

自动测试系统的可重构测试接口适配器设计

付新华, 肖明清, 周越文, 孔庆春

(空军工程大学工程学院自动测试系统实验室, 西安 710038)

摘要:提出可重构测试接口适配器(RTUA)的思想,用户通过程控接口可以现场自动配置 RTUA 以满足不同 UUT 及不同信号的测试需求。采用匹配函数描述测试点与仪器端口的匹配程度,匹配函数综合了测点信号属性与仪器性能参数、仪器可靠性、仪器成本等因素。给出 RTUA 的硬件架构模型,控制模块采用 SOPC 技术实现,可调用不同的配置文件实现 RTUA 重构。给出 RTUA 的软件设计方法,采用 COM 组件实现测控计算机对 RTUA 的配置管理。

关键词:自动测试系统;测试接口适配器;开关网络;SOPC 技术

Design for Reconfigurable Test Unit Adapter of Automatic Test System

FU Xin-hua, XIAO Ming-qing, ZHOU Yue-wen, KONG Qing-chun

(ATS Lab, Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038)

【Abstract】 This paper proposes a thought of Reconfigurable Test Unit Adapter(RTUA). RTUA can be configured in real-time with programmable interface to satisfy the test requirements of different UUTs or signals. A kind of matching function is presented to describe the matching degree between test point and instrument port. Matching function integrates signal properties of test point, capability parameters of instrument and instrument's price and so on. Hardware architecture of RTUA is put forward. Control module is implemented with SOPC and can be configured with different configuration files. Software design method of RTUA is given, test and control computer realizes the configuration management of RTUA with COM.

【Key words】 Automatic Test System(ATS); Test Unit Adapter(TUA); switch network; SOPC

1 概述

测试接口适配器(Test Unit Adapter, TUA)是自动测试系统(Automatic Test System, ATS)测试程序集的一部分,是被测对象 UUT 与测试系统之间的桥梁,主要起信号转换和调理作用^[1]。传统的通用 ATS 主要指其自动测试设备 ATE 和软件框架是通用的,而 TUA 和测试流程是专用的,通过更换不同的 TUA 和测试流程以适应不同 UUT 的测试需求。一个被测对象往往对应一个测试接口适配器,会造成适配器数量繁多、资源浪费、测试系统体积庞大。不同的适配器其接口描述文件也不一致,限制了测试程序集的移植和复用。而且在构建多个 UUT 的并行测试系统时,由于信号调理通道设计固定,每一个信号几乎对应一个调理通道,因此使得 TUA 的设计繁琐、复杂且可靠性差。

针对上述问题,本文提出可重构测试接口适配器(Reconfigurable Test Unit Adapter, RTUA)的思想,用户通过程控接口可以现场自动配置 RTUA 以满足不同 UUT 以及不同信号的测试需求,从而实现“一对多”,解决了资源专用和适配器重复开发的问题。

2 通用 ATS 硬件架构

通用 ATS 典型硬件架构如图 1 所示。采用模型化思想,可将整个系统划分成以下几个组成部分:测控计算机系统,仪器模型,开关模型,ICA 模型,ITA 模型,RTUA 内部模型,RTUA 通用端口 GP 模型,UUT 模型以及通道模型等。对于 ATS 的硬件设计,目前除 TUA 之外都有相应的标准可

以参考。TUA 是系统中唯一必须客户化设计的硬件单元^[1]。TUA 是连接测试资源与被测对象的纽带,其作用主要包括 2 个方面:(1)对来自被测对象的待测信号进行转接、隔离、分配以及必要的预处理;(2)将电源、测试激励信号分配给被测对象,并且保持与测试资源最大程度的兼容性^[2]。

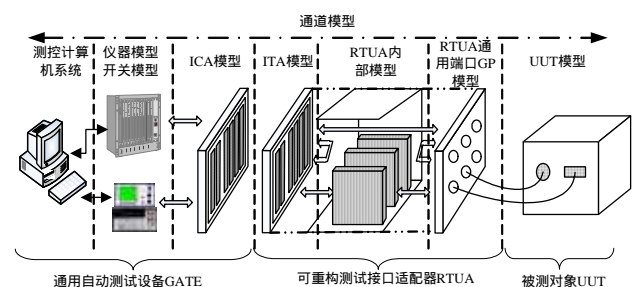


图 1 通用 ATS 典型硬件架构

3 RTUA 设计流程

RTUA 设计流程如图 2 所示。典型设计步骤如下:(1)UUT 信息的分析和统计,UUT 的测试需求是 RTUA 设计的基础。(2)RTUA 通用端口设计,形成通用端口 GP 模型。(3)测点与

基金项目:国家部委基金资助项目

作者简介:付新华(1980-),男,博士,主研方向:系统检测自动化与智能化;肖明清,教授、博士;周越文,教授;孔庆春,讲师、博士

收稿日期:2009-06-17 **E-mail:** fuxinhua_003@163.com

仪器端口的自动匹配，匹配程度取决于测点信号属性与仪器性能参数、仪器成本、仪器可靠性等因素。(4)根据匹配结果进行控制模块、开关网络和各信号调理模块设计。(5)RTUA 软件设计，包括底层硬件驱动、控制模块应用程序以及测控计算机 RTUA 控制组件的设计。(6)输出测控软件设计需要的有关信息，包括 ICA 模型、ITA 模型和通道模型等，文件格式可与 PAWS 等软件无缝链接。(7)完成 RTUA 相关工程设计，包括 ATE 内部、适配器内部连线的布局布线，生成电缆制作表等。

