



文章编号:1001-9081(2017)07-2034-05

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2017.07.2034

基于多 Agent 的实时自适应数据判读方法

王 静^{1,2*}, 王春梅¹, 智 佳¹, 杨甲森¹, 陈 托¹

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 计算机与控制学院, 北京 100049)

(*通信作者电子邮箱 wang711@yeah.net)

摘要:针对目前已有数据判读方法在有效载荷地面集成测试中不适应测试环境变化、实时判读不连续、错误率高的问题,提出一种基于多 Agent 框架的实时自适应判读(MARAD)方法。首先,依据“感知-决策-执行”的设计理念,构建四个具有独立任务又互相协同工作的智能 Agent,以适应测试环境的改变;其次,采用面向活动建模的方式,以 C 语言集成产生式系统(CLIPS)作为推理机,取消判读规则对测试序列的依赖,保证判读过程的连续性;最后,在判读规则中引入容错机制,在不改变正确性的前提下减少误判和漏判。测试验证结果表明,在判读数据相同的条件下,MARAD 方法的实时判读结果与已有的状态模型方法的三次事后判读的均值结果相比,参数漏判率均为 0%,但活动误判率降低 10.54 个百分点;与人工判读相比,参数漏判率降低 5.97 个百分点,活动误判率降低 3.02 个百分点,且无需人员参与判读。所提方法能够有效提高判读系统的自适应测试环境能力、实时判读的持续性和正确性。

关键词:有效载荷;自适应判读;多 Agent 框架;面向活动建模

中图分类号: TP311.1 **文献标志码:**A

Multi-Agent-based real-time self-adaptive discrimination method

WANG Jing^{1,2*}, WANG Chunmei¹, ZHI Jia¹, YANG Jiasen¹, CHEN Tuo¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Computer and Control Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Concerning the problem that existing data discrimination methods can not adapt to changeable test environment and realize continuous real-time discriminating process with low error rate when applied in ground integrated test of payload, a Multi-Agent-based Real-time self-Adaptive Discrimination (MARAD) method was proposed. Firstly, based on the design principle of "sensing-decision-execution", four Agents which had own tasks but also interact and cooperate with each other were adopted in order to adapt the changeable test situation. Secondly, an activity-oriented model was constructed, and the C Language Integrated Production System (CLIPS) was used as an inference engine to make the discrimination rules independent of test sequences and assure the continuity of discrimination. Finally, fault-tolerant mechanism was introduced to the discrimination rules to decrease fault positive rate without changing the correctness. With the same test data, compared with the state modeling method with the average result of three times after discriminating, MARAD method has the same parameter missing rate 0% but decreases the activity false-positive rate by 10.54 percentage points; compared with the manual method, MARAD method decreases the parameter missing rate by 5.97 percentage points and activity false-positive rate by 3.02 percentage points, and no person is needed to participate in the discrimination. The proposed method can effectively improve the environment self-adaptability, real-time discriminating continuity and correctness of the system.

Key words: effective payload; self-adaptive discrimination; multi-Agent framework; activity-oriented modeling

0 引言

在有效载荷地面集成测试实验中, 测试数据和遥测参数是反映操作指令及设备状态正确性的重要依据, 对数据的有效判读是测试实验中的关键环节。

目前专家学者们提出一系列实现自动判读的方法^[1-3], 均是通过采用某种建模形式如基于有限状态机(Finite State Machine, FSM)、Petri 网或函数模型等对有效载荷设备的状态迁移过程建模, 再依据建立的模型或领域专家知识获得模型中各状态对应的参数的连续变化规律, 构建自动判读知识库和判读规则以实现自动判读。

收稿日期:2016-12-20;修回日期:2017-02-16。

作者简介:王静(1990—),女,山东威海人,博士研究生,主要研究方向:自动测试; 王春梅(1965—),女,北京人,研究员,博士生导师,主要研究方向:自动测试; 智佳(1984—),男,山西太原人,工程师,硕士,主要研究方向:空间数据处理; 杨甲森(1979—),男,山东聊城人,副研究员,博士研究生,主要研究方向:智能测量与控制; 陈托(1986—),男,湖北天门人,工程师,硕士,主要研究方向:计算机软件、数据库处理。

上述基于状态迁移建模的各类自动判读方法均具有明显的优势,但将其应用到实际有效载荷地面集成测试中,需要实测环境满足十分苛刻的要求,如:

- 1) 测试序列必须使载荷设备的状态变化与模型中的状态变化规律一致;
- 2) 测试过程中出现的故障在参数表现上不具有传播性;
- 3) 每一状态下的参数预估值都必须正确。

上述要求往往难以达到,因为实际测试中,往往会出现非预期的测试情况,如:

- 1) 测试序列临时更改(增加、删除、替换或某一指令未正确执行等),引起设备的状态迁移顺序发生变化;



