

# 基于 TCP 与 UDP 通讯的设备自动化接口测试方法

左登超

(中车青岛四方车辆研究所有限公司, 山东 青岛 266031)

**摘要:** 基于 TCP 与 UDP 的以太网通讯在各行各业的应用十分广泛, 以太网通讯的种类多, 组合及配置灵活, 不同的控制设备使用的以太网通讯方式不尽相同; 在设备功能开发完成后, 可能会存在潜在的缺陷; 传统的测试方法主要依赖网络调试工具, 人工解析抓取到的设备发送的数据包, 或者通过组合数据指令的方式进行测试并观察结果; 这种测试效率非常低, 且易出错, 如果涉及到的以太网通讯种类较多, 数据量较大时, 使用网络调试工具不能满足测试需求; 为了确保各类以太网控制设备在运行过程中的稳定性, 并且使得接口测试过程做到自动化, 提升测试的效率以及准确度, 采用以太网通讯设备自动化接口测试装置, 根据用户测试指令自动完成以 TCP 与 UDP 为通讯方式的控制设备的接口测试, 为设备的稳定运行提供保障。

**关键词:** 自动化测试; 接口测试; 以太网通讯

## Method of Equipment Automation Interface Test Based on TCP and UDP Communication

ZUO Dengchao

(CRRC Qingdao Sifang Vehicle Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266031, China)

**Abstract:** Ethernet communication based on TCP and UDP is widely used in all walks of life. There are many kinds of Ethernet communication, and the combination and configuration are flexible, different control devices use different Ethernet communication methods; After the equipment function development is completed, there may be potential defects; Traditional testing methods mainly rely on network debugging tools to manually analyze the data packets sent by the captured devices, or test and observe the results by combining the data instructions; This test is very inefficient and error prone. If there are many types of Ethernet communication and a large amount of data involved, the network debugging tools cannot meet the test requirements; In order to ensure the stability of various Ethernet control equipment in the operation process, automate the interface test process, and improve the efficiency and accuracy of the test, the automatic interface test device with the Ethernet communication equipment is used to automatically complete the interface test of the control equipment with TCP and UDP as the communication mode according to the user test instructions, which provides guarantee for the stable operation of the equipment.

**Keywords:** automated testing; interface test; ethernet communication

## 0 引言

TCP 与 UDP 以太网通讯在各行各业应用十分广泛。TCP 与 UDP 的通讯种类多且配置灵活, 在不同的应用场景下, 以太网通讯控制设备的通讯方式不尽相同<sup>[1]</sup>。为了确保各类以太网控制设备在运行过程中的稳定性, 需要在产品投入运行前进行接口测试工作<sup>[2]</sup>。

针对以太网控制设备的接口测试方法较少, 传统的测试方式是将 PC 机与以太网控制设备相连, 利用网络调试工具, 向被测设备发送原始数据指令, 观察设备的动作是否与预期一致; 或者抓取被测设备发出的数据, 人工进行数据分析, 判断设备的工作情况<sup>[3]</sup>; 另一种测试方式是针对不同的设备需求, 编写设备测试软件, 由测试人员进行手动点击软件相关功能按键进行指令发送, 观察设备的动作或者设备回复数据, 判断是否达到预期效果<sup>[4]</sup>。

传统的测试方法完全依赖于人工手动测试, 通过组合原始数据指令进行测试并观察结果, 效率非常低, 且易出错; 如果涉及到的以太网通讯种类较多, 数据量较大时, 使用网络调试工具则不能满足测试的需求<sup>[5]</sup>; 开发测试软件, 需要按照特定被测设备进行开发; 由于软件是新开发的, 没有经过实践, 软件本身可能存在缺陷, 需要经过一段时间的调试才能投入使用, 使用过程中也不能确保其功能完全正确, 造成测试工作停滞, 转而解决调试软件本身的问题<sup>[6]</sup>。在软件的修改过程中, 为了不引起新的错误, 测试人员需要进行大量重复测试, 而手动测试回归性差, 无法适应软件修改需求, 导致软件可能存在大量缺陷<sup>[7]</sup>。借助基于 TCP 与 UDP 通讯的设备自动化接口测试方法, 根据用户测试指令自动完成以 TCP 与 UDP 为通讯方式的控制设备的接口测试, 为设备的稳定运行提供保障。

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-08-16。

作者简介: 左登超(1989-), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事轨道交通电子设备的开发与测试方向的研究。

引用格式: 左登超. 基于 TCP 与 UDP 通讯的设备自动化接口测试方法[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(11): 25-31.

