

# FAST 健康监测数据采集系统开发研究

范 峰,王化杰,钱宏亮,金晓飞,陈 明,沈世钊

(哈尔滨工业大学 土木工程学院,哈尔滨 150090, huajie\_wang@163.com)

**摘 要:**对 500 m 口径大射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope,简称 FAST)健康监测系统基础组成部分—FAST 健康监测数据采集系统进行开发研究.分析了 FAST 传感器选型影响因素,结合传感器自身适用标准进行具体选型,完成了基于所选传感器的硬件系统设计,运用 Labview 平台开发了与 FAST 监测系统相适应的采集软件系统,形成一套完整的基于虚拟仪器技术的 FAST 健康监测数据采集系统. FAST 30 m 模型试验是 FAST 建设过程中的关键步骤,通过在模型试验中的成功应用,表明该系统可为将来 FAST 健康监测系统的完善提供重要支撑条件.

**关键词:**FAST 30 m 模型;健康监测;数据采集系统;Labview

中图分类号: TP274 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2010)08-1177-06

## Exploitation and research of data acquisition system of health monitoring system for FAST

FAN Feng, WANG Hua-jie, QIAN Hong-liang, JIN Xiao-fei, CHEN Ming, SHEN Shi-zhao

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, huajie\_wang@163.com)

**Abstract:** As a basic part of the health monitoring system of five-hundred-meter aperture spherical telescope (FAST), the data acquisition system was researched in the paper. The sensors used for FAST were chosen considering the antologous characters of the sensors, and a hardware system was designed based on the chosen sensors. A software system for FAST was developed using the Labview software, so a data acquisition system based on virtual instrument technology was established. Successfully application of the data acquisition system during the experiment on the FAST 30 m-model, which is an important step of FAST, affirms its support for the health monitoring system of FAST.

**Key words:** FAST 30 m-model; ealth monitoring; data acquisition system; Labview

2007年8月,500 m口径射电望远镜FAST(见图1(a))作为“十一五重大科学工程”正式获得国家立项批准,进入了工程设计和建造阶段. FAST反射面采用整体索网结构(见图1(b)),面积相当于30个足球场地大小,建成后将是世界上最大的单天线射电望远镜<sup>[1-2]</sup>. FAST工作时,反射面精度要求 $RMS \leq 5$  mm,需要索网反复运动,易产生松弛、疲劳、破损等现象,且结构建造在喀

斯特洼地当中,周围环境恶劣.因此,无论从FAST的重要性还是从其工作特点来说都要求一套完整的健康监测系统对其建造过程和运行状况进行监测.

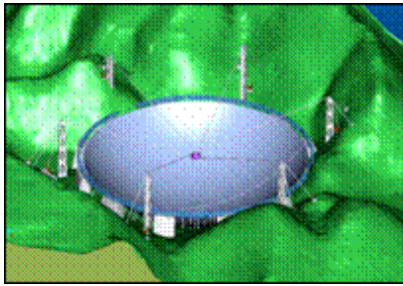
数据采集系统是整个健康监测系统的基础,为整个健康监测系统提供原始数据,采集到的数据质量直接关系到健康监测的成功与否.而传统数据采集系统的规模和分析功能不能完全满足FAST这种特殊结构的需要.因此,如何为FAST设计出一套与其自身特点相适应的高效率,高性能的数据采集系统是FAST健康监测成功实现的关键问题.为了给FAST健康监测系统提供支持,本文对FAST健康监测数据采集系统进行了设计研究.

收稿日期: 2008-08-18.

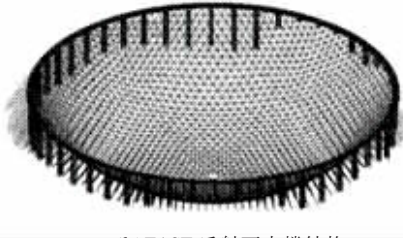
基金项目: 国家自然科学基金跨学科交叉重点项目(10435020);  
国家“十一五”科技支撑项目(2006BAJ01B02).

作者简介: 范 峰(1971—),男,教授,博士生导师;

沈世钊(1933—),男,教授,中国工程院院士.



