

# 基于嵌入式 Linux 的输电线路杆塔倾斜度自动化测试系统的设计与实现

王 威<sup>1</sup>, 岳灵平<sup>2</sup>, 杨 吉<sup>3</sup>, 郑鹏超<sup>1</sup>

(1. 北京国网富达科技发展有限公司, 北京 100070; 2. 国网浙江省电力公司, 杭州 310007;

3. 中国电力科学研究院, 北京 100070)

**摘要:** 在总结实际工作经验的基础上, 针对在测试输电线路杆塔倾斜度在线监测系统过程中存在的搭建测试环境复杂、测试步骤繁琐、测试周期长、测试效率低、测试结果格式混乱等问题, 设计了一个使用客户端/服务器架构的自动化测试系统, 详细论述了该系统的设计方案和实现原理; 客户端基于嵌入式 linux 系统, 采用多线程技术, 通过以太网, 使用定制的通信协议与服务端通信, 能够在收到服务端指令后自动完成输电线路杆塔倾斜度在线监测系统硬件模块的功能测试; 服务端采用 python 和 PyQt 开发, 能够跨平台运行, 使用多线程技术, 实现了图形化控制客户端、查看客户端测试状态、保存测试日志、生成标准化的 xls 和 pdf 格式的测试报告等功能; 实际应用表明, 该系统有效可靠结果准确, 提高了测试效率, 提升了输电线路杆塔倾斜度在线监测系统的可靠性。

**关键词:** 嵌入式; 杆塔倾斜度; 在线监测; 自动化测试

## Design and Implementation of The Automated Test Systems about Online Monitoring System Based on Embedded Linux for Tilt of Power Transmission Line Tower

Wang Wei<sup>1</sup>, Yue Lingping<sup>2</sup>, Yang Ji<sup>3</sup>, Zheng Pengchao<sup>1</sup>

(1. Beijing Guowang Fuda Science and Technology Development Co., LTD, Beijing 100070; China; 2. Zhejiang Electric Power Corporation., Hangzhou 310007, China; 3. China Elecerle Power Research Instltute, Beijing 100070, China)

**Abstract:** An automated test system of C/S architecture which is based on the practical experience regarding of the feedback from the production & test department is proposed in order to solve the issues of building test environment complexly, long test cycles, low efficiency of testing, chaotic test formats and so on. The architecture and the implementation are discussed in detail. The client that based on embedded linux uses multi-threading technology, can communicate with the server through customized protocol via ethernet and automatically test the hardware that composed of the online monitoring system of transmission line tower tilt. The server that is coded in python and PyQt can operate on cross-platform, check the status of the test procedure, save test logs, export the test report of xls and pdf format and so on through GUI. Engineering practice verifies the automated test system is effective in practice.

**Keywords:** embeded; lonline; monitoring; automated test

## 0 引言

输电线路杆塔倾斜度在线监测系统是指通过倾角传感器实时采集杆塔顺线方向倾斜角、横向方向倾斜角, 并计算出杆塔的顺线倾斜度、横向倾斜度和综合倾斜度后, 通过以太网或 GPRS 网络将监测数据传送到主站系统, 实现对杆塔倾斜各状态量监测的系统。其主要应用在输变电设备的状态检修管理, 保障电网的安全稳定运行<sup>[1-2]</sup>。随着输电线路杆塔倾斜度在线监测系统的应用越来越广泛, 传统的人工测试硬件方法的局限性越来越显现: 测试环境搭建复杂、测试步骤繁琐、测试周期长、测试效率低、测试结果格式混乱且不易保存, 严重制约了输电线路杆塔倾斜度在线监测设备的批量化生产和测试。

自动化测试可理解为测试过程自动化和测试结果分析自动化<sup>[3-6]</sup>。本文针对实际生产过程中发现的人工硬件测试的不

足, 设计和实现了基于嵌入式 Linux 的输电线路杆塔倾斜度自动化测试系统。

## 1 测试需求分析

为提高输电线路杆塔倾斜在线监测设备产品的整体质量, 确定输电线路杆塔倾斜度自动化测试系统应具有如下功能:

