

# 离散信号事件驱动的自动测试系统仿真验证方法与实现

唐小峰

(成都天奥测控技术有限公司, 成都 611731)

**摘要:** 为在设计早期对复杂自动测试系统进行充分验证从而加速其成熟并降低研发成本, 对离散事件系统规范进行扩展和改进, 在原子模型中引入了端口和故障模式, 通过端口间的连接构成耦合模型, 提出一种离散信号事件驱动的仿真调度算法, 并给出一个 C/S 架构的支持远程交互的仿真验证实现方案; 基于自研的 SCATS 自动测试系统软件平台, 分别针对一个示例系统和真实系统开展了实验, 结果表明所提模型和方法支持复杂系统多分辨率层次化建模, 仿真具有较高的一致性和执行效率, 满足自动测试系统仿真验证工程应用需求。

**关键词:** 自动测试系统; 离散事件系统规范; 仿真验证; 信号事件; SCATS 软件平台

## Simulation and Verification Method and Implementation for Discrete Signal Event-Driven Automatic Test Systems

TANG Xiaofeng

(Chengdu Spaceon T&C Technology Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

**Abstract:** A simulation and verification method is proposed to fully verify complex automatic test systems (ATS) in early design stage in order to accelerate their maturity and reduce research and development (R&D) cost. The method extends and improves the discrete event system specification, introduces ports and fault modes in atomic models, constructs coupling model through connections between ports, a discrete signal event-driven simulation scheduling algorithm is proposed, and a C/S architecture scheme is provided to support the remote interaction. Based on self-developed automatic test system software platform (SCATS), the experiments are carried out for an example system and real system respectively. The results show that the proposed model and method support the multi-resolution hierarchical modeling for complex systems, and the simulation has high consistency and efficiency, which meets the requirements of automatic test system simulation and verification applications.

**Keywords:** automatic test system; discrete event system specification; simulation and verification; signal event; SCATS software platform

## 0 引言

自动测试系统 (ATS, automatic test system) 是指以计算机为控制核心, 通过程序控制完成某一测试任务的测试仪器和其他设备的有机整体<sup>[1]</sup>。ATS 广泛应用于航空、航天、船舶和电子等领域, 是现代化高端装备的重要保障设备。ATS 一般由自动测试设备 (ATE, automatic test equipment)、测试程序集 (TPS, test program set) 和 TPS 软件开发工具 (即软件平台) 三大部分组成<sup>[2]</sup>。其中 TPS 是 ATS 的重要组成部分, TPS 的开发和调试工作在 ATS 总成本中占有很大比重。由于通用 ATS 一般被设计为满足多型被测设备 (UUT, unit under test) 的自动化检测需要, 这些 UUT 的 TPS 目前必须在成熟度较低的情况下依次排在紧缺的实物测试平台上进行调试, 形成了严重的资源

挤占。此外, ATE 本身的设计制造也只能通过漫长的 TPS 调试过程来充分验证, 因此极大影响了 ATS 的研制进度和交付效率, 增加了 ATS 的研发成本。

随着信息技术的发展, 针对 ATS 的离散信号事件系统特性采用计算机建模与仿真手段解决 ATS 开发、调试和验证问题成为一个值得探索的方向。离散事件系统规范 (DEVS, discrete event system specification)<sup>[3]</sup> 是一种通用的复杂动态系统建模与仿真范式, 近年来获得了广泛关注。唐俊等<sup>[4]</sup>证明了 DEVS 模型的封闭特性; 林清泉等<sup>[5]</sup>结合 DEVS 和智能体模型描述, 提出一种复杂产品行为模型的多分辨率模型框架。此外, DEVS 还被广泛用于柔性制造系统 PLC 程序的辅助设计<sup>[6]</sup>、机械加工过程碳排放过程动态分析、预测与定量评估<sup>[7]</sup>、构建网格世界等环境中智能体的交互行为和学习行

收稿日期: 2023-04-17; 修回日期: 2023-04-20。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB3302100); 装备发展部测试仪器科研项目 (2009ZCHZ0004); 四川省重大科技专项项目 (2022ZDZX0007)。

作者简介: 唐小峰 (1984-), 男, 重庆人, 博士, 工程师, 主要从事电子信息系统综合测试与故障诊断技术方向的研究。

引用格式: 唐小峰. 离散信号事件驱动的自动测试系统仿真验证方法与实现[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(7): 64-70.

为<sup>[8]</sup>以及电力电子系统的仿真和校正<sup>[9]</sup>等。

针对自动测试系统，目前还未见采用离散事件建模方法对其进行全要素系统级仿真验证的报道。刘宏伟<sup>[10]</sup>针对智能电网抄表业务设计了一种基于半实物仿真的自动测试平台；韩伟<sup>[11]</sup>介绍了变电站的仿真自动测试系统，使用软件程序模拟实际的报文数据；赵昕红等<sup>[12]</sup>通过 Simulink 建模工具为旋翼电动折叠系统构建了虚拟实验系统。其他的相关研究包括基于 LabVIEW 的虚拟仪器技术应用<sup>[13-14]</sup>等。

本文基于 DEVS 基本概念并结合 ATS 的特点对其进行了适应性改进，研究了针对自动测试硬件实体的多分辨率仿真模型描述，给出了 UUT、电缆、适配器、仪器设备和系统集成的具体建模方法，提出了一种离散信号事件驱动的仿真调度算法，给出了一个 C/S 架构的支持远程交互的仿真验证实现方案，并最终通过两个实验对所提模型和方法的有效性进行了验证。

## 1 多分辨率仿真模型描述

### 1.1 模型框架

DEVS 中的原子模型表示单分辨率的最小描述单元，其行为具有自治性。耦合模型包含原子模型的组合与连接，根据嵌套层次的不同又可分为一阶耦合模型和高阶耦合模型。耦合模型分辨率正比于其阶数。

