

光纤光栅传感器在索结构健康监测中应用 施工工法



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9月

1、前言

我国建筑索结构的应用百花齐放，创新形式不断涌现，建造技术日益成熟，已经进入发展高潮期，方兴未艾。索结构通常由索与其它结构组成，应用于建筑结构、桥梁结构、围护结构（幕墙、采光顶）。建筑结构中，索结构的形式众多，结构复杂，应用索作为承重结构或通过张拉索对刚性结构体系施加预应力，能够提高或改善结构的受力性能。索力测量是索结构设计和施工的重点和难点，在安装施工过程中，拉索的受力具有明显的非线性，对拉索的受力情况进行实时监测具有重要的意义。

以往索结构健康监测中，对索力的监测通常采用传统的电类传感器，电类传感器受电磁干扰严重、耐久性差，监测效果不理想。光栅光纤传感器凭借自身抗电磁干扰、电绝缘性能好、耐久性好、耐腐蚀、体积小、传输损耗小、传输容量大、测量范围广等优点在索结构健康监测中得到广泛应用。该工法采用了一种光纤光栅锁力传感器，其耐久性和精度能够满足索结构长期健康监测的要求。通过实验室模拟实验和索具公司现场标定结果，可以看出，光纤光栅锁力传感器测量准确，安装便捷，其耐久性好（25年以上），能够满足结构健康监测长期要求。本文通过总结索结构健康监测工程实例中光纤光栅传感系统的应用方法，形成光纤光栅传感器在索结构健康监测中应用施工工法。

该工法经过大连理工大学实验理论系统研究，由金广建设集团有限公司在工程实际应用中总结完善。深圳市简测科技有限公司完

成产品生产并进行实际应用。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、教育部科学技术进步二等奖。

2、工法特点

2.0.1 光纤光栅传感器和光缆的主要部位都是光导纤维，其不含金属成分，因此价格优势明显。光纤光栅传感器耐久性好，能够适应各种不利环境，成活率高，可重复使用，有效节约了施工成本。光纤光栅传感器无须电力驱动，传输距离远，操作便捷。

2.0.2 本工法选择索与结构连接的耳板作为索力监测点，耳板和索长调节杆的材质均匀，应力与应变呈线性关系，因此通过测量耳板应变，能够实现索力监测。该工法施工灵活方便，质量保证措施和控制措施充分，能够有效保护光纤光栅传感系统，确保了光纤光栅传感器的成活率和使用性能。该工法工序明了、操作简便，通俗易懂、操作人员易于掌握，实用性强，易于推广。

2.0.3 索的内部结构复杂，对外观品质要求较高，其索面及附属构件不允许出现损伤，并保证索自身和环境绝缘。光纤光栅传感器为无源传感器，安装过程不破坏原有结构，能够实现索力监测。

2.0.4 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

在索结构健康监测领域，该光纤光栅传感系统施工工艺实用性强，易于推广，适用于弦支结构、斜拉结构、索穹顶结构、索桁架结构、索膜结构和索网结构等。

4、工艺原理

4.1 传感器原理

4.1.1 光纤光栅传感器安装在构件表面，当构件所处环境温度或受力状态发生变化时，光纤传感器的中心波长发生变化，通过测量光纤传感中心器波长的变化，可以获得结构应力变化或者环境温度变化。本工法所运用光纤光栅传感器是指光纤光栅应变传感器和温度传感器。见图 4.0.1-1~5:



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

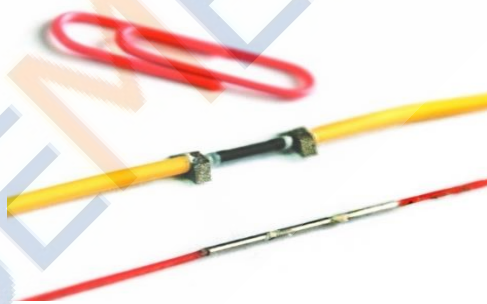


图 4.1.2-4 微型光纤光栅传感器



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

与传统传感器相比,光栅光纤传感器具有很多优点:(1)体积小、质量轻,常用的光纤半径为 $125\ \mu\text{m}$,最细的光纤半径可达 $17\sim 20\ \mu\text{m}$ 。可使用夹持块将光纤传感器焊接、粘接在结构表面或直接埋入混凝土结构内部,测量结构参数变化。(2)精度高,量程范围大。光纤传感器采用波长调制技术,其量程范围为 $\pm 2000\ \mu\text{e}$ 。(3)抗潮湿、抗电磁干扰、抗疲劳、耐久性好。光纤一般使用高分子材料包裹在其表面作为保护层,高分子材料能够很好的抵抗酸碱等化学成分的腐蚀,因此光纤传感器能够在腐蚀性环境中工作,适合结构长期健康监测。

(4)采用分布式测量,传感器布置灵活。(5)价格低、易于更换。光纤光栅传感器原理如图 4.1.1-6 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。

