

基于 AADL 的航电构型控制系统的建模分析

周德新 李 宁 刘哲旭

(中国民航大学航空自动化学院 天津 300300)

摘 要 针对航电系统的不同构型仿真、系统加改装的验证,为了使构型控制系统可以根据应用需求可靠转换,以满足系统结构能够可靠重构的需求,采用先进的建模语言 AADL(结构化分析设计语言)完成了对航电构型控制系统的建模设计。结合 AADL 对航电构型控制系统进行了详细的分析,展示了该系统的特征与关键技术,体现了此系统的工作原理与内部结构。该模型可以表达系统的功能与非功能约束,实现了系统级的组件建模策略,层次化地描述了系统的架构。

关键词 航空电子,结构化分析设计语言,构型控制

中图法分类号 V247.4 文献标识码 A

Modeling and Analysis of Avionics Configurations Control System Based on AADL

ZHOU De-xin LI Ning LIU Zhe-xu

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

Abstract To verify the avionics system's different configuration stimulations and the system's remodification, and to solve the issue that configuration control system can change according to operational needs to ensure the system structure can be reliably reconstructed, the advanced AADL(architecture analysis and design language) was adopted to complete modeling design of avionics configuration control system. With AADL, the avionics configuration control system was analyzed in detail, its features and key techniques were revealed, and the system's operational principle and internal structure were also reflected. This model shows the system's functions and non-functional constraints, realizes the system-level modeling strategy and hierarchically describes the system's structure.

Keywords Avionics, Architecture analysis and design language, Configurations control

1 引言

随着航空电子技术的发展,现代航空电子系统进入模块化高度综合的系统集成时代。系统综合程度的提高、功能的进一步增加,导致整个系统信号交联庞杂。航电设备维修后的功能验证,以及航电系统升级加改装后的验证也变得更加复杂。但是在系统级平台对航电设备进行验证与评估是必要的。在系统级对航电设备验证与评估的核心是如何实现对航电构型系统的控制。针对航电系统的不同构型的仿真需求、加改装的验证需求,整个系统结构能够根据应用需求可靠转换。

目前国外在波音 787、空客 A380 当中采用 AFDX 交换机、RDC(远程数据集中器)来实现对航电系统构型的管理与配置。国内目前在这方面的研究相对较少,但大量的飞机航电系统有加改装需求,现在我国在大飞机的研制过程当中对航电系统的验证是必要的。且由于各航空电子系统构型的差异,导致这种验证更加困难。因此现在对航电构型控制系统的研究与分析尤为重要。

对于复杂的实时系统的建模, AADL 作为一种高抽象层

次架构与分析语言非常适用^[1,6],其强大的描述能力与形式化的语义不仅能满足功能与非功能属性的要求,还能保证模型转换与自动化生成的一致性^[8]。同时 AADL 可以对同一模型进行实时性、可靠性、安全性等多种分析。因此利用 AADL 语言对航电构型控制系统建模,能够清晰地描述不同航电系统的构型。

本文首先对航电构型控制系统的概念和功能进行介绍与分析,其次对 AADL 的概念、建模要素及方法做概要性说明,最后结合 AADL 对航电构型控制系统进行建模及分析^[3]。

2 航电构型控制系统的建模需求

航电构型控制系统是在系统级根据不同的机型,在相同的硬件资源平台上配置不同的软件构型,因此系统可以根据应用需求实现可靠转换。航电构型控制系统采用“虚拟链路”技术代替原有的电气线路点对点连接方式实现不同的配置,无需改变硬件设备,其系统结构如图 1 所示。

系统上电后,构型管理计算机根据调理接口接入的航电设备,加载构型控制系统的配置信息,包括 AFDX 通信网络虚拟链路的配置信息、端系统中 ARINC429、DIO 离散信号与

本文受民航局重大专项(MHRD20130112),中央高校基本科研基金(3122015C011)资助。

周德新 女,硕士,硕士生导师,主要研究领域为智能诊断与智能检测,E-mail:261341244@qq.com;李 宁 男,硕士生,主要研究领域为航电系统;刘哲旭 男,博士,讲师,主要研究领域为航电系统。

AFDX 数据转换所需的配置信息。配置信息加载完成后,当构型控制终端有信号输入时,构型控制终端系统根据已加载的配置信息输入的信号将其转换为符合 AFDX 网络通信的 AFDX 数据帧,AFDX 数据帧从输入端的源端系统经虚链路传输至 AFDX 交换机,AFDX 交换机识别数据帧信息并解析出目的地址,然后根据目的终端的地址将数据转发至目的终端系统,同理,目的终端系统将其转换为对应的总线数据并通过调理接口输出至航电设备。