如图 1 所示为离散事件系统的多分辨率模型层次框架示意图，其中底层的  $m_1$ 、 $m_2$  和  $m_3$  方框为原子模型实例； $m_4$  和  $m_5$  所示的斜方框表示一阶耦合模型实例，其构成元素只含原子模型； $m_6$  所在的重叠斜方框表示高阶耦合模型实例，其中至少包含一个其他耦合模型。

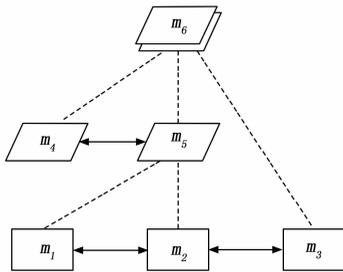


图 1 多分辨率模型层次框架

### 1.2 原子模型

离散事件系统的原子模型可以定义为一个九元组结构体：

$$m_A = \langle X, Y, P, S, s_0, F, \delta, \lambda, ta \rangle \quad (1)$$

其中： $X$  为输入信号集，涉及的信号主要采用参数化的信号属性描述方式； $Y$  为输出信号集； $P = P_I \cup P_O$  为端口集， $P_I$  和  $P_O$  分别表示输入端口集和输出端口集； $S = S_s \cup S_d$  为状态特征集， $S_s$  表示静态属性， $S_d$  表示状态变量； $s_0$  为初始状态； $F$  为故障模式集，每个故障模式可能影响多个状态或行为； $\delta: S_d \rightarrow S_d$  为状态转移函数，规定了模型响应输入信号事件的行为； $\lambda: S | X \rightarrow Y$  为输出函数，规定了模型根据当前状态或输入产生输出信号事件的行为； $ta: \delta | \lambda \rightarrow$

$R_{0,\infty}^+$  为时间推进函数，描述状态转移或信号输出所需的时间长度。

上述原子模型要素中，输入信号集  $X$ 、输出信号集  $Y$  和端口集  $P$  构成了模型的接口；状态特征集  $S$ （包括其初始状态  $s_0$ ）和故障模式集  $F$  构成了模型的属性；状态转移函数  $\delta$ 、输出函数  $\lambda$  和时间推进函数  $ta$  则描述了模型的行为。

原子模型端口是新引入的一个概念，在后续的仿真算法实现过程（详见第 3 节相关内容）中具有重要作用，端口的形式化定义如下所示：

$$p = \langle X^p, Y^p, buff, func, P_O^p \rangle \quad (2)$$

其中： $X^p$  和  $Y^p$  分别为经由当前端口输入和输出模型的信号集，若  $X^p \neq \phi \cap Y^p = \phi$  则  $p$  为输入端口，若  $X^p = \phi \cap Y^p \neq \phi$  则  $p$  为输出端口，若  $X^p \neq \phi \cap Y^p \neq \phi$  则  $p$  为双向端口； $buff$  表示端口上的输入信号缓存，只有当  $p$  为输入或双向端口时有效； $func$  称为关联行为函数，其中封装了针对当前端口输入信号事件的行为实现代码（包括状态转移和输出信号等），只有当  $p$  为输入或双向端口时有效； $P_O^p$  为与当前端口相连并能接收输出信号  $Y^p$  的端口集，只有当  $p$  为输出或双向端口时有效。

### 1.3 耦合模型

考虑耦合模型的原子特性，可将其定义为一个三元组结构：

$$m_c = \langle m_{self}, M, C_p \rangle \quad (3)$$

其中： $m_{self}$  为耦合模型本身的原子模型定义（如（1）式所示），其中完整定义了其接口、属性和行为； $M$  为组成耦合模型的其他模型实例的集合，若  $M$  中任意一个元素  $\forall m_k \in M$  均为原子模型，则  $m_c$  为一阶耦合模型，若  $M$  中存在元素  $\exists m_k \in M$  为耦合模型，则  $m_c$  为高阶耦合模型，模型嵌套的深度即为其阶数； $C_p$  为端口间连接的集合，其中的元素  $c_{i,j} = (p_i, p_j) \in C_p$  表示从端口  $p_i$  指向  $p_j$  的连接，描述了模型中的耦合关系，此时有  $p_j \in p_i, P_O^p$ 。若  $p_i \in m_{self}, P_I \cap p_j \in m_k, P_I(m_k \in M, k \neq self)$  则为外部输入耦合，此时可将  $p_i$  称为一类特殊的端口：入口（import），记为  $p_i^M$ ，用于引入外部输入信号；若  $p_i \in m_k, P_O \cap p_j \in m_{self}, P_O(m_k \in M, k \neq self)$  则为外部输出耦合，此时可称  $p_j$  为出口（export），记为  $p_j^{EX}$ ，用于将内部模型产生的信号输出到耦合模型外部；若  $p_i \in m_{k1}, P_O \cap p_j \in m_{k2}, P_I(m_{k1} \in M, m_{k2} \in M, k1 \neq k2 \neq self)$  则为内部耦合，表示内部模型之间的连接。

综上所述，可得如图 2 所示的耦合模型结构，若其中虚线框中的模型要素为空，则该模型即退化为一个原子模型。

## 2 自动测试系统建模方法

本节基于上述多分辨率模型描述方法，针对自动测试系统中的典型硬件实体构建其仿真模型。一个完整的自动测试系统如图 3 所示，其中主要包含 UUT、电缆、适配器、仪器设备以及由这些仪器设备集成得到的 ATE。电缆和适配器的作用是将 UUT 的接口连接到 ATE 的外部接口，使

