

多电飞机 BPCU 自动测试平台总线通讯技术研究

郭亿东, 王立坤, 祁在明, 杨善水, 王 莉

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

摘要: 针对多电飞机 BPCU 自动测试平台的开发, 研究了通讯网络的整体布局与设计方案; 首先分析了 BPCU 通讯网络使用的 AFDX 总线以及计算机端系统之间通讯使用的以太网技术, 其次根据 BPCU 测试平台的整体架构设计了通讯网络以及通讯方案, 采用多线程同步通讯的手段, 保证了通讯系统的高效稳定; 采用 VC++ 开发环境编写了 C 语言程序实现了整体的通讯功能, 最后通过实验验证了通讯网络的可行性。

关键词: BPCU 测试平台; 以太网通讯; AFDX 通讯; 航空总线

Research on Bus Communication Technology of BPCU Automatic Test Platform for MEA

Guo Yidong, Wang Likun, Qi Zaiming, Yang Shanshui, Wang Li

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the development of BPCU automatic test platform for multi-electric aircraft, this paper studies the overall layout and design scheme of communication network. Firstly, the AFDX bus used in BPCU communication network and the Ethernet technology used in communication between computer systems are analyzed. Secondly, the communication network and communication scheme are designed according to the overall architecture of BPCU test platform. Multi-thread synchronous communication is used to ensure the high efficiency and stability of the communication system. The C language program is written in development environment of VC++ to realize the overall communication function. Finally, the feasibility of the communication network was verified by experiments.

Keywords: BPCU test platform; Ethernet communication; AFDX communication; aviation bus

0 引言

随着航空综合技术的快速发展, 多电飞机供配电系统已由集中的供配电形式转变为更高效的分布式自动供配电形式。而 BPCU (即汇流条功率控制器) 作为供电系统的管理和状态监测环节, 其关键性和重要性也日益突出, 因此有必要建立 BPCU 的自动测试平台。

国内目前关于汇流条功率控制器自动测试平台的设计和研究成果较少, 文献 [1] 设计了基于 LabVIEW 的测试试验系统, 利用计算机模拟飞机电网运行状态, 通过以太网 TCP 协议将故障指令发送给下位机, 同时测试 BPCU 的性能指标, 实现了自动化测试。但由于研究时间较早, 模拟电网以及总线通讯技术的研究不能很好满足实际 BPCU 性能测试的要求。

收稿日期: 2019-05-15; **修回日期:** 2019-06-04。

作者简介: 郭亿东(1993-), 男, 江苏常州人, 硕士研究生, 主要从事航空配电系统方向的研究。

杨善水(1969-), 男, 安徽望江人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事航空航天供电系统方向的研究。

王 莉(1969-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事固态配电技术和故障检测与定位技术方向的研究。

本文搭建的 BPCU 自动测试平台主要包括 BPCU 测试样机、模拟电网、测试管理计算机、电网管理计算机以及通讯管理计算机等硬件设备, 其通讯网络包括 AFDX 通讯、以太网通讯、TTP/C 通讯等不同的通讯方式。使用编程软件建立统一的通讯网络, 并且保证通讯系统的实时性、稳定性以及高效性, 是通讯系统设计的关键。

1 BPCU 测试平台通讯架构

BPCU, 即汇流条功率控制器, 是多电飞机供电系统的重要组成部分。其功能是对飞机的供配电系统进行管理和控制, 完成对飞机不同工作状态下的供电模式转换, 在紧急情况下完成功率分配, 保证应急汇流条供电情况正常等, 并把状态信息通过数据总线发送给机电管理系统显示, 同时通过警报装置显示供电系统的故障信号^[2]。

针对 BPCU 的功能和性能, 本文构建了多电飞机 BPCU 测试平台的电网控制逻辑架构以及通讯系统架构, 如图 1 所示。

BPCU 测试平台的通讯系统主要由通讯管理计算机完成信息的管理和传输。测试系统的通讯程序由两部分构成:

