

面向机载设备自动化测试的信号模型研究

胡京徽¹ 吴际¹⁺ 孟翰¹ 刘超¹ 杨海燕¹ 孙新颖²
(北京航空航天大学计算机学院 北京市 100191)¹
(北京天创凯睿科技有限公司 北京市 100123)²

摘要 在机载设备测试中, 各种测试信号的准确定义和检测是保证飞行安全的关键因素。本文提出一种面向自动测试机载设备测试需求描述的信号模型, 通过将机载设备测试需求中所涉及到的信号进行分类, 以及将测试设备和被测设备之间传送的信号视作带有一组参数的动作, 建立适用于自动测试机载设备需求描述的信号模型, 旨在解决目前工业界中机载设备自动化测试需求中的信号规范描述问题。本文通过典型案例说明该信号模型的特点和实用性。

关键词 自动测试设备, 机载设备测试, 信号模型

中图法分类号 TP311.5 文献标识码 A DOI (投稿时不提供 DOI 号)

Research on Signal Model for Automatic Test Airborne Equipment

HU Jing-hui¹ WU Ji¹⁺ MENG Han¹ LIU Chao¹ YANG Hai-yan¹ SUN Xin-yin²
(School of Computer Science and Engineering, Beihang University, 100191, China)¹
(Beijing TianChuangKaiRui Innovation Technology CO., LTD., 100123, China)²

Abstract In the airborne equipment testing, the exact definition and detection of various test signals is a key factor to ensure flight safety. This paper presents a signal model for the test requirements description of automatic test airborne equipment. In the research, the signals involved in the test requirements of the airborne equipment is categorized, the signals transmitted between the test equipment and the equipment under test is regarded as a set of action including parameters and a signal model for automatic test airborne equipment requirements is established. The model aims to address the problem of the signal specification description in the airborne equipment automatic test equipment area of current industry. This paper illustrates the characteristics and practicability of the signal model through a typical case study.

Keywords Automatic test equipment, Airborne equipment test, Signal model

1 前言

随着航空制造业的高速发展, 各种机电一体化设备被广泛采用, 自动化程度和集成度也越来越高。这些机载设备大多都是安全关键系统, 任何缺陷都可能会导致财产损失甚至机毁人亡的悲剧^[1]。因此, 在机载设备的生产、使用和维修等生命周期中, 都需要对机载设备进行严格测试,

确保机载设备功能正常, 以避免飞行事故^[2]。

一般而言, 机载设备测试的目的是检查被测设备对测试设备发出的信号是否做出了预期的回应。航空工业部门对机载硬件设备的测试要求十分严格, 要求覆盖其所有功能测试点。根据对典型工业案例的分析, 在机载设备测试中对硬件信号的测试步骤占全部测试步骤的数量高达 80%以

到稿日期: 2017-08-05 返修日期: 2017-10-10

本文受科工局技术基础项目(项目编号: JSZL2014601B008)基金资助。

胡京徽(1992—), 男, 硕士, 主要研究领域为软件需求, 模型驱动软件工程; 吴际(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要研究领域为软件安全性与可靠性等; 孟翰(1993—), 男, 硕士, 主要研究领域为软件需求建模等; 刘超(1958—), 男, 博士, 教授, 主要研究领域为软件测试等; 杨海燕(1974—), 女, 讲师, 主要研究领域为软件工程; 孙新颖(1981—), 男, 硕士, 主要研究领域为机载设备测试。

上。例如,对于机载驾驶仪功能测试中,接近90%的测试步骤是对驾驶仪的电流、电压等电气信号和飞机俯仰和同步功能等多种信号的测试。此外,机电一体化设备中的RS422^[3]、ARINC429^[4]、1553B^[5]等机载数据总线的信号交互功能测试也是机载设备测试的重要组成部分。因此,自动测试机载设备的大部分工作是对设备中的信号进行测试。