- 2) 载荷方提供的先验知识与实际工作值不符;
- 3) 判读过程先于设备状态更改进行;
- 4) 设备满足迁移规则,但相关数据并未直接达到预期值,即渐变型,且无统一规律。

当上述任一状况出现时,采用目前的方法,一方面会误判当前的参数(或指令),另一方面,由于误判导致状态迁移失败,从而影响后续参数的判读,以致判读系统失去作用,只能终止此次测试序列的执行,或后续测试过程通过人工判读实现。在有效载荷集成测试中,1)~4)的情况会多次出现,提高判读方法对测试环境的适应能力,可以减少不必要的测试中断,降低人工判读成本。

多 Agent 技术作为软件自适应研究的重要分支之一,以其多个具有自治性、主动性和反应性的智能 Agent 的协作在众多领域被广泛引用^[4~7],其思想为解决有效载荷地面集成测试中的数据判读问题提供了良好的方案。鉴于此,本文基于多 Agent 技术对现有数据判读方法进行改进,提出一种基于多 Agent 框架的实时自适应判读(Multi-Agent-based Real-time self-Adaptive Discrimination, MARAD)方法,以满足有效载荷集成测试中对数据判读的需求。

1 自适应判读系统框架设计

MARAD 方法从两大方面提高判读系统的自适应性:

一是系统结构上,根据一般自适应系统“感知-决策-执行”的设计理念,构建判读 Agent 实现实时判读,感知环境变化,决策 Agent 应对测试环境变化作出决策,知识库 Agent 根据决策作相应执行,此外,还设计日志 Agent 记录判读结果和决策结果,便于查看。

二是实现技术上,主要基于 4 种关键技术:1)采用面向活动建模来构建知识库 Agent,摒弃现有面向状态建模的方式,取消判读规则对测试序列的依赖;2)在判读规则中引入容错机制,适应测试延迟变化,降低误判;3)应用 CLIPS 工具作为推理机,编写规则,实现自动推理;4)添加决策算法,应对测试环境的变化。

MARAD 方法的系统结构如图 1 所示,包含 4 个 Agent:

- 1) 判读 Agent(Discrimination Agent, DA)。

作为感知器,实现实时判读。数据接收与处理模块接收卫星仿真平台实时发送的参数和活动数据,处理后加入推理机,根据判读规则判断参数及活动执行的正确性,其判读结果发送给日志 Agent(Log Agent, LA)和决策 Agent(Decision Making Agent, DMA)。

判读规则包含实时参数判读规则和活动判读规则,前者用于判断实时参数数据是否在预期范围内,后者用于判断载荷设备的活动是否执行正确。判读规则中所需的知识从知识库 Agent(Knowledge Base Agent, KBA)中获取。

- 2) 知识库 Agent(KBA)。

存储判读相关的知识,并执行决策。其中知识库主要包括两部分:

a) 实时判据。指导判读 Agent(DA)对当前参数数据进行正确性判断的依据。

b) 活动信息。有效载荷系统的活动模型数据,用于指导判读 Agent(DA)判断活动执行的正确性与否。活动信息与活动模型一致,只有当更改活动模型时,活动信息才会发生更改。

决策接收与执行模块接收决策 Agent(DMA)发送的决策信息,并予以执行。

- 3) 日志 Agent(LA)。

存储判读系统的工作日志,包含两部分:

a) 判读日志。记录判读 Agent(DA)发送的参数和活动的判读结果,并将活动信息及执行结果单独保存,用于当测试系统重启或其他情况时,快速恢复实时判据。

b) 决策日志。记录决策 Agent(DMA)的策略内容,便于事后查看及对知识库中活动模型作出调整。

- 4) 决策 Agent(DMA)。

感知测试环境并作出决策。数据接收与处理模块接收判读 Agent 发送的活动信息,与决策规则一起经推理得出相应的策略,发送给知识库 Agent 执行,同时发送给日志 Agent 备份。决策规则可根据需求自定义添加。

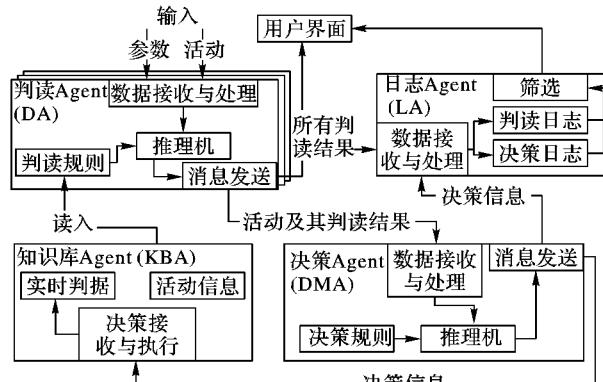


图 1 MARAD 系统结构

Fig. 1 Structure of MARAD system

2 关键技术

2.1 面向活动建模方法

有效载荷数据最重要的特点在于数据的动态变化性,目前的数据判读方法均依赖载荷状态变化得到参数变化规律,然而,测试过程中任何细微的调整都可能破坏数据原有的变化轨迹,导致数据判读系统不能发挥完整的作用。要解决这一问题:一种方法是将参数的所有可能的变化轨迹都添加到规则库中;另外一种是面向活动建模,描述载荷设备的活动对参数值的改变量,不考虑连续变化。前者适用于指令较少的情形,否则就会产生组合爆炸。实际中指令数目至少上百条,采用后者更合适。