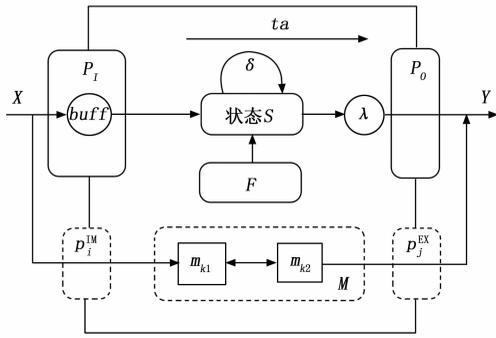


图 2 耦合模型结构

得 ATE 具备测试多个不同型号 UUT 的通用化能力。ATE 中的控制计算机通过各类测控总线（如 GPIB、PXI、VXI、LXI 和串口等）与仪器设备的程控端口相连。仪器设备的功能接口通常通过 ATE 的外部接口转接实现互连或与适配器端口相连，从而间接地连接到 UUT 接口。

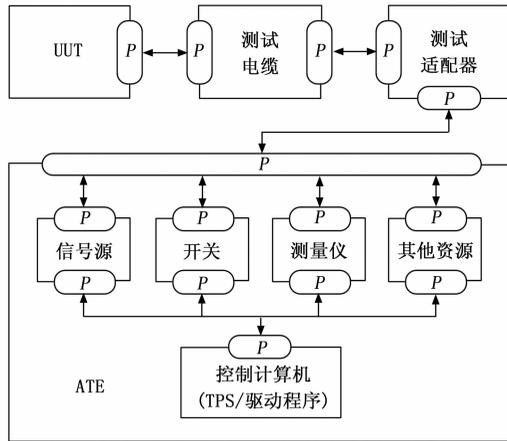


图 3 典型自动测试系统组成结构

自动测试系统的基本工作原理为由控制计算机运行当前 UUT 的 TPS，其间通过调用仪器驱动程序：①控制开关的闭合和断开，在 UUT 和仪器设备之间建立和切换信号通路；②控制信号源输出激励信号（如供电信号、通信控制信号、射频信号和离散量信号等），该信号通过适配器和电缆传递到 UUT，从而对 UUT 的工作状态施加控制和影响；③控制测量仪读取 UUT 输出信号的测量值，然后将结果逐层返回给驱动程序和 TPS，进行后续的判读或处理。

### 2.1 UUT 建模

首先根据 UUT 的接口控制文件梳理 UUT 模型的端口  $P$  和信号 ( $X$  和  $Y$ )。例如由两个针脚 XS1-DD 和 XS1-GND 构成 UUT 的直流供电输入端口，输入信号类型为 DC\_POWER，其主要信号属性为电压幅度和电流限，也可包含关于信号质量的描述，如允许的电压浮动范围或电压精度等。在面向信号的测试中，上述信息是 UUT 测试需求的重要组成部分<sup>[15]</sup>。

UUT 的内部状态  $S$  与其具体的设计规范相关，例如静态属性  $S_s$  中包含该设备的型号、名称、序号等信息；状态

变量  $S_d$  则可能涉及上电状态、工作电流、工作模式、工作参数以及当前工况下的性能指标等。UUT 的故障模式  $F$  可参考其故障模式、影响及危害性分析报告进行设置。

考虑到离散事件模型具有耦合封闭性特点，即耦合模型总能转化为一个等价的原子模型<sup>[4]</sup>，在进行 UUT 建模时可根据掌握资料的详细程度确定其模型分辨率以及行为描述的实现方式（包括  $\delta$ 、 $\lambda$  和  $ta$ ）。若能获取较详细的内部设计信息，则采用耦合模型（即  $M \neq \phi$ ）将更加清晰和直观。

### 2.2 电缆和适配器建模

电缆和适配器主要用于转接信号，它们的模型特点是：①端口和信号数量较多（即  $|P|$  和  $|X|+|Y|$  的值较大）；②动态的状态变量为空（ $S_d = \phi$ ）；③故障模式  $F$  主要涉及接触不良等连接型故障，这些故障模式直接影响信号的输出函数  $\lambda$ ；④行为模式较为单一，通常是简单地将一端的输入信号从另一端输出，只有输出函数  $\lambda$ （其中可以对信号属性进行简单处理，如功率衰减等），无状态转移函数  $\delta$ ，信号传输的时间可忽略不计（即时间推进函数  $ta$  的值恒为 0）。电缆和适配器的建模以使用单分辨率的原子模型为主。

### 2.3 仪器设备建模

仪器设备主要用于产生激励、测量信号和切换信号通路（开关类仪器）。在自动测试系统中它们通常是可编程的，因此具有与控制计算机进行通信的端口  $p_{ctrl} \in P$ 。其他端口主要用于输出激励信号或接收测量信号。普通仪器的建模过程与 UUT 类似，不再赘述。值得注意的是，在描述仪器的控制信号和行为时应充分参考相关开发手册或使用说明，增强模型的拟真度。

开关作为一类比较特殊的仪器，其模型特点是：①由于通道数一般较多，故端口和信号数量较大；②状态变量  $S_d$  记录当前所有开关单元的连接和断开状态；③故障模式  $F$  与电缆和适配器特点相似，主要是连接型故障；④状态转移函数  $\delta$  主要受程控端口输入信号事件触发，用于更新指定开关单元的开关状态；⑤输出函数  $\lambda$  依据连接关系传递端口上的信号；⑥时间推进函数  $ta$  主要作用于状态转移过程，用于模拟开关动作时延，而信号在开关内部传输的时间可以忽略不计。

开关模型中有输入信号在开关单元闭合前和闭合后到达端口的两种情况。前者需要将该信号暂存在端口的缓存  $p_{buff}$  中，开关闭合后再从中取用信号并输出；后者则可以直接从相连的另一端输出该信号。开关模型通常为原子模型，但若开关是由多个开关子模块拼接而成（例如大型矩阵开关）则更宜采用耦合模型。

