

引用格式:王鹏,徐双平,李翔,等. AFDX 端系统本地时间恢复单元设计[J]. 电光与控制,2020,27(4):73-77. WANG P, XU S P, LI X, et al. Design of local time recovery unit for AFDX end systems[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(4):73-77.

## AFDX 端系统本地时间恢复单元设计

王 鹏<sup>1,2</sup>, 徐双平<sup>2</sup>, 李 翔<sup>2</sup>, 范毓洋<sup>1,2</sup>, 田 毅<sup>1,2</sup>

(1. 民航航空器适航审定技术重点实验室,天津 300300; 2. 中国民航大学适航学院,天津 300300)

**摘要:** AFDX 端系统本地时间作为端系统本地时钟计时数据,可用于计算发送端系统和接收端系统之间的数据帧传输时延,从而进行传输数据帧的时间完整性验证。若端系统本地时间丢失,则无法进行数据时间完整性的验证。在当前 AFDX 网络健康管理以及时间同步相关设计的基础上,提出了一种基于时间戳列表的本地时间恢复方案。经验证,可实现端系统本地时间的恢复,进一步保障了 AFDX 网络中传输数据的时间完整性验证,提升了传输数据的可靠性。

**关键词:** 航空通信总线; AFDX; 时间完整性; 本地时间恢复

**中图分类号:** TP336 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.04.014

## Design of Local Time Recovery Unit for AFDX End Systems

WANG Peng<sup>1,2</sup>, XU Shuangping<sup>2</sup>, LI Xiang<sup>2</sup>, FAN Yuyang<sup>1,2</sup>, TIAN Yi<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Airworthiness Certification Technology for Civil Aviation Aircraft, Tianjin 300300, China;

2. College of Airworthiness, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** As the timing data of local clock of the end system, the local time of the AFDX end system can be used to calculate the transmission delay of data frame between the transmitting end system and the receiving end system, thereby performing the verification of time integrity of the transmitted data frame. If the local time of the end system is lost, the verification of time integrity of the data cannot be performed. Based on the current health management of AFDX network and the design of time synchronization, a scheme of local time recovery based on the time stamp list is proposed. It has been verified that the recovery of local time of the end system can be realized, which can further ensure the verification of time integrity of the transmitted data in AFDX network and improve the reliability of the transmitted data.

**Key words:** aeronautical communication bus; AFDX; time integrity; local time recovery

### 0 引言

AFDX 总线作为新一代航空通信总线,其传输速率可达 100 Mibit/s<sup>[1]</sup>。在数据传输过程中,为保证传输数据的可靠性、有效性,需要对接收数据进行时间完整性验证。其中,时间完整性指的是 AFDX 网络中发送端和接收端之间的数据帧传输时延不大于规定阈值的能力<sup>[2]</sup>。在对其进行验证时,需要端系统本地时钟计时数据,即端系统本地时间以及时钟偏差作为计算依据。若端系统由于内部原因(重启指令)或者外部原因(断电、单粒子、高强辐射场等)重启,其本地时间

将会丢失,从而不能对接收数据的时间完整性进行判断,导致接收数据的及时可靠性无法验证,可能丢弃原本正常无误的数据,增加飞机飞行的潜在故障风险,影响飞行安全。

目前,关于 AFDX 网络数据时间完整性的研究均在端系统正常工作的状态下进行<sup>[3-7]</sup>。其中,刘成<sup>[6]</sup>、田园<sup>[7]</sup>等提出了时钟同步的方法以提高网络对传输数据时间完整性判断的准确度。但是上述研究都是在端系统本地时间已知的基础上进行的,若该时间丢失则无法进行。为进一步提高 AFDX 网络中传输数据的可靠性,保证飞机的飞行安全,需要考虑在端系统本地时间丢失的情况下如何实现相关研究设计或者恢复端系统本地时间。

针对端系统本地时间丢失导致的问题,本文提出了一种基于时间戳列表的端系统本地时间恢复方法。经验证,通过对时间戳列表的处理以及对端系统重启时间和链路延迟的预估,可实现端系统本地时间恢复。

收稿日期:2019-04-08

修回日期:2019-05-19

基金项目:民用飞机专项科研,技术基础类(MJ-2015-J-091);中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项(3122018D033)