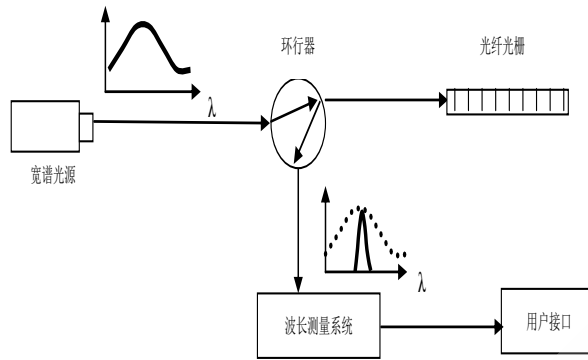


图 4.1.1-6 光纤光栅传感器原理

4.1.2 光纤光栅应变传感器封装

夹持式封装技术的主要思想是在钢管封装的光纤光栅传感器两端安装夹持式构件，将待测结构的应变通过夹持构件传递给光纤光栅，其原理如图 4.1.2-1 所示。使用粘结剂将光纤光栅固定于两个夹持部件之间。夹持部件采用钢管，直径为 d ；两端固定点之间的距离为 L ；两端夹持部件之间的距离为 L_f 。当结构受到外力作用发生变形时，安装在结构表面的光纤光栅传感器也随之发生变形，假设两个固定支点之间的轴向变形为 ΔL ，忽略钢管内胶层的变化，则 ΔL 由夹持部件的变形 ΔL_s 和光纤光栅的变形 ΔL_f 两部分组成**错误!未找到引用源。**

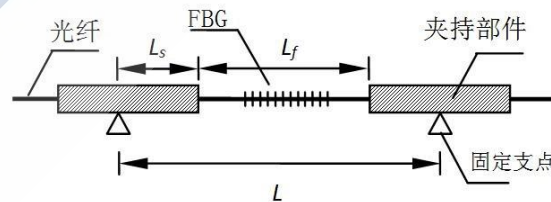


图 4.1.2-1 光纤光栅应变传感器构造图

为验证传感器应变传递效果，采用了等强度梁进行标定实验，如图 4.1.2-2 所示。将光纤光栅传感器和裸光纤安装在等强度梁的表面，

对等强度梁进行连续加载，标定传感器，标定结果如图 4.1.2-3 所示。

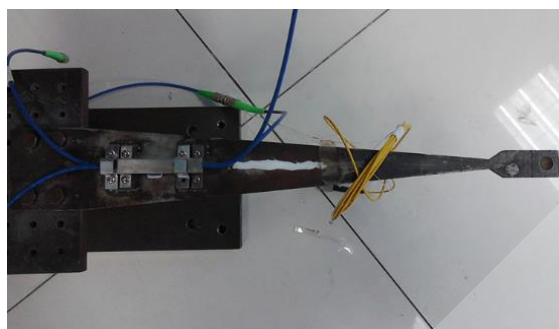


图 4.1.2-2 等强度梁

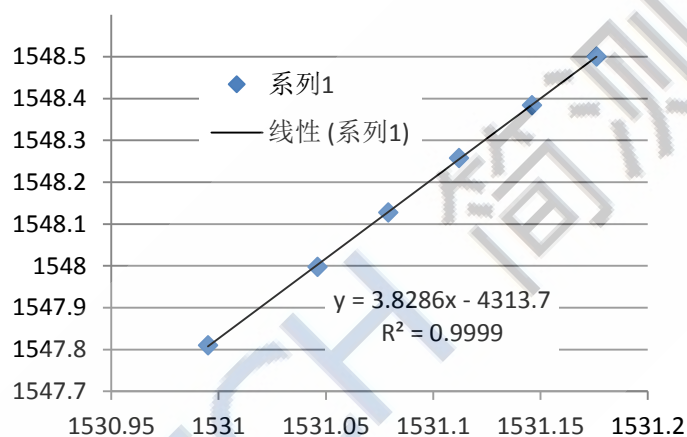


图 4.1.2-3 标定结果

从等强度梁的标定曲线可以看出，线性相关系数达 0.9999。

4.2 安装方法原理

光纤光栅传感器特点和传感器安装位置的选择：索在拉伸时，会发生明显的扭转挤压现象，如果将传感器植入索体内部，将会在拉伸过程中损坏传感器，同时也破坏了索体结构。分析研究索体结构发现，连接耳板和索长调节杆材质和形状均匀，适合安装传感器且不会破坏索体结构。实验证实，连接耳板和索长调节杆应力应变图呈直线分布，可以通过测量该部分应力应变，间接得到索力。光纤光栅传感器的安装方式有粘接和焊接，索体结构构件通常不允许焊接，因此选用粘结

方式安装。将传感器底座粘接在耳板和索长调节杆上，索力标定结果显示，该方法能真实反映索力变化，能够实现索力实时监测。

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。

4.4 采集设备功能简介

新型光纤光栅解调设备和编程语言的应用：设备采用大连理工大学研制的光纤光栅解调仪，该设备功能强大，精度高，能够实现光纤传感器与电类传感器多通道实时同步采集。该系统基于 LABVIEW 语言和 CompactRIO 平台进行开发，具有以下功能：

