

文章编号: 0258-0926(2018)03-0171-05; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0171

基于国产化 PXI 模块的松脱部件监测系统软件开发

李翔, 简捷, 李海, 王磊

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 基于国产化 PXI (面向仪器系统的 PCI 扩展) 模块, 利用中国核动力研究设计院 (NPIC) 研制的国产化松脱部件监测系统 (LPMS) 进行了 16 通道 LPMS 软件的开发, 本文主要介绍了软件设计要求、设计原则、设计流程, 以及主界面的设计, 并重点对国产化 PXI 控制模块接口程序的软件实现进行了详细阐述。开发的基于国产化 PXI 模块的 LPMS 软件经测试满足设计要求, 并已成功应用在出口国外某核电厂的 LPMS 中, 为保障核电厂安全经济的运行起到了积极的作用。

关键词: 松脱部件监测系统 (LPMS); 国产化; PXI 模块; 软件开发

中图分类号: TP319 **文献标志码:** A

Software Development of Loose Parts Monitoring System Based on Localized PXI Control Modules

Li Xiang, Jian Jie, Li Hai, Wang Lei

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: Using the loose part monitoring system (LPMS) developed by NPIC, the development of 16 channel LPMS software is carried out based on localized PXI (PCI extensions for instrumentation) modules. This paper introduces the software design requirements, design principles, design process and the design of the main interface, and the software implementation of the interface program of localized PXI control module is described in detail. The successful development of LPMS software based on localized PXI modules meets the design requirements, and it has been successfully applied in LPMS of a nuclear power plant abroad, which has played an active role in ensuring the safe and economical operation of the nuclear power plant.

Key words: Loose part monitoring system (LPMS), Localization, PXI module, Software development

0 引言

反应堆一回路系统的松动件、松脱件以及遗留金属部件 (松脱部件) 将严重破坏反应堆结构的完整性, 使压力边界遭到严重破坏, 甚至危及反应堆安全。松脱部件监测系统 (LPMS) 可实时监测核电厂反应堆压力容器 (RPV)、蒸汽发生器 (SG)、主泵 (RCP) 以及一回路管道的松脱部件, 通过对各监测区域信号的在线分析与诊断,

能够及早发现松脱部件, 起到核电厂反应堆故障的早期预警作用, 避免核电厂反应堆严重事故的发生, 降低核电厂反应堆非安全运行的风险, 因此 LPMS 是核电厂反应堆安全经济运行的重要系统^[1], 而安装在工业计算机控制器上的 LPMS 软件又是确保 LPMS 正常运行并有效发挥监测作用的重要组成部分。

由中国核动力研究设计院 (NPIC) 研制并已

收稿日期: 2017-11-12; 修回日期: 2018-03-14

作者简介: 李翔 (1976—), 女, 副研究员, 现主要从事核技术应用工作

在国内大量供货的 LPMS 信号处理机柜的设备中,除了采用的 PXI 标准工业计算机和少数 PXI 标准模块为国外进口外,已基本实现了国产化。针对相同的 PXI 接口,不同硬件制造商使用的方式可能完全不同,提供的接口函数也是不同的,选择国内外不同公司制造的 PXI 标准设备,就必须开发与其匹配的软件。为响应国家核电产品走出去以及提高核电产品国产化率的号召,有必要基于国产化的 PXI 标准工业计算机和 PXI 标准模块,进行 LPMS 软件的开发,使 NPIC 研制的 LPMS 达到全部国产化,并针对实际出口国外某核电厂的 LPMS 供货项目进行了基于国产化 PXI 模块的 LPMS 软件的设计与开发。

1 LPMS 软件设计要求

LPMS 软件通过对 LPMS 系统中安装于反应堆厂房内的加速度计的信号进行数据采集与分析,实现对压力容器、蒸汽发生器以及主泵等一回路重要部件的松脱部件的实时在线监测。LPMS 软件能够对具有松脱部件特征信号的特征信息进行快速分析和定位,并能够自动存储事件的特征信息,同时对原始数据进行存储。LPMS 软件可直观反映监测通道加速度计的安装位置、监测通道的实时运行状态、以及冷却剂压力和控制棒运动等与系统相关的运行状态,同时 LPMS 软件具有用户管理、参数设置、趋势分析、数据库管理以及帮助文档等完整的功能。基于国产化 PXI 设备的 LPMS 软件除了具备上述功能外,还新增了 2 种自检控制功能,分别为针对加速度计的自检脉冲锤的控制功能和针对电荷转换器的自检电荷信号的控制功能。

