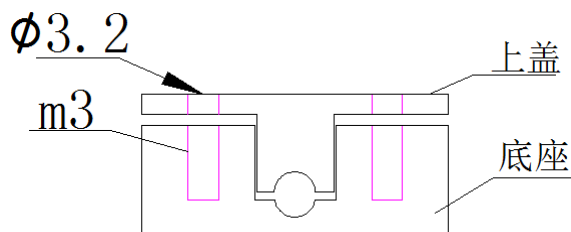


图 5.6 夹持块装配示意图

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 5.7 拉伸完成的传感器



图 5.8 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 5.9 所示：



图 5.9 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：

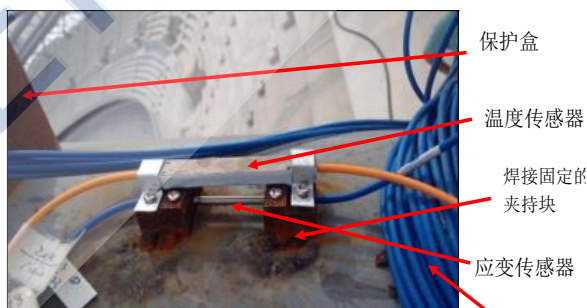


图 5.10 传感器保护盒内部

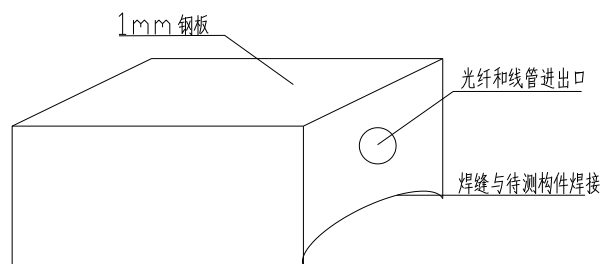


图 5.11 光纤光栅传感器保护盒示意图

(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。

5.2 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：

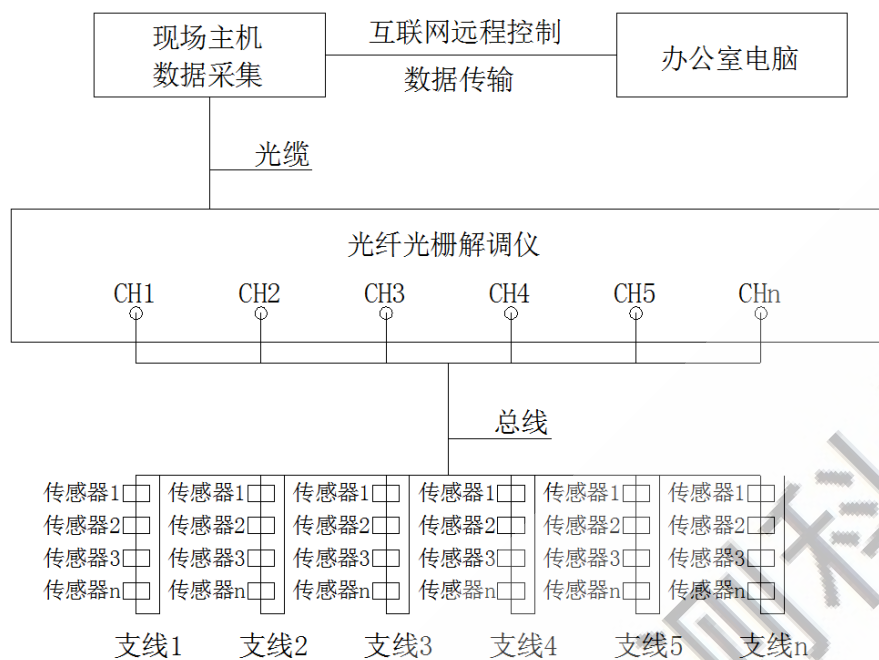


图 5.12 系统布线示意图

5.3 质量控制

5.3.1 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。

5.3.2 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。

5.4 安全控制

5.4.1 主要安全风险分析

- (1) 监测施工过程中存在的安全隐患
- (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。

5.4.2 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。

5.5 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。