### 1 自动化接口测试装置结构及原理

基于 TCP 与 UDP 通讯的设备自动化接口测试装置如图 1 所示。装置包含电源板卡、CPU 板卡、网口扩展板卡。其中网口扩展板卡有两个 M12-4 芯以太网口，通过背板连接至 CPU，为 CPU 提供扩展网口；CPU 板卡有 1 个 M12-4 芯以太网口，系统采用 X86 架构，Linux 操作系统。该设备包含两路测试通道，分别提供 3 个以太网口进行测试，每个网口 IP 地址可配置。

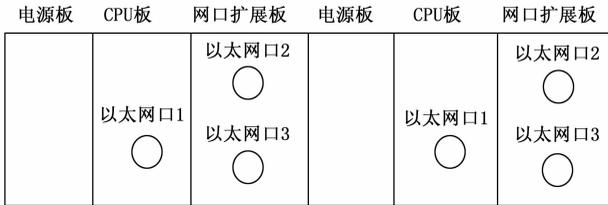


图 1 自动化接口测试装置

TCP 与 UDP 接口测试装置中运行软件，解析用户定义的通讯链路信息，指导装置与被测设备进行通讯链路的建立；解析用户定义的设备通讯协议信息以及数据收发关系信息，按照被测设备协议规定的格式，自动进行数据收发，与被测设备进行数据通讯；与工具软件建立通讯，接收用户录入的接口测试指令，执行接口测试。

### 2 自动化接口测试装置接口设计

使用自动化接口测试装置，可以对任意基于 TCP 与 UDP 通讯的以太网控制设备进行接口测试工作。TCP 可以使用服务器或者客户端，支持一对一通讯、一对多通讯、多对一通讯、多对多通讯。UDP 可以使用单播或者组播，单播支持一对一通讯、组播支持加入一个或者多个组播组通讯<sup>[8]</sup>。

#### 2.1 TCP 服务器接口设计

装置网口开启一个 TCP 服务器，接收被测设备一个或者多个 TCP 客户端的连接，即 TCP 服务器一对一或一对多通讯<sup>[9]</sup>。接口示意图如图 2 所示，每路 TCP 客户端连接可以在相同或者不同的被测设备上，此处仅指出每路 TCP 协议链路连接，同下。

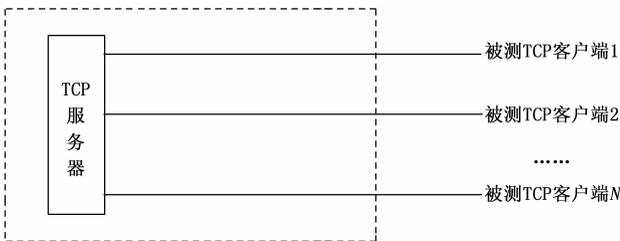


图 2 TCP 服务器一对一、一对多通讯接口

装置网口开启多个 TCP 服务器，每个 TCP 服务器接受一个或者多个 TCP 客户端的连接，即 TCP 服务器多对一或多对多通讯<sup>[10]</sup>。接口示意图如图 3 所示。

#### 2.2 TCP 客户端接口设计

装置网口开启一个 TCP 客户端，连接被测设备一个或

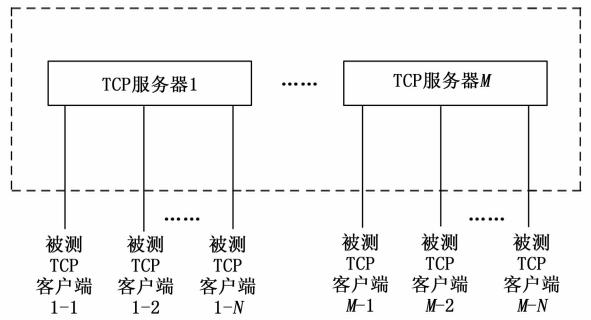


图 3 TCP 服务器多对一、多对多通讯接口

者多个 TCP 服务器，即 TCP 客户端一对一或一对多通讯<sup>[11]</sup>。接口示意图如图 4 所示。



图 4 TCP 客户端一对一、一对多通讯接口

装置网口开启多个 TCP 客户端，连接被测设备一个或者多个 TCP 服务器，即 TCP 客户端多对一或多对多通讯<sup>[12]</sup>。接口示意图如图 5 所示。

