

# 基于优度评价方法的面向信号软件平台中的仪器更换研究

许爱强<sup>1</sup>, 朱 坤<sup>2</sup>, 孟 上<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院 科研部, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院 研究生管理大队, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对现在维护 ATS 时遇到的对仪器更换方案很难选择的问题, 首先讨论在维护 ATS 时, 更换 ATS 中仪器的必要性, 并介绍面向信号 ATS 软件平台给测试带来的便利, 然后在面向信号 ATS 软件平台的基础上使用可拓学中物元模型较为完善的对仪器进行形式化的描述, 并通过蕴含分析和发散分析来生成仪器的更换方案, 最后通过一个简单的例子介绍使用优度评价方法来定量描述仪器更换方案的优劣以选择较优的更换方案。

**关键词:** ATS; 面向信号; 可拓学; 物元; 优度评价

## Instrument Interchangeable Research Based on Superiority Evaluation Method

Xu Aiqiang<sup>1</sup>, Zhu Kun<sup>2</sup>, Meng Shang<sup>1</sup>

(1. Department of Scientific Research, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;  
2. Graduate Student's Brigade, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Aiming to solve a problem, the choices of instruments used to replace an instrument of an ATS are difficultly made, encountered in the maintenance of an ATS. Firstly, this paper discusses the necessity of the replacement of instruments in an ATS during the maintenance of an ATS, and introduces the convenience of test brought by the signal-oriented software platform. Secondly, builds a formalized model of instruments with matter-element of extenics on the basis of the signal-oriented software platform, and gets the solutions by the principle of divergent and implication. Finally, finds out the best solution with superiority evaluation method.

**Keywords:** ATS; signal-oriented; extenics; matter-element; superiority evaluation method

## 0 引言

随着测试技术的发展, 自动测试系统 (automatic test System, ATS) 的使用已经非常广泛。在构建 ATS 时, 为了引入新的技术和减少研发费用, 一般仪器的选择多为货架商品 (commercial off the shelf, COTS)。并且随着技术的快速发展, COTS 的组件和软件更新周期越来越短。对于军用测试系统, 由于被测对象 (unit under test, UUT) 服役的时间一般较长, 所以军用 ATS 的使用时间一般都为几十年, 然而 ATS 中的 COTS 在 5 年或更少的时间内将不再被厂家支持<sup>[1]</sup>。

当 ATS 中的仪器出现严重故障时, 可能就需要选用新的仪器来更换, 综合考虑众多因素, 在市场上的众多仪器中选择一个适用于 ATS 的最优方案, 并不那么简单, 特别是对基于面向信号软件平台的 ATS。

本文将综合考虑面向信号的 ATS 软件平台的特点和仪器的一些重要特征, 使用可拓学<sup>[2]</sup>中物元模型把仪器进行形式化的描述。然后, 通过蕴含分析和扩散分析来研究可行的更换方案。最后, 通过一个简单的实例介绍使用可拓学中优度评价的方法来定量描述仪器更换方案优劣, 以从中选出最佳的方案。

## 1 面向信号的 ATS 软件平台

当 ATS 中的仪器需要发生改变时, 为了尽量减少对测试程序的更改, 先后出现了面向仪器和面向信号的 ATS 软件平台。它们的核心思想都是在仪器驱动程序和测试程序之间添加一层软件封装, 以使得测试程序中尽量少的出现或不出现和具体仪器相关的操作。面向仪器的思想是把一类仪器的操作封装成相同的函数接口, 所以基于此软件平台构建的 ATS 可以支持同类仪器的互换, 但是 IVI 基金在制定类标准时, 只划分了 8 类, 并且随着仪器的功能越来越多类的概念也越来越模糊, 已经很难再把仪器进行明确的分类<sup>[3]</sup>。面向信号的思想则是把仪器按信号封装, 即相同的信号具有相同的函数接口, 所以基于此软件平台构建的 ATS 可以支持具有相同信号仪器的互换。