出口国外某核电厂的 LPMS 有 16 个加速度计,数量多于国内常用的 13 个加速度计。16 个加速度计(图 1 中的黑色实心圆)的安装布置示意图 1,该核电厂采用两环路的反应堆模型,即 1 台 RPV、2 台 SG 和 2 台 RCP。RPV 顶部和底部分别安装 3 个加速度计(顶部的 PVT1、PVT2 和 PVT3,底部的 PVB1、PVB2 和 PVB3)。每台 SG 各安装 4 个加速度计(SG1 对应的 SG11、SG12、SG13 和 SG14,SG2 对应的 SG21、SG22、SG23 和 SG24),每台 RCP 各安装 1 个加速度计(RCP1 和 RCP2)。同时包括 2 个安装于 SG 与 RPV 之间冷管段上的自检脉冲锤(HM001 和

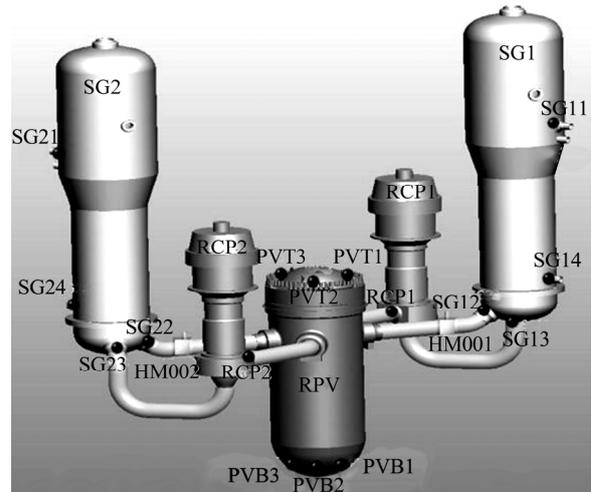


图 1 16 个加速度计安装分布示意图

Fig. 1 Installation Distribution Diagram of 16 Accelerometers

HM002)。

对于基于国产化 PXI 模块的 LPMS 软件的整体设计 requirements 是:能够满足实时对 16 个通道数据进行事件监测、分析、存储的要求,能够满足加速度计与电荷转换器等一次仪表部件进行远程控制的在线自检的功能要求,达到适用于出口国外某核电厂 LPMS 的要求。

2 软件设计原则与设计流程

2.1 软件研发原则

基于国产化 PXI 模块的 LPMS 软件在 Win 7 操作系统下运行,利用 LABVIEW 图形化编程平台,按照模块化、菜单化以及界面化的原则进行研发。每个子界面对应一个独立的功能模块,主界面与子界面的显示风格统一,界面友好直观,操作简单。因基于国产化 PXI 模块的 LPMS 软件直接出口使用,因此全部采用英文界面。

2.2 软件设计流程

LPMS 软件的设计包括主界面程序以及参数设置、趋势分析、数据查询等多个功能子界面程序的设计。主界面程序主要完成监测通道的数据采集和分析,实时完成松脱部件事件信号的甄别、事件数据的记录与存储、系统运行状态的实时显示、功能子菜单的调用、自检功能调用等。其中系统运行状态的实时显示包含加速度计状态、通道事件触发状态、通道故障状态、通道噪声数值显示以及冷却剂压力等反应堆运行状态,自检功能调用包括自检脉冲锤的启动以及电荷转换器自

检电荷信号的启动。

点击菜单，打开各个子界面，实现不同的功能，比如参数设置、噪声趋势分析、数据库查询、系统自检等。参数设置功能包含硬件参数设置和算法参数设置，其中硬件参数设置又包含加速度参数设置、松脱事件甄别参数等若干组件的设置。相比主界面而言，各子界面功能较为单一，在 LPMS 软件设计中属于锦上添花的部分，限于篇幅原因不进行介绍。

