

水库大坝结构监测监控系统 升级改造项目实施方案



深圳市简测科技有限公司

二〇一三年九月

1、工程概况

XXX 水库是“七五”、“八五”期间重点水利枢纽工程，也是采用碾压混凝土筑坝技术。水库位于干流上，距市区 40km，控制流域面积 2,795km²，总库容 21.68 亿 m³，与下游 70km 的水库形成干流梯级开发。是以中部城市供水和防洪为主，兼顾灌溉、发电、养鱼的一座大型水利枢纽工程。

XXX 水库大坝由挡水坝段、溢流坝段、底孔坝段及电站坝段组成，见下图 1-1。



图 1-1 大坝主体形象图

拦河坝为碾压混凝土重力坝，坝顶长 1,040m，共分 65 个坝段，除 4、5、7、9 坝段外，其余 61 个坝段均为 16m 长。挡水坝段 48 个，坝顶高程 267m，顶宽 10m，最大坝高 82m，最大底宽 61.30m。15—27#坝段为溢流坝段，设溢流表孔 12 孔，每孔净宽 12m，中墩为平尾墩厚 4m，溢流前缘净宽 144m；堰顶高程 255.2m，最大坝高 71.2m，最大底宽 74m，堰顶设 12x8.7m 弧形钢闸门，采用挑流式消能。13、14 坝段内各设放水底孔一个，进口设 4x 6m 检修平板钢闸门，出口设 4x 5m 弧形钢闸门以调节流量，出口采用挑流式消能。8、9 坝段为电站坝段内设 3 条内径 2.2m 的压力钢管，间距为 8m，电站厂房设在坝后，主厂房尺寸为 36.74x12.12m，装有 3 台 6,500kW 和 1 台 1,250kW 水轮发电机组。

坝体剖面为“金包银”型式，上游 3m 防渗层，下游 2.5m 保护层和 2m 基础垫层为常态混凝土，廊道、底孔等孔洞周围为 1m 厚钢筋混凝土，其余内部均为含粉煤灰 30%—35%的干贫碾压混凝土。

工程混凝土及钢筋混凝土总量为 202.6 万 m³，其中枢纽主体工程砼 187.6 万 m³，碾压砼 96.6 万 m³，工程于 1990 年 2 月开工，1996 年竣工，总工期为六年。坝底下为监测

数据采集室，水库管理局距大坝 3km。水库工程特性见表 1-1，主要建筑物特性见表 1-2，综合利用作用见表 1-3。

表 1-1 XXX 水库特性表

序号	指 标 名 称	单 位	数 量
1	最高库水位（校核）	m	265.7
	库容	亿 m ³	21.68
	面积	km ²	81.4
2	设计洪水位 水位	m	263.9
	库容	亿 m ³	20.23
	面积	km ²	77.8
3	正常高 水位	m	255.2
	库容	亿 m ³	14.20
	面积	km ²	61.0
4	防洪限制 水位	m	255.2
	库容	亿 m ³	14.70
	面积	km ²	61.0
5	死水位 水位	m	207.7
	库容	亿 m ³	0.348
	面积	km ²	7.40
6	防 洪 库 容	亿 m ³	5.81
7	调 洪 库 容	亿 m ³	7.48
8	兴 利 库 容	亿 m ³	13.852
9	净 调 节 水 量	亿 m ³	9.47
10	调 节 系 数		0.88

表 1-2 XXX 水库主要建筑物特性表

序号	指 标 名 称	单位	数 量
1	坝 型：混凝土重力坝		
2	坝 长	m	1040
3	挡水坝		
	（1）坝顶高程	m	267.0
	坝顶宽度	m	10.0
	（2）建基岩面最低高程	m	185.0
	（3）最大坝高	m	82.5
	（4）挡水坝长	m	846.0

	(5) 坝坡上游		1:0.2
	下游		1:0.65-1:0.75
4	溢流坝		
	(1) 坝顶高程	m	255.2
	(2) 建基岩面最低高程	m	184.0
	(3) 最大坝高	m	71.2
	(4) 溢流坝长	m	194
	(5) 溢流坝孔数	孔	12
	每孔净宽	m	12.0
	总 宽	m	144
	(6) 泄洪流量		
	校核洪水位	m	265.7
	泄流量	m ³ /s	9492
	设计洪水位	m	263.9
	泄流量	m ³ /s	7044
	(7) 工作闸门		
	弧形钢闸门	扇	12
	尺寸(宽×高)		12×8.7
5	底 孔		
	(1) 孔口尺寸(宽×高)		4×5
	(2) 孔 数	孔	2
	P=1%上游水位	m	262.8
	泄流量	m ³ /s	1068
6	工程量		
	(1) 土石方	万 m ³	644.61
	(2) 混凝土及钢筋混凝土	万 m ³	187.6
	其中：碾压混凝土	万 m ³	96.6
	(3) 帷幕灌浆	m	201698
	(4) 固结接触灌浆	m	83899