面向信号的 ATS 不仅提高了仪器的可更换性, 而且因为测试程序不涉及到仪器的操作, 所以还可以大大提高测试程序的移植性。当然, 要构造面向信号的 ATS 并不是那么简单, 首先基于面向信号的 ATS 需要严格和统一的信号定义; 其次, 虽然面向信号的 ATS 的测试程序中不涉及具体仪器的操作, 但最终的测试还是需要 ATS 中的具体仪器来完成, 所以这就需要大量的格式统一且相互独立的文档来作为测试程序和仪器交流的桥梁。为了支持构建面向信号的 ATS, IEEE SCC20 委员会推出了 STD 标准和 ATML 标准。STD 标准不仅提供了严格的信号定义, 还提供了面向信号的语言——测试进程语言 (test producer language, TPL), 相比于 ATLAS 语言, TPL 的使用更加灵活和方便。ATML 标准提供了和测试相关文档

收稿日期: 2014-04-27; 修回日期: 2014-06-02。

基金项目: 装备预研基金项目 (9140A25070208JB1402)。

作者简介: 许爱强 (1963-), 男, 山东即墨人, 博士生导师, 教授, 主要从事军用装备综合自动检测方向的研究。

格式的定义, 并将和 TPS (Test Program Set, 测试程序集) 及仪器相关的信息尽可能分开描述, 为提高 TPS 的可移植性和仪器的互换能力提供了可能<sup>[4]</sup>。

文献 [5] 介绍了一个已经成功用于工程实践的面向信号的软件平台。本文将在使用 STD 标准和 ATML 标准的面向信号的软件平台的基础上来研究仪器的更换。

## 2 仪器描述

ATML 标准关于仪器描述的标准是 IEEE 1671.2 标准, 按照该标准对仪器描述的格式, 可画出一个函数发生器的描述图形如图 1 所示。

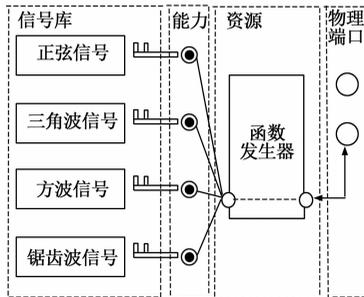


图 1 函数发生器的图形描述

图 1 中: 信号库, 用来存放使用 IEEE 1641—2010 标准定义的信号的集合; 仪器的能力, 和信号库联系在一起, 代表一台仪器能够产生、测量或转换的信号, 对图 1 中的函数发生器而言, 它的能力就是它能产生信号库中的正弦信号、三角信号、方波信号和锯齿波信号; 资源是逻辑实体, 一般指代仪器的一些内部资源, 但也不必代表仪器的真实的或物理的部分, 仅仅是帮助定义信号到端口映射的逻辑实体; 仪器的物理端口就是仪器的实际对外的接口。

### 2.1 仪器能力描述

仪器的一个重要特征是仪器的能力, 使用文献 [2] 中定义的多维物元和复合物元概念, 可以把仪器的一个频率为 0~4 MHz, 其不确定度为 0.1 Hz, 精度为 1 Hz, 幅度为 0~10 V, 其不确定度为 0.01 V 的正弦信号能力表示为:

$$M_{cap1} = [capability, signal_1, M_{sig1}]$$

式中,

$$M_{sig1} = \begin{bmatrix} sinewave, & frequency, & M_{fre1} \\ & amplitude, & M_{amp1} \end{bmatrix}$$

其中:

$$M_{fre1} = \begin{bmatrix} frequency, & range, & < 0 \text{ Hz}, 4 \text{ MHz} > \\ & errlmt, & 0.1 \text{ Hz} \\ & res, & 1 \text{ Hz} \end{bmatrix}$$

$$M_{amp1} = \begin{bmatrix} amplitude, & type, & trms \\ & range, & < 0V, 10V > \\ & errlmt, & 0.01V \end{bmatrix}$$

进而可把仪器的所有能力表示为:

$$M_{cap} = [capability, signal_i, M_{sigi}]$$

### 2.2 仪器端口的描述

仪器端口是仪器的另一个重要的特征, 可用多维物元和复合物元把一个具有 6 个针脚在仪器前端输出模拟信号的仪器端口信息表示为:

$$M'_{pi1} = \begin{bmatrix} port_1, & type, & 6-pin \\ & location, & front \\ & direction, & output \\ & signaltype, & analog \end{bmatrix}$$

