

# 无线电接口单元软件数据耦合和控制耦合覆盖目标的实现

夏小凤 庞宇 陈柯龙

(中电科航空电子有限公司 四川 成都 611731)

**摘要** 当前行业里对数据耦合和控制耦合覆盖目标存在的背景以及实现该方法充满困惑。介绍实现满足 DO-178C 中数据耦合和控制耦合覆盖目标的方法及过程。通过对该目标的说明和解释,提出一种实现该方法的方法。以无线电接口软件为例,详细地说明了实现该方法的过程。对后续机载软件研制项目过程中,开展数据耦合和控制耦合分析工作具有实际的指导意义。

**关键词** 数据耦合 控制耦合 DO-178C 无线电接口单元

中图分类号 TP311.56

文献标识码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2019.01.007

## IMPLEMENTATION OF DATA COUPLING AND CONTROL COUPLING COVERAGE OBJECT FOR RADIO INTERFACE UNIT SOFTWARE

Xia Xiaofeng Pang Yu Chen Kelong

(China Electronics Technology Group Avionics Corporation, Chengdu 611731, Sichuan, China)

**Abstract** In the current industry, the researchers feel confused about the background of coverage objective of data coupling and control coupling. They are also confused about the methods to achieve the objective. In this paper, we described the method and process to achieve the goal of data coupling and control coupling coverage in DO-178C. By explaining and illustrating the objective, we proposed a method to achieve the objective. Taking radio interface unit software as an example, we described in details the process of achieving this objective. It has practical guidance for how to carry out data coupling and control coupling analysis in the subsequent airborne software development project.

**Keywords** Data coupling Control coupling DO-178C Radio interface unit

## 0 引言

随着琨龙 600 和 C919 国产大飞机的首飞成功,国内的民机产业发展迅速,但是我国在民机软件研制的经验和积累都比较薄弱。当前国内机载软件研制主要依据 RTCA DO-178C 标准,该标准面向过程和目标,但是对于目标的实现方法却没有说明,导致软件研制人员对于这些目标及满足方法充满困惑。DO-178C 附表 A-7 中的目标 8 为“软件结构(数据耦合和控制耦合)的测试覆盖需要满足”,同时 DO-178C 对控制耦合和数据耦合进行了定义。

**数据耦合:**软件组件对不完全受该组件控制的数据的依赖性。

**控制耦合:**一个软件组件影响另一个软件组件执行的方式或程度。

耦合关系是衡量软件架构可靠性的重要指标,对于高安全性和高可靠性的机载软件而言,数据耦合和控制耦合分析更尤为重要。

本文以无线电接口单元软件为例,说明实现数据耦合和控制耦合目标的方法和过程。无线电接口单元设备(简称 RIU)是通信导航系统的关键设备,用于连接通信导航系统内部各个功能单元,按照 CCAR-25-R4 标准飞机的技术要求进行研制,同时该设备需要取得中国民航局(CAAC)的 CTSOA 适航认证。无线电接口单元软件是驻留在无线电接口设备中的嵌入式软件<sup>[1]</sup>,根据系统安全性分析的要求,软件研制保证等级为 C 级,根据 DO-178C<sup>[2]</sup>附表 A-7 中的目标 8,需要开

展数据耦合和控制耦合关系分析。

RIU 软件的主要功能如下:无线电调谐数据的集中与分发;设备的维护管理,包括上电自检、启动自检和周期自检;音频管理,包括接收音混音、音频控制数据管理、音频发送等。