面向活动的建模方法中,将有效载荷设备的指令操作用活动模型 A 描述, $A = \{A_1, A_2, \dots, A_p\}$ ($p \in \mathbb{N}$) 为所有活动的集合, $A_i = (V, P)$ ($i = 1, 2, \dots, p$), 其中:

1) V 为活动 A_i 的属性集合, $V = \{T = t_a \mid f: X_a \rightarrow t_a\}$ 。其中: X_a 表示活动的属性变量, t_a 表示对应属性变量 X_a 的取值, f 表示活动 A_i 的属性 X_a 与取值 t_a 之间的一一映射, X_a 的定义域可根据需要自定义, MARAD 系统中定义为: {活动 ID, 活动跟描述, 作用对象}。

2) P 表示活动 A_i 正确执行后对有效载荷下行参数产生的影响,是一组有序对的集合 $P = \{(y_1, y_2, \dots, y_l) \mid g: (AID; X_1, X_2, \dots, X_l) \rightarrow (y_1, y_2, \dots, y_l)\}$ 。其中: AID 表示该活动的唯一标识即活动 ID, X_1, X_2, \dots, X_l 表示该活动影响的参数的属性项序列, (y_1, y_2, \dots, y_l) 为对应属性项的值,由于一个活动可以影响多个参数,故映射 g 表示 $(AID; X_1, X_2, \dots, X_l)$ 到 (y_1, y_2, \dots, y_l) 的一对多映射关系, X_1, X_2, \dots, X_l 的选取依据判读需求自定义, MARAD 系统中定义为: {序号, 帧 ID, 参数 ID, 描述, 类型, 预期值, 变化函数, 波动上限, 波动下限}。

以某卫星的有效载荷系统中的部分活动为例,展示其活动模型如表 1 所示。



表 1 某有效载荷子系统的活动模型

Tab. 1 Activity models of effective payload subsystem

属性 V	影响 P(序号,帧 ID,参数 ID,描述,类型,预期值,变化函数,波动上限,波动下限)		
活动 ID	活动描述	作用对象	
T101	设备 1 加电	设备 1	{(1/2,00,P1,“总电流”,增量型,3.0, NULL,0.5,-0.5), (2/2,01,P1,“设备 1 +5v 电压”,定值型,3.2,NULL,0.2,-0.2)}
T102	设备 1 断电	设备 1	{(1/2,00,P1,“总电流”,增量型,-3.0, NULL,-0.5,+0.5), (2/2,01,P1,“设备 1 +5v 电压”,无值型,-,NULL,-,-)}
T201	设备 2 加电	设备 2	{(1/2,00,P1,“总电流”,增量型,0.6, NULL,0.5,-0.5), (2/2,02,P1,“设备 2 +5v 电压”,定值型,3.2,NULL,0.2,-0.2)}
T202	设备 2 断电	设备 2	{(1/2,00,P1,“总电流”,增量型,-0.6, NULL,-0.5,+0.5), (2/2,02,P1,“设备 2 +5v 电压”,定值型,0,NULL,0,0)}
T203	转角设置 1: 设备 2 俯仰 -7, 方位 86	设备 2	{(1/2,02,P2,“设备 2 俯仰角”,渐变定值型,-7,C=7C,+0.5,-0.5), (2/2,02,P3,“设备 2 方位角”,渐变定值型,86,C=7C,+0.5,-0.5)}
T204	转角设置 2: 设备 2 俯仰 -65, 方位 70	设备 2	{(1/2,02,P2,“设备 2 俯仰角”,渐变定值型,-65,C=7C,+0.5,-0.5), (2/2,02,P3,“设备 2 方位角”,渐变定值型,70,C=7C,+0.5,-0.5)}
T301	设备 3 加电	设备 3	{(1/2,00,P1,“总电流”,增量型,0.36, NULL,0.1,-0.1), (2/2,03,P1,“设备 3 +3.3v 电压”,定值型,3.0,NULL,0.2,-0.2)}
T302	设备 3 断电	设备 3	{(1/2,00,P1,“总电流”,增量型,-0.36, NULL,-0.1,0.1), (2/2,03,P1,“设备 3 +3.3v 电压”,定值型,0,NULL,0,0)}
T303	设备 3 设置自动 曝光模式 1	设备 3	{(1/2,03,P2,“灰度均值”,定值型,550, NULL,0,0), (2/2,03,P3,“暗电流”,定值型,30, NULL,0,0)}
T304	设备 3 拍照 1 次	设备 3	{(1/1,03,P4,“设备 3 接收帧计数”,增量型,+1,NULL,0,0)}

