

# 钢结构健康监测中光纤光栅传感系统 安装工法



大连金广建设集团有限公司

大连理工大学

深圳市简测科技有限公司

2014年8月

## 1、前言

电类传感器是应用最早的传感器，经过多年的发展改进已经相当的完善，为人类社会发展起到很大的推进作用。由于电类传感器本身的一些特点制约了其在结构健康监测领域的应用和发展。在电磁干扰严重的环境、水下或者潮湿环境、腐蚀性环境、易燃易爆环境、电力缺乏的环境下，应用电类传感器进行结构健康监测需要很多的辅助措施去克服不利于传感器运行的因素，代价巨大，效果不理想；同时，电信号长距离传输过程中损耗衰减严重，很难实现分布式或者准分布式布置。光纤光栅传感器的出现为传感器家族带来了新鲜的血液。大大推进了结构健康监测行业前进的步伐。他凭借着自身的优势成为近些年来监测、检测等领域的新宠，光纤光栅传感器的优点可以概括为以下几点：抗电磁干扰、电绝缘性能好、腐蚀环境下化学性能稳定、体积小、重量轻、几何形状可塑、传输损耗小、传输容量大、测量范围广，且光纤光栅传感器和传输光缆造价低廉，大大降低了监测成本。

除上述优点外，Alavie (1994) 等人将布拉格光栅传感器埋入碳纤维复合材料中，测量其应变变化。实验表明：在 0~2000 循环 320000 次后，光纤光栅传感器仍没有出现劣化现象；Morey (1996) 通过加速老化试验认为光纤布拉格光栅存活寿命大于 25 年。由此，世界各国都对其十分关注并开展了广泛的应用研究，并取得了丰硕的成果。在短短的 10 多年时间里光纤光栅已成为传感领域发展最快的技术。目前正逐步研究光纤光栅传感器在实际工程应用的。光纤光栅传感器的优良特性使其逐步取代传统电类传感器，成为结构健康监测领域的首选传感器。

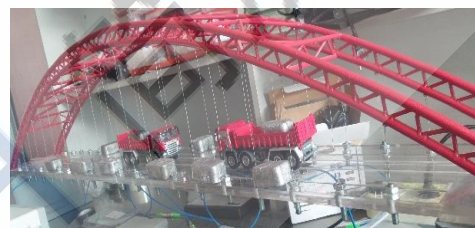
光纤光栅传感器为精密传感器，如现场施工环境恶劣以及安装保

护措施不到位，将会严重破坏传感器及信号传输光缆，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，保护光纤光栅传感系统，确保光纤光栅传感系统健康稳定运行，这正是制定本工法的意义所在。

多个工程实践证明，该施工工法具有良好的经济效益和广泛的可推广性。掌握好钢结构健康监测中光纤光栅传感系统安装工法，对钢结构健康监测光纤光栅传感系统快速、标准化施工具有指导意义，对钢结构的发展也起到积极的推进作用。实验模型验证如下图所示：



1.0.2-1 钢屋盖模拟监测



1.0.2-2 钢拱桥模拟监测

该工法由大连理工大学、大连金广建设集团有限公司、深圳市简测科技有限公司联合制定完成，其中大连理工大学进行工法理论系统研究，金广建设集团在工程实际应用中对该工法进行总结完善。简测科技进行了工法的实际应用。该工法所用传感器获得多项发明专利和实用新型专利，光纤光栅传感器健康监测技术及其工程应用获得辽宁省科学技术一等奖、2010年教育部科学技术进步二等奖。该工法应用的实际工程有大连市体育中心体育馆弦支穹顶索支网壳健康监测、大连市体育中心体育场钢桁架健康监测，某工厂钢梁切割过程健康监测等建筑工程。通过对多个工程的钢结构健康监测，验证了该工法具有优越的先进性和实用性，效益显著，符合节能环保的施工要求，对光纤光栅传感器在钢结构健康监测施工中的应用具有良好的推广价值。

和应用前景。

## 2、工法特点

### 2.1 光纤光栅传感器和光缆工程造价低

光纤光栅传感系统与传统传感系统相比，工程造价更低：光纤光栅传感器造价低于传统传感器；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。

### 2.2 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，结构健康监测施工与结构工程施工同步，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。本工法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。

### 2.3 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。传感系统施工过程中噪音低，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。

### 2.4 设备先进

设备采用简测科技的传感信号综合同步解调仪，该设备功能强大，

精度高，设备运行稳定。该设备可以实现光纤光栅传感器与电类传感器同步采集，运行效率高，功耗低，非常适合结构健康监测长期在线监测。

### 3、适用范围

本工法适用于居住建筑、公共建筑、工业建筑和农业建筑的整体钢结构健康监测施工和单个钢结构构件的健康监测施工。

### 4、工艺原理

#### 4.1 光纤光栅传感器的原理

当前，光纤传感器技术发展日趋成熟，应用领域广泛，在土木工程中的应用不断的出现，目前展现出蓬勃发展的态势，极有可能替代传统的传感器。在光纤光栅传感方面，光纤光栅技术又为光纤传感技术的发展开拓了新的领域，基于光纤光栅传感技术，能够开发出可以监测多种物理量的光纤光栅传感器（包括应变、温度、加速度、位移等），光纤光栅传感器质量轻、体积小、灵敏度高、耐腐蚀、抗电磁干扰，具有良好的长期稳定性和耐久性。正是由于光纤光栅传感器具有上述优点，因此在钢结构健康监测中选用了大连理工大学自主开发的光纤光栅应变传感器和温度传感器。

##### 4.1.1 光纤光栅传感器原理

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（4.1.1-1）所示，

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (4.1.1-1)$$

波长为  $\lambda_B$  的波长就被光纤光栅所反射回去（其中  $\lambda_B$  为光纤光

栅的中心波长， $\Lambda$  为光栅周期， $n$  为纤芯的有效折射率)，其结构如图 4.1.1-1 所示。

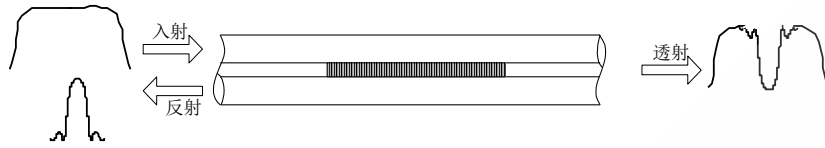


图 4.1.1-1 光纤光栅的结构

反射的中心波长信号  $\lambda_B$ ，跟光栅周期  $\Lambda$ ，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 4.1.1-2 所示，包括：宽谱光源（如 SLED 或 ASE）将有一定带宽的光通过环形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，再通过环形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。

