

# 基于 TTCN-3 的宽带载波通信一致性测试系统设计

张海龙, 刘 宣, 李 然, 唐 悦

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 电力线载波通信技术正在从窄带向宽带发展, 宽带载波通信已成为近年来电力线载波通信研发和应用的热点, 为保证不同厂商研发的宽带电力线载波通信设备符合协议规范要求并能够互联互通, 对其进行一致性测试十分必要; 基于 TTCN-3 测试框架和 Titan 开发平台设计了宽带载波通信协议一致性测试系统, 提出了一致性测试系统软件和硬件设计方案, 阐述了测试系统各部分的实现机制及关键技术; 在深入研究宽带载波通信协议的基础上, 针对物理层、链路层和应用层分别设计了不同的测试用例, 构建测试环境并进行一致性测试, 可对被测系统协议实现的正确性进行判决; 对推进宽带电力线通信的标准化和互联互通具有积极意义。

**关键词:** 电力线通信; 宽带; 一致性测试; 用电信息采集; 电能表

## Design of Broadband PLC Conformance Testing System Based on TTCN-3

Zhang Hailong, Liu Xuan, Li Ran, Tang Yue

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Power line communication technology is developing from narrowband to broadband, and broadband power line communication has become a hot spot in the research and application of power line carrier communication in recent years. Protocol conformance test plays a necessary and important role in guaranteeing that broadband power line communication devices meet the standards and achieve interoperability. A broadband PLC conformance testing system is designed based on TTCN-3 framework and Titan development platform. The software and hardware implementation scheme for conformance testing platform is proposed and the mechanisms of each module as well as key techniques are described. Different test cases aiming at PHY layer, MAC layer and APP layer are designed according to broadband PLC protocol, and finally test cases are executed based on testing environment. The work is of significance for promoting the broadband PLC standardization and interoperability.

**Keywords:** power line communication; broad-band; protocol conformance test; AMI; meter

## 0 引言

电力线载波通信 (power line communications, PLC) 技术已广泛应用于国外用电信息采集或高级计量系统 (AMI) 的各个场合, 在国内也已经普遍应用于自动抄表领域。除了用电信息采集外, 电力线载波通信技术还可广泛应用于智能家居、楼宇控制和物联网等领域。当前电力线载波通信技术正在从窄带向宽带发展, 宽带载波通信已成为近年来电力线载波通信研发和应用的热点技术, 目前中国电力企业联合会、国家电网公司、南方电网公司均正在制定或已经制定面向用电信息采集系统的宽带载波通信数据传输协议, 可以预见宽带电力线通信技术有着广泛而重要的应用前景。

在宽带载波通信数据传输协议制定以及宽带载波通信技术研发的过程中, 需要同步研究宽带载波通信一致性测试技术和系统。通过一致性测试, 既可以验证协议的某个实现是否与所遵从的协议规范保持一致, 同时也是保证不同设备厂商研发的通信设备能够互联互通的基础。因此, 宽带载波通信协议一致性测试系统的研发对于推进宽带载波通信的标准化和设备互联互通具有十分重要的意义。

本文依据国家电网公司企业标准 Q/GDW11612-2016《低压电力线宽带载波通信互联互通技术规范》的设计机制,

收稿日期: 2018-01-09; 修回日期: 2018-02-02。

基金项目: 国家电网公司科技项目 (JLB17201700041)。

作者简介: 张海龙 (1988-), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力线载波通信、无线通信方向的研究。

基于 TTCN-3 (Testing and Test Control Notation) 测试框架提出了宽带载波通信协议一致性测试方案并研发了测试系统。根据一致性测试理论及宽带电力线通信协议设计开发测试系统平台和测试用例, 利用一致性测试开发软件 Eclipse Titan 开发并执行测试套件, 对待测设备进行测试, 验证了所提出的宽带载波通信协议一致性测试系统设计的可行性。