1) 通讯管理计算机通过 AFDX 总线与 AFDX 交换机连接, 通过 AFDX 交换机, 通讯管理计算机可以与多个终

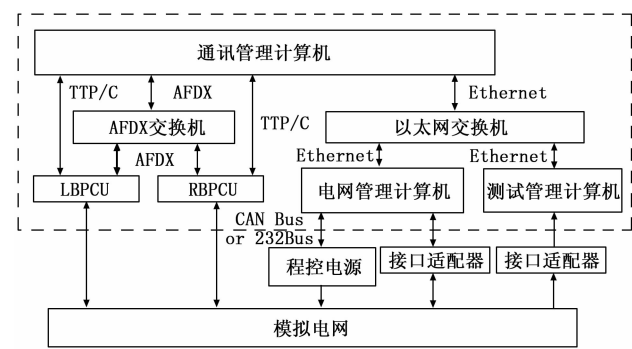


图 1 BPCU 测试平台架构

端进行通讯。本文的测试系统中 BPCU 包括左 BPCU（LBPCU）与右 BPCU（RBPCU）。另外，两台 BPCU 也通过 TTP/C 总线与通讯管理计算机连接，将 LBPCU 和 RBPCU 作为 TTP/C 总线的两个节点，实现两台 BPCU 之间的信息交互^[3]。

2) 通讯管理计算机通过网络线缆与以太网交换机连接，通过以太网交换机，与电网管理计算机以及测试管理计算机进行通讯。电网管理计算机执行的任务主要包括：控制模拟电网及程控电源，通过 LabVIEW 软件控制模拟电网运行于汇流条有电与没电状态，并模拟二次电源运行、电流状态、接触器状态等。测试管理计算机执行的任务主要包括：自动测试项目的管理以及电网状态的检测，通过 LabVIEW 界面显示模拟电网运行的情况。

表 1 通讯网络节点

通讯方式	通讯节点	IP 地址
AFDX 通讯	通讯管理计算机	192.168.1.1
	左 BPCU	192.168.1.2
	右 BPCU	192.168.1.3
以太网通讯	通讯管理计算机	192.168.1.1
	电网管理计算机	192.168.1.9
	测试管理计算机	192.168.1.10

2 ARINC664 双端口终端网卡

测试平台通讯管理计算机使用的 AFDX 通讯板卡为 ARINC664 高性能 AFDX 终端网卡，主要实现 AFDX 网络的信息传输功能。

PCI/PMC/PXI-3500 板卡的系统如图 2 所示，主要由前面板接口、网络接口模块、FPGA 控制模块和 PCI 桥芯片模块组成。其中，网络接口模块提供相互独立的两路发送通道和两路接收通道，也可以作为一对冗余端口使用。通过 HDMI 接插件可以提供 IRIG-B 时钟同步接口，TRIG 触发输入和输出，RS232 接口。网络接口模块与 PCI 桥芯片间的通信由 FPGA 控制。ARINC664 提供了 DLL 动态链接库，通过调用 CAPI 函数可以方便地使用板卡的相应功能。所有的 C-API 函数及其所需参数都在头文件 AFDX

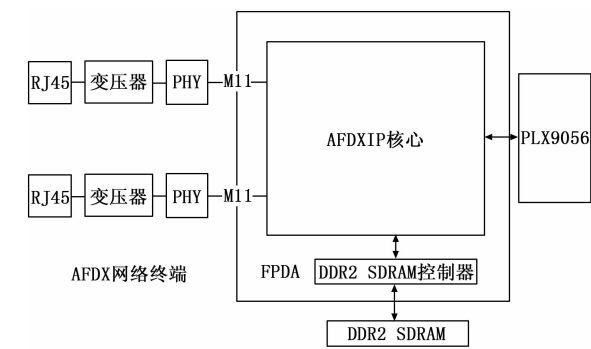


图 2 ARINC664 双端口终端网卡系统框图

_Card.h 中有定义。

3 通讯程序软件设计

与通讯管理计算机相互连接的终端包括两台管理计算机和两台 BPCU，其中两台管理计算机基于 windows 操作系统，使用 Labview 编程；BPCU 基于 Vxworks 实时操作系统，使用 VC++ 环境编程。针对通讯终端的不同操作环境，通讯管理计算机选择 windows 操作系统，采用 VC++ 环境设计软件程序，利用接口函数将多种通讯技术结合提高通讯效率。