## 1 国内外相关工作

目前国外在软件测试领域对于耦合关系的分析与测试有较多深入的研究,在文献[3]中详细介绍了软件的耦合类型、耦合覆盖的度量方法、以及通过插桩方式来获取耦合关系覆盖率的测试过程。文献[4]提出了一种根据数据耦合和控制耦合关系自动生成测试数据的技术,但是这些耦合关系的分析都是基于代码结构的,而在 DO-178C 中所有验证活动都是基于需求的,基于代码结构的测试难以满足适航局方的要求。对于数据耦合和控制耦合目标的满足方法,国外一些在业界领先的航电供应商的验证方法也不尽令人信服。如罗克韦尔柯林斯<sup>[5]</sup>,目前的做法是只要代码的结构覆盖目标满足,对于 C 级软件只要满足语句覆盖条件,即认为所有的耦合关系是被覆盖到的,但由于是成熟的航电供应商且有丰富的运营经验,局方基于信任是认可的。对于国内供应商来说,目前都缺乏适航经验,局方审定过程会更加严格,因此对该目标的解析以及验证方法的研究需要进一步深入。目前国内在机载软件的数据耦合和控制耦合关系验证方法的研究处于起步阶段,且对该目标的实现方法的理解存在偏差,在文献[6]中主要是依靠对需求的评审和代码分析来满足,但是没有动态测试证实数据耦合关系和控制耦合关系得到执行。

## 2 数据耦合和控制耦合覆盖目标的解析

DO-178C 标准中要求软件研制保证等级为 A 级、B 级、C 级的软件满足软件测试覆盖要求。DO-178C 中 6.4.4.2 章节中指出,结构覆盖分析的目标是确定基于需求的测试规程未测试到的代码结构,并进行额外的验证以达到结构覆盖<sup>[7]</sup>。验证活动应包括:

(1) 通过分析基于需求的测试获取的覆盖率数据,证实结构覆盖程度与所定的软件等级是一致的。

(2) 结构覆盖分析可以在源码、目标码以及可执行目标码上开展,对于 A 级软件,如果目标码中被编译环境等自动加入一些附加代码,则需要一些附加的验证工作说明其正确性。

(3) 分析应证实基于需求的测试覆盖了组件之间

的数据耦合和控制耦合关系。

通过以上验证活动,应满足的目标为:

(1) 软件结构的(修正的条件/判定 MC/DC)的测试覆盖得到证实;

(2) 软件结构的(判定覆盖)的测试覆盖得到证实;

(3) 软件结构的(语句覆盖)的测试覆盖得到证实;

(4) 软件结构的(数据耦合和控制耦合)的测试覆盖得到证实。

当前,前面三个目标均可借助软件工具进行证实。通常使用工具在源代码中自动插入代码检查点,检查点用于记录测试规程执行过程中是否执行到该语句,然后通过获取的检查点数据得到代码的覆盖数据,当前业界已有很多满足该目标的成熟工具,如 Testbed、Verctorcast<sup>[8]</sup>。但是对于软件结构中数据耦合和控制耦合的测试覆盖,却难以直接使用软件工具的结果来说明该目标已得到满足。

FAA CAST-19<sup>[9]</sup>意见书指出,数据耦合和控制耦合分析的目标是提供一种组件间交互/依赖性的正确性的度量和保证,目的是表明软件模块/组件影响其他模块/组件的方式是设计者期望的,且没有以设计者无预期的方式来影响其他模块/组件从而导致意外的,反常的或错误的行为。添加该目标的目的主要是为了证明软件架构以及集成过程在目标环境中被充分验证。该意见书同时指出,该目标的满足依赖于组件接口规格文档的详细程度和基于软件需求的测试中正常范围测试和健壮性测试的完整性,也就是说,接口和依赖性需要在设计需求中进行说明,并且这些需求要经过正常的功能测试和健壮性测试。如果接口和依赖项的定义不明确,并且测试用例不充分,则很难证明该目标已得到满足。

## 3 目标实现方法及过程

为了成功开展基于需求测试的数据耦合/控制耦合分析,必须采用评审、分析、测试三种验证方法结合的方式,在开发过程中通过评审和分析方法确保软件架构与需求一致且代码实现遵从软件架构;然后通过测试方法说明数据耦合和控制耦合关系得到正确运行;最后通过分析确保所有的数据耦合和控制耦合关系得到覆盖。开展满足基于 DO-178C 的数据耦合和控制耦合分析应包括以下四个步骤:

(1) 通过评审方法确保软件架构文档有 DO-178C 11.10 章节中规定的与数据流和控制流相关的内容:

数据结构、软件架构、内部和外部输入/输出,设计的数据流和控制流,调度过程以及多处理器/多任务间的通信机制、分区方法以及软件组件的描述等。

(2) 通过评审方法保证软件架构的一致性,使用评审和分析结合的方式保证代码和架构的一致性。DO-178C 附表 A-4 目标 9 对应了 DO-178C 中章节 6.3.3,该章节说明了软件设计描述文档评审/分析的目标是为了确保组件和软件架构之间的正确关系,这个关系也包括了数据流和控制流的关系,在 DO-178C 章节 6.3.4. b 中进一步指出,软件代码评审和分析的目标需要确保代码与软件架构中定义的数据流和控制流一致。

(3) 通过评审方法确保基于需求的集成测试已经完成开发,DO-178C 章节 6.4.3. b 说明了执行基于需求的软件集成测试是为了确保软件组件间的交互是正确的且满足软件的需求和架构。集成测试主要是为了发现以下错误:对于变量及常数的不正确的初始化,参数传递错误,数据损坏(特别是全局数据),事件或操作的顺序错误等。

(4) 通过测试方法开展基于需求的测试执行,并结合分析方法分析测试结果,通过测试结果证实组件间的数据耦合和控制耦合关系得到执行。

## 4 无线电接口单元软件目标实现方法及过程

### 4.1 软件架构文档化

根据 DO-178C,在软件设计过程中输出软件架构文档,无线电接口单元软件架构如图 1 所示。

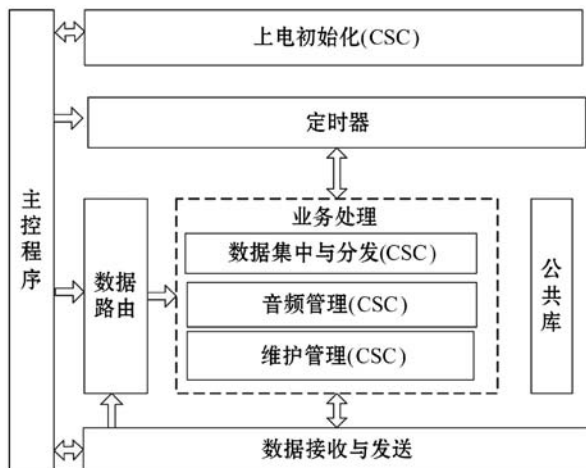


图 1 无线电接口单元软件架构图

软件架构文档中详细描述了组成该架构的组件及其功能,如表 1 所示。此外该架构文档也详细描述组件间的数据流和控制流关系。

表 1 组件说明

组件名称	组件功能
主控程序	RIU 软件入口,负责各个组件的调度
上电初始化	完成 RIU 软件上电自检 完成 RIU 位置识别
数据路由	完成 Arinc429 数据、RS422 数据路由到其他组件
数据接收与发送	完成 RIU 从其他外部设备接收数据以及将数据发送到外部设备,外部设备包括 VHF、HF、NAV、DME、ACP、AMU、RTU,数据类型包括 Arinc429 数据、RS422 数据、模拟音频数据、离散 IO 数据
数据集中与分发	完成调谐数据、外部设备维护数据集中与分发功能
音频管理	完成选呼功能,音量调节功能以及混音功能。 完成发话通道选择,HF、VHF 发话音输出,完成到 HF 的模拟音频输出通道选择,完成告警音频输出通道选择
维护管理	完成 RIU 维护功能,包括 RIU 自身启动自检,周期自检等
定时器	完成定时器管理
公共库组件	该组件实现 RIU 软件中的公用功能,如 429 数据校验等

### 4.2 软件架构一致性

根据 DO-178C 6.3.3 章节的要求,在软件设计过程中对软件架构进行评审,确保其一致性,并形成评审记录。

软件架构评审的检查单应包含以下内容:

- (1) 软件架构是否与软件高层需求保持一致性;
- (2) 软件架构是否符合软件设计标准;
- (3) 软件架构是否兼容目标计算机;
- (4) 软件架构是否包括输入/输出描述,包括内部的和外部的,例如数据字典;
- (5) 软件架构是否定义了数据流和控制流;
- (6) 软件架构是否定义了合适的资源限制,例如,时间片和内存余量;
- (7) 软件架构是否包含了调度过程、内部处理器/任务通信机制方面的描述。

