

# 基于核电管道评估系统的硬件与故障诊断设计

蒋兆翔, 何攀, 刘才学, 王瑶, 陈祖洋

(中国核动力研究设计院, 成都 610041)

**摘要:** 以核电管道评估系统为对象, 对其核心部分硬件系统的故障诊断与控制设计进行了研究; 利用程控放大、幻象供电、故障诊断等电路设计了硬件调理模块; 通过 Keil 软件对 STM32 芯片嵌入式软件编程的方式实现了硬件系统的控制与故障诊断功能, 并由设计的串口通信协议经 RS232 与软件系统通讯; 通过 LabVIEW 软件开发了硬件自动化测试平台和故障诊断监测程序, 保证硬件系统可靠性的同时提升了测试效率并减少了人力成本; 设计的硬件控制与故障诊断模块满足要求, 已成功应用在出口国外某核电厂的管道评估系统中, 为核电厂安全经济可靠地运行提供了保障。

**关键词:** 核电管道评估系统; 硬件调理控制; 自动化测试平台; STM32; 故障诊断

## Design of Hardware and Fault Diagnosis Based on Nuclear Pipeline Evaluation System

Jiang Zhaoxiang, He Pan, Liu Caixue, Wang Yao, Chen Zuyang

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Based on nuclear pipeline evaluation system, the fault diagnosis and control design of the core hardware system is studied. The hardware conditioning module is designed by means of program-controlled amplification, phantom power supply, fault diagnosis and other circuits. The hardware system control and fault diagnosis function are realized by Keil software programming STM32 chip embedded software, and use the designed serial communication protocol communicating with the software system through RS232. The hardware automatic test platform and fault diagnosis monitoring program are developed through LabVIEW software to ensure system reliability, improve test efficiency and reduce labor cost. The designed hardware control and fault diagnosis module meets the requirements and has been successfully applied in the pipeline evaluation system of a certain nuclear power plant exported to other countries, providing guarantee for the safe, economical and reliable operation of the nuclear power plant.

**Keywords:** nuclear pipeline evaluation system; hardware conditioning and control; automatic test platform; STM32; fault diagnosis

## 0 引言

核电作为一种清洁、低碳、环保的能源, 能帮助能源结构合理转型, 在 21 世纪以来高速发展。为了保证核电站的安全性和可靠性, 核电站通常设置一系列的装置和措施来保障运行。管道是核反应堆一回路的核部件, 作为冷却剂循环传递热能的通道, 犹如反应堆的血管, 其密封性能直接关系到核反应堆的安全<sup>[1]</sup>。

二代核电通常在管道破裂后采取应急保护的安全措施, 比如失水后的堆芯快速冷却等待, 需要消耗巨大的人力物力成本, 但其并无法阻止事件的发生, 核电的发展可能因此而停滞。三代核电作为中核“华龙一号”的先进核电, 采用预先防护故障诊断的方式, 通过多种监测系统运用信

号处理的方式智能化、远程化地监控反应堆的实时运行状态, 削弱了类似管道破裂后的保护性装置的搭建, 节约了建设成本, 同时发生事故的概率降低到  $10^{-7}$ , 核电站的安全性也达到了新的量级<sup>[2]</sup>。

核电管道评估系统, 通过破前漏监测作为核电的保护措施, 在管道早期发生冷却剂微小泄漏时便能及时发现, 以便核电工作人员采取安全措施避免反应堆发生 LOCA 失水事故, 防止放射性介质的外漏造成环境影响, 对核电站的安全提示有重要作用。系统同时能对冷却剂的泄漏进行定位定量, 为核电站的管道状态评估和检修提供技术支持。

核电故障诊断监测系统设计要求中使用期限通常大于 10 年, 反应堆正常运行时由于数目众多通常不会有专人去维护, 为了该设备在核电厂长期稳定与可靠地运行, 硬件系统的故障诊断实时监测与控制设计至关重要, 若系统出现故障, 需要能及时故障报警输出, 通知工作人员采取措施进行查看处理。本文以核电管道评估系统为对象, 研制了一套具有故障诊断功能的硬件控制与调理系统并搭建了其匹配的自动化测试平台, 对其故障诊断和信号处理进行了测试分析, 保障了整个系统长期稳定可靠地运行于反应堆。