(a)FAST 射电望远镜



(b)FAST 反射面支撑结构

图 1 FAST 射电望远镜

### 1 系统研究

结合 FAST 特点,主要采用先进的虚拟仪器技术对 FAST 数据采集系统进行了设计,相对于传统的数据采集系统,FAST 健康监测数据采集系统主要有以下特点:

- 1) 集成了电信号数据采集、光信号数据采集和激光照相等多种采集测量手段,实现了多种监测数据的合理采集;
- 2) 结合 FAST 监测内容,开发了具有相关数据分析处理功能的专用数据采集软件系统,提高了系统工作效率;
- 3) 根据 FAST 健康监测系统的需要,结合监测内容,开发了相应的实时预警功能。

系统分为 3 部分:传感器系统,采集硬件系统,采集软件系统.系统的总体框图如图 2 所示。

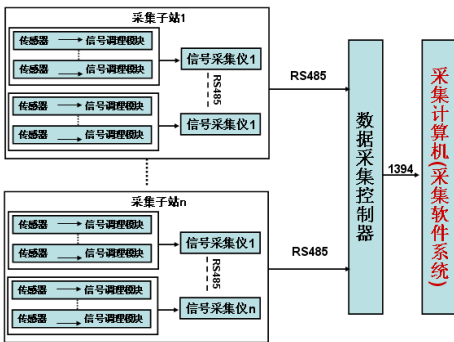


图 2 数据采集系统总体框图

#### 1.1 传感器系统

FAST 传感器的选型主要考虑以下因素:先进性原则;简洁实用、可靠性原则;耐久性原则;可维

护、可扩展原则;精度适中<sup>[3-4]</sup>。

FAST 健康监测系统对环境荷载和结构响应两大部分进行监测.环境荷载主要包括风荷载和温度荷载两项,结构响应主要为索应力、节点位移和加速度 3 项.其传感器选型如下:

1) 风荷载.要求传感器能监测到风速、风向、可以测量脉动风,进行风谱分析,按照当地风环境资料确定传感器精度和量程(年平均风速为 1.5 m/s,极限风速为 12 m/s),考虑室外工作环境,宜选择三维超声风向风速仪(图 3(a)).

2) 温度.要求传感器能绝对测量,根据当地历史最低温度和最高温度确定传感器量程(最低温度 -7 ℃,最高气温 38.1 ℃),考虑精度和长期稳定性等因素,初步选定铂电阻温度传感器(图 3(b))和光纤光栅温度传感器(图 3(c)).其中光纤光栅温度传感器较铂电阻温度传感器稳定性好,抗电磁干扰能力强,但是价格相对昂贵<sup>[5]</sup>。

3) 索应力.要求传感器能绝对测量、满足精度要求、最大量程与索的极限内力相同或略高.通过对不同原理索力测量方法的研究,最终确定通过测量索应变来实现索力测量,如采用特制焊接式自补偿应变计(图 3(d))或光纤光栅应变传感器(图 3(e)),普通电阻应变片适合短期施工的测量,而特制焊接式自补偿应变计和光纤光栅应变传感器则克服了普通电阻应变片的耐久性差、需要设置补偿、不适合长期监测的缺点,可作为长期监测的手段,在此基础上通过索测力仪(图 3(f))进行局部测量对采集数据加以校核。

4) 节点位移.要求能监测空间绝对坐标,FAST 反射面有 2000 多个节点,测量目标数目巨大,测量效率是节点位移监测的关键问题,经过调研,可考虑采用多台数码照相测量仪结合旋转平台对反射面进行分区划带测量,以解决节点位移测量效率问题.FAST 30m 模型暂时选用激光全站仪对节点位移进行监测(图 3(g)).

5) 加速度.需要根据索网结构动态响应来确定加速度传感器的精度、量程(一般为监测对象的 2~3 倍)和轴向(单轴、双轴和三轴);通过对现有 FAST 有限元模型进行模态分析可知其前 100 阶频率变化为 3.165~17.564 Hz,分布密集,节点振动为空间三向振动;由于索网轻,质量小,要求加速度传感器的质量对结构不产生附加影响或影响最小,安装加速度传感器的节点空间较小,因此要求传感器除了满足精度、量程、灵敏度,耐久性等因素外还要求传感器具有轻质、小体积的特点,通过调研可选用 DH301 电容式三向加速度传感器(图 3(h)).

