



让测量更简单

MAKE  
MEASUREMENT  
SIMPLE

# 盘锦辽东湾新区连岛中 桥工程 结构健康监测解决方案

## [摘要]

[本文提出了一种桥梁工程智能化结构健康监测解决方案，利用 JEMETECH 智能化监测系统实时采集、处理信号，实时掌握桥梁系统各监测物理量变化，实时监测桥梁的健康状态。详细内容见正文。]

深圳市简测科技有限公司

地址：深圳市南山区学府路 1 号

电话：0755-36632001

<http://www.jemetech.com/>

## 目 录

引 言.....	4
1 方案目标.....	5
1.1 设计原则.....	5
1.1.1 设计规范.....	5
1.1.2 主要传感器类型.....	6
1.1.3 设计原则.....	6
1.2 系统体系结构.....	7
1.2.1 数据采集模块.....	7
1.2.2 数据传输模块.....	7
1.2.3 数据存储模块.....	8
1.2.4 数据分析与显示模块.....	8
2 桥梁监测方案.....	9
2.1 监测内容.....	9
2.2 应力应变监测.....	10
2.3 温度监测.....	12
2.4 吊杆索力、桥面振动监测.....	13
2.5 桥梁环境监测.....	15
2.6 传感器布置.....	15
3 监测系统施工工艺.....	20
3.1 传感器安装.....	21
3.2 综合布线.....	24
3.3 质量控制.....	25
3.3.1 易出现的质量问题.....	25
3.3.2 保证措施.....	25
3.4 安全控制.....	26
3.4.1 主要安全风险分析.....	26
3.4.2 保证措施.....	26
3.5 环保控制.....	26
4 光纤光栅解调仪.....	27
4.1 光纤光栅解调仪简介.....	27
4.2 光纤光栅解调仪特性.....	28

4.3	产品系列 .....	28
4.4	指标参数 .....	29
5	电类传感综合同步采集仪 .....	29
5.1	电类传感综合同步采集仪简介 .....	30
5.2	电类传感综合同步采集仪特性 .....	30
5.3	指标参数 .....	31
6	监测系统软件 .....	31
6.1	系统开发环境 .....	31
6.2	监测系统功能 .....	33
6.2.1	信号实时同步显示 .....	33
6.2.2	数据自动存储功能 .....	33
6.2.3	自动报警功能 .....	34

## 引 言

深圳市简测科技有限公司是一家开发基于光纤光栅技术在监测领域应用的科技型企业。公司可提供包括传感器子系统、数据采集与处理子系统、损伤识别、安全评定及预警子系统，以及结构健康监测数据采集分析软件系统等全方位端到端解决方案；公司产品可用于安防、土木工程、交通、能源、航空、水利等工程领域；公司产品已在大型建筑、桥梁、大坝、水利、电力、安防、能源运输、石油平台等领域内具有成功的应用方案，公司的光纤光栅技术被国内高校广泛采用，公司完全具备可为高校实验室和大型企业提供基于光纤光栅技术的定制化应用方案的能力。

公司使命：**Make measurement simple** 使监测工作精确化、简单化、工程化。不断满足各领域客户的需求并提供监测方案。

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。

桥梁工程实际运营中病桥不断出现，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，大跨度桥梁运营期病害与事故主要集中在主梁、桥墩的裂缝和变形、以及索力变化等方面。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。

该结构健康监测系统设计通过采集大跨度桥梁主梁的应变、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 方案目标

## 1.1 设计原则

该大桥健康监测系统集传感器技术、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钢箱拱、承台、桥面、吊杆、系杆等结构健康监测系统的设计。其中，钢箱拱健康监测内容设计包括钢箱拱拱内的应变、温度、湿度监测，三角刚构的应变、温度监测以及混凝土拱座的裂缝与温度监测；承台监测包括裂缝、温度监测；桥面监测包括振动、环境状况监测；吊杆监测内容即为索力监测；系杆监测内容包括应变、应力监测。

### 1.1.1 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》 JTG F80/2-2004；
- (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) 《建筑电气安装工程的质量检验评定标准》 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。

### 1.1.2 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
  - c) 长标距光纤光栅应变传感器
- (2) 加速度传感器
  - a) 超低频加速度传感器
- (3) 空气湿度监测传感器  
空气湿度传感器
- (4) 风速风向监测传感器
  - b) 高精度风速风向传感器

### 1.1.3 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

## 1.2 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。

### 1.2.1 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。

### 1.2.2 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。

### 1.2.3 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。

### 1.2.4 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。

## 2 桥梁监测方案

### 2.1 监测内容

根据该大桥本身的特点，在结构健康监测中应对桥梁以下方面进行监测：

- (1) 对桥梁钢箱拱系统进行监测；
- (2) 对桥梁桥面系统进行监测；
- (3) 对桥梁吊杆索力进行监测；
- (4) 对桥梁系杆力进行监测；

桥梁应变、温度、吊杆拉力采用光纤光栅应变传感器进行监测，加速度、索力、风速、环境湿度采用电类传感器进行监测。光纤光栅传感器串连统一接入到桥梁控制中心的光纤光栅解调仪中，解调仪可对采集到的数据进行分析、存储，监测人员可对获取可靠信息，采取相应措施。获得的数据和分析结果可通过 internet 发送，达到远程监控的目的。

根据该大桥危险性分析，参照既有同类型结构监测经验以及现有的结构监测技术水平，确定该大桥监测内容如下。

(1) 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，温度监测和空气湿度监测。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 44 个光栅光纤应变传感器。另外，在相应截面布置了 22 个光栅光纤温度传感器，以监测温度和为应变传感器作温度补偿。为监测混凝土拱肋的裂缝和温度，在易出现裂缝的位置共布置了 64 个长标距光纤光栅应变传感器和 32 个光纤光栅温度传感器。为监测钢箱拱内空气的湿度，在主跨跨中、支座跨跨中等位置共安装了 18 个空气湿度传感器。