根据 DO-178C 6.3.4 章节的要求,在软件编码过程中对软件代码进行评审,确保软件代码正确实现了软件的架构,并形成评审记录。

软件代码评审的检查单应包含以下内容:

- (1) 源代码是否符合软件编码标准,所有的偏离是否有合适的理由;
- (2) 源代码是否遵从软件高层/低层需求并且没有源代码执行未定义的功能;
- (3) 源代码是否遵从软件架构,实现了软件架构中定义的数据流和控制流;
- (4) 源代码是否可验证,例如没有不能被验证的

语句和结构;

- (5) 源代码是否正确和一致;
- (6) 软件源代码是否实现了预期的功能。

### 4.3 基于需求的集成测试

根据 DO-178C 6.4 章节的要求,在软件验证过程中根据需求完成测试用例与规程开发,且测试用例经过评审,满足正常范围测试和健壮性测试要求,并形成评审记录。

软件测试用例评审<sup>[10]</sup>的检查单应包含以下内容:

- (1) 软件测试用例是否正确覆盖了输入数据的可能失效模式;
- (2) 软件测试用例是否正确覆盖了等价类;
- (3) 软件测试用例是否正确覆盖了软件初始化的异常情况;
- (4) 软件测试用例是否恰当地验证了时间相关的功能;
- (5) 软件测试用例和软件需求之间的追踪关系是否正确;
- (6) 软件测试用例是否覆盖了所有的软件需求。

### 4.4 测试结果分析

#### 4.4.1 数据耦合关系分析

下面以软件架构文档中的调谐数据设置数据流为例,说明组件间的数据耦合关系的分析过程。在该数据流中,从 RTU 来的 NAV、DME、VHF、HF 的调谐数据,将经过数据接收与发送组件、数据路由组件、数据集中与分发组件发送到各自设备中,详细数据流图如图 2 所示。

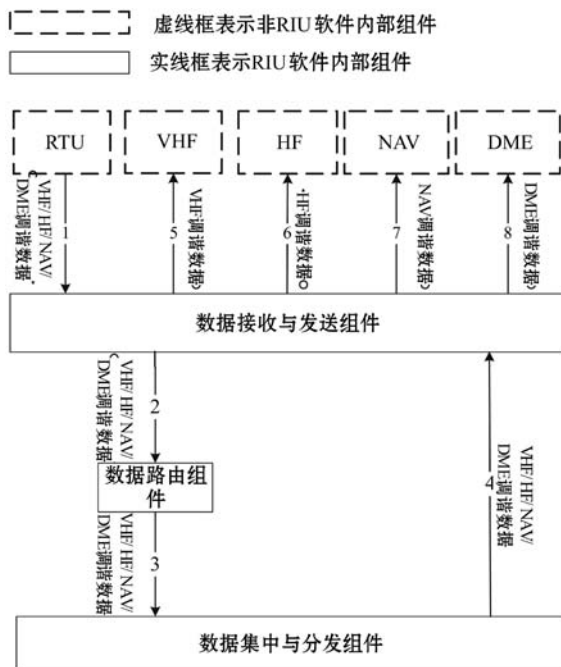


图 2 调谐数据设置数据流图

在测试用例文档中找出覆盖该数据流的测试用例如下:

- (1) 测试从 RTU\_IN 接口收到“VHF 调谐频率 (25 kHz)”字时,RIU 软件将该消息转发到 VHF\_OUT 接口(覆盖图中 1、2、3、4、5 连接成的数据流);
- (2) 测试从 RTU\_IN 接口收到“HF 频率字 1”字时,RIU 软件将该消息转发到 HF\_OUT 接口(覆盖图中 1、2、3、4、6 连接成的数据流);
- (3) 测试从 RTU\_IN 接口收到“ADF 调谐频率”字时,RIU 软件将该数据转发到 NAV\_DME\_OUT 接口(覆盖图中 1、2、3、4、7 连接成的数据流);
- (4) 测试从 RTU\_IN 接口收到“VOR/ILS 调谐频率”字时,RIU 软件将该数据转发到 NAV\_DME\_OUT 接口(覆盖图中 1、2、3、4、8 连接成的数据流)。