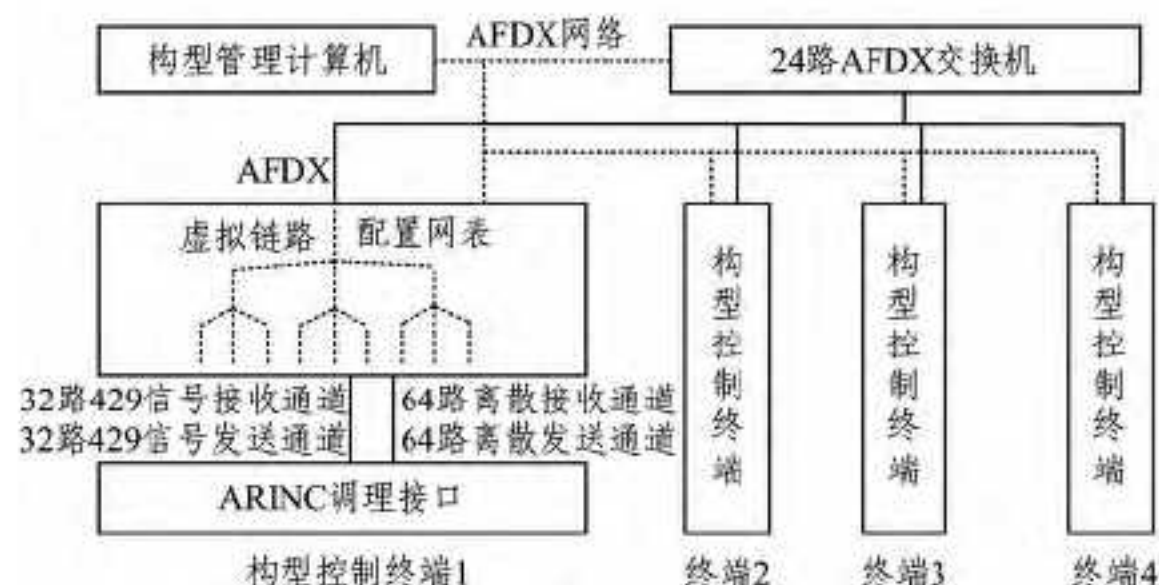


图1 航电构型控制系统结构

2.1 构型管理计算机

针对航电系统的不同构型的仿真需求以及系统的加改装验证需求,通过对构型管理计算机的控制,根据应用需求对系统进行可靠转换,并通过 AFDX 网络完成对端口配置信息与交换机配置信息的加载。

2.2 AFDX 网络

AFDX(Avionic Full Duplex Switched Ethernet)航空电子全双工交换式以太网^[5]是一种双余度网络,在原有的协议基础上对不同的环境和设备的适应性进行了增强,不仅在传输速度和性能上有很大的提高,而且引入虚链路、BAG 等概念实现了数据传输的实时性和可靠性。构型管理计算机通过对 AFDX 网络配置不同的信息,从而实现对不同构型系统的控制。构型控制终端之间通过 AFDX 网络进行数据传输。

AFDX 网络由端系统(ES)、虚链路(Virtual Link)、交换机(Switch)组成。

端系统是嵌入在构型控制终端系统中接入网络的接口设备,通过虚拟链路 VL 与 AFDX 交换机相连,AFDX 网络的确定性特征主要由端系统实现,同时端系统对数据进行封装、流量整形、调度策略,以及冗余控制。

虚拟链路 VL 是 AFDX 网络的核心,是一种逻辑上的通信信道,是根据配置信息建立的端系统之间的单向逻辑通信路径,用虚链路代替传统的点对点电气连接,实现了对复杂网络通信的控制,并且对于每一条虚链路实现了从一个源端系统到多个目的端系统的无方向单向逻辑连接,因此通过对 VL 的配置实现了对不同航电构型系统的控制。

AFDX 交换机在网络中处于核心位置,功能与以太网中的交换机类似,负责网络中数据帧的过滤、流量管理以及根据目的地址对数据帧进行转发。同时 AFDX 交换机支持虚链路,每个输出端口有足够大的缓冲空间且在交换过程中具有确定的可预计延迟时间。

AFDX 网络从系统上电开始运行,初始化完成后,会给网络中的交换机和端系统加载通信使用的确定的配置信息,当应用程序发送消息到通信端口时,由于每一个通信端口对应唯一的一条虚拟链路,而虚拟链路所对应的源端系统、目的端系统是事先通过配置信息预设好的,因此该消息可以通过端

口对应的虚拟链路传递到正确的端系统的接收端口。

2.3 构型控制终端

构型控制终端由 ARINC 调理接口、远程数据集中器(RDC),以及 AFDX 通信网络的端系统组成。虽然现在综合模块化航空电子系统已成功应用于大型客机,其主干网络采用 AFDX 网络进行通信,将各子系统进行连接。但很多子系统总线主要仍是成熟的 ARINC429、CAN 等总线,用来进行设备之间的数据交互。因此在利用航电构型控制系统对航电设备进行仿真验证的过程中,首先需要将 ARINC429 信号与 DIO 离散信号转换为构型控制系统中通信使用的 AFDX 数据帧。构型控制终端的主要功能是实现 ARINC429、DIO 信号与 AFDX 总线数据之间的转换并将转换后的 AFDX 数据发送到 AFDX 网络的交换机。RDC 是在综合航电系统架构下发展而成的一种新型航空电子设备,通过对不同总线之间的协议转换与物理信号转换,从而把不同的航电系统接入到构型控制系统的 AFDX 网络,它有两种数据收发模式:周期性收发与触发式收发。

3 AADL 建模语言及方法

AADL(体系结构分析与设计语言)是一种基于组件的层次化结构设计方法,利用组件建模,为描述与分析系统提供形式化的建模概念。其描述方法有 3 种:文本化表示、图形化表示、UML,这 3 种描述方法等价且可以互相转换。首先通过对组成系统模型的组件定义进行系统顶层开发,然后自顶向下,在此基础上添加软件描述以及硬件组件,最后将软件组件映射于硬件组件产生一个完整的系统模型。

AADL 组件分为 3 类:

- 1) 应用软件,即线程(thread)、线程组(thread group)、进程(process)、数据(data)、子程序(subprogram);
- 2) 硬件执行平台,即处理器(processor)、存储器(memory)、设备(device)、总线(bus);
- 3) 复合组件,即系统(system)。

除上述外,还包括包、属性集、端口、连接等丰富的建模元素。复合类组件的系统组件是由应用软件类组件与执行平台类组件集成,线程和子程序是最小的执行与调度单元。AADL 的图形化表示如图 2 所示。