收稿日期: 2020-02-12; 修回日期: 2020-03-12。

**作者简介:** 蒋兆翔(1991-)男, 四川成都人, 工程师, 主要从事核电子技术应用与反应堆关键设备故障诊断与开发工作方向的研究。

何攀(1979-)男, 研究员, 主要从事反应堆故障诊断技术方向的研究。

刘才学(1967-)男, 研究员, 主要从事核电站故障监测与诊断技术研究及设备研发工作方向的研究。

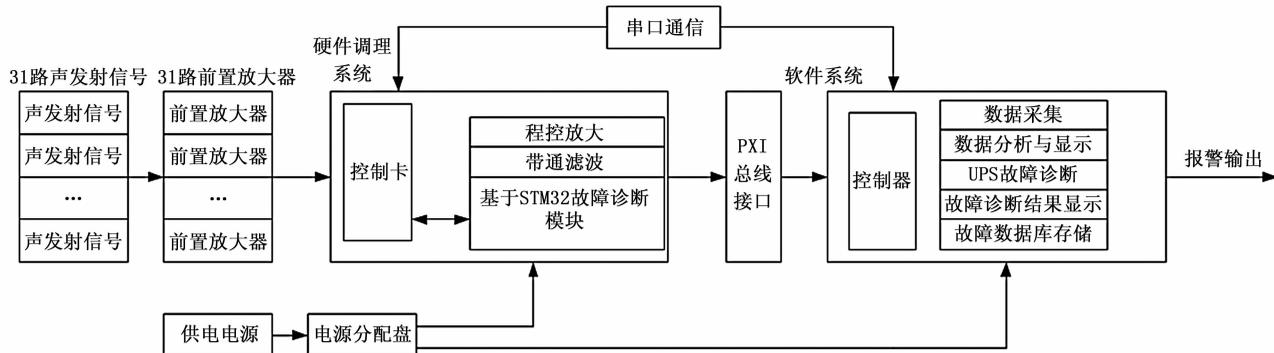


图 1 核电管道评估系统流程框图

## 1 系统原理与组成框架

### 1.1 系统原理

流体发生泄漏时由管道的管壁中激发出声发射信号,该声发射信号能描述材料结构的工况,是材料受外力或内力作用而产生变形或断裂时以应力波的形式释放能量的现象<sup>[3]</sup>。为了精确实时的采集波形信号,需要将前端信号做电气隔离、程控放大、带通滤波等信号处理,以消除背景干扰噪声信号对应力波信号的影响,提升系统的管道评估定位定量精度。

### 1.2 系统流程框架

图 1 所示为核电管道评估系统流程框图,31 个声发射传感器安装在一回路主管道和波动管的各个位置上监听声发射信号并将其转换为微电压信号,前置放大器将原始信号放大经贯穿件传输后送入电气厂房的硬件调理系统。硬件调理系统一方面对信号进行调理,另一方面通过基于 STM32 的故障诊断嵌入式程序对管道评估系统的运行状况实时监测,通过串口通信的方式与软件通信交互,由故障报警系统输出至主控室。调理后的数据由软件系统进行算法甄别并输出至报警系统中。

硬件系统由 1 个控制模块和 8 个调理模块。控制模块和调理模块通过机箱 PXI 总线连接,与软件系统的控制器通过串口通信的方式连接,以传输调理模块故障诊断的结果、接收软件系统的程控指令等。除控制器外,软件系统还配置了 8 张采集模块、1 张信号发生器卡用于调理后信号的数据采集分析与管道评估的计算,并输出至泄漏报警系统中。本文着重对系统核心部分的硬件调理控制与故障诊断做研究。

## 2 硬件设计

硬件系统由控制模块和调理模块组成。控制模块功能相对单一,为调理模块和软件系统控制器通讯接口。调理模块主要对管道的泄漏声发射信号进行模拟信号调理。

### 2.1 调理模块框架结构

调理模块硬件设计结构框图如图 2 所示。单张调理模块为 4 路信号调理,总共 8 张调理模块可处理 32 个通路的声发射信号。信号调理主要包括电气隔离、程控放大、带

