

光纤光栅传感系统 在混凝土结构健康监测中应用工法



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5月

1、前言

传感器是结构健康监测的基础，传统的电类传感器受电磁干扰大、远距离传输信号衰减大、受环境因素的影响大等特性大大限制了在工程长期监测中的应用，阻碍了混凝土结构健康监测行业的发展，特别是混凝土内部传感器植入环境、电磁干扰环境、水下潮湿环境、腐蚀性环境、易燃易爆环境、电力缺乏的环境等。近年来，光纤光栅传感技术不断应用和发展，对混凝土结构健康监测行业起到了推波助澜的作用。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；耐腐蚀；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；造价相对低廉。实验证实，光纤光栅存活寿命大于 25 年，反复性能良好，恶劣环境下性能稳定。光纤光栅传感技术凭借自身优势弥补了传统电类传感器的先天不足并逐渐取代传统电类传感器，工程建设中的应用越来越广泛，取得了良好的经济效益和社会效益。

目前关于光栅光纤传感系统的结构健康监测理论研究正趋于完备，光纤光栅传感器的类也呈多样性发展，数据采集手段和数据处理方法也逐步发展完备，但光纤光栅传感系统在混凝土结构健康监测中的施工过程却常常被忽略，同时缺少相应标准来约束和指导光纤光栅传感技术在混凝土结构健康监测系统中的施工，导致监测方案收不到预期的效果。该工法经过大连理工大学实验理论系统研究，由大连金广建设集团有限公司在工程实际应用中总结完善。光纤光栅传感系统在混凝土结构健康监测应用领域中，我公司与大连理工大学合作多年，通过结构健康监测施工实践，不断探索，积累了丰富的施工经验。通过对以往工程实践进行总结探索，形成了光纤光栅传感器在混凝土结构健康监测中应用工法，以指导光纤光栅传感器在混凝土结构健康监

测中的工程应用。希望该工法能为光纤光栅传感器在混凝土结构领域的应用起到引导作用，为我国混凝土结构建设的研究工作做出贡献。

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沈阳市伯官大桥工程，大连市体育中心体育馆工程，大连市体育中心体育场等建筑工程。通过对多个工程的结构健康监测，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

2.0.1 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 新的传感技术和产品需要配合新的施工工艺。根据光纤光栅传感系统的特性，工程中实际应用光纤光栅传感器对施工工艺要求较高，确保工艺能够有效保护光纤光栅传感系统。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 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。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。

2.0.4 设备采用光纤光栅传感器和电类传感器同步解调仪，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

在混凝土结构健康监测中，该工法充分发挥了光纤光栅适应性强的特点，适用于混凝土结构（包括预应力混凝土结构）内部和表面的应力、应变、温度和位移等物理量的监测。光纤光栅传感器为无源传感器，在井巷和隧道等易爆环境中之中，不会引起爆炸。

4、工艺原理

4.1 光纤光栅传感器

4.1.1 光纤光栅传感器的原理简介：

光纤光栅传感器的原理结构如图 4.1.1-1 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。

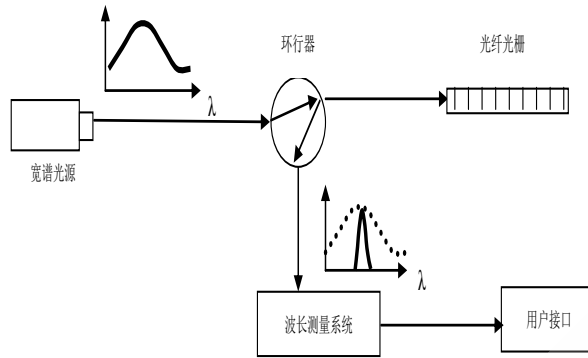


图 4.1.1-1 光纤光栅传感器原理

4.1.2 光纤光栅应变传感器简介

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。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。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，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：