#### 4.4.2 控制耦合关系分析

下面以软件架构文档中的数据接收与发送组件与其他组件之间的控制流为例,说明组件间的控制耦合关系的分析过程,如图 3 所示。

控制流关系如下:

- (1) 上电初始化组件在上电时调用数据接收与发送组件的配置接口完成 RIU Arinc429、RS422 接口的初始化;
- (2) 主控程序循环调用数据接收与发送组件将 A429、RS422 数据放入队列;
- (3) 数据接收与发送组件注册 8 ms 定时器,周期读取 RIU 离散数据并放入队列;
- (4) 数据路由组件循环从队列中获取数据并路由到其他组件;
- (5) 音频管理组件、数据集中与分发组件调用数据接收与发送组件发送数据,维护管理组件调用数据接收与发送组件接收与发送 Arinc429 和 RS422 数据。

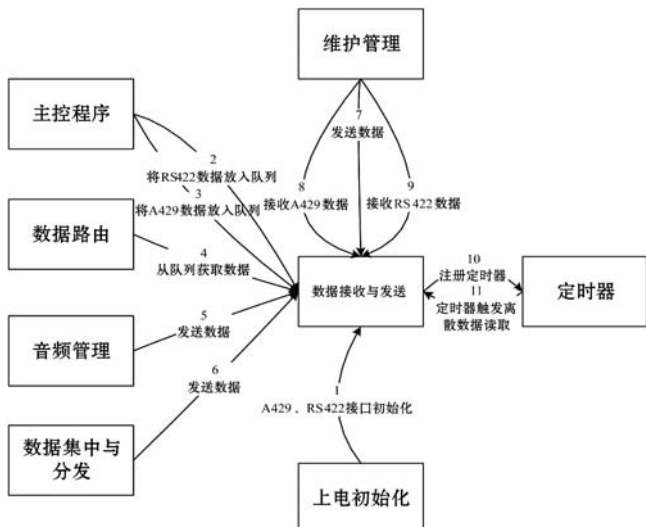


图 3 数据接收与发送组件控制流图

在测试用例文档中找出覆盖该控制流的测试用例如下:

(1) 测试离散量变化时,A429 字“RIU 维护字”的值是否变化(覆盖图中控制流 1、10、11、7);

(2) 测试当从 RTU\_IN 接口收到 A429 字“HF 频率字 1”字时,RIU 软件是否将该数据转发到 HF\_OUT 接口(覆盖图中控制流 3、4、6);

(3) 测试当 RIU 接收到 VHF 电台选呼消息时,是否向 ACP 输出 RS422“选呼指示”消息(覆盖图中控制流 2、4、6);

(4) 测试 WOW\_DIN 为低电平,RTU\_IN 接口 1 秒内收到 3 次 A429 字“启动自检命令”时,RIU 是否进行启动自检测试(覆盖图中控制流 8);

(5) 测试启动自检完成时,RIU 软件是否将 RS422“功能测试”消息置为启动并发送给 ACP(覆盖图中控制流 7);

(6) 测试当从 AMU\_DATA\_IN 收到 RS422“AMU 维护字 1”、“AMU 维护字 2”和“AMU 故障字”时,RIU 软件是否根据收到的维护和故障信息给 A429“AMU 维护状态”字赋值并发送到 RTU\_OUT(覆盖图中控制流 7、9);