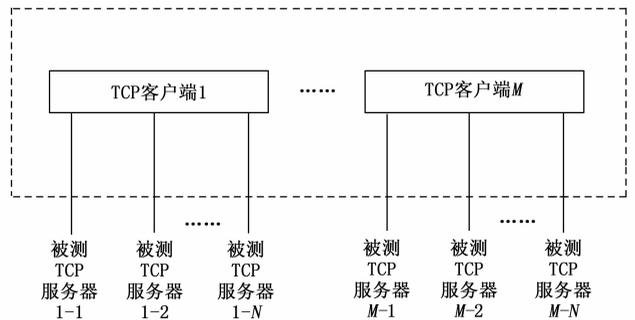


图 5 TCP 客户端多对一、多对多通讯接口

#### 2.3 UDP 单播接口设计

装置网口开启一个或者多个 UDP 单播，与被测设备进行一对一通讯<sup>[13]</sup>；接口示意图如图 6 所示。

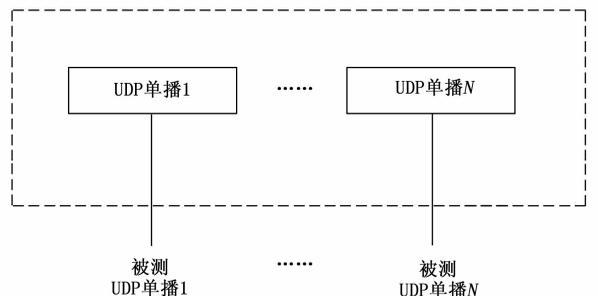


图 6 UDP 单播通讯

### 2.4 UDP 组播接口设计

装置网口加入一个或者多个组播组，与被测设备进行通讯<sup>[4]</sup>；接口示意图如图 7 所示。

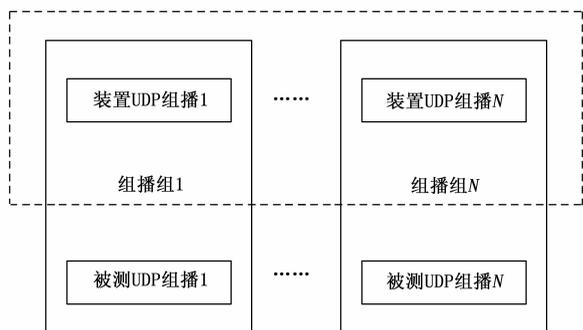


图 7 UDP 组播通讯

### 2.5 TCP 与 UDP 组合接口设计

装置每路网口均支持 TCP 服务器、TCP 客户端、UDP 单播、UDP 组播的任意组合，组合接口的设计可以参考 2.1~2.4。

- 1) TCP 服务器、TCP 客户端组合；
- 2) TCP 服务器、UDP 单播组合；
- 3) TCP 服务器、UDP 组播组合；
- 4) TCP 客户端、UDP 单播组合；
- 5) TCP 客户端、UDP 组播组合；
- 6) UDP 单播、UDP 组播组合；
- 7) TCP 服务器、TCP 客户端、UDP 单播组合；
- 8) TCP 服务器、TCP 客户端、UDP 组播组合；
- 9) TCP 服务器、UDP 单播、UDP 组播组合；
- 10) TCP 客户端、UDP 单播、UDP 组播组合；
- 11) TCP 服务器、TCP 客户端、UDP 单播、UDP 组播组合。

## 3 自动化接口测试装置软件设计

自动化接口测试装置内运行程序，与被测设备进行通讯链路的建立与管理、按照被测设备的通信协议进行数据收发、接收工具软件的测试指令，自动化执行接口测试工作。工作原理如图 8 所示。

- 1) 软件运行后，读取通讯配置文件，获取与被测设备的通讯方式，指导装置与被测设备建立通讯链接。自动化接口测试装置使用的通讯配置文件各字段如表 1 所示。
- 2) 读取数据配置文件。装置与被测设备链路下的通讯数据由数据配置文件定义，当软件读取到数据标识信息后，在内存中分配该数据的存储信息，一方面自动化接口测试装置根据此内存，进行数据的发送或者存储接收到被测设备发送的对应数据；另一方面接收工具软件发送的测试指令，根据指令中携带的链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移信息，进行内存数据的设置与获取。数据配置文件各字段如表 2 所示。