3.1 Windows 系统下以太网通讯

图 3 显示了通过以太网交换机进行信息传输的三台管理计算机的连接方式，包括主机和以太网交换机中的协议、通讯程序与 Winsock API 之间的关系。通讯程序通过 Winsock API 以虚拟的方式访问 UDP/TCP 提供的服务。

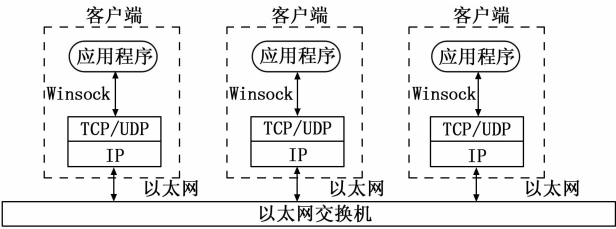


图 3 使用 winsock 以太网通讯框图

套接字是支持 TCP/IP 通信的基本操作单元，windows 系统下使用的 winsock 是网络编程的规范，同时也是一种标准 API 和网络编程接口。套接字通讯可以分为两种，即面向连接的套接字（TCP）和面向无连接的套接字（UDP），为不同需求的通讯程序提供了解决手段^[4]。图 4 是面向无连接的套接字通信工作的流程和基本原理。

通常情况下，Ethernet 通讯使用 TCP 协议，由于 TCP 通讯需先建立 USER 与 SERVER 之间的连接，因此能保证传输的准确性和稳定性。而 UDP 协议由于保证实时性和高效性而牺牲了传输的可靠性，接收端无法保证能够准确接收到对应发送端的信息。但 AFDX 使用冗余管理的方式克服了 UDP 通讯的可靠性问题，因此本程序中以太网通讯也选用 UDP 保证传输的实时性，对于可能出现的丢包、误码

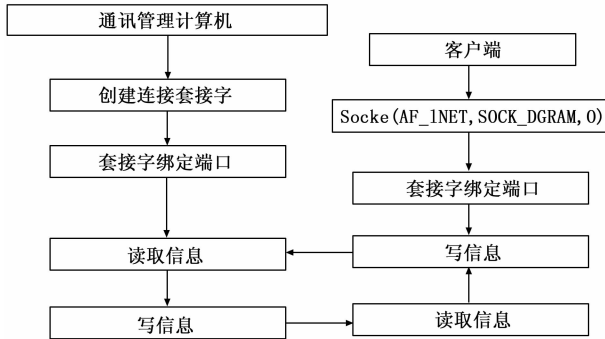


图 4 面向无连接的套接字通信工作的流程

情况进行实验测试后判断是否满足要求^[2]。

3.2 AFDX 冗余通讯管理

AFDX (Avionics Full Duplex Switched Ethernet) 即航空电子全双工交换式以太网，是在以太网 (IEEE 802.3) 标准基础上发展出来的一种确定性网络，遵循 ARINC664 协议的定义，主要特点是数据传输的实时性和可靠性^[5]。AFDX 系统由终端机、AFDX 交换机和 VL 链路组成，采用全双工 (Full Duplex) 方式连接，如图 5 所示。