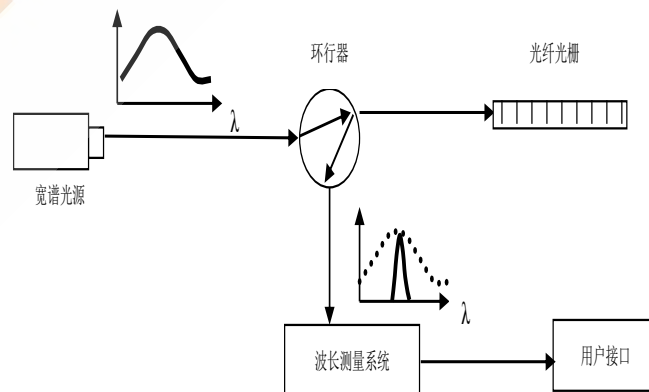


图 4.1.1-2 光纤光栅传感器原理

#### 4.1.2 光纤光栅应变传感器设计

两端夹持式光纤光栅应变传感器的原理如图 4.1.2-1 所示。

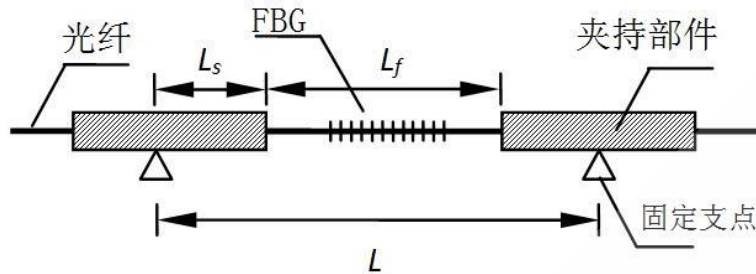


图 4.1.2-1 光纤光栅应变传感器原理图

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  $\Delta L$ ，根据材料力学基本原理和假设， $\Delta L$  由两部分组成，分别为夹持部件的轴向变形  $\Delta L_s$  和  $\Delta L_f$ ，如公式(4.1.2-1)、(4.1.2-2) 所示：

$$\Delta L_s = \frac{P L_s}{E_s A_s} \quad (4.1.2-1)$$

$$\Delta L_f = \frac{P L_f}{E_f A_f} \quad (4.1.2-2)$$

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：

$$\frac{\Delta L_s}{L_s} = \frac{E_f A_f}{E_s A_s} \frac{\Delta L_f}{L_f} \quad (4.1.2-3)$$

即：

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_f} = \frac{E_f A_f}{E_s A_s} \quad (4.1.2-4)$$

传感器的各项参数如表 4.1.2-1 所示。将表中的参数代入式 (4.1.2-5) 中，可得：

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_f} = 0.0084 \quad (4.1.2-5)$$

表 4.1.2 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	$E_f$	$7.2 \times 10^{10}$	Pa
夹持部件（钢管）的弹性模量	$E_s$	$2.1 \times 10^{11}$	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 (4.1.2-5) 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：

$$\varepsilon = \frac{L_f}{L} \varepsilon_f = \frac{L_f \Delta \lambda_{FBG}}{1.2L} \quad (4.1.2-6)$$

从公式 (4.1.2-6) 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。金属化封装后的光纤光栅应变传感器如图 3.4 所示。





图 4.1.2-2 光纤光栅应变传感器



图 4.1.2-3 光纤光栅温度传感器

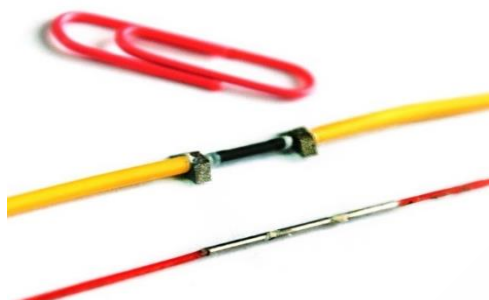


图 4.1.2-4 微型光纤光栅传感器

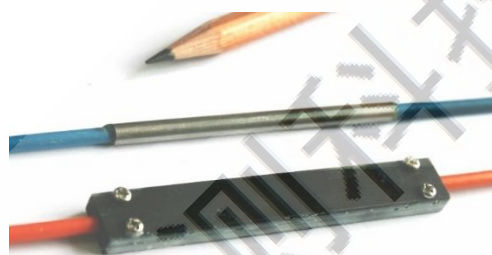


图 4.1.2-5 光纤光栅温度传感器



图 4.1.2-5 光纤光栅应变+温度补偿的传感器

由公式 (4.1.2-6) 可以发现, 应变与光纤光栅传感器中心波长变化  $\lambda_B$  呈线性关系, 通过标定试验可以精确确定比例系数  $k$ , 如式 (4.1.2-7) 所示。

$$\varepsilon = \frac{L_f \Delta \lambda_{FBG}}{1.2L} = \frac{\Delta \lambda_{FBG}}{1.2k} \quad (4.1.2-7)$$

普通桁架杆单元的应力监测, 可以直接应用公式 (4.1.2-7) 计算桁架杆件, 从而实现应力监测。

## 4.2 安装方法原理

4.2.1 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 4.2.1-1~4 所示：

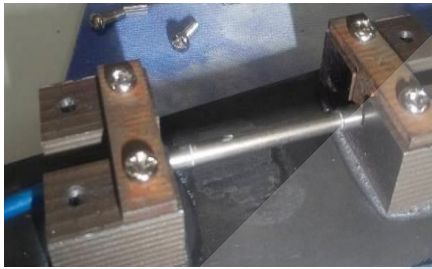


图 4.2.1-1 平面固定方式（粘接）

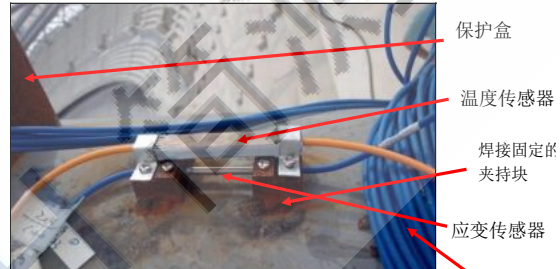


图 4.2.1-2 圆弧表面固定方式（焊接）

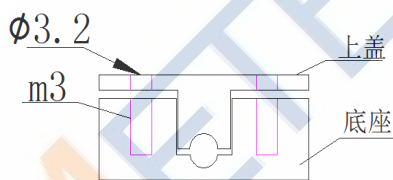


图 4.2.1-3 平面用加持底座示意图

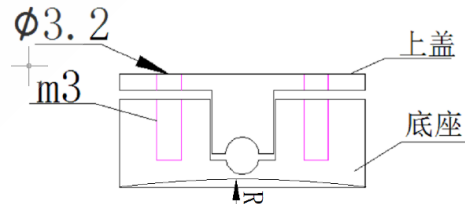


图 4.2.1-4 圆弧表面加持底座示意图

由图 4.2.1-3、4 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。

4.2.2 在钢结构表面，定位光纤光栅传感器圆管的安装位置操作难度较大。定位步骤为：在圆柱体的外表面套一个管状结构，如果该管状结构的内壁与圆柱体的外表面严密贴近，则该管状结构的中心线与圆柱体的中心线完全重合，同时管状结构的表面的每一条纵线都与圆柱

