

独塔单索面斜拉桥 长期结构健康监测解决方案



深圳市简测科技有限公司
2014年12月

一、项目概况及意义

1.1 工程概况

大桥位于川龙大道孝天公路延长线后湖段约 K11+625~K12+423，在北岸横店街的桥咀和南岸盘龙城开发区的姚咀横跨后湖，主跨中心对应测设里程号为 K11+955，横店侧桥梁起点里程为 K11+618.52，终点里程为 K12+429.48，全桥总长 804.06 米。

主桥为独塔单索面预应力混凝土展翅箱梁斜拉桥，塔梁墩固结体系。引桥采用简支空心板梁，桥面连续结构，横店岸分三联，分别为 0#~5#墩，5#~10#，10#~12#墩；盘龙岸分四联，分别为 15#~17#墩，17#~22#，22#~27#，27#~32#墩。桩柱式桥墩，横桥向为三柱式。桥台采用肋板式桥台。

1.2 本桥健康监测意义

桥梁建成以后，由于受气候、环境因素的影响，结构材料会被腐蚀和逐渐老化，长期的静、动力荷载作用，使其强度和刚度随着时间的增加而降低。这不仅会影响行车安全，更会使桥梁的使用寿命缩短。对桥梁结构的健康状况进行检测与监测，并在此基础上对其安全性能进行评估是桥梁运营日常管理的重要内容。桥梁健康监测具有十分重要的作用。

预应力混凝土大跨度连续梁桥由于其受力明确，构造简单，外形漂亮，是国内桥梁中应用最为广泛的桥型之一。鉴于在实际运营中有病桥不断出现，其相应的承载能力评定工作日益重要。大量的文献资料显示，预应力混凝土大跨度连续梁桥运营期病害与事故主要集中主梁，桥墩的裂缝和变形等方面。主梁是桥上部结构的主要受力结构，不仅承受弯矩，同时也承受各种水平分力作用，处于受组合力状态。主梁及桥面板在桥梁运营阶段出现最多的病害就是主梁腹板、顶板出现裂缝。裂缝产生的原因很多，如荷载作用、混凝土组成成分、温度变化、混凝土收缩和徐变、基础的不均匀沉降以及钢筋的锈蚀等。许多裂缝往往是几种不同因素联合作用的结果。桥墩病害的主要表现为墩偏位和混凝土裂缝。裂缝的

原因与上述主梁发生裂缝的原因基本相同。所以了解桥梁的极限状态、承载潜力以及剩余寿命等对桥梁的合理利用具有重大现实意义。

本健康监测系统设计通过采集预应力混凝土大跨度连续梁桥桥的应变、压力、裂缝、加速度、温度等数据为承载能力评定和健康状况评估提供依据。为确保桥梁安全运营、延长桥梁使用寿命，早期发现桥梁病害和节约桥梁的维修费用，建设该大桥健康监测系统十分必要。

1.3 监测系统选型的技术原则

该大桥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，满足桥梁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大桥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。

桥梁结构健康监测与安全预警系统施工图设计内容包括箱梁、桥面、支座、等结构健康监测系统的设计。其中，箱梁健康监测内容设计包括箱梁的应变、温度监测，桥面监测包括振动、环境状况监测；支座健康监测内容设计包括支座的水平竖向位移监测。

1.3.1 设计规范

- (1) 《公路工程技术标准》JTG B01-2003
- (2) 《公路桥涵设计通用规范》JTG D60-2004

- (3) 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62-2004
 - (4) 《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》JTJ 025-86
 - (5) 《公路工程抗震设计规范》JTJ 004-89
 - (6) 《公路桥涵施工技术规范》JTJ 041-2000;
 - (7) 《公路工程质量检验评定标准》JTGF80/2-2004;
 - (8) 《工程振动测量仪器和测试技术标准》中国计量出版社, 1999
 - (9) 《电气装置安装工程电缆线路施工及验收规范》GB50168-2006
 - (10) 《电子设备雷击保护导则》GB/T 7450-1987
 - (11) 《民用闭路电视系统工程技术规范》GB 50198-94
 - (12) 《建筑与建筑群综合布线系统工程设计及验收规范》GB/T50311-2000
 - (13) 《建筑电气安装工程质量检验评定标准》GBJ 303-88
 - (14) 《光缆线路对地绝缘指标及测试方法》YD5012-2003
 - (15) 《光缆通信工程无人值守电源设备安装设计暂行规定》YD5046-97
 - (16) 《电信网光纤数字传输系统工程及验收暂行技术规定》YDJ44-89
 - (17) 《光纤传输衰减变化的监测方法 传输功率监测法》YD/T 629.1-93
 - (18) 《光纤传输衰减变化的检测方法 后向散射监测法》YD/T 629.2-93
 - (19) 《光纤配线架技术要求及试验方法》YD/T 778-95
 - (20) 《大芯径大数值孔径多模光纤光缆》YD/T 816-2003
 - (21) 《光缆拉伸—应变性能测试方法》YD/T 825-1996
 - (22) 《光纤固定衰减器技术条件》YD/T 894-1997
- 等相关标准和规范。