- 1) 多信号实时同步采集
- 2) 数据自动存储功能
- 3) 自动生成报表功能
- 4) 多途径自动报警功能
- 5) 三维模型动态显示功能

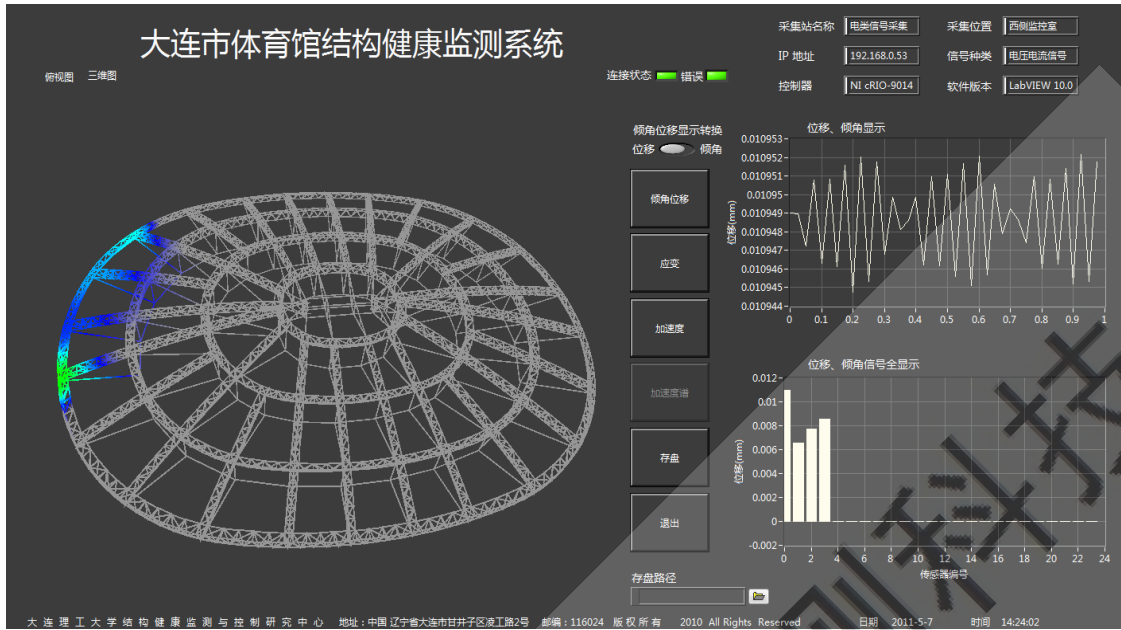


图 4.4-1 三维动态模型显示

5、施工工艺流程及操作要点

5.1 工艺流程

以大连市体育中心体育馆工程为例，工艺流程如下所示：



图 5.1-1 工艺流程图

大连市体育中心体育馆及配套服务设施工程是该体育中心最早开工建设的核心项目，总建筑面积约 8.1 万平方米，座位数 1.8 万人，采用了新型杂交空间结构体系——弦支穹顶（索支网壳）结构体系，最大跨度为 145.4 米，整个钢屋盖形状在空间上呈椭球体，整个结构通过 46 个支座固定于下部混凝土柱上。屋盖结构与水平方向倾斜布置，最高点高度为 45 米，矢跨比 1/10，上部采用巨型桁架结构，下部索杆体系为肋环型，由撑杆、环向索和径向索构成，共设 3 环。主体管桁架下弦为典型拉索结构，上弦空间管桁架与钢索的连接节点均采用销接节点，主体结构屋盖侧视图如图 5.1-2 所示，主体结构三视图如图 5.1-3 所示，弦支穹顶结构平面图如图 5.1-4 所示，钢索截面如表 5.1-1 所示。

