

数字专网的通信终端与加密组件测试系统设计

孟珞珈, 郭元兴, 刘皓

(中国电子科技集团公司 第30研究所, 成都 610041)

摘要: 为提高数字专网的通信终端与配套加密组件测试效率, 降低实装测试环境的构建、运维及人力成本, 开展了基于半实物仿真的测试系统设计; 对通信终端与加密组件的测试需求进行了分析, 提出并实现了一种模拟数字专网的通信链建流程和加密通信业务流程的方法; 采用了通用AXIe(仪器与测试高级电信计算架构的扩展)测试平台与扩展测试仪器的架构进行系统设计, 实现与不同测试对象的物理接口适配、信号调理以及报文数据交互控制, 为通信终端及加密组件的加密业务成功率测试、语音质量评测以及远供工作电流测量提供自动化测试技术手段; 经验证, 测试系统通信链路时延 <100 ns, 可为通信终端提供良好的语音质量评测环境, PESQ(感知语音质量评测模型)测试 ≥ 4.20 , 可支持加密业务成功率指标 $\geq 99.9\%$ 的无人值守测试。

关键词: 通信终端与加密组件; 测试系统; 半实物仿真; 模拟数字专网; AXIe平台

Design of Test System for Communication Terminal and Encryption Components of Digital Private Network

MENG Luoja, GUO Yuanxing, LIU Hao

(No. 30 Institute of CETC, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to improve the test efficiency of digital private network communication terminal and corollary encryption components, and reduce the construction, operation, and labor costs of practical testing environments, a design of testing system based on hardware-in-the-loop simulation is carried out; Analyze the testing requirements of communication terminal and encryption components, propose and implement a method for simulating the communication chain construction process and encryption communication service process of digital private network; the architecture of general Advanced TCA eXtensions for Instrumentation and Test (AXIe) test platform and extended test instruments is adopted to design the system, the physical interface configuration and signal modulation and message data interaction control with different test objects are realized through the test instrument, it provides automated testing technology means for the success rate of encryption service, voice quality evaluation and remote working current measurement of communication terminal and encryption components; After the verification, the communication link delay of the test system is less than 100 ns, it can provide a good voice quality evaluation environment for the communication terminal, and the tested perceptual evaluation of speech quality (PESQ) is not less than 4.20, it can support unmanned testing, with a success rate of encryption service not less than 99.9%.

Keywords: communication terminal and encryption components; testing system; hardware-in-loop simulation; analog/digital private network; AXIe platform

0 引言

随着数字通信技术发展, 数字专网在特定行业领域中得到广泛应用, 通信终端及配套加密组件是数字专网的重要组成部分, 为用户提供安全的语音及数据通信业务。当前通信终端及加密组件进行批量生产测试时需要基于数字专网构建实装测试环境, 但由于数字专网组成复杂、部件多体积大、硬件成本高, 需专业人员进行组装、开通与维护, 且对场地的操作空间、安全性、供电稳定性、散热措施均有较高要求, 因此实装环境无法直接建在生产车间, 导致生产时需要在装配线与实装环境之间频繁转运, 不能满足“装调检”一体化生产的要求; 此外, 由于自动化测

试手段欠缺, 在对通信终端加密业务成功率进行测试时, 需要安排大量人力分成若干小组进行上千次的重复拨打和记录, 劳动量大且容易出现误操作, 严重影响测试效率和测试质量。

为解决上述问题, 需设计一种体积小、成本低的测试系统, 该系统以实时仿真机为核心, 通过模块化定制接口, 实现动态特性的半实物仿真-软硬件环境^[1-2], 取代数字专网实装, 对通信终端及加密组件进行测试。通信终端形态为整机, 加密组件形态为嵌入式模块, 测试系统在设计上需满足既能对加密组件进行独立测试, 也能对通信终端安装加密组件后的整机功能进行测试两种需求, 因此需采用通

收稿日期: 2024-03-29; 修回日期: 2024-04-10。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3302104)。

作者简介: 孟珞珈(1979-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 孟珞珈, 郭元兴, 刘皓. 数字专网的通信终端与加密组件测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 78-85.

用性强、标准和规范的测试体系架构, 提高对产品的测试能力。随着现代计算机技术、集成电路技术和信号处理技术的不断进步与完善, 为自动化检测技术提供了源源不断的发展动力^[3-4]。AXIe 测试系统保留了 ATCA 的电源分配、电源、系统管理、以太网及 PCIe 通信方式, 采用分层体系架构, 建立在 AdvancedTCA 标准的基础上, 其目标是创建一个由各种元器件、产品和系统组成的生态系统^[5-9]。AXIe 标准可提供最大的可扩展性, 满足各种测试平台需求, 包括通用机架堆叠式系统、模块化系统、半导体 ATE 系统, 以及工作台和模块插件^[10-13]。

本文提出一种基于半实物仿真的数字专网的通信终端与配套加密组件测试系统, 采用“AXIe 测试平台+定制测试仪器”架构进行设计, 以 AXIe 测试平台作为处理核心, 通过扩展测试仪器实现与不同测试对象的物理接口适配、信号调理、数据交互控制, 通过模拟数字专网的通信建链流程和加密通信业务流程, 为通信终端及加密组件的加密业务成功率测试、语音质量评测以及远供工作电流测量提供自动化测试环境, 达到降本增效的重要目的。