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

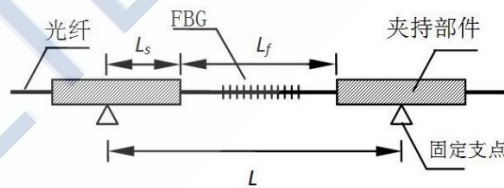


图 4.1.2-1 光纤光栅应变传感器构造图



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

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 4.1.2-4 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 4.1.2-5 所示。

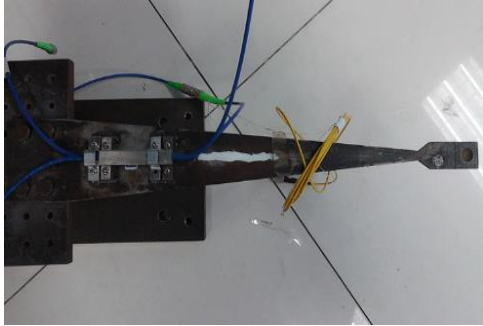


图 4.1.2-4 等强度梁

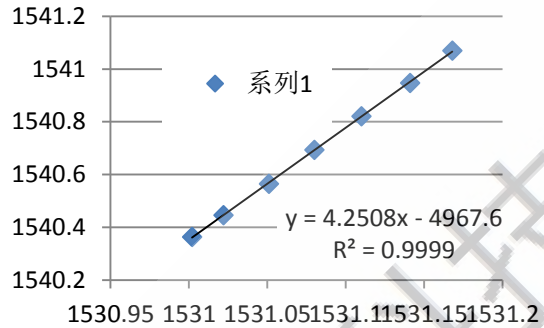


图 4.1.2-5 标定结果

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 安装固定原理，内部工艺原理

4.2.1 光纤光栅传感器植入混凝土结构内部的工法工艺原理

光纤光栅传感器可以植入混凝土内部进行测量，工法采用的设计思路是根据不同的施工工序，采取不同的固定传感器和保护传感器的工艺措施，以保证整个传感系统的有效性。如在振捣混凝土时，内部增加传感器保护装置，避免传感器受到振捣破坏；离心成型的混凝土内部增加保护装置，避免离心石子挤压破坏传感器，如图 4.2.1-1、2 所示：



图 4.2.1-1: 需振捣混凝土内部植入保护



图 4.2.1-2: 离心成型传感器植入保护

4.2.2 光纤光栅传感器监测混凝土结构表面的工法工艺原理

混凝土结构按其构件组成可以分为基础、墙、柱、梁、板、支撑等，传感器安装在混凝土表面分为粘接和锚接两种方法。传感器服役周期以及传感器安装部位决定了其安装方法。对于短期监测，可将传感器直接粘贴或者借助加持装置粘贴在结构表面，长期监测则可通过夹持装置铆接于结构表面。安装完成后，需要对传感器和线缆进行有效保护，如下图所示：



图 4.2.2-1 码头桩的表面传感器安装和保护

4.3 综合布线原理

混凝土结构健康监测布线系统选用综合布线匹配的接口，便于融入整个结构的综合布线系统，有利于实现建筑结构智能化，节约成本。

4.4 采集设备功能介绍

本工法采用了大连理工大学研制的光纤光栅解调仪，该设备精度高、性能稳定、功能强大，能够实现光纤光栅传感器与电类传感器多通道实时同步采集。

5、施工工艺流程及操作要点

5.1 施工流程

沈阳市伯官大桥工程为光纤光栅传感系统在混凝土结构健康监测中的实际应用案例。沈阳伯官大桥横跨沈阳浑河，北接棋盘山，南连沈抚新城，桥梁总长 885m，桥宽 32m，双向六车道，2010 年开工建设，2013 年竣工通车。该桥是我国首座六跨中承式飘带形提篮斜拱桥；拱肋采用变截面矩形空心钢箱体系，上下游拱肋之间组成三维空间结构，最大跨度 120m，最大拱高 67m；拱座以上拱肋双向倾斜，呈倒 V 状，内倾 17 度，除主跨拱肋外其余拱肋均无横向风撑；吊杆采用双索面布置，共计 172 根；主梁采用钢-混凝土叠合梁结构，混凝土桥面板通过剪力钉与吊杆横梁相连。如图 5.1-1 所示。