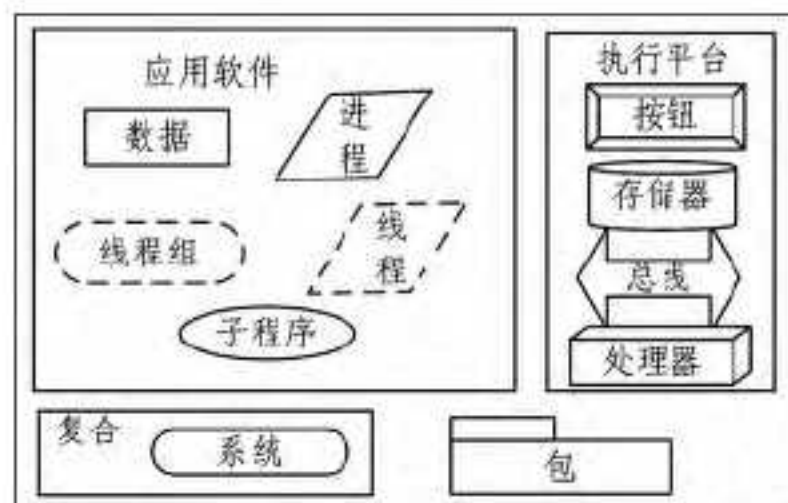


图2 AADL 的图形化表示

利用分类符、组件类型和组件实现对组件进行定义。组件类型,组件的外部接口,及其与其他组件的交互点,组件实现,组件的内部结构蓝图,组件类型可以包括多个组件实现。然后通过对组件的类型声明和实现声明的实例化,实现系统的软件到硬件的映射。AADL 的建模过程就是对组成系统模型不断实例化的过程。同时 AADL 提供了通过模式的选择表示组件或系统的工作状态的不同。

4 构型控制系统的结构建模与功能分析

4.1 构型控制系统建模分析

航空电子系统是一个对实时性与可靠性有严格要求的电子系统,因此对航电设备验证时即航电构型控制系统上电工作时必须保证系统的实时性与可靠性。为了实现系统需求,文章从系统架构与行为级别进行分析,充分地考虑了构型控制系统的功能与非功能属性。从系统的硬件架构与软件框架等方面进行了模型需求分析。

硬件架构,航电构型控制系统的主要功能硬件包括构型管理计算机、AFDX 交换机与远程数据集中器。因此在硬件建模设计中,建模需具有执行控制与传输命令的控制器,可以存储数据与配置信息的存储器、传输数据与配置信息的总线。

软件架构,对于待仿真验证的航电设备的不同构型,航电构型控制系统可以根据需求可靠转换,验证过程中数据是在根据应用需求配置的虚拟链路上进行传输的,这些功能主要依靠软件来实现,因此需要在设计之初考虑软件架构的可靠性重构。

系统行为级,对于系统模型来说,系统的执行行为是保证实时性的重要步骤,主要包括 AFDX 网络中的实时调度问题与系统服务项目。系统的交互行为指系统内不同模块之间或者同一模块的不同层级之间的信息交互。

对航电构型控制系统抽象简化后的主要实现过程可以描述为:待仿真验证的航电设备接入系统,系统上电后,构型管理计算机根据接入的设备,将各项配置信息加载完成后,如有信号输入时,触发构型控制终端的设备,同时,系统中其他设备开始进入工作状态,按照配置信息进行数据的传输,当无数据输入或者系统输入的数据与上一数据相比无变化时,系统停止工作。按照 AADL 系统层次化的建模方法,在航电构型控制系统实例建模过程中,分别对系统硬件、应用软件、系统行为建模的需求如表 1 所列。

表 1 构型控制系统建模需求

模型层次	功能描述	建模需求
硬件系统层	配置信息存储	RAM
	应用程序运行	Microcontroller
	数据存储	Device, Data
应用软件层	配置信息加载	SConfig Tconfig
	数据转换	Data-Exchange
系统级	数据流传输	Information flow
	端口管理	Port in system

4.2 基于 AADL 的系统建模方案

通过对系统的分析,构型控制系统被分为 3 个模块:数据转换模块、传输模块、控制模块^[2,7]。其图形化建模如图 3 所示。

系统 Termianl-CS 为构型控制系统的数据转换模块,传输模块为系统 Switch-CS,信息配置模块由 Microcontroller、Ram 与进程 Main-control 构成。当系统上电后,CPU 执行 Main-control 通过 SConfig、TConfig 数据端口利用 AFDX 总线将配置信息传入 RAM。当有信号输入时,首先,数据转换模块内的 RDC 根据加载好的数据转换配置信息将 ARINC429 或 DIO 离散信号转为 AFDX 数据帧,然后根据已经配置好的端口信息,ES 将源端系统的 AFDX 数据帧经虚链路(VL)传输到传输模块 Switch-CS 的交换机 Switch,交换

机根据源端系统的端口号将 AFDX 数据帧转发至目的终端。当 AFDX 数据帧传输到目的控制终端时,数据转化模块内的 RDC 再将 AFDX 数据帧转换为相应的 ARINC429 或 DIO 离散信号。由于 RDC 有两种数据转换方式,相应的数据转换模块的 Termianl-CS 系统也有两种工作模式。

