

DOI: 10.7667/PSPC160760

# 智能变电站嵌入式平台测试系统设计及应用

胡宝, 张文, 李先彬, 陈强林

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 智能变电站使用的装置均采用嵌入式软硬件平台架构, 经过新一代智能变电站建设的试点, 智能变电站长时间运行的可靠性仍有待提高。针对智能变电站嵌入式平台的特点, 开发了一套测试嵌入式平台的测试系统。该测试系统基于实际的软硬件平台, 针对内部通信特点, 定制测试用例驱动, 能够模拟极端情况下各个板卡间协调工作和运行的可靠性, 实现软件平台任务调度、时间和内存管理、中断和边界等功能及性能的自动测试和分析。通过该嵌入式平台测试系统, 能够快速模拟装置整个生命周期的运行状态和可能出现的异常现象, 从而保证智能变电站相关产品的稳定性。该测试系统已经在智能变电站软硬件平台的研发测试过程中得到了充分的应用。

**关键词:** 智能变电站; 嵌入式; 平台; 可靠性

## Design and application of embedded platform test system in smart substation

HU Bao, ZHANG Wen, LI Xianbin, CHEN Qianglin

(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

**Abstract:** The devices in smart substation adopt embedded software and hardware platform architectures. The reliability still needs to be improved after pilot construction about new generation of smart substation. A set of test system for testing embedded platform is developed against the characteristics of embedded platform in smart substation. Based on the actual hardware and software platform, in connection with the characteristics of internal communication, this test system can customize the test cases, which can simulate the reliability of coordination and operation among various boards in the extreme situation. Simultaneously, the system can achieve automatic testing and analysis, such as task scheduling, time and memory management, interrupt and border of the software platform. This system can quickly simulate the operation state and the possible anomalies of entire life cycle, so as to ensure the stability of relevant products in smart substation. The test system has been widely used in the research and test of hardware and software platform in smart substation.

**Key words:** smart substation; embedded; platform; reliability

## 0 引言

智能变电站发展过程中, 已经经历了数字化变电站、智能变电站和新一代智能变电站三个阶段。新一代智能变电站建设中要满足《智能变电站技术导则》<sup>[1-2]</sup>的要求, 即采用先进、可靠、集成、低碳、环保的智能设备, 以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为基本要求, 自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能, 并可根据需要支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策、协同互动等高级功能的变电站。

智能变电站的设备基本都是基于 IEC 61850 标准, 均采用了比较先进的软硬件平台和应用分层的架构, 实现了输入输出信息的全数字化和标准化, 能

够通过自动测试对保护测控等应用功能进行充分的验证<sup>[3-7]</sup>。但是, 还缺乏对设备内部嵌入式平台的测试方法和手段, 这对整个系统的运行可靠性是十分不利的。

本文通过对智能变电站嵌入式平台内部通信机制的分析, 搭建了嵌入式平台可靠性测试系统, 开发专用的监视和分析工具, 编制对应的测试用例, 能够对嵌入式平台全生命周期运行状态进行模拟和测试, 考核装置长时间运行和各个板卡协同工作的正确性, 解决可能存在的问题和隐患, 从而保证智能变电站装置的整体可靠性。

## 1 嵌入式平台架构

### 1.1 平台模块分析

嵌入式平台架构如图 1 所示, 一般采用分层、

模块化的设计原则, 主要包含硬件层、软件平台层和应用层 3 个部分。

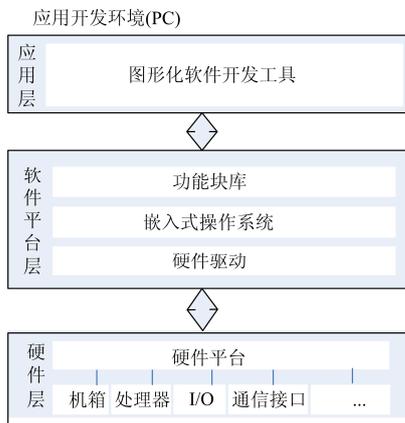


图 1 嵌入式平台架构

Fig. 1 Embedded platform architecture

硬件层主要包括处理器、通信接口等各种通用模块, 能够根据不同工程和保护应用, 进行灵活配置。

软件平台层主要由硬件驱动、嵌入式操作系统、功能块库组成, 硬件驱动实现硬件与软件的基本接口; 嵌入式操作系统完成对应用程序的多任务优先级调度、多 CPU 并行处理和多任务间数据交互等功能; 功能块库提供控制逻辑类、输入输出类、通信类、人机接口等丰富的功能块, 提供给应用开发人员调用。

