

# 机载远程数据集中器协议转换方法研究

周德新, 赵济舟, 马腾达

(中国民航大学 航空自动化学院, 天津 300300)

**摘要:** 针对机载远程数据集中器(RDC)的数据转换功能, 在对 ARINC429 和 AFDX 两种机载数据总线分析的基础上, 提出了一种基于配置信息中虚拟链路(VL, virtual link)与 ARINC429 数据标号的适配关系的数据转换方法; 对 RDC 功能需求进行分析并给出整体设计方案, 采用模块化设计并对各模块功能进行了详细的介绍, 其中配置信息模块的应用增加了 RDC 数据转换功能的灵活性; 在新型航电系统架构下, 通过对 RDC 之间基于 VL 的通信过程中的数据转换过程进行仿真和分析, 验证此方法的可行性; 协议转换方法的研究为 RDC 的整体功能仿真研究奠定了基础。

**关键词:** ARINC429; AFDX; 虚拟链路; 标号; 配置信息

## Research on Protocol Conversion Approach of Airborne Remote Data Concentrator

Zhou Dexin, Zhao Jizhou, Ma Tengda

(Aeronautical Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Aimed at the data conversion function of the airborne Remote Data Concentrator (RDC), ARINC429 and AFDX, two kinds of airborne data bus is introduced and analyzed in this paper, and the conversion method based on the relationship of Virtual Link and Label of ARINC429 in configuration information is proposed. Functional requirement of RDC is analyzed and the overall design is given. Modular design is used and functions of each module are introduced in detail, and the flexibility of data conversion function of RDC is increased by using the configuration information module. In the modern avionics system architecture, through the simulation and analysis of the process of data conversion in the communication process based on the VL between the RDC, the feasibility of the method of data conversion is proved. Research on the method of data conversion lays a foundation for the research of the overall function simulation of RDC.

**Keywords:** ARINC429; AFDX; virtual link; label; configuration information

### 0 引言

综合模块化航空电子系统(IMA)已成功应用于 A380、B787 等大型民用客机, 其主干网络采用航空全双工交换式以太网(AFDX)将机载各个子系统连接成一个高效可靠的整体<sup>[1-2]</sup>, 而飞机很多子系统仍采用比较成熟的 ARINC429 总线, 远程数据集中器(RDC)的功能则是实现 AFDX 总线设备与 ARINC429 设备之间数据转换的功能。以 B787 飞机为例, 其采用了多个 RDC 遍布整个机身, 将各子系统并入核心数据网络, 由此可见 RDC 在整个航电系统中的重要性不言而喻。

本文给出了一种 RDC 数据转换功能的设计方案, 介绍了 RDC 对于 ARINC429 数据和 AFDX 数据进行转换的方法。

### 1 ARINC429 总线<sup>[3]</sup>

ARINC429 标准是美国航空无线电公司制订的民用航空数字总线传输标准, 是一种单工方式的高速差分信号通信总线。A429 总线上只允许有一个发送器, 但可以有多个接收器, 最多为 20 个接收器。信息只能从通信设备的发送口输出, 经传

输总线传至与其相连的需要该信息的其他设备的接收口。因抗干扰能力强、技术成熟、简单有效、性能可靠、成本低廉等特性, A429 总线在民用和军用航空领域被广泛应用。

ARINC429 数据采用带有奇校验的 32 位信息单元, 信息单元通过 Label 识别, 最多有 256 个 Label。传输速度分为高速(100 kb/s)和低速(12.5 kb/s)两种传输速率。其信息单元结构如图 1 所示。

|    |       |       |      |       |
|----|-------|-------|------|-------|
| 32 | 30-31 | 11-29 | 9-10 | 1-8   |
| P  | SSM   | Data  | SDI  | Label |

图 1 ARINC429 信息单元

信息单元中各位的意义如下:

第 1~8 位: 数据字的标识符 LABEL, 采用反序排列, 用于识别数据字的应用格式。

第 10~9 位: 源/目的标识符 SDI, 用于发送数据字给总线上特定接收设备或用于接收器识别总线上的源设备。

第 29~11 位: 负载数据 Data, 数据字有 5 种应用格式: BCD 数据字、BNR 数据字、离散数据字、维护数据字和 AIM 数据字。

第 31~30 位: 符号状态矩阵位 SSM, 表示硬件设备操作模式、条件以及合法数据内容。其表示含义与 Data 类型有关。

第 32 位: 奇偶校验位 P。

### 2 AFDX 总线<sup>[4]</sup>

ARINC664 标准第七部分定义了 AFDX 的通信协议标准,

收稿日期: 2014-11-19; 修回日期: 2015-01-09。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB744904); 民航基金项目(MHRD20130112)。