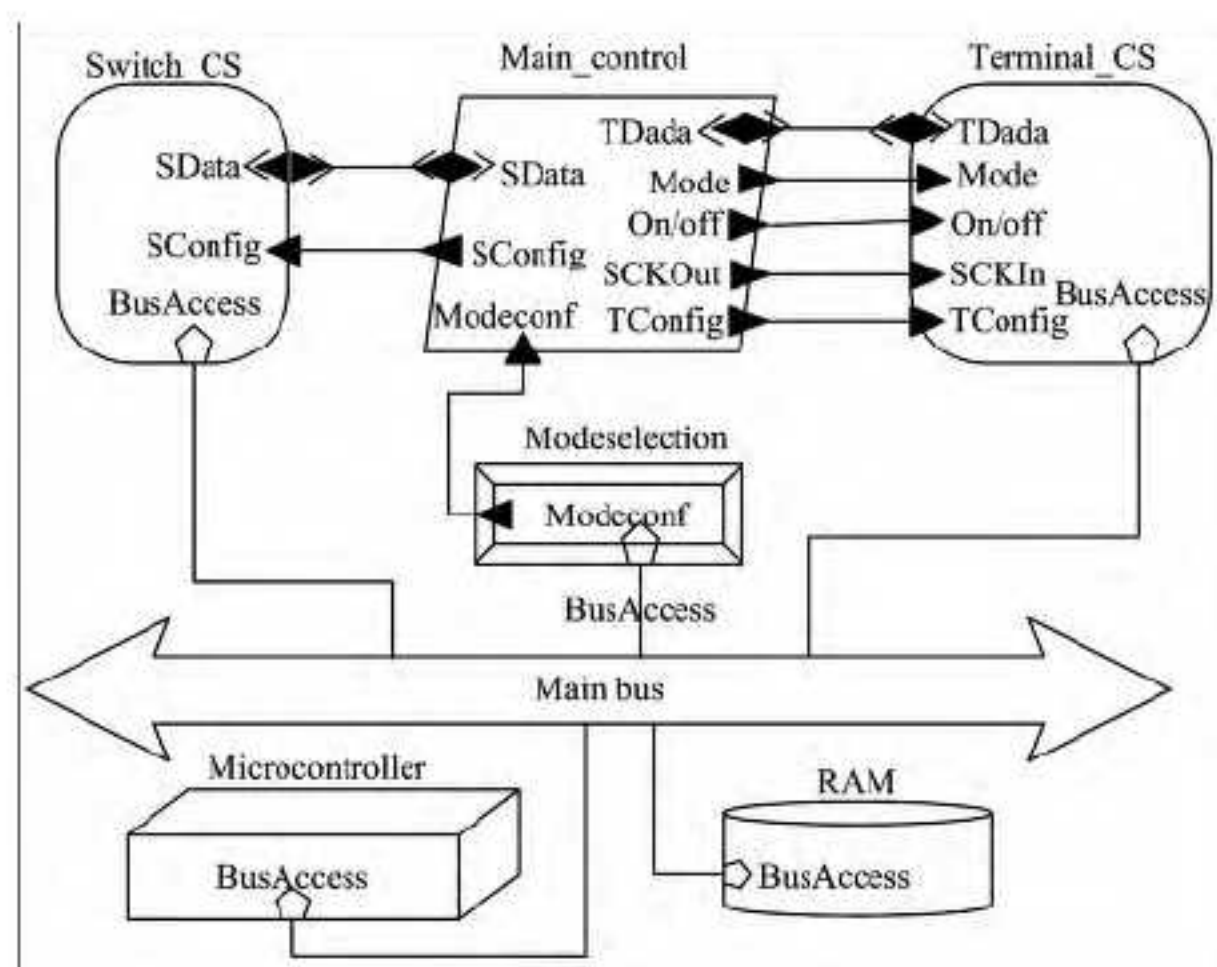


图 3 航电构型控制系统的图形化建模

主进程 Main-control 主要负责 AFDX 通信网络中交换机和端系统中通信使用的配置信息的加载、RDC 数据转换所需要的配置信息的加载、两个系统及其组件之间的数据交互。Main-control 包括 4 个线程:主控制线程 Main、读取系统的数据帧以及设置模式信息的线程 ReadandModeHandler、设置时钟的线程 Timer、加载配置信息的线程 Config 以及数据 AFDXData 与数据 Configuration。数据 Configuration 表示系统的配置信息,数据 AFDXData 表示系统 Termianl-CS 与 Switch-CS 之间交互的 AFDX 数据帧。线程 Timer、Config、ReadandModeHandler 的启动与停止由主线程 Main 控制。线程 ReadandModeHandler 通过端口 Mode 将设置的工作模式传递至系统 Termianl-CS,并根据端口 Read 读取的数据组件的 AFDX 数据帧重置系统的工作模式。由于事件数据端口是用于异步发送与接收数据的端口,且当系统的接收组件忙时,可以将数据队列。所以进程中的 SAFDX、TAFDX 端口使用事件数据端口。双向事件数据端口 SAFDX、TAFDX 读入来自系统 Termianl-CS 与 Switch 的 AFDX 数据或将数据 AFDXData 的数据帧输出至系统。数据端口 Tconfig、Sconfig 分别将系统的配置信息传输到数据转换模块与信息传输模块。其 AADL 的图形化表示如图 4 所示。