2 主要水文气象特征

太子河流域属温带季风气候。冬季寒冷，盛行西北风；夏季炎热，多东南风。四季冷暖干湿分明。多年平均气温 6.2°C ，绝对最高温度 35.5°C ，最低 -37.9°C 。1 月份平均气温最低为 -14.3°C ；7 月份平均气温最高为 23.1°C ；河水平均封冻期约为 100 天。年平均降水量 778mm。降水量年际变化较大；年内分配极不均匀，6~9 月降雨量占全年降雨量的 70%以上。该流域是辽宁省暴雨多发地区，洪水频繁，暴雨集中，多发生在 7~8 月。1870 年以来，辽阳站共发生 $10,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上洪水 7 次。最大洪水发生于 1960 年，达 $18,100\text{m}^3/\text{s}$ （XXX 坝址达 $10,500\text{m}^3/\text{s}$ ）。一般洪水历时 7 天，连续两次洪水历时 13 天左右。全流域多年平均径流量 $40.57 \times 10^8\text{m}^3$ ，地下水 $5.96 \times 10^8\text{m}^3$ ，坝址多年平均径流量 $11.1 \times 10^8\text{m}^3$ 。

年平均蒸发量为 1369mm，5 月份最大 253.7mm，1 月份最小为 17.9mm。月平均相对湿度 8 月份最大为 81%，5 月份最小为 57%。年平均风速 2.5m/s ，最大风速 16m/s 。

表 1-4 XXX 水库枢纽水文特性表

序号	指标名称	单位	数量
1	坝址以上流域面积	km^2	2795
	河流域面积	km^2	13883
2	年径流		
	(1) 多年平均年径流量	亿 m^3	11.10
	(2) 多年平均流量	m^3/s	35.9
	(3) 75%年径流量	亿 m^3	7.88
3	代表性流量		
	(1) 调查历史洪水最大流量	m^3/s	10500
	(2) 0.01%洪峰	m^3/s	22000
	(3) 0.1%洪峰	m^3/s	15700
	(4) 1%洪峰	m^3/s	9610
	(5) 2%洪峰	m^3/s	7840
4	七天洪量	亿 m^3	
	(1) 0.01%洪量	亿 m^3	18.6
	(2) 0.1%洪量	亿 m^3	14.4
	(3) 1%洪量	亿 m^3	10.1
	(4) 2%洪量	亿 m^3	8.67
5	(1) 多年平均输沙量	万 t	70.5
	其中：推移质	万 t	7.0
	(2) 多年平均含沙量	kg/m^3	0.695

3 枢纽工程地质概况

库区地质：XXX 水库位于泉水向斜中，向斜轴长 30km，宽 10km。河谷两崖广泛出露寒武系中、上统和奥陶系以可溶性碳酸盐岩为主的地层，外围连续分布非可溶性的寒武系中、下统页岩和震旦系碎屑岩、前震旦系变质岩及中生代火成岩。库区两岸高山连绵，分水岭高程都在 400m 以上，封闭条件良好，构造比较简单。未见通向库外的深大断裂，因此，不存在向邻谷渗漏问题。库区外围非可溶性岩层中的地下水位高于水库下常蓄水位，故水库蓄水后不会产生永久性渗漏。库区地震基本烈度为Ⅵ度，大坝按Ⅶ度设计。最大可能的水库地震按 4 级考虑。

坝址区地质：坝址区两岸呈不对称“U”型横向河谷。左岸山高坡陡，地形完整；右岸沟谷发育，地形不完整，呈南北展布的低矮单薄山脊，高程一般在 300m 以下。坝址区属构造剥蚀低山区。

4 大坝监测监控系统的设计实施过程及运行以来存在的主要问题

4.1 内观仪器自动化观测停止的原因

- 1) 随着时间的推移，内部观测设备损害程度较大，大约有 20%的内部传感器发生损坏。
- 2) 由于线路发生了老化和电磁干扰的原因，数据采集的中央控制系统也经常出现故障。
- 3) 在总体停止数据采集之前，所有采集的数据基本都不稳定，两次之间所采集的数据发生剧烈震荡，尤其是温度的数据产生巨大的偏差。
- 4) 从应变和应力的数据异常变化也可以推断，控制数据采集的中央控制系统的工作也非常不正常，而且中央控制系统的改造也存在非常大的困难。根据第三方的检测认为，中央控制系统已完全损坏，而且几乎所有的控制系统的部件都无法更换，因为当前已经没有厂家能提供适合以前的控制系统的改造设备。目前该数据自动化采集工作完全终止。