1 系统组成及原理

1.1 系统组成

测试系统组成如图 1 所示, 由测试系统硬件和测试系统软件两部分组成。测试系统硬件主要由 AXIe 测试平台、通信终端测试设备、密钥分发组件、语音质量分析仪和数字万用表组成。AXIe 测试平台作为测试系统的主控平台, 运行测试系统软件, 对外提供外设接口, 用于通信终端测试设备以及通用外设的接入, 并提供测试单元实现加密组件和密钥分发组件的接入。通信终端测试设备提供通信终端线路接口和程控接口用于通信终端的接入, 提供电流测试端口和仪器控制接口用于数字万用表的接入与控制, 提供拉距接口实现远距离通信线缆的接入, 实现对通信终端的接口适配、通信线路信号的调制解调与传输控制, 并通过模拟数字专网的通信建链流程, 构建全双工数字通信链路。密钥分发组件实现对通信终端加密组件的密钥分发; 语音质量分析仪用于对通信终端在测试系统构建的通信环境下的语音质量进行评测分析; 数字万用表实现对通信终端工作电流的实时测量。

测试系统软件提供测试人机交互界面, 实现测试过程的自动化控制, 主要由加密组件测试软件和通信终端测试软件两部分组成。其中加密组件测试软件实现对加密组件业务功能的批量测试; 通信终端测试软件实现对通信终端加密业务成功率测试以及工作电流测量。

测试时, 需先通过测试系统对加密组件进行测试验证, 再将测试通过的加密组件安装到通信终端内, 通过测试系统对通信终端进行测试。

1.2 加密组件测试原理

加密组件测试场景如图 2 所示, 测试前需将被测加密组件和密钥分发组件插接到 AXIe 测试平台对应的测试单元上, AXIe 测试平台可支持最多 10 个加密组件批量接入测

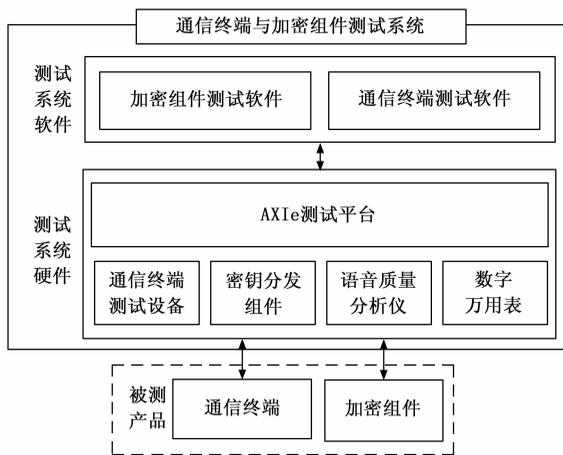


图 1 测试系统组成图

试。测试时, 加密组件测试软件通过模拟密钥分发流程控制密钥分发组件对加密组件进行工作密钥分发, 再模拟业务流程对加密组件的加密和解密功能进行检测。

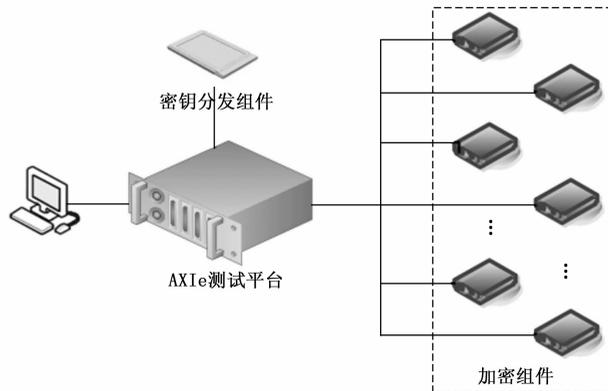


图 2 加密组件测试场景

1.3 通信终端测试原理

通信终端测试场景如图 3 所示, 将测试通过的加密组件嵌入安装到通信终端内, 再将通信终端接入到通信终端测试设备, 接入方式是通信终端的线路接口通过电话线连接到通信终端测试设备的线路接口, 通信终端的程控接口通过数据通信线缆连接到通信终端的程控接口, 通信终端测试设备可支持最多 6 台通信终端同时接入。测试内容包括通信终端语音质量评测、通信终端加密业务成功率测试和工作电流测量。

1.3.1 数字专网通信链路模拟原理

通信终端的测试需要通过测试系统模拟数字专网的通信建链流程, 构建全双工数字通信链路, 该功能由通信终端测试设备 FPGA 上运行的通信链路模拟单元实现。测试前, 需通过通信终端测试软件对测试参数进行配置, 配置内容主要包括端口号码表以及与号码绑定的工作密钥, 并将测试参数下发至通信链路模拟单元。通信链路模拟单元运行流程如图 4 所示, 包括:

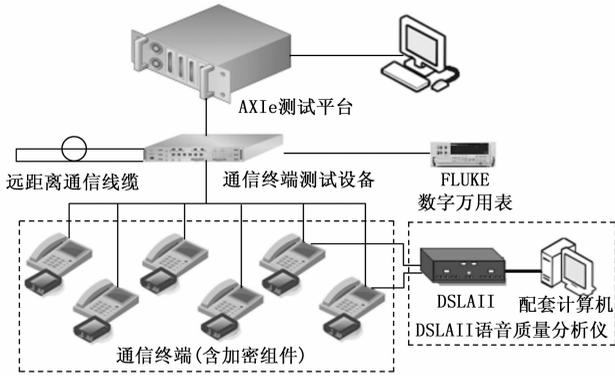


图 3 通信终端测试场景

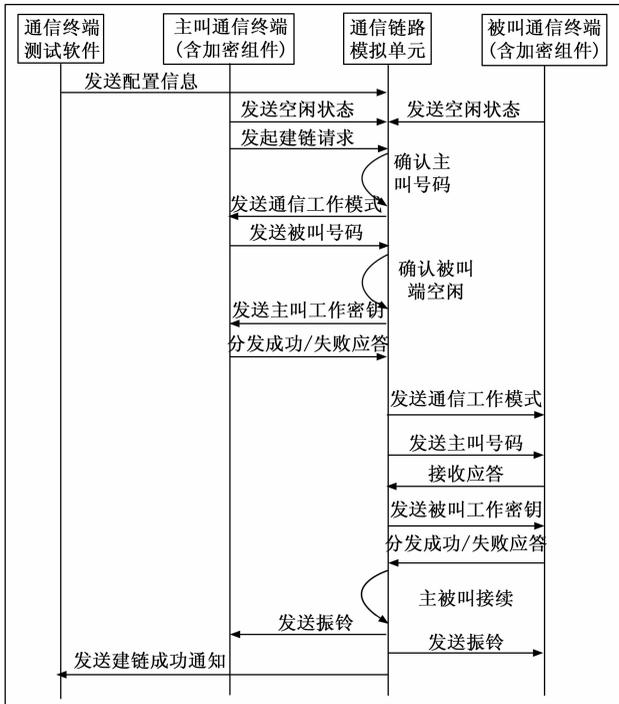


图 4 通信链路模拟单元运行流程图

1) 主叫通信终端发起建链请求后，通信链路模拟单元首先通过呼叫端口确认主叫号码，并向主叫通信终端发送通信工作模式，接着接收主叫通信终端发送的被叫号码，在被叫号码接受完成后，通信链路模拟单元在配置参数中查找到该号码，确认该号码对应的通信终端处于空闲状态后，通过主叫通信终端向主叫加密组件发送主叫工作密钥，并接收主叫加密组件返回的分发成功应答；若被叫号码查找失败则向主叫通信终端发送拆线指令，向测试软件发送建链失败通知；

2) 通信链路模拟单元依次向被叫通信终端发送通信工作模式以及主叫号码，等待被叫通信终端返回应答后，通过被叫通信终端向被叫加密组件发送被叫工作密钥，并接收被叫加密组件返回的分发成功应答；

3) 通信链路模拟单元在确认收到主被叫通信终端返回

的分发工作密钥成功应答后，将主叫通信终端与被叫通信终端对应的输入输出数字信号进行接续，并向通信终端两端发送振铃指令，向测试软件发送建链成功通知；

4) 通信链路模拟单元保持接续状态，当接收到通信终端发送的拆除链路指令后，拆除当前链路，并向通信终端发送挂机指令，向测试软件发送链路拆除通知。

1.3.2 通信终端语音质量评测原理

语音质量评测是评判通信终端性能的重要手段，分为主观评测和客观评测两大类，主观评测由人来完成，客观评测则是通过专业评测仪器自动判别语音质量^[14-15]。客观评测中通常采用 PESQ，它是将时间排列技术和精确感知模型相结合的产物，对通信中的语音延时、环境噪声等有较好的抑制性，同时又考虑到了端到端的时延，可用于评测不同类型的网络^[16-17]。通常认为 PESQ 得分在 4.0~4.5 分之间为高质量数字化语音，接近于透明信道编码。得分在 3.5 分左右，能感到通话质量有所下降，但不妨碍正常通话。得分在 3.0 以下，虽然有较高的可懂度，但自然度较差^[18-19]。

通信终端语音质量评测环境构建原理如图 5 所示，语音质量分析仪采用 Malden 公司的 DSLAII，测试过程描述如下：

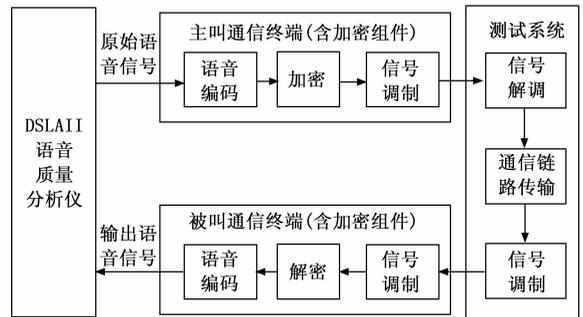


图 5 语音质量评测环境构建原理

1) 将主被叫通信终端的线路接口通过电话线连接到测试系统通信终端测试设备的线路接口，将主被叫通信终端的话柄线连接到语音质量分析仪的 Handset 接口，主被叫通信终端进入到加密通信状态后，操作语音质量分析软件进行评测；

2) DSLAII 语音质量分析仪发送原始语音信号到主叫通信终端，由主叫通信终端将原始语音信号进行语音编码、调用加密组件加密、进行信号调制后发送到测试系统；

3) 测试系统对信号进行解调处理后，通过通信链路传输和信号调制，输出到被叫通信终端；

4) 被叫通信终端对信号进行解调、调用加密组件解密、通过语音解码后还原为语音信号输出到语音质量分析仪；

5) 语音质量分析仪将原始信号以及通过测试系统后的输出语音信号进行电平调整与滤波、时间调整与校准、听觉转换处理，经过转换后的语音信号间的失真度测量作为扰动差值，在时间和频率上累积形成 PESQ 分数，最后映

射得到主叫通信终端的 MOS 分值, 计算公式如 (1) 所示:

$$PSEQMOS = 4.5 - 0.1d_{SYM} - 0.0309d_{ASYM} \quad (1)$$

其中: d_{SYM} 为平均对称干扰度, d_{ASYM} 为平均非对称干扰度。

1.3.3 通信终端加密业务成功率测试原理

通信终端支持通过程控接口进行拨号、摘机以及数据通信等操作, 因此采用无人值守的方式进行加密业务成功率测试采用可释放大量人力。在测试前在通信终端测试软件上进行测试号码和测试循环次数配置, 测试流程启动后, 通信终端测试软件读取配置并执行无人值守循环测试, 流程包括:

1) 通信终端测试软件通过程控接口向主叫通信终端发送“程控拨号+被叫号码”指令, 主叫通信终端收到指令后, 自动拨打被叫通信终端号码;

2) 测试系统控制主被叫通信终端完成通信建链;

3) 通信终端测试软件判断通信建链成功后向被叫通信终端程控接口发送“程控摘机”指令, 通信终端双方进入数据加密通信工作状态;

4) 通信终端测试软件发起加密通信业务测试, 其原理如图 6 所示。通信终端测试软件通过测试系统将测试数据 A 发往主叫通信终端的程控接口; 主叫通信终端将测试数据 A 进行加密处理和调制后通过线路接口发往测试系统; 测试系统对信号进行解调处理后, 经过通信链路传输和信号调制, 输出到被叫通信终端; 被叫通信终端对信号进行解调和解密处理后发往测试系统; 测试系统将收到的解密后数据生成测试数据 B 发往通信终端测试软件;

5) 通信终端测试软件将测试数据 B 与测试数据 A 进行比对检验, 判断测试是否成功, 并在测试软件界面呈现测试结果;

6) 通信终端测试软件循环发起测试, 直到完成测试循环, 并判断加密业务成功率是否满足指标要求。

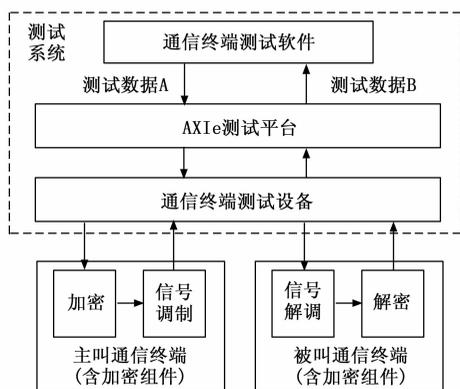


图 6 加密业务成功率测试原理

2 测试系统硬件设计

2.1 AXIe 测试平台设计

AXIe 架构继承了 ATCA 架构的主要特性, 并对数据传

输架构, 仪器板尺寸, 最大输出功率和散热等方面进行设计优化, 其主要结构包括机箱机架, 前面板和背板。其中机箱机架为整个系统提供机械支撑, 前面板主要实现具体的测试测量功能, 背板为前面板的互联提供支持^[20-21]。

AXIe 测试平台为标准 19" 桌面整机设备, 由机箱、总线背板、电源单元、主控单元、交换单元、加密组件测试单元以及密钥分发组件测试单元组成, 支持显示器等外设以及标准仪器的接入, 设计原理如图 7 所示。总线背板共提供 9 个独立槽位, 其中槽位 1~3 分别对应电源单元、主控单元和交换单元, 槽位 4~9 为扩展槽位, 同时配置 5 个加密组件测试单元和 1 个密钥分发组件测试单元; 总线背板提供电源线、控制总线 (I²C) 和业务总线 (Gbe), 电源单元进行交直流转换后输出 48 V 通过电源线对其它单元进行供电, 控制总线由主控单元作为主机对其它单元进行状态控制, 业务总线采用的交换拓扑结构为单星型结构, 传输协议采用标准以太网协议。主控单元与加密组件测试单元、密钥分发组件测试单元以及外接的通信终端测试设备之间通过交换单元进行业务数据交互。

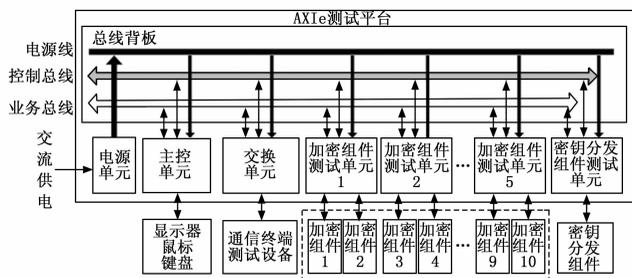


图 7 AXIe 测试平台

1) 主控单元设计: 主控单元是 AXIe 测试平台的核心处理单元, 运行桌面操作系统及测试系统软件, 在设计上采用了高性能 COMe 模块, 设计载板用于 VGA、USB、RS232 等通用外设接口及背板接口的扩展, 输出标准 ATX 电源供 COMe 模块工作, 通过 MCU 扩展出 I²C 连接到总线背板, 实现对 AXIe 测试平台内其它功能单元的控制。

2) 交换单元设计: 交换单元设计为二层交换机, 采用 JEM5396 作为以太网交换芯片, 实现主控单元与其它单元之间千兆网络数据交换, 交换单元设计了 11 路千兆以太网端口, 其中 1 路通过总线背板槽位 2 连接主控单元, 6 路分别连接到总线背板槽位 4~9, 剩下 4 路用于前面板对外以太网接口扩展, 交换单元上电时通过 MCU 的 SPI 接口对交换芯片进行初始配置。

3) 测试单元设计: 由于加密组件与密钥分发组件均为定制化设计, 因此需设计相应的测试单元实现对组件的物理接口适配、信号调理与供电控制。测试单元在设计上采用“FPGA+定制测试接口”的架构, 通过 FPGA 逻辑设计实现与组件之间的信号调理、通用测试协议与不同组件报文协议之间的转换控制、与主控单元之间的以太网数据通信。在测试接口设计上, 加密组件测试接口为 2 组独立的