从表 1 可以看出,活动模型将活动与参数数据关联,判读的实时判据只与当前所执行的活动有关,与测试序列执行的顺序无关,测试过程中对测试序列的调整不会影响判读。KBA 中的活动信息部分来源于活动模型。

活动模型中数据的来源方法有两种:1)分析载荷设计方提供的数据而得;2)通过预测试获得,即在集成测试开始之前,先将各个载荷执行一遍所涉及的活动,通过程序自动获得与各活动执行相关的参数及改变量。两种方法各有利弊,方法 1)由人工完成,通常比较节省时间,能应对复杂的活动类型(渐变型、关联型等),但容易有遗漏;方法 2)一般不易遗漏,但比较耗时,难于处理复杂类型,且需要载荷设计人员确认每一活动执行后设备状态的正确性,正确的状态才能得到正确的数据。

2.2 容错机制

一方面,由于判读过程中会存在不同步的情况,例如,模拟发送计算机发送指令并通知到判读系统,若数据解析稍有延迟,则判读系统就会因接收到未执行指令时的参数而判定

指令执行错误,从而出现误判;另一方面,由于有些特殊参数的变化是渐变类型,其稳定值的出现比普通参数耗时久,容易出现误判。

为适应此类情况,降低误判率,在 DA 的判读规则中添加容错机制,即设定一个容错变量 C,用于指导判读次数。C 值的选定与数据采集频率有关,频率越高,值越大。目前一般的数据采集频率为 0.5 s/次,可设置 C = 10。而针对渐变型变量,为保证判读的正确性,可根据其值变化速率,赋予特有的值,添加到活动模型中 P 成分的“变化函数”一项,如 C' = 2C,其中 C' 表示新的容错变量。当参数实际数据与预期数据不同的次数超过 C 或其倍数时,才判定指令“执行出错”,中间判读过程展示“执行中”。以渐变型参数的判读为例,说明容错机制的有效性。

设备 2 初始俯仰方位角均为 0°,转动范围为 [-90°, 90°],转速为 6°/s,设置 C = 10,参数 O2P2(帧 ID + 参数 ID)的变化函数 C' = 7C 得 C_{O2P2} = 70。表 2 中列出在发送 T203 指令后,MARAD 方法与状态建模方法(即目前已有的面向状态迁移建模的方法)对 O2P2 参数依次判读的结果。从表 2 可以看出,由于数据的渐变性,当指令发送后,参数值并非一次性达到预期值 -7,此时,没有容错机制的常规方法就会判定指令执行错误,并且不更改 O2P2 参数的当前判据,以至于当第 4 次接收到的参数 O2P2 达到预期值 -7 时,依旧判错。

表 2 容错机制对判读过程影响对比

Tab. 2 Comparison for effect of fault-tolerance mechanism on discrimination process

参数	参数 O2P2					
	接收序号	实际值	MARAD 方法预期值	判读状态	状态建模方法预期值	
1	0	-7	错误计数 $1 < C$	-7	错误,知识库中设备保持原有状态(即 0°)	× 提示指令执行
2	-3	-7	错误计数 $2 < C$	-7		×
3	-6	-7	错误计数 $3 < C$	-7		×
4	-7	-7	√	-7		×
结果	指令执行正确	指令正确	指令错误			

注:符号“×”表示判读错误,“√”表示判读正确。

2.3 判读规则与推理

MARAD 中的推理机采用“C 语言集成产生式系统”(C Language Integrated Production System, CLIPS) 内核实现,CLIPS 是美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于 1985 年开发的一种用于编写基于规则的通用专家系统的开发工具^[8-10],最初用于美国航天控制领域,具有很高的可靠性。CLIPS 的推理算法采用先进的 Rete 算法^[11-12],推理效率高。CLIPS 具有其特定的语言格式,为提高判读的效率,设计判读规则时考虑以下 3 点。

1) 事实(fact)自定义格式简洁统一。

输入数据包括参数和活动,其判读过程需要以 fact 的形式加入 CLIPS 中,为提高判读效率,对接收的所有参数和活动采用统一的处理,设计如下。

a) 参数 fact 自定义模板。

(deftemplate raw-data

(slot userfrm (type SYMBOL NUMBER))

(slot parameter (type SYMBOL NUMBER))

(slot value (type NUMBER)))

b) 活动 fact 自定义模板。



```
(deftemplate raw-ctrl
  (slot tname (type SYMBOL NUMBER)))
```

2) 规则优先级设置。

判读规则分为两大类:参数判读和活动判读,而活动判读也是基于对参数的判读,因此,当一条参数 fact 输入后,能同时匹配两个规则,为避免判读混乱,对判读规则设置优先级,活动判读的优先级高于参数判读。