关于仪器的能力和端口, IEEE1671.2 标准中还有一个重要的概念, 那就是能力要映射到仪器的物理端口上, 其方法是能力映射到资源, 资源再映射到端口, 文献 [6] 已有详细介绍, 这里不再深入叙述。总之, 同一个仪器上不同的端口可能会有不同的能力, 如图 1 所示函数发生器有两个物理端口, 但两个端口上的能力是不同的。所以, 上面描述的仪器端口还应该再加上一个特征——端口上的信号能力, 现把上式修改如下:

$$M_{pi1} = \begin{bmatrix} port_1, & type, & 6-pin \\ & location, & front \\ & direction, & output \\ & signaltype, & analog \\ & signal_i, & M_{sigi} \end{bmatrix}$$

进而可把仪器的所有的端口表示为:

$$M_{pi} = [port, port_i, M_{pi}]$$

### 2.3 其他重要特征的描述

要完成对一个仪器比较完整的描述除了上述的两个比较关键的信息外, 还需要考虑仪器的其他一些特征, 如价格、可靠性、仪器设置的复杂度、仪器尺寸、仪器当前状态和仪器厂家提供支持的时间。其中, 仪器的可靠性, 可用平均故障间隔时间 MTBF (mean time between failures) 描述; 仪器设置复杂度, 用仪器平均设置时间 MST (Mean Set Time) 衡量<sup>[7]</sup>; 仪器尺寸, 因为 ATS 中使用的大多数仪器都为标准尺寸, 所以本文使用相对值来描述; 仪器当前状态, 本文把仪器状态分为正常状态和故障状态, 即状态  $n$  和  $f$ ; 仪器厂家提供支持的时间, 该特征以时间来衡量。仪器的这些特征有的量值很容易得到, 像仪器价格、仪器厂家支持时间和尺寸; 有的特征量值就比较难得到, 像仪器的可靠性、MST 和当前状态, 这些量值需要根据专家的意见或历史资料进行打分, 以打分的分值作为量值。

综上所述, 一个故障的函数发生器  $I_0$  可以用复合物元表示为:

$$M = \begin{bmatrix} instrumentI_0, & capability, & M_{cap} \\ & port, & M_{pi} \\ & price, & c \\ & reliability, & t_r \\ & MST, & t_s \\ & size, & s \\ & state, & f \\ & support, & y \end{bmatrix}$$

## 3 仪器的可拓变换

某 ATS 不能正常完成测试任务, 经诊断发现, 该系统因不能产生正弦信号、方波信号和三角信号的激励信号而无法正常工作, 最终确定是系统中函数发生器  $I_0$  故障。下面将采用可拓变换的方法分析使 ATS 恢复正常工作状态的方法。

首先, 建立目标事元如下:

$$A_g = \begin{bmatrix} repair, & dominatingobject, & ATS \\ & actingobject, & tester \end{bmatrix}$$

然后,对目标事元进行蕴含分析如下:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \left[ \begin{array}{ccc} \text{present}, & c_1, & M_{sig} \\ & c_2, & \text{instrument } I_i \end{array} \right] \\
 A_2 &= \left[ \begin{array}{ccc} \text{change}, & c_1, & \text{state of } I_0 \\ & c_2, & \text{tester} \end{array} \right] \\
 A_{21} &= \left[ \begin{array}{ccc} \text{repair}, & c_1, & I_0 \\ & c_2, & \text{tester} \end{array} \right] \\
 A_{22} &= \left[ \begin{array}{ccc} \text{change}, & c_1, & \text{port of } I_0 \\ & c_2, & \text{tester} \end{array} \right]
 \end{aligned}
 \Rightarrow A_g$$

所以,蕴含通道为:(1)  $A_{21} \Rightarrow A_2 \Rightarrow A_g$ , (2)  $A_{22} \Rightarrow A_2 \Rightarrow A_g$ , (3)  $A_1 \Rightarrow A_g$ .

最后,使用扩散树方法把  $A_1$  具体化如下:

$$A_1 \left\{ \begin{array}{l} A_{11} = \left[ \begin{array}{ccc} \text{present}, & c_1 & M_{sig} \\ & c_2, & F \vee A \vee D \vee C \vee H \end{array} \right] \\ A_{12} = \left[ \begin{array}{ccc} \text{present}, & c_1, & M_{sig} \\ & c_2, & \bigwedge_{i=1}^m I_i^m \end{array} \right] \end{array} \right.$$