4.2 外部观测自动化观测停止的原因

- 1) 垂线与引张线在自动化观测运行期间，其自动化本身测值较稳，但自动化测值与人工测值无法进行比较分析，另外，由于正垂线线体过长，在每年的 10 月至次年的 3 月，线体晃动较大，导致测值不稳，于是便停止了自动化数据的采集，处于瘫痪状态。
- 2) 扬压力计总计 89 支。由于主廊道中原设计均为有压孔而实测有部分无压孔，故有 21 支仪器不能实测孔深，相应自动装置均在水面以上，故自动测值也没有。因此目前 89 支扬压力计中有 21 支仪器无人工测值及自动测值。目前扬压力自动化传感器采用的是差动式传感器，此系统在运行过程中，随着时间的推移，有 1/3 的仪器的自动测值不可靠，所采集的数据不完整，因此完全停止了自动化采集工作。目前完全都是由人工测值。
- 3) 大坝沉陷点总计 158 个，包括坝顶沉陷点 73 个，坝顶启闭机房沉陷点 12 个，190 主廊道 40 个，排水廊道 33 个，沉陷全部都由人工观测。
- 4) 大坝共有集水井 5 个，集水井内设水位计，利用霍尔开关传感器作为集水井内水位位置的控制开关，控制水泵的接通和断开，由于集水井水泵不能自动运行，因此自动化系统一直没有启用。
- 5) 全坝共设 7 个量水堰，分布在横向廊道排水沟内，分别为 11#、17#、23#、31#、38#、43#、60#，量水堰堰板选用 90°三角堰，均为人工观测。量水堰自动观测采用差动式电容传感器，将水位转换为差动电容比，现自动观测系统已不能使用。

5 报告编制依据

5.1 编制依据

- (1)《辽宁省观音阁水库自动化建设规划》，辽宁省观音阁水库管理局，2005. 1
- (2)《观音阁水利枢纽总布置图》，辽宁省水利水电勘测设计院，1990. 11
- (3)《辽宁省观音阁水库枢纽工程》，辽宁省观音阁水库管理局，1994
- (4) 观音阁水库管理技术文件、相关工程图纸和数据图表
- (5) 观音阁水库管理局对本工程设计提出的相关要求，设计单位工程技术人员与水库管理局相关技术人员例会及现场踏勘确定的有关本次工程的设计内容等

5.2 编制标准

- (1) 《工程建设标准强制性条文—水利工程部分》，建标[2004]103号，建设部
- (2) 《混凝土坝安全监测技术规范》，DL/T5178-2003，电力部
- (3) 《大坝安全自动监测系统设备基本技术条件》，SL268-2001，水利部
- (4) 《国家防汛指挥系统工程总体设计大纲》，国家防总
- (5) 《洪涝灾害调查纲要》，国家防总
- (6) 《东北地区实用洪水预报方案(下册)浑河卷》，水利部松辽委
- (7) 《辽宁省公共安全技术防范管理规定》，1999年，辽宁省人民政府令第103号
- (8) 《计算机网络产品设计规范》，电子工业部
- (9) 《指挥自动化计算机网络安全要求》，GB2887
- (10) 《计算机外部设备接口统一规定》，ZBY306.1-85，信息产业部
- (11) 《计算站场地安全要求》，GB9361-88，信息产业部
- (12) 《通信工程系统防雷技术规定》，YD 5078-98，信息产业部
- (13) 《广播节目声音质量主观评价方法和技术指标要求》，GB/T16463，信息产业部
- (14) 《水利建设项目经济评价规范》，SL72-94，水利部
- (15) 《水利工程设计概(估)算编制规定》，水总[2002]116号
- (16) 《水利建筑工程概算定额》(2002)
- (17) 《水利工程施工机械台时费定额》(2002)
- (18) 《水利水电设备安装工程概算定额》，水建管[1999]523号，水利部
- (19) 《水文专业有偿服务收费管理办法》，水利部
- (20) 《水文自动测报系统技术规范》，SL61-2003，水利部
- (21) 《水利水电工程水情自动测报系统设计规定》，DL/T5051-1995，水利部
- (22) 《水文自动测报系统设备基本技术条件》，SL/T102-1995，水利部
- (23) 《水文自动测报系统通信电路设计规定》，SL199-97，水利部

目前,在水利水电工程中,光纤技术已从初期的单纯温度监测,发展到渗流监测、应力应变监测、位移监测等多个方面,例如:渗漏定位监测、裂缝监测、混凝土应力应变监测、动应变及结构振动监测、岩

石锚固监测(锚杆及锚索预应力监测)、钢筋混凝土薄体结构物受力监测、混凝土固化监测、钢筋锈蚀监测、温度与渗流的耦合监测等。

与传统技术相比,光纤监测技术具有独特的优越性:(1)光纤传感器以光信号作为载体,以光纤作为媒质,光纤的纤芯材料为二氧化硅,因此,光纤传感器具有耐腐蚀、抗电磁干扰、防雷击等特点;(2)光纤本身轻细纤柔,光纤传感器的体积小,重量轻,不仅便于布设安装,而且对埋设部位的材料性能和力学参数影响甚小,能实现无损埋设;(3)光纤传感器灵敏度高,可靠性好,潜在故障大大低于传统技术;使用寿命长,具有良好的性能价格比;(4)可以准确地测出光纤沿线任一点的监测量,信息量大,监测效应量分布连续,成果直观,有助于实现动态监控。