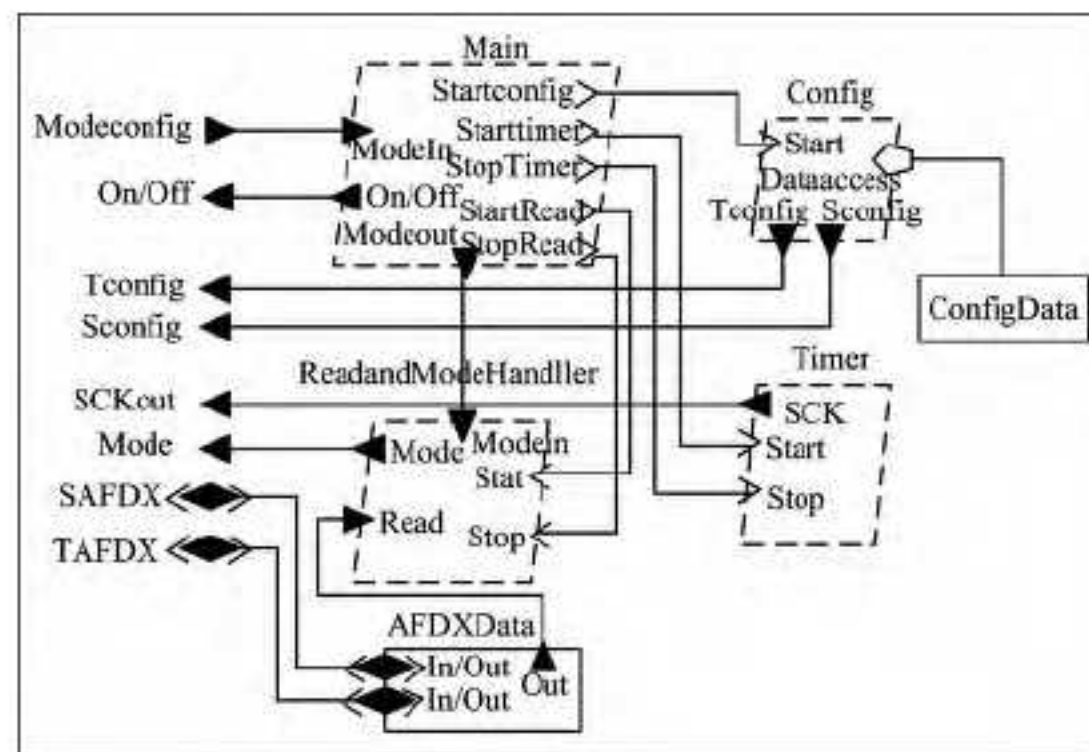
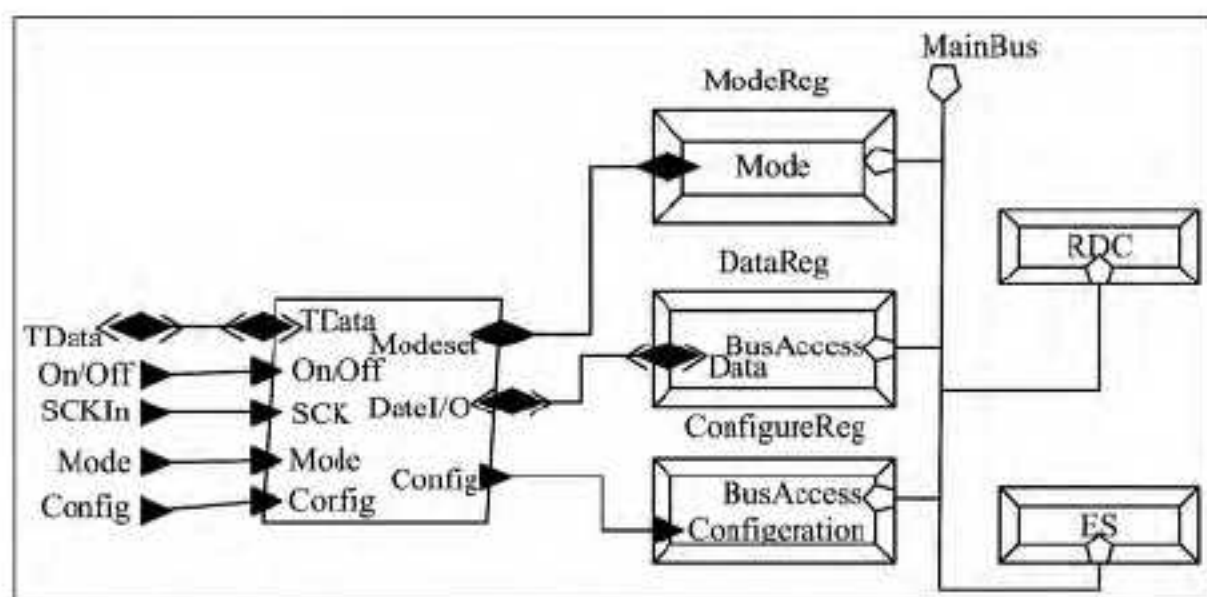