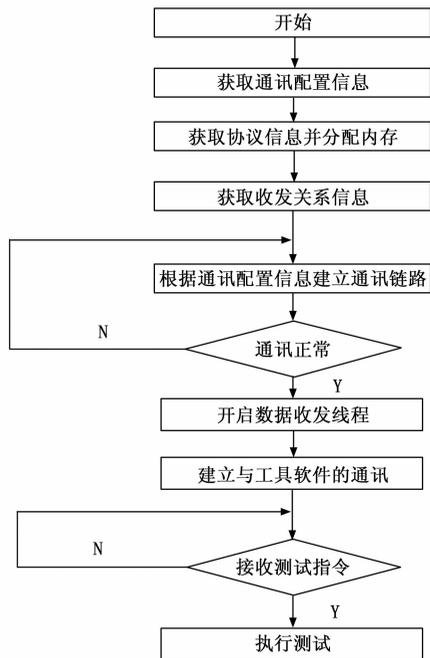


图 8 接口自动化测试流程图

表 1 通讯配置文件字段含义

序号	名称	含义
1	链路名称	唯一标识一条通讯链路名称；
2	通讯类型	根据被测设备的不同,分为 TCP 和 UDP；
3	通讯方式	当通讯类型为 TCP 时,通讯方式可以指定为服务器或者客户端； 当通讯类型为 UDP 时,通讯方式可以指定为单播或者组播；
4	通讯本方信息	用以指定本装置通讯链路的 IP 地址以及端口号,两者之间使用冒号分隔；
5	通讯对方信息	用以指定被测设备通讯链路的 IP 地址以及端口号,两者之间使用冒号分隔；

3) 读取数据收发关系配置文件。指导自动化接口测试装置如何发送与被测设备的通讯数据，收发关系配置文件各字段如表 3 所示；

- 4) 根据通讯配置文件信息，建立与被测设备的通讯并管理通讯过程；
- 5) 针对每一个通讯链路，开启数据收发线程，根据数据配置文件以及收发关系配置文件，开始与被测设备进行数据通讯；
- 6) 初始化与工具软件的 TCP 通讯，用以接收工具软件发送的测试指令；自动化接口测试装置支持的测试指令种类如表 4 所示；

设置指令：工具软件将具体链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移信息发送给自动化接口测试装置，装置接收到该信息后，将对应内存中的数据进行更新，由后台线程自动获取内存数据进行发送，强制指令只能设置装置发送方向的数据<sup>[15]</sup>；

表 2 数据配置文件字段含义

序号	名称	含义
1	数据标识	唯一标识一包数据,范围是 0001h—FFFFh,默认 10 进制、二进制以 b 结尾,16 进制以 h 结尾;
2	数据类型	表示数据的触发方式,类型有周期触发、请求触发、变化触发;其中周期触发表示设备与被测通讯链路建立后,将本包数据以规定的周期向被测设备进行发送;请求触发表示设备收到指定的数据后,再发送本包数据;变化触发表示设备检测到本包数据的数据字段较上一次有变化后进行发送;
3	校验类型	表示本包数据使用的校验算法;
4	校验范围	表示待校验数据在本包数据的起始终止位置;
5	发送周期	针对周期触发帧有效,表示循环发送的时间,单位毫秒;
6	数据大小	表示本包数据的总长度,以字节为单位;
7	变量名	表示一包数据中指定字节偏移、位偏移数据的名称;
8	字段类型	帧头字段 数据区报文的帧头;
		帧尾字段 数据区报文的帧尾;
		命令字段 数据区报文识别标识,用于区分识别收到的报文;
		数据字段 数据区报文的数据,无特殊功用的内容均可作为数据字段;
		校验字段 用于存放计算出来的校验数据;
9	变量类型	用于指示变量所占用的字节或者位的个数;
10	字节偏移	变量在本数据的字节位置;
11	位偏移	变量在本数据的字节位置下的位位置;
12	默认值	变量的初始值;