### 1.2 采集硬件系统

根据选定的传感器,进行相应硬件系统设计.根据采样速率的不同将采集硬件系统划分为动态和静态两大部分.

#### 1.2.1 动态信号采集硬件系统的设计

风速仪、加速度传感器采集的信号随时间变化较快为动态信号,需要硬件系统具有较高的采样频率,所以对动态信号硬件系统的选择首先要

考虑采样速率,根据测点数量来确定硬件系统的通道数量,综合考虑硬件系统的精度、量程、总线类型、性价比等因素来最终确定.硬件系统还要根据传感器传来的信号类型进行适当的信号调理,对模拟信号的采集主要有采集箱和采集卡两大产品类型,由表 1 可知采集箱更适用于 FAST 结构,如本系统采用的 DH5920 动态信号采集仪(图 4(a))等.

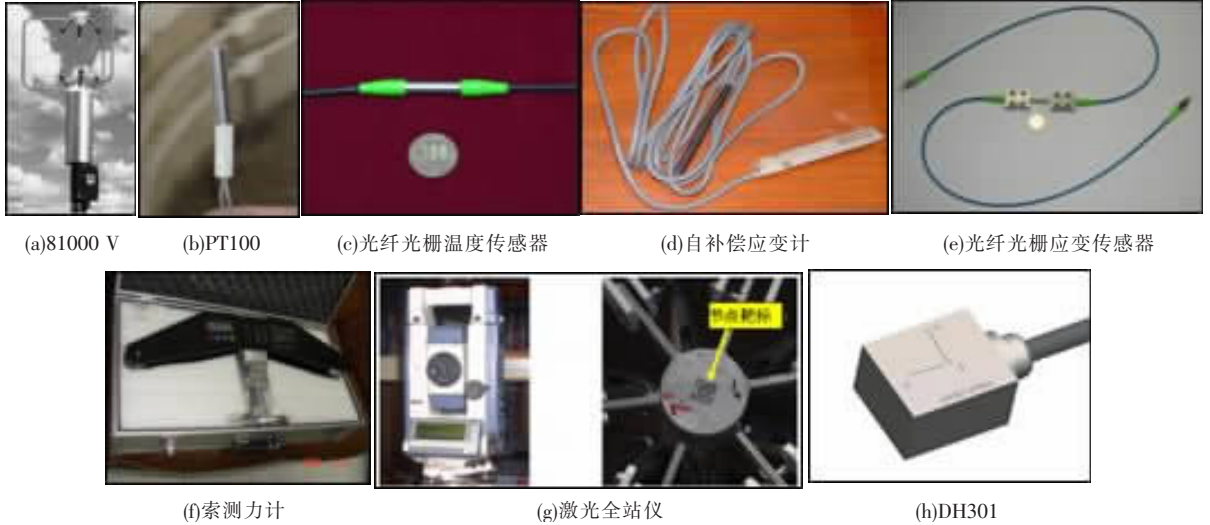


图 3 数据采集系统采用的传感器

表 1 采集箱与采集卡对照表

对比指标	采集箱	采集卡
通道数	较多	较少
扩展空间	较大	较小
稳定性	较好	一般
价格	较贵	便宜

#### 1.2.2 静态信号采集硬件系统的设计

温度传感器、应变传感器采集的信号随时间变化缓慢为静态信号,静态采集硬件系统的设计与动态类似,需要对模拟信号进行适当的调理,综合考虑系统的通道数量、精度、量程、总线类型、性

价比等因素来确定,二者最大的区别是静态信号对采集硬件的采样频率要求较低.铂电阻温度传感器和电阻应变片采集来的信号为普通的电信号,硬件系统可以选用合适的静态数据采集箱,如 DH3816 静态采集仪(图 4(b))等.而光纤光栅传感器采集来的信号为光信号,需要光纤光栅解调仪对其信号进行转换和采集,解调仪的选择原则跟采集箱的选用原则相似,都是根据信号的特征来确定解调仪的各项指标,本系统选用的是 MOI 公司的生产的 SI425 型解调仪(图 4(c)).