通滤波等,其中程控放大倍数由 STM32 芯片控制。STM32 芯片为调理模块控制核心,故障诊断电路监测结果的控制处理、串口通信电路的转换与控制、板载自检信号的产生与输出都在软件嵌入式设计中处理。典型电路设计主要包括程控放大、幻象供电电路、故障诊断电路。

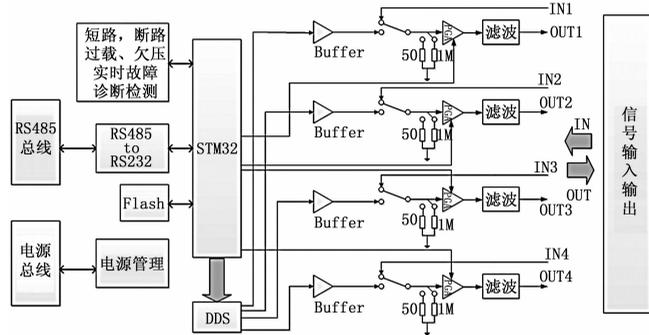


图 2 调理模块设计框图

### 2.2 信号调理设计

信号调理设计分为程控放大电路设计与带通滤波设计。

为了减小声发射信号传输距离过长导致信号衰减影响,程控放大电路是调理卡的重要组成部分,图 3 所示为硬件调理模块程控放大电路原理图,AD8066ARZ 为电压跟随器,用于增强电路的驱动能力,芯片 AD8021AR 和 ADG1209YRUZ 组成程控放大电路,如图 3。EN、A1、A0 为 STM32 程控输入端,分别用于支路的选择和 4 种放大倍数的选择控制。

根据运算放大器虚短和虚断的原理,可得  $R_x U_0 = (R_{83} + R_{84} + R_{86} + R_{90}) U_i$ , 其中 4 个电阻的值选择为 8.2 K $\Omega$ 、732  $\Omega$ 、91  $\Omega$ 、91  $\Omega$ , 这样选择的目的是阻值的相对误差要使放大倍数的偏差尽可能小。 $R_x$  为可变电阻,根据 A1、A0 的值程控变化,例如 A1A0 为 01 时,则  $R_x$  为  $R_{84} + R_{86} + R_{90} = 914 \Omega$ , 放大倍数约为 10 倍。

声发射信号有效范围为 50~200 kHz,放大信号后需要滤除频带之外的噪声和干扰。ADI 网页设计是一种有源滤波器设计的简洁高效的方法,输入滤波器阶数、频带范围、类型等参数后软件会自动生成电路原理图和元件参数,并对电路做幅频、相频特性分析。设计完成后采用仿真的测

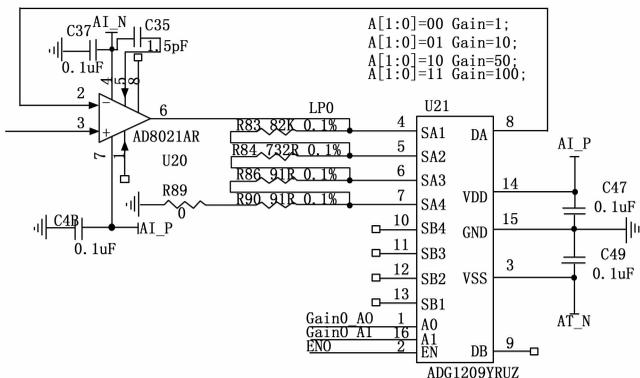


图 3 程控放大电路原理图

试方法循环优化滤波电路最终达到设计要求。

### 2.3 幻象供电电路设计

声发射信号经同轴电缆传输上百米后至二次仪表处理设备中, 信号在传输中会衰减, 量级最多只能达到微伏级别, 有效信息可能因为传输过程中混入的噪声受到改变, 影响后续泄漏算法的精度。因此, 传输过程中每个支路配置一个前置放大器至关重要。

前置放大器将声发射信号放大 40 dB, 且本身具备耐高温、抗辐照的特性, 但是其正常工作需要 +24 V 左右的供电电压, 供电由硬件系统每个调理模块提供。如图 4 所示为幻象供电的示意图, 前置放大器连接在 IN1 处, 一方面直流电压由输出至前置放大器, 另一方面交流信号进入调理信号卡, 由于前置放大器和调理系统的连接通过同轴电缆贯穿件传输至反应堆安全壳内的, 因此这种设计节约了一半布线的同时也节省了一半的贯穿件, 控制了核电管道评估系统的建设成本。