Ross^[6]指出,机载设备维护的一种重要手段就是对设备进行测试。机载设备在出厂时以及在使用过程中都需要进行定期检查和测试,以确保设备的正常工作。为了提高测试效率,降低测试的复杂度,有必要对占比较高的信号测试流程进行规范化定义。机载设备测试必需遵循DO-160标准中规定的机载设备测试环境和测试流程标准^[7]。在DO-160标准中所描述的温度、高度和频率等测试环境因素影响下所涉及到的测试信号通常不能通过软件模拟,而需要使用专用测试设备产生和发送这些信号来测试被测设备。然而,来自不同厂家的各种不同被测设备中的信号往往采取不同的命名规范,缺少统一的术语和测试动作语义的定义,容易导致在不同厂家项目合作中产生误解。因此要想准确规范地描述设备测试需求,有必要建立规范的信号模型。

本研究的目标是,针对航空工业界所面临的自动测试机载设备测试需求中信号描述不规范的问题,归纳总结机载设备测试所必要的信号的要素,针对机载设备测试信号建模,形成面向自动测试设备领域需求分析的信号模型。

本文的组织结构为:第二部分介绍研究背景和领域中相关研究工作,第三部分说明本研究针对的实际问题,介绍机载设备测试需求描述和信号种类;第四部介绍设备信号的建模要素,构建信号模型,并在第五部分介绍工业界实际应用案例的信号模型。论文最后,对本文研究内容及未来研究方向进行总结。

2 研究背景和相关研究工作

2.1 研究背景

自动测试(Automatic Test)指的是将以人为主的软件测试行为转化成为机器自动执行测试的一种技术^[8]。自动测试设备(Automatic Test Equipment)指的是将自动测试技术运用到测试计算机控制元件,电路板和硬件子系统等领域,实现硬件设备测试的自动化^[9]。如图1所示,根据对航空航天相关部门的调研,自动测试机载设备的工作过程可以分成以下六类活动:(1)说明测试需求;(2)编写测试用例;(3)交付测试集;(4)安排测试任务;(5)执行测试工作;(6)总结评估测试。测试机载设备的工作过程需要由产品工程师、软件工程师和产品测试员三方共同参与并相互合作完成。其中,产品工程师是精通电子元器件的硬件工程师,他们有着多年机载设备测试的经验,可以根据不同被测设备的待测功能点设计测试流程。但是,绝大多数产品工程师不会从事测试用例编程实现的工作,因此需要软件工程师承担编程工作。他们需要熟悉测试厂商提供的测试设备,可以基于机载被测设备底层的驱动进行编程,完成产品工程师描述的设备测试流程的程序实现。产品测试员是进行设备测试的现场操作人员,他们通过操作测试设备来执行产品工程师规定的测试流程。测试设备则执行软件工程师编写的测试程序,并同时记录测试设备的输出结果的数据。

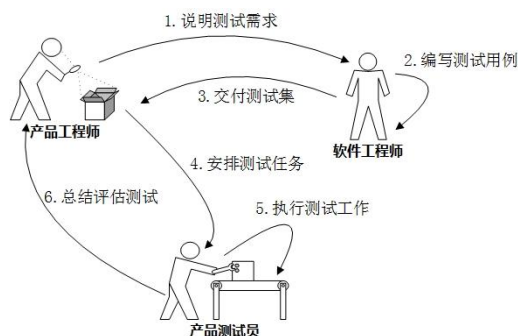


图1 典型机载设备测试的工作过程

在上述测试工作过程中,说明测试需求是实施测试的基础性工作。产品工程师如果在测试过程中没有准确规范地表达测试需求,将会导致后续的工作过程出现工期延误,甚至会因为测试不

充分而无法发现设备故障，进而导致飞行事故。一般而言，机载设备的自动测试需求描述的主体是针对机载设备信号的测试语句。例如，在某飞机驾驶仪的测试中，90%的测试语句是描述对驾驶仪信号的测试，在某飞机中增稳计算机测试中有85%的测试语句是描述对增稳计算机的信号测试，在机载设备1553B总线信号交互测试中，几乎全部都是针对总线信号。此外，测试中测设备的功能和硬件实现机制和自动化测试实现技术手段。

Sugden^[10]指出，一致规范的需求可以提高测试效率和避免因工程师个人理解偏差而引入的测试代码缺陷。然而，目前工业界对机载设备信号的测试需求描述并没有形成统一的标准规范，缺少对信号的测试需求描述的规范定义。这不仅使得自动测试设备中的测试需求说明容易引起工程师之间的误解，也极大地加重了人工反复编写和修改大量测试代码的工作量。建立统一的信号模型将简化和规范化测试需求的描述方法，使其易于理解和检查，并有助于测试脚本的自动生成。因此，对于自动测试机载设备的研制开发，如何建立面向测试需求描述的信号模型是亟待解决的问题。