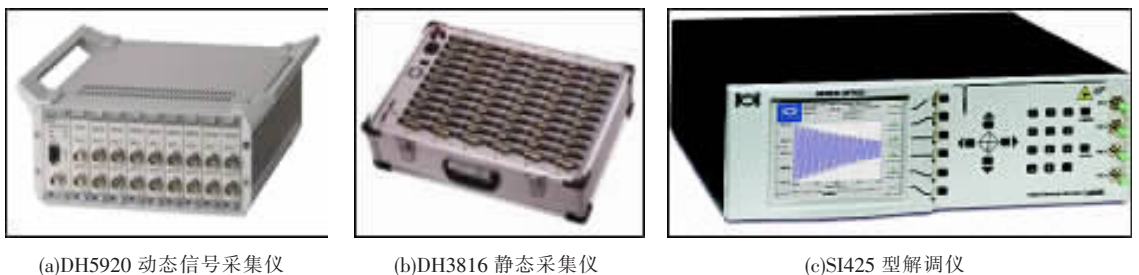


图 4 采集硬件

### 1.3 采集软件系统

软件是虚拟仪器技术的关键,合适的软件系统可以最大限度发挥系统的性能.FAST 有其自身的结构特点,传统采集系统自带的采集软件并不

能完全满足它的功能要求,且很多功能并不需要,不具有针对性,效率低下,成本较高.因此需要针对 FAST 自身特点开发出一套合适的高效率采集软件系统.

### 1.3.1 系统功能与界面设计

数据采集软件系统的开发语言或平台有很多,本系统采用的 Labview 开发平台是世界上第一个图形化编程语言,是应用最广的数据采集和控制开发环境之一. 主要具有以下优点<sup>[6]</sup>: 编程效率高; 测试系统完整; 运用比较成熟. 本套系统就以 Labview 为开发平台,对采集软件系统进行开发设计.

FAST 数据采集软件系统要实现以下功能:

- ①原始数据的初步分析及转换;
- ②数据的实时显示;
- ③动态数据频域内的实时分析显示;
- ④良好的预警系统;
- ⑤数据的实时存储;
- ⑥硬件参数设置和控制.

静态数据更新较慢,可以将采集的数据定期进行读取分析,所以实际上是一个对存储后数据分析处理的过程,而对于动态数据,随时间变化较快,需要实时的在线监测,是一个数据分析处理与存储并行的过程,下面就结合监测内容对软件系统的相关功能进行了设计.

1) 温度. 铂电阻温度传感器传来的数据就是温度数据,只需将采集后的数据直接读取显示,通过运算得到其统计值,便可直观的观察出结构的温度状况. 然而对于光纤光栅传感器,则需要通过软件系统换算得到温度值之后再行显示、统计、分析.

数据换算在软件系统中可以通过 Formula Node 公式节点来实现. 软件界面如图 5(a)所示.

2) 索应力. 对于应变传感器传来的应变值,通过软件换算为索的应力,然后再进行显示、统计、分析,对于索测力仪测得的数据,也要除以相应的索面积换算为索应力,二者都可以通过在程序面板上直接作运算编程来实现. 软件界面如图 5(b)所示.

3) 节点位移. 系统测得的是光学靶标的空间坐标,在软件系统中要将其转化为节点坐标,然后再与理论值比较,计算其径向偏差和切向偏差. 通过对径向偏差和切向偏差的统计分析,来判断和监测反射面是否达到工作精度要求,张拉是否到位,所有节点转换和运算都可以通过在 Formula Node 公式节点中编程来实现. 软件界面如图 5(c)所示.

4) 加速度. 动态信号首先要进行数字滤波,在软件系统中通过一个带通滤波器来实现,对处理后的数据,要进行时域内的显示分析,通过一个选择结构和 Mask and Limit Testing. vi 来实现系统的预警功能. 并对时域的数据进行 FFT 变换,得到频域数据,直观的观测动态信号,通过 Mask and Limit Testing 节点来设置预警线,将预警判断结果通过 Roud Led 以预警灯和 Snd Play Wave File 以预警声音的形式表达出来,同时进行数据存储. 软件界面如图 5(d)所示.