## 1 宽带载波通信协议

宽带载波通信数据传输协议规定了面向电力用户用电信息采集系统的宽带载波通信网络的物理层、数据链路层和应用层技术, 及适用于用电信息采集系统的集中器通信单元与电能表通信单元、采集器通信单元之间的数据交换机制。宽带载波系统构成的电力线通信网络中, 定义了三种设备角色: 中央协调器 (CCO)、代理协调器 (PCO) 以及站点 (STA)。CCO 为网络中的主节点, 负责完成组网控制、网络维护管理和用电信息采集等功能, 其对应的设备实体为集中器本地通信单元; PCO 和 STA 对应于安装在电能表、采集器的通信单元设备, 其中 STA 为网络中从属节点, PCO 在网络中作为中继节点连接 CCO 和 STA。

在组网过程中, 宽带电力线通信网络一般会形成以 CCO 为中心, 以 PCO 为中介代理, 连接所有 STA 的多层级树形网络, 如图 1 所示为典型的宽带电力线通信网络拓扑结构。

宽带电力线通信网络的协议栈如图 2 所示, 包括物理层、数据链路层、网络层、传输层以及应用层。通常在宽带电力线组网环境下, 网络层和传输层可以省略。

应用层实现了通信单元之间的业务数据交互, 通过数据

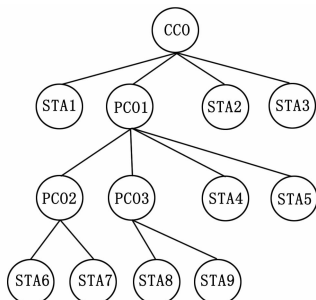


图 1 宽带电力线通信网络拓扑结构

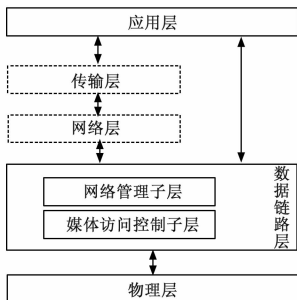


图 2 宽带电力线通信网络协议栈

链路层和物理层完成数据传输。数据链路层分为网络管理子层和媒体访问控制 (MAC) 子层, 网络管理子层实现宽带电力线通信网络的组网; MAC 子层通过 CSMA/CA 和 TDMA 两种信道访问机制访问物理信道, 实现报文的可靠传输。物理层的主要功能是进行发送端编码和调制, 以及接收端解调和译码。

## 2 协议一致性测试

### 2.1 基于 TTCN-3 的一致性测试框架

一致性测试是指检测协议的某个实现与所对应的协议规范是否一致, 即在特定的网络环境下, 利用测试序列对被测协议实现进行黑盒测试, 通过比较被测协议实现的响应与协议规范是否一致从而得到测试判决<sup>[1]</sup>。协议一致性测试的原理如图 3。

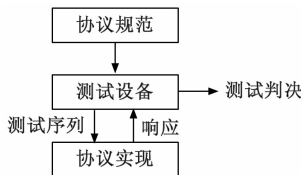


图 3 一致性测试原理

针对协议一致性测试, 国际标准化组织制定了 ISO/IEC 9646 协议一致性测试方法和框架。其中 ISO 9646-3 定义了协议测试领域专用的标准化测试描述语言, 其最新版本为 TTCN-3。TTCN-3 由 ETSI (European Telecommunications Standards Institute, 欧洲电信标准协会) 维护, 已广泛应用于 3GPP, DSL, IPv6, GSM, LTE 等各种通信系统的协议一致性测试<sup>[2]</sup>。

TTCN-3 测试系统框架<sup>[3]</sup>如图 4。各个实体功能如下: TTCN-3 执行 (TTCN-3 Executable, TE) 实体负责解释和执行测试集; 被测设备适配 (SUT Adapter, SA) 实体实现测试系统与 被测系统 (SUT) 的通信; 平台适配 (Platform Adapter, PA) 实体实现系统定时器功能; 编解码 (Code-de-

code、CD) 实体负责 TTCN-3 数据类型与比特串的转换; 测试管理 (Test Management, TM) 实体负责管理和控制整个测试系统; 测试日志 (Test Logging, TL) 实体负责记录测试执行日志; 组件句柄 (Component Handling, CH) 实体负责组件的管理<sup>[4]</sup>。