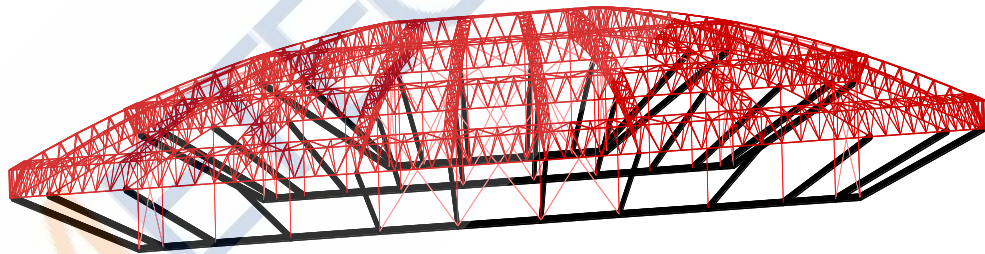


图 5.1-2 主体结构屋盖侧视图

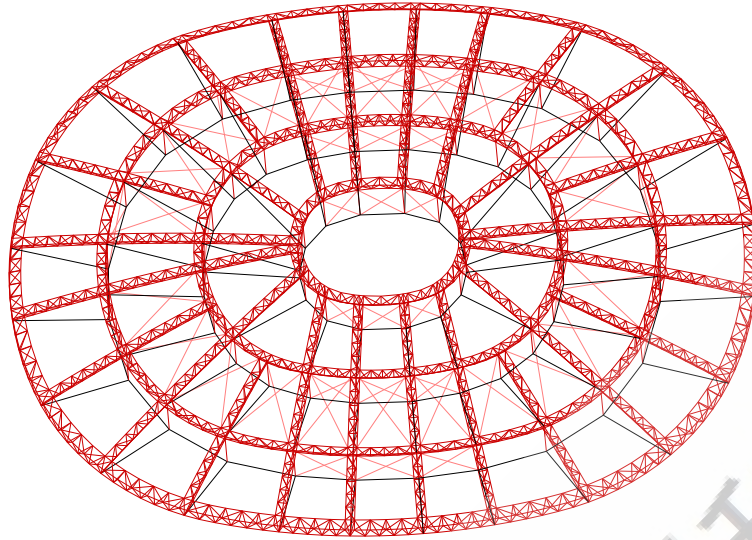


图 5.1-3 主体结构屋盖三视图

表 5.1-1 钢索截面

截面位置	直径(mm)	单根有效面积(mm ²)	规格	总面积(mm ²)
内圈环索	95	4195.0	单索	4195.0
第二圈环索	95	4175.0	双索	8390.0
外圈环索	105	5349.0	双索	8390.0
内圈、第二圈径向索	80	2809.0	单索	2809.0
外圈径向索	105	5349.0	单索	5349.0

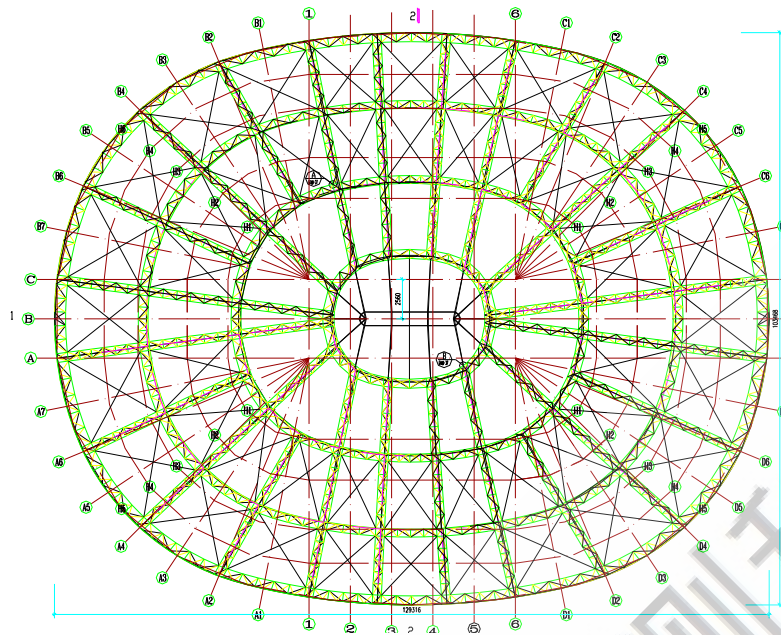


图 5.1-4 弦支穹顶结构平面图

5.2 光纤光栅传感系统索结构健康监测方案和施工方案的制定

5.2.1 监测方案制定

根据计算模型确定索的三种状态：零应力状态、预应力状态、荷载受力状态。根据索力监测方法，确定传感器数量、夹持装置、工具和器械等。参考结构受力分析计算书、设计要求和《结构健康监测设计标准》，制定监测方案。根据结构分析计算书和设计要求，对表 5.2.1-1 中所列关键拉索采用光纤光栅索力传感器进行索力监测，在每个拉索的锚头和索长调节杆安装一个光纤光栅索力传感器，同时每个拉索的锚头处安装一个光纤光栅温度传感器，补偿温度变化。光纤光栅索力传感器安装位置如图 5.2.1-1 所示，关键拉索的索力监测测点位置如图 5.2.1-2 所示。

表 5.2.1-1 关键拉索的索力监测测点位置

类别	构件性质	受力特征	单元号	传感器数量
第一类	环向拉索	拉力	6721, 6722, 6723, 6730, 6731, 6732, 6725, 6728, 6781, 6742, 6711, 6672	12
第二类	内环-2环 间径向索	拉力	6762, 6691, 6676, 6707, 6692, 6761, 6746, 6777	8
第三类	2环-3环 间径向索	拉力	6683, 6688, 6695, 6700, 6753, 6758, 6765, 6770	8
第四类	3环-4环 间径向索	拉力	6774, 6775, 6748, 6749, 6679, 6678, 6705, 6704	8