作者简介: 周德新(1954-), 女, 辽宁人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事机载电子仿真与深度维修的研究。

AFDX 在成熟的商用以太网技术的基础上,采用全双工交换网络拓扑结构避免商用以太网传输延迟的不确定性,增加冗余提高网络的可靠性。其高带宽、低延时和高可靠性等特点可满足大飞机航电主干网络的通信要求。

AFDX 帧长度为 64~1518 字节,带宽为 100 MHz,其帧数据结构如图 2 所示。

|       |       |        |          |    |    |
|-------|-------|--------|----------|----|----|
| 以太网帧头 | IP 报头 | UDP 报头 | 数据       | SN | 校验 |
| 14B   | 20B   | 8B     | 17-1471B | 1B | 4B |

图 2 AFDX 帧数据结构

帧数据结构中各部分的意义如下:

**以太网帧头:** 目的 MAC 地址 (6Byte), 源 MAC 地址 (6Byte), IP 类型 (2Byte), 其中目的 MAC 地址包含虚拟链路 ID (VLID, 2Byte), 源 MAC 地址包含用户定义 ID 和接口 ID

**IP 报头:** 包含版本、报头长度、服务类型、总长度、标识、标识、片偏移、生存周期、传输层协议和头部校验和等信息 (12Byte), 以及源 IP 地址 (4Byte) 和目的 IP 地址 (4Byte)。源 IP 地址和目的 IP 地址均包含用户定义 ID 和分区 ID。

**IP 数据段:** UDP 报文头 (8Byte) 和 UDP 数据字段 (18Byte~1472Byte), UDP 报文头包含源端口、目的端口、长度和校验和, UDP 数据字段为负载数据和帧序列号, 负载数据不满 17Byte 时, 填充 0, 负载数据不超过 1471Byte, 帧序列号为 1~255。

**帧校验:** CRC 校验 (4Byte)。

在 AFDX 网络中, VLID、目的 IP 地址、源 IP 地址、目的端口号和源端口号可以唯一的确定一条虚拟链路, 从而实现端系统之间一对一或者一对多的通信。

### 3 协议转换方法

#### 3.1 整体设计

在以 ARINC429 总线为主体架构的航电系统中, LRU 通过物理连接实现点对点的通信, 如图 3 所示, LRU A 需要通过两条不同的物理线路连接 LRU C 和 LRU D 来实现通信<sup>[4]</sup>。

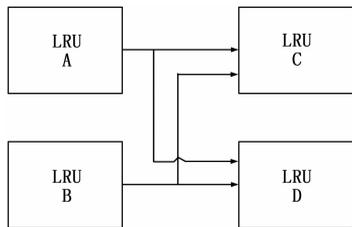


图 3 ARINC429 总线点对点连接示意图

新型航电架构中, 所有 LRU 均通过 RDC 连入 AFDX 网络, ARINC429 数据也经过 RDC 转换为 AFDX 数据帧, 但各 LRU 之间的信号需求关系并没有改变, 此时, RDC 对于数据处理的功能则显得至关重要。图 4 所示为 RDC 数据转换功能的整体设计示意图, AFDX 总线采用虚拟链路的概念提供逻辑分离的链接, ARINC429 数据以 Label 识别, 所以, 通过设置 VLID 与 Label 的适配关系可以模拟完成各 LRU 之间点对点的数据通信。

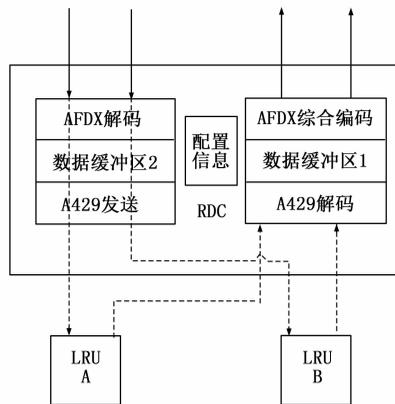


图 4 RDC 数据转换功能整体设计

#### 3.2 ARINC429 数据到 AFDX 数据转换设计

ARINC429 数据到 AFDX 帧数据的转换是由 A429 接收及解码模块、数据缓冲区 1、AFDX 综合编码模块和配置信息模块完成。

**配置信息模块:** 配置信息包括航电体系中所有 LRU 所需 ARINC429 信号的 Label 和传输速度、VLID、源 IP 地址、源端口号、目的 IP 地址、目的端口号等信息以及本地 LRU 连接到 RDC 的 A429 板卡通道序号。可根据 LRU 的实际物理连接, 来配置通道与 Label 信息。