(2) 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。

(3) 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二、第三根吊杆相比其

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。

(4) 系杆力监测——该桥的水平推力主要是由布置在桥面的系杆来平衡，本桥两侧各设置 6 根系杆，在每根系杆的锚固端各布设一个光纤光栅应变传感器，监测系杆应变，通过换算得到系杆力。为抵消环境温度变化的影响，适当布置了 8 个光纤光栅温度传感器。

该大桥项目中需要使用到光纤传感器共有 2 种类型：温度传感器、应变传感器进行健康监测；同时配备一定量电类传感器进行加速度、环境风速、环境湿度数据采集。

配置基本原则：

(1) 根据独立断面选配独立通道，每个通道允许数量 12-20 个中心波长值，每个通道波长区间不重叠，选取波长值符合通道波长区间的对应传感器作为一个通道。

(2) 应变、温度等每个传感器均对应 1 个中心波长值。

(3) 如超出 1 个通道的容量，则相应增加通道数量。

## 2.2 应力应变监测

桥梁应力监测是指在桥梁外部荷载作用过程以及发生不均匀沉降时，桥梁构件发生内力变化，采用监测设备对受力结构的应力应变变化进行监测的技术手段，在监测值接近或超出控制值时发出报警，以保证结构在运行期间的安全性。

应力应变监测的目的：

(1) 实时监测钢箱拱内力变化，掌握钢箱拱结构健康状态。

(2) 实时监测系杆内力，掌握系杆内力变化。

构件应力监测需要利用大量的高性价比传感器，实现对主要构件应变实时监测。管道监测所采用的各种类型传感器的核心功能是获取各种准确、有效和可靠的结构信息。

表 2.1 为主要应变传感器特性对比：

表 2.1 各种传感器特性

类型 特性	钢弦式应变计	电阻应变计	光纤光栅应变计
传感器体积	大	小	小
蠕变	较小，适宜长期测量	较大，需提高制作技术、工艺解决	较小，适宜长期测量
测量灵敏度	较高	较高	高

温度变化的影响	温度变化范围较大时需要修正	可以实现温度变化的自补偿	温度变化范围较大时需要修正
长导线影响	不影响测量结果	需进行长导线电阻影响的修正	不影响测量结果
信号传输距离	较长	短，小于 100 米	长，可达 10 公里
抗电磁干扰能力	差	差	好
对绝缘的要求	要求不高	要求高	无需绝缘
动态响应	差	好	好

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 2.1 所示：



图 2.1 光纤光栅应变传感器

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 2.2 所示：

表 2.2 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	$\pm 2000\mu\epsilon$
分辨率	$1\mu\epsilon$ (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

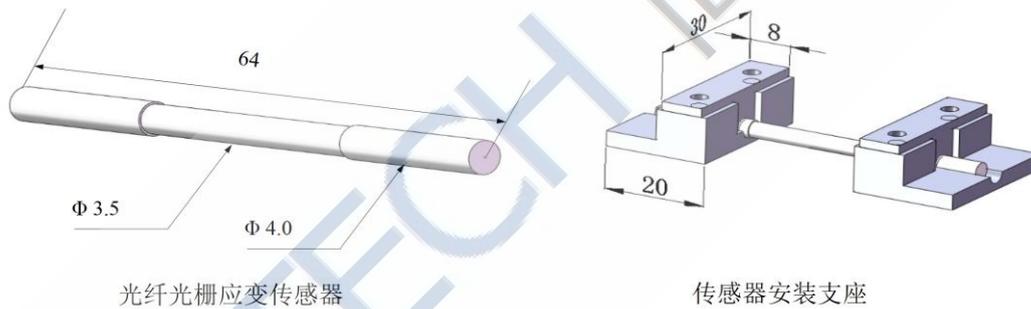


图 2.2 光纤光栅传感器封装形式及传感器安装支座

### 2.3 温度监测

桥梁温度监测是指桥梁外部温度发生变化时，引起光纤光栅应变传感器温度漂移，需要进行温度补偿，以抵消温度变化引起的误差。

本光纤光栅温度传感器按封装方式分为增敏型与无增敏性封装结构，按外形可分为管式和方形两种。传感器采用了独特的封装技术，不仅可以有效的提高了传感器的温度灵敏度，使传感器能自由的感应结构对象的温度变化，而且消除了外界应变影响，使传感器免受外界应力的冲击。

表 2.3 光纤光栅温度传感器技术指标

产品参数		
传感器	增强型光纤光栅温度传感器	无增敏型光纤光栅温度传感器
量程	$-30^{\circ}\text{C} \sim +120^{\circ}\text{C}$	$-30^{\circ}\text{C} \sim +120^{\circ}\text{C}$

分辨率	0.05℃	0.1℃
波长范围	1510nm~1590nm	1510nm~1590nm
规格尺寸	5mm 外径	3.6mm 外径
安装方式	表面粘接或埋入被测材料中	表面粘接或埋入被测材料中
应用范围	高精度温度测量	低精度温度测量及光纤光栅传感器温度补偿



图 2.3 光纤光栅温度传感器

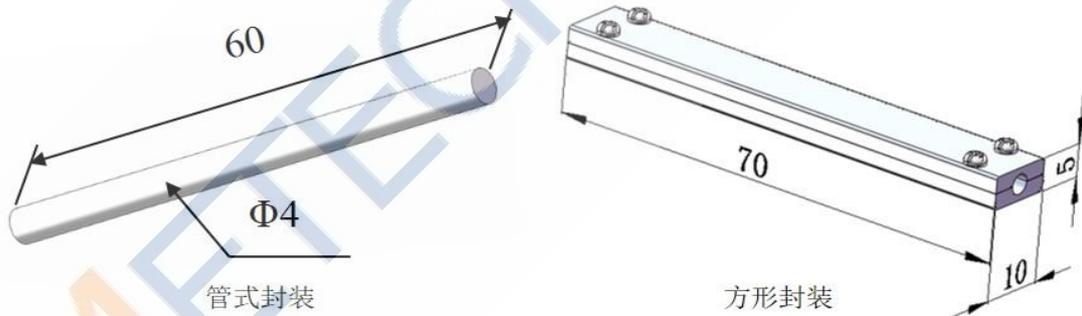


图 2.4 光纤光栅温度传感器封装形式

## 2.4 吊杆索力、桥面振动监测

吊杆拉索是桥梁的主要受力构件，索力的大小是判断桥梁是否处于正常运营状态的重要指标。目前对索力测定放大方法有压力表或压力传感器测量法、三点弯曲法、磁通量法、频率法、振动波法、伸长量测试法、垂度测试法等。压力表法测试精度较高，适合测试施工过程中的索力；磁通量法需要预埋和提前标定，大多用于桥梁结构健康监测；频率