LPMS 软件主界面设计流程见图 2。

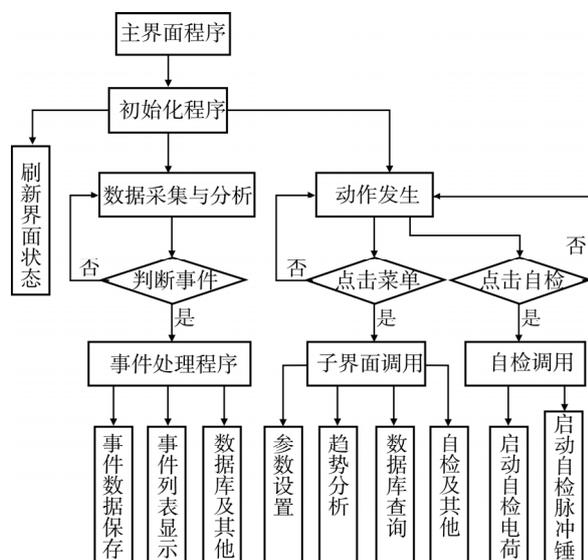


图 2 LPMS 软件主界面设计流程图

Fig. 2 Flow Diagram of Main Interface Design of LPMS Software

3 主界面设计

监测软件主界面设计示意图 3。主界面顶部的软件菜单和工具快捷键能够控制各功能子界面；主界面左部反应堆组态图即为图 1，包含两环路反应堆的主系统分布、加速度计布置以及自检脉冲锤布置；主界面右边为 16 个通道的通道信息、通道事件状态、通道故障状态、通道噪声数值以及电荷自检控制，通道信息包括加速度计功能位置码以及在软件中的通道编号，通道编号为 1~16，通道事件状态显示的事件均通过软件的事件复核；主界面下部事件记录表可显示最近几次触发的事件记录，记录表包括事件触发的区间定位、事件快速分析与信息提取，列表数据同时会记录到数据库中，其中事件触发的区间包含 PVT、RCP1、PVB、RCP2、SG1 和 SG2 6 个区间。

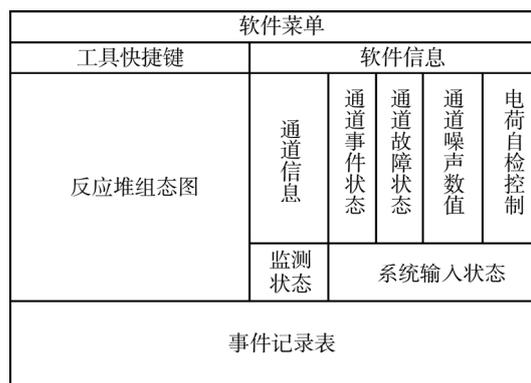


图 3 监测软件主界面

Fig. 3 Main Interface of Monitoring Software

点击反应堆组态图中的自检脉冲锤安装位置（即图 1 中 HM001 与 HM002 上部紧邻的方形区域）时，远程启动对应编号的脉冲锤撞击，完成加速度计的在线检测功能。

点击任意通道的自检电荷控制时，即可远程启动对应的安装于反应堆厂房内的电荷转换器的自检电荷信号的输入，完成电荷转换器功能与性能的在线检测。

在 LABVIEW 的编程中，主界面的设计不仅指用户直观可见的显示部分，还必须完成隐藏在显示界面背后复杂的框图程序，本文不对隐藏在界面后面的框图程序作介绍。基于国产化 PXI 模块的 LPMS 软件设计的关键是针对国产化 PXI 输入输出接口控制模块（简称 PXI 控制模块）的设计，LPMS 软件基本依赖 PXI 控制模块实现通用状态信息的获取和事件状态以及故障状态信息的传递。

4 PXI 控制模块接口的设计

4.1 控制模块端口

国产化 PXI 控制模块采用了单槽宽度 3U 高度的标准 PXI 模块，包含 24 路数字输入端口和 24 路数字输出端口，各输入输出端口之间相互隔离。每个输入端口或输出端口都可以看作一个独立的开关，为与 PXI 控制模块连接的 LPMS 的报警处理器提供逻辑参考信号。24 路数字输入端口分为 3 组，定义为 P0、P1 和 P2，每组端口包括 8 路端口，如 P0 的 8 路端口定义为 P0.0、P0.1、……、P0.7。24 路数字输出端口同样分为 3 组，定义为 P3、P4 和 P5，每组端口也包括 8 路端口，如 P3 的 8 路端口定义为 P3.0、P3.1、……、

P3.7。

4.2 控制模块通讯协议

LPMS 软件通过 PXI 控制模块的输出端口将启动自检脉冲锤、启动自检电荷信号等多种控制指令以及各通道事件、各通道故障等状态传输到报警处理器，同时通过 PXI 控制模块的输入通道将报警处理器面板的禁止报警开关状态或冷却剂压力等多种信息传输到 LPMS 软件。

LPMS 软件需要通过 PXI 控制模块传递的信息量大，需要输出的状态非常多，而输出端口数量有限，所以不仅全部 24 个输出端口被使用了，而且必须将部分端口进行复合使用，才能完成各种控制指令以及报警状态的传输。从表 1 所列的输出通讯协议中可以看出，P5.0、P5.1 以及 P5.3 到 P5.6 的 6 个端口进行了复合使用。表 1 中的模块输出物理端口与 LPMS 软件接口程序中的端口定义一致，指令输入端口与报警处理器固件 FPGA 程序中的端口定义一致，指令编码与指令描述是为了确保 LPMS 软件的控制指令能够真正被系统的执行设备识别并按照通讯协议完成指定的功能，是 PXI 控制模块接口软件设计与报警处理器固件 FPGA 程序设计需要共同遵循的约定。