3) 活动判读规则分类。

活动判读要依据活动模型中参数的类型设计不同的规则。表 1 中列出的〈活动-参数〉类型有如下几种。

增量型 活动执行后,参数有固定增量(区间),如表 1 中〈T101-00P1〉;

定值型 活动执行后,参数为固定值(区间),如表 1 中〈T102-01P1〉;

无值型 活动执行后,无参数值,无需进行该参数判读,如表 1 中〈T201-02P1〉;

渐变定值型 活动执行后,参数在一段时间后达到固定值,如表 1 中〈T203-02P2〉。

此外还有一些比较特殊的〈活动-参数〉类型,如关联型,主备份切换加电,设 T1 为切主份, T2 为切备份, T3 为加电, T1、T2 执行后对参数无影响,而 T3 执行后,对电流的影响与其之前执行的是 T1 还是 T2 有关。此类型需要设置一个保存区,用于覆盖保存之前执行的 T1 或 T2 的活动信息。

以增量型为例给出规则如下。

```
(defrule DA ::judgeIncreCtrl (declare (salience 400))
  ?t <- (tc-incre (tname ?tname) (userfrm ?frm) (parameter ?
    para) (sum ?sum))
  ?v <- (object (is-a incre-ctrl) (tname ?tname) (userfrm ?
    frm) (parameter ?para)
    (ivalue ?iv) (lrange ?ilr) (ihrange ?ihr) (comprum ?cnum)
    (num ?num))
  ?p <- (object (is-a reserv-data) (userfrm ?frm) (parameter ?
    para) (pvalue ?pv) (lrange ?lr) (hrange ?hr))
  ?x <- (object (is-a predict) (userfrm ?frm) (parameter ?para)
    (isValid ?isv))
  ?r <- (raw-data (userfrm ?frm) (parameter ?para) (value ?val))
  =>
  (bind ?pval (+ ?pv ?iv)) (bind ?l (+ ?lr ?ilr)) (bind ?h
    (+ ?hr ?ihr))
  (bind ?max (+ ?pval ?h)) (bind ?min (+ ?pval ?l))
  (if (<= ?min ?val ?max)
    then
      (retract ?t ?r)
      (send ?x put-isvalid F)
      (printf LA (str-cat ?tname "&" ?num "/" ?sum "&T&" ?
        frm "&" ?para "&[" ?min "," ?max "]&" ?val
        "&RULEjudgeIncre"))
      (assert-string (str-cat "(" "result" (TorF T) (tname
        ?tname)) (userfrm ?frm) (parameter ?para)
        (value ?pval) (lrange ?l) (hrange ?h)))
    else (if (> ?cnum * comptime *)
      then
        (retract ?t ?r)
        (send ?x put-isvalid F)
        (printf LA (str-cat ?tname "&" ?num "/" ?sum
          "&F&" ?frm "&" ?para "&[" ?min "," ?max
          "]&" ?val "&RULEjudgeIncre"))
        (assert-string (str-cat "(" "result" (TorF F) (tname
```

```
" ?tname") (userfrm ?frm) (parameter
" ?para) (value ?val) (lrange " 0 ") (hrange
" 0 "))"))
  else
    (retract ?r)
    (send ?v put-comprnum (+ ?cnum 1))
  )))
```

2.4 决策算法

DMA 根据 DA 判读的结果制定决策,决策算法流程如图 2 所示。

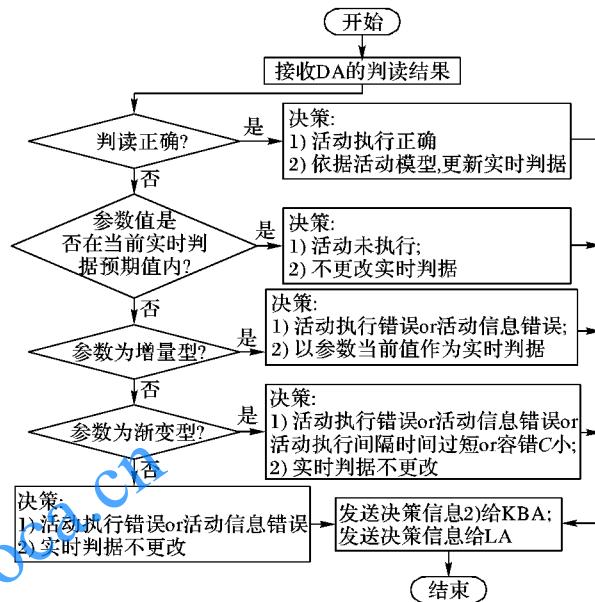


图 2 决策算法流程
Fig. 2 Flow chart of decision algorithm

以表 1 中的 03P4 和 00P1 两个参数的判读过程为例,说明该决策机制应对测试环境变化的有效性。设有效载荷执行如表 2 所示的测试序列,测试过程中出现:1)第一次 T304 未执行;2)设备 1 的总电流 00P1 的实际值约为 4.0 ± 0.5 ,与提供的数据有差别。表 3 中给出 MARAD 方法与常规判读方法的判读过程。