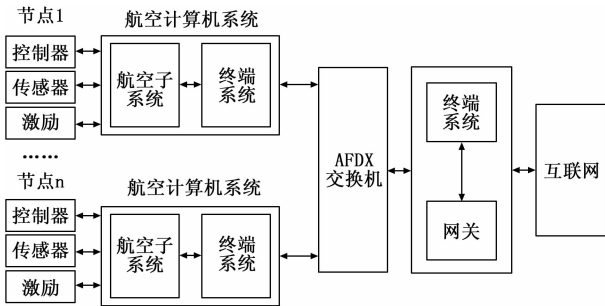


图 5 航空电子 AFDX 网络端系统

AFDX 终端一般是指符合 ARINC664 标准的板卡，板卡为用户提供了 API 函数接口，方便了各设备的通讯程序编写。AFDX 交换机是在以太网交换机的基础上改进的，能实现全双工互联的设备，主要完成 Ethernet 数据帧转发的功能。传统以太网采用动态路由的寻址方式使得传输路径不确定，而 AFDX 网络是一种确定性网络，采用虚链路来实现路由的选择，虚链路 VL 将一条物理链路分成多条逻辑上独立的 VL，每条 VL 都有其独立的参数，通过这些参数的设置来控制数据在 VL 上的传输^[6]。

本测试系统的通讯软件使用 ARINC664 终端网卡提供的 API 函数库。函数库中包含消息发送函数 AfdxCardComSendMsg 以及消息接受函数 AfdxCardComRecvMsg，因此在编程过程中无需重复以太网通讯的调用 winsock API 设置 UDP 端口的工作。

调用板卡 API 时，需要对 AFDX 通讯网络的双余度冗余管理模式进行设置。双余度冗余通讯是指 AFDX 通讯网络设置多条通讯链路，两个终端在传输信息时一般由两条

链路同时传输相同信息，保证数据不会由于意外或传输的不稳定性而导致数据传输失败，这样可以有效地避免 UDP 通讯的不可靠性对系统造成的影响，如图 6 所示。

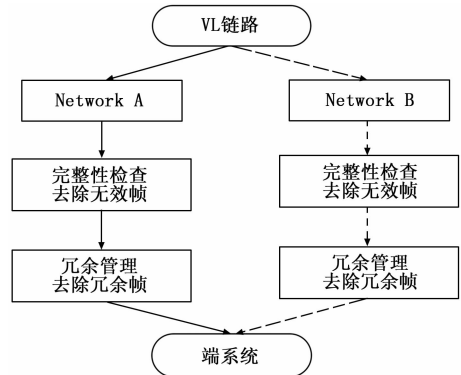


图 6 冗余管理示意图

根据 ARINC664 终端网卡提供的数据结构 TAfdxVICfg 中定义的网络完整性校验使能参数、冗余使能参数以及最大 Skew 值，冗余管理需要经过完整性检查和冗余判断两个步骤。AFDX 在打包数据帧过程中封装了一个 8 位的帧序列号 SN，完整性检测模块就是通过 PSN (即同一 VL 中前一帧的 SN) 判断该数据帧是否有效。通过完整性检查的帧需再进行冗余管理^[1]。

最大 skew 值 (nSkewMax) 指互为冗余的帧最大允许的传输时间间隔，通过检测两个有效帧之间的时间间隔判断其是否互为冗余。程序中设置 nSkewMax=100，即间隔时间不超过 100 毫秒即为冗余帧。由数据帧的 SN 值判断其有效性，再由两个有效数据帧的接受时间间隔判断是否互为冗余帧，即为程序的冗余管理策略，流程图如图 7 所示。

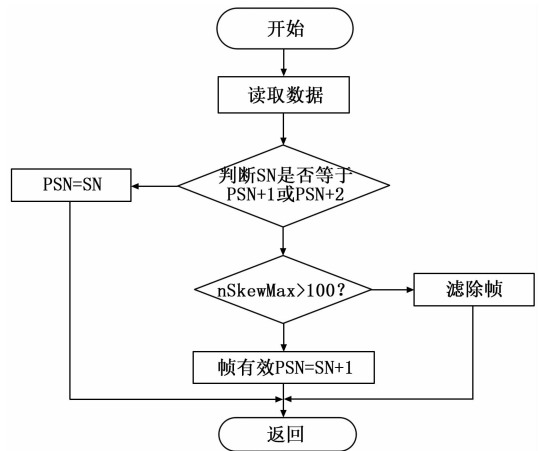


图 7 冗余管理算法流程图

在数据结构 EAfdxRxMibType 中包含各种不同情况下数据帧丢弃的类型，包括端口未使能丢弃帧、SN 错误丢弃帧、冗余错误丢弃帧等，程序中添加查看信息代码，以识别不同情况下丢弃数据帧的原因。