应用层的图形化软件开发工具是一个集成的图形化应用软件开发环境, 提供设置、编译、下载和在线调试等开发过程中所需的功能, 为高效、快捷地开发出稳定可靠的应用程序提供有力支撑。

### 1.2 仿真测试

通用的嵌入式系统测试工具主要是在 PC 上搭建仿真测试环境进行仿真测试, 同时利用 Rational PurifyPlus、Fortify 等对源代码进行性能、内存和边界等测试。仿真测试仅能够在 PC 机上对程序的逻辑和规范性进行验证测试, 无法对实际软硬件平台运行时的性能和效率进行分析和验证<sup>[8-10]</sup>。

## 2 测试系统构成

嵌入式软件平台研发测试过程中, 主要通过结合不同应用测试各个功能模块的正确性。通过开发该测试系统, 对不同的工程应用进行了抽象和建模, 能够针对软件平台提供的功能和边界进行量化测试, 如长时间运行工况模拟、事件记录的压力测试、内部异常处理和任务调度管理等, 从而满足实际工程应用中的各种需求。

嵌入式平台测试系统是结合实际的软硬件平

台及早期自动测试的研究成果, 针对内部通信特点, 定制测试用例驱动, 从而验证嵌入式软件平台的功能、性能和可靠性, 系统结构如图 2 所示。

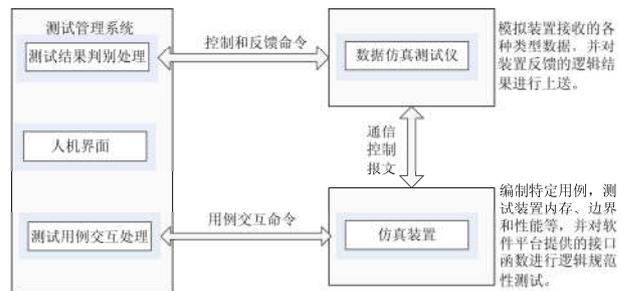


图 2 测试系统架构

Fig. 2 Test system architecture

### 2.1 数据仿真测试仪

数据仿真测试仪自主设计和开发, 用于模拟嵌入式平台内部各个模块和板卡之间的专用通信协议, 如内存读写、数据表通信命令等。同时还能仿真智能变电站 IEC 61850 规约客户端与嵌入式平台装置进行基于 IEC 61850 标准的 MMS 通信, 对上行和下行命令进行交互和判别。

### 2.2 仿真装置

配置典型硬件, 根据嵌入式平台提供的各种功能库和函数, 设计内部模块和各个板卡间数据交互的测试驱动程序, 并按照 IEC 61850 标准进行数据建模, 将内部通信的判别结果进行内部记录并上送到测试管理单元。

### 2.3 测试管理单元

测试管理单元主要完成测试系统的建立。包括数据仿真测试仪的控制、测试用例的生成和测试结果的生成与查询等<sup>[11-15]</sup>。

## 3 测试用例设计

### 3.1 平台特性分析

智能变电站嵌入式软件平台是为智能变电站保护、测控等应用提供操作系统级支撑的软件模块, 其主要功能如下:

- 1) 内存管理功能;
- 2) 时间管理功能;
- 3) 任务管理功能;
- 4) 中断管理功能;
- 5) 记录管理功能;
- 6) 定时器、事件位管理功能;
- 7) 通信管理功能。

软件平台典型应用如图 3 所示, 测试过程中, 需对其不同功能编制对应的测试用例, 进行边界、

压力和性能等的测试。在软件平台开发过程中, 为了方便验证和测试各类管理功能的正确性, 专门设计了一个测试模块, 嵌入到软件平台内部, 通过它能够查看和修改装置运行过程中内存数据。