6、监测系统选型的技术原则

结构健康监测项目需要利用大量的高性价比传感器,实现对结构性能实时监测,为结构或构件的损伤识别、功能评价等提供信息。结构健康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、有效和可靠的结构及周边环境信息。

下表为主要应变传感器特性对比:

表 A.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

充分考虑本项目测量结构在制作、养护、施工及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；光纤光栅传感器具有其独特的优点：

1. 传感头结构简单、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、重复性好；
2. 与光纤之间存在天然的兼容性，易与光纤连接、低损耗、光谱特性好、可靠性高；
3. 具有非传导性，对被测介质影响小，又具有抗腐蚀、抗电磁干扰的特点，适合在恶劣环境中工作；
4. 轻巧柔软，可以在一根光纤中写入多个光栅，构成传感阵列，与波分复用和时分复用系统相结合，实现分布式传感；
5. 测量信息是波长编码的，所以，光纤光栅传感器不受光源的光强波动、光纤连接及耦合损耗、以及光波偏振态的变化等因素的影响，有较强的抗干扰能力；
6. 高灵敏度、高分辨力。

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。

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

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。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。

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。

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。

7、大坝健康监测系统总体设计

7.1 设计原则

该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。

7.2 系统体系结构

整个系统分为客户端和服务端，客户端只需安装一个标准的 Web 浏览器，数据都存储在服务器上，根据用户的请求，服务器给用户发送相关数据，用户处理完成再传递回服务器。服务器执行数据查询和数据处理的算法，并将结果发送给客户，用户端浏览器不用维护，合法用户使用安装有浏览器并已经接入到局域网的计算机即可十分容易地使用该系统。系统的体系结构如下图所示：