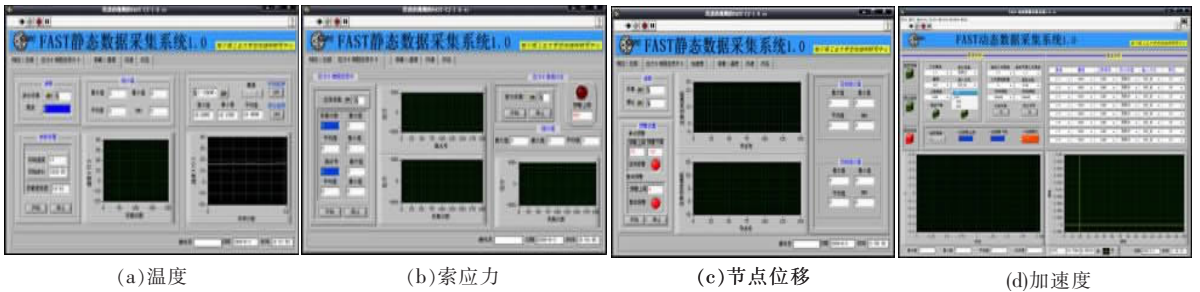


图 5 采集软件系统界面

### 1.3.2 接口调用

对于动态采集,需要实时的读取分析硬件系统采集来的数据,二者是同步工作,软件系统与硬件系统之间还需要做相应的接口程序. FAST 采集软件系统与硬件系统的接口调用考虑了两种方案.

1) 基于 acivex 控件的调用方式: 只需调用控件,直接调用 C 语言开发的硬件控制界面,无需参数设置,方便简单,但是界面及参数的设定依赖于 C 语言,灵活性差.

2) 基于 .dll 动态连接库技术的软件与硬件的接口调用<sup>[7]</sup>: 可以在 Labview 编制的软件系统中

自行进行参数设置,设定硬件的相关信息,相对与控件的方式比较烦琐,但是界面及参数设定比较灵活、可变.

两种接口调用方案都要解决以下两个基本问题:

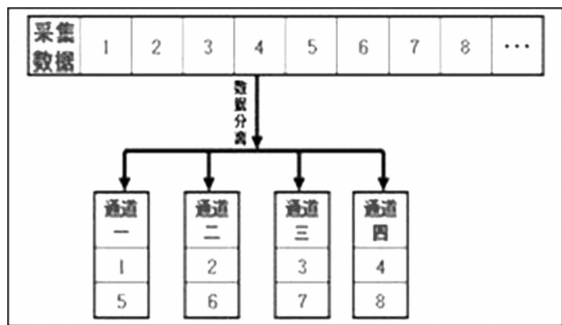
1) 采样和读取的速度问题. 对于硬件采集来的数据,需要通过指针在内存中划分指定区域作为缓存,用来暂时存放得到的数据,软件分析程序则不断的从缓存中将数据取走进行分析,通过循环程序实现对缓存数据的不断读取,缓存区间的大小  $A$ 、读取的速率  $f_r$ 、与采样频率  $f$ 、通道个数  $n$

之间要满足

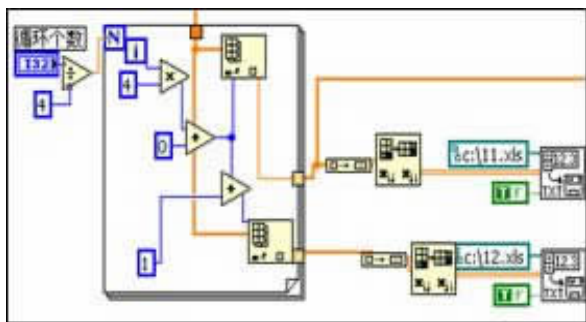
$$f \times n \leq f_s \leq A.$$

否则会造成内存不足出现数据堆积覆盖现象,或者数据不足出现数据重复多零的可能。同时为了满足快速傅里叶 FFT 的计算要求,还要对读取的数据进行判断,判断其是否满足 2 的整数次幂(本程序以 1024 个点为依据进行频域分析),如果满足则进行 FFT 变换分析,如果不足则通过 LABVIEW 中的位移寄存器将数据传递到下次循环,与新取得数据一起进行判断直至满足要求为止。