另外，针对多电飞机中的重要供电部分，配电系统设

置了双 BPCU 的冗余管理, 即 LBPCU 和 RBPCU 均传输对应数据至测试系统中, 构成双冗余度的管理系统。

因此在 AFDX 双网络冗余的基础上, 还需要对双 BPCU 冗余通讯进行管理。首先定义 RBPCU 传输的数据优先级高于 LBPCU。当两个 BPCU 同时传输数据至通讯管理计算机时, 先判断信息有效性, 若两个 BPCU 的信息均有效, 且字符串内容相同时, 丢弃 LBPCU 的信息, 并传输相应的信息给测试管理计算机^[7]。

3.3 多线程通讯任务

单 while 循环下的通讯任务能够完成点对点的通讯, 但由于 recv 函数与 send 函数相互阻塞, 导致无法实现信息的单独接收和发送。另外由于通讯管理计算机是 BPCU 测试平台通讯网络的管理节点, 完成的任务为各终端信息的相互传递工作, 为保证软件的运行效率和通讯转发的速率, 需要使用多线程同步通讯技术。

为了防止将主线程设为任意一条通讯线路可能造成的阻塞情况, 在主线程中使用函数 WaitForMultipleObjects 确保子线程之间能同步执行, 主线程监视每一个子线程的执行情况, 并且无限期等待子线程执行, 确保传输数据不会丢失。当通讯线程数不确定的情况下, 可在主线程中使用 while 函数循环创建线程, 但是 while 循环可能造成线程拥堵以及重复创建线程浪费资源的情况。本程序中主要执行的子线程通讯任务如图 8 所示, 包括两台 BPCU 之间的通讯、BPCU 与测试管理计算机之间的通讯、测试管理计算机向电网管理计算机发送信息, 通讯线程为 6 条, 因此可以直接使用线程组进行管理, 避免了拥堵和浪费资源的情况。两个节点之间的相互通讯分为两条互斥的子线程, 使用 CCriticalSection 类来控制链表, 构建数据临界区, 保护线程的共享数据在通讯过程中的安全性。

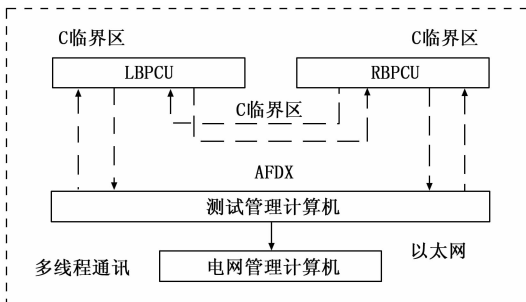


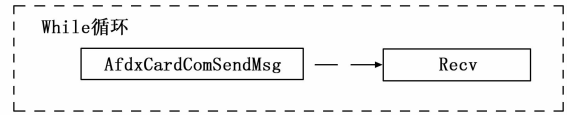
图 8 线程通讯任务

3.4 通讯程序优化

针对多电飞机 BPCU 通讯程序的需求, 子线程中将 BPCU 发送函数 AfdxCardComSendMsg 与测试管理计算机接收函数 Recv 放在一个 While 循环中即一个子线程完成 BPCU 发送的信息接收、信息反馈处理、将处理过的信息返回给测试管理计算机的任务, 如图 9 所示。该方案可将发送与接收两个线程并为同一线程, 同时可以保证接收信

息经过处理后发送, 保证信息正确性, 也节约了通讯计算机的线程资源。

BPCU发送测试计算机接收



测试计算机发送BPCU接收

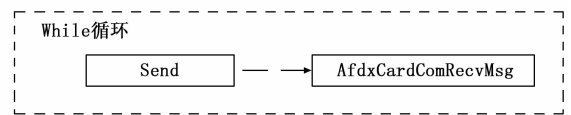


图 9 子线程通讯流程

在数据传输过程中, 通讯程序可能出现的问题包括:

- 1) 无法与 BPCU 进行信息交互。
- 2) 接收的数据被截断, 或发送数据被置零。

实现 AFDX 通讯的关键参数包括终端机的 IP 地址、使用的 UDP 号以及 VL 链路号。对于不同的 ARINC664 板卡, IP 地址的设置方式存在差异, 本测试系统使用的板卡 IP 地址为 10.ES 高八位, ES 低八位, 分区号, ES 以及分区 ID 均在程序中有对应的定义。当两个终端机的通讯程序中, IP 地址设置为对方的 IP, 且 UDP 号与 VL 链路号均相同时, 才能实现通讯功能。因此针对不同的 BPCU, 需了解其程序中的具体设置^[8]。

根据 BPCU 信息传输协议, AFDX 通讯系统传输的数据为 char 型字符串, 每一位字符均为 0x00 格式。对于 char 型字符串, 0x00 字符即为 '\0', 当使用 strlen() 等函数对字符串进行长度计算时, 会存在遇到 0x00 即截断的情况^[9]。因此在 sendto 及 recv 函数中的 length 参数一项, 应避免使用相应的函数。另外 recv 函数中的 length 参数会被强制缩小, 即当接收到的字符串长度小于预先设定的长度, length 参数会定义为较小的值, 而下次接收到较长的字符串时, recv 函数仍旧按照较小的值读取字符串, 这便会造成接收字符串截断的情况。因此在 while 循环中需对 length 参数进行重置^[10]。

4 实验验证

4.1 以太网通讯实验

以太网通讯网络包括一台以太网交换机以及三台终端计算机, 运行通讯管理计算机的以太网通讯测试程序。

通讯程序中包含了 PING (Packet Internet Groper) 功能, 预先设置好两台计算机的 IP 地址即可自动完成网络通断测试, 如图 10 所示。若目标计算机无法通信, 程序会提示是否继续运行以保证其他终端的正常通讯。

PING 的结果可以看出, 向测试管理计算机发送十次信号, 平均通讯时间小于 1ms, 丢包率为 0%, 正确率为 100%。当网络状态稳定的情况下, UDP 通讯也能满足可靠性的要求。

```

*****AFDX、TTP、Ethernet communication program*****

Successful initialization !
Testing the running status of the test management computer.....
Test management computer IP address: 119.75.217.109
Receive a response from the test management computer: Byte = 64, Time < 1 ms
Receive a response from the test management computer: Byte = 64, Time < 1 ms
Receive a response from the test management computer: Byte = 64, Time < 1 ms
Receive a response from the test management computer: Byte = 64, Time < 1 ms
Receive a response from the test management computer: Byte = 64, Time < 1 ms
Receive a response from the test management computer: Byte = 64, Time < 1 ms
Receive a response from the test management computer: Byte = 64, Time < 1 ms
Receive a response from the test management computer: Byte = 64, Time < 1 ms
Receive a response from the test management computer: Byte = 64, Time < 1 ms
Receive a response from the test management computer: Byte = 64, Time < 1 ms
Receive a response from the test management computer: Byte = 64, Time < 1 ms
PING statistics:
Packet: send = 10, receive = 10, lost = 0 (0% SER)
Time: MIN = <1ms, MAX = <1ms, average = <1ms

Successful initialization !
Successful creation of UDP sockets !
Binding Successful!
Local IP Address is: 0.0.0.0

```

图 10 PING 功能程序图

图 11 为接收程序与发送程序放入一个 while 循环中的通讯程序，能够完成点对点信息传输功能。

```

*****Start transferring data*****
Please enter send data: 123
Test Management Computer Receives Data: 123

Please enter send data: 456
Test Management Computer Receives Data: 456

Please enter send data: _