图 5.1-1 沈阳市伯官大桥照片

光栅光纤传感系统在混凝土结构健康监测中应用的施工工艺流程图如下

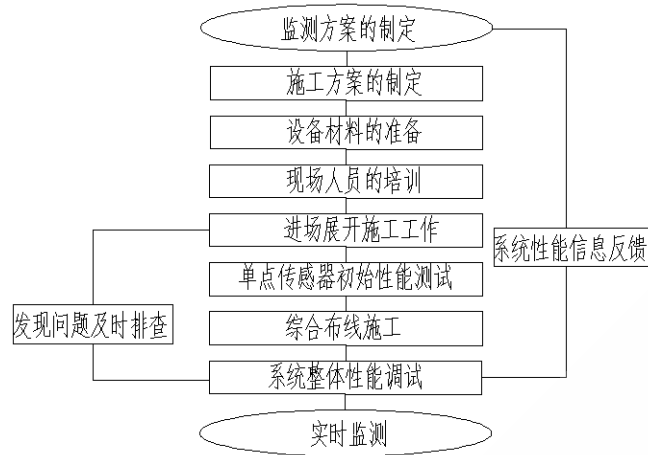


图 5.1-2 沈阳市伯官大桥光纤光栅传感系统健康监测流程图

5.2 光纤光栅监测方案制定

沈阳市伯官大桥健康监测目标包括：

- 1) 提供桥梁实际外荷载信息；
- 2) 对桥梁的计算假定和参数进行验证；
- 3) 有效监测桥梁服役期变形状态、关键部位和关键构件的受力和安全状态，实现对重要构件应力及变形超界的多级报警；
- 4) 对桥梁在长期服役期间进行运行状态监控和健康状况评估，及时发现结构响应的异常、结构损伤或退化，对桥梁的维护提供建议。

伯官大桥结构形式新颖、受力复杂，除主跨拱肋外，上下游拱肋间均无横向风撑且为陡拱，桥面采用格构式体系，拱脚处各构件相互交错，构造复杂，属于应力集中的薄弱部位。因此在钢结构和混凝土结合的拱脚部位植入了 20 组光纤光栅传感器，监测混凝土浇筑过程、混凝土凝结过程、桥梁施工荷载增加过程和通车运行过程的受力情况。桥梁桩基中植入 5 组光纤光栅传感器，监测土层的摩擦阻力和大桥的

