

# 大型民机配电系统 AFDX 总线应用技术研究

戴高乐, 邢卉丽, 杨善水, 王莉

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 210016)

**摘要:** 基于 AFDX 通讯总线模拟了大型民机配电系统的高速通讯网络, 对配电系统中 AFDX 总线的应用技术进行了研究, 提高了配电系统软件在 AFDX 总线中的读写效率和兼容性, 为系统中 AFDX 总线的应用提供了借鉴和参考; 首先分析了 AFDX 通讯总线的组成和关键技术, 并构建了大型民机配电系统的模拟通讯网络; 随后, 进行了 AFDX 总线端系统应用软件的研究, 采用数据压缩和基于“位运算”的数据处理方法; 以 LabVIEW 软件为例, 针对端系统中用户软件无法开发相应的 AFDX 总线驱动问题, 设计了无 AFDX 底层驱动软件与 AFDX 通讯网络的接口程序; 并基于 AFDX 总线的采样端口模式, 提出了一种基于 AFDX 网络的多余度系统的冗余通讯方法; 最后, 通过通讯实验验证了接口程序及冗余通讯方法的正确性和可靠性。

**关键词:** 航空通讯总线; AFDX; 大型民机; 配电系统;

## Research on Application Technology of AFDX Bus in Distribution System of Civil Aircraft

Dai Gaole, Xing Huili, Yang Shanshui, Wang Li

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

**Abstract:** Based on AFDX communication bus, this paper simulates the high-speed communication network of civil aircraft distribution system, and studies the application technology of AFDX bus. Firstly, the composition and key technologies of AFDX communication bus are analyzed. Then, an analog communication network for civil aircraft power distribution system is constructed. The method of data compression and data processing based on bit operation is adopted to improve the efficiency of communication data reading and writing. The interface program of communication network between LabVIEW and AFDX is designed. The application of end system based on LabVIEW software in AFDX bus is realized. Based on the sampling port mode of AFDX bus, redundancy communication problem of redundant system in network is solved.

**Keywords:** aeronautical communication bus; AFDX; civil aircraft; power distribution system;

## 0 引言

随着民用客机的迅猛发展, 飞机的用电量不断增多, 电气负载和电网规模不断加大, 配电系统通讯总线的数据吞吐量也迅速攀升, 这就对大型民机配电系统通讯总线的实时性和可靠性提出了更高的要求。传统的航空通讯总线技术主要采用 ARINC429/629、MIL-STD-1553B、CAN 等协议, 这些数据通信协议已经广泛地应用在航空电子系统中, 但是它们均存在传输速率较低的缺点, 总线带宽均未超过 2 Mbps, 数据吞吐量上无法满足今后大型民机配电系统对于通讯总线的要求<sup>[1]</sup>。因此, 波音和空客公司开发了高实时性、高可靠性和高带宽的新一代航空总线——AFDX 总线。

国内外的学者对 AFDX 总线做了很多的研究工作, 文献 [2] 开展了 AFDX 总线协议与 CAN 总线协议间网关技术的研究; 文献 [3] 开展了如何优化 AFDX 总线端系统之间的传输

延时问题的研究; 文献 [4] 提出了插入额外帧的方法来提高 AFDX 总线的稳定性。然而这些研究都是针对 AFDX 总线协议本身的, 针对端系统中 AFDX 总线的应用技术研究开展的较少。

本文以 AFDX 总线为基础, 模拟了大型民机配电系统的通讯网络, 针对大型民机配电系统数据吞吐量大以及 AFDX 端系统的底层驱动不支持 LabVIEW 软件的问题, 开展了 AFDX 总线应用技术研究。优化了端系统的数据处理能力, 解决了基于 LabVIEW 软件的航电模拟系统与 AFDX 通讯网络的兼容问题和配电系统双余度控制器通讯的冗余管理问题。

## 1 AFDX 总线协议简介

AFDX (Avionics Full Duplex Switched Ethernet) 全称为航空电子全双工交换式以太网, 是基于标准以太网技术 (IEEE 802.3), 由 ARINC664 协议第 7 部分定义的一种确定性网络。

### 1.1 AFDX 网络组成

AFDX 通讯总线由端系统、交换机和物理链路三部分构成星形拓扑架构。AFDX 网络的传输路径是静态的, 通过网络配置表直接加载实现, 可靠性较高。

1) 端系统: 端系统是 AFDX 通讯网络中的重要元件, 保证了网络中各个节点间安全、可靠的数据交换。除了提供硬件接口, 端系统还向用户提供了各种软件程序接口, 实现用户数