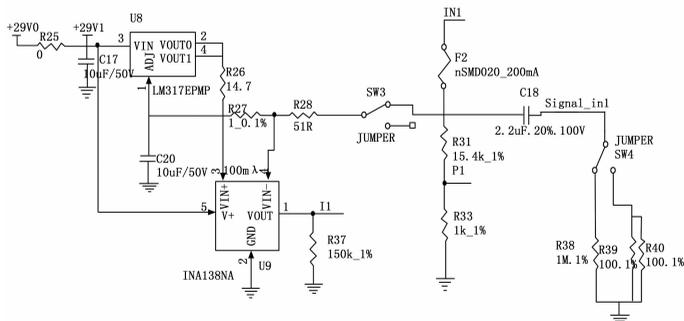


图 4 幻象供电及故障诊断监测电路原理图

## 3 故障诊断设计与实现

本部分主要包括故障诊断电路设计与嵌入式软件设计两部分。

### 3.1 故障诊断电路设计

故障诊断电路为系统的核心电路, 保障了本系统在核电站的长期稳定运行, 主要思路是利用模拟电路里的电流、电压等参数来获取调理系统的运行状态, 共有短路、断路、欠压、过载 4 种诊断设计。

短路、断路、欠压监测的电路原理图如图 4 所示, 短路监测的目的是调理模块是否存在短路的问题, 断路监测的目的是判断通道是否和前置放大器连接上, 欠压监测则是判断对外前置放大器直流供电是否小于最小供电电压。测点的结果经电压跟随器增强驱动能力后由 STM32 芯片模数转换用于分析、存储和上传。

欠压监测中, 调理模块对外供电的触点为 IN1, 此处信号为正负 10 V 叠加直流 24 V, 信号范围为 14~34 V。由于 STM32 的大部分引脚只能接受不大于 3.3 V 的电压信号, 需要选择合适的分压电阻才能供 STM32 采集分析。通过 R31、R33 两个分压电阻衰减 16.4 后被得到 P1 处电压范围 0.85~2.07 V。

短路监测和断路监测融合为一段电路, 根据短路、断路、正常 3 种情况下的电流大小, 再将此电流用 INA138NA 芯片放大转换为电压信号, 转换的公式为  $I_1 = I_s * R_{27} * R_{37}$ , 触点  $I_1$  的电压值经电压跟随器输入至 STM32 芯片中进行故障诊断分析。短路时电流不会流入上述的分压电阻而是直接流出到地, 此时电流最大为 85 mA, 转换后电压 2.56 V; 断路时电流直接流入上述分压电阻, 阻值很大因此电流最小为 1.7 mA, 转换后电压 52 mV; 正常情况下前置放大器输出内阻和上述分压电阻并联, 并联后的电阻减小, 电流适中为 50 mA, 转换后电压 1.52 V。

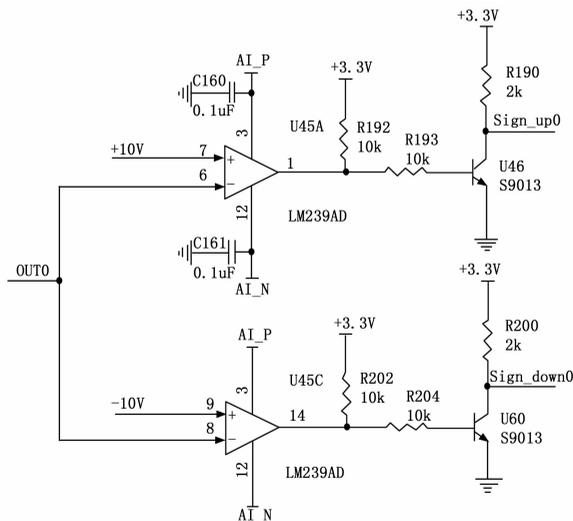


图 5 过载监测电路原理图

过载监测的电路原理如图 5 所示, 目的是将输出信号幅值限制在一个范围内, 以保护调理系统的功能电路。声发射调理后输出信号的范围设定为 -10~+10 V, 若输出大于 +10 V, LM239AD 比较器输出逻辑低, 三极管截止, Sign\_up 为高, 反之输出若小于 +10 V, Sign\_up 为低; 类比得到 Sign\_down 的值, 结果经电压跟随器至 STM32 进行软件设计, 判断信号是否过载。故障诊断电路的监测输出连接至板卡的 STM32 芯片用于软件的算法设计与综合判断。