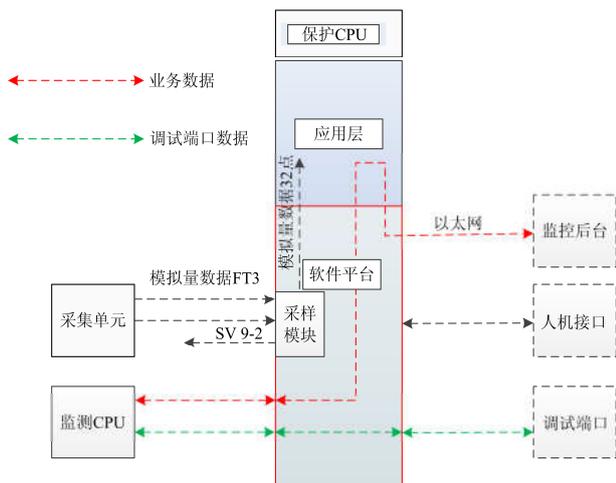


图3 平台典型应用

Fig. 3 Typical application of platform

### 3.2 仿真装置用例编制

针对软件平台的各个功能使用专用的软件开发工具, 按照 IEC 61850 标准进行建模, 并开发相应的测试元件, 从而对嵌入式软件平台提供的各个功能块进行测试。

智能变电站应用中, 对 SV 采样和 GOOSE 跳闸的实时性要求很高, SV 采样和 GOOSE 跳闸的测试用例需要囊括采样性能、链路监视、异常处理、时钟影响等关键点。

软件平台的报告管理功能也是定制测试用例的重点。它需要针对其报告存储、事件记录、录波生成机制进行设计, 以便对装置存储能力、存储速度、存储效率得出量化的测试结果。

各板卡之间通信可靠性测试用例的定制, 侧重通过内部触发机制, 测试在各种通信压力下板卡间通信数据的正确性和时间性能, 模拟各种通信异常, 考核软件平台对异常数据处理的可靠性。

### 3.3 管理系统用例编制

仿真装置测试用例按照 IEC 61850 标准建模完成后, 管理系统能够根据装置生成的 ICD 模型自动生成监视用例, 控制数据仿真测试仪发送模拟数据到仿真装置, 然后监视仿真装置上送的数据是否与施加信息量一致。

管理系统能够根据设定的修改条件, 通过内部命令修改仿真装置的相应数据, 如测试差动保护相关功能时, 管理系统能够根据模型自动识别相关的

定值、压板、控制字和对应的出口信息, 控制仿真测试仪输出满足保护动作条件的故障量值, 然后根据预设的判别逻辑自动判断仿真装置的反馈结果是否满足要求, 将测试结果输出到人机界面并进行记录。

## 4 应用实例

嵌入式软件平台测试系统开发完成后, 对软件平台提供的常规功能模块能够进行自动测试, 能够完成的测试项目如下:

- 1) 规约一致性测试;
- 2) 定值、压板等信息规范测试;
- 3) 采样、自检等功能测试;
- 4) 数据表测试;
- 5) 压力和边界测试;
- 6) 各类接口函数测试;
- 7) 兼容性测试。

对嵌入式软件平台进行分析和研究后, 逐步完善了该测试系统, 在测试过程中发现了很多软件平台隐藏的问题, 如时间翻转、程序重定位、大数据压力下运行稳定性等方面的问题。

### 4.1 时间相关功能测试

通过测试用例和调试程序模拟内部时钟快速运转, 运用该测试系统进行装置长时间运行稳定可靠性试验时, 当模拟装置运行 400 多天后, 装置出现较多异常告警, 约 11 s 后又恢复正常。

经过排查是由于操作系统提供的 Get\_tick 函数存在异常, 如图 4 所示, 导致在当内核给的 Tick 大于 0xFFFFFBxx 后 Get\_tick 函数会收到 0xFFFFFFFF, 因此要等到内核 Tick 真正的翻转后时间函数调用才会恢复正常。

```

File Edit Setup Control Window Help
Get tick from times system call = fffffb8d
Current Tick: 0x1b8d Pseudo Tick: 0xfffffb8d
Get tick from times system call = fffffb8e
Current Tick: 0x1b8e Pseudo Tick: 0xfffffb8e
Get tick from times system call = fffffb8e
Current Tick: 0x1b8f Pseudo Tick: 0xfffffb8f
Get tick from times system call = fffffb8f
Current Tick: 0x1b8f Pseudo Tick: 0xfffffb8f
Get tick from times system call = fffffb90
Current Tick: 0x1b90 Pseudo Tick: 0xfffffb90
Get tick from times system call = fffffb91
Current Tick: 0x1b91 Pseudo Tick: 0xfffffb91 ← 内核打印
Get tick from times system call = fffffb92
Current Tick: 0x1b92 Pseudo Tick: 0xfffffb92 ← 内核tick正常
Get tick from times system call = ffffffff ← times错误
Current Tick: 0x1b93 Pseudo Tick: 0xfffffb93
Get tick from times system call = ffffffff
Current Tick: 0x1b93 Pseudo Tick: 0xfffffb93
Get tick from times system call = ffffffff
Current Tick: 0x1b94 Pseudo Tick: 0xfffffb94
Get tick from times system call = ffffffff
Current Tick: 0x1b95 Pseudo Tick: 0xfffffb95
Get tick from times system call = ffffffff
Current Tick: 0x1b96 Pseudo Tick: 0xfffffb96
    
```