2)多通道数据分离问题。硬件采集得的数据为多通道数据,未进行分离,在软件系统中需要通过循环运算对数据进行分离,使各通道的信号得以还原(图 6)。



(a)分离原理



(b)数据分离程序流

图 6 数据分离

在解决以上两个问题的基础上,系统最终采用方案二,即运用 Labview 中 Call Library Function 结点函数对动态链接库文件进行调用,实现了软硬件的协同工作,并进行了联机测试:运用本套系统对正弦信号发生器生成的信号进行采集,实现了预期目标,接口调用成功。

## 2 系统应用

### 2.1 FAST 30m 模型索网变位试验简介

FAST 30m 模型是 FAST 原型结构的缩尺模型(图 7),其索网变位试验是根据理论分析的结果,通过促动器对下拉索进行张拉,调整反射面节

点位置,实现中心、正北、正西和西南 4 种抛物面状态的变位,将变位结果与理论结果相比较,考察变位效果,从而验证索网结构的可行性<sup>[8-9]</sup>。

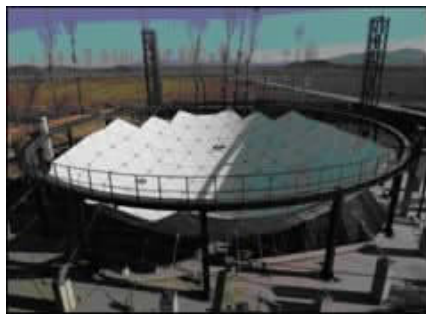


图 7 FAST 30m 模型

FAST 30m 模型索网变位试验的监测可以对系统的适用性、可靠性进行很好的验证。

### 2.2 系统应用及结果处理

在试验中,FAST 健康监测数据采集系统完成了以下工作:

1)对短期内 FAST 反射面不同部位不均匀温度场分布进行监测。根据不均匀温度场分析结果<sup>[10]</sup>,对 FAST 30m 模型选取 7 个温度变化梯度较大的位置布置温度传感器(图 8),运用本套数据采集系统对其进行监测,图 9(a)为通道一即东侧温度现场监测界面,图 9(b)为后期数据处理曲线,二者曲线一致,证明采集监控系统可以对采集数据进行实时准确分析。

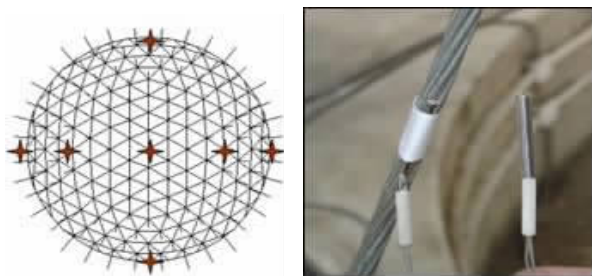
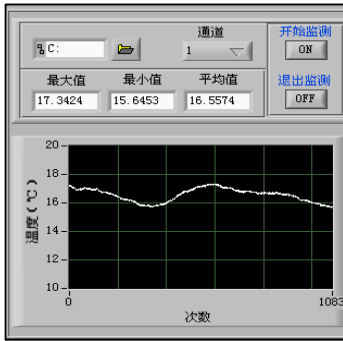


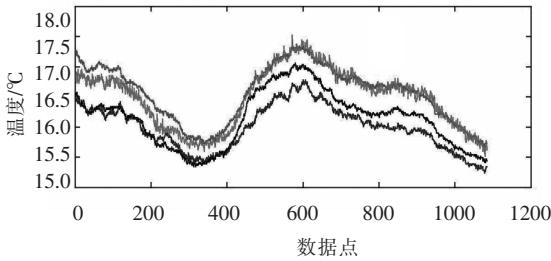
图 8 温度传感器安装布置

2)对节点坐标进行监测。通过静态数据采集软件系统对采集数据进行实时的分析和处理。以中心状态抛物面张拉为例,图 10 为后期 MATLAB 分析的位移图,从图中可以看出 124 点位移过大,图 11 为现场监测界面,可以看出,索网 124 点偏差过大,超过系统预警红线,与 MATLAB 分析结果吻合,现场系统发出预警,经核查发现 124 点促动器位移施加方向出现问题,从而证明采集监控系统能在第一时间发现问题,系统的实时显示与预警功能满足要求;后期数据统计分析表明,中心部位张拉时,实测抛物面与理论抛物面节点最大径向偏差 39.3 mm、平均值 4.6 mm、整体径向偏差 RMS 值 6.9 mm,最大切向偏差 89.1 mm、平均