2.2 相关研究工作

软件需求描述方法的研究在学术界中由来已久。Haubeck 和 Lamersdorf 等人^[11]提出了基于信号在线监控和模型驱动工程的交互方式来感知需求演化的需求描述方法。他们基于模型驱动软件工程的方法建立了需求描述的元模型，实现了半自动化地完成需求确认和需求演化，但该元模型并不适用于航空航天设备测试需求的描述。Gao 和 Ma 等人^[12]提出了航天器测试需求描述方式及其测试代码自动生成方法。他们的研究目标是设计航天器的静态测试需求的形式化描述方法并且通过测试需求自动生成测试代码，增加航天器测试设备的测试效率。他们在论文中提出的形式化测试需求描述方法可以很好地支持自动转化代码，但这种形式化方法却不支持机载设备中的硬

件信号的测试描述。另外，Cho 和 Kim^[13]等人提出了基于故障位图的低成本自动测试设备的解决方案。Radu^[14]提出了使用混合信号自动测试数字电路设备。Sun^[15]通过模型仿真和实时性分析的方法对机载设备进行实时性测试。这些研究中提出的自动测试机载设备方案往往仅能运用于特定机载设备的测试，缺少对机载设备中的信号进行统一规范化地建模，更加缺少对测试需求描述的统一处理。因此，这些方法不能支持通用化的机载设备信号的测试需求描述。

此外，Yue^[16]提出了 RUCM (Restricted Use Case Modeling) 需求建模方法，并且 Zhang^[17]开发了支持 RUCM 建模方法的工具。RUCM 描述方法由结构化用例规约模板和限制规则构成。实验证明，RUCM 及其扩展方法可以很好地适用航空航天、嵌入式和实时操作系统等领域需求描述。但由于自动测试设备领域的信号属于专有领域，RUCM 描述方法并不能对自动测试设备领域中的信号提供规范的和具体详实的测试需求描述。

综上所述，目前自动测试机载设备领域缺少对测试信号需求描述方法。本研究基于模型驱动的软件工程思想，提出一种面向机载设备中测试需求描述的信号模型。该方法借鉴 RUCM 建模思想，建立机载设备测试信号的元模型，采用句式模板的方式定义硬件信号测试设备中所涵盖的需求描述要素，规范化硬件测试需求描述方式，既能准确清晰地描述硬件设备测试需求，使开发者很好地理解测试系统，避免测试需求表述的二义性，又能加快硬件信号测试迭代周期，有序高效地自动化测试机载设备。

3 机载设备的测试需求描述

3.1 机载设备测试需求

为了保证飞机的飞行安全，机载设备在出厂和使用过程中都需要定期进行测试。在相关企业中，机载测试有着严格的工作流程。图2是机载设备测试需求描述到测试用例编写过程的示例。在航空工业部门中，所有机载设备在出厂时都会

提供关于设备的出厂测试规范；产品工程师根据出厂测试规范中对机载设备测试要点的描述设计针对机载设备的测试流程，同时编写用于记录测试过程数据的测试记录单，测试记录单说明了对机载设备测试的测试步骤和所需要记录的参数；软件工程师根据测试记录单编写测试需求说明；测试需求说明编写完成后，需要产品工程师和软件工程师对测试需求说明反复协商和确认，达成一致的意见后，软件工程师就根据测试需求说明编写测试代码。