法测量仪器具有携带容易、测量方便的优点，其测试精度能满足用户要求，因此频率法成为目前桥梁索力测试的最佳选择。

频率法测索力广泛应用于施工控制、结构健康监测、旧桥检测等领域。频率法是利用精密拾振器，拾取拉索在环境振动激励下的振动信号，经过滤波、放大和频谱分析，再根据频谱图来确定拉索的自振频率，最终根据自振频率与索力的关系确定索力。拉索的抗弯刚度、边界条件、计算长度、减震器、粘滞阻尼器等都会影响到索力计算的准确性。自振频率的测量一般有 2 种方法：环境激励（测量时间长）和人工激励（测量时间短）。索的测量一般采用人工激励方法。

桥梁在服役过程中会产生振动，从中可以计算出桥梁工作中极其重要的各种性能参数，当桥梁非正常运行时所产生的振动信号频率就会发生变化，因此监测桥梁的振动频率并能做出合理的分析和判断，对于及时发现桥梁故障和采取补救十分重要。桥梁的振动监测已发展为桥梁损伤评估诊断的常用方法之一。

吊杆索力及桥面振动均采用加速度传感器进行采集。压电加速度传感器，是内装微型 IC-集成电路放大器的压电加速度传感器，它将传统的压电加速度传感器与电荷放大器集于一体，能直接与记录和显示仪器连接，简化了测试系统，提高了测试精度和可靠性。其突出特点如下：

- (1) 低阻抗输出，抗干扰，噪声小；
- (2) 性能价格比高，安装方便，尤其适于多点测量；
- (3) 稳定可靠、抗潮湿、抗粉尘、抗有害气体。

其主要技术指标如下表所示：

表 2.4 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℃
放电时间常数	$\geq 0.2S$
安装力矩	约 20kgf·cm (M5 螺纹)



图 2.5 压电式加速度传感器

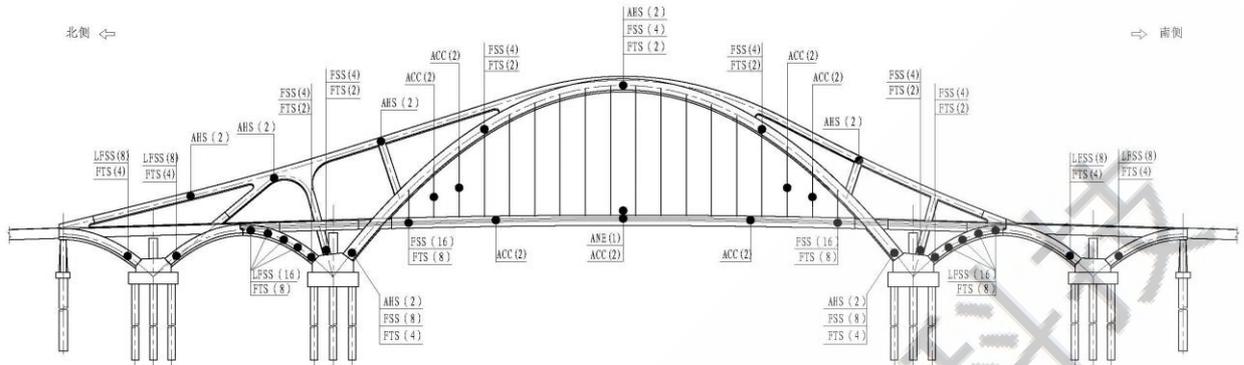
## 2.5 桥梁环境监测

桥梁环境监测包括桥梁环境风速、风向以及环境湿度等内容，所选传感器可以采用电流型风速风向仪、电流型湿度仪。其型号及类型较为常见，为普通型电流传感器，能够精确反映环境信息，以满足监测需求。

## 2.6 传感器布置

对于提篮拱桥，监测的重点为钢拱、吊杆、以及钢箱梁，为重点监测对象。拱桥为对称结构，测点应对称布置。传感器布设示意图如图 2.6~2.12 所示：

监测系统测点总布置图



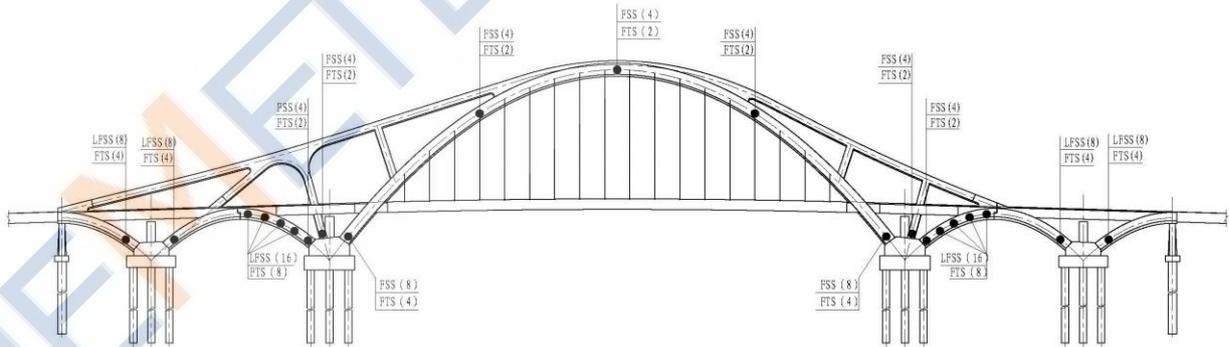
监测设备数量汇总

监测项目	传感器类型	单位	数量	备注
应变	钢箱拱	FSS	44	
裂缝	混凝土拱肋	LFSS	64	
温度	钢箱拱	FTS	22	
	混凝土拱肋	FTS	32	
系杆力	FSS	个	24	
	FTS	个	8	作为温度补偿
吊杆索力	ACC	个	8	安装两端吊杆上
桥面振动	ACC	个	6	安装在主跨1/4, 1/2, 3/4的桥面两端
风速风向	ANE	台	1	安装在主跨中间截面的立杆上
钢箱拱空气湿度	AHS	个	18	