RS232 业务总线+GPIO 控制总线，可同时适配 2 个加密组件；密钥分发组件测试接口为 Serdes 业务总线+GPIO 控制总线。

2.2 通信终端测试设备设计

通信终端测试设备硬件由电源单元、主处理单元、传输控制单元和测试接口单元组成，支持最多 6 台通信终端接入测试，设计原理如图 8 所示。

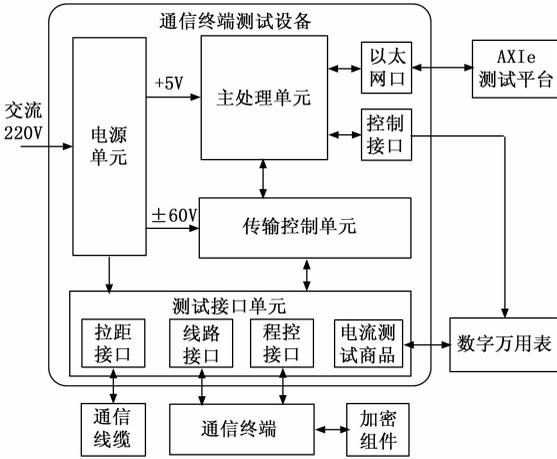


图 8 通信终端测试设备设计原理

电源单元实现交流 220 V 输入到所需 ±60 V、+5 V 直流电压输出的转换。

主处理单元基于 FPGA 处理器设计，实现与传输控制单元的 6 路调制解调器数字接口以及通信终端程控接口的通信，对外提供以太网口和数字万用表控制接口，通过 Verilog 逻辑设计实现数字专网通信链路模拟、数据交互控制以及协议转换处理。

传输控制单元由 6 路独立的传输控制电路组成，设计原理如图 9 所示，采用 MT9172 调制解调器实现与通信终端之间线路信号的全双工调制解调。主处理单元 FPGA 输出的待调制数字信号，经 MT9172 调制后通过传输变压器将信号耦合到 ±60 V 传输线路上传输到通信终端；通信终端通过传输线路发往传输控制单元的信号，经传输变压器后输入到 MT9172 调制解调器，解调为数字信号后输出到主处理单元 FPGA 进行处理。此外，主处理单元 FPGA 与通信终端程控接口之间通信采用“异步+同步”的方式，异步通信用于命令的交互控制，同步通信用于数据的传输。

由于对通信终端通过通信线路供电时的功耗有严格限制，且在远距离通信状态下的工作电流测量要求采用真实线路，不能通过等效电阻代替，因此通信终端测试设备在接口单元的设计上除了连接通信终端的线路接口和程控接口外，还需提供拉距接口用于远距离通信线缆的接入，并提供电流测试端口用于数字万用表的接入。接口单元设计原理如图 10 所示，将远距离通信线缆的两端分别接入到通信终端测试设备的“拉距接口 1”和“拉距接口 2”，通过

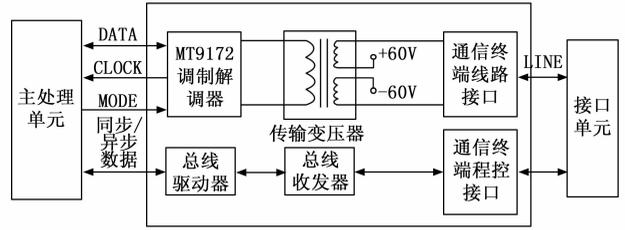


图 9 传输控制电路

“线路控制开关”同时控制继电器 B 与继电器 C 进行 0 km 或远距离线路切换；数字万用表的“100 mA”端口和“COM”端口分别通过测试线缆连接到通信终端测试设备的电流测量端口两端，通过“电流测量开关”将数字万用表串接到通信线路上，通信终端测试设备控制接口通过串口通信线缆连接到数字万用表的控制接口，通过通信终端测试软件实现对数字万用表工作状态控制和对通信终端工作电流的实时测量与结果读取。继电器控制开关说明如表 1 所示。

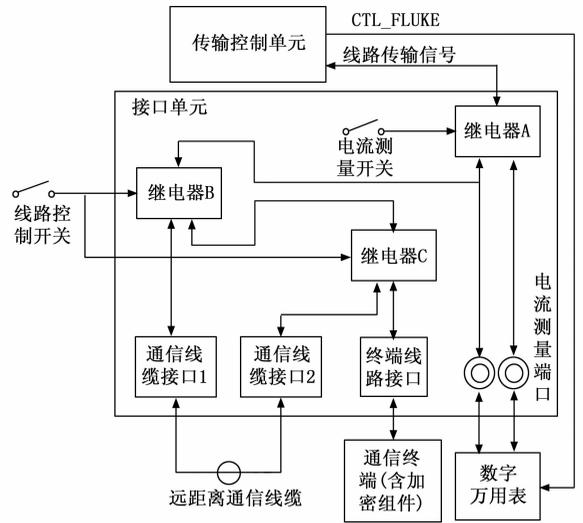


图 10 接口单元原理

表 1 继电器控制开关说明

开关名称	继电器	功能
电流测量	继电器 A	关闭：断开数字万用表 开启：接入数字万用表
线路控制	继电器 B 继电器 C	关闭：0 km 开启：接入通信线缆

3 测试系统软件设计

3.1 加密组件测试软件设计

加密组件测试软件需实现对加密组件的批量自动化测试。为增加测试灵活性，在设计上提供了加密组件在位检测功能，对 AXIe 测试平台所提供的 10 个加密组件测试接口依次编号，当测试者在软件界面上点击“在位检测”后，