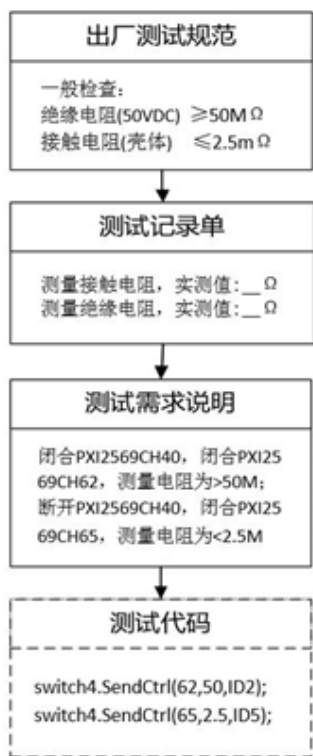


图2 机载设备测试需求开发过程

在测试记录单中，产品工程师使用自然语言来描述设备测试需求。由于软件工程师和产品工程师专业知识的不同，对于测试记录单的理解往往存在差异，这就导致软件工程师在编写测试需求说明时需要频繁地和产品工程师进行讨论，导致测试需求分析过程的效率非常低。根据对工业项目的调研，测试记录单中大部分是对机载设备中信号的测试需求，因此，可以建立面向机载设备测试需求的信号模型，以规范化设备测试流程。

3.2 机载设备测试信号

机载设备需要配合飞行器完成飞行过程中的各种复杂的飞行任务，所以机载设备之间存在许多的信号。本研究所涉及的信号的功能是用于机载设备的交互或者控制。根据对工业界案例的调研，信号分类如图3所示。其中，电气类型信号是在工业领域中最常见的一类信号，包括电流信号、电压信号和电阻信号这些测试信号；控制类型信号是用于控制电器信号的频率等特性的信号；飞控类型信号是飞机中专有的设备信号，大多数是控制和检测飞机飞行时的各类参数；数据总线信号涉及到飞机中不同协议总线数据发送和接收等作用。各类测试信号协同工作，共同完成复杂的飞行任务。

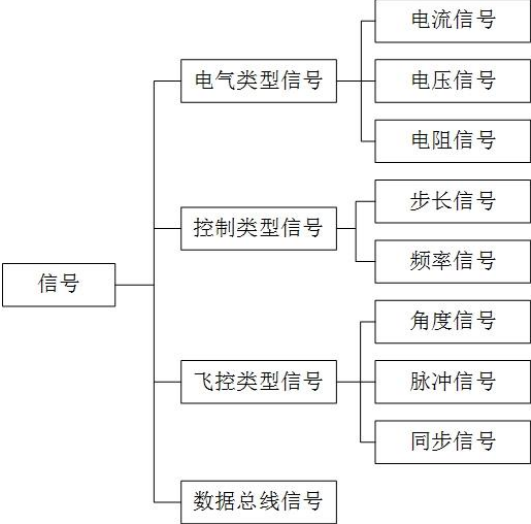


图3 信号分类图

根据机载测试信号的不同，每种类型信号需要与之对应的设备参数来描述。例如：电流信号常用的物理单位是安培（A），而电压信号的物理单位是伏特（V）；电压信号是矢量，而电阻信号是标量；所有信号都需要有信号的值。

4 信号模型

4.1 信号模型的设备测试平台

机载设备的测试平台是由测试设备和被测设备组成。测试设备（Test Equipment）提供自动测试设备的所需的测试能力。被测设备（Equipment Under Test）是需要测试的对象，即机载设备，如机载雷达、控制增稳计算机、飞机

驾驶仪、机载电源等机载硬件模块。如图 4 所示，测试平台包含的测试设备传输信号的 A 类端口，被测设备具有可以接收测试信号的 B 类端口。测试设备通过 A 类端口向被测设备的 B 类端口发送测试信号，被测设备将根据接收的测试信号执行相应的测试动作，执行结束后反馈测试结果。

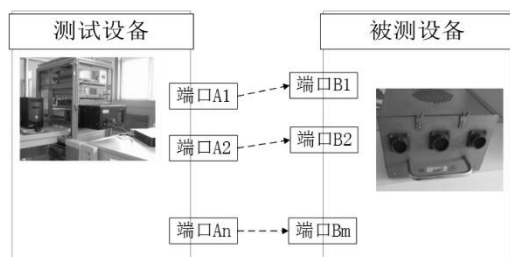


图 4 设备测试平台示意图

4.2 测试需求元模型

在 RUCM 建模方法的基础上，经过适当扩展，可以得到描述机载设备测试需求的元模型，如图 5 所示。对于各种机载设备，其测试需求都可以用测试流（TestFlow）来描述，测试流继承自测试事件流（FlowOfEvents）。在测试用例元模型定义下的用例模板可以通过一系列测试的语句（Sentence）来描述测试需求功能。