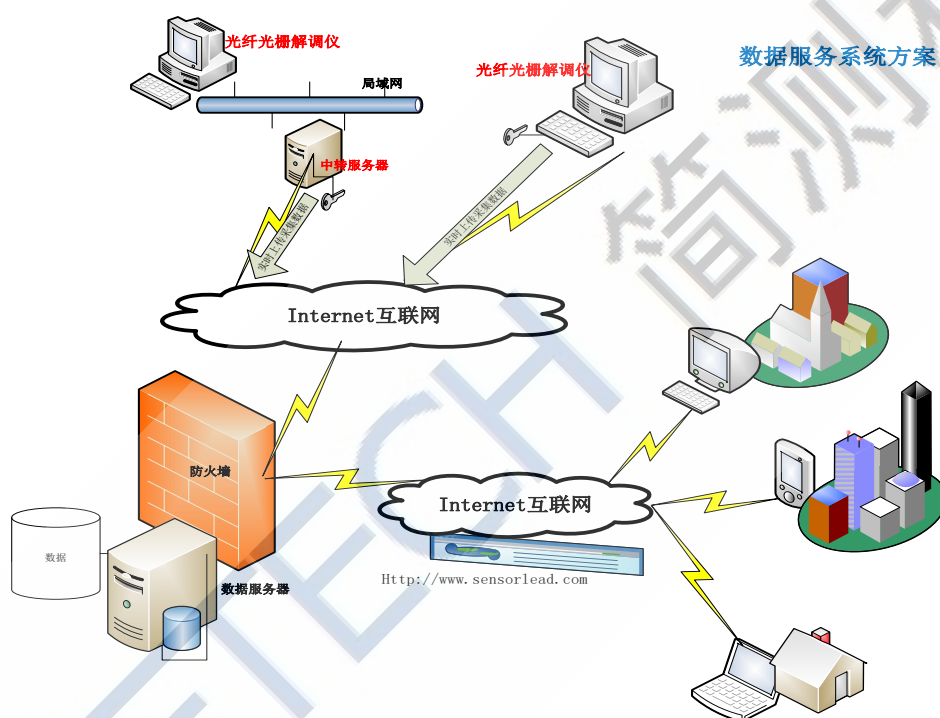


图 1 系统体系结构图

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。

7.2.1 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。

7.2.2 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。

7.2.3 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。

7.2.4 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。

7.3 系统功能总框架

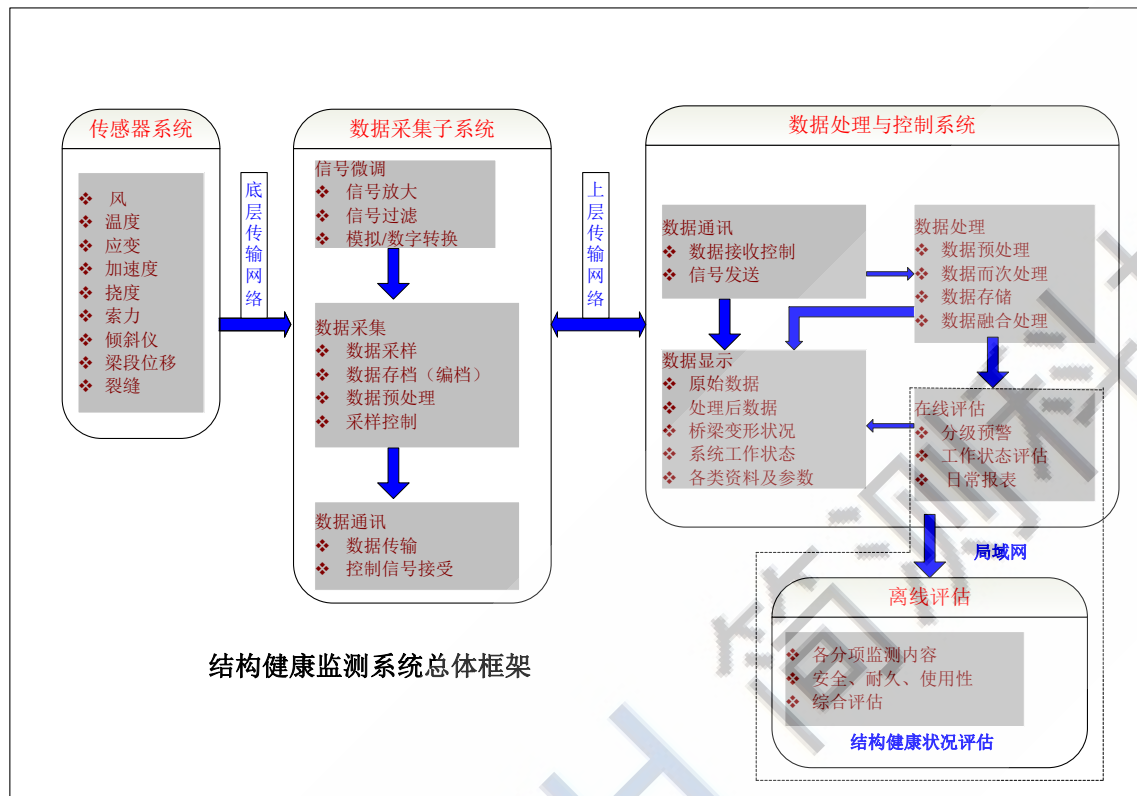


图2 系统功能总框架图

7.4 大坝监测方案

7.4.1 监测内容

根据大坝自身的特点，在健康监测中应对大坝以下方面进行监测：

- 1) 关键部位的应变进行监测；
- 2) 关键部位的温度进行监测；
- 3) 对大坝关键部位的震动进行监测；
- 4) 对大坝裂缝进行监测；

在以上的监测内容中除振动外均采用光纤光栅传感器，光纤光栅传感器串连统一接入到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、保存、打印等，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 传送到远处，达到远程监控的目的。

光纤光栅解调仪采集到信号后开始分析处理，对于一般大坝梁的检测/监测，

解调仪完全可达到处理存储的功能，对于结构关键部位的实时监测，由于数据量庞大，可采用阵列处理器、磁盘结构来处理、存储数据。

根据分析，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，确定监测内容如下。

1. 大气温度——掌握所处区域的大气温度。
2. 振动——掌握结构实时振动响应，用以计算结构模态参数，并用于振动类突发事件的预警。
3. 应变——掌握动静载荷力作用下的结构应力应变情况，用以设置相应预警阈值。
4. 结构温度——掌握结构温度情况。
5. 大坝裂缝——监测关键部位裂缝情况。

该大坝项目中需要使用到光纤传感器共有 4 种类型：温度传感器、应变传感器、位移传感器、带温度自补偿型应变传感器进行健康监测；同时配备少量电类传感器进行加速度的数据采集，

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。

7.4.2 在线监测数据处理

采集方案很大程度上依赖于系统要求和数据库的容量。静态数据反映的是结构缓慢的变化过程，并且采集的次数较少，所以，对于静态数据，应力和变形采样频率约为 2Hz，可以完全提交或采用统计方式存储，采用统计的方法同时记录每统计时段的最大值、最小值、均值方差和趋势等。

在线监测系统经过长期营运，将纪录结构应力、加速度、倾角、位移、沉降、裂缝以及变形等大量数据和相关资料。对营运期内的历史数据进行统计分析，统计不同时候的关键部位应力、加速度、倾角、位移、沉降、挠度以及变形的历程，局部以及整体变化，可以让管理部门更清楚地掌握运行周期内监测指标的变化规