说明：  
 1. 传感器代号分别表示：  
 LFSS-长标距光纤光栅应变传感器  
 FSS-光纤光栅应变传感器  
 FTS-光纤光栅温度传感器  
 AHS-空气湿度传感器  
 ACC-加速度传感器  
 ANE-风速仪  
 2. ●-传感器

图 2.6 监测系统测点总布置图

钢箱拱及拱座应变监测测点布置图



传感器数量表

传感器	布设位置	单位	数量
FSS	钢箱拱	个	44
FTS	钢箱拱	个	22
LFSS	混凝土拱肋	个	64
FTS	混凝土拱肋	个	32

图 2.7 钢箱拱及拱座应变监测测点布置图

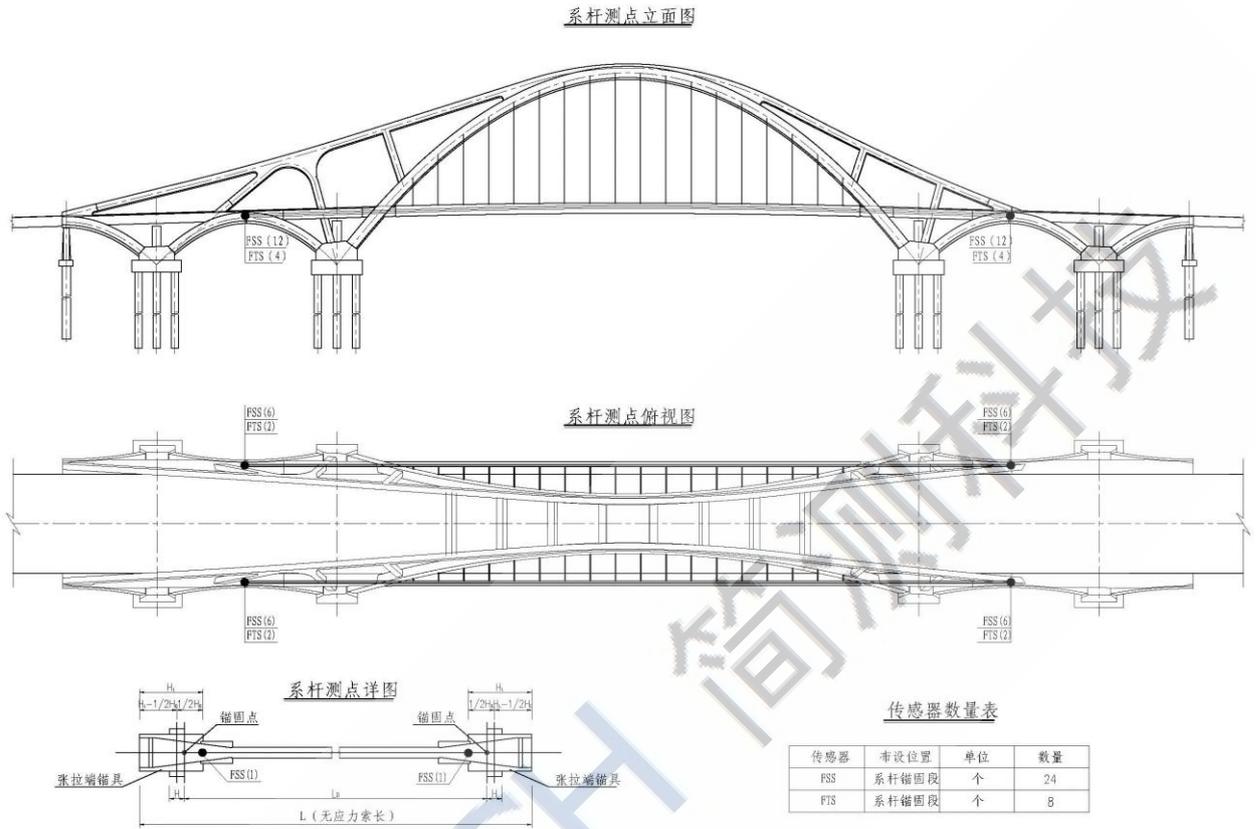


图 2.8 系杆监测测点布置图

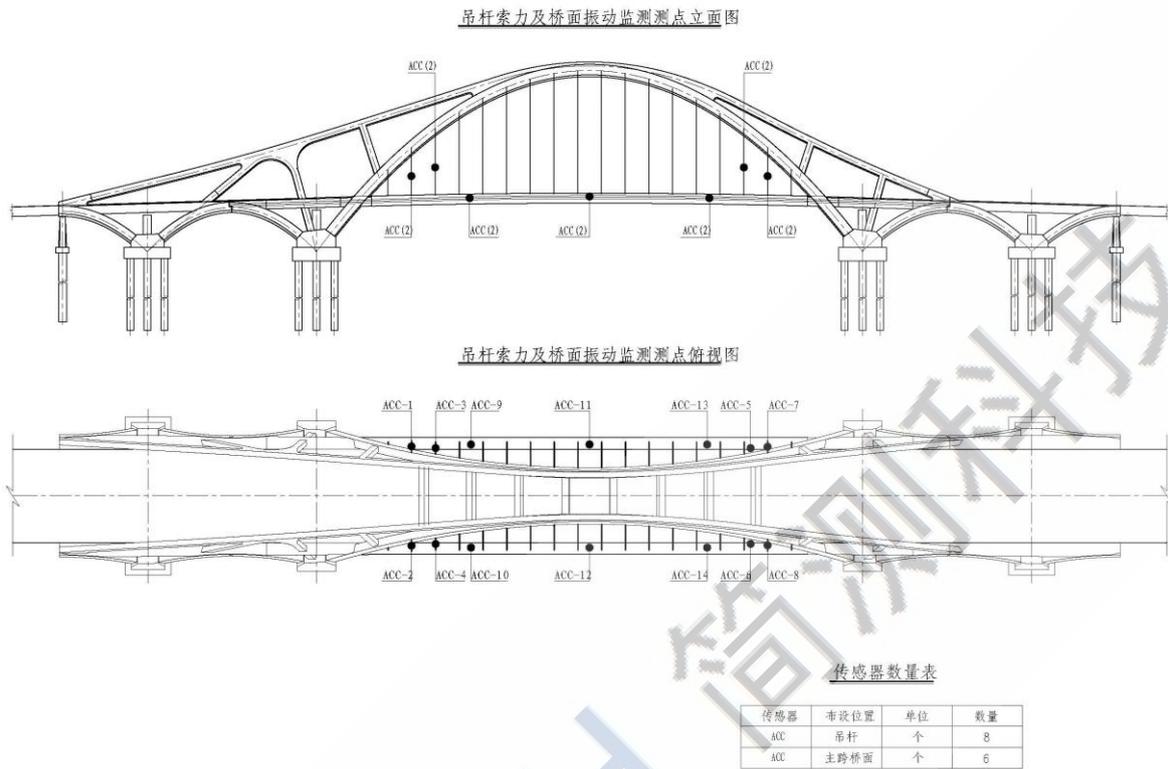
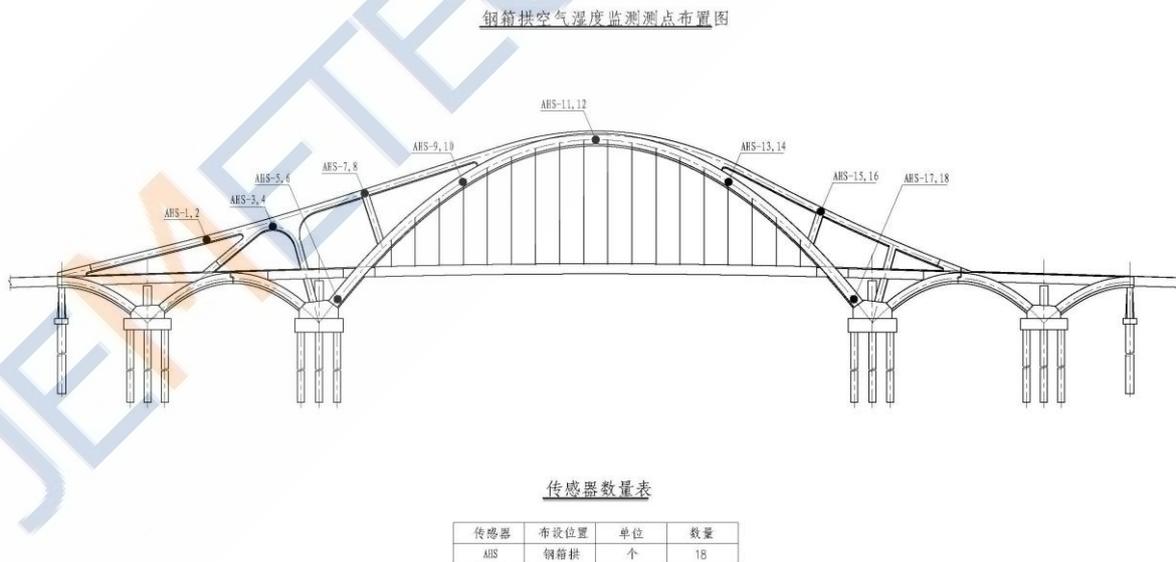


