

飞行试验测试采集的 AFDX 总线检测分析技术研究

彭国金, 刘嫚婷, 张娟

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 在航空产品的航电系统跨代升级中, AFDX 总线数据的检测分析是飞行试验对航空产品航电系统进行科研鉴定的一项重要技术手段, 针对复杂航空电子环境下的采集记录的 AFDX 总线数据的多类、随机性等特点, 提出了 AFDX 总线消息识别、帧检测、丢包检测分析方法及实现技术, 并结合采用了 AFDX 总线周期检测分析算法, 设计了 AFDX 总线的检测分析技术, 实现了飞行试验 AFDX 总线的检测分析, 最后在某试验机 AFDX 总线飞行试验测试中进行了应用, 试验表明该 AFDX 总线检测分析技术满足飞行试验对航电系统进行科研鉴定的需求。

关键词: 检测分析; 航电系统; AFDX 总线; 测试采集

Research on the Detection and Analysis Technology of the Flight Test Acquisition AFDX Bus Data

Peng Guojin, Liu Manting, Zhang Juan

(Chinese Flight Establishment of AVIC, Xi'an 710089, China)

Abstract: In cross-generation upgrade of the avionics system of aviation products, the detection and analysis of the AFDX bus data is an important technology medium for scientific research appraisal to the avionics system of aviation products in the flight test, in view of the characteristics of the AFDX bus data acquisition and recording of complex airborne electronic environment, the bus data is random and so on, designed the detection and analysis technology of AFDX bus message recognized, frame analysis, lost packet analysis, and the AFDX bus cycle detection algorithm is used in combination, design the detection and analysis technology of the AFDX bus, realize the detection and analysis of the flight test AFDX bus. In the end, the technology is carried out in the flight test of a test aircraft, which meets the detection and analysis requirements of flight test AFDX bus data.

Keywords: detection analysis; avionics system; AFDX bus; test acquisition

0 引言

随着现代航空电子系统复杂度的不断增加, 1553B 等 20 世纪 90 年代成熟的航空总线技术, 已经不能适应航空电子设备及子系统之间的通信需求, 新型军用高速总线 AFDX (Avionics Full Duplex Switched Ethernet)^[1-2] 的实时性和可靠性以及高带宽, 都特别适合当代航空电子子系统的需求, 并且在空客 A380 上得到了成功应用。随着航空环境下 AFDX 总线技术逐渐成熟并进行工程运用, 在飞行试验^[3] 工程领域, 对飞行试验 AFDX 总线数据分析技术已经成为现代飞机飞行试验的重要内容之一。

在飞行试验过程中, 试验机机载总线测试系统采集记录航电系统 AFDX 总线, 试飞工程师对该记录的数据进行分析, 分析的结果数据作为对该试验机航电系统进行科研鉴定的重要依据。

在传统的飞行试验航电总线^[3] 处理中, 因为试验机航电系统环境单一, 同样的试验采集记录环境也是单一的, 不会有复杂的测试环境, 记录下试验文件只包含总线数据, 总线没有专

门的检测分析这一需求。但是在 AFDX 总线测试采集过程中, 因 AFDX 总线的网络特性, 具有复杂的测试环境、可能的帧不完整以及丢包的特点, 故在 AFDX 总线数据处理中, 对测试系统采集的 AFDX 总线进行检测分析包括对采集的 AFDX 总线数据的完整帧检测、对 AFDX 总线消息识别分析及丢包检测分析, 是飞行试验鉴定飞机航电系统的一项重要内容, 所以 AFDX 总线的检测分析就成为航电系统 AFDX 总线数据分析的一项重要内容, 而在复杂航空环境下, 传统的航电总线数据分析技术已不适用新形势下对 AFDX 总线进行检测分析。

1 飞行试验总线检测分析

从某一方面来说飞行试验是对试验机整机性能到各个子系统的一个鉴定过程, 随着新型航空总线 AFDX 应用于航空产品中, 试验机航电系统随之也进行了跨代升级, 传统的航电总线 1553B 技术被逐渐取代。试验机新的总线技术构架^[4] 需要被飞行试验进行科研鉴定, 以确保其可靠、稳定, 且性能等各项指标符合设计要求, 飞行试验总线检测分析作为一项重要的技术鉴定手段, 直接给试飞工程师提高数据依据。