```

图 11 以太网通讯程序实验

4.2 AFDX 板卡通讯实验

AFDX 通讯网络包括一台 AFDX 交换机、一台终端计算机以及两台 BPCU，运行通讯管理计算机的 AFDX 通讯测试程序。

AFDX 通讯网络主要完成 BPCU 之间的通讯以及 BPCU 与测试管理计算机之间的通讯，实验时在通讯程序中输入 send 函数通讯信息，模拟测试管理计算机通过以太网将数据传送到通讯管理计算机后，再由 AFDX 网将信息传输至 BPCU。图 12 为 AFDX 点对点通讯实验的通讯程序框图。

```

*****AFDX Communication*****

transfer data to LBPCU: 553394156
AFDX Communication success!

transfer data to LBPCU: 22322
AFDX Communication success!

```

图 12 AFDX 通讯程序实验

4.3 多线程系统联调实验

各终端部署完成后，连接以太网交换机以及 AFDX 交换机，运行多线程通讯测试程序。

首先使用 PING 功能测试各终端是否正常工作，若有终端未能 PING 成功则程序会暂停并询问是否继续。各终端均正常工作后，通讯管理计算机进入网关模式，接收各终端传输的数据并判断发送的目标地址，并且监控记录各终端之间的通讯数据，如图 13 所示。

多线程通讯保证了各终端信息传输不干扰，且关联

```

Received data from LBPCU: 230 28 115
Transfer to test management computer Success!

Received data from test management computer: 123456
Transfer to RBPCU Success!

```

图 13 多线程通讯程序实验

数据不会由于同时传输数据而出现误操作。通讯网络是测试平台的关键枢纽，保证数据传输的准确性、及时性、有效性，同时多总线通讯网络的开发也为未来飞机通讯网络的构建打下了基础。

5 结论

本文针对多电飞机 BPCU 自动测试系统的总线通讯部分，分别设计了以太网通讯网络、AFDX 通讯网络和 TTP/C 通讯网络，在 VC6.0 环境下将 3 个通讯方式结合在一起编写了综合性的通讯管理系统，并且根据测试系统的实际需求优化了通讯线程，提高了系统的实时性和稳定性。通过多电飞机 BPCU 自动测试平台的系统联调运行，验证了通讯管理系统能够实时的接收和发送数据，保证系统稳定运行。综合性通讯管理系统的开发为多电飞机日益复杂的供电系统提供了高效稳定的平台。

参考文献:

- [1] 董延军, 郭朋, 张晓斌, 等. 基于 LabVIEW 的汇流条功率控制器测试系统设计 [J]. 测控技术, 2012, 31 (11): 92-96.
- [2] 田泽, 姜丽云, 陈伟, 等. AFDX 网络关键协议分析与研究 [J]. 电子技术应用, 2016, 42 (4): 7-10, 14.
- [3] Tao G. An AFDX monitor system introducing data analysis based on ICD [A]. Proceedings of 2016 IEEE/CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS) [C]. 2016.
- [4] Li M. Determinism Enhancement of AFDX Networks via Frame InSertion and Sub-Virtual Link Aggregation Industrial Informatics IEEE Transactions on [J]. 2014, 10 (3): 1684-1695.
- [5] 李超. 基于 AFDX 技术的航空通信系统的设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.
- [6] 孟宪强, 程瑞琪, 蒋兆远. 基于以太网的 VC6.0 网络通信编程研究 [J]. 兰州交通大学学报, 2004 (4): 74-77.
- [7] 白凡玉, 董延军, 王利然. 分布式飞机供电系统中 BPCU 的设计与实现 [J]. 机电一体化, 2013, 19 (1): 81-84.
- [8] 李哲, 田泽, 张荣华, 等. AFDX 网络协议及关键技术的研究 [J]. 计算机技术与发展, 2016, 26 (4): 46-50.
- [9] 赵永库, 李贞, 唐来胜. AFDX 网络协议研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (1): 8-10, 30.
- [10] 戴高乐, 邢卉丽, 杨善水, 等. 大型民机配电系统 AFDX 总线应用技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (5): 257-260.