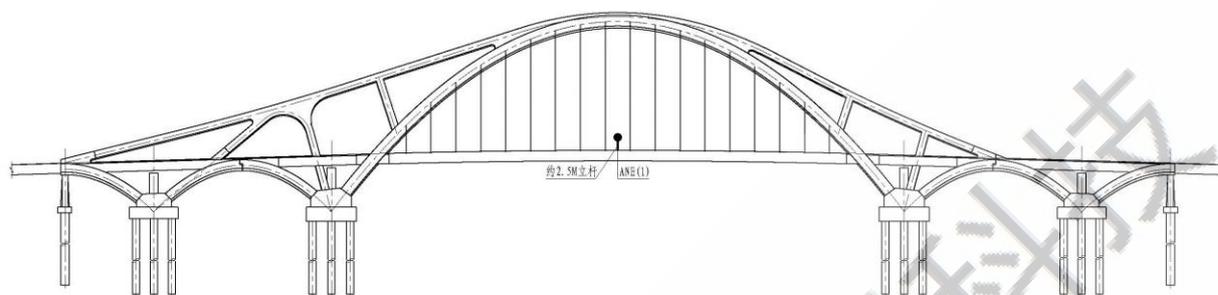
图 2.9 吊杆索力及桥面振动监测测点布置图



说明：  
1. 上下游的钢箱拱内空气湿度传感器布置完全相同。

图 2.10 钢箱拱空气湿度监测测点布置图

风速风向监测测点布置图



传感器数量表

传感器	布设位置	单位	数量
ANE	主跨桥面中间	个	1

说明：  
1. 在主跨桥面中间位置立一个高约2.5m左右的杆，将风速仪固定在该杆顶部。

图 2.11 风速风向监测测点布置图

监测系统走线图

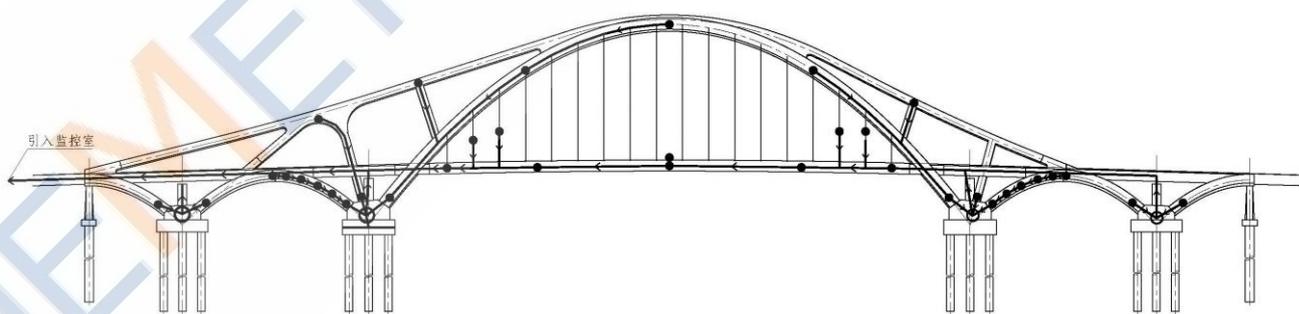


图 2.12 监测系统走线图

### 3 监测系统施工工艺

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：

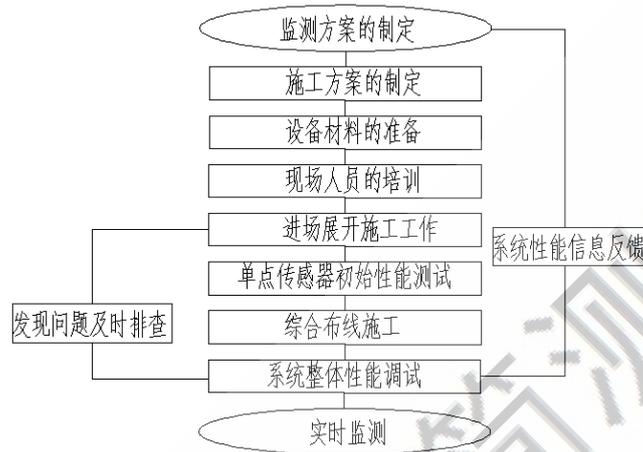


图 3.1 施工工艺流程图

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。

### 3.1 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 3.2~5 所示：



图 3.2 平面固定方式（粘接）

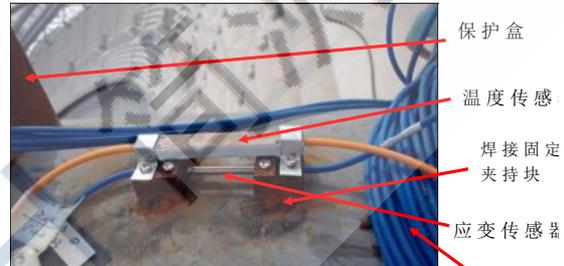


图 3.3 圆弧表面固定方式（焊接）

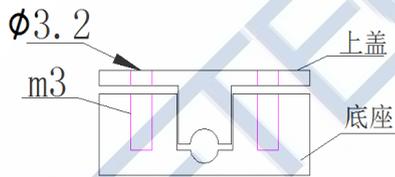


图 3.4 平面用加持底座示意图

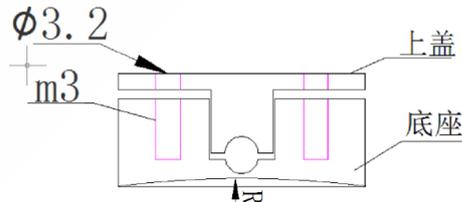


图 3.5 圆弧表面加持底座示意图

由图 3.4、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：

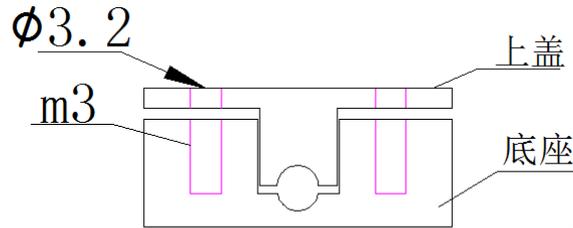


图 3.6 夹持块装配示意图

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 3.7 拉伸完成的传感器



图 3.8 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 3.9 所示：



图 3.9 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：

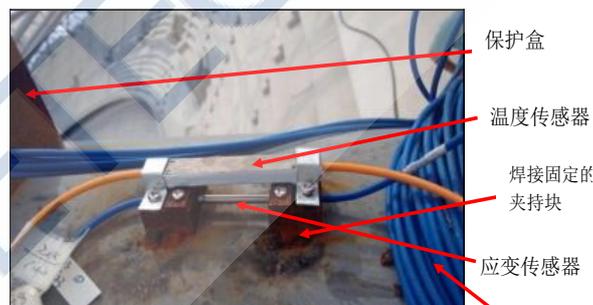


图 3.10 传感器保护盒内部

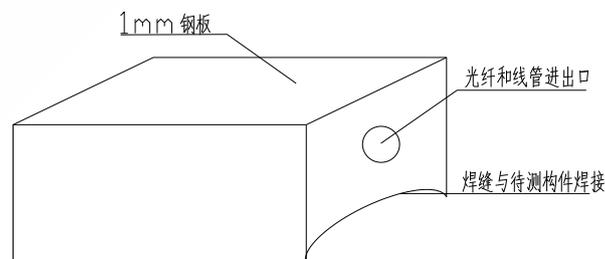


图 3.11 光纤光栅传感器保护盒示意图

(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。

### 3.2 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：

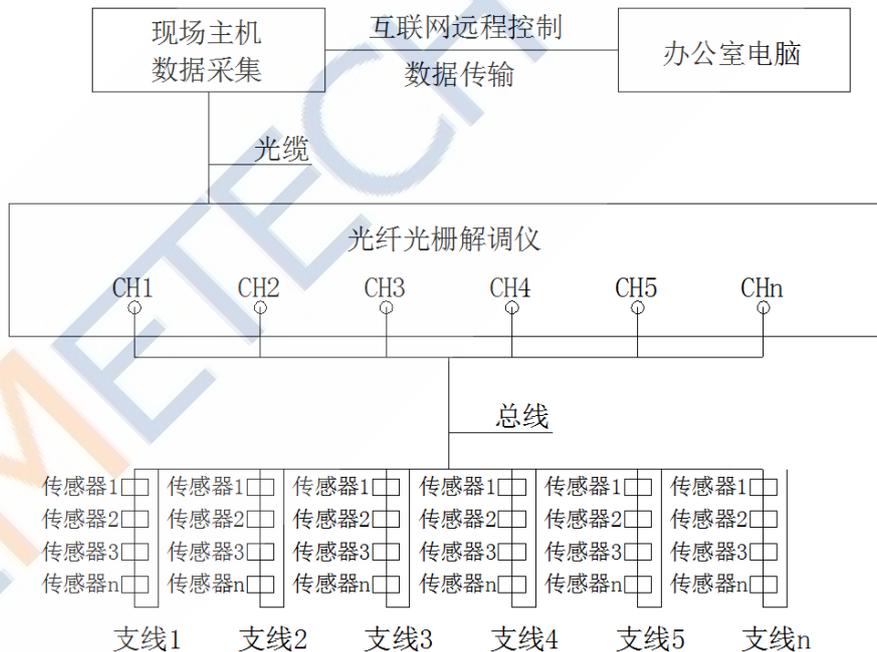


图 3.12 系统布线示意图

### 3.3 质量控制

#### 3.3.1 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。

#### 3.3.2 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。

## 3.4 安全控制

### 3.4.1 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。

### 3.4.2 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。

## 3.5 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。

## 4 光纤光栅解调仪

光纤光栅解调仪凭借自身分辨率高、重复性好、采集速度快、可靠性高、处理能力强、传输损耗小、传输容量大、测量范围广等优点在结构健康监测中得到广泛应用。当前，光纤传感器技术发展日趋成熟，应用领域广泛，在各领域中的应用很多展现出蓬勃发展的态势，极有可能替代传统的传感解调手段。主要应用于桥梁、大坝、高层建筑、隧道、高速公路、电力、机械、石油化工、管道、消防、安防、暖通等领域的结构应变、温度、位移等物理量数据的实时监测。