### 2.4 系统集成

自动测试系统模型的集成涉及两个层面，一是 ATE 的集成（即将仪器设备模型集成到一起，形成一个 ATE 耦合模型），二是测试系统的集成（即 UUT+电缆+适配器+ATE）。系统集成的过程就是将相同层次的模型实例端口相互连接（即内部耦合）或连接到高层次模块的外部端口（即外部输入或输出耦合），从而构成一个整体。

集成后的 ATE 可能是一阶耦合模型，也可能是高阶耦合模型，这主要取决于其中仪器设备模型的实现方式。并且，从通用化的工程经验看 ATE 模型中主要是外部耦合，即仪器设备模型之间直连的情况较少（除了控制计算机与仪器设备程控端口的连接）。整个测试系统则是一个典型的高阶耦合模型，且其中以内部耦合为主。

### 3 仿真调度算法

自动测试系统仿真算法实质上是离散信号事件驱动的仿真调度过程，需要解决端口信号事件的产生和处理、行为函数触发执行以及输出延时等问题，既能模拟硬件的并行行为特征，又能高效利用仿真时钟。

仿真调度算法的基本原理如图 4 所示，下面结合该原理图对算法过程的详细步骤进行说明。

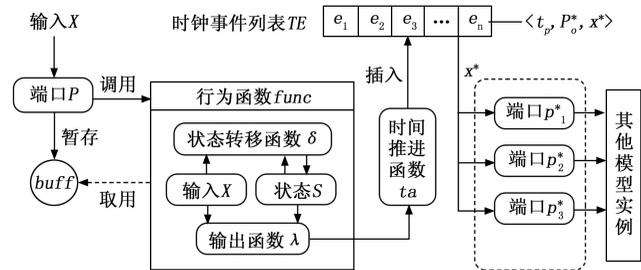


图 4 仿真调度算法基本原理

1) 状态初始化。加载系统模型时对各级模型实例的状态  $S$  进行初始化，即  $S \leftarrow s_0$ 。

2) 仿真启动。令  $X_0$  为原始输入信号集，通过将其中的信号依次施加到原始输入端口集  $P_0$  来启动仿真过程。

3) 输入信号事件处理。如图 4 所示，每当有信号  $x \in X$ （包括  $X_0$  中的信号）输入到一个模型实例的端口  $p \in P$  时，即触发一个输入信号事件。首先，将该信号对象进行缓存，即  $p.buffer \leftarrow x$ 。然后，若  $p$  为入口或出口（即耦合模型的外部输入/输出端口），则直接将  $x$  输入到  $p.P_0$  中的每个端口；若  $p$  为一个模型实例的输入端口，则以  $x$  为参数调用执行  $p.func$  函数，转步骤 4)。

4) 行为函数触发执行。受端口上的输入信号事件调度，行为函数执行时通过状态转移函数  $\delta$  根据输入信号的属性值和当前状态  $S$  更新状态变量  $S_d$ 。然后，输出函数  $\lambda$  根据当前输入或状态产生输出信号。函数  $\delta$  和  $\lambda$  需要根据对象的行为特点编写计算机代码实现。

5) 注册时钟事件。对模型响应的总时长  $\Delta t$  进行估计，将其作为时间推进函数  $ta$  的输出值，构造一个事件项  $e = \langle tp, P_0^o, x^* \rangle$ ，其中仿真时刻  $tp \leftarrow t + \Delta t$  ( $t$  为当前仿真时刻)， $P_0^o$  是输出信号的输出端口集， $x^*$  即为输出信号。将  $e$  按  $tp$  升序插入到全局的时钟事件列表  $TE$  中，完成事件的注册。

6) 事件循环处理。仿真启动之后，调度算法循环从  $TE$  中提取首元素  $e_1$ ，更新当前仿真时刻  $t \leftarrow e_1.tp$ ，然后将信号  $e_1.x^*$  从  $e_1.P_0^o$  中的每个端口输出，进入与之相连的其他端口  $\{p_1^*, p_2^*, p_3^*, \dots\}$ ，触发新的信号事件，并返回步骤

3) 继续执行。通过这种方式实现了模型输出信号的延迟处理，能较好地模拟硬件的响应性能。

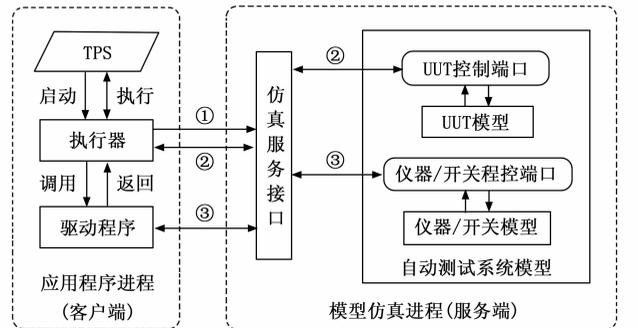
7) 仿真结束。当  $TE = \emptyset$  时，仿真结束，系统进入稳态。

### 4 自动测试系统仿真验证实现

自动测试系统仿真验证的目的有三个：1) 验证 TPS 的逻辑是否满足 UUT 测试需求；2) 验证仪器驱动程序的调用是否正确；3) 验证 ATE 的行为是否符合预期的设计规范。

TPS 是一组可执行的程序或脚本，通常需要在开发阶段进行调试，因此将 TPS 的仿真验证与程序调试进行结合是比较自然的思路。驱动程序是受 TPS 执行过程中调用的计算机程序，可与 TPS 的调试同步执行，对传参和测量值返回显示功能进行验证；ATE 的设计验证主要关注仿真过程中各种信号是否沿着正确的路径传输并被处理。