体中心线平行。如图 4.2.2-1 所示：

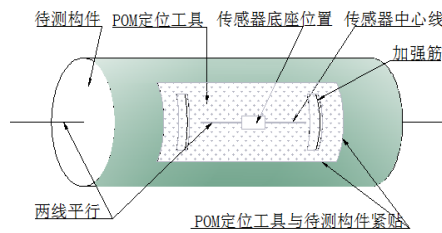


图 4.2.2-1 光纤光栅传感器定位示意图所示

其他截面的钢材中心平行线则由边缘位置尺寸确定。POM 特钢作为一种新型材料，具有自重轻、强度高、便于携带、耐磨性能好等特点，不仅能保持形态不易变形且不易磨损，保证了模具精度，是该工法使用模具的理想材料。

#### 4.3 综合布线原理

在整个建筑结构的综合布线体系中，可将结构健康监测的布线系统作为其中的一个子系统，这样有利于整个结构的信息化和智能化管理，同时也节约了整个工程的成本，降低了造价。结构的综合布线系统分为建筑自动化、通信自动化、办公自动化系统（包括暖通、给排水、安防、通信等），当各系统单独布线，缺少整体规划时，会造成大量的施工环节重复和材料浪费，也不利于建筑智能化的实现。

综合布线系统(Premises Distribution System, PDS)又称开放式布线系统(Open Cabling System)，是一种模块化、灵活性极高的建筑物内或建筑群之间的信息传输通道。它能将数据通信设备、交换设备和语音系统及其他信息管理系统集成，组合成一套标准的、通用的、按一定秩序和内部关系构成的统一整体，形成一套标准的、规范

的信息传输系统。综合布线系统是建筑物智能化必备的基础设施，是一种开放式星型拓扑结构的预布线，不仅易于实施，而且能随需求的变化而平稳升级，并在较长一段时间内能适应建筑智能化需求。

现代建筑物的信息传输通道系统(布线系统)已不仅仅要求能支持一般的语音传输，还应能够支持多种计算机网络协议及多种厂商设备的信息互联，可适应各种灵活的、容错的组网方案，因此一套开放的，能全面支持各种系统应用(如语音、数据通信、楼宇自控和保安监控等系统)的综合布线系统，是现代化建筑物中必不可少的。所以，综合布线系统是跨学科跨行业的系统工程，随着 Internet (因特网，又称国际互联网)和信息高速公路的发展，各国的政府、教育、国防、交通、能源、电子、建筑、通信、金融等行业也都在针对自己的楼宇特点，进行综合布线，以适应新的需要。结构健康监测正需要这样的一个布线系统来满足结构安全预警的通信要求。

针对光纤的布置，结合光纤的特点对放线过程的细节加以保护，尽量使用与整个建筑相匹配的器件，以满足当前监测需求和后期拓展的需要。

#### 4.4 采集设备功能简介

##### 4.4.1 多信号实时同步采集

该系统在一个 CompactRIO 机箱中同时使用 CRIO-9208 (电流)模块、CRIO-9234 (加速度)模块以及 CRIO-9235 (应变)模块，利用 CRIO-9208 (电流)模块采集位移、倾角传感器信号，利用 CRIO-9234 (加速度)模块采集加速度传感器信号，利用 CRIO-9235 (应变)模块采集应变传感器信号，在上位机中同时同步显示三种信号，实现随时调用目标传感器。实时同步采集技术，对分析结构阵型、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。监测系统界面如图 4.4.1-1 所示。

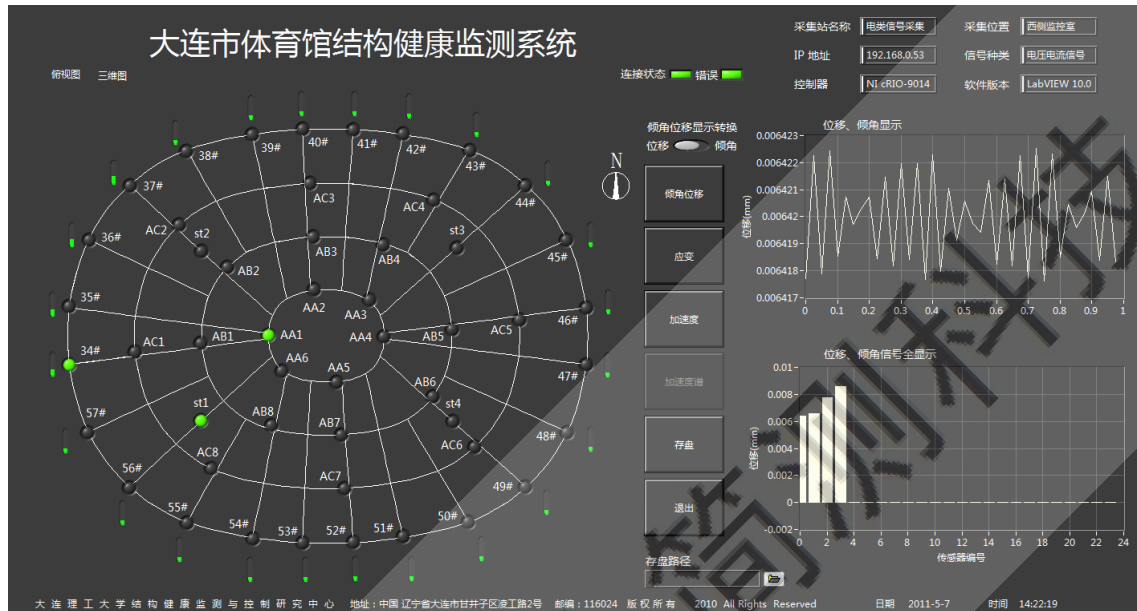


图 4.4.1-1 监测系统软件界面

#### 4.4.2 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。位移、倾角及应变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。