1.1 飞行试验传统航电总线检测分析

在以 1553B 传统航电总线为代表的航空产品总线技术构架中, 1553B 航电总线具有确定性, 是一种飞机内部时分制指令/响应式多路传输数据总线, 整个系统由总线控制器 (BC) 和最多 31 个远程终端组成, 总线上的所有通信都有 BC 发起,

收稿日期:2015-11-18; 修回日期:2015-12-21。

基金项目:国防基础科研项目(A0520132031)。

作者简介:彭国金(1978-),男,江西人,硕士,高工,主要从事试飞测试与数据分析技术方向的研究。

传输线采用双余度，同一时刻只有一条总线进行工作。

对飞行试验航电总线测试系统来说，采集记录的 1553B 航电总线数据文件是由单一的总线数据组成，是符合航电系统规范设计的 1553B 消息帧数据，且没有别的类型的数据被采集记录，其测试环境单一，测试数据规范，试验机机载总线测试系统记录的 1553B 总线数据结构如图 1 所示。

```
A 0X2000 OK CMD 0 09:04:53 399664000 +26000
B 0X283F OK STS 1 09:04:53 399771000 +640000
```

图 1 传统 1553B 总线数据测试记录数据结构

飞行试验 1553B 总线数据处理软件按通用试飞数据处理模式对记录的总线数据进行处理，就可以为试验机 1553B 航电系统进行科研鉴定提供数据，故不需要专门针对 1553B 总线进行检测分析。

1.2 新形势下 AFDX 总线检测分析

和传统的 1553B 航电总线截然不同，航空电子全双工通信以太网交换 AFDX 是一个基于标准定义的电子和协议规范 (IEEE802.3 和 ARINC 664 Part7)，应用于航空产品航电系统之间的数据交换，同时允许其他总线标准 (ARINC429、1553B) 映射到网络中进行通讯。AFDX 总线具有的开放性 & 网络特性给飞行试验航电总线测试带来了新的挑战，在采用 AFDX 总线技术构架后，对采用了新技术后的试验机航电系统进行科研鉴定是飞行试验的一项重要内容。

应用了 AFDX 总线技术后的航电系统，飞行试验测试环境有传统的单一测试环境变得更为复杂，在飞行试验总线测试系统中，AFDX 总线消息帧被测试系统采集到之后，会被打上以太网 UDP 包头，然后再发送给通用记录器进行记录，所以在飞行试验中测试系统采集记录的 AFDX 总线消息帧格式如图 2 所示。

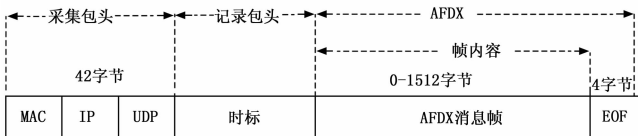


图 2 飞行试验 AFDX 总线测试记录数据结构

飞行试验中，采用了通用飞行试验采集器的总线测试系统，还会采集记录以太网底层的系统通讯、系统事件等消息包，和 AFDX 总线一起被记录到试验原始数据文件中。针对 AFDX 航电系统的网络传输特性及复杂的航空环境，对飞行试验测试采集的 AFDX 总线数据进行检测分析，通过分析采集的总线数据，对 AFDX 航电系统的各项指标及可靠性进行鉴定。

2 AFDX 数据检测分析

2.1 飞行试验 AFDX 总线

AFDX 总线是一种基于以太网的全双工交换式航空数据总线，消息在传输过程中以以太网帧的形式封装在以太网帧内，AFDX 帧长度与以太网帧长度相同，最小为 64 字节，最大长度为 1518 个字节，它是一种特殊的以太网帧，其总线系统组成如图 3 所示。

同时，通用总线测试系统的采集模块还会将航电系统的底层通讯等消息采集记录下来，一并发送给记录设备，这就给

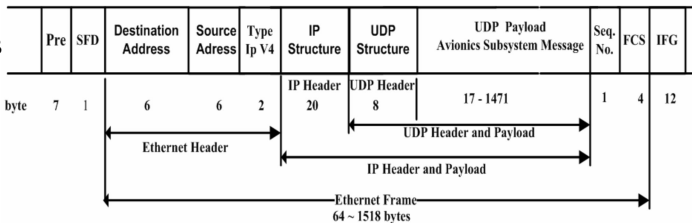


图 3 AFDX 总线数据帧结构

AFDX 总线检测分析增加了难度，这也是我们检测分析的一个难点。

对飞行试验来说，需要知道采集记录了哪些 AFDX 总线消息帧，以和试验机航电系统设计的总线消息帧进行比对鉴定，同时对采集的 AFDX 总线消息帧进行完整性和丢包检测分析，以鉴定试验机航电系统总线性能的可靠性。