1) 客户端硬件模块的自动检测, 主要包括网口、3 G 模块、2.4 G 模块、加密卡模块、串口、485 功能接口、系统监控板、时钟、Nand flash 的坏道数量等, 老化实验过程中客户端系统状态信息的保存。

2) 服务器端查询指定时间段内老化记录, 存储测试结果并将测试结果保存为 pdf 和 xls 格式, 便于存档和统计, 对客户终端测试状态信息的展示。

## 2 输电线路杆塔倾斜度自动化测试系统

### 2.1 总体设计

输电线路杆塔倾斜度自动化测试系统由运行在嵌入式 linux 上的测试客户端和运行在 pc 上的测试服务端组成, 二者之间通过以太网相连进行通信。整个系统的基本操作流程如图

收稿日期: 2016-01-05; 修回日期: 2016-04-18。

作者简介: 王 威(1987-), 男, 内蒙通辽人, 工学硕士, 中级工程师, 主要从事输电线路在线监测技术软件方向的研究。

1 所示。

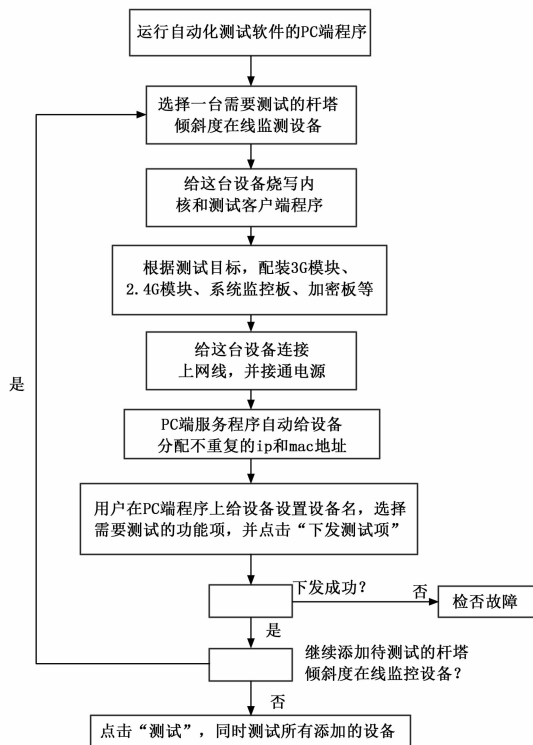


图 1 操作流程

测试人员选定待测试的杆塔倾斜度在线监测设备, 烧写 linux 内核和测试客户端程序, 安装待检测的配件模块, 如 3 G 模块、加密卡模块、2.4 G 模块等, 给设备上电, 用网线将设备与电脑相连, 点击运行电脑上的测试服务端程序, 待服务端程序给客户端程序分配好 ip 和 mac 地址后, 给待测试设备命名并根据测试目标下发测试项目给客户端程序, 然后可以选择继续添加待测试设备。当所有待测试设备都添加完毕后, 点击“测试”按钮, 下发测试指令给所有待监测设备, 等待客户端程序返回测试结果。客户端程序收到测试指令后, 按照之前收到的测试项目逐一进行测试, 记录测试结果并将测试结果发送给服务端程序。服务端程序收到测试结果后, 对测试结果进行统计并生成 pdf 和 xls 格式的测试报告, 完成本次测试。

## 2.2 客户端设计

客户端是基于嵌入式 linux 的自动化检测程序, 主要包括动态 ip 和 mac 请求线程、数据接收线程、测试线程和心跳线程。

动态 ip 和 mac 请求线程主要向服务器发送申请 ip 和 mac 的请求及接收和设置服务器返回的 ip 和 mac; 数据接收线程主要负责接收服务器发送的测试项的配置参数和各种测试指令、解析它们并将其存入待测试指令队列汇总; 测试线程主要负责当客户端收到服务器发送的测试指令后, 开始从待测试队列中读取测试命令, 执行测试函数, 并负责处理测试结果。心跳线程主要负责发送心跳报文给服务端, 确保客户端 ip 和 mac 有效。

客户端处理流程如图 2 所示。

客户端程序启动后, 首先屏蔽 SIGHUP 等常见信号干扰, 初始化全部外围设备并打开外围设备电源, 初始化 ip 和 mac 请求线程、数据接收线程、定时器线程、测试线程和心跳线