作者简介:王 鹏(1982—),男,新疆伊犁人,博士,研究员,硕导,研究方向为航空电子硬件安全性适航审定。

配合时钟同步系统,可快速恢复端系统时间完整性验证能力,提高了 AFDX 网络传输数据的可靠性。

### 1 端系统本地时间恢复原理

#### 1.1 端系统本地时间恢复单元分析

在对数据进行时间完整性验证时,端到端数据传输延时算式为

$$\Delta t = t_{rec} - t_{send} + t_{offset} \quad (1)$$

式中: $t_{rec}$ 为接收端系统完成数据接收瞬间端系统本地时间; $t_{send}$ 为发送端系统完成数据发送瞬间端系统本地时间;而  $t_{offset}$  为两个端系统本地时间之间的偏差。若  $\Delta t$  小于系统设定的完整性验证阈值,则验证通过;否则不通过。具体而言,不同系统的阈值大小由系统本身决定。

目前,为保证传输数据的时间完整性,AFDX 网络会进行时钟同步设计。由于 AFDX 网络来源于以太网,故 AFDX 网络时钟同步多采用以太网时钟同步方法移植处理<sup>[6-9]</sup>,达到时钟同步的效果。当前,较为成熟的以太网时钟同步协议,无论是 IEEE1588 还是 AS6802,都需要打时间戳或者记录本地时间的操作<sup>[10-11]</sup>。由此可见,端系统本地时间对时钟同步来说至关重要。

以 IEEE1588 协议为例,它将主从时钟的时间信息以往返式报文的方式互相转发,在假设链路对称的情况下对不同时钟的偏差进行计算,从而实现时钟的同步<sup>[12]</sup>。若将控制端系统的网络时间管理单元(Network Time Management,NTM)时钟作为网络时钟同步标准,NTM 可根据接收到的时间信息,将时间戳与各个端系统联系起来生成时间戳列表存于本地,并根据接收到的时间信息不断进行列表更新。任一端系统本地时间丢失时,均可利用该列表恢复其本地时间。此外,时间戳列表含有所有端系统时间信息,可用于计算不同端系统间的时间偏差。

不过,仅靠 NTM 是无法实现端系统本地时间恢复的,它还需要控制端系统中网络健康管理单元(Network Health Management,NHM)和端系统(End System,ES)的参与。NTM,NHM,ES 三者数据交互如图 1 所示。

NHM 会采集端系统状态信息,并根据该信息生成相应触发信号和控制信息分别发送至 NTM 和端系统,从而实现对端系统的监控和管理。此外,在进行时钟同步时,端系统会发送其时间信息至主时钟端<sup>[7]</sup>,即 NTM 端。NTM 会处理端系统发来的时间信息,生成时间戳列表。

当某一端系统需要恢复其本地时间时,NHM 会发送相应触发信息到 NTM,使 NTM 通过双冗余通道发送时间戳列表到该端系统。然后,端系统会根据接收到的列表信息以及相关预估信息进行计算。最后,根据

计算结果恢复端系统本地时间。

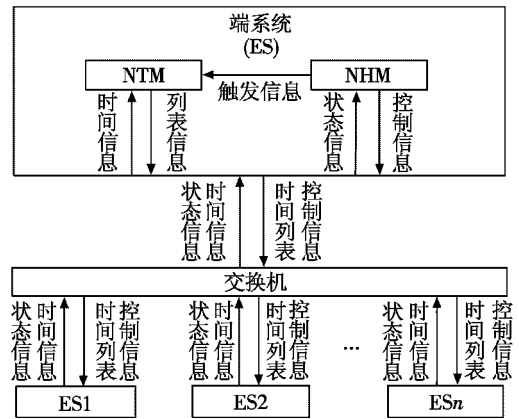


图 1 NTM, NHM, ES 数据交互图

Fig. 1 The data interaction of NTM, NHM and ES

此外,在进行端系统本地时间恢复计算时,采用时间戳列表信息为其本地时间信息丢失之前数据,若要实现对端系统本地时间的恢复,还需要对其重启前判定时间、重启指令发送接收时间、端系统重启时间以及列表接收时间进行预估。为保证本地时间恢复后,相应帧一定能够进行完整性验证,可利用最差情况下端系统重启时间值以及端到端最大预估延对本地进行恢复<sup>[13-14]</sup>。