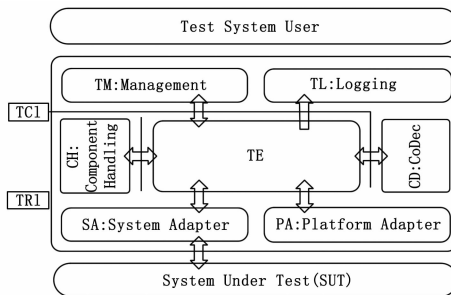


图 4 TTCN-3 测试系统框架

TRI 和 TCI 接口由 TTCN-3 规范定义, 负责实体间的交互<sup>[5]</sup>。测试开发人员需要依据测试系统需求来实现相应的实体, 如 SA、PA、CD 实体。

### 2.2 一致性测试开发平台 Titan

Titan 是由爱立信公司开发的基于 Eclipse 平台的开源 TTCN-3 协议集成测试开发和执行环境<sup>[6]</sup>。Titan GUI 提供以下的 Eclipse 平台插件:

- 1) Designer: 用于开发 TTCN-3/ASN.1 源码, 生成可执行测试套;
- 2) Executor: 控制测试脚本的执行;
- 3) LogViewer: 以表格、文本和图形格式表示测试日志, 并提供测试日志到源码的导航;
- 4) Titanium: 提供代码质量保证, 如模块导入结构的可视化、代码重构等。

Titan 提供了完整的 TTCN-3 开发和执行功能。作为开源的软件平台, 使用 Titan 进行一致性测试平台开发, 相比于其他商业软件 (如 TWorkbench<sup>[7]</sup>) 更便于测试平台的使用以及推广。因此, 宽带电力线通信协议一致性测试平台使用 Titan 进行开发。

## 3 测试平台设计

依据设计要求, 测试平台需要支持以下具体测试功能及性能指标:

- 1) 从协议层次来看, 平台需要支持对物理层、链路层以及应用层的测试;
- 2) 从被测对象角色来看, 平台需要支持对不同角色的测试, 包括 CCO、PCO 以及 STA;
- 3) 从协议测试的内容来看, 平台需要支持对 SUT 的组网、维护以及抄表功能等协议机制的测试;
- 4) 测试平台可根据实际模拟载波信道的特性, 如信道衰减、信道噪声及干扰。

根据上述需求, 以及一致性测试原理及网络拓扑结构, 设计的测试平台总体架构如图 5 所示。一致性测试平台由软件平台和硬件平台两部分组成。软件平台通过网口经以太网交换机与硬件平台各部分相连。软件平台运行于上位机上, 产生各种测试用例; 硬件平台完成信号收发及信道模拟功能, 将测试帧转换为所需的宽带载波通信信号或反之。进行一致性测试时,

测试软件平台产生的测试序列经由测试硬件平台发送给 SUT，然后接收 SUT 的响应并进行测试判决。

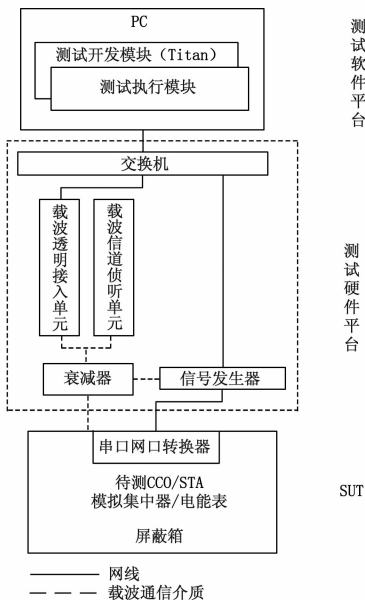


图 5 测试平台总体架构

### 3.1 测试软件平台

测试软件平台分为测试开发模块和测试执行模块两部分。测试开发人员通过测试开发模块实现相关接口，编写测试用例，编译可执行测试套件；而测试执行人员通过测试执行模块输入硬件控制信息、选择和执行测试集、记录并分析测试日志、获得测试判决结果。将测试开发环境与测试执行模块解耦，使得测试执行人员仅需关心测试的执行，而无需接触测试套件的开发，大大简化了测试人员的操作。