软件会自动向加密组件测试接口 1~10 依次发起“接口查询”命令并接收加密组件应答, 以检测加密组件是否已安装到位, 全部查询完成后, 软件界面会激活已安装到位的加密组件选择框, 测试者可根据需要点击“全选”或单独选择所要测试的加密组件。

启动测试后, 加密组件测试软件会读取界面的配置信息以生成测试接口编号表, 并依次对编号所对应的加密组件进行自动化测试, 测试内容包括控制密钥分发组件对加密组件进行工作密钥分发, 对加密组件进行加密业务测试、解密业务测试和密钥销毁测试, 测试流程如图 11 所示。

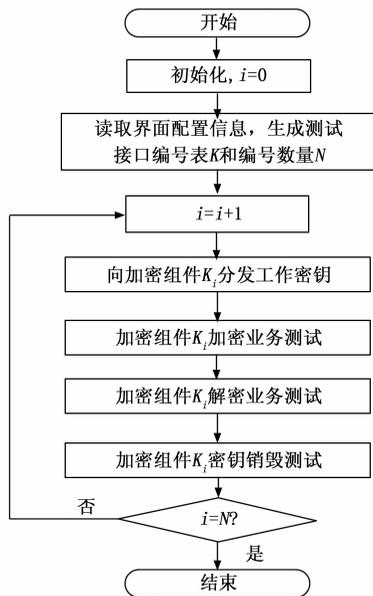


图 11 加密组件批量测试流程图

3.2 通信终端测试软件设计

通信终端测试软件主要实现对通信终端加密业务成功率的测试和工作电流测量。测试前, 操作者在软件界面上进行主被叫通信终端号码和测试循环次数 N 的配置; 测试时, 软件将测试次数 T 和测试失败次数 L 清零, 读取测试循环 N, 按照主被叫通信终端通信建链、读取工作电流、发送和接收测试数据、检验测试数据、计算加密业务成功率 P 的流程执行循环测试, P 计算公式如 (2) 所示, 测试流程如图 12 所示。

$$P = \left(1 - \frac{L}{N}\right) \times 100\% \quad (2)$$

4 验证与分析

测试系统实物如图 13 所示, 图中①是 AXIe 测试系统, ②是加密组件测试单元, ③是密钥分发组件测试单元, ④是通信终端测试设备, ⑤是 DSLAI 语音质量分析仪。测试系统的验证分为系统性能验证和功能验证两部分。

4.1 系统性能验证

测试系统的性能验证包括通信链路时延、信道误码以及语音质量评测环境验证 3 部分。首先对测试系统通信链

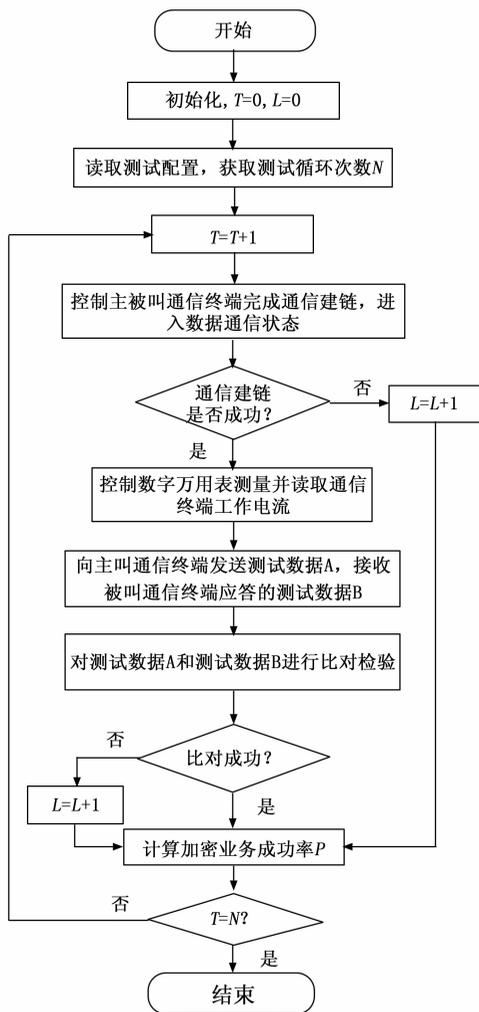


图 12 通信终端加密业务成功率测试流程图



图 13 测试系统实物图

路时延进行测量: 主被叫通信终端进入到通信状态后, 通过示波器获取主叫端调制数据输出信号和被叫端解调数据输入信号, 如图 14 所示, 经测量通信时延为 93 ns。

对测试系统信道误码进行测试: 通过通信终端测试软件控制主被叫通信终端进入到通信状态后, 同时向主被叫通信终端循环发送 1 000 次长度为 1×10^6 bit 的测试数据包, 并通过通信终端接收测试数据进行判别, 统计误码为 0。

对语音质量评测环境进行验证: DSLAI 语音质量评测界面如图 15 所示, 每轮评测包括 Female 语音主叫→被叫、

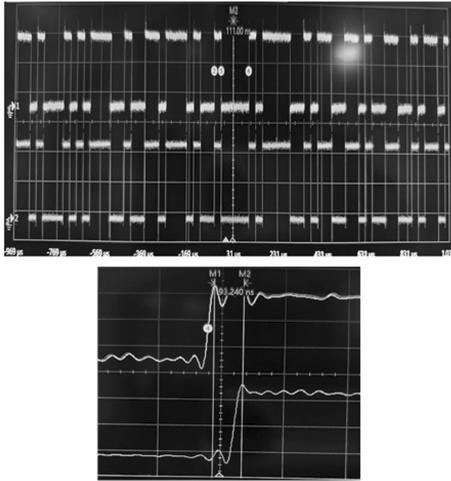


图 14 测试系统数字信道时延测试

Female 语音被叫→主叫、male 语音主叫→被叫、male 语音被叫→主叫四组，评测指标包括 PESQ 和 Offset，部分评测结果如表 2 所示，满足 PESQ≥4.20。