共计采用 36 个光纤光栅索力传感器, 36 个光纤光栅温度传感器。

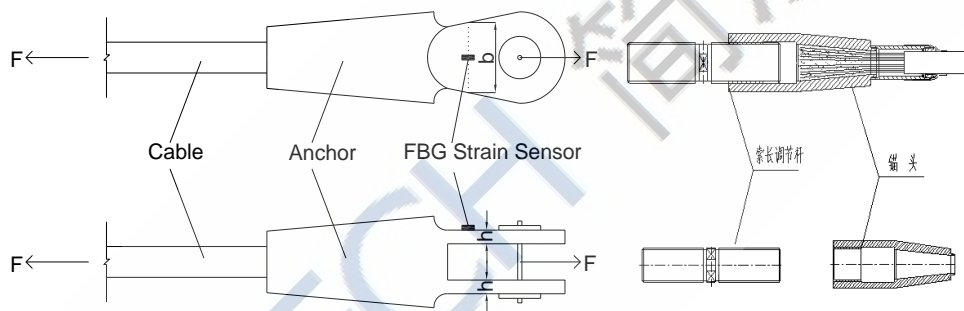


图 5.2.1-1 光纤光栅索力传感器安装位置示意图

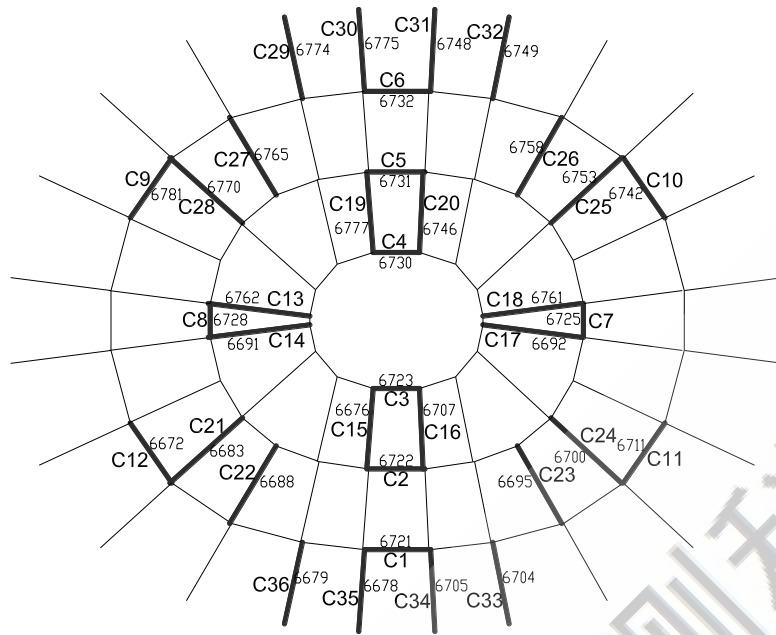


图 5.2.1-2 关键拉索的索力监测测点位置

5.2.2 光纤光栅传感系统施工方案的制定

根据索力监测方案，制定光纤光栅传感系统施工方案，包括传感器定位、安装、保护、以及光缆线路规划。索体结构由以下构件构成：连接耳板、索、锚头和索长调节杆，如图 5.2.2-1 所示：

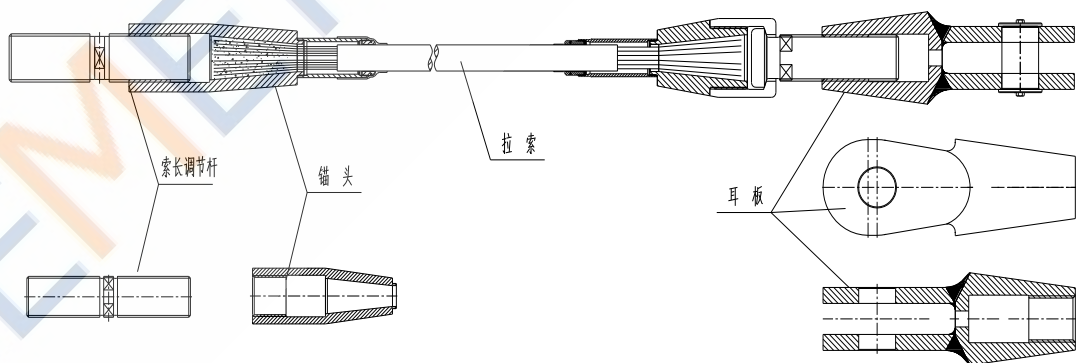


图 5.2.2-1 索结构示意图

连接耳板和索长调节杆应力应变图呈直线分布，可以通过测量该部分应力应变，间接得到索力。因此将传感器底座粘接在耳板和索长

调节杆上，如图 5.2.2-2 所示：

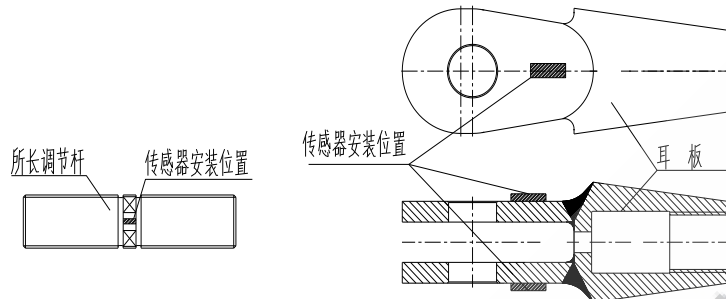


图 5.2.2-2 传感器安装位置示意图

索体结构复杂，其他专业施工时应防止索面产生电火花损坏索面结构和材质，对索结构造成破坏。应避免索导电的情况出现，否则会造成索结构在短时间产生高温而失效。光纤光栅传感器为无源传感器，最大程度降低了对索体结构的破坏风险。

5.3 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工作。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结构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。

5.4 工厂标定

拉索出厂前，须进行索张拉实验标定，利用索张拉过程，进行索力传感器标定。为保证标定结果准确，标定实验通常在索生产车间进

行。以往工程标定结果发现，光纤光栅传感器安装在连接耳板和索长调节杆是很理想的，原因如下：

- 1) 安装在该位置不会破坏索体结构，没有降低索的强度；
- 2) 光纤光栅传感器能准确反映索力的变化情况；
- 3) 光纤光栅传感器安装在结构表面便于安装和维修，提高了传感器的成活率，降低了安装成本。