#### 3.1.1 测试开发模块

测试开发环境基于 Eclipse Titan 平台，为支撑上层模块（即测试执行模块）的测试执行功能，实现测试用例的交互流程，测试开发模块需要实现测试软件平台与被测系统之间的通信。

由于测试软件平台收发时使用 TTCN-3 类型的数据，无法直接与 SUT 进行通信，所以测试软件平台收发的数据需要进行 TTCN-3 类型与协议二进制串之间的转换，该功能由 CD 实体实现。在 CD 中，编解码函数按照协议层级进行划分和设计，不同层级的报文进行组帧或解帧时调用对应的编解码函数。基于网络协议栈，构造了 4 组编解码函数，分别对应链路层、应用层、Q/GDW 1376.2 报文<sup>[8]</sup>和 DL/T 645<sup>[9]</sup>报文。图 6 所示为报文接收时的解码流程。

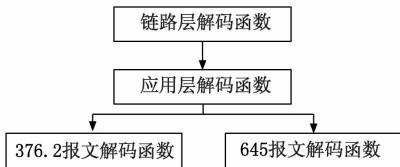


图 6 报文解码流程

为了实现测试软件平台与透明物理设备、测试工装、衰减器、信号发生器等物理设备之间的通信，需要测试开发人员实

现相应的通信接口，这部分功能在 SA 实体实现，其通过 Socket 接口利用 TCP 协议实现与硬件平台间的数据交互。

由于宽带协议采用了 TDMA 和 CSMA/CA 机制，为保证时隙收发的准确性，需要在测试系统中实现数据帧的精确定时收发。在设计中我们将时间戳的产生以及精确收发时隙的控制放到硬件平台来实现，由硬件平台保证信道收发的精确定时，而软件平台只负责测试内容的产生和测试的运行判决，这样对软件测试平台定时器的精度要求大大降低，其最小定时大约需要 30 ms，故在软件平台中使用了上位机默认的系统定时器即可满足定时要求。

基于上述功能实体的实现，测试开发平台能够提供给测试执行平台完整的底层功能支持。由 Titan 平台提供测试用例解释执行的能力，通过 PA 实体进行定时操作，由 CD 实体编解码数据帧，再通过 SA 模块交由硬件平台进行数据帧收发。

#### 3.1.2 测试执行模块

测试执行模块如图 7 所示，包括以下 5 个部分：

- 1) 用户界面负责接收用户输入的相关控制信息，并输出得到的测试结果和日志信息；
- 2) 硬件设备控制单元通过调用相应的函数与硬件设备之间进行通信，实现对硬件设备的参数配置；
- 3) 测试流程监视器用于收集脚本的执行结果和日志信息；
- 4) 测试结果保存模块负责将日志信息保存至本地；
- 5) 脚本执行控制器控制测试用例的执行。测试用例脚本集是测试脚本经过 Titan 编译后形成的可执行文件，即可执行测试套件。脚本执行控制器通过调用测试执行人员选择的测试集所对应的可执行测试套件来执行测试用例。

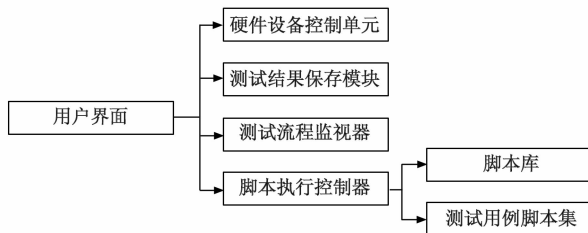


图 7 测试执行模块

### 3.2 测试硬件平台

测试硬件平台主要包括载波透明物理设备、测试工装、衰减器、信号发生器等物理设备或模块。

载波透明物理设备需要具备收发数据的功能，主要实现协议物理层和部分 MAC 子层的功能。实际中载波透明物理设备分为载波透明接入单元和载波信道侦听单元，分别实现报文的发送和接收。透明接入单元负责将软件平台组织的数据发送到载波通信介质，并根据需求自动回复 SACK；信道侦听单元负责将载波通信介质里的所有数据实时发送给软件平台，供其进行分析判断。