收稿日期: 2017-10-19; 修回日期: 2017-12-04。

**作者简介:** 戴高乐 (1992-), 男, 江苏苏州人, 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。

据的读写和收发。

2) 交换机: 交换机在 AFDX 网络中承担着数据转发的功能, 负责连接各个端系统。交换机之间可以通过互相级联扩展交换端口, 便于大型通讯网络的组建。

### 1.2 虚拟链路技术

虚拟链路 (Virtual Link) 技术是 AFDX 总线的核心技术, 其建立了一个源终端到一个或多个目标终端的逻辑上的单向连接, 并有效的分割带宽资源, 实现了实际带宽的分时复用。

在发送端, 采用了流量整形技术对虚拟链路进行资源的分配, 端系统会预先为每条虚拟链路设定带宽分配间隙 (Bandwidth Allocation Gap, BAG, 代表帧与帧之间发送的最小时间间隔) 和最大帧长度 (Lmax) 这两个参数, 从而限制了每条虚拟链路的最大可用带宽 (最大可用带宽 =  $L_{max} / BAG$ ), 保证了每条虚拟链路按照预先设定时间间隔进行传输, 避免虚拟链路之间的互相冲突。

## 2 配电系统 AFDX 通讯网络架构

参考 B787 的通讯架构, 本文构建了大型民机配电技术研究系统的电网框图和通讯网络架构如图 1 所示。

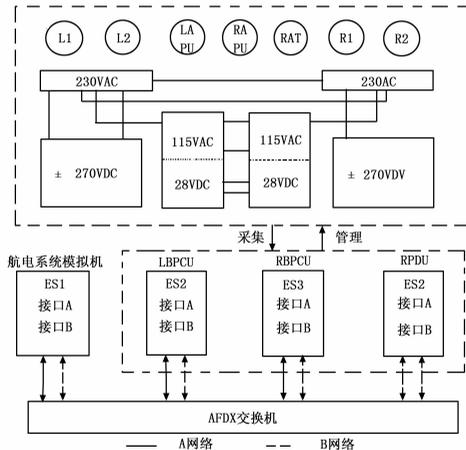


图 1 配电系统通讯网络架构

汇流条功率控制器 (BPCU; Bus Power Control Units) 是配电系统控制单元, 左右两台 BPCU 冗余管理电网, 上传电网状态信息至航电系统模拟机; 航电系统模拟机用于模拟航电系统中的通用计算资源柜 (Common Computing Resource Cabinet), 汇总和显示电网状态信息, 并发出电网管理指令至 BPCU; RPDU (Remote Power Control Units) 是远程配电控制单元, 将电能分配给部分远程负载。

配置 4 个 AFDX 端系统和一台 AFDX 交换机。每个端系统上均有两个物理端口, 分别为 A 网络端口和 B 网络端口, 并根据配置表连至交换机的相应端口上, 设置 AFDX 通讯链路规划表如表 1 所示。

## 3 数据的优化处理

针对大型民机配电系统总线的庞大数据传输需求, 本文采用数据压缩的存储方式减小数据传输量, 同时以“位运算”为核心思想编写通讯数据处理程序。该方法不仅节省了通讯数据空间, 而且减少了数据处理程序的代码量, 提高 AFDX 通讯数据的读写效率。

表 1 AFDX 通讯链路规划表

虚拟链路	1	2	3
源端系统	航电系统模拟机(ES1)	航电系统模拟机(ES1)	航电系统模拟机(ES1)
目标端系统	LBPCU(ES2)	R BPCU(ES3)	RPDU(ES4)
虚拟链路	4	5	6
源端系统	LBPCU(ES2)	R BPCU(ES3)	RPDU(ES4)
目标端系统	航电系统模拟机(ES1)	航电系统模拟机(ES1)	航电系统模拟机(ES1)

### 3.1 基于位存储的数据压缩技术

AFDX 通讯每一帧中用户数据的存储空间为 17~1472 字节<sup>[3]</sup>, 如果大量的电网数据以浮点数据型的模拟量信号进行存储, 则每一个直流电信号会占用 4 个字节、每一个交流电信号会占用 12 个字节, 那么每一帧中整个电网的数据存储量极大, 甚至有可能发生存储溢出。因此采用了按位存储的数据压缩方式来处理电网数据。

数据压缩技术的本质是数据类型的转换, 将某一电网部件具体的电信号模拟量数据转换为反映该部件工作状态的数字量数据, 并按位对各种部件状态进行存储。通过软件程序和 GJB-181A 标准判断采集到的模拟量值反映了电网部件的哪一种工作状态, 并将其转换为有电/没电、正常/故障这 4 种状态信号进行存储。而对于部分关键的电网部件, 则仍以 float 型的数据类型存储其电信号模拟量。压缩后每种部件的状态仅占 2bit 的存储空间, 大大节省了用户数据的存储空间。