#### 1.2 AFDX 端系统时间恢复单元流程分析

当某一端系统重启后,NHM 会向 NTM 发送控制信号,使 NTM 将最新的时间戳列表复制后分 A, B 网络发送到指定端系统,进行端系统本地时间恢复。端系统内,其本地时间恢复流程如图 2 所示。

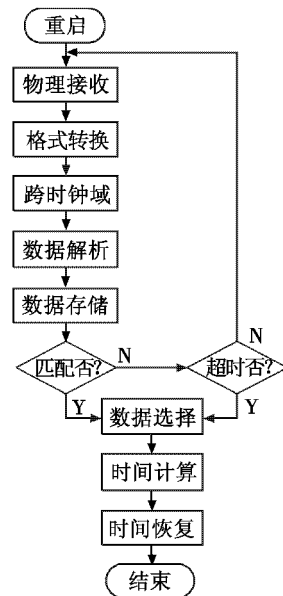


图 2 本地时间恢复流程

Fig. 2 The process of local time recovery

首先,数据通过物理层传输,物理层与 MAC 层间

数据格式不同,需要进行格式转换。其次,由于物理层时钟与 MAC 处理时钟属于不同时钟域,需要进行跨时钟域操作后才能交由 FPGA 处理。此外,跨时钟域后输出数据不能直接解析,要先对其进行数据帧的恢复,才能解析出有效信息。对于解析出的有效信息,设计将其写入存储,防止丢失。最后,根据接收时间戳列表表头进行匹配判断并选择相应时间戳进行相应处理。

若在规定时间内收到匹配列表,则选择匹配列表中任意一个,根据其时间信息恢复端系统本地时间;若在规定时间内未收到匹配列表,则从已经接收到的列表中选择与端系统索引号对应的最大时间戳值用于本地参考时间的更新,从而得到更贴近于当前时间的本地时间值。

### 1.3 端系统本地时间恢复单元设计原理

NTM 将时间戳列表按端系统与时间戳对应关系写入 RAM,并根据收到的信息实时更新列表。其中,时间戳列表写入 RAM 时,地址与表头地址存在如下关系

$$a = a_{\text{head}} + i_{\text{ES}} \quad (2)$$

式中: $a$  为时间戳写地址; $a_{\text{head}}$  为时间戳列表表头写入 RAM 地址,取值为 0 或者  $2^n$  (其中  $n$  为正整数); $i_{\text{ES}}$  为端系统索引号,有效区间为  $[1, 2^n - 1]$ 。

另外,由于时间戳列表中时间戳记录的是端系统重启前最后一次同步时刻,还需要对端系统重启时间以及相关指令处理发送时间的预估。故时间戳列表时刻与所需恢复时间关系如图 3 所示。

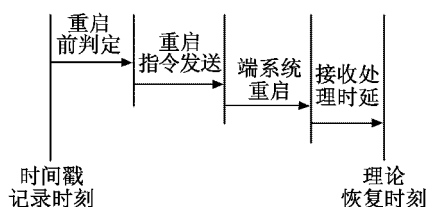


图 3 本地恢复时间与时间戳关系图

Fig. 3 The relationship between recovered local time and timestamp

其中,数据处理时间仅为  $\mu\text{s}$  级,甚至  $\text{ns}$  级,可忽略不计。重启前判定时间可认为是带宽分配间隔,用系统设定 BAG 代入计算即可;而重启指令发送接收时间可认为是最大端到端时延;端系统重启时间由端系统性能决定;最后,接收处理时延可认为是端系统设定列表接收时间上限。虽然上述方法计算出的本地时间值会稍大于当前实际值,但是可保证本地时间恢复后能够进行时间完整性验证。

由上述可知端系统恢复本地时间参考值与时间戳值存在下述关系

$$c = T_s + t_{\text{set}} \quad (3)$$

式中: $c$  为本地时间参考; $T_s$  为有效时间戳值; $t_{\text{set}}$  为设定值,它由端系统重启前判定时间、重启指令发送接收时间、端系统重启时间以及列表接收时间组成,算式为

$$t_{\text{set}} = B_{\text{BAG}} + d_{\text{max}} + t_{\text{restart}} + t_{\text{list}} \quad (4)$$