标定现场如图 5.4-1 图 5.4-2 标定现场图所示：



图 5.4-1 标定现场图



图 5.4-2 试验机

为避免传感器在索堆放和运输过程中的损坏，标定完成后将传感器拆除并妥善保管，保留传感器夹持装置，并做好记录使耳板钢印号

与传感器一一对应。索结构运至施工现场后，重新将传感器对应钢印号逐个安装上去。

5.5 现场安装

现场传感器安装，应在索安装完成后并处于零应力状态下完成。传感器安装完成后，应进行传感器数据采集，作为索力监测初始状态。

传感器现场安装如下图所示：



图 5.5-1 钢印标记

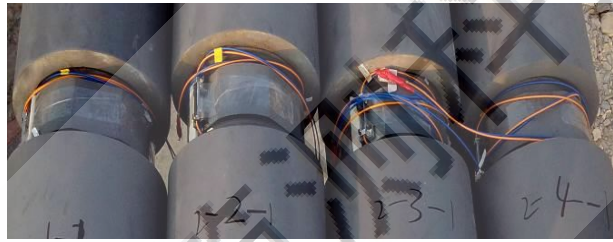


图 5.5-2 现场传感器安装

传感器安装采用环氧树脂粘接方式进行：将待测目标位置用锉刀出去污渍，后用砂纸打磨光滑，均匀涂抹一层环氧树脂，然后将传感器底座精确的安放在标定位置，用透明胶带固定直至环氧树脂胶固化。

5.6 设备和材料的准备

索表面安装传感器，应优先采用环氧树脂胶粘接，而焊接容易破坏锚头，因此不宜采用焊接。需要准备的材料有：传感器加持底座、环氧树脂胶、泡沫单面胶、锉刀、砂纸、塑料壳、PPR 铝塑管、扎带等

光纤光栅传感器应尽量避免外力接触和碰撞，采用保护壳的办法能够有效保护传感器、光缆和接头。采用强度较高的铝塑 PPR 管对光纤敷设线缆进行保护，同时将光纤的留余部分汇总在监控室机柜内进行保护。

5.7 监测

5.7.1 张拉过程监测

索安装就位后，将所有传感器接入监测设备，对张拉过程中索受力情况进行实时监测。张拉过程中，索力达到设计值后索的整体形态位置理论上能够达到设计要求，然而受多种耦合因素影响，施工须分步进行才能达到索力和形态符合设计要求。本工程分三步进行张拉：第一步，索安装就位后张拉至 10%设计值，停止张拉并调整索形态；第二步，张拉至 50%设计值，进行第二次调整索形态；第三步，张拉至 105%设计值后卸载至 100%设计值，进行最后一次形态调整，张拉结束。整个张拉过程索力可以通过油压千斤顶的压力表直接读出索力值，与光纤光栅传感器实时采集的索力形成对比，分析证明，光纤光栅传感器所测的索力与千斤顶所测的索力基本一致。

5.7.2 荷载状态监测

索张拉完成后，多种荷载逐渐增加，对该阶段进行索力实时监测尤为重要。随着荷载不断增加，索力也随之产生变化，实时监测索力能够反映结构安全状态，对安全施工及保证结构安全性具有指导意义，同时施工单位根据监测结果能够适当加快施工速度，提高施工质量，从而降低施工成本。

5.7.3 运营状态监测

工程竣工交付使用后，结构健康监测系统可以满足运营方实时了解结构的安全情况的要求。实时监测的数据为运营方举办各种活动提供可靠地安全性评价参考依据。该系统可以实现远程控制和自动报警，

不需要人员长期驻守现场。报警信息通过手机短信和 E-mail 电子邮件的方式发送，保证了获得重要报警信息的及时性。

5.8 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，防止结构施工的其他工序覆盖或者破坏该传感器。2) 记录索结构初始状态值，为以后数据处理做好准备。3) 对索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。

5.9 综合布线施工

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。应严格执行线缆及传感器保护措施，体育馆索结构布线示意图所示：