律和损伤、衰退趋势，从而可以有条件地分析和预测结构的使用状况，为养护维修提供科学依据。

本监测指标趋势预测主要包括应力、加速度、倾角、位移、沉降、裂缝以及变形等监测项目，当监测指标超出设置的预警值时即进行报警，提醒管理部门进行维护管理。

对监测系统实时数据进行预警分析，判断结构是否发生了过大的反应，为管理部门决策提供及时参考，具有非常重大的意义。因此，在线监测系统中建立一个阈值预警报警系统。该系统主要对关键部位的应力、加速度、倾角、位移、沉降、裂缝以及变形等监测指标的异常提供预警及报警信号，以便引起管理者重视，并为其它系统进行工作提供相应依据。

报警从系统实时接受数据开始就能进行分级报警。根据设置的超限阈值，判断传感器监测传输来的数据，如果超限，就实施报警，并触发紧急事件措施，监测数据存入超值域事件数据库，以便进行运营安全状况的评判。预警报警系统如下图所示：



图 3 预警报警系统图

7.5、监测点布置

7.5.1 观测仪器布置情况

根据 XX 水库地质情况和工程布置，设计选择了 10#、22#和 42#坝段作为内部观测仪器布设与观测基面：10#坝段为挡水坝段，坝高 80.0m，位于左岸河床内；22#坝段为溢流坝段，坝高 71.2m，坝基下有 F8 断层通过，地质构造复杂；42#坝段为挡水坝段，又为河床和右岸的转弯坝段，坝高为 64.0m。以上三个观测面构造在各坝段中心线上。

7.5.2 应力、应变观测

在 10#观测基面内 190.5m 高程截面上下游方向布置 5 组应变计，每组 5 支 TY-25 型贴片式应变计，1 支无应力计布置距应变计组 1.5m。经观测结果看，此仪器产品不够可靠，波动太大，分析困难。

为了解基岩应变情况，在 10#、22#基面内沿上下游各布置 3 支单向应变计，42#基面内设 2 支应变计，应变计均为 DI-25B 型。

为了解坝趾混凝土应力，在 10#和 22#坝趾处各有 2 支 WL-60 型应力计，分垂直和水平方向埋设。

7.5.3 温度观测

由于内部观测仪器均具有测温功能，故有这类仪器处没设温度计，所以三个坝段温度计数量为 10#基面 52 支，22#基面 45# 支，42#基面 31 支，气温温度计 9 支，共计 137 支。

7.5.4 渗压观测

渗压观测包括坝体砼测压观测和 F8 断层渗压观测

坝体渗压观测仪器布设在 10#基面 201.0m 和 220.5m 基面内，共 13 支 SZ-4 型渗压计。

F8 断层渗压观测仪器分别埋设在 23#和 24#坝段内，采用 185mm 钻孔，渗压计埋设在 F8 断层破碎带内，23#坝段 2 支渗压计设在帷幕前为 SZ-8 型，24#坝段 2 支渗压计设在帷幕后为 SZ-4 型。

7.5.5 裂缝观测

为了解坝趾混凝土与基岩结合情况，分别在三个基面坝趾各布设 2 支裂缝计。1#-4#坝段坝基较陡，坝基需要进行接触灌浆，为决定灌浆时间和测定混凝土与坝基是否开裂，在 1#-4#坝段分别布设了 1 支、2 支、2 支和 3 支裂缝计，裂缝计由 CF-5 型裂缝计改装而成。

8、监测系统主要设备技术要求

1. 光纤光栅表面安装式应变传感器



图 3-1 低温敏型光纤光栅应变传感器

低温敏型光纤光栅传感器具有其独特的优点：

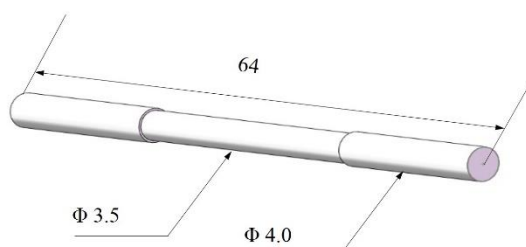
- （1） 传感器体积小、重量轻、外形可变，适合埋入大型结构中，可测量结构内部的应力、应变及结构损伤等，稳定性好，可重复使用；
- （2） 与光纤之间存在天然的兼容性，易与光纤连接，光谱特性好，低损耗、可靠性高；
- （3） 具有绝缘性，不影响待测结构，同时具有抗腐蚀、抗电磁干扰的特点，适合在恶劣环境中工作；
- （4） 一根光纤可以串联多个光纤光栅传感器，由其构成传感阵列，与波分复用和时分复用系统相结合，实现分布式测量；
- （5） 传感器灵敏度高、分辨率大。
- （6） 低温敏型传感器几乎不受温度影响。

其主要参数指标如表A.2所示

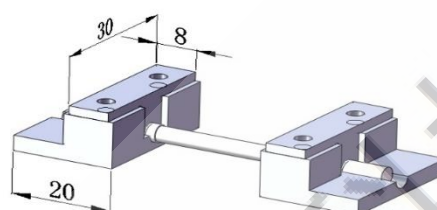
表A.2 低温敏型光纤光栅应变传感器主要技术指标

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	-50~120

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（Φ3mm）
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