式中: $B_{\text{BAG}}$  为带宽分配间隔; $d_{\text{max}}$  为端到端最大时延; $t_{\text{restart}}$  为端系统重启时间; $t_{\text{list}}$  为时间戳列表接收时间上限。

## 2 端系统本地时间恢复设计

AFDX 网络常采用 48 bit 时间戳,分辨率为  $1 \mu\text{s}$ 。设计将时间戳列表中时间戳位宽压缩为 32 bit,在计算时需乘以  $2^{16}$  进行恢复。这样不但可以降低占用带宽,而且估算出来的时间值只会略大于当前时间,保证能进行帧的完整性检查<sup>[15]</sup>。这种处理虽然会引入一定误差,但误差为毫秒级,对本地时间恢复影响较小,且经时钟同步后会被消除。

端系统本地时间恢复单元以 FPGA 板卡为载体实现,它主要由接收模块、数据解析模块、存储模块(RAM)、读写控制模块、列表处理模块以及时间生成模块组成。其中,接收模块、数据解析模块、存储模块、读写控制模块采用冗余设计,以提高设计可靠性,其设计框图如图 4 所示。

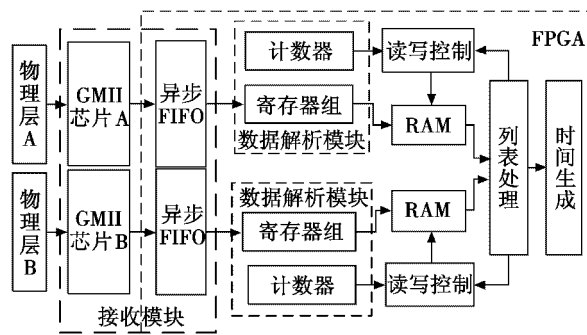


图 4 本地时间恢复单元设计框图

Fig. 4 Design block diagram of local time recovery unit

1) 接收模块。该模块主要实现对 NTM 发送时间戳列表的接收,由 GMIi 芯片和异步 FIFO 组成。其中, GMIi 芯片可将接收物理层数据进行格式转换。在百兆网络中,其输出时钟为 25 MHz,而 FPGA 常采用 125 MHz 时钟进行数据处理,故从 GMIi 芯片输出数据交由 FPGA 进行数据处理时需要进行跨时钟域转换。设计通过构造一个  $8 \times 1024$  的异步 FIFO 来实现跨时钟域操作,将数据从 GMIi 输出时钟域转换到 FPGA 数据处理时钟域。

2) 数据解析模块。该模块主要将跨时钟域后数据进行组帧、解析,对传输的有效数据进行提取,由寄存器组和相应控制计数器组成。该模块功能的实现主要依赖于不同计数器对控制信号的触发。此外,物理层接收数据经异步 FIFO 输出数据位宽为 8 bit,需要将

其进行组帧后才便于解析,从而提取出时间戳列表。

3) 存储模块。该模块主要完成时间戳列表的存储,通过一个  $32 \times 256$  简单双端口 RAM 实现。由于接收的时间戳列表在进行匹配判断后,才能根据端索引选择出最佳的时间戳用于本地时间恢复,为防止数据丢失,要对接收列表进行存储保存。而简单双端口 RAM 读写控制地址独立,可根据控制信号进行数据读写,便于数据的处理。

4) 读写控制模块。该模块主要根据需求实现对存储模块的读写控制,由计数器和寄存器组成。模块功能的实现与数据解析模块类似,也是通过计数器触发相应信号实现。在进行数据存储时,模块通过控制 RAM 的写地址,保证所有有效数据按照要求写入 RAM。此外,还要根据需求控制读使能信号和读地址,以读出所需数据。如:列表匹配判断时,读出表头;匹配成功后,读出时间戳等。

5) 列表处理模块。该模块主要实现对不同端口接收时间戳列表的匹配判断,并根据判断结果进行时间戳的选择,主要由比较器、寄存器和计数器组成。接收的时间戳列表中前 32 bit 有效位含有列表序列信息、条目信息,列表处理模块可根据这些信息对不同端口接收时间戳列表进行匹配判断。若两个列表该信息一致,则匹配;否则,不匹配。当在规定时间内接收到匹配列表时,按照式(2)所得地址查询时间戳列表存储 RAM,即可得到端系统对应时间戳,将该时间戳交由时间生成模块处理即可;否则,继续等待,直至列表匹配或者超时。在出现超时的情况下,端系统可按照式(2)所得地址分别查询两个端口接收的时间戳列表,然后将最大的时间戳交由时间生成模块处理即可。