由表 3 可知,当第一次 T304 未执行时,两种方法都给出“执行错误”的判读结果,与此同时,MARAD 方法对该参数的判据作出调整,更改为实际值 0;在 T304 第二次执行正确时,MARAD 方法能够给出正确的判断结果,而常规方法会继续判定执行错误,参数 00P1 同理。

3 系统实现与验证

采用 Visual Studio 2012 工具开发了 MARAD 系统,并嵌入 CLIPS6.30 版本 DLL,部署在判读计算机上。应用某卫星的有效载荷分系统集成测试的测试数据进行验证,搭建系统测试验证平台如图 3 所示,卫星平台仿真计算机模拟执行测试序列,解析载荷数据包,并将活动(指令)及解析数据发送给判读计算机,数据管理服务器存储数据包源文件及解析后的参数、日志等,各设备间借助交换机通过网络连接。

知识库及判读规则在系统中以配置文件的形式存在,更改知识库及扩充判读规则无需更改系统的其他程序。系统判读完成后生成日志报告,便于载荷人员查看和修改知识库。

以某一涉及 4 台有效载荷设备,104 条指令活动和 201 个数据参数的测试序列为列进行测试验证,测试用例中加入实测时的常见干扰因素,如活动未执行、测试暂停与再执行



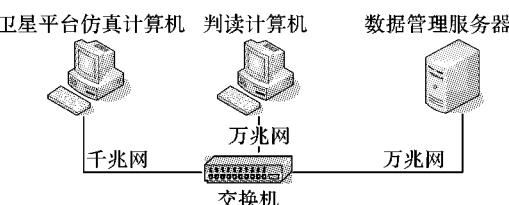
(包含修复过程)、载荷方提供数据不符、参数渐变、测试序列变更等,并将测试结果与目前提出的可实现自动判读的状态模型方法及工程应用中普遍采用的人工判读方法进行比较,以说明 MARAD 方法的优越性。其中状态模型方法以基于 FSM 模型的方法为例参与比较,由于状态模型方法不具有自适应性,实时判读效果较差,对比意义不大,故采用事后判读的方式,数据可回放多次。

表 3 决策机制对判读过程的影响对比

Tab. 3 Comparison of effects of decision mechanism on discrimination process

活动 ID	参数 O3P4			参数 OOP1		
	实际值	MARAD 方法	状态建模方法	实际值	MARAD 方法	状态建模方法
T101	0	0	0	3.89	判据更改为 3.89 ± 0.5	$3.0 \pm 0.5 (\times)$
T201	\	\	\	4.62	$4.49 \pm 0.7 (\checkmark)$	$3.6 \pm 0.7 (\times)$
T301	\	\	\	4.98	$4.85 \pm 0.8 (\checkmark)$	$3.96 \pm 0.8 (\times)$
T203	\	\	\	\	\	\
T303	0	0	0	\	\	\
T304 (未执行)	1(\times) (判据更新为 0)	1(\times)	\	\	\	\
T204	\	\	\	\	\	\
T304	1	1(\checkmark)	2(\times)	\	\	\
T203	\	\	\	\	\	\
T302	\	\	\	4.56	$4.49 \pm 0.7 (\checkmark)$	$3.6 \pm 0.7 (\times)$
T202	\	\	\	4.02	$3.89 \pm 0.5 (\checkmark)$	$3.0 \pm 0.7 (\times)$
T102	\	\	\	—	—	—

注:符号“×”表示判读错误;“√”表示判读正确;“\”表示值不变,即与前一活动下的参数值相同;“—”表示缺少值,一般为断电情况下。

图 3 有效载荷 MARAD 系统测试平台
Fig. 3 Test platform of MARAD system for payload

测试条件及结果对比如表 4 所示,其中参数漏判率(Parameter Missing Rate, PMR) 及活动误判率(Activity False-positive Rate, AFR) 的计算公式分别为:

$$PMR = \frac{\text{未判读的参数数目}}{\text{所有参数总数}} \times 100\%$$

$$AFR = \frac{\text{实际执行情况与判读结果不一致的活动数}}{\text{活动总数}} \times 100\%$$

由表 4 可以看出,MARAD 方法与状态模型方法相比,都无需人员参与判读,且无参数漏判;而在处理方式上,MARAD 能够应对实测环境的变化,处理实时的数据判读,状态模型方法则采用事后判读,需多次回放数据以更新知识库,提高判读准确率;在活动判读结果上,由于状态模型方法的误判率不固定且随着回放次数增加而逐次降低,故取前三次回放测得的误判率的均值,结果表明,MARAD 方法实时判读的活动误判率比状态模型方法事后判读的三次回放的均值结果仍下降了 10.54 个百分点,而在参数漏判率方面,由于两种方法的知识库中都包含所有需判读的参数信息,故均不存在参数漏判的