2.2 AFDX 总线检测分析

由于 AFDX 总线飞行试验的测试环境及总线本身具有的网络特性，需对 AFDX 总线进行检测分析。AFDX 总线检测分析主要包括：AFDX 消息帧识别、AFDX 完整帧检测、AFDX 帧丢包检测。

AFDX 消息帧识别分析是 AFDX 总线数据分析的基础，因飞行试验采集记录的 AFDX 总线数据是以二进制存储的，同时记录的不仅仅只有 AFDX 总线数据，还有随机的其他底层通信消息，所以要对飞行试验采集记录的数据进行 AFDX 消息帧识别。

AFDX 完整帧检测分析是对 AFDX 总线数据进行处理的关键步骤，对识别后的 AFDX 消息帧进行完整性分析，以确定采集记录的 AFDX 总线消息帧的完整性。

AFDX 帧丢包检测分析是对试验机航电系统以及飞行试验测试系统部署的一项重要鉴定技术手段，对航电系统之间通信的消息经过核心交换机之后是否存在丢失数据进行分析，以确定航电系统之间通信的可靠性。

2.3 AFDX 总线检测分析过程

AFDX 总线检测分析的过程一般包含：

- 1) 读取飞行试验测试记录的 AFDX 总线数据；
- 2) 按照记录的协议开始进行 AFDX 总线的解析分析；
- 3) 分析并找到完整的 UPD 数据包；
- 4) 对完整的 UPD 数据包的数据进行分析；
- 5) 按照 AFDX 协议进行 AFDX 总线的识别分析，确定记录的 AFDX 消息帧；
- 6) 分析并找到 AFDX 消息帧；
- 7) 对 AFDX 消息帧进行完整性分析；
- 8) 对完整的 AFDX 消息帧进行丢包分析检测；
- 9) 循环这一过程，直到检测分析完成。

3 AFDX 数据检测的关键技术

3.1 AFDX 总线消息识别分析技术

因为飞行试验我们最后分析的 AFDX 总线飞行试验数据就是一个包含了多种数据的原始文件。在对飞行试验海量 AFDX 总线数据进行检测分析时，需进行关键字段地判断。

按照 AFDX 标准协议规定，AFDX 帧的 MAC 源地址必须是 MAC 单播地址，以用来确认物理层以太网接口。MAC 的源地址是唯一的，并且是符合 IEEE802.3 标准的本地管理地

址, 其地址结构如图 4 所示。

Ethernet MAC controller Identification 48 bits					
Constant field:24 bits "0000 0010 0000 0000 0000 0000"	Network_ID 8 bits		Equipment_ID 8 bits		Interface_ID 3 bits
	Constant field:4 bits "0000"	Domain ID 4 bits	Side ID 3 bits	Location_ID 5 bits	

图 4 飞行试验 AFDX 的 MAC 源地址格式

这样在我们分析海量复杂原始 AFDX 总线数据时, 对 AFDX 总线消息进行识别分析:

- 1) 按照以太网协议标准, 找到一个完整的 UDP 数据包;
- 2) 我们判断在记录包头 MAC 的源地址中的 Constant field 是否为“0000 0010 0000 0000 0000 0000”;
- 3) 如果不是则表示不是我们需要的 AFDX 帧, 接着分析下一个 UDP 数据包;
- 4) 如果是则继续判断 MAC 的源地址中的 Network_ID 高四位是否为 0;
- 5) 如果不是则表示不是我们需要的 AFDX 帧, 接着分析下一个 UDP 数据包;
- 6) 如果是表示该数据包为我们所需要的 AFDX 总线数据帧。

通过关键字的判断, 我们实现了 AFDX 总线消息的识别判断, 确定测试系统记录了哪些 AFDX 消息帧。

3.2 完整 AFDX 帧检测技术

在获得一个 AFDX 消息帧后, 按照飞行试验的需求, 我们需要对 AFDX 总线消息帧进行完整性检测, 以鉴定 FTI 接收到的 AFDX 总线帧的完整性。从交换机 FTI 监控口出来的数据帧的格式为实际有效的数据为 AFDX Payload, 为了获得更多的信息, 支持数据分析和故障排除, 要求在监控到的原始帧中插入附加信息, 附加信息包括错误类别 ETO 信息、FCS 信息。为了不影响原始数据帧的设计, 附加信息插入在原始帧的末尾, 如图 5 所示。