### 3.2 基于位操作的数据处理技术

电网数据进行压缩后还需要进行数据打包, 才能组成用户数据帧发送至 AFDX 总线上。为了能够有效和快速的实现数据的打包和发送, 本文采用 C 语言, 以“位运算”为核心思想编写了 BPCU 中 AFDX 通讯的数据处理程序。

首先, 由于 AFDX 通讯数据为 char 型格式的变量, 宏定义一个占用 1 字节的基准值“#define AFDX\_State 0x01”, 用于移位运算; 再定义一个指针变量指向通讯数据数组的首地址, 并将通讯数据数组清零。

然后, 根据通讯数据结构表, BPCU 对其采集到的电网信息进行电能质量检测, 并更新通讯数据:

- a) 对于某一数字量数据, 对基准值进行移位操作, 再与该数字量对应的数组元素进行或操作, 即可刷新数据。
- b) 对于某一模拟量数据, 本文采用 memcpy (void \* dest, const void \* src, size\_t n) 函数, 更新通讯数据。

最后, 通过通讯接口函数, 将更新完数据的 AFDX 通讯数组 SND\_AFDX 发送至 AFDX 通讯总线中, 完成通讯数据的打包。由于位操作是直接对内存进行操作, 且代码量较小, 提高了端系统对通讯数据的读写速度, 优化了端系统的处理能力。

## 4 基于 LabVIEW 软件的端系统与 AFDX 总线的兼容问题

航电系统模拟机采用 LabVIEW 设计软件程序, 实现配电系统的数据汇总和电网状态显示的功能, 但是 AFDX 的底层驱动不支持开发用于 LabVIEW 的动态链接库文件。因此, 针对端系统中某些应用软件无法开发相应的 AFDX 总线驱动,

从而导致该端系统应用软件无法读取总线信息的问题, 本文提出了设计 AFDX 通讯接口程序的方法。该接口程序不仅负责读写 AFDX 通信总线上的数据, 还基于套接字 (socket) 建立了 C++ 程序进程与 LabVIEW 程序进程间的本地 TCP 通讯连接, 解决 LabVIEW 软件与 AFDX 总线的兼容问题, 通讯程序结构如图 2 所示。

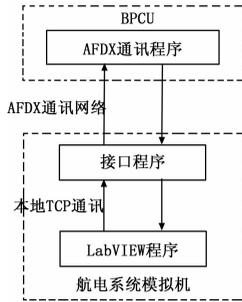


图 2 系统通讯程序架构

接口程序采用双线程的软件架构, 从而提高软件的运行效率和通讯转发的速率。主线程的任务是接收 AFDX 通讯数据并转发给 LabVIEW 程序、完成 AFDX 板卡的初始化和套接字库的初始化以及启动子线程, 程序流程图如图 3 所示。子线程的任务是创建并设置套接字、接收 LabVIEW 发送的数据并通过 AFDX 通讯转发给 BPCU 以及管理连接套接字链表, 程序流程图如图 4 所示。

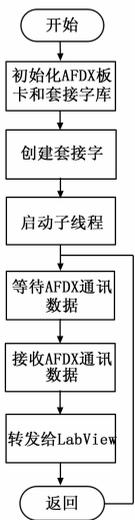


图 3 主线程程序流程图

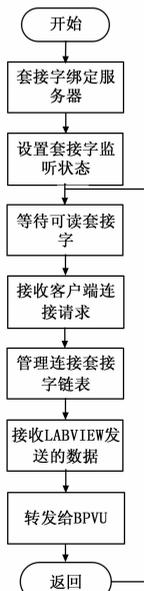


图 4 子线程程序流程图

子线程中采用 select () 模型监听套接字的状态, 实现数据的读取。先定义 fd\_set 结构的套接字集合, 并将主线程中创建的监听套接字加入该集合中; 随后调用 select 函数查询该集合的可读性, 可写性和错误信息; 若 select 函数返回值大于 0, 代表某些集合可读写或已经出错, 再调用 FD\_ISSET 函数检查可读套接字是否在该集合中; 如果该套接字为监听套接字, 则调用 accept () 函数, 返回一个连接套接字, 并将其加入套接字集合和连接套接字链表中, 如果不是监听套接字而是