问题。

表 4 三种判读方法测试结果对比
Tab. 4 Comparison of testing results by three methods

判读方法	有效载荷设备数	活动参数总数	实时吞吐率/(Mb·s⁻¹)	单次完整执行时间/min	判读方式	参与人数	参数漏判率/%	活动误判率/%
							参数漏判率/%	活动误判率/%
MARAD 方法	4	104	201	8.1	260	实时	0	0
状态模型方法	4	104	201	8.1	260	事后(需数据回放多次)	0	11.5(回放三次的均值)
人工判读方法	4	104	201	8.1	260	实时	4	5.97 3.98

MARAD 方法与人工判读方法相比,采用的都是实时判读方式,但:MARAD 方法无需人员参与判读,而人工判读方法则需要 4 人(一般情况下,一台有效载荷设备需要至少一人判读);在参数漏判率方面,人工判读方法的漏判率 5.97%,而 MARAD 方法则无漏判;在活动误判率方面,MARAD 方法比人工判读方法下降了 3.02 个百分点。

测试结果分析表明,MARAD 方法优于状态模型方法和人工判读方法,具有良好的环境适应能力,能够保证实时测试过程中判读的连贯性,且具有较高的判读准确率,可满足有效载荷地面集成测试的判读需求。

4 结语

本文设计并实现了可应用于有效载荷地面集成测试中的实时自适应判读系统,该系统基于多 Agent 框架及自适应设计的理念,改进目前已有方法对实际测试环境的非预期变化的不适应性、判读不连续及错误率高等不足,具有如下优势:

1) 依据“感知-决策-执行”的系统设计,能够应对实测中测试序列调整、数据提供有误等干扰因素,确保判读在测试中的连贯性。

2) 面向活动建模,使得判读过程独立于测试序列;判读规则加入容错机制,降低误判率。

3) 判读规则及决策规则可扩充,提高了系统的通用性和可扩展性,日志文件记录决策信息,为载荷人员查看及调整知识库提供了依据。

实例分析及测试验证表明该方法具有明显的优越性,能够满足有效载荷地面集成测试中对实时数据判读的需求,可以应用于工程实用。接下来将继续优化活动模型的自动获取方法,以提高系统使用的便捷性。

参考文献 (References)

- [1] 贺宇峰,赵光恒,吕从民,等. 基于 CLIPS 专家系统的自动数据判读方法[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(4): 505–513. (HE Y F, ZHAO G H, LYU C M, et al. Technology of automatic data discrimination based on CLIPS expert system [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 28 (4): 505–513.)
- [2] 张强,郭丽丽,马振林. 基于模型自动判读的研究与实现[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(7): 17–20. (ZHANG Q, GUO L L, MA Z L. Design and realization of automatic interpretation based on model [J]. Computer Technology and Development, 2014, 24(7): 17–20.)

(下转第 2043 页)



的条件下, 使用基于活跃度的工作者信誉模型来选取众包工作者相比通过平均信誉模型和基于证据理论信任模型来选取工作者, 其众包任务完成的质量更高, 并且时间花费更少。

参考文献 (References)

- [1] DOAN A, RAMAKRISHNAN R, HALEVY A Y. Crowdsourcing systems on the world-wide Web [J]. Communications of the ACM, 2011, 54(4): 86–96.
- [2] 朱小宁. 支持任务推送的众包系统的研究与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015: 53–64. (ZHU X N. Research and implementation of crowdsourcing system supporting task push [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015: 53–64.)
- [3] 王莹洁, 蔡志鹏, 童向荣, 等. 基于声誉的移动众包系统的在线激励机制 [J]. 计算机应用, 2016, 36(8): 2121–2127. (WANG Y J, CAI Z P, TONG X R, et al. Reputation based incentive mechanism for mobile crowdsourcing system [J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(8): 2121–2127.)
- [4] HOWE J. The rise of crowdsourcing [J]. Wired Magazine, 2006, 14(6): 1–5.
- [5] 冯剑红, 李国良, 冯建华. 众包技术研究综述 [J]. 计算机学报, 2015, 38(9): 1713–1726. (FENG J H, LI G L, FENG J H. Summary of crowdsourcing technology [J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(9): 1713–1726.)
- [6] SAXTON G, OH O, KISHORE R. Rules of crowdsourcing: models, issues, and systems of control [J]. Information Systems Management, 2013, 30(1): 2–20.
- [7] 芮兰兰, 张攀, 黄豪球, 等. 一种面向众包的基于信誉值的激励机制 [J]. 电子与信息学报, 2016, 38(7): 1808–1815. (RUI L L, ZHANG P, HUANG H Q, et al. A reputation based incentive mechanism for crowdsourcing [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(7): 1808–1815.)
- [8] 张晓波. 基于工作者错误率估计的众包质量控制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 24–36. (ZHANG X B. Quality control of crowdsourcing based on worker error rate estimation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 24–36.)
- [9] 张志强, 逢居升, 谢晓芹, 等. 众包质量控制策略及评估算法研究 [J]. 计算机学报, 2013, 36(8): 1636–1649. (ZHANG Z Q, PANG J S, XIE X Q, et al. Research on quality control strategy and evaluation algorithm of crowdsourcing [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(8): 1636–1649.)
- [10] JURCA R, FALTINCS B. Towards incentive-compatible reputation management [C]// Proceedings of the 2003 International Conference on Trust, Reputation, and Security: Theories and Practice. Berlin: Springer, 2003: 138–147.
- [11] 阮闪闪, 王小平, 薛小平. 基于证据理论信任模型的众包质量监控 [J]. 计算机应用, 2015, 35(8): 2380–2385. (RUAN S S, WANG X P, XUE X P. Crowdsourcing quality monitoring based on evidence theory trust model [J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(8): 2380–2385.)
- [12] 夏恩君, 赵轩维, 李森. 国外众包研究现状和趋势 [J]. 技术经济, 2015, 34(1): 28–36. (XIA E J, ZHAO X W, LI S. Current situation and trend of crowdsourcing research abroad [J]. Technology Economics, 2015, 34(1): 28–36.)