承载状态。如图 5.2-1 所示

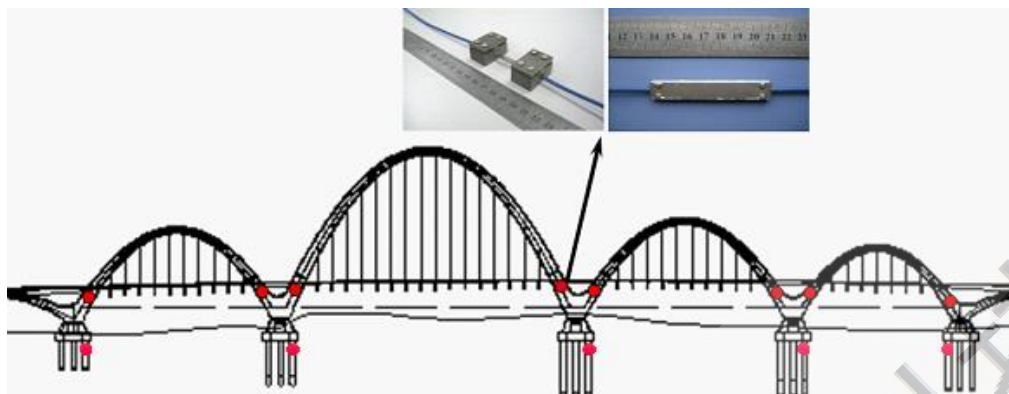


图 5.2-1 光纤光栅传感器及其安放位置

5.3 施工方案的制定

本工程所采用的光线光栅传感器全部置于混凝土内部，另有一部分埋置于泥土之中，这类环境下传统的电类传感器很难存活，光纤光栅传感器则可以在恶劣的环境下发挥稳定的性能。

光纤光栅传感器植入钢拱和混凝土结合部位的时，需要考虑混凝土浇筑作业时的冲击力和振动冲击力，采取有效措施对传感器和通信线缆进行有效保护，如图 5.3-1 所示。

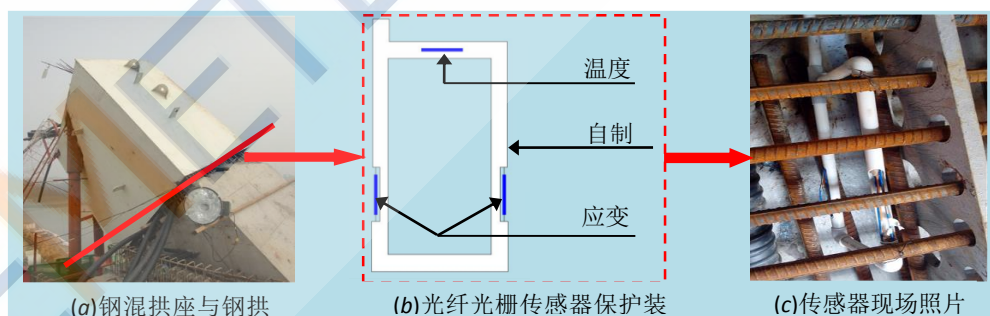


图 5.3-1 钢筋混凝土结合部位的传感器安装布置示意图

实验证实，管桩内植入的传感器采取裸露的方式即可以满足制作过程的保护要求，但光缆伸出管桩的部位应加强保护，防止打桩时损伤线缆。如图 5.3-2 所示：



图 5.3-2 管桩内部光纤光栅传感器

大桥整体线缆敷设采用穿线管保护，防止线缆老化和外力破坏。

5.4 设备材料准备

桥梁监测除采用光纤光栅传感器外，还采用了电类的加速度传感器、GPS 定位系统、风速仪等。设备选用大连理工大学研发的光纤光栅与电类传感器同步解调仪。线缆敷设采用 PVC 穿线管保护，光纤光栅传感器植入混凝土时采用 PVC 管保护，光纤接头和线缆采用光纤端头保护盒和 PPR 铝塑管进行保护，如图 5.4-1 所示：



图 5.4-1 光缆和端头保护

植入桩基检测光纤光栅传感器前，需要预先安装钢筋底座，然后将传感器安装在钢筋上，最后将钢筋绑扎固定于钢筋笼上，如图 5.4-2 所示：



图 5.4-2 桩基植入光纤光栅传感器底座

5.5 现场人员的培训

现场施工人员需掌握整个监测方案的各个施工环节：管桩内传感器的植入施工方法，钢-混凝土结合部位传感器植入施工方法，线缆敷设施工方法。实验证实，在管桩制作过程中植入光纤光栅传感器来测量管桩受力的方法可行有效，制定形成“管桩光纤光栅传感器植入技术交底文件”，施工人员应严格执行文件内容，采用工程追责制度，明确工程责任。

5.6 传感器及光缆的保护

钢-混凝土结合部位的传感器植入后，须进行混凝土浇筑和振捣工序，该部位传感器和线缆需要特别保护，伸出混凝土部分的光缆和端头同样需要保护。针对混凝土的施工特点，设计了传感器保护装置，如图 5.6-1、2 所示。