式中,  $F$  代表函数发生器、 $A$  代表任意波形发生器、 $D$  代表数模转换器、 $C$  代表综测仪、 $H$  代表高频信号源。

分析上文得到的 3 个蕴含通道:蕴含通道 (1) 是对仪器的端口进行置换,即如果原仪器  $I_0$  只是正在使用的通道坏了,而恰好  $I_0$  还有能够产生相同信号的闲置通道,或者不相同但能够简单地通过端口转接器使得转换后的通道适用于 ATS;蕴含通道 (2) 是对仪器的内部元器件进行置换,即对仪器进行维修;蕴含通道 (3) 是对仪器进行置换,即选择状态正常的具有相似能力的单个仪器或多个仪器的组合来置换仪器  $I_0$ ,这些仪器可以是原 ATS 中没有的,也可以是 ATS 中已经有的。

通过以上分析,可以看出如果仪器坏的程度不高,选择蕴含通道 (1) 或 (2) 将会是很划算的;但如果仪器的毁坏程度已经很高,维修成本和后期的维护成本要比更换一台新的仪器的成本要高,那么无疑我们需要对  $I_0$  进行置换变换。本文主要研究查找仪器置换变换的最优解变换,即蕴含通道 (3)。

### 4 案例研究

某 ATS 中用以产生频率为 2 ~ 400 kHz, 不确定度为 0.08 Hz, 精度为 1 Hz; 幅度有效值为 3~5 V, 不确定度为 0.01 V 正弦信号的函数发生器发生故障,经分析需要对其进行更换。经上文对蕴含通道 (3) 的分析知,置换函数发生器的方案有很多,下面将使用优度评价方法来进行较优方案的选择。备选仪器各项指标如表 1 所示,表 1 中各离散值指标的值

都经过了归一化处理。

#### 4.1 确定评价指标

要评价每一个置换变换的优劣,首先选择衡量指标如下:

$$SI = \{SI_1, SI_2, \dots, SI_8\}$$

其中,  $SI_1 = (\text{capability}, M'_{cap})$ ,  $SI_2 = (\text{port}, M'_{pi})$ ,  $SI_3 = (\text{price}, c)$ ,  $SI_4 = (\text{reliability}, t_r)$ ,  $SI_5 = (MST, t_s)$ ,  $SI_6 = (\text{size}, s)$ ,  $SI_7 = (\text{state}, n)$ ,  $SI_8 = (\text{support}, y)$ 。

其中,

$$M'_{cap} = [\text{capability}, \text{signal } j, M_{sig} \text{ of } M_{pi}], \\
 i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m.$$

是  $SI_1$  表征所用端口上信号的能力指标。

由于第一个特征和第二个特征比较复杂,所以根据需求分别对特征 1 建立 4 级衡量指标,对特征 2 建立 2 级衡量指标,它们的 2 级衡量指标可建立为:  $SI_i = \{SI_{i1}, SI_{i2}, \dots, SI_{im_i}\} (i = 1, 2)$ , 同理即可建立第一个特征的 4 级衡量指标为:

$$SI_{1111j} = (\text{range}, \langle p, q \rangle), SI_{1112j} = (\text{errlmt}, x), \\
 SI_{1113j} = (\text{res}, y), j = 1, 2, \dots, m, x, y > 0.$$

#### 4.2 确定权系数

衡量指标  $SI_1, SI_2, \dots, SI_8$  对方案选择的影响有轻重之分,以权系数  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_8)$  来表示各衡量指标的重要性程度。

其中,  $\sum_{k=1, k \neq 7}^8 \alpha_k = 1, \alpha_7 = \Lambda, \Lambda$  表示非满足不可的指标,  $\alpha_k \in [0, 1]$

具体取值根据 ATS 的具体要求并参考专家的意见或历史资料来定。同理可确定各级指标的权系数,对应于上文确定的各级衡量指标,可确定本例要用的各级权系数为:

$$\alpha = (0.3, 0.1, 0.1, 0.3, 0.05, 0.05, 0, 0.1), \\
 \alpha_{11} = (0.5, 0.5) \\
 \alpha_{1111} = (0.1, 0.45, 0.45), \alpha_{1112} = (0.1, 0.9).$$