1.3.2 主要传感器类型

- (1) 应变和温度监测传感器
 - a) 光纤光栅应变传感器
 - b) 光纤光栅温度传感器
- (2) 加速度传感器
 - a) 低频加速度传感器

- (3) 位移监测传感器
 - a) 光纤光栅位移传感器

1.3.3 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

二、监测系统设计要点

2.1 测量要求

- (1) 对全桥斜拉索进行索力测量；
- (2) 对主桥桥面高程变化测量、振动进行测量；
- (3) 主塔塔顶偏移、沉降情况进行测量；
- (4) 桥梁伸缩缝情况进行测量；
- (5) 对桥梁箱梁系统进行应变测量；
- (6) 对桥支座进行位移测量；
- (7) 对桥梁关键部位进行温度监测；

2.2 钢箱拱监测系统设计

钢箱拱监测主要包括应变监测，裂缝监测，温度监测。

为监测钢箱拱在荷载下的变形，在主跨跨中、主跨 1/4 跨、支座截面、牛腿位置等应力较大处共安装 48 个低温敏型光纤光栅应变传感器。另外，在相应截面布设了 12 个光纤光栅温度传感器，以监测温度和为应变传感器作温度补偿。

为监测桥支座及伸缩缝的裂缝和温度，在易出现裂缝的位置共布设了 54 个

光纤光栅位移传感器和 9 个光纤光栅温度传感器。

2.3 桥面监测系统设计

桥面监测包括桥面振动监测和环境状况监测。

在桥面的主跨跨中截面、1/4 截面各布置 2 个加速度传感器，测量桥面的振动特性。为监测桥址处环境状况，在跨中截面附近布设风速仪一台。

2.4 吊杆索力监测

吊杆作为重要的传力构件，将纵横梁等永久作用和汽车等可变作用传递到拱肋上，监测吊杆的受力状况对于判断拱桥是否处于正常工作状态至关重要。吊杆索力监测一般采用频率法测得。

本桥从主跨两端起第一、第二、第三、第四根吊杆相比其他吊杆更容易损坏，因此在这几根吊杆中间布置加速度传感器，监测吊杆的振动频率，进一步分析得到吊杆的索力。

2.5 沉降、偏移监测

该桥的主桥桥面高程变化测量、及主塔塔顶偏移、沉降情况采用 GPS 测量仪进行监测。

2.6 系统体系结构

根据现场采集的情况，大致分为四个模块：数据采集模块、数据传输模块、数据存储模块、数据分析与显示模块。首先是数据采集模块在工程现场采集到传感器波长信息，然后把波长等数据通过数据传输模块传送到服务器，送入数据库由数据存储模块进行分析和分类存储，最后在数据分析模块和显示模块对传感器信息进行显示和分析，满足用户的需求。

2.6.1 数据采集模块

数据采集系统设计和实现还必须实现以下功能要点：传感器系统的数据采集方式必须统一规划，易于扩展。

数据采集系统应能在无人值守条件下连续运行，采集得到的数据可供远程传输和共享，采样参数可远程在线设置。对于各类数据采集方式都设计成 24*7 小时的工作方式，并保证系统运行负载在合理范围内。

采用基于实时操作系统平台的数据采集与传输系统保证高采样频率的数据采集的稳定可靠性。

采集系统具有实时自诊断功能，能够识别传感器失效、信号异常、子系统功能失效或系统异常等。出现故障时，系统应能立即自动地将故障信息保存至本地并等候上传至数据服务器。

采集系统具备工程容灾备份功能，串联传感器发生断路可切换到备用通道并继续使用。

采集系统具备很强的弱信号解调功能，在传感器发生损伤导致信号变弱时能够采用增大光强的方式依然能够采集数据。

2.6.2 数据传输模块

数据传输系统必须提供合理的暂存和发送机制以保证在恶劣的网络环境下原始数据及时传输，并且保证数据的完整性。原始数据可以在数据采集工作站上以滚动覆盖的方式保存 30 天。各数据采集工作站开辟独立的空间滚动存放历史数据。所有数据采集工作站采集的数据必须以统一的格式存储和实时传输到服务器。