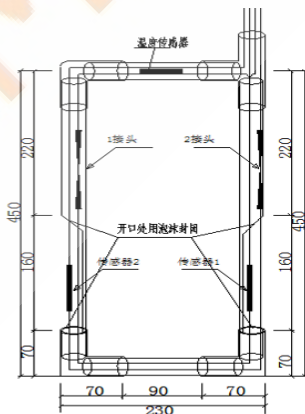


图 5.6-1 混凝土内部传感器保护设计



图 5.6-2 伸出混凝土部分光缆保护

光缆穿越混凝土部分采用 PPR 管保护，该管塑性好，可以随意弯曲，强度适中，振捣棒冲击下不破坏，能够有效保护信号光缆，混凝土外部光缆则采用 PVC 管进行保护。

5.7 单点传感器功能测试

管桩单点传感器功能测试分为四个阶段，分别为：管桩预制前测试，预制完成后测试，打桩完成后测试，系统成型后测试。通过各阶段传感器测试，能够掌握传感器状态信息，反馈桩受力过程。钢筋混凝土结合部位的传感器单点测试分为：植入后测试，浇筑后测试，混凝土凝固过程测试，系统成型后测试。如图 5.7-1、2、3 所示。

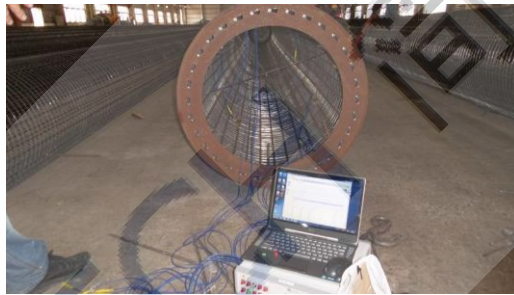


图 5.7-1 管桩预制前单点测试



图 5.7-2 管桩预制后单点测试



图 5.7-3 实时监测

5.8 综合布线施工

在整个桥梁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。该桥梁结构的综合布线系统分为桥梁亮化系统、除湿系统、通信系统和结构健康监测系统。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，也不利于桥梁结构智能化的实现。如图 5.8-1 所示

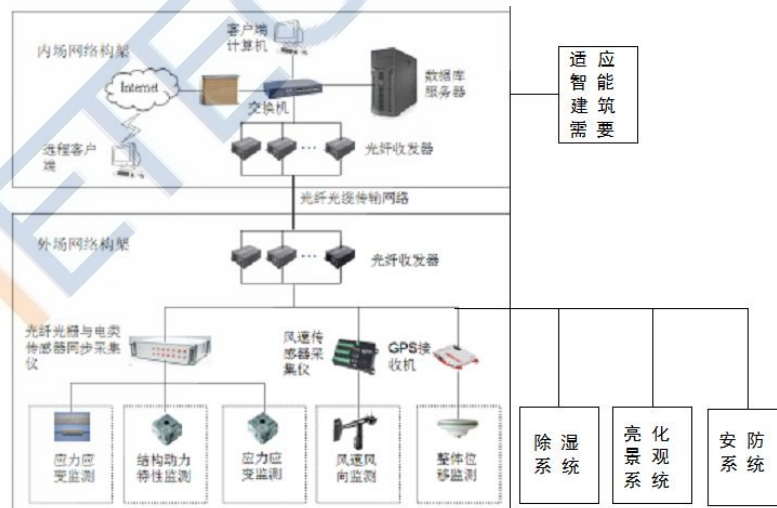


图 5.8-1 大桥综合布线示意图

工程中应用的光缆应精确计算使用长度，根据工程经验合理确定光缆总量，由光纤生产厂家加工，避免现场焊接，保证光纤质量。为避免光信号衰减，光缆穿过保护管时，保证光缆走线平顺，