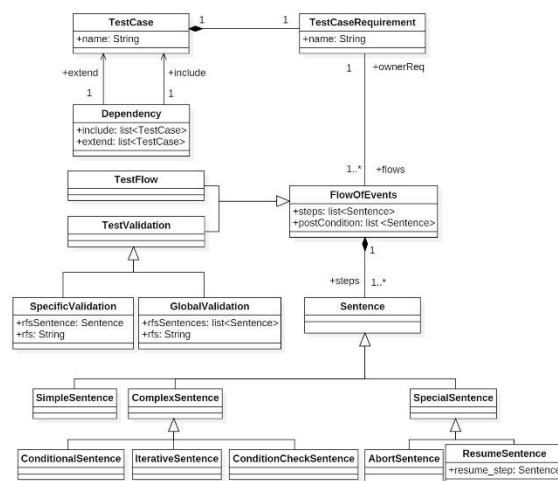


图 5 测试需求元模型

4.3 信号元模型

本节定义的信号元模型如图 6 所示。信号元模型的主要元类是信号（Signal）类。对于机载设备的自动测试设备，其需求用例的测试流（TestFlow）可以通过信号类来表示。信号类由其参数（Parameter）类和动作（Action）类这两个元类组成。例如，“在 B3 和 B4 之间发送 28A 的电流”这样的信号包括参数和对应测试动作。这些测试信号包含多种要素，例如上述测试信号中，“B3”和“B4”是两个信号测试相关联的端口、“28A”是电流大小的参数，“发送”是测试动作。

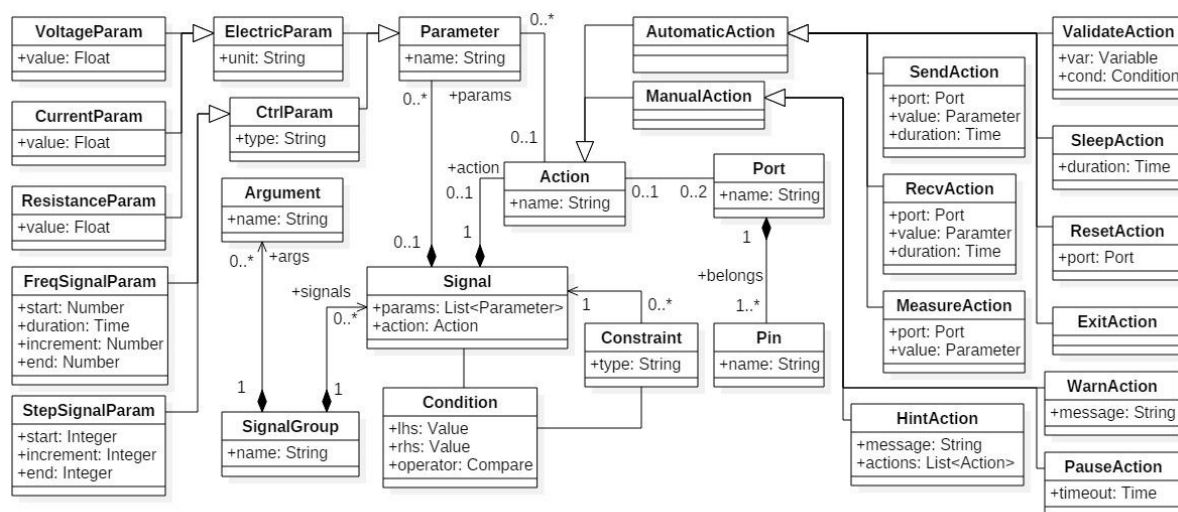


图 6 信号元模型

4.3.1 参数元类

参数类根据具体运用中的功能在元模型中分为电气参数 (ElectricParam) 类和控制参数 (CtrlParam) 类。不同的参数子类描述不同类型的信号参数。例如, 电气参数类中包含每种电气信号的单位 (unit), 控制参数类中有频率和步长控制的数值。表 1 中列出了参数类的子类。

表 1 参数元类的子类

类名	名称	属性
VoltageParam	电压参数	value: 电压值
CurrentParam	电流参数	value: 电流值
ResistanceParam	电阻参数	value: 电阻值
FreqSignalParam	频率参数	start: 起始时间 duration: 时间间隔 increase: 单位间隔增量 end: 结束时间
StepSignalParam	步长参数	start: 起始计数 increase: 计数增量 end: 结束计数