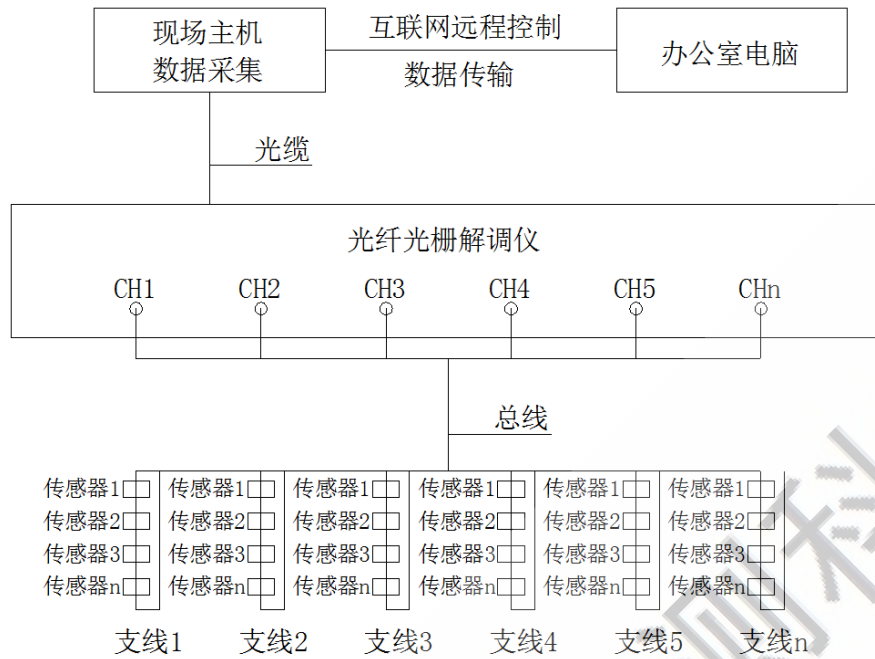


图 5.9-1 索结构布线示意图

5.10 系统整体性能调试

索结构中光纤光栅传感系统的性能调试与其他结构健康监测性能调试有所不同，选择索就位后的时间节点作为系统调试的初始状态。调试完成后，对张拉过程的索力监测具有指导意义。判断索结构健康监测系统性能主要参照以下三个标准：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 测试系统的数据分析处理能力。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。

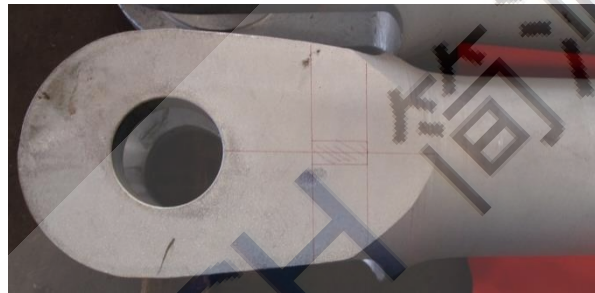
5.11 实时监测

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。

5.12 施工操作要点

5.12.1 为保证索力监测结果准确，传感器安装位置确定后应保证光纤光栅传感器的轴线方向与索的轴线方向一致，精确测量确定轴线后将传感器夹持装置用环氧树脂胶粘结好。



5.12.2 传感器夹持装置设计合理性和加工精度直接影响传感器的工作性能，传感器夹持装置应采用精度较高的线切割加工技术，保证装置精度要求。

5.12.3 夹持装置与索粘接：为保证不破坏索结构，夹持装置底座采用环氧树脂粘在设计安装位置。环氧树脂应现用现制，刚制好的环氧树脂流动性大，在重力等因素影响下，夹持装置底座会出现滑落现象，采用胶带将粘好后的夹持装置底座固定，确保安装位置准确。

5.12.4 现场光纤布置：施工现场各专业交叉施工作业，会对传感器和光纤造成破坏，选择合适的线路和采取恰当的保护措施是十分必要的。通常采用电缆桥架和穿线管对光缆进行保护，采用塑料保护壳对

传感器进行保护。

5.12.5 长期实时监测：结构健康监测是长期不间断的连续监测过程，对采集设备和传感器要求很高，应保证采集系统的正常电力供应。施工现场的电力供应受各种环境的影响，随时断电和电压不稳的现象时有发生，为避免断电对系统的影响，采集系统通常配置 UPS 备用电源装置，可以保证临时断电时的短时电力供应。

5.12.6 采用电工胶布将光纤端头和光纤耦合器紧密包裹，避免外界环境污染。电工胶布包裹完成后，采用防水胶布再次紧密包裹一至两层，能够起到防水和缓冲减震作用。

5.13 小结

本节介绍了光纤光栅传感系统在索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、准确反映索力变化，确保了索结构张拉施工期间整体结构的安全性和稳定性，实现了空间索结构的安装过程和张拉过程的结构健康监测，也为后期的实时监测应用奠定了基础。光纤光栅传感系统在索结构健康监测中的施工工艺是系统、完整的施工工艺，成功地应用于大连市体育中心体育馆结构健康监测、乐清市体育场索结构健康监测。下图 5.13-1、5.13-2 为大连市体育中心体育馆和乐清市体育场。

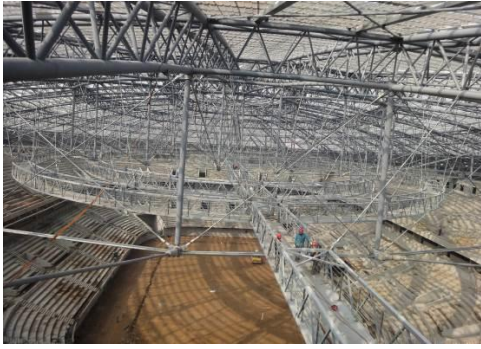


图 5.13-1 大连市体育馆索结构



图 5.13-2 乐清市体育场索结构

6、材料与设备

6.0.1 主要使用材料一览表

表 6.0.1-1 材料供应计划表

序号	材料名称	材质	单位
1	环氧树脂	环氧树脂	管
2	传感器夹持件	45#钢	kg
3	光缆	单模	米

6.0.2 采用主要机具设备一览表

表 6.0.2-2 机具、设备供应计划表

序号	机械设备物资	型号、规格	单位
1	小型直流焊机	220v	台
2	铁丝	10#	米
3	开泰管	6"	米
4	对讲机	GP88	台
5	角磨机	100	台
6	电缆桥架	100×50	米
7	光时域反射测试仪 (OTDR)		台
8	传感信号综合同步解调仪	JEME-i15-e32	台
9	笔记本电脑	联想 y650	台
10	稳压器	220	台