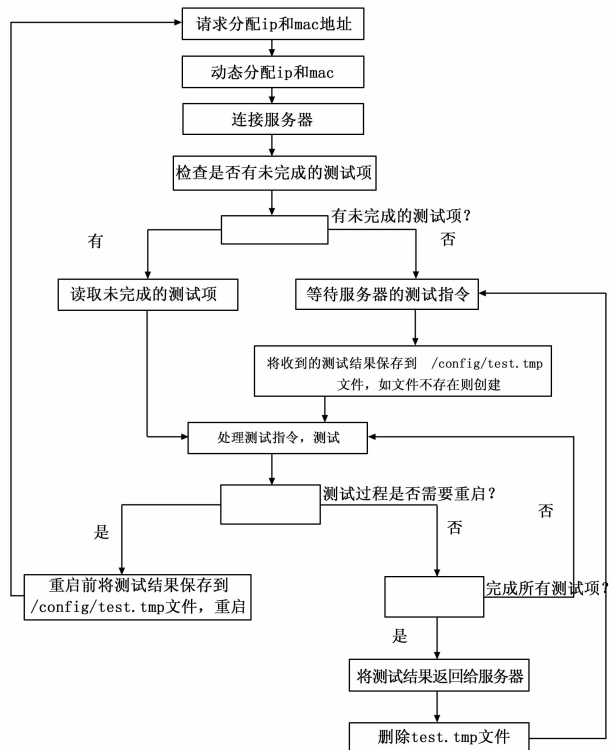


图 2 客户端处理流程

程。检查是否存在上一此分配的 ip 和 mac, 若存在, 则加载此 ip 和 mac; 否则加载默认的 ip 和 mac。创建 ip 和 mac 请求线程, 向服务端广播请求报文, 等待服务端分配指定 ip 和 mac。待收到 ip 和 mac 后, 设置为本机的 ip 和 mac, 同时 ip 和 mac 线程进入休眠。然后主程序创建心跳线程。心跳线程每十秒发送心跳报文至服务端, 确保 ip 和 mac 有效。主程序创建测试线程。测试线程检查是否有未完成的测试项目。若有, 则读取未完成的测试指令, 完成测试, 将测试结果发送给服务端, 继续等待服务端的测试指令。若没有未完成的测试项目, 测试线程检查待测试命令队列。若队列内无测试命令, 则测试线程休眠。主程序创建数据接收线程, 等待服务端测试指令。当数据接收线程收到服务端发送的指令后, 按照通信协议进行校验, 若校验通过, 进行解析; 否则返回相应错误代码给服务端。解析后, 根据指令类型的不同分别做相应的处理。若为开始测试指令, 则唤醒测试线程, 读取待测试队列中的命令, 开始测试, 测试完毕后将测试结果发送回服务端。若为下发测试项目指令, 则将收到的测试指令添加到待测试命令队列中。若为 ip 和 mac 失效报文, 则唤醒 ip 和 mac 请求线程, 重新请求 ip 和 mac。若为心跳回复报文, 则通知心跳发送线程收到服务端的心跳回复。

## 2.3 服务端设计

运行在 pc 上的服务端程序主要负责处理 ip 和 mac 分配请求、按照规则为客户端分配 ip 和 mac、设置测试项目、将测试项目下发给客户端、发出测试指令、展现客户端的测试状态同时格式化存储测试结果。采用 python 语言开发。

按照功能, 主程序主要分为以下几个模块。

### 1) 存储模块:

存储模块采用列表结构, 列表中每一项为一个 key—value

形式的字典, 其中 key 主要包括序号、名称、ip、mac、ip 和 mac 是否分配、测试项目是否下发、测试是否开始、测试结果。测试结果亦为一个 key-value 形式的字典, 保存客户端自动测试后发送回的结果。