4.3.2 动作元类

动作类分为自动动作 (AutomaticAction) 类和手动动作 (ManualAction) 类。自动动作是在测试中自动执行并且记录测试结果的动作, 手动动作是测试中需要人为干预的动作。表 2 列出了动作类的子类。Action 类关联的类有端口 Port 类和参数类。Port 类描述了被测设备的 B 类端口。Port 类可能包含一个或者多个引脚 (Pin) 类。

表 2 动作元类的子类

类名	名称	属性
SendAction	发送动作	port: 发送端口 value: 发送的信号值 duration: 持续时间
RecvAction	接收动作	port: 接收端口 value: 接收的信号值 duration: 持续时间
MeasureAction	测量动作	port: 测量端口 value: 测量的信号值
ValidateAction	确认动作	var: 确认的变量 cond: 确认的条件
SleepAction	睡眠动作	duration: 睡眠的时间
ResetAction	重置动作	port: 重置的端口

ExitAction	退出动作	
HintAction	提示动作	message: 提示的消息 actions: 要执行动作列表
WarnAction	警告动作	message: 警告信息
PauseAction	暂停动作	timeout: 暂停超时

4.3.3 其它元类

元模型中包含信号描述中需要判定的条件 (Condition) 类、在特定信号中添加限制的 (Constraint) 类和信号组 (SignalGroup) 类。值得注意的是信号组类是多个信号类的组合, 并且信号组类接收实参 (Argument) 类传入的实际参数值。引入信号组类, 有利于将具有相似测试任务的信号序列归类, 减少编写测试用例的工作量。

5 应用案例

本文以某航空通用测试平台的开发为实例。在目前测试设备更加通用化、标准化和小型化的“三化”趋势下, 该项目旨在解决飞机通信系统、飞机自动控制系统、导航定位系统、飞机发动机自动控制系统和飞机空调控制系统等机载设备的自动测试问题。该测试平台包含的硬件测试功能模块有: 功率/频率测试功能、三用表测试功能、示波器功能、AD/DA 测试功能、矩阵切换功能、角度测试功能、同步器功能、信号源功能。此外, 该项目除了要求丰富的基础功能以外, 还要求有很强大的扩展能力。

在该测试平台的诸多应用中, 本文选取三种被测设备作为示例: (1) JSY (某飞机驾驶仪计算机测试), (2) ZWJ (某机载控制增稳计算机测试), (3) 1553B (某机载 1553B 总线部分功能测试)。项目的信号统计数量见表 3。

表 3 项目中信号数量统计

被测设备	电气信号数	其他信号数	总测试信号数
JSY	548	448	996
ZWJ	582	135	717
1553B	0	1348	1348

本文基于信号模型设计了机载设备测试中与信号相关的需求描述的句式模板, 其中针对信号的句式包含以下电流类型句式、电压类型句式、电阻类型句式、频率类型句式、总线类型句式和

测试分组句式等。每种句式模板都分别定义了信号的参数类型和测试中需执行的动作。针对上述 3 种被测设备，这些句式能够完全支持测试需求中各种信号的描述。例如，表 4 列举了驾驶仪项目的三种句式模板和示例。在模板 1 中，PIN_HIGH 表示高电位端口，PIN_LOW 表示低电位端口，CURRENT_PARAM 表是需要发送的电流的参数。“在 B3 和 B4 之间发送 28ADC 的电流”是模板 1 的一个示例，描述了向被测设备相应引脚发送电流的信号。在句式中的信号表达方式是根据不同的信号定义类型定义相应的句式，句式中包含测试动作，表达测试的语义。

表 4 电流类型句式举例

名称	内容
模板 1	在 PIN_HIGH 和 PIN_LOW 之间发送 CURRENT_PARAM 的电流。
示例	在 B3 和 B4 之间发送 28A 的电流。
模板 2	在 PIN_HIGH 和 PIN_LOW 之间发送 CURRENT_PARAM 且满足 CONSTRAINT 的电流。
示例	在 B5 和 B4 之间发送 115V/400Hz 且满足功率 <3VA 的电流。
模板 3	测量 PIN_HIGH 和 PIN_LOW 通路上的电流得到测量值为 OUT。
示例	测量 B11 和 B2 通路上的电流得到测量值为 x A。