**A429 接收及解码模块:** RDC 通过 A429 板卡接收各 LRU 发送的 ARINC429 数据, 通过解码函数, 获取不同 Label 的 ARINC429 数据的信息, 把传输速度信息加载到配置信息模块, 并把解码后的 SDI、负载数据、SSM 以及完整的 ARINC429 数据字存储到缓冲区模块 1。

**数据缓冲区 1 模块:** 存储了不同 Label 的 ARINC429 数据解码后的信息以及完整的 ARINC429 数据字, 以及 AFDX 综合编码模块最后发送的 AFDX 帧的基本信息, 包括 VLID、源 IP 地址、源端口号、目的 IP 地址、目的端口号和帧序列号等。数据缓冲区 1 模块作为 AFDX 综合编码模块的数据源, 并且有利于完成对 A429 接收数据和 AFDX 发送数据的监视。

**AFDX 综合编码模块:** 从配置信息模块读取目的 LRU 所需的 ARINC429 信号以及 VLID、源 IP 地址、源端口号、目的 IP 地址和目的端口号等信息, 并根据所需 ARINC429 信号从数据缓冲区 1 模块读取完整 ARINC429 数据字和 SSM 信息, 最后配置成完整 AFDX 帧, 通过 AFDX 板卡发送。其中 ARINC429 数据作为负载在 AFDX 帧结构中的形式如图 5 所示。图中表示 Label 分别为 010、011 和 012 的 ARINC429 数据及它们的状态字段 FS-DS1、FS-DS2 和 FS-DS3 作为数据负载, ARINC429 数据的状态字段含义应于缓冲区中 SSM 含义相同, 其具体定义如表 1 所示<sup>[4]</sup>。

表 1 FS 状态意义表

| 序号 | 字段  | 十六进制数据 | 含义               | 备注                |
|----|-----|--------|------------------|-------------------|
| 1  | ND  | 0x00   | NO DATA          | 无有效数据             |
| 2  | NO  | 0x03   | Normal Operation | 数据有效              |
| 3  | FT  | 0x0C   | Function Test    | 功能测试              |
| 4  | NCD | 0x30   | No Computed Data | 设备正常工作, 无法计算数据可靠性 |

| 地址     | 信息结构               |        |        |    |
|--------|--------------------|--------|--------|----|
| 0x0000 | 保留                 |        |        |    |
| 0x0004 | FS-DS1             | FS-DS2 | FS-DS3 | 未用 |
| 0x0008 | ARINC429 Label 010 |        |        |    |
| 0x0012 | ARINC429 Label 011 |        |        |    |
| 0x0016 | ARINC429 Label 012 |        |        |    |

图 5 AFDX 帧负载数据为 ARINC429 数据时格式

AFDX 综合编码模块完成 AFDX 帧的编码后, 可以设置 AFDX 帧的发送方式和通道选择。发送方式分为触发式发送和周期性发送, 通道选择则为选择 AFDX 板卡的 A 通道发送、B 通道发送或者 A 和 B 通道同时发送。

触发式发送: 当 AFDX 帧编码完成后相对于上一次发送的帧的负载数据发生变化时 (一般为负载数据中 ARINC429 数据发生变化或者数据状态集发生变化), 则发送当前帧, 否则只更新缓冲区中相对应的帧的更新时间。当 LRU 对数据实时性要求较低时, 选择此发送模式, 可有效降低对总线的利用率, 保证实时数据的带宽。

周期性发送: 周期性的完成 AFDX 帧的编码并发送, 周期可根据各 LRU 实时性需求的不同进行设置, 一般只要小于缓冲区的更新周期就能保证实时性, 过高的发送频率, 并不能增加数据的实时性, 还会无谓的浪费带宽, 造成网络阻塞。

通道选择则是根据数据是否冗余的需要进行选择, 安全性需求较高的数据可选择 AFDX 板卡 A 通道和 B 通道同时发送, 对安全性要求较低的数据可选择 A 通道或者 B 通道发送, 合理的通道分配有助于达到高要求数据的安全和实时的标准。

### 3.3 AFDX 数据到 ARINC429 数据转换设计

AFDX 数据转换为 ARINC429 数据由 AFDX 接收及解码模块、数据缓冲区 2 模块、ARINC429 发送模块和信息配置模块完成。

AFDX 接收及解码模块: 通过 AFDX 板卡接收 AFDX 帧数据, 将 AFDX 完整帧数据以及解码后得到的 VLID、源 IP 地址、源端口号、目的 IP 地址、目的端口号、接收通道、是否冗余和作为负载数据的各 ARINC429 完整数据字及状态字段等信息存储于数据缓冲区 2 模块。