图 4 进程 Main-control 的 AADL 图形化表示

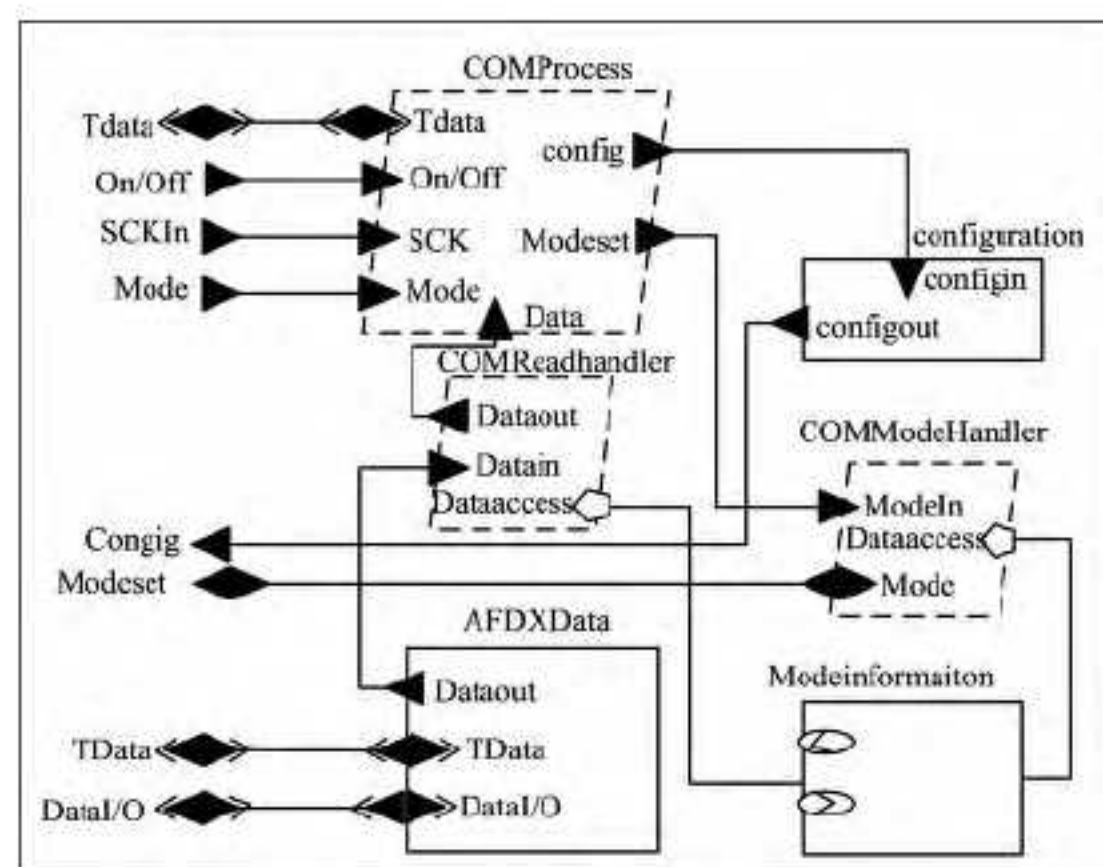
系统 Switch-CS 主要由交换机 Switch 与寄存器集成。

The diagram illustrates the data and configuration flow. On the left, external inputs 'SAFDX' (diamond symbol) and 'Sconfig' (triangle symbol) enter a dashed box labeled 'BusAccess'. Inside this box, 'SAFDX' flows through a diamond symbol to 'Data', and 'Sconfig' flows through a triangle symbol to 'Config'. 'Data' then flows through a diamond symbol to 'DataReg', and 'Config' flows through a triangle symbol to 'ConfigReg'. Both 'DataReg' and 'ConfigReg' have a 'BusAccess' label and a diamond symbol. They are connected to a 'Switch' on the right, which also has a 'BusAccess' label and a diamond symbol. A 'BusAccess' label with a diamond symbol is also shown at the top right, connected to the switch.

系统 Terminal-es 主要由 RDC、ES 以及寄存器集成。RDC 与 ES 直接连在外部总线上由 Microcontroller 调度控制。寄存器 ConfigureReg 用于存放 RDC 数据转换需要的配置信息以及 ES 中通信需要的配置信息;寄存器 DataReg 用来存放来自源端系统的 AFDX 数据或者传入目的端系统的 AFDX 数据;寄存器 ModeReg 用于存放当前工作模式,双向数据端口 modeset 可以根据寄存器内的信息设置 RDC 的工作模式,也可以根据事件数据端口 TData、DataI/O 传来的数据重置寄存器内的信息,从而改变系统中 RDC 的工作模式。其内部结构的 AADL 图形化表示如图 6 所示。

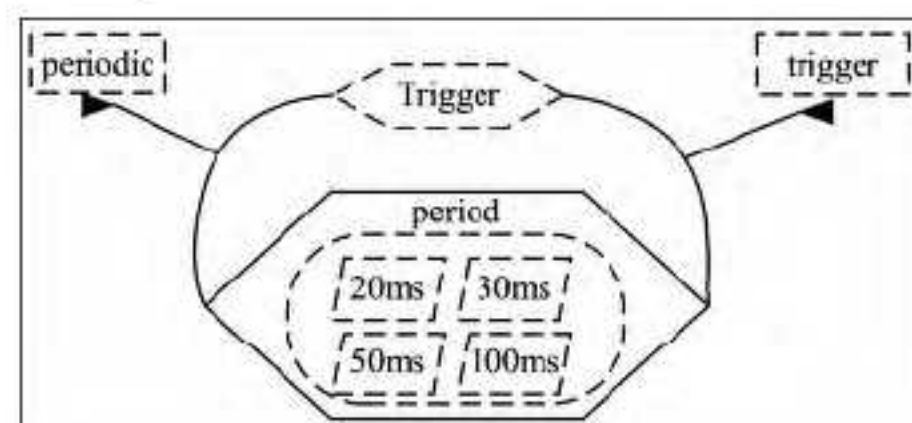


系统 Terminal-cs 与组件数据通信的主要进程为 COM-Process, 用于接受控制模块传来的信息以及本系统工作的信息, 控制其开关状态 (On/Off)、时钟指令信号 (SCK)、加载配置信息 (Config)、当前工作模式进程 Modeset 以及当前传入终端的 AFDX 数据。进程由一个主控线程 COMProcess 控制其他两个线程 COMReadler 与 COMmodehandler。线程 Comprocess 接收来自控制模块的时钟信息, 控制终端模块数据转换的开关; 接收控制模块的配置信息, 负责加载 AFDX 通信网络中端系统的配置信息与 RDC 数据转换的配置信息; 根据配置信息以及数据内的数据帧信息调用 COM-ReadHandler, 接收运行模式信息并调用线程 COMmodehandler 设置当前工作模式; 信息转换模块的配置信息通过数据 Configuration 输出; 数据组件 AFDXData 表示 AFDX 网络传入转换器的源端数据或者经转换器传入的源端数据。线程 COMReadHandler 与 COMmodehandler 共享了数据 modeinformation, COMReadHandler 读入工作模式信息, COMmodehandler 对其设置新的工作模式。COMProcess 内部结构的图形化表示如图 7 所示。