(7) 测试当发话通道选择为 VHF1 且 PPT 按下时,RIU 是否将从 ACP 接收到数字音频从 VHF\_OUT 接口发出(覆盖图中控制流 5)。

#### 4.4.3 测试执行

RIU 软件的测试环境如图 4 所示。

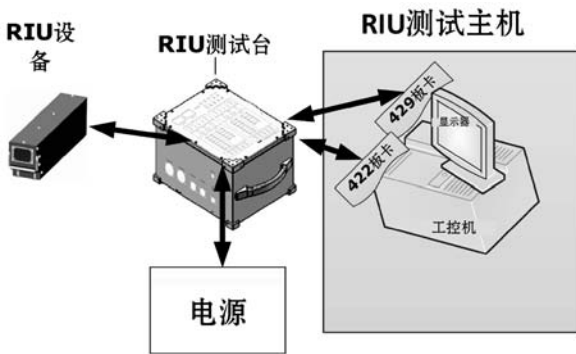


图 4 RIU 软件的测试环境示意图

RIU 测试台具有为 RIU 设备供电,A429 信号监测端口、RS422 信号监测端口、离散输入控制、离散输出状态指示,电源开关控制、上电指示等功能。同时 RIU 测试台实现 RIU 硬件平台对外接口信号线的转接。

RIU 测试主机其用于仿真通信导航系统中与被测 RIU 设备进行 A429 交联(包括 VHF、HF、NAV、DME、RTU、DPU)和 RS422 交联(ACP、AMU)的设备接口和功能,为被测 RIU 设备提供信号激励,实现对 RIU 设备的数据转发功能进行测试;RIU 测试主机是由工控

机、A429 板卡和 RS422 板卡组成。

RIU 测试主机上安装了自研工具软件 Arinc429 和 RS422,通过这两个工具软件,可以分别实现 A429 数据和 RS422 数据的输入激励以及输出显示,RIU 测试主机与 RIU 设备的数据交互关系如图 5 所示。

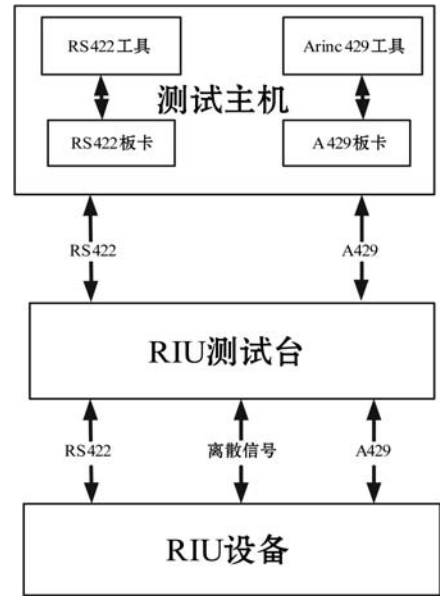


图 5 RIU 测试主机与 RIU 设备的数据交互示意图

在该测试环境下执行第四章中的测试用例,下面用例为例:

测试从 RTU\_IN 接口收到“VHF 调谐频率(25 kHz)”字时,RIU 软件将该消息转发到 VHF\_OUT 接口。

测试结果见图 6,在 Arinc429 工具上发送从 RTU\_IN 接口(发送通道 1)发送“VHF 调谐频率(25 kHz)”(0x06000118),从 VHF\_OUT(接收通道 6)收到该消息(0x06000118),测试结果通过。



图 6 数据转发测试结果图

依次执行软件架构中的所有数据耦合和控制耦合关系对应的测试用例,直到所有用例测试结果全为通过,说明 RIU 软件的数据耦合和控制耦合关系得到验证并通过,耦合关系结构覆盖目标满足。

(下转第 44 页)