### 3.2 嵌入式软件设计

本部分分为软件框架设计、参数配置及串口通道设计。

#### 3.2.1 软件框架设计

STM32 是 ST 公司基于 ARM Cortex-M3 内核开发的单片机，具有低价格、多外设、优异实时性能、功耗低等优势<sup>[4-5]</sup>。STM32 的开发只需一个串口即可下载代码，支持 SWD 和 JTAG 两种调试口，不需要昂贵的仿真器。STM32 系列芯片是故障诊断、程控放大、驱动编程等的最佳选择之一<sup>[6-7]</sup>。

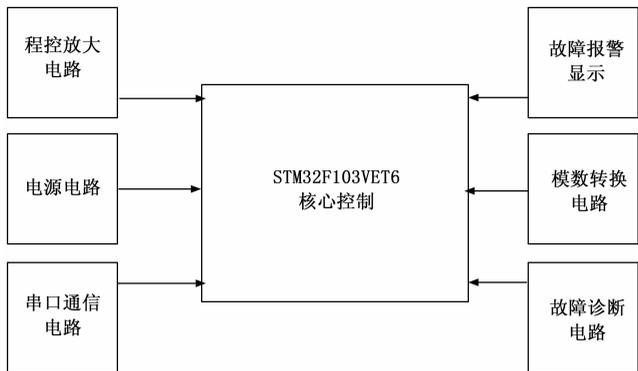


图 6 嵌入式软件设计框架

如图 6 所示为软件设计框图，STM32 芯片是硬件调理系统的驱动和程控核心，本文选用的芯片型号为 STM32F103VET6，是一款拥有 100 引脚，512 KFlash，64 kSRAM，32 位 cortex 内核的增强型芯片。调理模块的 ADC 采集配置、故障诊断分析与计算、程控放大指令、故障 LED 输出等都属于 STM32 嵌入式软件设计，设计的平台为 Keil，Keil 是兼容单片机 C 语言软件开发系统，功能结构、可读性、可维护性有明显的优势且易学易用，是 STM32 编程和调试的主流软件平台。软件设计调试完成后将程序下载到 STM32 芯片上才可运行。本节主要介绍 STM32 嵌入式设计中的 ADC 采集配置，故障诊断分析算法及与软件系统的通信交互方式。

#### 3.2.2 参数配置

参数配置包括 ADC 采集配置和故障诊断算法参数配置。

对于前者，通过 Keil 平台使用 C 语言完成 STM32 ADC 采集配置，由于故障诊断电路的实时监测结果为模拟信号，若要进行故障状态的分析与计算，需要优先完成软件的 ADC 配置将其转换为数字信号。STM32 拥有 1~3 个 ADC，ADC 可以单独使用，也可以使用双重模式提高采样率。STM32 的 ADC 是 12 位逐次逼近型的模拟数字转换器，总共 18 个通道，可测量 16 个外部和 2 个内部信号源。

STM32 的 ADC 有很多转换的配置方式<sup>[7]</sup>，本文选用 ADC 搭配 DMA 来完成模数转换和存放采集的数据，利用 STM32 的库函数对这两个外设配置。ADC 的通道数设置为 8，时钟为 PCLK2 的 8 分频，即  $72\text{ MHz}/8 = 9\text{ MHz}$ 。DMA 的外设源地址为 ADC，内存地址为采集数据的地址，

模式设置为连续不断地循环方式。配置完成后即可完成图 4 测点 I1 和 P1 的模数转换。

至于故障诊断软件配置，主要通过硬件电路的监测结果进行分析与汇总并给出状态监测结果，主要需要配置边界条件和过载监测的方法。

断路短路的边界条件分别为 52 mV 和 256 V，将短路阈值设置为 2.4 V，断路阈值设为 0.1 V，若检测电压小于 0.1 V，电路状态为断路；若检测电压大于 2.4 V，电路状态为短路；否则电路状态为正常。