### 4.1 光纤光栅解调仪简介

JEME-iFBG -S 系列产品是一款基于嵌入式硬件平台和实时操作系统的多通道光纤光栅同步解调仪，采用波长扫描型光纤激光器作为光源，具有多路同步采集及单光路 20dB 信号增益能力。1-5Hz 采样频率可以测量低速变化的温度、应变等物理参数。每个光学通道具有 80nm 波长范围（1510~1590nm），单通道可同时连接多个 FBG 传感器（取决于传感器波长范围）。



图 4.1 传感信号综合同步解调仪

## 4.2 光纤光栅解调仪特性

- (1) 高精度监测
  - a) 解调精度达到 1pm
  - b) 大功率波长扫描光纤激光器
  - c) 低噪高压驱动和光电转换电路模块
  - d) 光纤光栅“波长显微镜”算法
- (2) 大容量采集数据实时监测
  - a) 实时控制器运算资源控制
  - b) 实时信号“硬”分析算法
  - c) 高效的数据拟合和压缩算法
- (3) 同步监测
  - a) 各通道、各设备同步采集
  - c) 同步时间精度不低于  $0.1 \mu s$
  - d) 实现与基于 TCP/IP 协议的第三方数据通信
  - e) 通用型数据采集仪的同时采样功能
  - f) 信号接收能力，时钟精度达到  $0.1 \mu s$
- (4) 高效率软件架构

采用状态机和循环事件结构互耦合的软件架构，实现与嵌入式硬件平台系统无缝结合、程序功能模块化和多线程运行，使系统具备数据采集、实时信号处理、存储、网络通信、实时数据显示、历史数据查看、数据管理及任务配置的功能

## 4.3 产品系列

序号	产品	型号	描述
1	光纤光栅解调仪	JEME-iFBG-S04	4 路静态 1510-1590nm
2	光纤光栅解调仪	JEME-iFBG-S06	6 路静态 1510-1590nm
3	光纤光栅解调仪	JEME-iFBG-S08	8 路静态 1510-1590nm
4	光纤光栅解调仪	JEME-iFBG-S12	12 路静态 1510-1590nm
5	光纤光栅解调仪	JEME-iFBG-S15	15 路静态 1510-1590nm
6	光纤光栅解调仪	JEME-iFBG-S24	24 路静态 1510-1590nm
7	光纤光栅解调仪	JEME-iFBG-N04	4 路静态 1525-1565nm
8	光纤光栅解调仪	JEME-iFBG-N06	6 路静态 1525-1565nm
9	光纤光栅解调仪	JEME-iFBG-N08	8 路静态 1525-1565nm
10	光纤光栅解调仪	JEME-iFBG-N12	12 路静态 1525-1565nm
11	光纤光栅解调仪	JEME-iFBG-N15	15 路静态 1525-1565nm

#### 4.4 指标参数

光纤光栅测量指标	
光路数量	4、8、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	8、16、32、48、64
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
外型尺寸	250×320×185mm (15、24 通道); 250×300×100mm (4、6、8 通道)

## 5 电类传感综合同步采集仪

数据采集，是指从传感器和其它待测设备等模拟和数字被测单元中自动采集信息的过程。数据采集系统是结合基于计算机的测量软硬件产品来实现灵活的、用户自定义的测量系统。

被采集数据是已被转换为电讯号的各种物理量，如温度、水位、风速、压力等，可以是模拟量，也可以是数字量。采集一般是采样方式，即隔一定时间（称采样周期）对同一点数据重复采集。采集的数据大多是瞬时值，也可是某段时间内的一个特征值。准

确的数据量测是数据采集的基础。数据量测方法有接触式和非接触式，检测元件多种多样。不论哪种方法和元件，均以不影响被测对象状态和测量环境为前提，以保证数据的正确性。数据采集含义很广，包括对面状连续物理量的采集。

## 5.1 电类传感综合同步采集仪简介

JEME-eDAQ 系列是一款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(电压、电流、电桥和 IEPE 等)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。

JEME-eDAQ 用于测量基于电压、电流、桥式电路、IEPE(压电)等类型的传感器信号，支持 16、32、48、64 通道的同步采集。高精度的 A/D 数据采集卡为用户提供了精准可靠的测量结果；可定制类型、通道数量的模拟信号调理模块和参数可调的低通滤波器可以灵活方便的满足用户的测试测量需求，如图 5.1 所示。