## 4 结 语

本文提出了一种基于 Storm、Spark、Kafka 等分布式计算技术的分布式多层大数据分析处理模型,并采用这种模型,通过高性能的消息传递中间件 Apache Kafka,分析、处理实时和非实时数据。实现了一个高频交易(HFT)系统。该模型包含表示层、前端切换层和业务逻辑层。每个层负责不同的功能,可以根据表示层接收到的用户信息请求,在前端切换层和业务逻辑层完成计算分析,可以在数十毫秒到数百毫秒之间处理数百万个市场状态的计算和订单提交。实验结果表明,HFT 系统的性能优越。改进后的算法性能优于原始算法,相同条件下平均计算时间明显减少,使得每秒钟可处理的市场交易额得到提升。在正常情况下,可以支持用 6 台 PC 计算 80 个期货的市场状态,且延迟在 1 秒内,足以预测高频交易市场的短期趋势。该体系结构还可以用于许多其他高频、大数据和流数据处理系统。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 王聪,王翠荣,王兴伟,等. 面向云计算的数据中心网络体系结构设计[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(2): 286-293.
- [ 2 ] 朱虎明. 基于集群计算的免疫优化算法及其应用研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010.
- [ 3 ] 朱晓明,刘卫东. 基于松散耦合的分布式信息系统的数据挖掘[J]. 计算机工程, 2004, 30(2): 181-182,197.
- [ 4 ] 李卫榜,李战怀,陈群,等. 分布式大数据函数依赖发现[J]. 计算机研究与发展, 2015; 52(2): 282-294.
- [ 5 ] 许智宏,蒋新宇,董永峰,等. 一种基于 Spark 的改进协同过滤算法研究[J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(5): 247-254, 278.
- [ 6 ] 李文昊,李海芳. 确定性分布式数据库中长事务处理方法研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(13): 92-95.
- [ 7 ] 宋顶利,张昕,于复兴. 分布式优化 Apriori 算法的交通运行状态数据分析模型[J]. 科技通报, 2016; 32(10): 202-206.
- [ 8 ] 陈锐忠,魏理豪,梁哲恒,等. 基于 Hadoop 的海量数据处理模型研究和应用[J]. 电子设计工程, 2016; 24(14): 101-103.
- [ 9 ] Gu L, Li H. Memory or Time: Performance Evaluation for Iterative Operation on Hadoop and Spark[C]//2013 IEEE 10th International Conference on High Performance Computing and Communications & 2013 IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing. IEEE, 2014;

721-727.

- [ 10 ] 魏祖宽,刘兆宏. 基于 Hadoop 的大数据分析和处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2017.
- [ 11 ] Jenie Y I, Kampen E J V, Ellerbroek J, et al. Taxonomy of Conflict Detection and Resolution Approaches for Unmanned Aerial Vehicle in an Integrated Airspace[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(3): 558-567.

(上接第 38 页)

## 5 结 语

数据耦合关系和控制耦合关系的测试覆盖目标是 DO-178C 标准中规定的机载软件结构覆盖中的目标,在本项目开展过程中通过评审、测试和分析三种验证方法结合的方式来满足。本文介绍了数据耦合和控制耦合测试覆盖目标满足的方法和过程,对后续机载软件研制过程中如何开展数据耦合和控制耦合分析具有实际的指导意义。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 杨珂瑶,张小芳,曾雷杰. 基于 DSP 的嵌入式软件测试方法[J]. 计算机与现代化, 2014(10): 61-65.
- [ 2 ] DO-178C. Software considerations in airborne systems and equipment certifications[S]. RTCA December 13, 2011.
- [ 3 ] An analysis tool for coupling-based integration testing[EB/OL]. [2000-9]. <https://cs.gmu.edu/~offutt/rsrch/papers/coucover.pdf>.
- [ 4 ] Meyers S C. Automatic generation of data coupling and control coupling test conditions: US, 15/331259 [P/OL]. 2018-04-26. <http://www.freepatentsonline.com/y2018/0113796.html>.
- [ 5 ] <https://www.rockwellcollins.com>.
- [ 6 ] 林枫. 简图页软件验证中的数据耦合与控制耦合分析[J]. 工业控制计算机, 2014, 27(7): 107-112.
- [ 7 ] 张军才,王娟,潘卫. 基于 DO-178B 的结构覆盖分析研究[J]. 航空计算技术, 2011, 41(4): 67-69.
- [ 8 ] Verification tools assessment study[EB/OL]. [2007-6]. <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ar0654.pdf>.
- [ 9 ] Clarification of structural coverage analyses of data coupling and control coupling[EB/OL]. [2004-2-28]. [https://www.faa.gov/aircraft/air\\_cert/design\\_approvals/air\\_software/cast/cast\\_papers/media/cast-19.pdf](https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/air_software/cast/cast_papers/media/cast-19.pdf).
- [ 10 ] 倪红英. 民用飞机软件验证要求研究与实践[J]. 航空电子技术, 2017, 48(1): 43-47.