系统实际实施中，采用两种传输方式：

一种方式是利用缓存机制，将采集到的数据保存到本地，根据服务器端的请求，将数据传输到指定服务器。数据传输采用断点续传技术。

另一种方式是，根据客户端请求，实时将工程现场采集到的传感器数据传输到客户端电脑上。该方式对网络环境要求比较高，根据网络环境的不同，做到局

域网内查看工程现场采集数据延迟在 20 秒左右。

2.6.3 数据存储模块

为了最大限度地提高设备利用率、减小数据损失的风险，本系统数据存储采用分布/集中式存储结构。

分布式存储方式是指在数据采集系统中每个采集工作站的本地硬盘均作为数据存储介质，用于存储本工作站采集的数据。由于本地硬盘的大小限制，数据按时间滚动存储。

集中式存储方式是指每个所有的监测数据，包括自动监测数据和传感参数器配置文件都按约定标准集中存放。为了保证后续数据二次处理、数据融合的性能要求，监测数据优先存储在一级存储设备即磁盘阵列上，根据服务器端请求或定时将历史监测数据转存到服务器的存储设备上。整个服务器存储设备上按就近时间至少保存一年的原始数据。

数据存储的基本原则：

(1) 考虑到系统的扩展性，并规范数据通道和存储格式，为不同类型传感器数据通道设计统一规范的通道编码和存储格式有利于各种数据的融合处理和系统维护及扩展；

(2) 最大限度的压缩数据量，原始采样数据采用特定的二进制数据压缩存储。使用指定的软件或二次开发包对存储的文件进行分析、报表、转换等操作；

(3) 用户可以通过应用服务器观察原始数据，并选择参数进行各种二次处理，并保存感兴趣的处理结果。

(4) 基于原始数据的二次处理、数据融合数据保存在关系数据库中，方便日后的检索和评估分析。

2.6.4 数据分析与显示模块

通过本系统可以对工程现场的传感器数据进行在线实时显示，在专门设计的用户界面上，可以看到所有传感器的工作情况，按照所见即所得的原则，直接点

击某个传感器的图标，就可以进入该传感器信号的显示界面，对其响应曲线进行观察，而且能够方便地得到该传感器数据每天、每周、每月或每年的统计资料。