节点	说明
• a1-a2	Test call started @ 2:49:40 Tuesday (UTC)
• a1-a2	Female SQM -20dBm started
• a1-a2	Female SQM -20dBm finished
• a2	P.56 Levels: Active=-25.0dBm Peak=-5.3dBm Noise=-64.0dBm Activity=54.0%
• a1-a2	Female SQM -20dBm started
• a2	Speech Quality: PQLQA Narrowband v2.4 = 4.27 Offset = 69.8ms
• a2	Speech Quality: PESQ P.862.1 = 4.33 Offset = 70.8 ms Utterance Count = 2
• a1-a2	Female SQM -20dBm finished
• a1	P.56 Levels: Active=-19.0dBm Peak=-0.2dBm Noise=-57.7dBm Activity=53.7%
• a1	Speech Quality: PQLQA Narrowband v2.4 = 4.29 Offset = 70.9ms
• a1	Speech Quality: PESQ P.862.1 = 4.25 Offset = 70.3 ms Utterance Count = 2
• a1-a2	Male SQM -20dBm started
• a1-a2	Male SQM -20dBm finished
• a2	P.56 Levels: Active=-19.0dBm Peak=-2.8dBm Noise=-66.3dBm Activity=44.7%
• a1-a2	Male SQM -20dBm started
• a2	Speech Quality: PQLQA Narrowband v2.4 = 4.18 Offset = 71.4ms
• a2	Speech Quality: PESQ P.862.1 = 4.24 Offset = 71.0 ms Utterance Count = 2
• a1-a2	Male SQM -20dBm finished
• a1	P.56 Levels: Active=-19.0dBm Peak=-2.3dBm Noise=-60.3dBm Activity=45.0%
• a1	Speech Quality: PQLQA Narrowband v2.4 = 4.29 Offset = 70.9ms
• a1	Speech Quality: PESQ P.862.1 = 4.23 Offset = 70.4 ms Utterance Count = 2
• a1-a2	Test ended
• a1-a2	Test call finished

图 15 语音质量评测界面

表 2 语音质量评测结果

测试节点	语音模式	PESQ	Offset/ms
线路 1→线路 2	Female -20 dBm	4.33	70.8
线路 2→线路 1	Female -20 dBm	4.25	70.3
线路 1→线路 2	male -20 dBm	4.24	71.0
线路 2→线路 1	male -20 dBm	4.23	70.4
线路 1→线路 4	Female -20 dBm	4.34	70.5
线路 4→线路 1	Female -20 dBm	4.32	70.8
线路 1→线路 4	male -20 dBm	4.30	70.6
线路 4→线路 1	male -20 dBm	4.29	70.6
线路 1→线路 6	Female -20 dBm	4.31	70.3
线路 6→线路 1	Female -20 dBm	4.26	70.9
线路 1→线路 6	male -20 dBm	4.24	70.6
线路 6→线路 1	male -20 dBm	4.21	70.5

4.2 系统功能验证

测试系统的功能验证包括加密组件的批量测试、通信终端加密业务成功率测试以及远供工作电流测量。

对加密组件的批量测试能力进行验证：将 10 件加密组

件插接到加密组件测试单元的测试接口上，将密钥分发组件插接到密钥分发组件测试单元的测试接口上，启动加密组件测试软件对加密组件进行批量测试，并与人工实装测试模式进行对比，如表 3 所示，在人员减少 50% 的情况下，加密组件的测试效率提高超过 170%。

表 3 加密组件测试效率

测试模式	人员	测试耗时/s
人工实装测试	2	1 050
测试系统测试	1	380

通信终端加密业务成功率测试为无人值守模式，测试系统可同时接入 6 台通信终端，分为 3 组进行加密业务成功率测试，为满足 ≥99.9% 的测试指标，测试循环次数 N 设置为 1 000 次。经与人工实装测试模式对比，如表 4 所示，测试效率提高超过 37%，同时避免了由于人工疲劳测试引起的误操作。

表 4 加密业务成功率测试

测试模式	人员	测试耗时/s
人工实装测试	3	2.2×10 ⁴
测试系统测试	0	1.6×10 ⁴

验证测试系统对通信终端工作电流自动化测量功能，数字万用表选用型号为 FLUKE45，将数字万用表接入到测试系统，在主叫端拉距接口两端依次接入 0、1、2、2.5、3、3.5 km 不同长度的通信线缆，主被叫通信终端进入到通信状态后通过通信终端软件自动控制数字万用表进行工作电流测量，测量结果如表 5 所示，通过与实装模式下的测量结果对比无明显偏差。

表 5 通信终端工作电流测量

拉距模式	远供长度/km	工作电流/mA	实装测量/mA
关	0	8.30	8.48
开	1	8.84	8.98
开	2	9.07	9.10
开	2.5	9.50	9.57
开	3	10.09	10.11
开	3.5	10.45	10.51

5 结束语

本文设计了一种数字专网通信终端及加密组件半实物仿真测试系统，包括 AXIe 测试平台与通信终端测试设备的硬件设计、通信链路模拟单元 FPGA 逻辑设计、加密组件和通信终端测试软件设计，通过模拟数字专网加密通信业务流程实现对加密组件业务功能的批量测试，通过模拟数字专网的通信建链流程仿真了数字专网的通信接续。本文对测试系统的性能与功能进行了验证，性能验证方面包括获取通信链路时延、测量信道误码以及验证语音质量评测环境，证明测试系统可提供良好的测试环境；功能方面验证了加密组件批量测试、通信终端加密业务成功率测试以及远供