6) 时间生成模块。该模块主要根据列表处理模块输出的时间戳值进行本地时间的计算,由一些乘法器、加法器和寄存器组成。本地时间更新不仅需要列表时间戳值,还需要对  $t_{\text{set}}$  相关时间做预估。该模块只需要将列表处理模块输出时间戳以及其他配置信息代入式(3)和式(4)即可得到本地时间。

### 3 测试

#### 3.1 测试说明

端系统本地时间恢复单元受到 NTM 中相应触发信号 ready 的控制,当触发信号 ready 高有效时,触发本地时间恢复;否则,进行时间戳列表的更新。设计在两种情况下会触发本地时间恢复:一种是未收到更新数据,即更新信息 time\_msg 全 0;另一种是虽然收到了更新数据,但列表更新使能信号 renew 无效,无法进行

列表更新。

另外,由于在时间戳列表信息基础上恢复本地时间还需要对  $t_{\text{set}}$  进行预估,此处暂定为 20 s(时间戳分辨率为  $1 \mu\text{s}$ ,转换为十六进制即为  $28'h1312d00$ 。对于该设定值,不同端系统可根据自身性能和设置参数确定)。此外,为便于观察,将  $t_{\text{list}}$  暂定为  $90 \mu\text{s}$ 。当超过  $90 \mu\text{s}$  时,未接收到匹配的时间戳列表,则采用最大时间戳值更新本地时间;当计时在  $90 \mu\text{s}$  内,则根据接收到的匹配时间戳列表更新本地时间。

#### 3.2 触发测试

端系统本地时间恢复单元需要相应触发信号控制,现分别对正常状态下(状态 a)、未接收到更新数据(状态 b)、列表更新使能信号置无效(状态 c)3 种状态进行测试,结果如表 1 所示。表中, rst\_n 为复位信号,低有效。

表 1 不同状态下触发测试结果

Table 1 Trigger test results in different states

测试信号	信号值		
	状态 a	状态 b	状态 c
rst_n	1	1	1
time_msg	40'h01_0102_0304	40'h00_0000_0000	40'h01_0102_0304
renew	1	1	0
ready	0	1	1
index_ES	8'h01	8'h00	8'h00
ram_msg	32'h01020304	32'h00000000	32'h00000000

正常情况下,NTM 进行时间戳列表更新,列表更新使能信号有效,本地时间恢复触发信号无效。列表根据接收数据,解析出 index\_ES,按式(1)所示关系,查找其对应时间戳值在 RAM 中存储地址。同时,将解析出 ram\_msg 写入对应地址中。

当未接收到更新数据时,意味着端系统可能出现问题,列表更新使能信号虽然有效,但无法进行时间戳列表更新,需要触发本地时间恢复单元。

当 NTM 将列表更新使能信号置为无效时,即使收到更新数据,也会将解析出的相关数据置为全 0,不进行时间戳列表更新,并触发本地时间恢复单元,恢复端系统本地时间。

#### 3.3 恢复测试

由于时间戳列表在接收过程中可能遇到多种情况,故分别对立即收到匹配列表(事件 1)、规定时间内收到匹配列表(事件 2)、未收到匹配列表(事件 3)3 种情况进行测试,观察输出是否与设计预期一致。其测试结果如表 2 所示。表中:ready1,ready2 分别为冗余通道 1 和 2 的本地时间恢复触发信号;head\_1,head\_2 分别为冗余通道 1 和 2 的接收列表表头;ts\_1,ts\_2 分别为冗余通道 1 和 2 的接收列表读取端系统对应时间戳。

表2 不同状态下恢复测试结果

Table 2 Recovery test results in different states

测试信号	信号值		
	事件1	事件2	事件3
rst_n	1	1	1
ready1	1	1	1
ready2	1	1	1
index_ES	8'h01	8'h01	8'h01
head_1	32'h01020304	32'h21222324	32'h797a7b7c
head_2	32'h01020304	32'h21222324	32'hf2f4f6f8
ts_1	32'h05060708	32'h25262728	32'h7d7e7f80
ts_2	32'h05060708	32'h25262728	32'hfafefe00
clkref	48'h0506_083a_2eff	48'h2526_285a_2eff	48'hfafc_ff32_2eff