#### 4.4.3 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 4.4.3-1 所示。

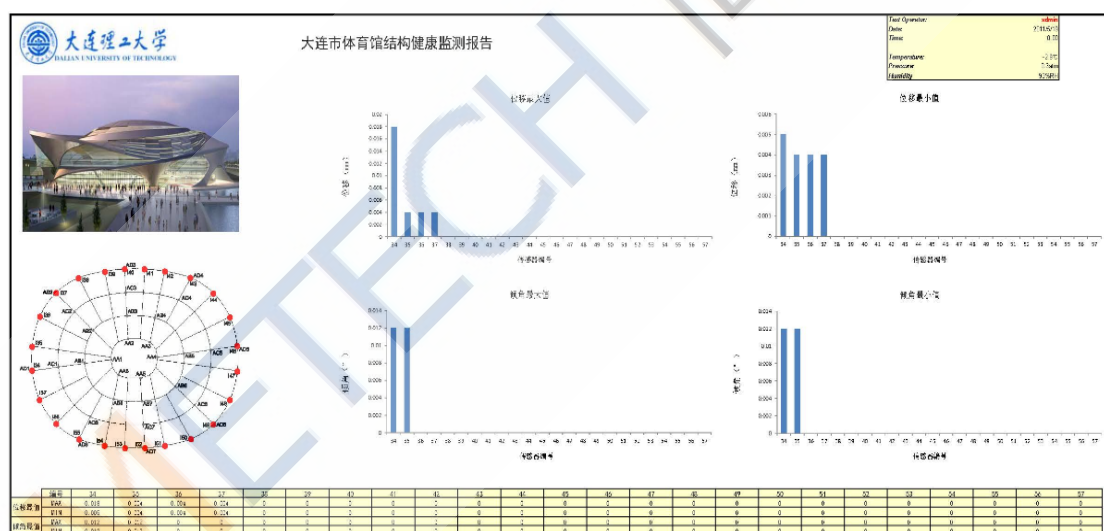


图 4.4.3-1 每日监测结果报表

#### 4.4.4 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 4.4.4-1 所示），保证了重要报警信息的及时性。



图 4.4.4-1 系统报警机制

#### 4.4.5 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 4.4.5-1 所示，通过颜色的深浅变化来反映关键部位的受力状态，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。

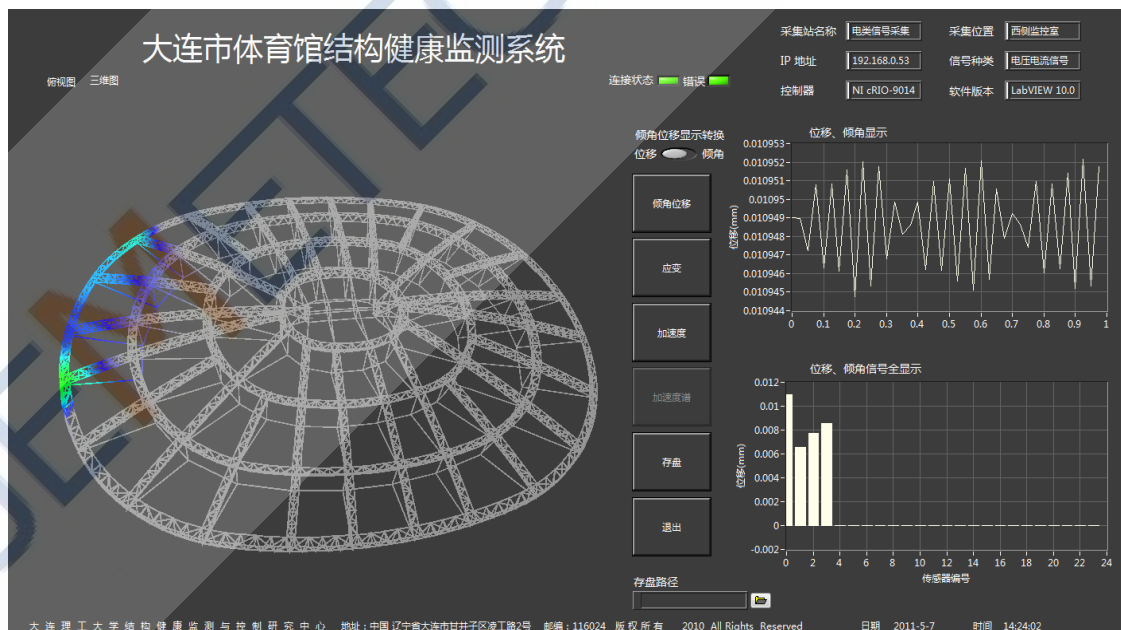


图 4.4.5-1 三维动态模型显示

## 5、施工工艺流程及操作要点

### 5.1 工艺流程

根据多个工程健康监测的光纤光栅传感系统的安装经验总结出该施工工法的施工工艺流程图：

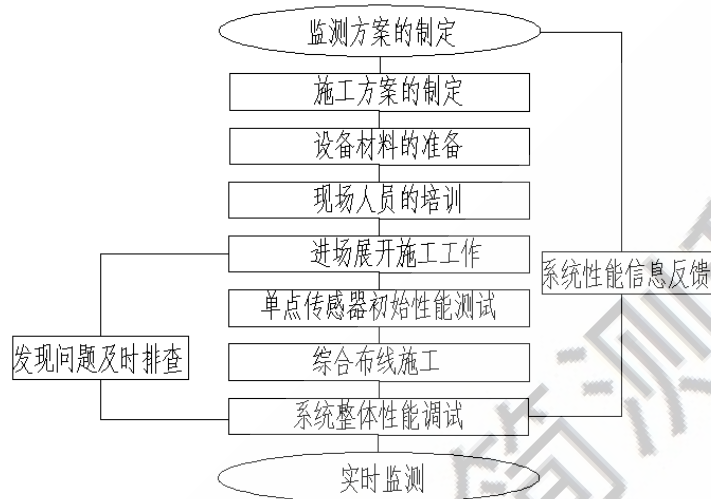


图 5.1-1 施工工艺流程图

### 5.2 钢结构工程简介

某体育场外部钢棚罩采用折板型桁架结构体系，并包裹充气薄膜，其结构新颖美观，为主体结构中最为重要的部分，体育场棚罩结构为折板型桁架结构体系，其下部支座固定在第一层混凝土结构上，棚罩内支座固定在混凝土结构开台的顶部，这样混凝土结构和棚罩结构就融为一个整体共同工作，同时彼此之间可以相互约束。这种整体式结构可以减小温度、地震以及不均匀沉降等对结构造成的不利影响。棚罩结构由 68 榀主桁架和环向桁架构成，平面长轴为 320 米，短轴为 293 米，主桁架最大悬挑长度为 37 米，截面尺寸如表 5.2-1 主桁架截面半径和壁厚所示，总用钢量为 7342 吨。结构设计特色主要体现在：（1）结构采用空间折板型钢桁架，结构受力均匀；（2）为了增强结构的整体稳定性和侧向抗扭刚度，除了环向桁架外，在看台顶部支座间设置了纵向支撑；（3）罩棚内支座位置的选取独具匠心，计算和