表 3 收发关系配置文件字段含义

序号	名称	描述
1	链路名称	标识一条通讯链路名称;名称同通讯配置文件;
2	方向	分为装置发送方向和装置接收方向;
3	数据标识	当方向为装置接收方向时,本字段表示要接收的数据标识; 当方向为装置发送方向时,若本数据标识表示的数据为周期触发帧,则按照发送周期循环进行发送;若本数据标识表示的数据为请求触发帧,则收到“请求标识”字段的数据后再进行发送;
4	请求标识	当方向为装置发送方向时,若本数据标识表示的数据为请求触发帧,则收到“请求标识”字段数据后,再进行发送;

延时指令:工具软件将具体的延时时间发送给自动化接口测试装置,装置接收到该信息后,会延时相应的时间,再处理其他测试指令<sup>[6]</sup>;

心跳指令:工具软件将具体链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移、累加步长  $n$ 、累加频率  $f$  信息发送给自动化接口测试装置,装置接收到该信息后,以累加频率  $f$ ,将

表 4 测试指令类型说明

序号	动作名称	编写规则
1	设置(=)	变量名=常量值
2	延时(delay)	delay=时间
3	心跳(lifesignal)	变量名=lifesignal  步长 频率
4	上升沿(redge)	变量名=redge   时间
5	下降沿(fedge)	变量名=fedge   时间
6	递增(incr)	变量名=incr(极小值,极大值,步长,频率)
7	递减(decr)	变量名=decr(极小值,极大值,步长,频率)
8	系统时间一年(year)	变量名=year
9	系统时间一月(month)	变量名=month
10	系统时间一日(day)	变量名=day
11	系统时间一时(hour)	变量名=hour
12	系统时间一分(minute)	变量名=minute
13	系统时间一秒(second)	变量名=second
14	范围内(range)	变量名=range(极小值,极大值) 变量名=range[极小值,极大值] 变量名=range[极小值,极大值]
15	获取(==)	变量名==常量值

当前值累加  $n$ , 向内存中的数据进行更新<sup>[17]</sup>;

上升沿指令:工具软件将具体链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移、时间  $t$  信息发送给自动化接口测试装置,装置接收到该信息后,将对应内存中的数据先设置成 0,保持时间  $t$ ,然后设置为 1,由后台线程自动获取内存数据进行发送;

下降沿指令:工具软件将具体链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移、时间  $t$  信息发送给自动化接口测试装置,装置接收到该信息后,将对应内存中的数据先设置成 1,保持时间  $t$ ,然后设置为 0,由后台线程自动获取内存数据进行发送<sup>[18]</sup>;

递增指令:工具软件将具体链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移、最小值、最大值、步长  $n$ 、频率  $f$  信息发送给自动化接口测试装置,装置接收到该信息后,以频率  $f$ ,将当前值从最小值开始累加,每次累加步长  $n$ ,直至累加到最大值后保持,向内存中的数据进行更新,由后台线程自动获取内存数据进行发送;

递减指令:工具软件将具体链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移、最小值、最大值、步长  $n$ 、频率  $f$  信息发送给自动化接口测试装置,装置接收到该信息后,以频率  $f$ ,将当前值从最大值开始递减,每次递减步长  $n$ ,直至递减到最小值后保持,向内存中的数据进行更新,由后台线程自动获取内存数据进行发送<sup>[19]</sup>;

系统时间年指令:工具软件将具体链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移信息发送给自动化接口测试装置,装置接收到该信息后,从当前系统时间中获取年的数据,向内存中的数据进行更新,由后台线程自动获取内存数据

进行发送；

系统时间月指令：工具软件将具体链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移信息发送给自动化接口测试装置，装置接收到该信息后，从当前系统时间中获取月的数据，向内存中的数据进行更新，由后台线程自动获取内存数据进行发送；

系统时间日指令：工具软件将具体链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移信息发送给自动化接口测试装置，装置接收到该信息后，从当前系统时间中获取日的数据，向内存中的数据进行更新，由后台线程自动获取内存数据进行发送；

系统时间时指令：工具软件将具体链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移信息发送给自动化接口测试装置，装置接收到该信息后，每小时从当前系统时间中获取时的数据，向内存中的数据进行更新，由后台线程自动获取内存数据进行发送；

系统时间分指令：工具软件将具体链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移信息发送给自动化接口测试装置，装置接收到该信息后，每分钟从当前系统时间中获取分的数据，向内存中的数据进行更新，由后台线程自动获取内存数据进行发送；

系统时间秒指令：工具软件将具体链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移信息发送给自动化接口测试装置，装置接收到该信息后，每秒钟从当前系统时间中获取秒的数据，向内存中的数据进行更新，由后台线程自动获取内存数据进行发送<sup>[20]</sup>；