数据缓冲区 2 模块: 存储 AFDX 完整帧数据以及解码后的信息, 存储 ARINC429 完整数据字并作为 ARINC429 发送模块的数据源, 提供以 Label 作为识别的数据接口, 以便 ARINC429 发送模块从缓冲区提取数据。并且存储 ARINC429 发送模块最终通过 A429 板卡发送的数据及通道号, 用于数据监测及管理。

ARINC429 发送模块: 首先读取信息配置模块中 RDC 的发送通道与本地 LRU 的匹配关系以及各 LRU 所需 ARINC429 信号的信息, 包括 Label 和传输速率。然后根据 Label 从数据缓冲区 2 模块中读取相对应的完整的 ARINC429 数据字, 最后指定发送通道和传输速率对 ARINC429 数据字进行发送。ARINC429 数据的发送同样分为触发式发送和周期性发送。

触发式发送: 当所需发送的存储于数据缓冲区 2 模块的一个或多个 ARINC429 数据字发生变化时, 对 LRU 所需所有

ARINC429 数据字进行发送, 否则, 不进行发送。

周期性发送: 周期性的完成各 LRU 所需 ARINC429 字的发送, 发送周期可根据各 LRU 的实时性要求进行设定, 一般只要小于数据缓冲区的刷新频率即可, 过高的发送频率同样无法增加数据的实时性, 无谓的浪费带宽。

## 4 实验验证及分析

基于 AFDX 总线架构的航电系统包含多个 RDC, 可依据各 RDC 所连接的 LRU 对 ARINC429 数据的不同需求分别进行配置, 以保证各 RDC 具备其所要完成的数据转换功能。图 6 为包含两个 RDC 的航电系统架构示意图, 本节将在此架构下对 RDC 的数据转换功能进行应用分析。

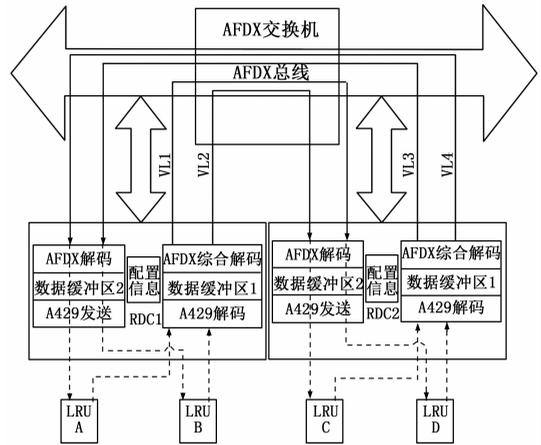


图 6 网络架构 RDC 通信示意图

RDC1 和 RDC2 中的配置信息如表 2 和表 3 所示。

表 2 RDC 本地 LRU 配置信息

|      | IP 地址    | 本地 LRU | 发送 A429 通道 | 发送 A429 Label | 接收 A429 通道 | 接收 A429 Label |
|------|----------|--------|------------|---------------|------------|---------------|
| RDC1 | 10.1.1.1 | A      | Tx_1       | 002           | Rx_1       | 001           |
|      |          | B      | Tx_2       | 003           | Rx_2       | 004           |
| RDC2 | 10.1.2.1 | C      | Tx_1       | 004           | Rx_1       | 003           |
|      |          | D      | Tx_2       | 001           | Rx_2       | 002           |

表 3 RDC 中 VLID 配置信息

| VLID | 源    | 目的   | 源端口号   | 目的端口号  | 负载 ARINC429 数据标号 (Label) | 发送方式 |
|------|------|------|--------|--------|--------------------------|------|
| 1    | RDC1 | RDC2 | 20 000 | 30 000 | 001                      | 周期   |
| 2    | RDC1 | RDC2 | 21 000 | 31 000 | 004                      | 周期   |
| 3    | RDC2 | RDC1 | 32 000 | 22 000 | 003                      | 周期   |
| 4    | RDC2 | RDC1 | 32 767 | 23 000 | 002                      | 触发   |

以 VL1 为例具体说明数据转换的过程。LRU A 发送到 RDC1 的数据为 0xC65BB580, 解码得到 Label001 的数据及状态, 其中数据状态为 01 (正常工作)。将完整 ARINC429 数据字及解码信息存储到缓冲区模块 1。

在 RDC1 中, AFDX 综合编码模块依据表 3 中 VL1 的配置信息完成完整 AFDX 数据帧。首先从缓冲区模块 1 中读取 VL1 相应的完整 ARINC429 数据 (Label001) 及数据状态, 编 (下转第 2524 页)