## 2) 展现模块:

展现模块采用 PyQt 框架开发。PyQt 为 Qt 框架的 python 版本。展现模块主要包括 4 个功能区。

### (1) 测试状态展示功能区:

主要展示具体测试设备的 ip、mac、ip 和 mac 分配状态、测试项目下发状态、测试过程状态

### (2) 测试项目设置功能区:

主要包括具体测试硬件模块的设置, 如 3 G 模块、时钟模块、系统监控板模块等。

### (3) 控制指令下发功能区:

主要包括设置默认测试项目、下发测试配置、开始测试、导出测试结果、查询老化记录等功能按钮。

### (4) 老化状态信息查询功能区:

主要包括查询起止时间的设置, 系统老化过程中的状态信息 (如 cpu 利用率、内存使用量、内存空闲量、Nand flash 使用量、Nor flash 使用量等) 的展示。

## 3) ip 和 mac 分配模块:

接受客户端的 ip 和 mac 请求报文, 返回 ip 和 mac 的设置报文, 同时定时检查所有客户端的 ip 和 mac 是否在指定时间内失效。若失效, 则给客户端发送失效报文。

## 4) 日志记录模块:

主要记录各个子模块在运行过程中出现的各种问题, 便于后期对发现的问题进行修改。如下面这条记录记录了何时哪个模块收到了客户端发送回来的测试结果, 同时记录了对该设备下发的测试项目以及其他相关测试状态的信息。

```
2015-12-21 10:19:48.929 - main - INFO - {'id': 173341178894, 'mask': 4294967040, 'test_items': {'encry_card': '83', 'min_sys': '88', 'two_four_g': '82', 'timer': '87', 'four_eight_five': '85', 485NUM=3, 'flash': '89', 'net': '80', 'number': 0, 'test_status': 2, 'device_name': 'test1', 'result': {'83': 'Nspi_other_ver() error!', '82': 'Npeekfd zigbee error!', '88': 'Y', '85': 'Y', '89': 'Y'}, 'mac': 'BE:FD:01:F1:00:02', 'last_time': 1450664377.820872, 'fail_flag': 1, 'assigned_config': 1, 'assigned_ip': 2, 'start_time': 1450660765.653268, 'ip': '192.192.192.1', 'test_time': '01'}
```

## 5) 通信模块:

按照指定协议格式, 发送相关的控制指令等。

### 1) 测试结果的格式化模块:

主要功能为将内存中保存的测试结果转换为 pdf 和 xls 格式文件存储在硬盘上, 以便于后期存档和统计。

程序处理流程如图 3 所示。

主程序启动后, 启动界面展现线程、ip 和 mac 分配线程、接收线程、定时器线程。界面展现线程主要负责人机交互、下发测试配置、导出测试结果、展现被测试设备的状态。ip 和 mac 分配线程使用 1124 端口, 监听客户端的 ip 和 mac 请求, 待收到请求后, 将分配的 ip 和 mac 发送到客户端的 1125 端口。接收线程主要负责接收处理客户端的心跳数据、测试结果数据、下发测试项目及发送测试指令等, 监听 1126 端口, 同时将回复报文发送至客户端的 1127 端口。定时器线程主要负责检查客户端 ip 和 mac 是否失效