结束语 机载设备中的信号在自动测试设备领域中扮演着重要的角色。本文针对机载设备测试过程中缺少对测试需求中信号进行规范化描述的问题，提出面向机载设备的测试需求的信号模型，并且将该信号模型运用于实际工业案例中。本文定义的信号模型支持简明和规范地描述测试需求，并且可以进一步支持基于模型得测试代码自动生成。并且在文章后续的工作中将信号模型进行扩充尽量支持嵌入式系统等其他领域。

参考文献

[1]A. Boglietti, A. Cavagnino, A. Tenconi, S. Vaschetto, Politecnico di Torino. The Safety Critical Electric Machines and Drives in the more Electric Aircraft: A Survey [C]. IEEE Industrial Electronics 2009, Italy, 2009: 2587-2594.

[2]Xin Du, Daquan Tang, Yingcheng Yang. Development of the Automatic Testing and Fault Diagnosis Technology for Airborne Equipment [J]. Computer Measurement and Control, 2003, (01): 5-8.

[3]Dabo Xin, Bo Ai. Research on Airborne RS422 Bus Acquisition Technology [J]. China Science and Technology Information, 2016, (21): 73-74.

[4]Rong Li, Weiguo Liu, Xiaojian Liu. Design and Implementation of a ARINC429 Bus Transmit-receive System [J]. Computer Measurement and Control, 2005, (09): 970-972.

[5]Yue Zhao, Yiqian Tang, Peng Chen, Lihua Kou. Application of 1553B Bus to the Aircraft Equipment Testing Systems [J]. Journal of Liaoning Institute of Technology, 2002, (04): 19-20.

[6]William A. Ross. The Impact of Next Generation Test Technology on Aviation Maintenance [C]. IEEE Systems Readiness Technology Conference, AUTOTESTCON 2003, USA, Sep 2003: 2-9.

[7]DO 160: Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment [S]. 2010.

[8]C. Nebut, F. Fleurey, Y. Le Traon, J. M. Jezequel. Automatic Test Generation: A Use Case Driven Approach [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2006, 32(3): 140-155.

[9]Brindley, Keith. Automatic Test Equipment [M]. Elsevier, 2013: 1-2.

[10]R. Sugden. Why be Consistent? A Critical Analysis of Consistency Requirements in Choice Theory [J]. Economica, 1985, 52(206): 167-183.

[11]C. Haubeck, W. Lamersdorf, J. Ladiges. Interaction of Model-driven Engineering and Signal-based Online Monitoring of Production System: Towards Requirement-aware Evolution [C]. Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE, Nov 2014: 2571-2577.

[12]Shiwei Gao, Jianghua Lv, Shilong Ma, et al. Spacecraft Test Requirement Description and Automatic Generation Method [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(7): 1275-1286(in Chinese).

[13]Keewon Cho, Woosung Lee, Jooyoung Kim. Reducing the Failure Bitmap Size with a Partial Solution Search Tree for the Low Cost Automatic Test Equipment [C]. SoC Design Conference, Nov 2014, 128-129.

[14]Mihaela Radu. Testing Digital Circuits Using a Mixed-Signal Automatic Test Equipment [C]. IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, July 2014.

[15]Lei Sun, Haiyan Yang, Ji Wu. Simulation and Real-time Analysis for Embedded Software Design Model with Consideration of Integrated Modular Avionics Platform [C]. Computer Science, 2015, (12):95-97.

[16]Tao Yue, L. C. Briand, Y. Labiche. Automatically Deriving a UML Analysis Model from a Use Case Model [M]. Carleton University, 2010.

[17]Gong Zhang, Tao Yue, Ji Wu, and Shaukat Ali. Zen-RUCM: A Tool for Supporting a Comprehensive and Extensible Use Case Modeling Framework [C]. ACM/IEEE 16th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems, Tools Demonstration, 2013.

作者联系方式:

胡京徽 hujinghui@buaa.edu.cn 18211184579

通讯作者联系方式:

吴际 wuji@buaa.edu.cn 13521128276

北京航空航天大学 学院路 37 号 100191