为提高实现方案的灵活性以及满足远程仿真验证等需求，采用了如图 5 所示的 C/S 架构，其中 TPS（及其执行器）和驱动程序运行于客户端进程，用于模拟图 3 中所示的控制计算机模型。自动测试系统模型的仿真在服务端运行。前后端通过 HTTP 协议经仿真服务接口进行交互。表 1 中所示为主要的通信接口描述。



①模型初始化/复位指令 ②UUT控制指令及响应 ③仪器/开关控制指令及响应

图 5 自动测试系统仿真验证实现原理

表 1 仿真验证实现的网络通信接口描述

接口类型	接口参数
模型初始化指令	系统模型标识、模型文件路径
UUT 控制指令	UUT 模型地址、控制端口 ID、读写模式、指令内容
仪器控制指令	仪器模型地址、程控端口 ID、读写模式、指令内容
模型返回值	数据类型、数据内容
模型复位指令	系统模型标识

当 TPS 启动执行时，向后端发送模型初始化指令，加载对应的系统模型。TPS 执行过程中可以通过发送 UUT 控制指令并通过仿真服务接口转入 UUT 模型的控制端口，触发 UUT 模型行为执行，得到的响应数据再依次返回给执行器和 TPS，进行判读、显示或其他处理。当 TPS 执行过程中需要控制仪器设备时，通过调用相应的驱动程序，结合传参内容构造仪器程控指令（如标准的 SCPI 指令或模拟的

接口函数调用等), 然后发送到仪器模型的程控端口, 触发其产生信号、进行测量或切换开关等动作, 响应后的数据同理逐层返回到 TPS。

### 5 实验及结果分析

仿真验证实验基于自主研发的自动测试系统软件平台产品 (SCATS V1.0) 实现, 它具备测试系统建模、测试程序开发/调试、测试程序执行、仪器驱动辅助开发和故障诊断等功能, 并且能够在主流的国产 CPU 计算机和国产操作系统上进行安装、部署和使用。SCATS 为 TPS 调试功能提供了一个“模型仿真”的选项, 能够基于本文所提方法对自动测试系统进行全要素的仿真验证<sup>[16]</sup>。

下面通过两个实验演示本文所研自动测试系统仿真验证方法和实现的效果。实验一是一个较为简单的示例, 主要用于对所提方法进行进一步的举例说明; 实验二是针对一个真实的航空机载设备 UUT 开展的应用验证, 用于证明本文研究的实用性。

#### 5.1 实验一

本实验以如图 6 所示的自动测试系统为例 (简洁起见其中省略了测试电缆), 其测试需求为通过局域网控制 UUT 先后产生一个正弦波信号  $x_1$  和方波信号  $x_2$ , 然后通过射频开关的切换, 分别将两个信号输入到频谱仪和示波器测量它们的幅值。

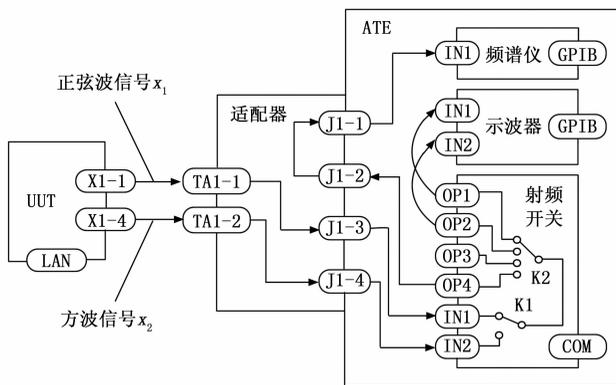


图 6 自动测试系统实例

图 6 中的 UUT、适配器、频谱仪、示波器和射频开关均为原子模型。以射频开关为例, 它的输入和输出信号为图中所示的正弦波和方波信号, 即  $X, Y = \{x_1, x_2\}$ ; 该模型有 7 个端口  $P = \{IN1, IN2, OP1, \dots, OP4, COM\}$ , 其中 IN1 和 IN2 为输入端口, OP1~OP4 为输出端口, COM 为串口控制端口; 主要静态属性  $S_s = \langle id, addr \rangle$  分别为设备标识信息和逻辑地址 (如  $addr = \text{“com4”}$  是射频开关的串口通信地址), 状态变量  $S_d = \langle k_1, k_2 \rangle$ , 分别表示其中的两个开关单元 K1 和 K2 的掷所在的位置, 初始状态为  $s_0 = \{k_1 = 1, k_2 = 1\}$ ; 射频开关的故障模式  $F$  如表 2 所示, 这些故障将在行为函数中改变模型正常的执行逻辑; 状态转移函数  $\delta$  主要用于更改  $k_1$  和  $k_2$  的值; 输出函数  $\lambda$  根据开关单元的状态将输入的信号从相应的输出端口输出; 时间推

进函数  $ta$  主要决定状态转移 (即开关单元切换) 所需的时间  $\Delta t$ , 本例中假定为 1 个仿真时间单位, 即  $\Delta t = 1 T$ 。

表 2 射频开关模型中的故障模式

故障代码	故障描述
0000	正常
0001	K1 固定在 CH1
0002	K1 固定在 CH2
0003	K2 固定在 CH1
0004	K2 固定在 CH2
0005	K2 固定在 CH3
0006	K2 固定在 CH4
0007	K1 或 K2 的公共端开路
0008	控制电路故障