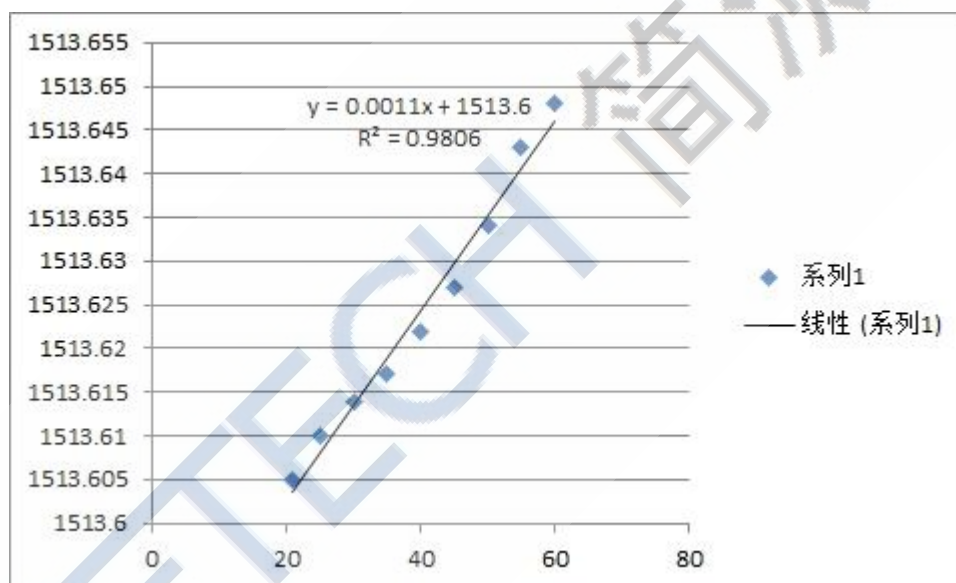


光纤光栅应变传感器



传感器安装支座

图3-2 光纤光栅传感器封装形式及传感器安装支座



数据可以看出温度每变化1℃，传感器波长变化大概在1pm左右，按照我国室外温度环境范围-50~70℃来计算，120的范围波长变化仅为0.12nm，完全满足实际应用需求

2. 光纤光栅温度传感器

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 A.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℃~+180℃	-30℃~+180℃
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

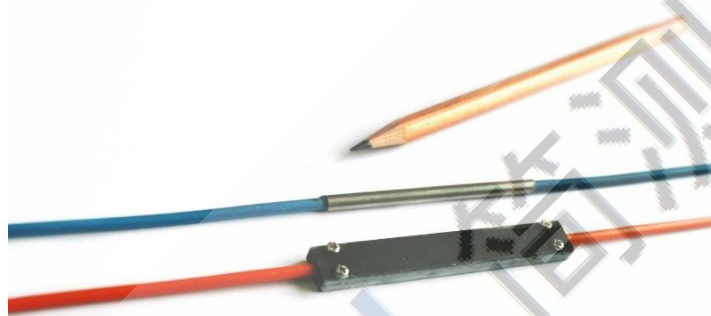


图 3-3 光纤光栅温度传感器

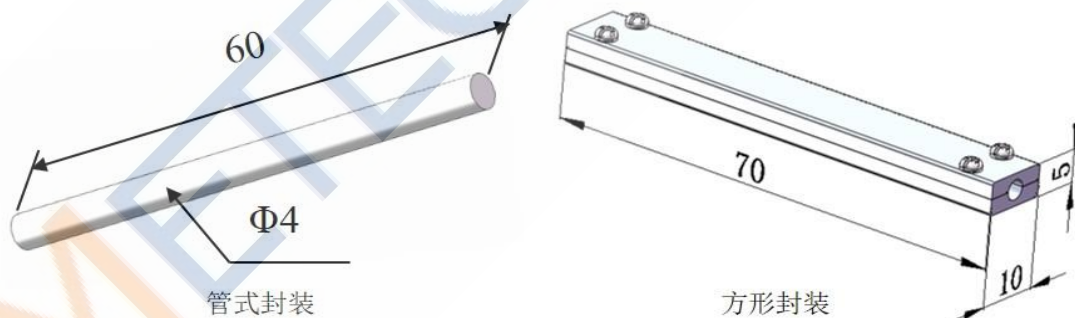


图 3-4 光纤光栅温度传感器封装形式

3. 加速度传感器

振动监测系统对象是振动信号，采用加速度传感器进行振动信号采集。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：

A.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3-5 压电式三向加速度传感器

4. 光纤光栅位移传感器

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其他材料对传感器应变传递的影响；通过调节封装工艺中的参数，可以改变传感器的位移量。

光纤光栅位移传感器

1. 基坑、边坡滑移、地基沉降监测；
2. 桥梁伸缩缝、阻尼器伸缩位移监测；
3. 隧道沉降测量
4. 接触位移测量；
5. 大坝位移测量；
6. 土木水利工程中的混凝土结构内部及表面长期裂缝测量；