#### 4.3 首次评价

利用备选仪器非满足不可的指标——仪器状态、端口的类型和仪器能力等对备选仪器进行初步筛选,把显然不满足用于该 ATS 的仪器排除,对剩下的仪器进行下面步骤的筛选。

对于本例,根据测试需求对频率范围的要求排除掉综测仪和高频电源。当然,如果测试需求信号较多时,就不能像这样简单地排除掉这两个仪器,因为它们虽然不能产生满足要求的正弦信号,但有可能产生符合测试需求的其他信号,进而可以和其他仪器组合共同满足所有的测试需求。

表 1 备选仪器各项指标

仪器	能力(正弦波)		端口	价格	可靠性	MST	尺寸	支持
	频率(不确定度,精度)	幅度(不确定度)						
F(I <sub>1</sub> )	(0,4 MHz)(0.03 Hz, 1 Hz)	(0 V, 10 V)(0.01 V)	1	0.94	0.89	0.45	1	0.8
F(I <sub>2</sub> )	(0,4 MHz)(0.03 Hz, 1 Hz)	(0 V, 20 V)(0.01 V)	1	0.93	0.92	0.50	1	0.8
A(I <sub>3</sub> )	(0,4 MHz)(0.05 Hz, 1 Hz)	(0 V, 10 V)(0.01 V)	1	0.97	0.83	0.55	1	0.6
A(I <sub>4</sub> )	(0,4 MHz)(0.04 Hz, 1 Hz)	(0 V, 10 V)(0.01 V)	1	1.00	0.85	0.53	1	0.9
D(I <sub>5</sub> )	(0,400 kHz)(0.07 Hz, 1 Hz)	(0 V, 10 V)(0.001 V)	1	0.90	1.00	0.62	1	1
C(I <sub>6</sub> )	(0,200 kHz)(0.01 Hz, 0.5 Hz)	(0 V, 10 V)(0.01 V)	1	0.00	0.80	1.00	0	1
H(I <sub>7</sub> )	(0,5 kHz)(0.10 Hz, 2 Hz)	(0 V, 10 V)(0.1 V)	1	0.00	0.81	1.00	0	0.8

### 4.4 建立和规范化关联函数

上文把仪器评价指标分成了 1 级、2 级和 4 级, 下面对这些评价指标建立关联函数并做归一化处理。在建立关联函数的时候, 首先应对最低级的评价指标建立关联函数再逐级向上计算关联函数并计算优度。根据各衡量指标取值的不同情况, 即衡量指标可以是离散点值或区间值, 对各指标建立关联函数也就有 2 种情况。

#### 4.4.1 区间值的关联函数

例如, 指标  $SI_{1111j}$  为值区间  $X = \langle p, q \rangle$ , 依据当精度和分辨率相同的情况下, 仪器所能提供的范围越大越好的原则(因为这可以为以后 ATS 的功能的扩展提供可能), 参考文献 [8] 中定义的区间距的概念建立关联函数为:

$$k_{1111j}^I(R, X) = \left| \frac{2000 + 400000}{2} - \frac{p + q}{2} \right| - \left( \frac{400000 - 2000}{2} - \frac{q - p}{2} \right),$$

$$k_{1111j}(R, X) = \frac{1}{L} k_{1111j}^I, j = 1, 2, \dots, m.$$

式中,  $L = \max_{j=1,2,\dots,m} \{k_{1111j}^I\}$ ,  $k_{1111j}(x)$  代表仪器  $I_j$  第四级评价指标的第 1 个关联函数。

#### 4.4.2 离散值的关联函数

仪器精度和分辨率都是离散的, 为此类离散点衡量指标需要建立离散关联函数, 例如, 为  $SI_{1112j}$  建立离散关联函数为:

$$k_{1112j}(x) = \begin{cases} d, & x = a, \\ e, & x = b, j = 1, 2, \dots, m \\ f, & x = c. \end{cases}$$

这里  $d, e$  和  $f$  的取值是根据专家的意见或历史资料打分得到的。

本例需要建立的关联函数为:

$$k_{1112j}(x) = \begin{cases} 1.000, & x \leq 0.04 \text{ Hz}, \\ 0.996, & x = 0.05 \text{ Hz}, \\ 0.990, & x = 0.07 \text{ Hz}. \end{cases}$$

$$k_{1122j}(x) = \begin{cases} 0.99, & x = 0.01 \text{ V}, \\ 1, & x = 0.001 \text{ V}. \end{cases}$$