范围内指令：工具软件将具体链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移、极大值、极小值信息发送给自动化接口测试装置，装置接收到该信息后，取极大值与极小值范围内的随机数据，向对应内存中的数据进行更新，由后台线程自动获取内存数据进行发送；

获取指令：工具软件将具体链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移信息发送给自动化接口测试装置，装置接收到该信息后，从对应内存中取出一次实时数据，然后通过 TCP 通讯向工具软件发送结果；

7) 自动化接口测试装置收到测试指令后，根据指令中携带的链路名称、数据标识、字节偏移、位偏移信息，操作内存数据，从分配的内存中设置或者获取数据；当获取到数据后，向工具软件返回获取到的数据，工具软件根据此数据判断执行是否通过；

## 4 自动化接口测试实验结果与分析

### 4.1 自动化接口测试实验步骤

由于自动化接口测试装置可以测试的情况比较多，以 TCP 服务器一对一通讯为例，即被测设备作为 TCP 客户端，装置作为 TCP 服务器，对被测设备进行接口测试，测试系统连接如图 9 所示。

测试前需要按照被测设备的要求修改装置的 IP 地址。通过修改脚本文件即可配置本装置的网口 IP 地址。IP 地址

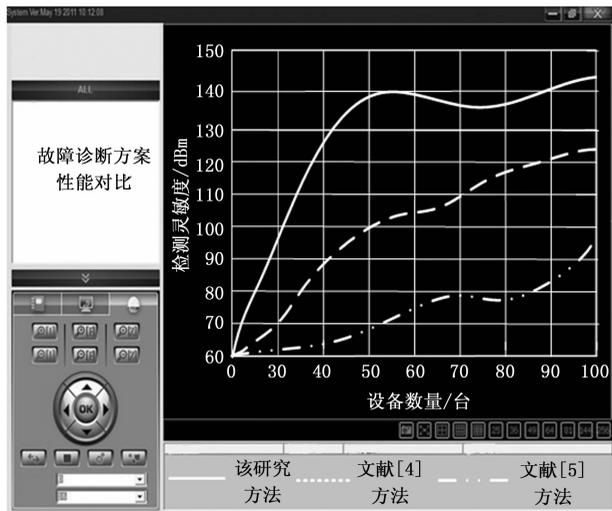


图 9 测试系统连接

脚本内如下：

```
# eth1
ifconfig eth1 down
ifconfig eth1 172.30.131.60 netmask 255.255.255.0 up
# eth2
ifconfig eth2 down
ifconfig eth2 172.30.131.61 netmask 255.255.255.0 up
# eth3
ifconfig eth3 down
ifconfig eth3 172.30.131.62 netmask 255.255.255.0 up
eth1、eth2、eth3 分别分别对应设备上的三个网口；
```

被测设备的 TCP 客户端信息：172.31.41.50，端口 8001，与其通讯的 TCP 服务器信息：IP 地址 172.31.41.36，端口 8000；由装置主动发送 1001 数据，然后被测设备回复 1002 数据。

步骤 1：通过交换机，将被测设备、工具软件以及设备进行组网连接；

步骤 2：按照设备 IP 地址修改方法，修改脚本文件 eth1 的 IP 地址：

```
# eth1
ifconfig eth1 down
ifconfig eth1 172.31.41.36 netmask 255.255.255.0 up
```

步骤 3：编写通讯配置文件，如表 5 所示。

表 5 通讯配置文件内容

链路名称	通讯类型	通信方式	通信本方信息	通信对方信息
Ch-1	TCP	服务器	172.31.41.36;8000	172.31.41.50;8001

此配置文件供装置使用，由于被测设备作为 TCP 客户端，需要使用装置模拟与被测设备通讯的 TCP 服务器；配置文件中，通讯类型填写 TCP，通讯方式填写服务器，通讯本方信息填写与被测设备通讯的 TCP 服务器的地址端口