工作电流测量, 证明测试系统可有效提高测试效率, 降低测试成本。当前测试系统已应用在“装调检”一体化生产线上, 后续将通过优化改进提高无人值守批量测试能力。

参考文献:

- [1] 刘宏伟. 基于半实物仿真的抄表系统自动化测试平台设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (12): 51-57.
- [2] 李思雨, 黄少罗, 姚凯, 等. 基于半实物仿真的远火模拟训练系统设计 [J]. 兵工学报, 2022, 43 (10): 2497-2507.
- [3] NARCISO S J. Creating test systems using AXIe and PXI modules [C] //Orlando: AutotestconIEEE, 2011: 309-315.
- [4] 支超有, 秦成, 赵慧婷. 现代新型测试总线技术综述 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (7): 2002-2004.
- [5] 周志波, 王石记, 孟汉城. AXIe 标准研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (6): 1413-1416.
- [6] 彭刚锋, 崔强, 王国东. 新一代测试总线标准—AXIe 综述 [J]. 测控技术, 2012, 31 (7): 6-9.
- [7] HAASZ V. AXIe-New standard for the highest performance test and measurement applications [C] //Singapore: 2011 IEEE 6th International Conference, 2011: 30-32.
- [8] 杨硕. AXIe 总线宽带高速采集类仪器模块设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [9] 朱明龙. AXIe 仪器模块接口套件研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [10] 郭元兴, 刘强. 基于 AXIe 架构的通用测试平台设计 [J]. 通信技术, 2014, 47 (2): 226-230.
- [11] 许剑锋. 基于 AXIe 总线的自动测试系统设计 [J]. 电子技术, 2011, 24 (9): 134-135.
- [12] 王巴予. AXIe 机箱管理控制器研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [13] 刘明军, 唐建立, 夏磊. 多通道 AXIe 模拟信号并行测试模块设计 [J]. 电子世界, 2021 (23): 110-113.
- [14] 周璐, 邱小军, 林志斌. PESQ 测量语音增强算法性能不确定性的研究 [J]. 语音技术, 2020, 34 (1): 71-73.
- [15] 朱宪宇, 熊婕, 李庆先, 等. 无线通信通话语音质量测量结果的不确定度评定 [J]. 仪器仪表标准化与计量, 2019 (1): 40-42.
- [16] 倪萍, 魏芳. 基于 PESQ 算法的彩铃铃音质量评估系统 [J]. 计算机应用与软件, 2012, 29 (10): 145-147.
- [17] 卫国标. 基于 PESQ 算法的广播节目语音质量评测系统设计与实现 [J]. 电脑知识与技术, 2018, 14 (7): 178-179.
- [18] 凌渝. 基于 PESQ 算法的语音质量客观评价方法研究 [J]. 警察技术, 2011 (5): 30-32.
- [19] 高峰, 张宏伟. 一种基于感知语音质量评价的列车显示器语音自动检测方法 [J]. 控制与信息技术, 2021 (1): 76-80.
- [20] 许川佩, 黄天怀. 基于 FPGA 的 AXIe 接口设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2016 (10): 45-49.
- [21] 王石记, 潘安君. 新一代综合自动测试标准体系研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (4): 746-749.
- [12] YIN Y, HU X, LI T. A practical approach to analyze the non-stationary signals of a quayside container crane motor using a combined empirical mode decomposition and wavelet packet quantization technique [J]. Noise Control Engineering Journal, 2016, 64 (2): 126-133.
- [13] LIU Z, PENG D, ZUO M J. Improved Hilbert-Huang transform with soft sifting stopping criterion and its application to fault diagnosis of wheelset bearings [J]. ISA Transactions, 2022, 125: 426-444.
- [14] HENRIQUEZ RODRIGUEZ P, ALONSO J B, FERRER M A. Application of the Teager-Kaiser energy operator in bearing fault diagnosis [J]. ISA Transactions, 2013, 52 (2): 278-284.
- [15] 孙敏, 魏禹, 马吉祥, 等. 一种采用 B 样条插值的改进能量算子在电梯电机轴承故障诊断中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (3): 118-124.
- [16] XU Y, WANG Y, LINGZHI W. Bearing fault detection using an alternative analytic energy operator: a fast and non-filtering method [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32 (10): 105101-105113.
- [17] 刘泽潮, 张兵, 易彩, 等. 高阶频率加权能量算子在列车轴箱轴承故障诊断中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53 (12): 46-56.
- [18] WANG Y, GU L, XU Y. Enhancement of bearing fault detection using an alternative analytic energy operator and sparse Bayesian step-filtering [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35 (3): 905-920.
- [19] FAGHIDI H, LIANG M. Detection of bearing fault detection from heavily contaminated signals: a higher-order analytic energy operator method [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2015, 137 (4): 41012.
- [20] HUANG N E, WU Z H, LONG S R, et al. On instantaneous frequency [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1 (2): 177-229.
- [21] WANG B, LEI Y, LI N. A hybrid prognostics approach for estimating remaining useful life of rolling element bearings [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2020, 69 (1): 401-412.
- [22] XU Y, LI Y, WANG Y. A novel energy demodulation method using B-spline approximation for bearing fault detection [J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2022, 189: 110635.
- [23] CHENG Y, WANG Z, CHEN B, et al. An improved complementary ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise and its application to rolling element bearing fault diagnosis [J]. ISA Transactions, 2019, 19: 218-234.

(上接第 77 页)