$$k_{3j}(x) = \begin{cases} 1.0, & x = 0.90, \\ 0.9, & x = 0.93 \text{ or } 0.94, \\ 0.7, & x = 0.97 \text{ or } 1. \end{cases}$$

$$k_{4j}(x) = x,$$

$$k_{5j}(x) = \begin{cases} 1.0, & x = 0.45, \\ 0.9, & x = 0.50, \\ 0.8, & x = 0.53 \text{ or } 0.55, \\ 0.6, & x = 0.62. \end{cases}$$

$$k_{8j}(x) = x.$$

有些关联函数没有列出是因为备选仪器的某些指标取值相同, 并且这些指标的关联函数均取值为 1。

### 4.5 计算优度

首先由  $I_j$  四级指标的关联函数, 逐级计算出一级指标的关联函数, 例如当更换的选择是单个仪器时,

$$k_{1j} = \sum_{i=1}^r \sum_{q=1}^n \sum_{l=1}^p \alpha_{1iqlj} k_{1iqlj}, j = 1, 2, \dots, m,$$

当更换方案是一个仪器组合时,

$$k_{1c} = \sum_{i=1}^r \max_{j \in \{1, 2, \dots, f\}} \left( \sum_{q=1}^n \sum_{l=1}^p \alpha_{1iqlj} k_{1iqlj} \right), c = 1, 2, \dots, b,$$

然后计算  $I_j$  总的优度, 当更换方案是单个仪器时:

$$C(I_j) = \sum_{i=1}^8 \alpha_i k_{ij}, j = 1, 2, \dots, m$$

当更换方案是一个仪器组合时,

$$C(I_c) = \sum_{i=1}^8 \alpha_i k_{ic}, c = 1, 2, \dots, b$$

最佳仪器的选择, 对  $I_j$  的优度进行比较:

$$\text{若 } C(I_1) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, m\}} \{C(I_j)\} \text{ 或 } C(I_1) = \max_{c \in \{1, 2, \dots, b\}} \{C(I_c)\}$$

则仪器  $I_1$  为较优。

本例各备选仪器优度值为:

$$C(I_1) = 0.9357, C(I_2) = 0.9307, C(I_3) = 0.8874, \\ C(I_4) = 0.9137, C(I_5) = 0.9658$$

从计算结果可知, 在本例中选用  $I_5$  的方案较优。

## 5 总结

现在, ATS 已经广泛的应用到各个行业, 对于很多 ATS 都不可避免的会涉及到对 ATS 的后期维护工作, 维护 ATS 时常常需要对 ATS 中的仪器进行更换。在更换 ATS 中的仪器时, 为使得更换方案最优, 需要考虑大量的影响因素对仪器进行形式化的描述, 并需要定量描述仪器互换方案优劣, 从众多的备选方案中选择一个最优方案。本文在面向信号 ATS 软件平台的基础上使用可拓学中物元模型较为完善的对仪器进行了形式化的描述, 然后通过修复 ATS 的目标事元进行蕴含分析和扩散分析来研究可行的变换方案, 最后通过一个简单的例子介绍了使用优度评价方法来定量描述仪器互换方案的优劣。本文介绍的方法可方便有效地用于 ATS 中仪器更换方案的选择。

### 参考文献:

[1] Nathan Tacha, Alex McCarthy, Brian Powell, Arun Veeramani. How to Mitigate Hardware Obsolescence in Next-Generation Test Systems [A]. IEEE Autotestcon [C]. 2009, California: 229-234.

[2] 杨春燕, 蔡文. 可拓工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[3] 叶小杰, 龙兵, 谢志富, 等. 自动测试系统中的仪器设备驱动通用封装研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (4): 975-977.

[4] 林志文, 贺喆, 刘松风. 基于 ATML 的系统级 TPS 开发及综合诊断应用 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31 (5): 1010-1016.

[5] 王怡苹, 许爱强. 基于 STD 标准的自动测试系统软件平台研究 [J]. 仪表技术, 2013, (6): 1-4.

[6] 赵鹏鹏, 崔少辉, 王诗源. ATML 中的能力描述方法研究 [J]. 信息技术, 2013, (1): 88-91.

[7] 付新华, 肖明清. 基于一种匹配函数的 ATS 资源自动配置方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34 (12): 1392-1397.

[8] 李桥兴, 刘思峰. 基于区间和区间侧距的初等关联函数的构造 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38 (7): 1097-1100.