射频开关的射频信号输入端口 IN1 (IN2 同理) 关联一个名为“sig\_handle”的行为函数 (即  $IN1.func = \text{“sig\_handle”}$ )。信号输入时, 该函数通过判断当前 K1 和 K2 的状态, 调用  $\lambda$  从正确的端口输出该信号, 同时令其他端口输出一个空信号 (模拟信号被断开的情况)。程控端口 COM 关联一个名为“write”的行为函数 (即  $COM.func = \text{“write”}$ ), 该函数对程控指令进行解析, 从而调用  $\delta$  更新开关单元的状态。例如程控指令为“INIT” (初始化) 或“RST” (复位) 时, 则分别置  $k_1 \leftarrow 1$  和  $k_2 \leftarrow 1$ 。同时, 该函数还检查 IN1.buf 是否有缓存的信号, 若有则调用  $\lambda$  输出信号, 实现与真实射频开关行为的一致。

图 6 中的 ATE 是一个一阶耦合模型, 它的端口 J1-1 和 J1-3 是入口, J1-2 是出口; 组件集  $M = \{\text{频谱仪, 示波器, 射频开关}\}$ ; 连接集  $C_p = \{(ATE.J1-3, \text{射频开关}.IN1), (\text{射频开关}.OP4, ATE.J1-2), \dots, (\text{射频开关}.OP1, \text{示波器}.IN1), \dots\}$ , 其中所列元素分别表示外部输入耦合、外部输出耦合和内部耦合。

基于该自动测试系统开发的 TPS 中包含 20 个测试步骤。以“模型仿真”模式启动 TPS 调试, 在测试程序执行到第 4 行时, 经信号路由搜索算法计算得到需要闭合 K1 的第 1 掷和 K2 的第 4 掷才能将正弦波信号输入到频谱仪测量。假设控制 K2 的指令内容为“CON K2 4”, 通过 TPS 执行器调用射频开关的驱动程序将该指令发送到服务端的射频开关程控端口 COM, 调用上述“write”函数对其进行解析后置状态  $k_2 \leftarrow 4$ 。执行 TPS 第 5 行时执行器向 UUT 模型发送指令, 控制它从端口 X1-1 输出一个中心频率为 100 MHz, 功率为 -35 dBm 的正弦波信号  $x_1$ 。该信号分别通过端口 TA1-1 和入口 J1-3 到达射频开关的 IN1 端口, 触发上述“sig\_handle”函数执行 (当前仿真时刻  $t = 6 T$ ), 完毕后时钟事件列表 TE 中包含一个事件  $e = \langle 7 T, \{\text{射频开关}.OP4\}, x_1 \rangle$ 。根据仿真算法, 下一个仿真时刻  $t = 7 T$  时 (即延时  $\Delta t = 1 T$ ), 将从射频开关的端口 OP4 输出  $x_1$ , 进入与 OP4 相连的端口 J1-2 触发新的输入信号事件和行为, 直到  $TE = \phi$ , 系统进入稳态。

在 TPS 的第 10 行和第 20 行设置两个断点。正常情况下在第一个断点处，开关状态为  $k_1 = 1$  和  $k_2 = 4$ ，频谱仪接收到 UUT 端口 X1-1 输出的有效正弦波信号，因此  $x_1$  幅度测量值正常 ( $\approx -35$  dBm)；由于该信号不能通过开关到达示波器的两个端口，因此示波器返回的幅值为零。在第二个断点处，UUT 端口 X1-4 输出方波信号，开关状态被切换到了  $k_1 = 2$  和  $k_2 = 1$ ，因此示波器端口 IN1 (通道 1) 接收到有效的信号  $x_2$ ，返回正常的测量值 ( $\approx 5$  V)；而频谱仪没有接收到信号，返回一个很低的噪声幅值 (假定为  $-120$  dBm)。

表 3 所示为模拟各种正常和故障状态下 TPS 执行到两个断点处在调试面板界面上观察到的测试结果数据 (粗体表示当前时机下的异常值)。表中数据在标称值附近随机小幅变化是因为在频谱仪和示波器模型的行为函数中增加了一个随机扰动来近似模拟测量误差。

表 3 TPS 仿真验证实验结果

状态	时机	频谱仪 IN1 ( $x_1$ 幅度)	示波器 IN1 ( $x_2$ 幅度)	示波器 IN2 ( $x_2$ 幅度)
0000	断点 1	-35.06 dBm	0.00 V	0.00 V
	断点 2	-120.00 dBm	5.01 V	0.00 V
0001	断点 1	-35.04 dBm	0.00 V	0.00 V
	断点 2	-120.00 dBm	<b>3.98 mV</b>	0.00 V
0002	断点 1	<b>-120.00 dBm</b>	0.00 V	0.00 V
	断点 2	-120.00 dBm	4.96 V	0.00 V
0003	断点 1	<b>-120.00 dBm</b>	<b>3.98 mV</b>	0.00 V
	断点 2	-120.00 dBm	4.99 V	0.00 V
0004	断点 1	<b>-120.00 dBm</b>	0.00 V	<b>3.98 mV</b>
	断点 2	-120.00 dBm	<b>0.00 V</b>	<b>5.01 V</b>
0005	断点 1	<b>-120.00 dBm</b>	0.00 V	0.00 V
	断点 2	-120.00 dBm	<b>0.00 V</b>	0.00 V
0006	断点 1	-35.09 dBm	0.00 V	0.00 V
	断点 2	<b>26.99 dBm</b>	<b>0.00 V</b>	0.00 V
0007	断点 1	<b>-120.00 dBm</b>	0.00 V	0.00 V
	断点 2	-120.00 dBm	<b>0.00 V</b>	0.00 V
0008	断点 1	-120.00 dBm	<b>3.98 mV</b>	0.00 V
	断点 2	<b>-120.00 dBm</b>	<b>3.98 mV</b>	0.00 V
接线错误	断点 1	<b>-120.00 dBm</b>	0.00 V	0.00 V
	断点 2	-120.00 dBm	<b>3.98 mV</b>	0.00 V