信息，通讯对方信息填写被测设备的信息；

步骤 4：编写数据配置文件如表 6 所示，其中 1001 数据由接口测试装置主动发出，1002 为装置接收被测设备返回的数据；该配置文件供装置和工具软件使用；

表 6 数据配置文件内容

数据标识	数据类型	发送周期	字节开端	数据大小	变量名	字段类型	变量类型	字节偏移	位偏移
1001	周期触发	1000	大端	7	head1	帧头字段	CHAR	0	0
					sender1	数据字段	CHAR	1	0
					count1	数据字段	CHAR	2	0
					length1	数据字段	CHAR	3	0
					version1	数据字段	CHAR	4	0
					code1	数据字段	CHAR	5	0
					tail1	帧尾字段	CHAR	6	0
1002	请求触发		小端	8	head2	帧头字段	CHAR	0	0
					count2	数据字段	CHAR	1	0
					senderIP	数据字段	CHAR	2	0
					recieveIP	数据字段	CHAR	3	0
					version2	数据字段	CHAR	4	0
					code21	数据字段	CHAR	5	0
					code22	数据字段	CHAR	6	0
tail2	帧尾字段	CHAR	7	0					

步骤 5：编写数据收发关系配置文件，文件内容如表 7 所示。

表 7 收发关系配置文件内容

链路名称	方向	数据标识	请求标识
Ch-1	设备输出	1001	
	设备输入	1002	

此配置文件供自动化接口测试装置使用，内容描述了装置 Ch-1 通讯链路下，收取 1002 的数据，主动发送 1001 的数据。

步骤 6：将上述配置文件通过 FTP 工具导入设备，并

重启接口测试装置；

步骤 7：在工具软件中编写测试指令，设置或者获取变量的数据，下发至接口测试装置；

步骤 8：工具软件根据设备返回的数据，判断测试是否通过。

#### 4.2 实验结果及分析

在自动化执行完接口测试后，工具软件会将测试结果保存成表格的形式，结果如表 8 所示。

表 8 自动化接口测试结果记录

用例号	执行动作	实际结果	测试结论
TC-1	sender1=10; delay=1000; senderIP==10;	senderIP(10)	Pass
TC-2	version1=21; delay=1000; version2==21;	version2(21);	Pass
TC-3	code=1; delay=1000; code21==2;	code21(2);	Pass
...	...	...	...

保存的结果记录中，会记录工具软件每次执行的动作，收取自动化接口测试装置返回的变量名以及对应的实际数据，工具软件可以根据动作中的期望，自动判断测试的结果是否正确，并在测试结论中给出 Pass 或者 Fail，方便测试人员查看测试结果。

#### 5 结束语

借助基于 TCP 与 UDP 通讯的设备自动化接口测试方法，能够进行 TCP 服务器、TCP 客户端、UDP 单播、UDP 组播通以及四种通讯方式任意组合的接口测试；接口测试装置对外提供 6 个测试网口，IP 地址可配置，可以通过数据配置文件以及数据收发关系配置文件，指导自动化接口测试装置的数据收发，使得测试不同被测设备时无需修改代码，提高了测试的灵活性、通用性以及效率，为设备的稳定运行提供保障。

#### 参考文献：

[1] 涂金龙. TCP 和 UDP 通信测试软件的设计 [J]. 电脑知识与技术, 2013, 9 (4): 731-736, 754.

[2] 杨懂懂, 李明春. 一种接口自动化测试系统设计与实现 [J]. 自动化技术与应用, 2021, 40 (10): 142-145.

[3] 蒋凡, 胡澄宇, 张卫星. 基于 Linux 环境的 TCP 协议一致性测试实现 [J]. 计算机工程, 2001 (5): 50-52, 82.

[4] 王俊, 蒋厚明, 王海涛, 等. 一种跨平台的移动自动化测试系统的设计与实现 [J]. 自动化技术与应用, 2017 (10): 68-72.

[5] 杨巍. 软件自动化测试系统的设计 [J]. 科技传播, 2014 (18): 234-229.