图4 系统时间输出

Fig. 4 System time output

### 4.2 程序重定位功能测试

软件平台在多模块加载后，通过静态重定位对各个应用模块进行内存分配。在测试过程中出现了装置内存数据被误修改，导致内部板卡通信时出现异常。经过反复验证和分析，是由于编译器提供的浮点转换库编译后无“\_\_SoftFPSCR”的重定位信息所致，如图 5 所示。

```

0001352e 000004 0097eaf8 0007ec58 4 TabHandle      tabi.o
0001352c 000004 0097eafc 0007ec5c 4 TabCpuNumber  tabi.o
00013530 000004 0097eb00 0007ec60 1 .bss          MSL_C.FPCEABI.bare.E2.UC.a errno.o
00013530 000004 0097eb00 0007ec60 4 errno        MSL_C.FPCEABI.bare.E2.UC.a errno.o
00013534 000004 0097eb08 0007ec68 8 *fill*
00013538 000004 0097eb08 0007ec68 1 .bss          MSL_C.FPCEABI.bare.E2.UC.a secure_error.o
00013538 000004 0097eb08 0007ec68 4 __msl_constraint_handler MSL_C.FPCEABI.bare.E2.UC.a s
0001353c 000004 0097eb10 0007ec70 8 *fill*
00013540 00000c 0097eb10 0007ec70 1 .bss          Runtime.FPCEABI.E2.UC.a ExceptionPFC.o
00013540 00000c 0097eb10 0007ec70 4 fragmentInfo Runtime.FPCEABI.E2.UC.a ExceptionPFC.o
0001354c 000004 0097eb20 0007ec80 8 *fill*
00013550 000004 0097eb20 0007ec80 1 .bss          Runtime.FPCEABI.E2.UC.a D:\CVS\EPFC.4.0\epfc_support\
00013550 000004 0097eb20 0007ec80 4 __SoftFPSCR   Runtime.FPCEABI.E2.UC.a D:\CVS\EPFC.4.0\epfc
00013554 000004 0097eb28 0007ec88 8 *fill*
00013558 000004 0097eb28 0007ec88 1 .bss          Test20202.a F:\xxxx\input88\plat\src\ctest1.o
00013558 000004 0097eb28 0007ec88 4 ctest_number Test20202.a F:\xxxx\input88\plat\src\ctest1.o

```

图 5 编译信息

Fig. 5 Compile information

修改浮点转换库，增加重定位后进行多次测试，未再出现内存地址被误修改的现象。

### 4.3 压力性能测试

智能变电站应用过程中，对装置信息上送、事件记录等要求越来越高，要求在任何工况下重要信息也应该在 3 s 内上送到监控后台。嵌入式软件平台针对各类信息进行了优先级分配，初始设计过程中，使用该测试系统进行各种压力测试时，始终无法满足重要信息在 3 s 内上送到后台的要求。

测试系统不断完善测试用例，软件平台针对各个数据进行优化，最终实现了重要数据在任何工况下能够在 3 s 内上送到后台的要求，同时保证软件平台能够可靠运行。

### 4.4 规范一致性测试

继电保护装置的要求越来越明确，对各种工况下装置应该上送的报文均进行了详细的规范和定义，通过该测试系统能够对规范中要求的所有报文进行正逻辑和反逻辑测试。

如按测试信息规范中要求的运行状态上送时，出现投退某一个压板后，装置出现误上告警然后迅速返回和报文重复上送的问题，经过不断地完善和积累，使用该平台的保护装置均顺利地通过规范一致性实验。

## 5 结论

通过对嵌入式软件平台的测试研究和分析，搭建的测试系统在嵌入式软件平台开发和完善过程中起到了重要作用，同时也为智能变电站装置的稳定运行提供了可靠保证。随着智能变电站设备的自动化程度越来越高，对二次设备使用寿命和可靠性要

求也更加严格，使用该测试系统能够及早发现和解决智能变电站相关产品在可靠性和长时间运行下可能存在的问题，从而保证电网更加稳定的运行。

### 参考文献

[1] Q/GDW 383-2009 智能变电站技术导则[S]. 北京: 国家电网公司, 2009.