监测结果表明，在自重作用下，内支座位置近乎于整个罩棚结构的中心，因此外支座处杆件受力较小。

表 5.2-1 主桁架截面半径和壁厚

截面编号	直径 (mm)	壁厚 (mm)
1	44.5	4.0
2	57	4.0
3	66.5	5.0
4	89.5	6.0
5	90.0	8.0
6	114.5	10.0
7	162.5	16.0
8	188.5	16.0
9	201.0	16
10	225.0	20.0
11	250.0	30.0

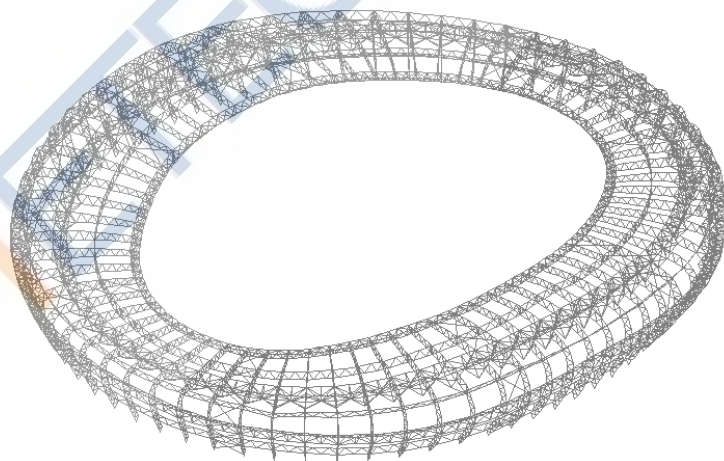


图 5.2-1 棚罩结构

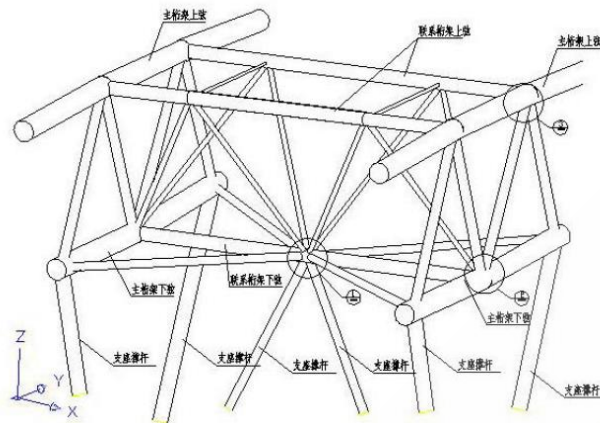


图 5.2-2 节点结构

### 5.3 光纤光栅传感系统钢结构健康监测方案和施工方案的制定

#### 5.3.1 监测方案的制定

根据结构受力分析计算书、设计要求和《结构健康监测设计标准》制定完善的监测方案。对体育场结构关键构件进行应力监测和温度监测，应力和温度的监测光纤光栅应变传感器完全可以胜任，根据各种传感器优化算法的计算结果，并考虑到工地的现场施工条件和经济承担能力，确定传感器的安装位置和数量。无论是结构发生震动，还是局部坍塌或是整体失效，都会在结构的杆件应力状态上得以体现，尤其是结构的重要杆件，其应力变化将更加明显，这就是结构健康监测领域的热点应力法。使用有限元软件 ANSYS 对结构在各种工况的应力状态进行模拟，根据结构的应力包络图，对应力最大的杆件进行监测，就可以根据应力监测结果对结构的安全性能进行评价。本次应力监测使用大连理工大学结构健康监测与控制研究中心研制的光纤光栅应变传感器，同时使用光纤光栅温度传感器进行温度补偿。光纤光栅应变传感器的工作原理是：将光纤传感器粘贴或者焊接在构件表面，当构件所收的外力和所处的环境温度发生变化时，构件的长度就会发生变化，导致构件表面光纤传感器的中心波长发生变化，通过测量光纤

传感器中心波长的变化,就可以获得结构应力的变化或者环境温度的变化,其应力计算如式 5.3.1-1 所示。

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_{FBG}}{1.2k} \quad (5.3.1-1)$$