P1 处电压范围正常时为 0.85~2.07 V，正常供电为 24 V，若输出直流电压为 22 V，则 P1 处电压为  $(22 - 10) / 16.4 = 0.73$ 。将欠压阈值设置为 0.7 V，若检测电压小于阈值则监测结果为欠压。

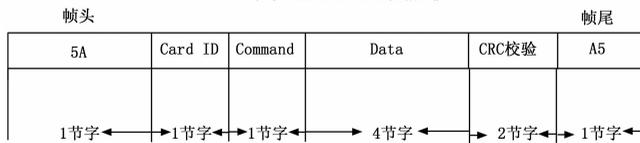
过载监测由于已经为数字信号不必进行 ADC 采集。然而考虑到瞬时的超限信号可能引起过载误报结果，需要设定一个百分比阈值。若在一定时间内过载监测结果大于总数的 10%，则判定输出信号过载。

阈值的设定可根据实际测试情况改变，4 种故障诊断实时监测结果经 RS485 串口通信上传给上位机系统。

#### 3.2.3 串口通信设计

若要实现上位机和调理设备的交互首先需要设计串口通信协议，保证通信的可靠性与稳定性。如图 7 所示为串口通信协议图。通信帧分为上位机询问帧和调理设备应答帧，设置的帧头与帧尾用于识别信息的起止段，Card ID 为相应卡号。Command 为命令的种类包含放大倍数的读写、故障异常状态的获取等，Data 为匹配 Command 的相应数据，CRC 校验用于在接收端检测信息在传输中是否受到了影响，传输是否有错误。

上位机PXI-3050询问帧格式如下：



下位机调理控制卡CFP-3931通信应答帧格式如下：

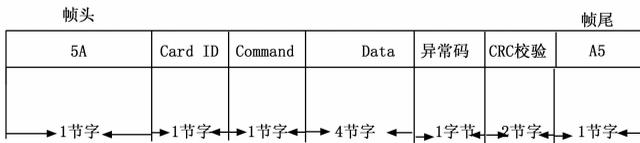


图 7 串口通信协议图

STM32 的串口资源相当丰富，功能也较为强劲，有分数波特率发生器、支持同步单线通信和半双工单线通讯、具有 DMA 等<sup>[7]</sup>。根据串口通信协议的规定完成嵌入式软件的设计。首先根据 STM32 中文参考手册将使用的串口 3 管脚分别设置为推挽输出和复式推挽输出模式，再将串口波特率设置为 9 600、字长为 8 位、停止位为 1 位，奇偶校验位 0 位，串口模式设置为发送或接收模式。通过循环发送数据的方式触发中断响应进行数据接收，数据接收收到完

成标识后回到发送状态, 使用便捷高效。

### 4 系统测试与自动化测试平台

测试分析主要针对硬件系统调理模块的信号处理功能和故障诊断功能进行测试分析。信号处理功能包括程控放大测试和带通滤波测试, 这里着重程控放大性能的测试。

#### 4.1 故障诊断测试

Labview 是一款图形化的仪器开发平台, 使用 G 语言编程, 可通过 NI-VISA 的驱动方式利用串口通信与调理系统建立连接, 实时监测硬件系统的故障诊断状态。图 8 所示为故障诊断测试图, 该程序选择对应的目标板卡、发送命令、串口通信参数, 然后根据串口通信协议解析返回的串口指令获得实时监测状态、放大倍数等。对调理模块 1 四个通道的测试中, 通道 1、3 的状态为正常运行。通道 4 由于没有连接前置放大器导致了断路状态, 通道 2 将 SW3 跳线帽移到下端处于不供电状态, 诊断状态为欠压断路, 此种通道主要用于函数发生器输入调理模块进行放大滤波测试。因此, 故障诊断测试准确可靠, 为其在核电产品的应用提供了可靠支持。

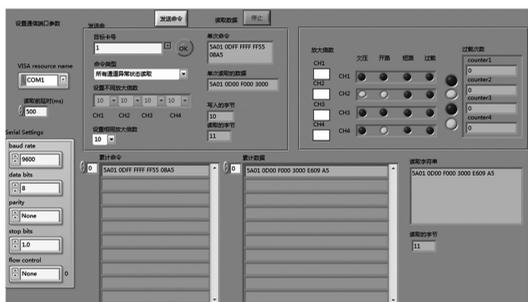


图 8 系统故障诊断测试

#### 4.2 自动化测试平台搭建

由于核电压力监测系统中监测点较多, 导致调理系统的模块量相应增多, 硬件测试中包含重复冗余的工作, 人工测试存在读数偏差、测试效率低等问题, 开发自动化测试平台程序意义深远。