产品详情

光纤光栅 位移传感器

用于测量各种结构间的相对位移，也可用于实时监测裂缝的张开与闭合，适用于各种隧道管片接缝、水坝坝体位移、土壤沉降、岩石、山体、边坡监测等。安装时将传感器和探头分别固定在移动物体和参考物体上。既可以作长期监测，又可以作短期监测。该传感器可以重复使用。具有精度高、灵敏度高、寿命长等优点，可方便地与其他光纤光栅传感器一起组成全光监测网。



1. 无弹簧工作机制，有效解决无损耗应变传递机制
2. 可根据工程需求灵活定制量程、分辨率和规格尺寸；
3. 用于工程结构表面安装时可重复利用；
4. 通过传感器支座可焊接或胶粘接在工程结构表面；
5. 可根据工程需求灵活定制不同形状的传感器支座。

参数指标：

光纤光栅位移传感器	
量程	0-100mm
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）
连接方式	熔接或 FC/APC 接头

5. 传感信号综合同步解调仪

JEME-iX-eX 系列产品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(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。

光纤光栅采集模块用于测量光纤光栅（FBG）传感器信号，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）。

电类传感解调模块用于测量基于电压、电流、桥式电路、IEPE(压电)等类型的传感器信号，支持多通道通道的同步采集。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。



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	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℃
外型尺寸	250×320×185mm（15、24 通道）； 250×300×100mm（4、6、8 通道）

6、监测系统软件

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。

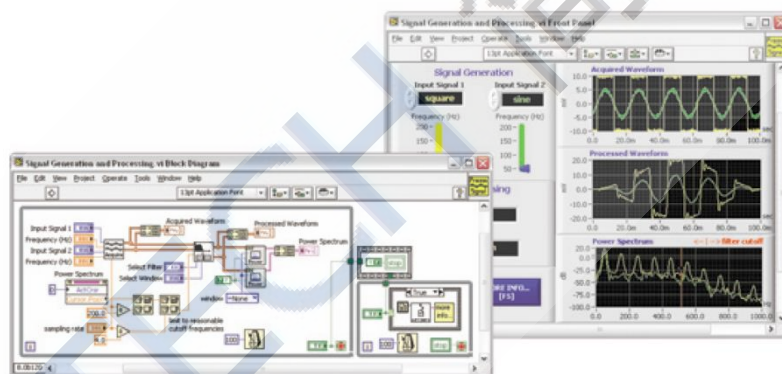


图7-1 NI LabVIEW图形化界面

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7-2所示，LabVIEW与许多硬件平台都实现了完美的无缝对接。

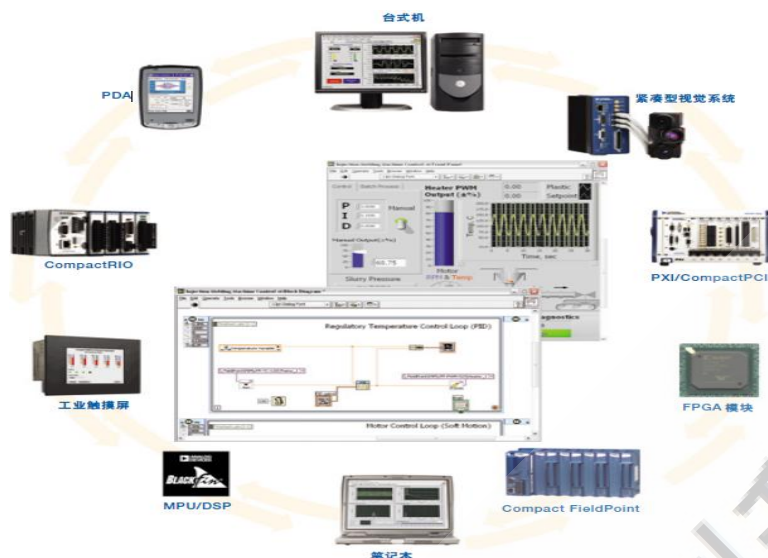


图7-2 NI LabVIEW硬件兼容平台

监测系统功能

多信号实时同步显示

该系统实时同步采集并显示多种类型传感器信号，包括光纤光栅应变传感器信号、光纤光栅温度传感器信号以及加速度传感器信号，随时调用目标传感器，在上位机中同时同步显示三种信号。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、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7-3所示。



图7-3 监测系统界面

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7-4所示。



图7-4 系统数据存储设置

数据自动存储功能

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7-5所示），保证了重要报警信息的及时性。



图7-5 系统报警机制

9、质量控制

9.1 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。

9.2 保证措施

(1) 混凝土、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。

10、 安全控制

10.1 主要安全风险分析

- (1) 监测施工过程存在的安全隐患
- (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。

10.2 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。

10.3 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。