系统通信模式采用排队缓冲模式,任何时刻所有读入的数据都可以使用,系统通过 AFDXData 组件实现组件之间的数据交互。

由于数据转换终端的 RDC 有两种工作方式, 周期性收发与触发式收发, 因此系统 Terminal-CS 共分两种工作模式, 触发模式与周期模式^[4]。系统上电加载配置信息完成以后, 当有信号输入时系统根据配置信息进行数据转换。系统中有两个信号表示系统的中断信号, 数据信号 Trigger 和数据信号 Peridoic。当系统上电完成, Config 端口对系统加载配置信息, 各线程进行初始化后, 当数据端口 Data-in 有信号输入时, 系统开始工作, 当数据端口输入的信号或者经转换器输入的源端信号为周期信号时, 系统的工作方式为周期式, 当系统输入的信号或者经转换器输入的源端信号为离散信号时, 系统的工作方式转换为触发式, 反之亦然。当输入的信号为周期信号时, 由于周期信号 ARINC429 的周期不同, 导致周期模式下的执行的线程也不同。本系统主要涉及的 ARINC429 信号周期有 20ms、30ms、50ms、100ms, 所以一共建模 4 个线程的线程组。工作模式转化的内部结构的 AADL 图形化表示如图 8 所示。



5 模型功能验证

在航电构型控制系统中,系统上电、配置信息加载完成以后,如果有信号输入时,信号流经由控制终端的源端、流路径AFDX交换机到达目的终端。为了验证构型控制系统的功能是按照已加载的配置信息执行的,对信息流的分析是必要的。选取如图9所示的控制终端的Terminal-CS1输入的AFDX数据帧到Terminal-CS2目的终端的端到端流通信进行分析。

图 9 所示为该信息流从预先设置的端系统 Terminal-CS1, 经转换器 Switch 系统、主控线程, 最后流入端系统 Terminal-CS2。从表 1 可以看出, 端系统 1 发送的数据经 AFDX 网络的交换机, 转发到端系统 2。因此, 我们可以判断系统的设计满足功能的需求。

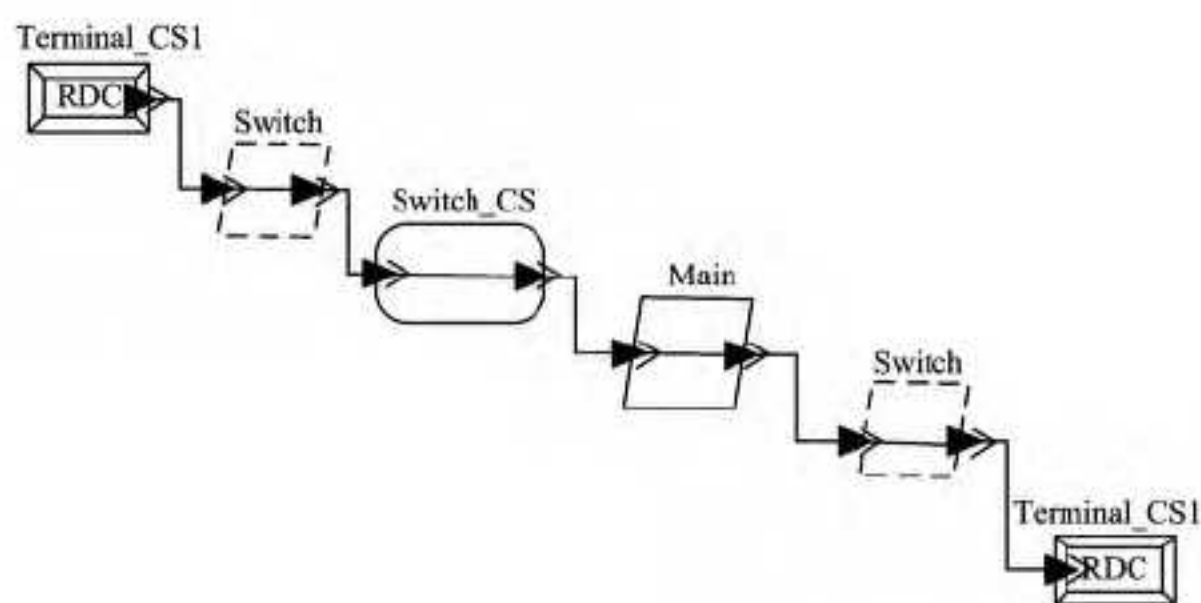


图9 端到端系统流分析

表2 数据分析

	源端	目的终端
IP	10.10.10.10	10.1.2.4
Mac	02:00:00:01:02:40	03:00:00:00:00:03

结束语 随着综合模块化航电系统的发展,航电系统的综合程度会进一步提高,因此如何实现对不同航电系统的构型控制变得更加重要。通过本文的分析,利用AADL语言实现了系统级的组件建模策略,层次化地描述了系统的架构。其模型可以表达系统的功能与非功能约束。在本文建模完成的基础上,利用AADL语言的扩展性,通过对组件的扩展,建立系统故障与测试之间的关系,从而描述系统的测试性。