LPMS 软件需要通过 PXI 控制模块获取的信息量很少，输入通讯非常简单，每个输入端口都可以有自己独立的含义，因此本文不对输入通讯进行描述。

4.3 同组端口时序型复合指令的实现

在表 1 中，同组端口时序型复合指令是指利用 P5.6~P5.3 输出端口，先后两次输出指令，且首次输出指令状态为 1010 的复合指令类型。比如在 LPMS 软件主界面按下 HM001 后，在控制模块接口程序中只需向 P5.6~P5.3 端口顺次写出数据 1010 以及 1110 就可以通过 PXI 控制模块实现自检脉冲锤 1 的启动。因通讯协议中的时序型复合指令都在同一个组合端口 P5 内，因此相对多组端口复合指令的实现而言，设计相对简单。

4.4 多组端口复合指令的实现

在表 1 中，多组端口复合指令是利用 P3、P4 以及 P5.0 和 P5.1 输出端口，传递通道事件状态以及控制通道电荷转换器自检电荷信号启动状态等。原采用的国外某知名品牌的 PXI 控制模块的硬件支持多组端口的同步处理，可以将属于任意组的任意输出端口进行组合，并且实现在同一时刻对定义范围内的所有输出端口的同步操作，因

表 1 国产化 PXI 控制模块输出通讯协议示例

Table 1 Communication Protocol Sample of the Output of Localized PXI Control Module

序号	模块输出物理端口	指令输入端口	指令编码	指令描述
1	P5.7	Dout23	—	设定时间内捕获到电平变化为程序正常
2	P5.6~P5.3	Dout22~Dout19	1010、0001	程序初始化正常
3			1010、1110	启动自检脉冲锤 1
4			1010、0110	停止自检脉冲锤
5	P5.1~P5.0 P4.7~P3.0	Dout17~Dout16 Dout15~Dout0	01xxxxxxxxxxxxxxxx	x=0 (对应电荷转换器使用测试信号) x=1 (对应电荷转换器启动自检电荷信号)
6			10xxxxxxxxxxxxxxxx	x=0 (对应通道无事件) x=1 (对应通道有事件)
7	P5.2	Dout18	—	同步写多位数据或指令，上升沿写入

表 2 基于不同 PXI 控制模块实现事件状态传递的程序步骤的对比表

Table 2 Comparison of Procedure Steps for Implementing Event State Transfer Based on Different PXI Control Modules

序号	进口 PXI 控制模块的实现	国产化 PXI 控制模块的实现
1	向 P5.1~P3.0 的组合端口输出 10 10000000 00000001	向 P5 端口输出 00000000
2	—	向 P4 端口输出 10000000
3	—	向 P3 端口输出 00000001
4	—	向 P5 端口输出 00000010
5	—	向 P5 端口输出 00000000
6	—	向 P4 端口输出 00000000
7	—	向 P3 端口输出 00000000

此在其基础上，使用多组端口复合指令实现通道事件和通道故障的传递以及自检电荷信号的启动就非常容易。

但是与原采用的进口 PXI 控制模块相比，国产化 PXI 控制模块在硬件接口支持上有比较明显的差距，如不支持多组端口的同步处理，即不同组的输出端口不能完成同步操作，因此使用了大量接口程序开展多组端口复合指令的设计和实现。比如通道 1 和通道 16 同时出现事件状态时需要通过 PXI 控制模块进行传递，基于进口 PXI 及国产化 PXI 的程序步骤对比(表 2)，在进口 PXI 控制模块中只用 1 个步骤就完成的指令传递，使用国产化 PXI 控制模块则需要 7 个步骤。大量的多组端口复合指令的实现，也是完成基于国产化 PXI 控制模块的 LPMS 软件设计和实现的关键。

5 测试与结论

将基于国产化 PXI 模块的 LPMS 软件集成到国产化 PXI 接口的工业控制计算机，且 LPMS 信号处理机柜的柜内设备全部实现了国产化。

对集成后的 LPMS 系统进行功能测试，包括 16 个加速度计通道信号的实时在线监测、撞击触发波形显示、触发通道指示、数据自动保存、自检脉冲锤的控制、电荷转换器自检电荷信号控制、参数设置、数据查询、打印以及通道报警与报警输出禁止等。并且对集成后的 LPMS 进行了包括 168 h 整机考验在内的多项性能测试。

对基于国产化 PXI 模块的 LPMS 软硬件功能和性能的测试结果表明：根据两环路反应堆加速度计的布局研发完成的基于国产化 PXI 模块的 LPMS 软件，能有效满足 RPV、2 台 SG、2 台 RCP 以及相关管道等监测区域松脱部件的 16 路监测通道的实时在线监测，完全满足系统既定的各项功能指标和系统性能指标。

参考文献：

- [1] 刘才学, 汪成元, 郑武元. 核电站松脱部件监测系统研制[J]. 核动力工程, 2010, 31(1): 97-101.

(责任编辑：刘 君)