[6] 王芬. 接口测试中数据关联技术的运用 [J]. 电脑知识与技

- 术, 2021, 17 (11): 67-68.
- [7] 李智. 一种可配置数据交互流程的嵌入式总线接口测试系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (11): 7-11.
- [8] 袁扬, 谭月辉, 孙慧贤, 等. 指控装备通信接口可重构测试系统软件框架设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 153-155.
- [9] 王喜乐, 王帆, 王瑞山. 参照 AUTOSAR 标准的 TCP/IP 协议栈一致性测试实现 [J]. 现代传输, 2022 (3): 62-65.
- [10] 胡亚军. 基于 LabWindows/CVI 的通信电源系统自动化测试的实现 [J]. 通信电源技术, 2010, 27 (4): 26-28, 34.
- [11] 杨光, 潘俊家, 崔根群, 等. 车载以太网 TCP/IP 协议一致性测试系统研究 [J]. 现代电子技术, 2020, 43 (7): 29-33, 38.
- [12] 周轩羽, 李雪, 李巍. 汽车以太网技术演进及测试 [J]. 电信网技术, 2017 (6): 6-11.
- [13] 孙宇伟, 王怀侠, 郭燕红, 等. 基于以太网的高可靠性综合  
\*\*\*  
 (上接第 10 页)
- [57] 吕兴燕, 王兴伟, 张爽, 等. 基于 NSGA-II 算法的 SDN 多控制器部署优化机制 [J]. 通信学报, 2018, 39 (s1): 263-270.
- [58] KSENTINI A, BAGAA M, TALEB T, et al. On using bargaining game for optimal placement of SDN controllers [C] // 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2016: 1-6.
- [59] KILLIB P R, REDDY E A, RAO S V. Cooperative game theory based network partitioning for controller placement in SDN [C] // 2018 10th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS). IEEE, 2018: 105-112.
- [60] 郭烜成, 林晖, 叶秀彩, 等. 软件定义广域网中控制器部署与交换机动态迁移策略 [J]. 计算机应用, 2019, 39 (2): 453-457.
- [61] 曹洪运. SDN 控制平面中负载均衡的迁移优化研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
- [62] 王立业, 胡宇翔, 胡涛. 基于多目标优化的应激式交换机迁移策略 [J]. 信息工程大学学报, 2019, 20 (4): 397-404.
- [63] 周宁, 胡涛, 胡宇翔, 等. 面向 SDN 负载均衡的交换机自适应迁移策略 [J]. 电子技术应用, 2019, 45 (12): 91-95, 105.
- [64] LI J, HU X, ZHANG M. Research on dynamic switch migration strategy based on FMOPSO [C] // 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). IEEE, 2018: 913-917.
- [65] 刘必果, 束永安, 付应辉. 基于多目标优化的软件定义网络负载均衡方案 [J]. 计算机应用, 2017, 37 (6): 1555-1559, 1573.
- [66] CHEN H, CHENG G, WANG Z. A game-theoretic approach to elastic control in software-defined networking [J]. China Communications, 2016, 13 (5): 103-109.
- [67] WU G, WANG J, OBAIDAT M S, et al. Dynamic switch migration with noncooperative game towards control plane scalability in SDN [J]. International Journal of Communication Systems, 2019, 32 (7): 3927.
- [68] 郭子楨, 梁俊, 肖楠, 等. 软件定义卫星网络多控制器可靠部署算法 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55 (2): 158-165.
- [69] 刘治国, 卢美玲, 李慧, 等. 基于 SDN 的卫星网络多控制器部署方法研究 [J]. 计算机仿真, 2020, 37 (4): 62-66, 97.
- [70] 时永鹏. 空天地一体化网络中网关与 SDN 控制器的优化部署 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [71] QU H, XU X, ZHAO J, et al. An SDN-based space-air-ground integrated network architecture and controller deployment strategy [C] // 2020 IEEE 3rd International Conference on Computer and Communication Engineering Technology (CCET). IEEE, 2020: 138-142.
- [72] 陈金涛, 梁俊, 郭子楨, 等. 软件定义卫星网络多控制器部署策略 [J]. 西安电子科技大学学报, 2022, 49 (3): 59-67.
- [73] CHEN L, TANG F, LI X. Mobility-and load-adaptive controller placement and assignment in LEO satellite networks [C] // IEEE INFOCOM 2021-IEEE Conference on Computer Communications. IEEE, 2021: 1-10.
- [74] 杨虹. 面向复杂空天地一体化网络的 SDN 控制器的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [75] 杨力, 孔志翔, 石怀峰. 软件定义空间信息网络多控制器动态部署策略 [J]. 计算机工程, 2018, 44 (10): 58-63.
- [76] LIAO Z, CHEN C, JU Y, et al. Multi-Controller Deployment in SDN-Enabled 6G Space-Air-Ground Integrated Network [J]. Remote Sensing, 2022, 14 (5): 1076.
- [77] GUO J, YANG L, RINCÓN D, et al. SDN controller placement in LEO satellite networks based on dynamic topology [C] // 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE, 2021: 1083-1088.