基于互联网终端，用户可查询相关工程现场的各种配置信息、报警信息等。进而对工程管理的决策提供建议与帮助。并且提供多线索查询手段，比如时段、分区、传感器类别等。

三、施工要点

总体布置图见图 1.1。主梁标准截面见图 1.2。

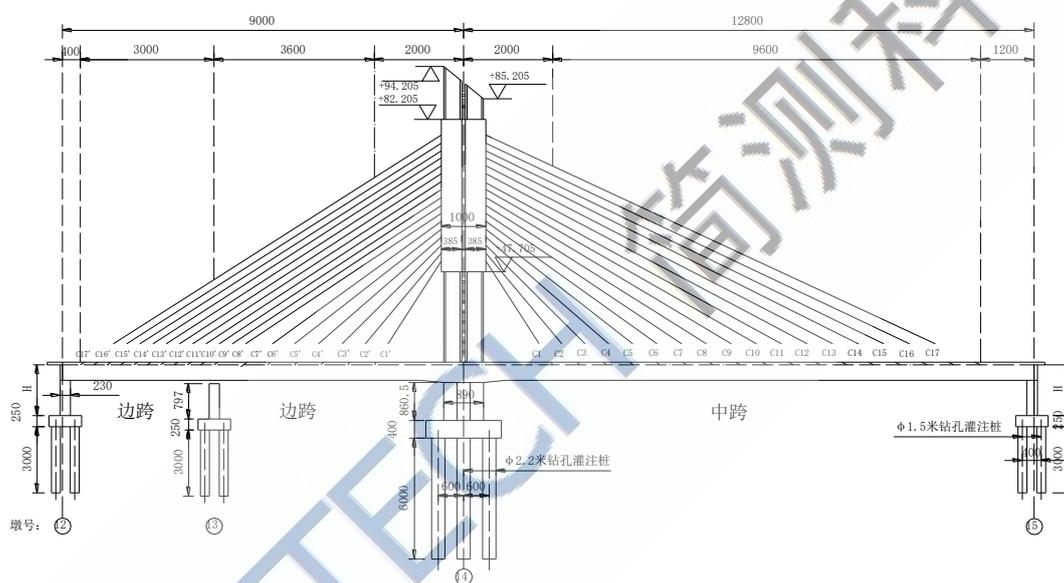


图 1 后湖大桥总体布置图

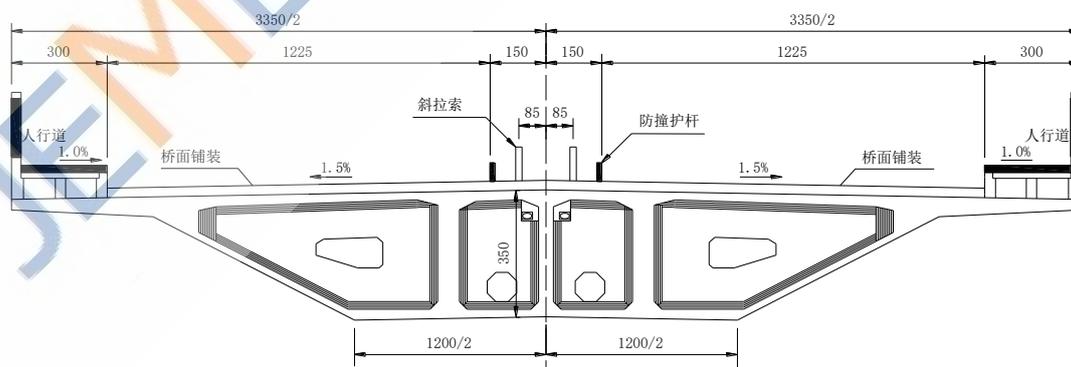


图 2 主梁标准截面图

桥梁施工具有空间跨度大、时间跨度大、工况复杂、交叉施工、现场人员构成复杂、施工单位多等特点。上述众多因素加大了现场传感器布设、信号传输

线路的布设、保护工作难度。传感器布设及保护施工工艺要求、质量检验标准应符合相关规定要求，对各主要工艺应制定详细的施工细则，并征得监理工程师同意后再进行施工作业。

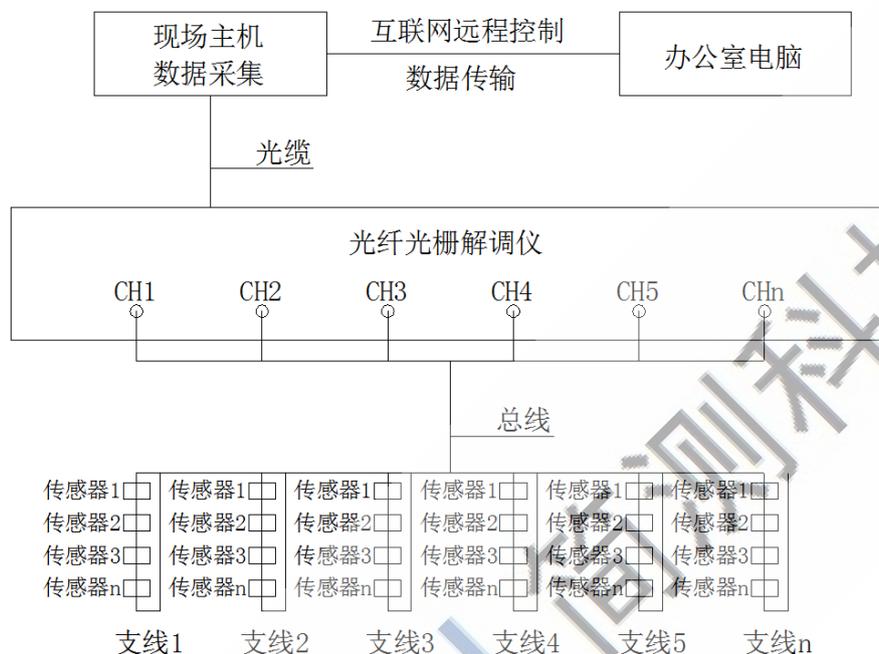


图 3 系统布线示意图

3.1 施工阶段传感器布设

(1) 应变传感器

本项目中所使用的应变传感器布设方式分为表面式与埋入式，表面式应变传感器的布设方式主要有粘贴式与焊接式。粘贴式布设主要针对桥梁结构钢构件。利用优质粘结剂将应变传感器粘贴到测点表面。首先需将测点处位置利用角磨机砂轮片进行初次打磨，将测点表层防腐层清除掉，然后利用砂纸片进行打磨，最后用细砂纸沿某一固定方向将测点表面细腻抛光。利用脱脂棉蘸丙酮将测点表面清洗干净。利用高性能粘结剂粘贴传感器之后，需在传感器表面附近设置防腐层保护好传感器与附近经打磨测点表面。防腐层采用多层环氧树脂类胶以及玻璃胶。焊接式布设的前几个步骤与粘贴式相同，只是在被测物表面处理完成之后，采用点焊或氩弧焊初步固定传感器的位置，然后再采用点焊或氩弧焊将传感器在标距位置处焊透。特别注意：焊接时间必须很好把握，否则将严重损害传感器。

通常而言，焊接时间低于 3 秒，迅速采用沾水脱脂棉或海绵降低温度。焊接结束的 5 小时内，根据结构表面的颜色特征，采用油漆将传感器进行喷涂。如条件允许，可采用“环氧树脂+玻璃布”进行传感器二次固定和保护。对于混凝土结构表面，预先在混凝土表面钻孔，埋入膨胀螺栓。然后，采用钢结构的焊接工艺方法布设传感器。