# 用户自定义建模离线编程与仿真平台设计

戴 雷, 闵华松

(武汉科技大学 冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心, 武汉 430065)

**摘要:** 目前存在的离线编程与仿真系统仍运行于单一系统或平台下, 所能加载的机器人类型限于某一种或某一公司的某种型号; 基于此提出了一个基于 Qt 框架的离线仿真和编程系统, 通过设计规划了图形库系统并定义了相应的装配文本格式, 实现了当前广泛使用的 6 旋转自由度工业机器人的用户自定义加载, 还分别对六自由度工业机器人运动学进行了分析, 并介绍了系统的总体结构, 还描述了指令编译系统; 最终以六自由度弧焊机器人 UPR100 为例, 仿真结果证明系统较好地满足了具备柔性化建模的六旋转自由度工业机器人离线编程及仿真平台的要求。

**关键词:** 自定义建模; 运动学; 离线仿真; 工业机器人

## User-defined Modeling of Industrial Robots Simulation Platform Design and Research

Dai Lei, Min Huasong

(Engineering Research Center for Metallurgical Automation and Detecting Technology of Wuhan University of Science and Technology, Ministry of Education, Wuhan 430065, China)

**Abstract:** Nowadays, the existing type of Off-line programming and simulation system is still operating in a single system or platform, the robot type they can load is limited to one or a certain type of a company. Based on this, our paper presents simulation and offline programming system based on Qt framework, graphics library system being planned and corresponding assembly text format being defined, has realized the current widespread use of rotational degree of freedom 6 user-defined load of industrial robots. Kinematics of six degrees of freedom industrial robot are analyzed and presented the overall structure of the system, but also describes the command system which compile robot command. The final simulation results of UPR100 arc welding robot prove that system better meet the general industrial robot off-line programming and simulation platform with flexible modeling.

**Keywords:** user-defined modeling; kinematics; off-line programming; industrial robots

## 0 引言

制造业中小企业面临生产成本的不断提高及优秀员工的短缺, 在生产中使用离线编程是一个不错的解决方案, 但同时商品化的离线编程系统价格一般比较昂贵, 难以在中小企业应用; 机器人公司开发的离线编程与仿真系统具有量身定制的特点, 只限所产机器人模型, 编程语言也是所产机器人的编程语言, 通用性、开放性较差且同样难于应用到嵌入式系统中; 各高校和科研院所开发的离线编程系统与目前大多数该系统一样是建立在单一的系统平台(如 Windows 或者 Linux)上, 且仅仅完成一种机器人的离线编程与仿真, 缺少通用性和柔性加载功能。

基于此, 本文设计并实现了集离线编程与仿真功能于一体, 支持依据三维模型库实现用户自定义机器人三维模型装配的离线编程与仿真系统。系统具有开放体系结构、易扩充、易维护、具有良好人机交互界面和跨平台特性等特点。结果验证了系统的有效性, 较好地满足了中小企业的生产要求。

## 1 运动学

机器人运动学直接关系到系统最终运行的效果, 因此本文先给出运动学的解决。

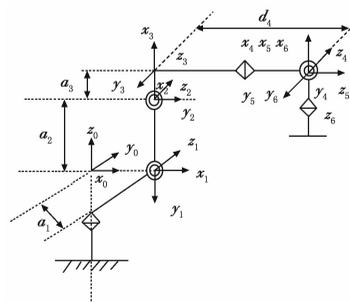


图1 UPR100 机器人坐标系分布及参数

UPR100 六自由度弧焊工业机器人有 6 个旋转副, 表 1 为 UPR100 弧焊机器人 D-H 参数表。图 1 为 UPR100 弧焊机器人简图及坐标系分布。

表 1 UPR100 弧焊机器人 D-H 参数

| Axis | $d/mm$ | $a/mm$ |   | range    |
|------|--------|--------|---|----------|
| 1    | 0      | 100    |   | -170~170 |
| 2    | 0      | 650    | 0 | -140~80  |
| 3    | 0      | 186    |   | -90~150  |
| 4    | 650    | 0      |   | -360~360 |
| 5    | 0      | 0      |   | -110~110 |
| 6    | 0      | 0      | 0 | -360~360 |

收稿日期: 2014-11-19; 修回日期: 2015-01-09。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61175094)。

作者简介: 戴雷(1989-), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式系统及其应用方向的研究。

闵华松(1969-), 男, 湖北孝感人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事嵌入式系统与智能机器人方向的研究。