值 6.2 mm、整体切向偏差 RMS 值 9.6 mm，与现场实时分析的数据统计值(图 11)完全吻合，证明了系统实时分析功能的可靠性。

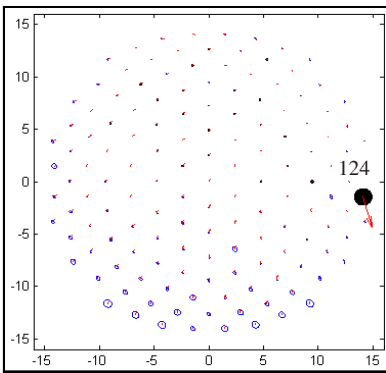


(a)现场监测曲线图



(b)后期数据处理曲线

图 9 温度数据处理比较



注:图中圆圈大小代表径向偏差大小,实心圆为正值(偏离球心,索网曲面外),空心圆为负值(偏向球心,索网曲面内)。

图 10 数据处理位移图

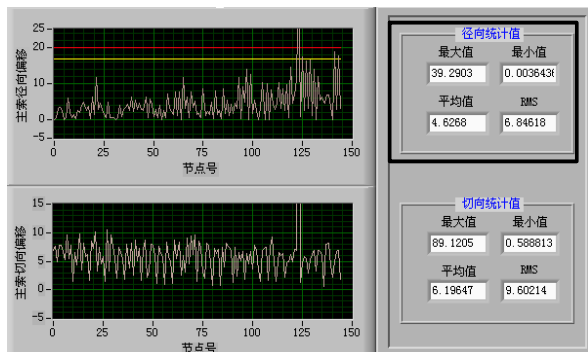


图 11 节点位移数据监测界面

### 3 结 论

1)结合相关的选型原则及 FAST 健康监测数据采集系统特点,进行了传感器及采集硬件的优化选型,选型过程合理,满足系统需要。

2)运用 Labview 平台对软件系统进行了功能开发和界面设计,并开发了相关接口调用程序,实现了软硬件系统的协同工作。

3)实验表明,本套系统操作灵活,功能完备,能够满足 FAST 健康监测数据采集的需要。

### 参考文献:

- [1] 钱宏亮,范峰,沈世钊,等. FAST 反射面支承结构整体索网方案研究[J]. 土木工程学报,2005,38(12): 18-23.
- [2] FAN Feng, QIAN Hongliang, SHEN Shizhao, et al. The Cable - Net Structure for Supporting the Reflector of FAST [C]//Proceedings of IASS - APCS Symposium. Beijing, China: IASS, 2006:136-137.
- [3] 李惠,欧进萍. 斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现(I):系统设计[J]. 土木工程学报,2006,39(4): 39-44.
- [4] 周文松,李惠,欧进萍,等. 大型桥梁健康监测系统的信息采集子系统设计方法[J]. 公路交通科技,2006, 23(3):83-87.
- [5] 周智. 土木工程结构光纤光栅智能传感元件及其监测系统[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2003.
- [6] 邓炎. Labview7.1 测试技术与仪器应用[M]. 北京:机械工业出版社.,2005.
- [7] 陈敏,汤晓安. Labview 的虚拟仪器数据接口设计与实现[J]. 中国测试技术,2004,30(5):52-54.
- [8] 金晓飞. FAST 50 米模型健康监测系统设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [9] 金晓飞,钱宏亮,范峰,等. FAST 50 米模型整体索网张拉方案研究[J]. 空间结构,2007,13(2):22-25.
- [10] 金晓飞,范峰,沈世钊. 巨型射电望远镜(FAST)反射面支承结构日照温度场效应分析[J]. 土木工程学报,2008,41(11):71-7.

(编辑 赵丽莹)