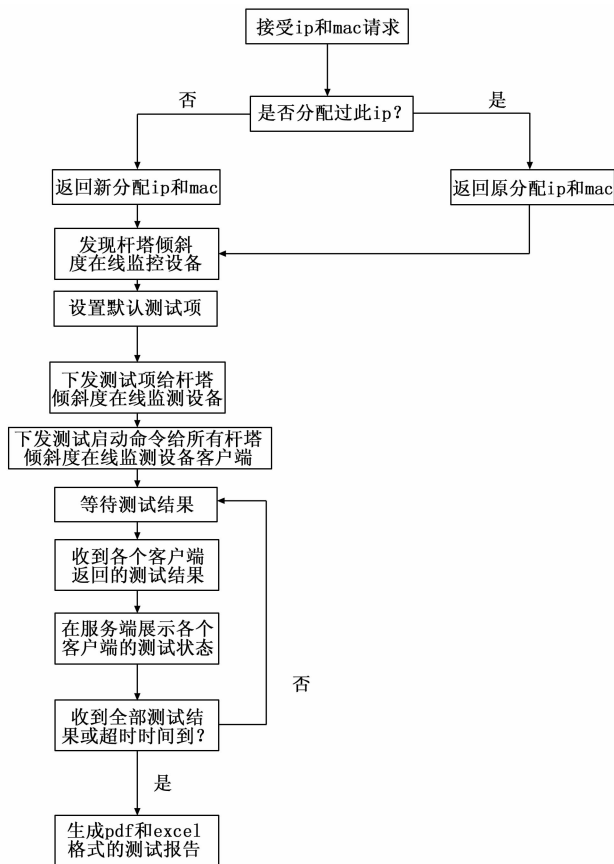


图 3 程序处理流程

程序启动后, ip 和 mac 分配线程等待客户端的连接。当收到客户端的 ip 和 mac 请求报文后, 查看已分配 ip 和 mac 表, 判断客户端的 ip 是否分配过并且是否属于测试中的重启状态 (时钟测试需要客户端的重启)。若未分配过此 ip 或此 ip 并未处于测试状态, 则给客户端分配新的 ip 和 mac, 并将新的 ip 和 mac 加入已分配 ip 和 mac 列表中, 同时更新此客户端的测试状态信息。若通过查询已分配 ip 和 mac 表, 发现分配过此 ip 和 mac, 那么将原 ip 和 mac 返回给客户端。为保证每一个客户端的 ip 和 mac 都具有唯一性, ip 和 mac 分配策略如下: 在 1~253 之间同时排除本机 ip 和 mac 的第四个字段的数值从 1 开始分配, 逐渐递增, 直到 253。同时定时器线程每隔 30s 定时检查已分配 ip 和 mac 是否处于超时状态, 若处于超时状态, 则给测试客户端发送 ip 和 mac 失效报文, 将该 ip 和 mac 从已分配列表中删除, 更新展现端测试状态信息。服务端设置号测试设备名称、默认测试参数, 下发测试参数个指定客户端。待配置好所有测试客户端后, 发送测试指令。测试客户端根据收到的测试配置参数开始自动进行测试。此后服务端等待测试客户端的测试结果。待收到测试结果后, 服务端解析测试结果并将测试结果保存为 pdf 和 xls 格式的测试报告, 供生产人员进行存档及统计分析。其中在生成 pdf 格式报告时采用了开源的第三方库 reportlab, 生成 xls 格式报告时采用了 xlrd、xlutils、xlwt 等开源的第三方源码库, 提高了开发效率。

## 2.4 实验结果与分析

本次测试为服务端程序启动后的第一次测试, 测试设备数量为 1 个, 测试耗费时间为 1 分钟, 所测试的项目分别为加密

卡模块、2.4 G 模块、最小系统测试（测试 RAM 大小、nor 和 nand flash 大小、CPU 使用率和频率是否在正常范围内）、时钟模块、485 接口模块、flash 模块。测试结果表明最小系统测试、485 接口模块、flash 模块工作正常，可以投入使用，加密卡、2.4 G 模块、时钟模块出现故障。经实际查看，发现加密卡模块某个接口出现开焊问题，导致断路；2.4 G 模块和时钟模块出现错误提示是由于未安装上述两个硬件模块。在更换加密卡、添加 2.4 G 模块和时钟模块后，测试结果均为正常。

3 结语

基于嵌入式 Linux 的输电线路杆塔倾斜度自动化测试系统具有扩展性好、维护成本低、开发周期短、测试效率高、测试结果准确度高等特点，实际应用表明，该系统能有效减轻生产人员的工作负担，解决了以往人工测试过程中的试步骤繁琐、测试周期长、测试效率低、测试结果格式混乱等实际问

题，提高了测试工作的效率，对于提高输电线路杆塔倾斜度在线监测系统的可靠性具有重要意义。

(上接第 69 页)

两通道处理器之间通过 RS232 接口交换数据，进行通道间的互检和周期自检。

在正常工作情况下，上通道显示器作为主显示器，显示发动机的出口温度（T4），扭矩（TRQ）、转速（ΔNG）等重要信息；下通道显示器显示燃油、滑油、电源等系统信息和系统故障信息。在飞机降落后显示飞行报告等系统信息