内部不能弯折，如图 5.8-2、3 所示。

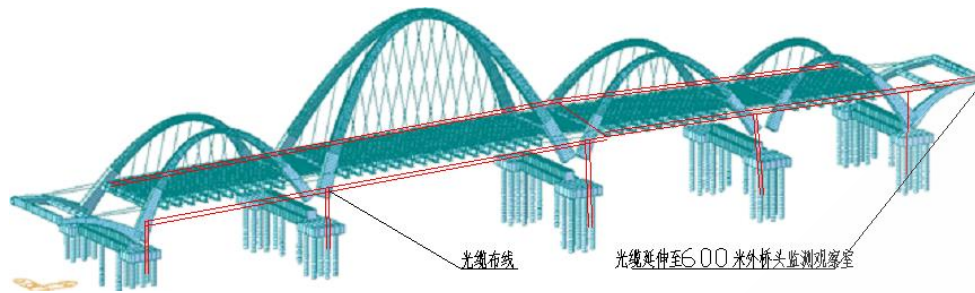


图 5.8-2 桥身布线图



图 5.8-3 总光缆走线图

5.9 系统整体性能调试

混凝土结构光纤光栅传感系统的整体性能调试是通过对各传感器子系统和各信号传输子系统的性能调试来实现的。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，逐一环节进行排查解决。光纤光栅传感器植入混凝土内部，若传感器损坏，则无法修复，须采取有效措施对传感器及传输光缆进行有效保护。

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 目前，光纤光栅传感器在工程应用中还未普及，直接应用于恶劣环境中，容易损坏。如何保护光纤光栅传感器和传输光缆成为其多领域广泛应用的设计思路。图 5.11.1-1 为植入混凝土内部的光纤光栅传感器保护装置。

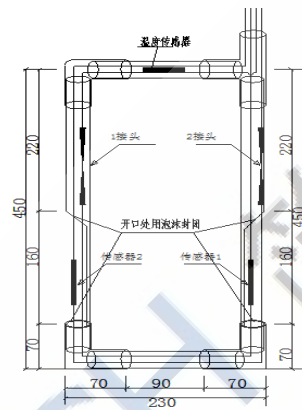


图 5.11.1-1 混凝土内部光纤光栅传感器植入保护壳设计图

该设计的优点有：

- 1) 可以使光纤光栅应变传感器充分与混凝土结合，容易确定安装方向。
- 2) 可以使光纤光栅应变传感器与待测钢筋表面充分靠近和粘结。
- 3) 可以使温度传感器在混凝土内部摆脱混凝土的包裹，准确测量温度变化。

5.11.2 定位安装:根据整体结构计算结果,选择关键部位安装传感器。混凝土模板安装完成后,按照设计位置将传感器和保护装置安装、定位。传感器须精确定位,否则将影响最终监测结果。传感器类型不同,则安装位置固定方法也不相同:

- 1) 测量混凝土应变时,传感器应与混凝土完全包裹,并与钢筋

和模板保持一定间距，避免钢筋的受力变化影响传感器，最终导致监测结果无效。

2) 测量钢筋应变时，采用环氧树脂胶，将传感器粘接在待测钢筋表面。为保证粘接效果，钢筋表面需要打磨，使钢筋表面平整、洁净，避免传感器脱落

3) 温度传感器位于保护装置内部的封闭空间，不受混凝土和钢筋的伸缩影响，能够精确测量混凝土内部温度变化。

5.11.3 光纤线路保护

采用铝塑 PPR 管保护线路，采用光缆保护盒保护光纤端头，同样将尾端光缆与光纤耦合器置于光缆保护盒内。铝塑 PPR 管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，如下图所示：



图 5.11.3-1 开泰管和光缆保护盒对光缆和端头的保护（浇筑前）



图 5.11.3-2 开泰管和光纤终端保护箱对光纤和端头的保护（浇筑后）

5.11.4 防水、防腐、防污处理

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，如下图：



图 5.11.4-1 光纤端头和光纤耦合器图光纤连接



图 5.11.4-2 接头部位电工胶布包裹图接头部位防水胶布包裹

5.11.5 混凝土浇筑前，应对植入传感进行测试并记录传感器初始数据，作为监测参考状态。如条件允许，应在浇筑全过程进行实时监测，有助于掌握传感器在浇筑过程中的变化和完好程度，发现损坏可及时更换传感器，同时也能够辅助和指导混凝土的浇筑施工。如现场条件受到限制，无法实现混凝土浇筑与监测同步进行，则应加强传感器的保护措施，浇筑完成后，及时检查传感存活状态。