测试工装在测试系统中主要扮演集中器/电能表或透传通道的角色。它需要实现两种工作模式：第一种模式下，测试工装可以作为集中器/电能表，为被测 CCO/STA 分配地址，协助系统的组网，同时测试工装还需要能够自主的开启一些流程（如抄表流程）的运行或数据的应答；另一种模式下，测试工装只需承担通信转发的工作，为测试软件平台与被测 CCO/STA 之间的通讯提供一个透明的通道。

可编程衰减器用来模拟信号在实际路径传输中所面临的信号衰减, 最大衰减为 120 dB。信号发生器承担的任务, 一是向通信信道中注入噪声以模拟信道噪声, 二是在抗频偏测试时给发射机提供可调整的时钟信号。可注入的噪声和干扰信号包括: 带宽 25 MHz, 功率为 -30 dBm 的高斯白噪声; 频段 1: (1 MHz, -20 dBm)、(3 MHz, -30 dBm)、(6 MHz, -30 dBm), 频段 0: (1 MHz, -20 dBm)、(8 MHz, -30 dBm)、(15 MHz, -20 dBm) 的窄带干扰; 脉冲频率 100 kHz, 脉宽 1 μs, 幅值 4 V 的脉冲信号。测试软件可对信号发生器的波形、频率、带宽、功率等参数进行控制, 产生测试所需的各种信号。

### 4 测试集设计

设计测试集要遵循两个基本原则: 一是要求设计的测试集在针对协议正常流程进行测试的同时, 也要考虑异常和极限场景; 二是要求测试集尽量做到完备覆盖, 并且要避免测试集冗余。

#### 4.1 测试集划分

在深入研究宽带载波通信协议<sup>[10]</sup>的基础上, 借鉴黑盒测试法, 针对物理层、链路层和应用层分别设计了不同的测试用例。

物理层测试集主要是测试物理信道传输的可靠性和有效性。其测试集如图 8 所示。测试例包括白噪声功能、抗衰减、ToneMask 功能、TMI 模式遍历等。

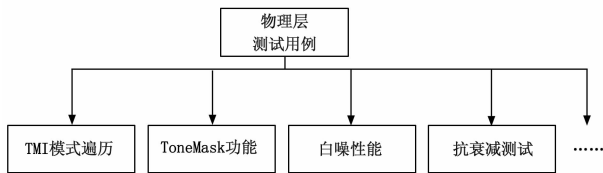


图 8 物理层测试集

链路层测试集如图 9 所示, 主要包括组网功能测试、信标测试、冲突退避测试以及网络维护测试等测试用例。

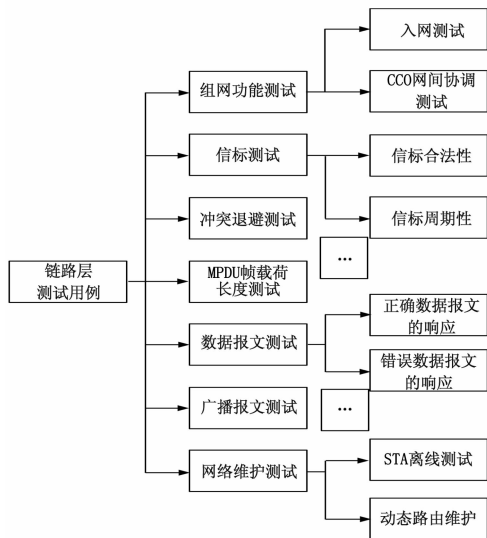


图 9 链路层测试集

应用层的功能是实现智能抄表, 测试用例主要包括 STA 和 CCO 的抄表功能测试。

### 4.2 编写测试脚本

以单网络环境下的 STA 主动入网流程说明测试用例的设计过程。该测试中, 测试平台的角色为 CCO, 被测设备为 STA, 以 STA 成功发出发现信标为测试结束 (见图 10)。