分析表 3 中的数据，当故障代码为“0001”(K1 固定在 CH1) 时，在第一个断点处与正常情况所需的状态  $k_1 = 1$  相同，因此不会产生影响；在第二个断点处  $k_1$  的值本应为 2 但仍然保持为 1，导致示波器 IN1 端口接收到的不是方波信号，而是从 UUT 端口 X1-1 输出的正弦波信号，测得其幅值为 3.98 mV (假定阻抗为  $50 \Omega$  条件下  $-35$  dBm 的转换值)，与正常的 5 V 有明显差异。

再如当故障代码为“0008”(控制电路故障) 时，不能通过程控指令改变射频开关的状态，即始终保持在初始状态  $k_1 = 1$  和  $k_2 = 1$ ，从而导致两个断点处的测量值完全相同。

最后，模拟了适配器中接线错误的情形。使用 SCATS 的适配器建模工具将内部连线修改为 TA1-1 连接到 J1-4 和 TA1-2 连接到 J1-3。在断点 1 处由于 K1 的状态为  $k_1 = 1$ ，故信号  $x_1$  无法到达频谱仪端口；断点 2 处示波器 IN1 实际收到的是信号  $x_1$ ，而不是预期的  $x_2$ ，表 3 中最末一项测试数据正确地反映了上述结果。

采用类似的方法分析其他状态情况，可见仿真验证的结果与预期均一致，意味着在这种“模型仿真”模式下调试 TPS 能够感知测试系统设计或状态的变化，是对当前 TPS 调试验证手段的重要改进<sup>[15]</sup>。

### 5.2 实验二

本实验针对的是一个真实的航空直流发电机控制器 UUT，并且在一个实物 ATE 验证平台上对其进行了实际测试。表 4 中所示为该 UUT 自动测试所需的仪器资源，基于 Python 3.6.5 编程语言分别构建了这些仪器资源的原子模型和耦合模型 (其中的矩阵开关由四个模块拼接而成)，并集成得到了整个测试系统的模型。

表 4 仪器资源列表

序号	型号	名称
1	PAC0215	三相交流电源
2	N5767A	大功率直流电源
3	AV1671	模块化直流电源
4	E1412A	数字多用表
5	1260_45A	矩阵开关
6	SMP5001	80 通道小功率开关
7	SMP5005	48 通道小功率开关

根据 UUT 的实际测试需求，使用 SCATS 软件平台开发了它的 TPS，其中包含电压调节测试、过压保护测试和启动维护 BIT 等 7 个测试项目，共计 301 个测试步骤，37 个功能和性能指标。

本实验中 ATE 的控制计算机采用了国产飞腾 CPU (FT-2000/4@2.6 GHz) 和统信 UOS20 操作系统。底层仪器驱动程序采用了自研的国产 VISA IO 库和 IVI-C 接口规范。基于上述特点，在仿真验证的网络通信接口中 (参见表 1) 将仪器/开关的程控指令内容格式设计为对底层标准化驱动函数接口调用相关的信息，例如 {“funcname”: “viScanf”, “params”: {“vi”: 1, “viString”: “% [^\n]”, “buf”: “\n” \* 256}, “ret”: “params/buf”} 是一个获取测量值的指令，其中的“vi”为仪器资源的虚拟标识；由仪器模型返回的虚拟测量值保存在“buf”中；“ret”属性为解析返回的测量值提供了路径信息。这种设计的好处是使得仿真模式下驱动程序的实现代码与真实物理测试下的仪器驱动代码具有较高的相似性和对应关系，进一步提高了仿真验证的拟真度。

如图 7 所示为在“模型仿真”模式下运行 TPS 产生的部分日志内容，其中记录了各个模型实例的行为动作以及信号在系统中的转接流动等信息。通过这些信息 (包括

各个指标的测试结果)按测试步骤逐条与实际情况进行对比,结果表明模型行为与实际系统一致性较高,仿真验证的可信度满足工程应用要求。

```

/**仪器初始化和关闭**/
[cmd](DMM1|数字多用表(E1412A)) 打开仪器资源
[cmd](SPST1|小功率开关(SM5001)) 打开仪器资源
.....
[cmd](DCPS1|直流电源模块(DC1761)) 仪器关闭
/**开关控制**/
[cmd](SPR1|小功率开关(SM5005)) 闭合开关: K3
[cmd](SPST1|小功率开关(SM5001)) 闭合开关: K2
.....
[cmd](Grp_3|矩阵开关Bank) 闭合开关: Grp_3, Row0_A, Col11
[cmd](MX1|矩阵开关模块(1260_45A)) 处理指令: CLOS (@1(3011))
.....
[cmd](SPST1|小功率开关(SM5001)) 断开开关: K2
/**仪器控制**/
[cmd](DCPS1|直流电源模块(DC1761)) 处理指令: VOLT 28.0
[cmd](DCPS1|直流电源模块(DC1761)) 处理指令: :OUTPut ON
.....
[cmd](DMM1|数字多用表(E1412A)) 处理指令: :READ?
[cmd](DMM1|数字多用表(E1412A)) 读取测量缓存
-> 测量结果为: {'trName': 'z端电压', 'trId': 'trVz', 'convdValue': '27.0 V', 'valueStr':
'27.0', 'dataType': 'physical', 'unit': 'V', 'range': '值>=20.0 V', 'outcome': '通过'}
/**信号转接流动**/
[转接输入](TUA001|测试适配器(TUA)) 从端口J23-1输入信号: {'type': 'DC_POWER',
'attributes': {'dc_amp1': 28.0 V, 'currentLimit': 3.0 A}}
[转接输出](TUA001|测试适配器(TUA)) 从端口J23-21输出信号: {'type': 'DC_POWER',
'attributes': {'dc_amp1': 28.0 V, 'currentLimit': 3.0 A}}
.....