埋入式应变传感器布设工艺如下：在混凝土结构钢筋笼施工完毕后，将应变传感器应用铁丝架准确固定在截面测点处。一般情况下将传感器固定在截面测点附近的受力钢筋上，以确保传感器在混凝土浇注过程中保持预定位置。

(2) 加速度传感器

为保证加速度传感器能够承受恶劣的野外环境，针对测索力加速度传感器采用如下布设方法，具体为：首先将传感器与索的接触的表面清洁平滑，使其不平度小于 0.01mm，安装螺孔轴线与测试方向一致，某些安装表面较粗糙需在接触面上涂些清洁的硅脂以改善耦合；传感器安装时采用螺钉安装和胶粘剂两种手段固定传感器，安装螺钉可将加速度传感器和准备套在索上的钢套箍固定，螺钉为 M5 安装螺钉，安装力矩为 20Kgf. cm。另外，加速度传感器和钢套箍之间还可以用 J-39 胶粘剂粘，粘结工艺按胶接工艺清洗胶接面，对大加速度的测量需计算胶接强度，最后钢套箍可直接通过螺丝包裹固定在斜拉索上，所有螺丝均涂有胶粘剂以防松动和腐蚀。

针对桥面加速度传感器布设采用如下布设方法，加速度传感器外部采用全密封钢盒结构，可防水及其他腐蚀。该封装结构可以重新开启，以方便监测系统运营过程中的传感器检修。

3.2 传感器编号

桥梁传感网络包括众多类型的传感器。需根据传感器布设方案按照一定规则为每一传感器指定唯一编号。采用下述格式对传感器进行编号。

传感器编号=传感器类型编号+可测方向编号+监测截面编号+测点编号

应制作耐久性好，可防潮的传感器编号标签。确保在恶劣环境下，不会产生编号标签模糊的情况。通常应用碳素墨水笔书写标签，采用透明胶带制作防水即

可满足要求。但是大量实践经验表明，由于大桥恶劣的施工条件会导致传感器信号线成束切断，这样会导致传感器位置信息大量丢失。为防止此极端情况发生，可以在制作传感器编号标签同时，纪录该传感器信号线的长度编号范围。该编号为信号线出厂时按每隔 1 米，标识在最外保护层的连续编号。这样即使信号线标签全部损坏，通过长度编号范围同样可以分辨出传感器编号，进行补救。

3.3 施工阶段传感网络保护

桥梁施工阶段需在每一监测截面设置信号线续接点。续结点布设在桥梁检修道位置处。在竣工阶段传感网络集成前，截面内传感器信号线在信号线续接点保护放置。截面布设的传感信号线长度不要过长，长度够引入信号线续接点后冗余 1.5m 即可。混凝土构件传感网络保护比钢构件复杂，下面只针对混凝土构件传感网络保护进行阐述，钢构件相关工作基本一致。

施工阶段传感网络保护任务是将传感器精确埋设到预定监测位置以及混凝土构件浇注完毕后，确保构件内传感器与信号线完好，将信号损耗控制在最小范围内。将引出信号线集中放置在信号线续结点进行可靠保护。该阶段信号线保护工作可以划分为两部分。

(1) 被浇注于混凝土构件中的信号线保护。采取以下保护措施：将截面内各测点信号线集束后，紧贴构造钢筋下部固定。这样可以避免人员的踩踏与浇注混凝土的冲击；在信号线容易产生锐弯曲的部分，额外搭接辅助钩筋以达到固定效果；在信号线混凝土构件引出段，预埋 7~12cm 直径钢管。在钢管下端口处做好防漏浆处理，避免砂浆上涌致使管内信号线粘连；提高施工方现场人员的认识。

(2) 混凝土构件中引出的信号线保护。在预埋钢管附近设置预埋件，待混凝土浇注完毕后在钢管外部采取木盒保护；利用铁丝可以将木盒固定于预埋件上。1.5m 冗余信号线放置在钢管内部。钢管上端口要严格密封。这样防止万一木盒破坏，钢管内 1.5 米信号线仍然能够满足防护要求。木盒与钢管即为信号线续接点保护结构。当信号线引入续接点后，在混凝土浇注前，应利用传感器采集装置对各传感器信号进行检测，对不合格传感器进行及时补救。

3.4 竣工阶段传感网络集成

竣工阶段传感网络集成任务是在桥梁竣工阶段将各截面信号线续接点内信号经信号线集中引入位于子监测系统的监控室内。传感网络所有出现的信号线接头采用焊接方式连接，以保证信号传输质量。具体措施如下：

利用耐久性好的铁盒预埋在信号线续接点处，在该处进行信号线续接的焊接操作。确保每个焊接点质量合格。在铁盒内做好焊接点保护。预埋铁盒可以在桥梁运营阶段较为方便打开，有利于日后传感网络检修与维护。预埋铁盒与中控室之间传输段采用铠装信号线，外部用钢线桥盒进行保护。