图 5.1 电类传感综合同步采集仪

## 5.2 电类传感综合同步采集仪特性

- (1) 电类传感采集部分：
  - a) 16、32、48、64 通道高速同步采集

- b) 支持多种类型信号(IEPE、电压、电流、桥路)
- c) 可定制的独立通道低通滤波器
- d) 16 位数据采集分辨率
- e) 与光纤光栅模块可同步解调
- (2) 硬软件系统部分：
  - a) 以太网接口，系统支持远程工作方式
  - b) 内嵌 VxWorks 实时操作系统提供工业级的系统稳定性能
  - c) 内嵌资源丰富的 FPGA 硬件逻辑芯片
  - d) 可定制的信号实时处理功能
  - e) 低功耗，可支持移动电源

### 5.3 指标参数

电类传感测量指标	
单机通道数	16、24、32、48、64
支持输入信号类型	IEPE、电压、电流、桥路
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℃
外型尺寸	366×320×147mm

## 6 监测系统软件

### 6.1 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。

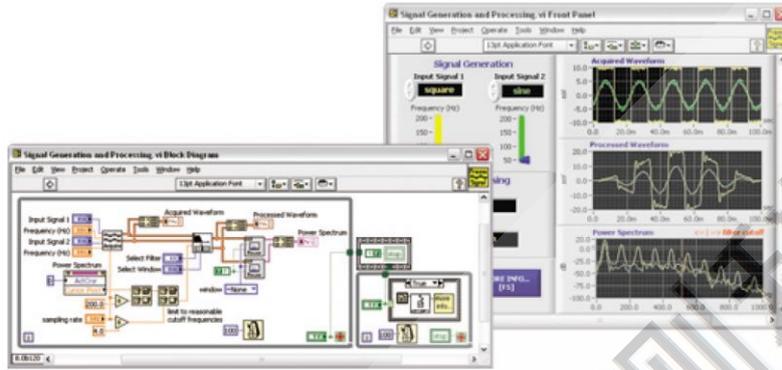


图 6.1 NI LabVIEW 图形化界面

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。

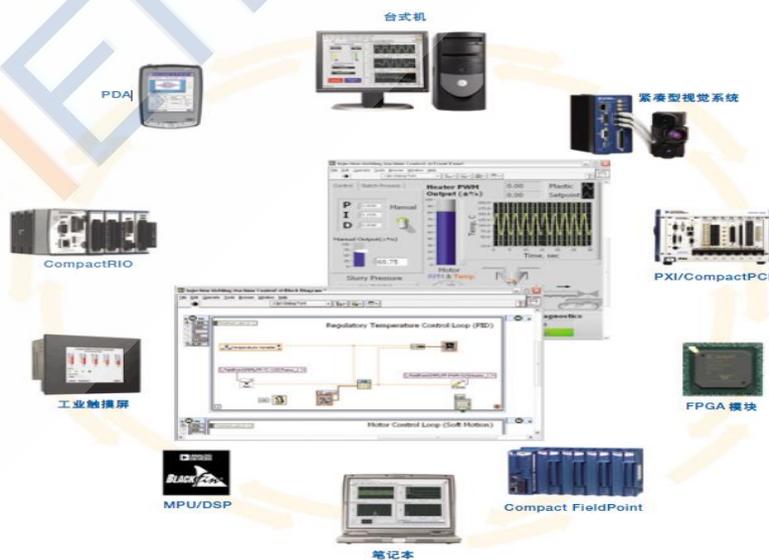


图 6.2 NI LabVIEW 硬件兼容平台

## 6.2 监测系统功能

### 6.2.1 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。

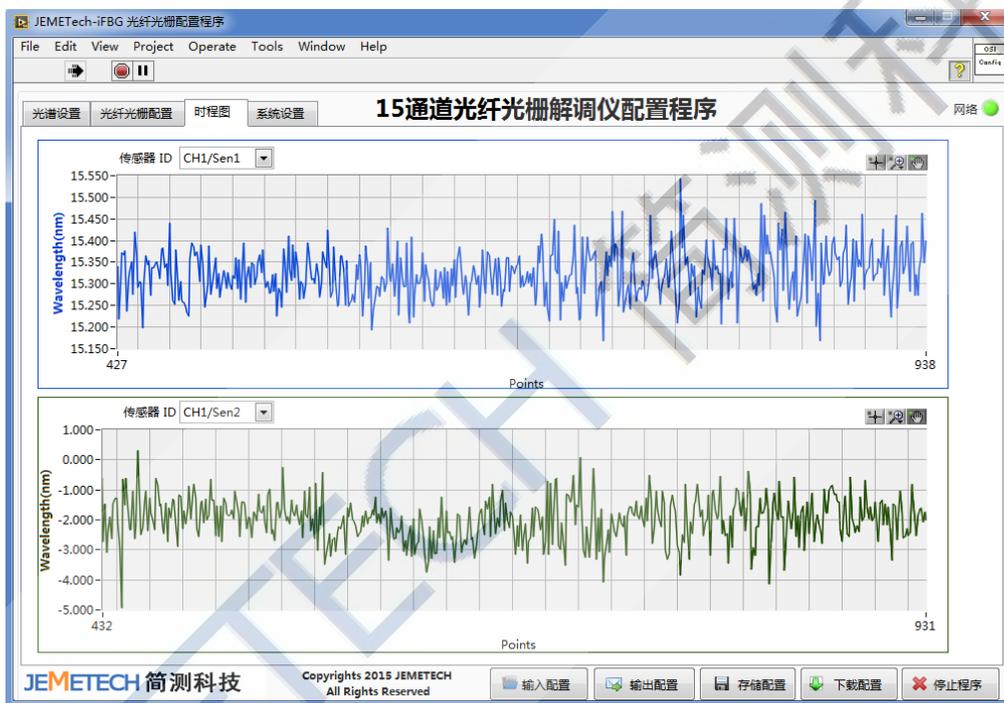


图 6.3 监测系统界面

### 6.2.2 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

### 6.2.3 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

深圳市简测科技有限公司

JEMETECH CO.,LTD.

**JEMETECH**  
简测科技