连接套接字, 则调用 recv () 函数接收连接套接字中 LabVIEW 客户端发送的数据, 并将其转发至 AFDX 通讯网络。

双线程程序的一个关键问题就是共享资源的同步访问, 本程序中 accept () 函数返回的连接套接字就是一个共享资源, 主线程需要向该 socket 写数据, 而子线程需要从该 socket 读数据。为了解决这个问题, 将该连接套接字存入一个链表中, 并通过 CCriticalSection 类控制该链表, 构建数据临界区, 达到同一时刻只允许一个线程访问该链表。同时, 还需要定义一个 CSingleLock 型的变量, 线程通过调用成员函数 Lock () 占用共享资源, 资源访问完后, 通过调用 Unlock () 释放该共享资源, 保证线程之间对共享资源的互斥访问。

### 5 多余度配电系统冗余通讯管理

大型民机配电系统中, 左、右 BPCU 对重要的电网部分进行冗余管理, 并都上传该部分的数据至 AFDX 总线, 构成双冗余度控制系统。为了解决系统中冗余通讯的问题, 就需要考虑通讯数据优先级和数据有效性的问题。

AFDX 通讯网络本身是一个确定性网络, 并通过虚拟链路定义了端系统之间的单向连接。因此端系统能够分辨出数据的来源, 从而根据预先定义的优先级读取高优先级的数据。

将端系统的端口设置为采样模式以解决数据有效性问题。AFDX 总线的端口采样模式能够与 ARINC653 (航空电子应用软件标准接口) 标准完美地衔接<sup>[5]</sup>, 其工作机制使得采样端口只能缓存一条信息, 当 AFDX 总线上有新的信息到达时, 缓冲区中旧的信息将被直接覆盖。同时, 每个采样端口都和一个刷新标志相关联, 当这个刷新标志有效时, 说明当前缓冲区中的信息是最新的<sup>[6]</sup>。所以, 可以通过检测该刷新标志, 来判断每个端系统发送的冗余数据是否有效。

基于采样端口的冗余数据处理程序流程图如图 5 所示。首先, 定义 RBPCU 数据的优先级高于 LBPCU, 随后程序先读取来自 RBPCU 的冗余数据, 并判断其刷新标志是否有效, 若有效, 直接将该部分数据写入套接字并发送给 LabVIEW 程序, 直接丢弃 LBPCU 的冗余数据; 若无效, 则读取来自 LBPCU 的冗余数据, 并判断其刷新标志是否有效, 若有效, 将该部分数据写入套接字发送给 LabVIEW 程序; 若无效, 则仍将 RBPCU 的数据发送给 LabVIEW 程序。

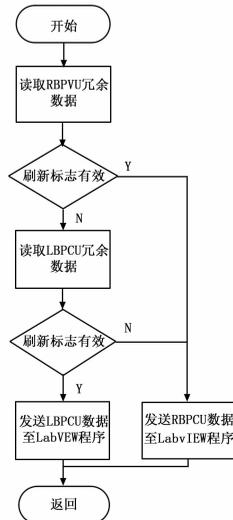


图 5 通讯数据冗余管理流程图

## 6 通讯实验验证与分析

### 6.1 配电系统 AFDX 模拟通讯网络系统实验

系统正常情况下，进行通讯网络点对点的数据收发实验。

左右 BPCU 通过数据压缩和位运算处理，形成 AFDX 通讯数组。通过 BPCU 宿主机中的 Tornado2.2 调试环境实时观测该数组，如图 6 所示。其中 SND\_AFDX 为数据发送数组，以十六进制显示，RCV\_AFDX 为数据接收数组，以十进制显示。接口程序实现了 BPCU 与航电系统模拟机之间的数据传递，如图 7 所示。图 8 中显示的“AFDX 接收数据 Y”为 LabVIEW 程序接收到的数据，“AFDX 发送数据 X”为发送的数据。

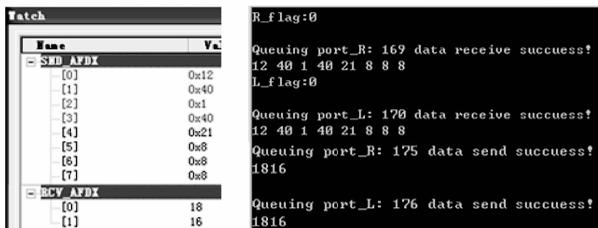


图 6 左右 BPCU 发送、接收数据

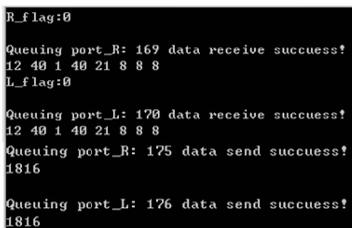


图 7 接口程序发送、接收数据



图 8 LabVIEW 程序收发数据及状态显示

有图可得，航电系统模拟机接口程序转发的数据分别为 [0x12, 0x40, 0x1, 0x40, 0x21, 0x8, 0x8, 0x8] 和 [18, 16]，该组数据与通讯网络中 BPCU 程序、和 LabVIEW 程序收发的数据均一致。点对点互相通讯实验表明，数据发送、接收正确，接口程序能够实现基于 LabVIEW 软件的端系统与 AFDX 总线的兼容。