3.5 监控室设计

为保护在大桥恶劣工作环境下工作的监测系统各数据采集与调理仪器设备，本方案在桥北侧合适位置布设一间现场监控室。由于大桥自然环境恶劣，全年温差与湿度非常容易对采集仪器设备造成损伤。且监控室内环境封闭，计算机等设备很容易造成室内温度过高。根据实际条件可在监控室内布设仪器设备机柜、可控空调以及通风设施，保证室内环境满足仪器正常工作要求。同时应考虑设置UPS不间断电源，保护仪器设备。

四、主要监测产品技术要求

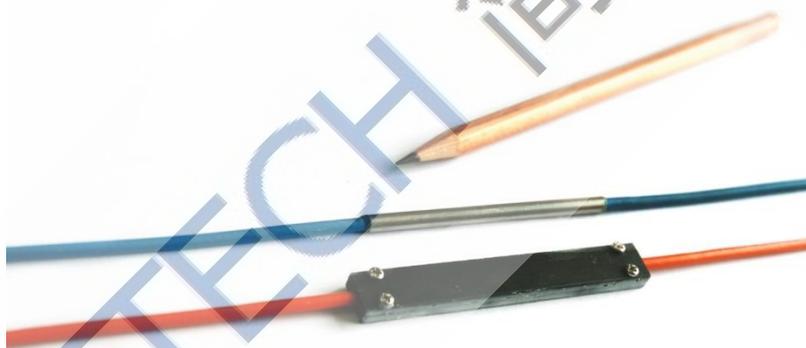
4.1 光纤光栅应变传感器



低温敏型光纤光栅应变传感器	
量程	$\pm 2000 \mu \epsilon$

分辨率	1 $\mu\epsilon$
波长范围	1510~1590nm
工作温度范围	-30℃~120℃
规格尺寸	外径 4mm，测量标距 30mm
尾纤规格	聚合物软管或铠装管（ Φ 3mm）
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
温敏系数	1.5pm/℃

4.2 光纤光栅温度传感器



传感器	光纤光栅温度传感器
量程	-30℃~+120℃
分辨率	0.1℃
波长范围	1510~1590nm
封装	不锈钢

规格尺寸	外径 4mm
安装方式	表面粘接或埋入被测材料中
应用范围	低精度温度测量及光纤光栅传感器温度补偿

4.3 光纤光栅位移传感器



光纤光栅位移传感器	
量程	0-70mm
精度	0.1%F.S.
灵敏度	0.05%F.S.
波长范围	1510~1590nm
工作温度范围	-30~120
光栅反射率	≥90%
安装方式	螺栓固定或者焊接
尾纤规格	聚合物软管或铠装管 (Φ3mm)
封装	采用无弹簧工作机制
连接方式	熔接或 FC/APC 连接头

4.4 传感信号综合同步解调仪

基于嵌入式硬件平台和实时操作系统的分布式多类传感器同步采集仪器。

实现了多类传感器（光纤光栅、电压、电流、电桥和 IEPE）和多终端设备的精准同步采集，具备信号实时处理分析功能以及多线程运行的模块化、规范化的软件平台，可以满足结构健康监测的传感器数量多，分布广，信号测量精度高，同步性要求高，信号分析处理实时性强的需求。

光纤光栅测量指标	
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
电类传感测量指标	
单机最大通道数	32
支持输入信号类型	IEPE、电压、电流、桥路、数字 I/O
低通滤波器	50Hz(可定制)
单通道最高采样率	100KS/s
同步差分采集	是
分辨率	16bits
共模抑制比	85dB @ 0dB gain, 60Hz
通道间串扰	-100dB @ 0dB gain, 1kHz
电气特性	
电源供应	+ 19~30VDC
数据传输接口	以太网
功率	20W 典型
机械特性	
工作温度	-20~55°C

4.5 加速度传感器



压电式加速度传感器主要技术指标

压电式加速度传感器	
线性	$\leq 1\%$
横向灵敏度	$\leq 5\%$ (典型值 $\leq 3\%$)
输出偏压	8~12VDC
恒定电流	2~20mA (典型值 4mA)
输出阻抗:	$< 150\ \Omega$
激励电压	18~30VDC (典型值 24VDC)
温度范围	-40~+120°C
放电时间常数	$\geq 0.2S$
安装力矩	约 20kgf·cm (M5 螺纹)

五、监测系统软件

5.1 系统开发环境

NI LabVIEW 是目前测试测量领域内领先的软件开发工具，广泛应用于系统测试和控制等行业。自软件问世以来，依靠其强大的图形化开发环境，引起了世界各地科研人员和工程人员的极大关注，成为其开发项目的重要开发工具，LabVIEW 可以帮助用户缩短程度开发时间，保证软件质量，提高工程和生产效率，被认为是下一代高级计算机程序开发语言。