This work is partially supported by the Natural Science Foundation of Hubei Province (2014CFB836).

YAN Jun, born in 1991. M. S. candidate. His research interests include embedded system, data mining.

KU Shaoping, born in 1969. Ph. D., associate professor. His research interest include MCU and embedded system, network information system.

YU Chu, born in 1991. M. S. candidate. Her research interests include embedded system.

(上接第 2038 页)

- [3] 吴婧, 苏振华, 孙诚. 一种基于 Kalman 滤波的卫星遥测数据判读系统 [J]. 航天器工程, 2014, 23(3): 86–91. (WU J, SU Z H, SUN C. Satellite telemetry data interpretation system based on Kalman filter [J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(3): 86–91.)
- [4] ZOLFOUR-AROKHLO M, MASHINCHI M R. A multi-Agent system approach to control road transportation network [C]// Proceedings of the 2016 1st Conference on Swarm Intelligence and Evolutionary Computation. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 42–46.
- [5] 丁博, 王怀民, 史殿习. 构造具备自适应能力的软件 [J]. 软件学报, 2013, 24(9): 1981–2000. (DING B, WANG H M, SHI D X. Constructing software with self-adaptability [J]. Journal of Software, 2013, 24(9): 1981–2000.)
- [6] 唐苏妍, 朱一凡, 李群, 等. 多 Agent 系统任务分配方法综述 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(10): 2155–2161. (TANG S Y, ZHU Y F, LI Q, et al. Survey of task allocation in multi Agent system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(10): 2155–2161.)
- [7] 庞毅, 孙青林, 焦刚领, 等. 基于多 Agent 的舰艇编队对海攻击仿真系统 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(10): 2396–2403. (PANG Y, SUN Q L, JIAO G L, et al. Warship formation anti-sea attack simulation system based on multi-Agent [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(10): 2396–2403.)
- [8] Slashdot Media. STB of NASA, CLIPS basic programming guide Version 6.30 [EB/OL]. (2015-03-17) [2016-04-23]. <http://clipsrules.sourceforge.net/documentation/v630/bpg.pdf>.
- [9] Slashdot Media. STB of NASA, CLIPS advanced programming guide

Version 6.30 [EB/OL]. (2015-03-17) [2016-04-23]. <http://clipsrules.sourceforge.net/documentation/v630/apg.pdf>.

- [10] 温国谊, 查光东, 张翔. 基于 CLIPS 的某型飞机故障诊断专家系统的设计与实现 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(S1): 157–161. (WEN G Y, ZHA G D, ZHANG X. Design and realize of a plane's expert system development for fault diagnosis based on CLIPS [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(S1): 157–161.)

- [11] 顾晓东, 高阳. Rete 算法: 研究现状与挑战 [J]. 计算机科学, 2012, 39(11): 8–12. (GU X D, GAO Y. Rete algorithm: current issues and future challenge [J]. Computer Science, 2012, 39(11): 8–12.)

- [12] FOREGY C L. Rete: a fast algorithm for the many pattern/many object pattern match problem [J]. Artificial Intelligence, 1982, 19(1): 17–37.

WANG Jing, born in 1990. Ph. D. candidate. Her research interests include automatic testing.

WANG Chunmei, born in 1965. B. S., research fellow. Her research interests include automatic testing.

ZHI Jia, born in 1984. M. S., engineer. His research interests include space data processing.

YANG Jiasen, born in 1979. Ph. D. candidate, associate research fellow. His research interests include intelligent measurement and control.

CHEN Tuo, born in 1986. M. S., engineer. His research interests include computer software, database processing.