```

图 7 部分仿真验证日志信息

此外,由于仿真模式下可以忽略等待物理设备状态或信号稳定的时间,因此能够大幅提升 TPS 验证的执行效率。本实验在无软件界面参与条件下(仅使用 TPS 执行器程序)对“模型仿真”模式下的 TPS 执行时间和实际物理测试时间进行了对比,前者用时约为 4.6 秒,后者用时为 3 分 41 秒,前者仅为后者的 2.1%。在 UUT 测试需求更复杂的情况下(例如有的 UUT 完整测试时间长达数十分钟),效率提升效果将更加明显。

## 6 结束语

全要素的自动测试系统仿真验证对于提高系统的研发效率、降低成本具有重要意义。本文系统地研究了自动测试系统的多分辨率模型定义、建模方法、仿真算法和实现方案,通过实验证明了仿真验证的一致性、高效性和实用性,为进一步在未来复杂自动测试系统型号上的推广应用奠定了基础。决定仿真验证应用效果的关键是模型的精确性,高质量模型的构建是一个较为费时的工作。为更好在自动测试行业中实现所研成果的产业化,模型的标准化研究和参考模型库(如仪器模型库)的构建是下一步的主要工

作方向。

## 参考文献:

[1] LI M Q, GONG X. Electronic Controller Automatic Test System Based on Intelligent Control Algorithm [J]. Journal of Electrical can Computer Engineering, 2022, 2022 (1): 1-13.

[2] 齐永龙, 宋 斌, 刘道熙. 国外自动测试系统发展综述 [J]. 国外电子测量技术, 2015, 34 (12): 1-4.

[3] ZEIGLER B P, MUZY A, KOFMAN E. Theory of Modeling and Simulation [M]. 3rd Edition, New York: Academic Press, 2018.

[4] 唐 俊, 张明清, 刘建峰. 离散事件系统规范 DEVS 研究 [J]. 计算机仿真, 2004, 21 (6): 62-64.

[5] 林清泉, 杨佳然, 张和明. 一种基于离散事件系统规范的复杂产品行为模型描述方法 [J]. 系统仿真学报, 2022, 34 (4): 661-669.

[6] 王 兵, 江海凡, 丁国富. 基于 DEVS 的柔性制造系统逻辑建模与 PLC 程序设计 [J]. 航空制造技术, 2021, 64 (8): 41-49.

[7] 朱 硕, 张 华, 江志刚, 等. 基于 DEVS 的机械加工过程碳排放多粒度动态模型构建及仿真 [J]. 机械工程学报, 2018, 54 (19): 158-169.

[8] 王霄汉, 张 霖, 赖李媛君, 等. 基于 DEVS 原子模型的智能体离散仿真构建方法 [J]. 系统仿真学报, 2022, 34 (2): 191-200.

[9] 杨 祎, 赵争鸣, 檀 添, 等. 离散状态事件驱动仿真方法及自适应预估校正算法 [J]. 电工技术学报, 2017, 32 (12): 33-41.

[10] 刘宏伟. 基于半实物仿真的抄表系统自动化测试平台设计 [J] 计算机测量与控制, 2022, 30 (12): 51-57.

[11] 韩 伟. 智能变电站二次仿真自动测试系统设计与实现 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28 (12): 174-178.

[12] 赵昕红, 戴 翔. 装备仿真测试技术研究 [J]. 测控技术, 2020, 39 (3): 71-75.

[13] 康仲飞. 基于虚拟仪器的港口高压岸电变频电源检测系统 [J]. 自动化与仪表, 2022, 38 (10): 8-13.

[14] 徐 源, 邢兰昌. 基于虚拟仪器的多通道声发射检测系统设计与开发 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (1): 85-90.

[15] 唐小峰, 孙智敏, 文永康, 等. 基于 ATML 标准的网络化自动测试实现方法 [J]. 中国测试, 2020, 46 (S1): 110-113.

[16] 唐小峰, 胡 宇, 邹 建, 等. ATML 测试描述标准的应用扩展研究 [J/OL]. 测控技术, 2022: 1-6. DOI: 10.19708/j.ckjs.2022.09.304.

[17] 安春莲, 杨古月, 杨延菊. 基于中值滤波预处理的强冲击噪声背景测向方法 [J]. 电子学报, 2021, 49 (6): 1159-1166.

[18] 刘宇涵, 闫 河, 陈早早, 等. 强噪声下自适应 Canny 算子边缘检测 [J]. 光学精密工程, 2022 (3): 350-362.

[19] 李庆忠, 刘 洋. 基于改进 Canny 算子的图像弱边缘检测算法 [J]. 计算机应用研究, 2020 (S01): 361-363.

[20] 邱 东, 翁 蒙, 杨宏韬. 基于改进概率霍夫变换的车道线快速检测方法 [J]. 计算机技术与发展, 2020, 30 (5): 43-48.

[21] GB/T 25994-2010. 蜂窝陶瓷外观质量标准 [S]. 中国国家标准化管理委员会, 2011.

.....  
(上接第 63 页)

[15] 安春莲, 杨古月, 杨延菊. 基于中值滤波预处理的强冲击噪声背景测向方法 [J]. 电子学报, 2021, 49 (6): 1159-1166.

[16] 淡州阳, 刘粉林, 巩道福. 基于差分直方图中尾部信息的平滑滤波检测算法 [J]. 计算机科学, 2021, 48 (11): 234-241.

[17] 吴京城, 施露露, 杜亚南, 等. 基于双重高斯滤波的细胞图像快速分割方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2022 (2): 93