(上接第45页)

$$\begin{aligned}
 B' &= A' \circ R_c \\
 &= \{ \langle 0.45, 0.45 \rangle \langle 0.63, 0.29 \rangle \langle 0.77, 0.16 \rangle \langle 0.89, \\
 &\quad 0.05 \rangle \langle 1, 0 \rangle \} \\
 &= \text{more or less } B
 \end{aligned}$$

当 $A' = \text{not } A$ 时:

$$\begin{aligned}
 B' &= A' \circ R_c \\
 &= \{ \langle 0.7, 0.2 \rangle \langle 0.5, 0.4 \rangle \langle 0.4, 0.5 \rangle \langle 0.4, 0.5 \rangle \langle 0.4, \\
 &\quad 0.5 \rangle \}
 \end{aligned}$$

根据直觉准则(GMP)可以得出:当 $A' = A$ 、 $A' = \text{very } A$ 、 $A' = \text{more or less } A$ 时, R_c 的性能较好;当 $A' = \text{not } A$ 时, R_c 性能比较差。

(2) Mamdani 直觉模糊拒式推理算法

当 $B' = \text{not } B$ 时:

$$\begin{aligned}
 A' &= R_c \circ B' \\
 &= \{ \langle 0.4, 0.5 \rangle \langle 0.4, 0.5 \rangle \langle 0.6, 0.33 \rangle \langle 0.65, 0.25 \rangle \\
 &\quad \langle 0.7, 0.2 \rangle \}
 \end{aligned}$$

当 $B' = \text{not very } B$ 时:

$$\begin{aligned}
 A' &= R_c \circ B' \\
 &= \{ \langle 0.51, 0.36 \rangle \langle 0.64, 0.25 \rangle \langle 0.84, 0.11 \rangle \langle 0.88, \\
 &\quad 0.06 \rangle \langle 0.91, 0.04 \rangle \}
 \end{aligned}$$

当 $B' = \text{not more or less } B$ 时:

$$\begin{aligned}
 A' &= R_c \circ B' \\
 &= \{ \langle 0.29, 0.63 \rangle \langle 0.29, 0.63 \rangle \langle 0.37, 0.57 \rangle \langle 0.41, 0.5 \rangle \\
 &\quad \langle 0.45, 0.45 \rangle \}
 \end{aligned}$$

当 $B' = B$ 时:

$$\begin{aligned}
 A' &= R_c \circ B' \\
 &= \{ \langle 1, 0 \rangle \langle 0.5, 0.4 \rangle \langle 0.33, 0.6 \rangle \langle 0.25, 0.65 \rangle \langle 0.2, \\
 &\quad 0.7 \rangle \} \\
 &= A
 \end{aligned}$$

根据直觉准则(GMT)可以得出:当 $B' = \text{not } B$ 、 $B' = \text{not}$

参考文献

- [1] Feiler P H, Hundak J. developing. AAD-L for Control System: APractitioner's Guide (CMU/SEI-2007-TR-014) [M]. Pittsburgh, PA: Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 2007
- [2] 钱磊, 郁文生, 朱明华. 基于AADL的无线传感网络的建模与分析[J]. 计算机科学, 2012, 39(11): 424-427
- [3] Feiler P H, Hansson J. Flow Latency Analysis with the Architecture Analysis and Design Language(AADL)[D]. Pittsburgh, PA: Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 2007
- [4] 李振松, 蒋志雄, 顾斌. AADL 模式转化设计方法研究[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(12): 424-427
- [5] 姜丽云. AFDX 网络关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013
- [6] 杨阳. 基于AADL的车用嵌入式实时系统建模方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012
- [7] 殷锋社, 汤小明. 基于AADL的航空电子系统建模研究[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(4): 88-89
- [8] 刘玮, 李蜀瑜. AADL 的形式化研究[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(9): 43-45

$\text{very } B$ 、 $B' = \text{not more or less } B$ 时, R_c 的性能较差;当 $B' = B$ 时, R_c 性能比较好。

综合上述结果可以看出,无论是对于直觉模糊取式推理还是直觉模糊拒式推理,当 $A' = A$ 或者 $B' = B$ 时, R_c 都是性能比较好的直觉模糊关系。

结束语 本文的主要贡献是在对 Mamdani 模糊推理算法研究的基础上,对其进行了直觉化扩展,给出了模糊关系 R_c 对应的直觉模糊取式推理算法和直觉模糊拒式推理算法。然后以具体的算例验证了该方法的正确性和有效性,并依据直觉准则对其性能进行了评价。

参考文献

- [1] Atanassov K. Intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96
- [2] Atanassov K. More on intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1989, 33(1): 37-46
- [3] Atanassov K. New operations defined over the intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 61(2): 137-142
- [4] Atanassov K. Intuitionistic Fuzzy Sets: Theory and Applications [M]. Heidelberg, Germany: Physical-Verlag, 1999
- [5] Atanassov K, Janusz K, Eulalia S, et al. On Separability of Intuitionistic Fuzzy Sets [J]. Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2003, 2715: 285-292
- [6] 雷英杰, 王宝树. 直觉模糊关系及其合成运算 [J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(2): 113-118
- [7] 郭智莲, 杨海龙, 王珏. 双论域上的直觉模糊概率粗糙集模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(7): 1828-1834
- [8] 郭庆, 殷明, 吴磊. 直觉模糊信息系统的优势关系及其约简[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(11): 2239-2243
- [9] 吴磊, 杨善林, 郭庆. 优势关系下直觉模糊目标信息系统的上近似约简[J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(4): 300-304
- [10] 王永庆. 人工智能原理与方法原理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998