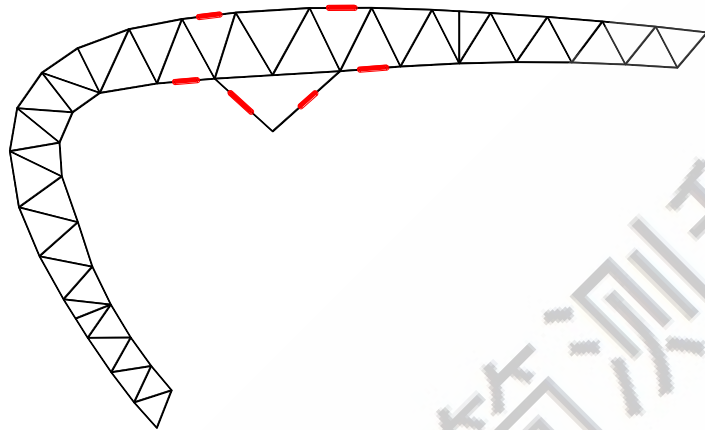


图 5.3.1-1 应变传感器布置示意图

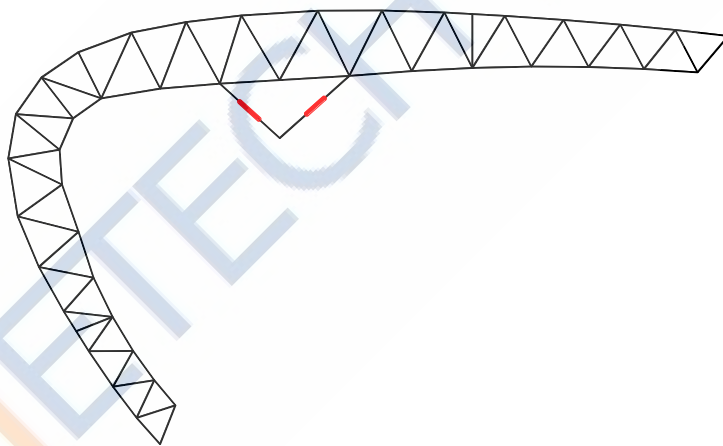


图 5.3.1-2 应变传感器布置示意图

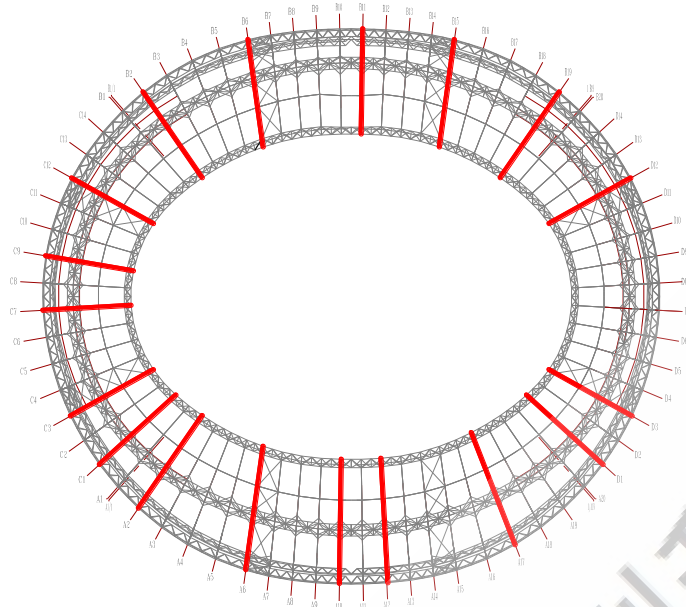


图 5.3.1-3 应力传感器测点示意图

### 5.3.2 光纤光栅传感系统施工方案的制定

根据监测方案中的光栅光纤传感器监测任务设计对应的施工方案，同时根据每一个施工环节制定不同专业领域的施工方案，方案中涵盖了传感器的精确定位和安装方案，传感器的保护方案，光缆的保护方案，综合布线方案等。

### 5.4 设备和材料的准备

5.4.1 根据监测方案的要求确定设备采用光纤光栅传感器解调仪或光纤光栅和电类传感器同步解调仪，根据具体的监测要求设计设备的采集通道以满足监测需求。

5.4.2 在钢结构表面，定位光纤光栅传感器圆管的安装位置操作难度较大，定位步骤为：在圆柱体的外表面套一个管状结构，如果该管状结构的内壁与圆柱体的外表面严密贴近，则该管状结构的中心线与圆柱体的中心线完全重合，同时管状结构的表面的每一条纵线都与圆柱体中心线平行。如图 5.4.2-1 所示：

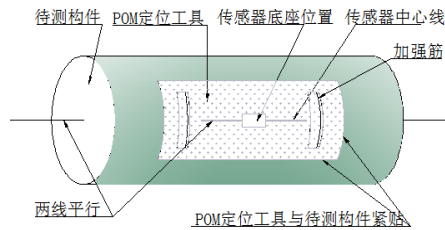


图 5.4.2-1 光纤光栅传感器定位示意图所示

其他截面的钢材中心平行线则由边缘位置尺寸确定。POM 特钢作为一种新型材料，具有自重轻、强度高、便于携带、耐磨性能好等特点，不仅能保持形态不易变形且不易磨损，保证了模具精度，是该工法使用模具的理想材料。

5.4.3 根据光纤光栅传感器的特性，需要安装之前做统一的预拉伸，现场安装固定完成后撤去拉紧装置。

5.4.4 制定合理的焊接方案，减少传感器底座的安装误差，对钢结构表面漆膜的损坏要采用合理的防腐方案。

5.4.5 光纤光栅传感器应尽量避免外力作用和碰撞，通常设置保护壳来有效地保护传感器、光纤留余和接头。

5.4.6 光纤线缆敷设采用强度较高的铝塑 PPR 管来保证光纤线缆的安全，留余的光纤汇总在监控室内，采用机柜集体保护。

## 2.5 现场人员培训

施工人员在现场条件成熟后培训进场，实施具体环节的施工作业。施工前，需要对施工人员进行施工作业培训，强调施工重点和注意事项，保证施工人员熟悉掌握健康监测的各个环节。施工人员还须在施工技术交底和安全技术交底书面文件上签字，便于约束施工和追查责任，以保证施工质量。对于专业性强的施工环节，施工人员需要持证上岗并加强安全措施，保证施工环节安全有序进行。

## 5.6 进场展开施工作业

结构健康监测人员与主体结构施工人员同时进场，主动了解结构施工计划和现场变更情况，实时掌握现场施工进度，确定最佳的工程节点，完成传感器及其保护措施的布置。及时与甲方、设计、施工、监理交流沟通，发现问题及时解决。结构健康监测施工过程中，与其他专业交叉施工现象非常普遍，因此对传感器合适的保护是十分必要的。对传感器的保护应体现在各个施工环节，任何环节都有可能对传感器造成破坏，有些阶段的传感器破坏是无法修复的，最终将影响后续的监测工作。结构健康监测的施工环节需要各专业各部门统一协调完成，加强工程管理显得尤为重要。

#### 5.7 单点传感器初始性能测试

光纤光栅传感器安装完毕后，首先对其进行单点数据采集，其目的体现在以下三点：1) 检测传感器的安装质量和传感器性能，发现问题及时调整或者更换传感器，防止钢结构施工的其他工序覆盖或者破坏该传感器。2) 记录钢结构初始状态值，为以后数据处理做好准备。3) 对钢结构施工过程进行监测，为结构施工的安全进行提供数据参考。

#### 5.8 综合布线施工

该建筑结构的综合布线系统中有亮化系统、暖通系统、通信系统、安防系统和结构健康监测系统。普通单护套光缆的动态（安装敷设时）弯曲半径为 10 倍的光缆外径，静态（敷设后）弯曲半径为 20 倍的光缆外径。普通双护套光缆的动态（安装敷设时）弯曲半径为 12.5 倍的光缆外径，静态（敷设后）弯曲半径为 25 倍的光缆外径。光纤线路的敷设分为钢结构部分的分支光纤敷设和汇总在一起的光纤线路敷设。如图 5.8-某体育场钢结构光缆布线图所示：

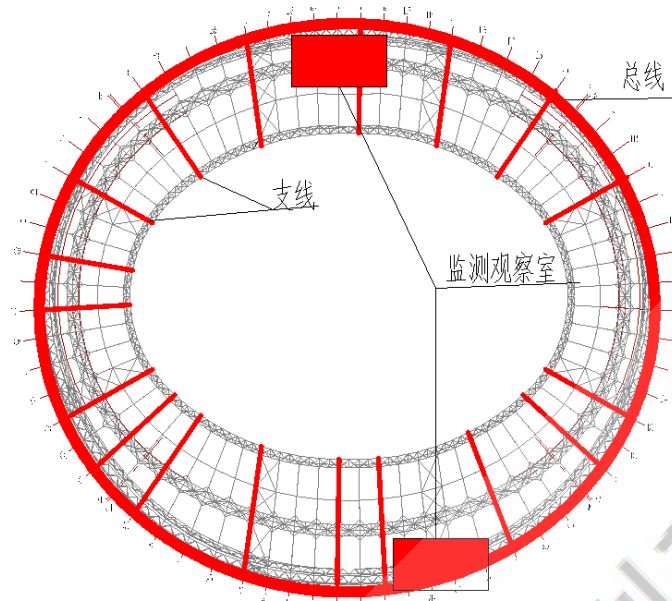


图 5.8-1 某体育场钢结构光缆布线图

该体育场设有两个监测观察室，分别为主监测室和次监测室，通过先进的布线技术和控制技术使整个体育场结构健康监测做到实时同步健康监测。

### 5.9 系统整体性能调试

评价结构健康监测系统性能主要参照以下三个方面：1) 传感器的灵敏度、精度和长期稳定性，以及数据采集测试监控平台的综合性能；2) 传感器测点的空间分布优化布置；3) 测试数据的分析处理能力。通过监测系统的整体性能调试，可以判断目前系统运行状态，以及预测未来系统运行的稳定性。该过程需要对每一个传感器信号进行回顾，如果发现传感器信号异常，从“传感器及保护装置安装布置”这一环节进行排查解决。