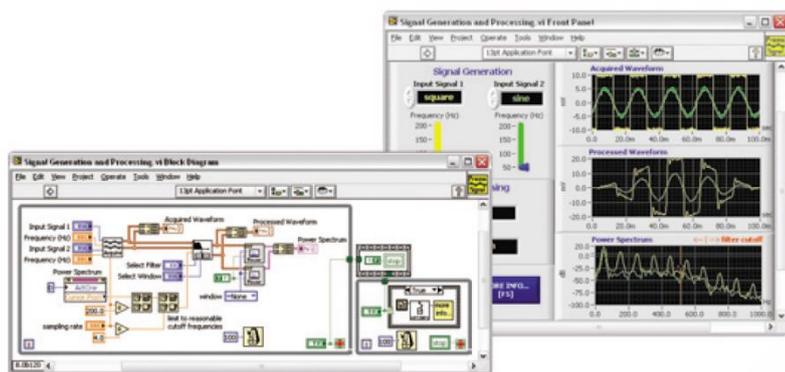


图 6.1 NI LabVIEW 图形化界面

LabVIEW 开发环境友好，具有拖放式的用户界面，内置内容丰富的函数库，函数代码高度封装，使编程过程变得简单、易行，于此同时，LabVIEW 同样具备界面设计功能，变量与控件直接相互关联，用户在编写代码的过程中，可以及时调整软件界面，缩短了程序的开发时间。LabVIEW 同样是一种高度开放的程序语言，与其他编程环境具有很好的兼容性和交互性，可以方便快捷的调用其他开发软件的运行结果，软件的通用性较高。LabVIEW 软件开发平台与以往的程序语言相比，最大的不同之处在于其内置了数据采集、分析和显示功能，具有高度开放的 I/O 接口，硬件部署对象广泛，节约了硬件投资成本。如图 6.2 所示，LabVIEW 与许多硬件平台都实现了完美的无缝对接。

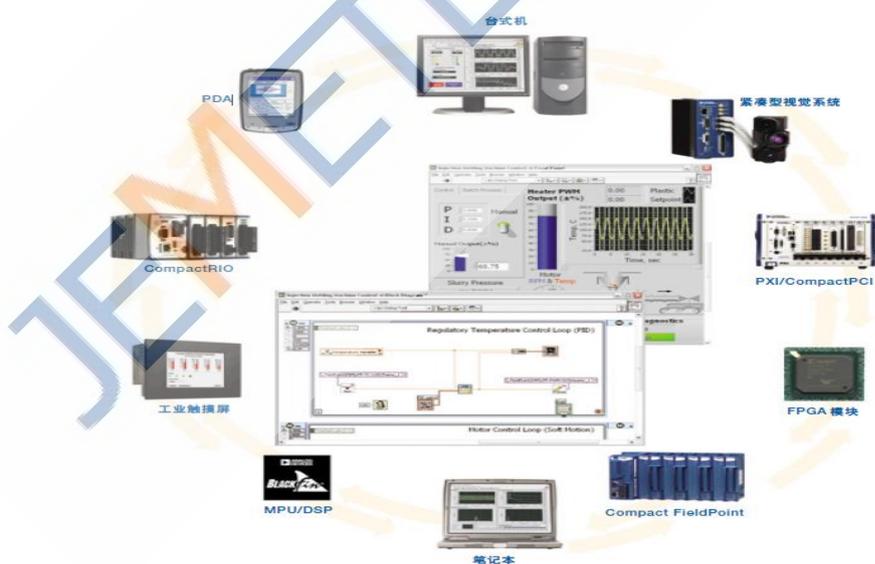


图 6.2 NI LabVIEW 硬件兼容平台

5.2 监测系统功能

5.2.1 信号实时同步显示

该系统实时同步采集各通道传感器信号，随时调用目标传感器，在上位机中同步显示各通道传感器信号。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、高阶频率等特性具有重要意义，为实时监测桥梁内力变化进行参考。监测系统界面如图 6.3 所示。