5.11.6 混凝土固化期内，应实时不间断连续监测，分析数据，时刻掌握混凝土内部变化状态。应严格执行传感器保护措施，保证传感器的高成活率，混凝土强度达到设计强度后，监测工作也随即停止。施工监测完成后，应继续对光纤和端头进行保护，便于长期监测混凝土内部变化。

5.11.7 应恰当选择传感器植入的时间节点。过早，会使传感器长时间暴露于施工现场，增加了破坏风险；过晚，则没有足够时间去准备

安装和精确调整，难以保证安装精度。

5.12 小结

本工法介绍了光纤光栅传感系统在混凝土结构健康监测中的施工工艺。监测结果表明，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、温度变化以及结构的整体变形情况，确保了大桥结构施工期间整体结构的安全性和稳定性，也为桥梁长期实时监测应用奠定了基础。植入混凝土内部的光纤光栅传感器无法进行修复和更换，应着重关注并采取有效措施对传感器及传输光缆进行保护。光纤光栅传感器植入混凝土结构内部的工法工艺原理同样适用于混凝土结构表面状态监测，监测领域和内容更加广泛，如图 5.12-1~4 所示：

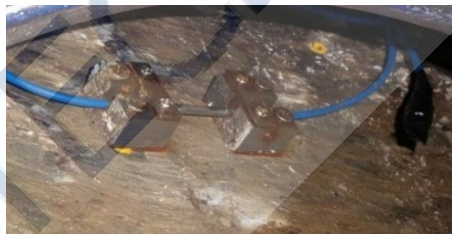


图 5.12-1 混凝土表面铆接固定



图 5.12-2 混凝土表面传感器保护 I



图 5.12-3 混凝土表面保护装置 II

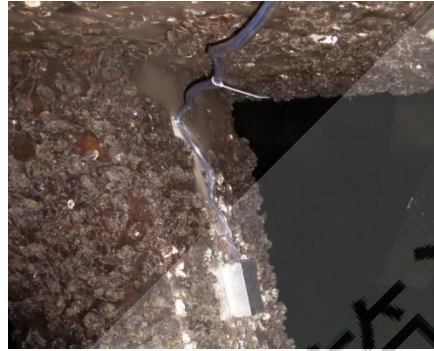


图 5.12-4 混凝土表面传感器和支线保护（水侵蚀范围内）

光纤光栅传感系统在混凝土结构健康监测中的施工工艺是一套完整的施工工艺，成功地应用于沈阳市伯官大桥健康监测工程、海南海花岛桩基检测项目、天津港码头结构健康监测项目，监测成果可信，经济效益、社会效益显著。该工艺不仅适用于大型结构主体健康监测，同样适用于单一构件的各性能监测。各种监测结果表明，光纤光栅传感系统的施工工艺效果理想，推广价值高。

6 材料与设备

6.1 需用主要材料与设备

表 6.1-1 需用主要材料与设备一览表

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	发泡剂		瓶
6	PVC 管	6"	米
7	光时域反射测试仪 (OTDR)		台
8	光纤光栅解调仪	JEME-FBG-S15	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
14	光缆终端保护箱	300X400	个

7 质量控制

7.1 规范标准

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	《电力光纤通信工程验收规范》	DL/T5344-2006	行业标准
3	《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 传感器安装定位完成后，在浇筑的时由于震动挤压等因素使传感器发生错位，从而使传感器数据不能准确反映混凝土内部变化情况。

7.2.2 光缆施放由于震动和挤压因素导致破坏。

7.2.3 光纤端头和耦合器受到污染。

7.2.4 光缆和光纤光栅传感器耐久性不良，未达到使用年限要求。

7.3 保证措施

7.3.1 浇筑施工时，为防止传感器由于震动挤压等因素发生错位，应将保护装置和传感器牢固的固定在钢筋上，必要时增加辅助钢筋。

7.3.2 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。

7.3.3 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。清理需要准备物品有：抹布、酒精、脱脂棉球、刀片等。

7.3.4 安装植入传感器时，应严格按照监测方案确定的位置精确安装，测试人员应亲自监督、检查、验收施工人员的各个施工环节，严格按照《建筑工程施工质量验收统一标准》执行。