### 6.2 双余度配电系统冗余通讯实验

上节的系统通讯实验，系统正常，图 8 中 LabVIEW 程序显示左右 BPCU 均工作，无报警提示。

关闭右 BPCU，进行冗余通讯实验，通讯数组仍如图 6 所示。图 9 中，接口程序只接受到左 BPCU 发送数据，同时提示右 BPCU 节点数据接收失败，进行冗余管理后，将有效数据发送至航电系统模拟机中，“AFDX 接收数据 Y”为 [0x12, 0x40, 0x1, 0x40, 0x21, 0x8, 0x8, 0x8]，与接口程序发送有效数据一致，同时根据接口程序发送的报警信息，提示右 BPCU 的 AFDX 通讯失败。由此验证了本文提出的 AFDX 总线中基于采样模式的冗余管理方法能够解决多余度配电系统的冗余通讯问题。

## 7 结论

本文设计了基于 AFDX 通讯总线的大型民机配电系统模

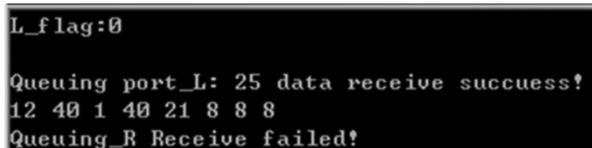


图 9 接口程序接收数据及状态显示

拟通讯网络，应用了数据压缩和基于“位运算”的通讯数据处理方式，设计了 LabVIEW 软件与 AFDX 总线之间的接口程序，优化了 AFDX 网络中端系统的数据处理能力。通过大型民机配电系统 AFDX 模拟通讯网络的数据收发实验，验证了本文所构建的大型民机配电系统 AFDX 通讯网络能够实现电网数据的收发，同时验证了本文所设计的接口程序能够解决基于 LabVIEW 软件的端系统与 AFDX 通讯网络的兼容问题。为大型民机电气系统的实验提供了通讯平台。

### 参考文献:

[1] 宁新建. 航空机载计算机及其总线 [J]. 计算机与网络, 2003 (24): 54-55, 58.

[2] Rejeb N, Mhadhbi I, Salem A K B, et al. Modeling of a heterogeneous AFDX-CAN network gateway [A]. Computer Applications & Research [C]. IEEE, 2014: 1-6.

[3] Li J, Guan H, Yao J, et al. Performance Enhancement and Optimized Analysis of the Worst Case End-to-End Delay for AFDX Networks [A]. IEEE International Conference on Green Computing and Communications [C]. IEEE Computer Society, 2012: 301-310.

[4] Li M. Determinism Enhancement of AFDX Networks via Frame Insertion and Sub-Virtual Link Aggregation [J]. Industrial Informatics IEEE Transactions on [J]., 2014, 10(3): 1684-1695.

[5] 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.

[6] 钟杰, 何民, 王怀胜, 等. AFDX 构架及协议分析 [J]. 电讯技术, 2010, 50(1): 65-71.

[7] 严仰光, 秦海鸿, 龚春英, 等. 多电机与电力电子 [J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(1): 11-18.

[8] 李大鹏, 赵明莉, 田园. AFDX 端系统中冗余管理的研究和实现 [J]. 电子技术, 2012, 39(12): 10-13.

[9] 陈昕, 周拥军, 万剑雄. AFDX 端系统关键技术的研究与实现 [J]. 计算机工程, 2009, 35(5): 1-3.

[10] Wang H C, Niu W S. Design and Analysis of AFDX Network Based High-Speed Avionics System of Civil Aircraft [J]. Advanced Materials Research, 2012, 1655(462).

[11] Wheeler P. Technology for the more and all electric aircraft of the future [A]. IEEE International Conference on Automatica [C]. IEEE, 2016.

[12] Li J, Guan H, Yao J, et al. Performance Enhancement and Optimized Analysis of the Worst Case End-to-End Delay for AFDX Networks [A]. IEEE International Conference on Green Computing and Communications [C]. IEEE Computer Society, 2012: 301-310.

[13] Chen X, Xiang X, Wan J. A software implementation of AFDX end system [M]. A Software Implementation of AFDX End System. 2009: 558-563.