当两端口接收的时间戳列表直接匹配时,可直接根据其中任一列表时间信息进行更新。在更新过程中,只需要将读取时间戳值以及设置预估时间代入式(2)即可。测试结果如表2中事件1所示。

当接收时间在设定阈值  $90 \mu\text{s}$  内,时间戳列表由不匹配转为匹配时,测试分为不匹配、匹配两部分。初始阶段,接收时间戳列表不匹配,但接收时间小于  $90 \mu\text{s}$ ,端系统本地时间恢复模块继续接收时间戳列表;当在  $90 \mu\text{s}$  内某一时刻,接收到的时间戳列表匹配后,即利用匹配的时间戳列表得到对应的时间戳值进行本地时间更新。其测试结果如表2中事件2所示。

当在设置的  $90 \mu\text{s}$  接收时间内未接收到匹配的时间戳列表时,本地时间恢复单元会根据在  $90 \mu\text{s}$  内接收到的对应于端系统的最大时间戳值更新本地时间。由于在规定时间内接收时间戳列表不匹配,本地时间的更新需要对读取到的对应时间戳值进行比较,将较大值暂存为  $ts_{\max}$ ;在计时到达  $90 \mu\text{s}$  后,将  $ts_{\max}$  值代入计算更新本地时间。其测试结果如表2中事件3所示。

#### 4 结束语

针对 AFDX 网络中端系统本地时间丢失,数据时间完整性无法判断,从而可能导致的错误丢帧问题,本文设计并实现了一种基于时间戳列表的本地时间恢复设计,并通过相关测试证明了设计的有效性,可在端系统本地时间丢失后恢复其本地时间。该设计增强了端系统对接收数据时间完整性的验证能力,提高了 AFDX 网络传输数据的可靠性,进一步保障了飞机的飞行安全。

#### 参考文献

- [1] Airlines Electronic Engineering Committee. Aircraft data network, Part 7: Avionics full duplex switched Ethernet (AFDX) network; ARINC 664P7-2005 [S]. Maryland: Aeronautical Radio, Inc., 2005.
- [2] 李硕,王学望,康锐. 面向完整性要求的航空电子全双工交换式以太网可靠性评价参数研究[J]. 西安交通大学学报,2013, 47(3):126-131.
- [3] PETT D, GEORGES J P, DIVOUX T, et al. Freshness analysis of functional sequences in launchers[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(30):80-85.
- [4] 王竹清,肖立民,胡玉其. AFDX 网络系统监控设计与实现[J]. 计算机测量与控制,2018, 26(7):62-65.
- [5] 李鹏. FC-AE-1553 网络时间同步等关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2018.
- [6] 刘成,王彤,李铮,等. 时间触发 AFDX 网络的设计和实时性分析[J]. 北京航空航天大学学报,2013, 39(6):728-733.
- [7] 田园,李大鹏,王红春,等. 基于 AFDX 网络的时间同步分析与实现[J]. 航空计算技术,2016, 46(4):123-126, 130.
- [8] 梁姣. 基于 IEEE1588 协议的航电以太网时钟同步系统的研究与实现[D]. 南京:东南大学,2015.
- [9] 赵永库,唐来胜. AFDX 网络应用关键技术分析与研究[J]. 测控技术,2013, 32(4):86-89, 94.
- [10] 黄盛,卓越,金鑫,等. 一种自动校时的 IEEE 1588v2 精确时间同步算法[J]. 电讯技术,2016, 56(5):538-543.
- [11] 黄韬,陈长胜. TTE 时间同步协议关键算法研究和仿真分析[J]. 电子科技大学学报,2014, 43(3):437-442.
- [12] 宋仕坤. 基于以太网 MAC IP 核的 IEEE1588 协议的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2017.
- [13] 赵永库,王红春,唐来胜. AFDX 网络端到端时延分析方法[J]. 电光与控制,2013, 20(4):81-83.
- [14] 杨云,熊华钢. 计算 AFDX 延迟的网络演算方法[J]. 电光与控制,2008, 15(9):57-60.
- [15] 田泽,索高华,张荣华,等. 基于 FPGA 的 AFDX 网络高速数据采集器设计[J]. 电子技术应用,2016, 42(8):179-182.