11	焊条	2.5	Kg
12	电工胶布		卷
13	防水胶布		卷

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，对索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	《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》	GB8923-2008	国家标准
3	《电力光纤通信工程验收规范》	DL/T5344-2006	行业标准
4	《索结构技术规程》	JGJ257-2012	行业标准
6	《土木工程用光纤光栅应变传感器》	JG/T422-2013	行业标准

7.2 易出现的质量问题

7.2.1 传感器夹持装置采用粘接形式，当环氧树脂胶没有凝固时，震

动挤压等因素容易使传感器发生错位，从而使索力监测结果不准确。

7.2.2 传感器信号强度衰减。

7.2.3 光纤端头和耦合器受到污染。

7.2.4 交叉施工影响，传感器受到破坏。

7.3 保证措施

7.3.1 传感器安装定位完成后，为防止因自重、震动和挤压等因素使传感器发生错位，应采用胶带将传感器牢固的帮扎在索体上，待环氧树脂胶完全固化后再撤去胶带。

7.3.2 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。

7.3.3 虽然对光纤端头采取了上述保护措施，但因施工环境复杂，端头会被污染。被污染的端头需要清理。清理需要准备的物品有：抹布、酒精、脱脂棉球、刀片等。

7.3.4 应与混凝土施工单位保持联系，实时了解混凝土施工进度和现场情况。

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

本工法对索结构监测系统关键环节采用了合理的施工方法，加速监测系统形成，确保了索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。本工法对索张拉施工提供了必要的技术支持，对结构的关键施工节点进行连续监测，有利于结构施工单

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

该工法系统总结了光纤光栅传感器在索结构健康监测系统中的安装方法，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 大连市体育馆工程

11.1.1 工程概况

大连市体育中心体育馆及配套服务设施总建筑面积约 8.1 万平方米，座位数 1.8 万人，体育馆地下一层，地上五层，建筑总高度 41.26 米，2009 年 7 月 1 日开工，2011 年 11 月 30 日竣工。体育馆主体结构屋顶采用弦支穹顶（索支网壳）结构体系，最大跨度为 145.4 米。

11.1.2 工法应用情况

该工程索杆体系为肋环型，由撑杆、环向索和径向索构成，共设 3 环。共采用了 74 个光纤光栅应变传感器和 74 个光纤光栅温度传感

器，对拉索受力进行实时监测。张拉施工期间，油压表索力代表值与传感器所采集的索力值基本一致。期间，监测到个别索受力异常，经检查发现，索夹出现了滑移现象，及时通知施工方采取措施解决。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 经济与社会效益

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 3 万元。该工法在索力测量和结构健康监测领域具有重大意义，与其他索力测量方法相比，光纤光栅索力传感器测量方法简单，数据可靠、精确，是一种新兴的索力测量方法。借助该索力健康监测系统，对体育馆的安全性能进行评价，判断结构损伤位置和损伤情况，为体育馆的安全运营提供了保障。该工程为光纤光栅传感器索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 大连国际孵化器二期

大连国际孵化器主楼工程位于大连高新园区七贤岭亿阳路北，由大连金明科技发展有限公司投资建设，大连金广建设集团有限公司承建，大连兴业监理有限公司监理，开工时间 2008 年 4 月 30 日，竣工时间 2010 年 8 月 6 日。工程主体地上 25 层，地下 1 层，裙房三层，为框架剪力墙结构，总建筑面积为 83000 平方米。该工程裙房部分为

室内网球场和羽毛球场等运动场所，屋面采用索结构。共采用 34 个光纤光栅索力传感器和 34 个温度传感器，对拉索受力进行实时监测。该工程传感器总造价比传统传感器总造价节省 7 万元，人工费节省 2 万元。该工程采用本施工工法，对索结构进行长期实时监测，有效保证了施工质量，降低了后期使用过程的维护费用，取得了良好的经济效益及社会效益。

11.3 大连海事大学科技园 2#楼建筑工程

大连海事大学科技园 2#楼位于大连市高新区黄浦路核心地段，塔楼 34 层，地下四层，裙房 5 层，总建筑面积 28 万平方米，工程开工时间 2009 年 8 月 1 日，竣工时间 2012 年 11 月 20 日。裙房使用功能为大型商场及电影院，塔楼为写字间。裙房部分大堂建筑面积 2400 平方米，屋顶采用索结构。共采用 54 个光纤光栅索力传感器和 54 个温度传感器，对索结构进行实时监测。该工程传感器总造价比传统传感器总造价节省 13 万元，人工费节省 3 万元。该项目对索施工过程进行连续实时监测，保证索受力满足设计要求，工程质量得到保证。建筑投入使用后，索结构满足使用功能要求，监测效果得到认可。