在一个显示器失效时，系统进入降级工作模式，另一个正常通道显示复合信息，以保证飞行正常进行。在飞机降落后显示飞行报告等系统信息。

1) 正常工作情况下（二通道均有效），显示的页面如图 21。

当直升机着陆时，发参显示系统通道 2（下端显示器）显示飞行报告页。

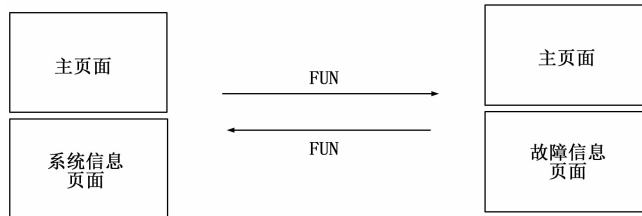


图 21 正常工作情况下（二通道均有效），显示的页面

2) 系统通道 2 失效时，通道 1 显示的复合信息页面如图 22。

当直升机着陆时，发参显示系统通道 1（上端显示器）显示飞行报告页。

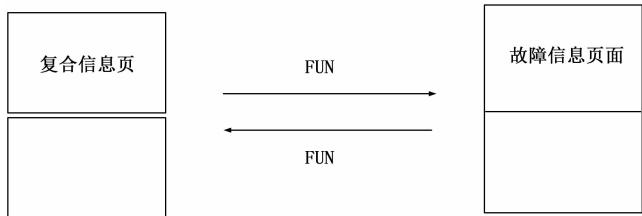


图 22 系统通道 2 失效时，通道 1 显示的复合信息页面

3) 系统通道 1 失效时，通道 2 显示复合页面如图 23。  
当直升机着陆时，发参显示系统通道 2（下端显示器）显

示飞行报告页。

参考文献：

[1] 黄 欢, 王 威, 等. 基于嵌入式 Linux 的杆塔倾斜度在线监测仪设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23: 4246-4248.  
[2] 郝丽花, 姜 敏, 刘 宏. 杆塔倾斜在线监测的应用研究 [J]. 山西电力, 2013, 6: 22-23.  
[3] 闫 帅, 刘锦高. 基于 PXE 的自动化 CV 测试系统设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2015, 23: 88-91.  
[4] Pressman R S. 软件工程——实践者的研究方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.  
[5] 启 亮. 国际化软件测试 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.  
[6] 郑蓓蓓, 黄晓霞, 刘 蔚. 基于 LUA 脚本的无线模块自动化测试 [J]. 计算机技术与发展, 2011, 21: 197-200.

示飞行报告页。

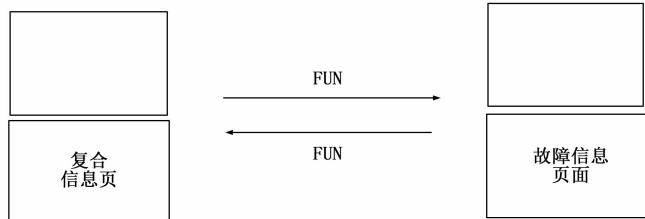


图 23 系统通道 1 失效时，通道 2 显示复合页面

3 实验结果

采用双余度发动机状态监测技术研制的某型涡轴发动机状态实时监测系统经过了大量的地面试验和某型直升机上试飞试验，功能、性能满足要求，实现了发动机状态实时监测，目前该系统已在某型直升机上应用。该技术为某型涡轴式发动机的应用起到了有力支撑和保证，在一定程度上推进了我国航电系统综合化、数字化的发展。同时对于航空故障诊断、预测和健康管理技术未来的发展起到有力支撑和推动。

4 结束语

基于双余度发动机状态监测技术成功研制了发动机状态监测系统，该系统体积小、重量轻、精度高、可靠性高，在高噪音、高复杂的电磁环境条件下实现了故障准确定位、故障诊断、提高飞行安全性及人机功效，适用于飞机、舰艇、装甲、汽车的发动机状态实时采集与监测，该技术具有灵活的设计能够很好的满足用户的不同需求，具有很好的通用性。

参考文献：

[1] 谢宏军, 张 涛, 王 超. 智能仪器仪表 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007  
[2] 肖忠祥. 数据采集原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001.  
[3] 郑 胜. 基于 PC104 主板的嵌入式数据采集系统的研制 [D]. 西安: 西北工业大学, 2002.  
[4] 张永孝. 直升机飞控系统的计算机冗余设计 [J]. 航空计算技术, 1996 (3): 20-24.  
[5] 黄贤武, 郑筱霞. 传感器原理与应用 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1999.