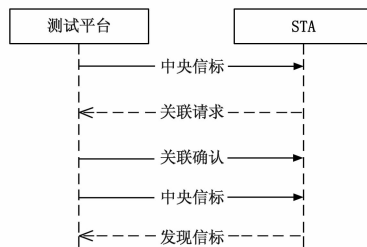


图 10 STA 主动入网流程

具体流程如下:

- 1) 测试平台模拟 CCO 的角色向被测设备发送中央信标帧, 启动定时器 T1;
- 2) 在定时器 T1 超时前, 测试平台正确收到了被测设备发送的关联请求报文, 则停止定时器, 并向被测设备发送关联确认报文, 启动定时器 T2; 如果定时器 T1 超时, 或者接收非关联请求报文, 则判失败;
- 3) 在定时器 T2 超时后, 测试平台向被测设备发送中央信标帧 (启动定时器 T3);
- 4) 在定时器 T3 超时前, 测试平台正确收到了被测设备发送的发现信标帧, 则停止定时器 T3, 并判通过; 如果定时器 T3 超时或者接收到非发现信标帧, 则判失败。

在测试开发环境中, 根据宽带载波通信协议中定义报文结构, 使用 TTCN-3 语言定义相关的报文格式。信标帧定义如图 11 所示。

```

type record Beacon_FC
{
    bitstring delimiter length(3),
    bitstring networkType length(5),
    octetstring netwrokID length(3),
    octetstring timeStamp length(4),
    bitstring source_tei length(12),
    bitstring copy_type length(4),
    bitstring symbol_count length(9),
    bitstring pahse length(2),
    bitstring block_count length(3),
    bitstring reserve length(6),
    bitstring version_1 length(4)
}

```

图 11 信标帧格式定义

根据入网流程, 基于 TTCN-3 语言编写的测试用例定义如图 12 所示。

测试用例编写完成后, 通过内嵌的 Titan 编译器将用例代码脚本编译为可执行文件。

一致性测试的测试用例目前总计 123 例, 物理层测试例有 2 个; 链路层测试例有 88 个; 应用层测试例有 33 个。

### 5 测试验证

仍以单网络环境下的 STA 主动入网流程为例验证软件工作流程和测试结果。该测试中, 测试平台模拟 CCO 的角色, 被测设备为 STA, 以 STA 成功发出发现信标为测试结束。

测试过程中 TTCN-3 软件平台显示的测试平台和被测设备的报文交互结果如图 13 所示。

```

testcase sta_join_network() runs on
    CCO system SystemInterface
{
    map(mtc:test_port, system:test_port);
    var Beacon_Para para;
    para.mpdu_type := 0;
    var MPDU beacon := GetBeacon(para);
    var MPDU join_request;
    timer TL_T := 0.5;
    test_port.send(beacon);
    TL_T.start;
    alt
    {
        [] TL_T.timeout {
            setverdict(inconc, "Join Request Timeout!");
            stop;
        }
        [] test_port.receive(MPDU:?) -> value join_request {
            TL_T.stop;
        };
    }
    if (join_request.mpdu_type != 2) //判断是否为关联请求
    {
        setverdict(fail, "Reply Err. Not a Join Request");
        stop;
    }
    //此处省略若干
    if (discovery_beacon.mpdu_type != 1)
        //判断是否为发现信标
    {
        setverdict(fail, "Reply Err. Not a discovery Beacon!");
        stop;
    }
    setverdict(pass, "Get discovery Beacon");
    unmap(mtc:test_port, system:test_port);
}

```

图 12 入网测试用例

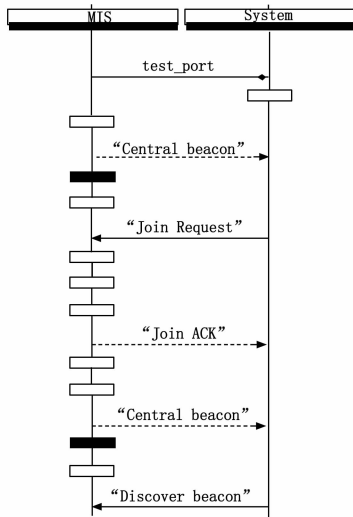


图 13 测试平台和被测设备报文交互结果

(上接第 43 页)