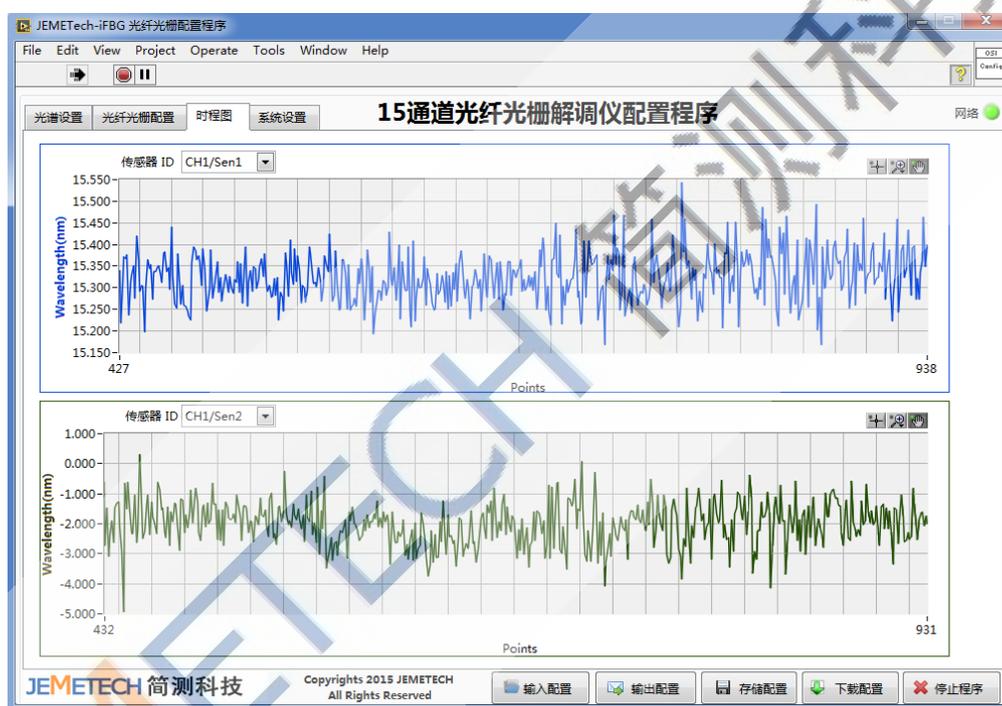


图 6.3 监测系统界面

5.2.2 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，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 6.4 所示。

图 6.4 系统数据存储设置

5.2.3 自动报警功能

该系统设计了多个结构安全指示灯，当桥梁结构某一部位发生应力过大时，该指示灯显示为红色，表示该部位处于异常状态，需要启动相应的应急预案。该指示灯能正确表征应力过大的部位，对采取紧急措施具有指导意义。报警信息通过手机短信和 E-mail 电子邮件的方式发送（如图 6.5 所示），保证了重要报警信息的及时性。



图 6.5 系统报警机制

六、质量控制

6.1 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。

6.2 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。

6.3 安全控制

6.3.1 主要安全风险分

- (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。

6.3.2 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。

6.4 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。

七、监测采购产品清单

桥梁结构健康监测与安全预警系统费用						
序号	产品描述	型号	数量	单价 (RMB)	总价 (RMB)	备注
1	产品系列				362,882	
1.1	传感信号综合同步解调仪	JEME-i15-e32	1	¥226,800	¥226,800	(15 路光、32 路电)
1.2	低温敏型光纤光栅应变传感器	JFSS-04	48	¥336	¥16,128	(低温敏型)
1.3	光纤光栅温度传感器	JTFS-01	21	¥230	¥4,830	
1.4	光纤光栅位移传感器	JFDS-70	54	¥1,399	¥75,546	
1.5	压电式加速度传感器	LC-0101	22	¥1,799	¥39,578	
1.6	静力水准仪或 GPS 测量仪		1		¥0	外购件
1.7	计算机		1		¥0	外购件
1.8						
2	配件及服务费用				228,927	
2.1	配电柜		1	¥2,000	¥2,000	
2.2	传感器保护盒 (应变、位移、加速度)		145	¥200	¥29,000	
2.3	传感器安装支座		145	¥120	¥17,400	
2.4	光纤接续盒		4	¥150	¥600	

2.5	连通水管（含水管接头）		500	¥3	¥1,500	
2.6	光缆走线线槽		500	¥5	¥2,500	
2.7	单芯铠装光缆		1500	¥3	¥4,500	
2.8	光纤跳线（2米）		123	¥14	¥1,722	
2.9	光纤终端盒（24口）		2	¥180	¥360	
2.10	光纤快速接头		123	¥15	¥1,845	
2.11	电缆		500	¥10	¥5,000	
2.12	电缆走线线槽		500	¥5	¥2,500	
2.13	外场 UPS		1		¥0	外购件
14	设备、传感器安装调试费		30	¥500	¥15,000	
2.15	桥梁维修设备租赁费		145	¥1,000	¥145,000	
2.16	水电费及措施费				¥0	甲方负责
2.17	总包配合费				¥0	甲方负责
2.18	管理费				¥0	甲方负责
2.19	税金				¥0	甲方负责
2.20	桥梁维修设备租赁费				¥0	甲方负责
3	软件				58,000	
3.1	计算分析费			50,000	¥0	传感节点如果已经完成设计该项费用可略去
3.2	监测软件研制费	JCFS-IE51	1	58,000	¥58,000	根据实际需求定制
					¥0	
合计：					649,809	