AFDX Ployed 17-1471Byte	ETO 4Byte	FCS 4Byte
----------------------------	--------------	--------------

图 5 飞行试验 AFDX 的监控信息格式

对照 AFDX 总线协议标准, 对关键字段信息进行检测, 包括一个 FCS 界定符、一个 EOF 界定符和 ETO 字段:

- 1) 首先我们对 EOF 界定符进行检测;
- 2) 如果 EOF 界定符的值不符合约定, 则该数据帧就不是我们需要的消息帧;
- 3) 其次对 FCS 字段进行检测;
- 4) 如果 FCS 界定符的值不符合约定, 则该数据帧就不是我们需要的消息帧;
- 5) 最后对 ETO 界定符进行检测分析;
- 6) 如果 ETO 界定符的值不符合约定, 则该数据帧就不是我们需要的消息帧;

通过 ETO 界定符、EOF 界定符和 FCS 字段的判断, 我们实现了 AFDX 总线消息的完整性检测。

3.3 AFDX 帧丢包检测技术

AFDX 总线为网络化总线技术, 同时测试系统对 AFDX

总线的采集也运用了网络化测试技术, 理论上网络化技术的运用就会存在丢包现象, 所以对采集记录的 AFDX 总线数据进行丢包检测就非常有必要。

如图 3 所示 AFDX 总线数据帧结构, 描述了 AFDX 负载 AFDX Payload 和序列号 AFDX SeqNo, 序列号的起始值为 0, 每次加 1 递增, 然后在 1~255 之间循环, 以此对 AFDX 消息进行丢包检测分析:

- 1) 打开飞行试验测试记录的 AFDX 原始数据并读取;
- 2) 对记录的 AFDX 试验数据进行 AFDX 总线消息识别分析即 AFDX 帧完整性检测分析;
- 3) 对需要检测分析的 AFDX 消息, 读取 ICD 数据库中相关信息;
- 4) 对 AFDX 消息帧进行 AFDX SeqNo 检测, 如果 AFDX SeqNo 不为 255, 则比对每个消息帧出现的 SeqNo 数值是否连续, 如果存在不连续数值的则表示丢包;
- 5) 对 AFDX 消息帧进行 AFDX SeqNo 检测, 如果 AFDX SeqNo 为 255, 则下一个消息帧的 SeqNo 数值 0, 如果不是则表示丢包;
- 6) 对检测分析的 AFDX 总线数据帧进行丢包统计并给出结果。

通过周期信息序列号 AFDX SeqNo 的判断, 我们实现了 AFDX 总线消息的丢包检测分析。

4 设计实现与测试

基于飞行试验实际总线数据分析需求, 使用 C++ 语言, 采用 AFDX 总线消息识别分析技术、完整 AFDX 帧检测技术、AFDX 帧丢包检测等技术开发了 AFDX 总线数据检测分析软件^[5-6]。采用了 SQL server 数据库技术对总线试验信息进行管理和快速查询, 运用以上相关关键技术, 采用模块化设计技术设计了该分析软件。

在某试验机上, 航电系统采用了 AFDX 总线技术构架, 使用 AFDX 通讯机制实现了机上航空电子设备及子系统之间的消息通讯。该试验机在飞行试验中采集记录了试验航电总线 AFDX 数据。

应用 AFDX 总线数据检测分析软件对该试验机测试的 AFDX 数据进行检测分析:

- 1) 确定测试系统采集记录了哪些 AFDX 总线消息帧, 将分析结果和配置消息表进行比对, 找出哪些消息是交换机没有转发的, 从而完善交换机消息配置;
- 2) 对这些消息帧进行了完整性和丢包分析, 并将软件分析结果和实际飞行试验航电系统设定, 以及机上屏显系统信息进行比对分析, 检测测试环境, 对测试方案重点环节采集、传输等进行完善。

试验结果表明, 采用以上分析算法的软件数据处理准确, 满足了试飞工程师对海量 AFDX 试验数据检测分析的需求。

基于以上算法开发的飞行试验 AFDX 总线数据检测分析软件已在多个试验机试飞中推广使用。

5 结束语

本文介绍了飞行试验对 AFDX 总线数据检测分析的要求, (下转第 324 页)