### 5.10 实时监测

结构健康监测为结构全寿命的长期实时监测，运行周期长，各系统架构复杂，专业性强，系统安装与调试需要由专业人员完成，系统交付初期需要进行试运行，在试运行阶段对运营方人员进行专业的培

训和讲解，保证系统的顺利交接，同时可以测试整个监测系统的运行状态，发现问题，及时沟通解决，保证后续系统正常运行。

### 5.11 操作要点

5.11.1 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：

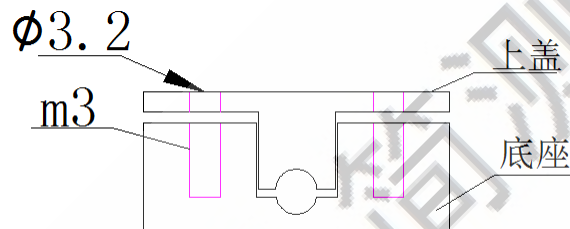


图 5.11.1-1 夹持块装配示意图

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）。

5.11.2 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。

5.11.3 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。

5.11.4 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。

5.11.5 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。

5.12.6 安装传感器与施工同步进行。构件受力的初始状态通常为构件的安装完成后的零应力状态，记录构件的零应力状态作为结构的初始状态对监测目标尤为重要。因此要求安装传感器应与钢结构的安装同步进行。

5.11.7 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 5.11.7-1 拉伸完成的传感器



图 5.11.7-2 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。传感器安装完毕。如图 5.11.7-3 所示：



图 5.11.7-3 撤去夹持装置

5.11.8 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。

5.11.9 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：

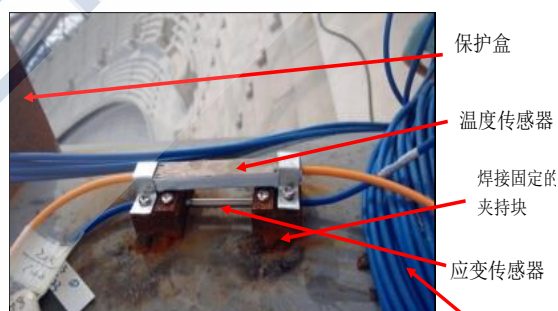


图 5.2.11-1 传感器保护盒内部

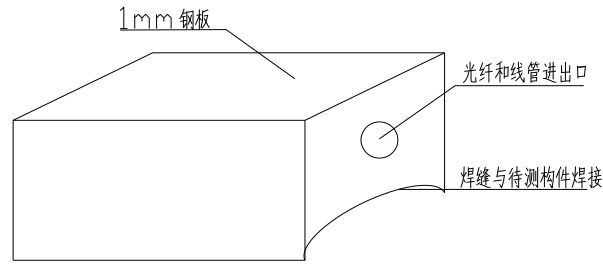


图 5.2.11-2 光纤光栅传感器保护盒示意图

5.11.10 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。

## 5.12 小结

本节介绍了光纤光栅传感系统在钢结构健康监测中的施工工艺。监测结果表明，目前所安装的光纤光栅传感器信号稳定，具有良好的耐久性和稳定性，能够快速、准确反映结构构件的应力变化、温度变化以及结构的整体变形情况，确保了钢结构施工期间整体结构的安全性和稳定性，实现了空间结构的安装过程和卸载过程的健康监测，也为更加广阔的实时监测应用奠定了基础。光纤光栅传感系统在钢结构健康监测中的施工工艺是系统、完整的施工工艺，成功地应用在大连市体育中心体育场结构健康监测、大连市体育中心体育馆钢结构健康监测、大连市体育中心游泳馆钢网架结构健康监测和大连市体育中心

媒体中心钢结构网架的结构健康监测中，系统运行稳定、高效。图 5.12-1、2 为成功监测到的结构焊缝开裂的案例：



图 5.12-1 局部焊缝开裂

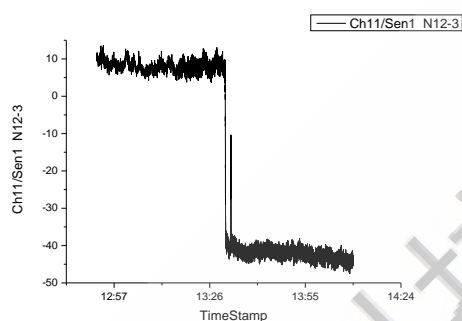


图 5.12-2 局部破坏数据显示

该工艺不单单适用于大型结构建筑整体健康监测，更适用于某一个构件的各种参数的监测，应用本工艺成功监测了某工厂钢梁负重状态下的高温气体火焰的切割过程。这些充分证明了光纤光栅传感系统的施工工艺是可行的。光纤光栅传感系统在钢结构健康监测中的应用实例还有大连市体育馆工程、大连市体育中心的游泳馆和媒体中心的网架结构健康监测，均收到了良好的监测效果。

## 6、材料与设备

### 6.1 主要使用材料一览表

表 6.1-1 材料供应计划表

序号	材料名称	规格	材质	单位
1	钢板	1-35	Q345C	t
2	POM板	6mm	聚甲醛树脂	t
3	焊条	2.5	507	Kg
4	胶水		环氧树脂	Kg
5	油漆	15Kg/桶	环氧富锌	桶
6	铝塑管	6'	PPR	米
7	线缆桥架	100X50	喷塑铁板	米
8	扎带	500-1500	尼龙	条

### 6.2 工程主要使用设备一览表

表 6.2-1 机具、设备供应计划表

序号	机械或设备名称	型号/规格	单位
1	光纤熔接机		台
2	OTDR		台
3	直流焊机	200A	台
4	冲击钻	4mm	个
5	角向磨光机	100	台
6	盒尺	5m	把
7	毛刷	1寸	把