[2] Q/GDW 11010-2013 继电保护信息规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2013.

[3] 董磊超, 刘昊昱, 浮明军, 等. 智能变电站间隔层设备自动测试系统研制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 147-151.

DONG Leichao, LIU Haoyu, FU Mingjun, et al. Development of automatic test system for bay level equipment of smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 147-151.

[4] 浮明军, 刘昊昱, 董磊超, 等. 智能变电站继电保护装置自动测试系统研究和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 41-44.

FU Mingjun, LIU Haoyu, DONG Leichao, et al. Research and application of relay protection automatic test system for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 41-44.

[5] 温东旭, 杨辉, 王旭宁, 等. 电力保护装置保障性自动测试方案研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 135-138.

WEN Dongxu, YANG Hui, WANG Xuning, et al. Research and practice on the scheme of automatic testing of power protection device security[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 135-138.

[6] 刘巍, 赵勇, 石光. 智能变电站继电保护装置一键式测试方法及系统[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 152-154.

LIU Wei, ZHAO Yong, SHI Guang. One-key test system for relay protection equipment of intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 152-154.

[7] 范宏, 朱牧之, 沈冰, 等. 线路保护实时仿真自动测试平台设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 124-129.

FAN Hong, ZHU Muzhi, SHEN Bing, et al. Research on automatic testing system of line protection based on real time simulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 124-129.

- [8] 丁恒春, 杨晓波, 钱吉红, 等. 基于dSPACE的光伏并网系统实时仿真[J]. 陕西电力, 2015, 43(12): 22-26.  
DING Hengchun, YANG Xiaobo, QIAN Jihong, et al. Real-time simulation of photovoltaic grid-connected system based on dSPACE[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(12): 22-26.
- [9] 程时润, 万钧力, 刘浩, 等. 基于 LabVIEW 的光伏电池建模与仿真[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 17-26.  
CHENG Shirun, WANG Junli, LIU Hao, et al. Modeling and simulation of photovoltaic cells based on LabVIEW[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(7): 17-26.
- [10] 李红囡, 李晨曦. 监控网与GOOSE网合一的通信网实时性分析[J]. 陕西电力, 2015, 43(4): 28-31.  
LI Hongnan, LI Chenxi. Communication network real-time analysis based on combination of MMS and GOOSE nets[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(4): 28-31.
- [11] 侯亮, 冯亮, 杨庆伟. 智能变电站虚拟回路自动化校验技术的研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 44-48.  
HOU Liang, FENG Liang, YANG Qingwei. Research of smart substation virtual circuit automatic checking[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 44-48.
- [12] 李颖, 李峰, 李兵皓, 等. 基于变电站数字化移交成果的全景信息监视平台[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 57-61.  
LI Ying, LI Feng, LI Bingkai, et al. A panoramic information monitoring platform based on the digital substation handover results[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 57-61.
- [13] 邵风瑞, 王命延. 继电保护测试系统组态软件的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 72-75.  
SHAO Fengrui, WANG Mingyan. Configuration-based software protection test platform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 72-75.
- [14] 赖擎, 华建卫, 吕云, 等. 通用继电保护自动测试系统软件的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 91-94.  
LAI Qing, HUA Jianwei, LÜ Yun, et al. Research on general relay protection auto-test system software[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 91-94.
- [15] 徐立子. 变电站自动化系统的可靠性分析[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 68-72.  
XU Lizi. Reliability analysis of substation automation system[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 68-72.

收稿日期: 2016-03-31; 修回日期: 2016-08-25

作者简介:

胡宝(1963-), 男, 本科, 高级工程师, 从事继电保护及自动化产品测试技术、测试方法的研究和科研产品的测试工作; E-mail: 13707607502@163.com

张文(1984-), 男, 本科, 工程师, 从事继电保护软件平台的测试技术、测试方法的研究和科研产品的研发测试工作; E-mail: electricwen@163.com

李先彬(1980-), 男, 本科, 工程师, 从事继电保护及自动化产品的测试技术、测试方法的研究和科研产品的研发测试工作。E-mail: lxb\_2003@126.com

(编辑 葛艳娜)