目前自动化测试平台的研究已较为成熟, 自动化测试方案在电机系统开发、网络控制、仪控测试等领域都有大量的应用<sup>[8-10]</sup>。虽然应用于不同的领域和工程, 但其搭建的思想都是相同的。

如图 9 所示, 本文搭建的自动化平台系统在不增加额外硬件板卡的条件下, 使用软件系统自带的 NI 厂商函数发生器卡产生自动化扫频信号输入至硬件系统的各调理模块中, 经信号处理后的信号又传回软件系统, 由系统采集卡获取。自动化程控放大测试系统如图 10 所示, 电压测点输出除以放大倍数后的一系列信号, 图中测试为放大倍数 10 倍的时候, 时域测试波形无失真, 幅度测试斜率为 10, 测试准确可靠数据量大且效率高, 测试后自动计算线性度和放大误差并将结果存储在指定文件路径中。表 1 所示为板卡 1 中通道 1 不同放大倍数的部分数据测试结果, 测试数据

表明误差很小, 调理模块的设计可靠, 达到设计要求。

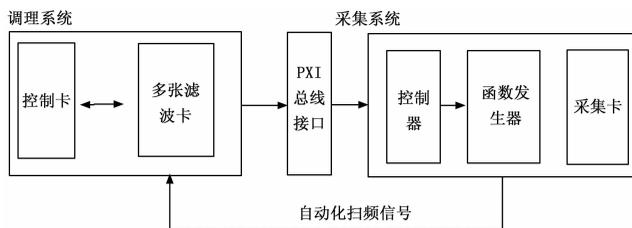


图 9 自动化测试框图

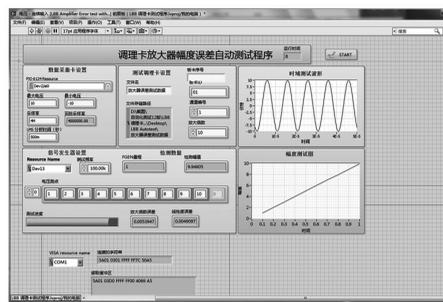


图 10 程控放大自动化测试图

本文基于核电管道评估系统为研究对象, 设计了系统中核心的具有调理控制与故障诊断的硬件系统, 详细论述了硬件设计与嵌入式软件设计的思路, 并开展了系统信号处理控制和故障诊断的测试验证。测试与分析结果表明:

1) 硬件调理模块能有效的对核反应堆管道系统的应力波信号完成程控放大、带通滤波等信号处理, 且通过基于 PXI 的技术信号能够达到高度同步, 通过运用 G 语言搭建的自动化测试平台的测试结果与理论要求一致。

2) 硬件系统基于 STM32 芯片实现了对自身进行短路、断路、过载、欠压 4 种实时故障诊断监测, 同时具有串口通信、程控指令、板载自检等良好控制能力, 性能和功能均完全满足既定的设计指标。

3) 设计的硬件控制与处理系统为核电管道评估系统不仅为核反应堆管道监测系统提供了有效的信号处理手段, 也提供了可靠性保证, 保障了其在核电站的长期稳定运行。

本文基于核电管道评估系统为研究对象, 设计了系统中核心的具有调理控制与故障诊断的硬件系统, 详细论述了硬件设计与嵌入式软件设计的思路, 并开展了系统信号处理控制和故障诊断的测试验证。测试与分析结果表明:

1) 硬件调理模块能有效的对核反应堆管道系统的应力波信号完成程控放大、带通滤波等信号处理, 且通过基于 PXI 的技术信号能够达到高度同步, 通过运用 G 语言搭建的自动化测试平台的测试结果与理论要求一致。

2) 硬件系统基于 STM32 芯片实现了对自身进行短路、断路、过载、欠压 4 种实时故障诊断监测, 同时具有串口通信、程控指令、板载自检等良好控制能力, 性能和功能均完全满足既定的设计指标。