## 7、质量控制

### 7.1 质量标准

结构健康监测是一个新兴的行业，对结构健康监测质量目前还没有一套完整的验收标准。目前为止只有大连理工大学和大连金广建设集团有限公司主编的《结构健康监测系统设计标准》作为结构健康监测的设计依据，以保证结构健康监测系统的设计质量。结构健康监测施工质量验收可以依据系统完整性、数据完整性、数据有效性分项进行验收。施工部分应根据结构健康监测的特点、光纤光栅传感器的特性以及信号传输系统的布置，参考相关施工质量验收标准严格要求。参考标准如下：

表 7.1-1 该工法应满足的有关标准、规范

序号	名称	编号及版本	备注
1	《建筑工程施工质量验收统一标准》	GB50300-2013	国家标准
2	《钢结构工程施工质量验收规范》	GB50205-2001	国家标准
3	《建筑钢结构焊接技术规程》	JGJ81-2002	行业标准
4	《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》	GB8923-2008	国家标准
6	《电力光纤通信工程验收规范》	DL/T5344-2006	行业标准
7	《土木工程用光纤光栅应变传感器》	JG/T422-2013	行业标准

### 7.2 质量控制要点

### 7.2.1 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) 传感器和光缆受到施工破坏。
- 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) 光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。

### 7.2.2 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) 钢结构健康监测施工和结构施工几乎同时进行，交叉作业的情况严重。为避免其他施工对传感器和线缆的破坏，需要与钢结构施工单位保持沟通渠道畅通，实时了解钢结构的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。

## 8、安全措施

### 8.0.1 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。

### 8.0.2 保证措施

本工法应遵循以下国家、行业有关现行标准、规范的要求：

- 1) 《建筑施工安全检查标准》
- 2) 《建筑机械使用安全技术规程》
- 3) 《施工现场临时用电安全技术规范》
- 4) 《建筑施工高处作业安全技术规范》
- 5) 《职业健康安全管理体系规范》

8.0.3 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。

8.0.4 应采取安全措施，并加强现场警戒。

8.0.5 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。

8.0.6 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。

8.0.7 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。

## 9、环保措施

本工法虽然不会产生噪音、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。

9.0.1 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。

9.0.2 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。

9.0.3 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。

9.0.4 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。

9.0.5 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。

## 10、效益分析

### 10.0.1 经济效益

本工法对钢结构健康监测系统关键环节采用了合理的施工方法，加速钢结构健康监测系统形成，确保了结构健康监测系统的高效的运行。本工法的造价低廉节约了大量的建设成本。本工法对钢结构安装施工提供了必要的技术支持，对结构的加载卸载过程等关键施工节点进行连续监测，有利于钢结构施工单位及时掌握结构安全状态，反馈回顾施工方案，提高施工效率，节约成本。在监测运行阶段对建筑结构使用情况进行分析评估，确保了结构长期安全运行，降低了灾害发生的概率，经济效益可观。

### 10.0.2 环保效益

本工法与传统施工方法相比，采用了新型的光纤光栅传感技术以及先进合理的施工工艺，不产生建筑垃圾，不排放污染物，符合节能环保标准，实现了绿色、环保的施工目的，取得了一定的环保效益。

### 10.0.3 社会效益

该工法系统总结了钢结构健康监测中光纤光栅传感系统安装技术，实际应用效果体现出其具有方便、快捷、高效、可靠等优点，是一项发展迅速的高新技术，具有广阔的推广价值和应用前景。

## 11、应用实例

### 11.1 大连市体育中心体育场工程

11.1.1 工程概况：大连市体育中心体育场位于大连市甘井子区西北

路与岚岭路交会处。占地面积 13.5 万平方米，建筑面积 12 万平方米，6.1 万个座位。体育场的室外两片训练场地占地 60000 平方米，能够承担田径、足球等奥运会赛事，同时兼顾城市大型活动功能。体育场造型为飘逸的曲线形态，体育场外观采用的膜结构面积是目前世界上仅次于北京水立方的大型单体建筑。该工程 2011 年 6 月竣工，2013 年成功承办全运会足球赛事。

11.1.2 工法使用情况：该工程共使用了 172 个光纤光栅应变传感器和 172 个温度补偿传感器，对每榀桁架关键受力位置和变形进行实时监测。整个施工过程和加载过程所采集的数据与设计计算值基本一致。体育场投入使用后，系统继续运行，为各种演出活动和体育赛事提供了重要的安全预警，得到了运营方的充分肯定。

#### 11.1.3 经济效益和社会效益

与传统传感器价格相比，光纤光栅传感器、光缆的价格合理，成本控制优势明显。在大连市体育馆工程中，传感器和光纤的总造价比传统传感器及电缆总造价节省 15 万元。光纤光栅传感器结构简单，安装方便，大连市体育馆工程安装人工成本合计节省 10 万元。该工法在钢结构健康监测领域具重大意义，该工程为光纤光栅传感器钢结构健康监测施工工法的实际应用，具有巨大的推广价值，社会效益十分显著。

#### 11.2 大连新世界大厦东塔楼工程

大连新世界大厦工程建筑面积约 8 万平方米，工程的开工时间为 2007 年 7 月 1 日，竣工时间为 2010 年 11 月 30 日，地下 3 层，裙房为地上 4 层，东塔楼地上 58 层，结构高度 210 米。主体为混合结构，钢结构从地上 5 层开始，核心筒中分布有型钢钢骨柱，外框架由矩形钢柱和楼层钢梁组成；5-6 层为组合结构转换桁架；15 层/26 层/37

层设置有伸臂桁架。该工程结构复杂，对重要结构节点植入 80 个光纤光栅应变传感器和 80 个温度补偿传感器，对主要受力部位和变形部位进行实时监控。对于工程安装施工过程及后期使用发挥了系统作用。该工程中传感器和光纤的总造价比传统传感器电缆总造价节省 13 万元，安装人工成本合计节省 8 万元。

### 11.3 曙光汽车零部件制造基地建设项目工程

曙光汽车零部件制造基地建设项目工程由曙光汽车零部件制造有限公司投资，金广建设集团有限公司承建，大保健设管理有限公司负责监理工作，工程开工时间 2010 年 7 月 1 日，竣工时间为 2011 年 11 月 30 日。工程建筑面积 7.8 万平方米，共 6 座单体厂房，主体为钢结构，建筑高度为 19.25 米。该工程在各关键结构节点中，共植入 120 个光纤光栅应变传感器和 120 个温度补偿传感器，用于监测、控制安装施工过程及结构后期投入生产使用状态。与传统工法相比，该工程总造价节省 10 万元，人工成本节省 6 万元。通过使用该工法，不仅确保了工程质量，还降低了工程后期维修成本，获得了良好的经济和社会效益。