波变换和离散小波变换的原理进行了介绍。第二部分接着利用 Matlab/Simulink 软件开展了仿真建模和程序编程的工作，验证了连续小波变换在传感器故障检测中的应用效果，从仿真得到的具体结果来看，仿真故障检测的效果良好。文章还按照传感器故障原因分类，依据计算机仿真实现方法对传感器偏置故障、开路故障在 Matlab 平台下进行了故障诊断的仿真，均得到了较好的效果。可以说，小波分析方法能够避免抽取对象的数学模型，适用性较强，不仅能诊断多数常见传感器故障类型，而且诊断故障的准确性较高。

参考文献:

[1] 王逍梦, 任章. 基于小波变换的二阶传感器故障诊断研究 [J]. 兵工自动化, 2013 (5): 74-78.

[2] 齐涛, 倪原, 徐宁. 基于小波变换的微弱生命信号去噪问题研究 [J]. 生命科学仪器, 2009 (10): 20-23.

[3] 刘李鹏, 高智勇, 刘向明. 基于小波变换的模板大值图像边缘检

对比图 10 中的 STA 主动入网流程, 可以发现图 13 中测试平台与被测设备的交互流程与测试例设计完全符合, 该条测试例验证通过。

6 结论

本文在业界首次设计并实现了基于 TTCN-3 的宽带电力线通信一致性测试平台。目前已经进行了百余个测试用例的一致性测试, 测试结果表明测试平台能够正确地执行测试用例, 对被测系统协议实现的正确性进行判决, 达到了系统所需的功能和性能需求, 为验证宽带载波通信设备实现的一致性以及实现互联互通奠定了良好基础。后续工作中将根据宽带协议设计和业务发展的需要, 继续改进和完善测试集, 推动宽带载波通信技术的发展和應用。

参考文献:

[1] 谭喜堂, 等. HDLC 协议一致性测试系统的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014 (1).

[2] TTCN-3 [EB/OL]. <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/testing/ttcn-3>, 2017.

[3] ETSI ES 201 873-1 V2.2.1. Methods for Testing and Specification (MTS); The Testing and Test Control Notation version 3; Part 1; TTCN-3 Core Language [S]. 2017.

[4] 吴礼发. 网络协议工程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.

[5] ETSI ES 201 873-5 V4.8.1. Methods for Testing and Specification (MTS); The Testing and Test Control Notation version 3; Part 5; TTCN-3 Runtime Interface (TRI) [S]. 2017.

[6] EclipseTitan [EB/OL]. <https://projects.eclipse.org/projects/tools.titan>, 2017.

[7] TTWorkbench [EB/OL]. <https://www.spirent.com/Products/TTworkbench>, 2017.

[8] 中国电力科学研究院等. Q/GDW 1376.2-2013 电力用户用电信息采集系统通信协议 第 2 部分: 集中器本地通信模块接口协议 [S]. 2013.

[9] 中国电力科学研究院等. DL/T 645-2007 多功能电能表通信协议 [S]. 2007.

[10] 中国电力科学研究院, 等. Q/GDW 11612-2016 低压电力线宽带载波通信互联互通技术规范 [S]. 2017.

测算法 [J]. 中南民族大学学报 (自然科学版), 2006 (4): 42-45.

[4] 吕纯洁, 姚永玉, 江浩. 历史时序数据相似性提取方法在机械故障诊断中的应用 [J]. 机械研究与应用, 2009 (2): 21-23.

[5] 宋新, 刘次华, 甄新. 奇异点检测的小波方法在信号初至时提取中的应用 [J]. 湖北汽车工业学院学报, 2001 (2): 37-40.

[6] 黄治军. 基于小波分析的传感器故障诊断研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004: 31-53.

[7] 郑见阳. 基于 STF 的飞控系统传感器故障诊断研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2015: 29-32.

[8] 丁亦农. Simulink 与信号处理 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

[9] 李衍达, 郑大钟. 现代故障诊断与容错控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

[10] 陈杰, 黄鸿. 传感器与检测技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.

[11] 杨军, 冯振声, 黄考利. 装备智能故障诊断技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.