7.3.5 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

本工法对大体积混凝土内部光纤光栅传感器植入关键环节采用了合理的施工方法，加速混凝土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。本工法对大体积混凝土浇筑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

该工法系统总结了大体积混凝土内部光纤光栅传感器的植入方法，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 沈阳伯官大桥工程

11.1.1 工程概况：沈阳伯官大桥横跨沈阳浑河，北接棋盘山，南连沈抚新城，桥梁总长 885m，桥宽 32m，双向六车道，2010 年开工建设 2013 年竣工通车。该桥是我国首座六跨中承式飘带形提篮斜拱桥；桥的拱肋采用变截面矩形空心钢箱体系，上下游拱肋之间组成三维空间结构，最大跨径 120m，最大拱高 67m；拱座以上拱肋双向倾斜，呈倒 V 状，内倾 17 度，除主跨拱肋外其余拱肋均无横向风撑；吊杆采用双索面布置，共计 172 根；主梁采用钢-混凝土叠合梁结构，混凝土桥面板通过剪力钉与吊杆横梁相连。

11.1.2 工法应用情况：伯官大桥结构形式新颖、受力复杂，除主跨拱肋外，上下游拱肋间均无横向风撑且为陡拱，桥面采用格构式体系，

拱脚处各构件相互交错，构造复杂，属于应力集中的薄弱部位。因此在钢结构和混凝土结合的拱脚部位植入了 20 组光纤光栅传感器，监测混凝土浇筑过程、混凝土凝结过程、桥梁施工荷载增加过程和通车运行过程的受力情况。桥梁桩基中植入 5 组光纤光栅传感器，监测土层的摩擦阻力和大桥的承载状态。

11.1.3 经济和社会效益：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。在伯官大桥工程中，传感器和光纤的总造价比传统传感器及电缆总造价节省 6 万元。光纤光栅传感器结构简单，安装方便，伯官大桥工程安装人工成本合计节省 5 万元。该工法在混凝土结构健康监测领域具重大意义，该工程为光纤光栅传感器混凝土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 大连医科大学附属二院教学病房楼工程

大连医科大学附属二院教学病房楼工程总建筑面积 78185 平方米，工程开工时间 2009 年 11 月 20 日，竣工时间为 2012 年 5 月 12 日，地下 2 层，地上 28 层，其中地下 2 层为停车场，1-6 层裙房为手术室及办公用房，7—28 层为病房。本工程主体结构属底部大空间部分框支剪力墙结构，7 层以下为框架核心筒体结构，7—28 层采用剪力墙结构。该工程结构形式复杂，基础底板最厚处达 2.4 米，为大体积混凝土施工，在重要节点植入 20 组光纤光栅传感器，监测大体积混凝土浇筑过程、凝结过程、建筑施工荷载增加过程及使用过程的受力状态。该工程传感系统节省成本 5 万元，安装成本节省 3 万元。该工程项目组通过技术攻关和精心施工，保证建筑质量，取得了宝贵经验及良好的社会和经济效益。该工程至今未出现质量问题，满足使

用功能要求。

11.3 金海花园广场工程

大连金海花园广场工程位于大连市星海广场，工程由大连金海花园广场投资有限公司投资建设，大连金广建设集团有限公司承建，大连理工工程建设监理有限公司担任监理工作。该工程总体建筑风格为两个椭圆形高层建筑单体及一个3层裙房工程，局部裙房为5层纯钢结构工程，工程开工时间为2007年8月1日，竣工时间为2010年10月1日。工程地上42层，地下3层，纯剪力墙结构，总建筑面积10万平方米。基础底板最厚处达3.6米，为大体积混凝土施工，我公司根据该工法施工，在施工重要节点植入30组光纤光栅传感器，监测大体积混凝土浇筑、凝结以及后期使用全过程的结构健康状态。该工程传感系统节省成本7万元，安装成本节省4万元。该工法为工程的安全运行提供了科学依据，取得了良好的社会效益。