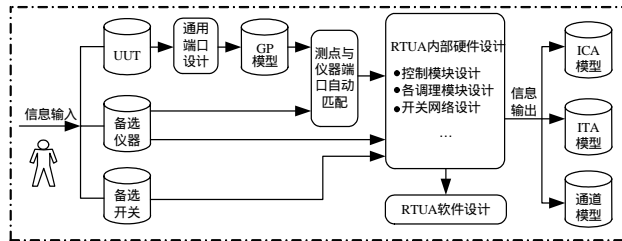


图2 RTUA 设计流程

4 通用端口设计

RTUA 前面板上设有若干“通用端口”，用不同的电缆连接通用端口与 UUT 端口即可实现对不同 UUT 的自动测试。把需要同时测试的一组端口称为“同测端口”。通用端口分普通端口和射频端口 2 种。确定普通通用端口方法如下：取所有“普通同测端口组”中端口数的最大值作为普通通用端口个数；以同测端口为单位把所有 UUT 端口归类到不同的通用端口，根据归类结果确定每个普通通用端口的针数。射频端口通常有 N, BNC, SMA, TNC 和 MCX 等几种类型，分别针对这几种情况，取所有“射频同测端口组”中每种端口数的最大值再加 1 作为该种射频通用端口个数，将 UUT 所有射频端口都归类到相应的适配器射频通用端口^[3]。

5 测点与仪器端口的自动匹配

5.1 影响因素

测点与仪器端口的匹配程度可用匹配函数来刻画。匹配函数一般与以下几个因素有关：

(1)测点信号属性与仪器性能参数：测试的最终目的是检测信号的特征，仪器选型最基本的依据就是所选仪器的性能参数能够满足信号测试的需要。

(2)仪器可靠性：可靠性低的仪器易发生故障，耽误任务完成，在多个仪器均能完成测试任务的情况下优先选用可靠性高的仪器。仪器可靠性可用平均故障间隔时间 MTBF 描述。

(3)仪器成本：降低测试成本一直是测试界追求的目标，成本低的仪器应优先考虑。

(4)仪器设置复杂度：测点的测试用时取决于测点信号属性和仪器设置复杂度 2 个方面。仪器设置复杂度是影响 ATS 测试效率和吞吐量的重要因素，仪器设置复杂度可用仪器平均设置时间(Mean Set Time, MST)衡量。在进行仪器匹配时，MST 小的仪器应赋予大的选用权值。

5.2 基本信号模型

利用面向信号的思想描述仪器能力与测试需求是测试领域的一个重大进步^[4]。一个信号可由以下几个要素完全确定：(1)信号功能：激励，测量；(2)信号类型：直流 DC，交流 AC 等；(3)信号属性：信号包含的属性参数，如频率、幅度、分辨率等；(4)属性值：各属性参数的取值、数值或范围；

(5)信号端子：信号的输入/输出端子。

不同类型的信号其包含属性参数的种类一般也不同，每个属性参数在信号处于激励或测量状态下的描述需求也不完全相同。不失一般性，信号 s 可表示为

$$s = \{F; T; P; H\}$$

其中， F 为信号功能； T 为信号类型； $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 为属性集； p_i 为基本属性参数，其取值范围为 $[v_{i\min}, v_{i\max}]$ ，表示信号属性值或范围； $H = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$ 为信号端子集。

定义 1 属性参数归化是指对信号的属性参数进行适当的处理，使得信号的各属性参数值都正比或反比于信号的优劣。若为正比例则称为归大化处理，若为反比则称为归小化处理。

定义 2 已知同功能同类型的 2 个信号 A 和 B ，即 $F(A)=F(B)$ ， $T(A)=T(B)$ 。其属性集分别为 $P^A = \{p_1^A, p_2^A, \dots, p_n^A\}$ 和 $P^B = \{p_1^B, p_2^B, \dots, p_m^B\}$ ， p_i^A 的取值为 $[v_{i\min}^A, v_{i\max}^A]$ ， $i=1, 2, \dots, n$ ， p_j^B 的取值为 $[v_{j\min}^B, v_{j\max}^B]$ ， $j=1, 2, \dots, m$ 。

(1)若 $\forall p_k \in P^A$ 有 $p_k \in P^B$ ，且 $\forall p_k \in P^B$ 有 $p_k \in P^A$ ，即 A, B 的属性集包含相同的属性参数，则称 A 与 B 同构，记作 $A \cong B$ 。

(2)若 A 与 B 同构且属性参数经归大化处理后， $\forall p_k \in P^A$ ，有 $[v_{k\min}^A, v_{k\max}^A] \subset [v_{k\min}^B, v_{k\max}^B]$ ，则称 B 覆盖 A ，记作 $B \succ A$ 。

(3)若 A 与 B 同构且属性参数经归大化处理，则信号 A 和 B 的距离定义为

$$\|A - B\| = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left[\frac{(v_{k\max}^A - v_{k\min}^A)/2 + v_{k\min}^A}{\max\{v_{k\max}^A, v_{k\max}^B\} - \min\{v_{k\min}^A, v_{k\min}^B\}} - \frac{(v_{k\max}^B - v_{k\min}^B)/2 + v_{k\min}^B}{\max\{v_{k\max}^A, v_{k\max}^B\} - \min\{v_{k\min}^A, v_{k\min}^B\}} \right]^2}$$

其中， N 为 P^A 的元素个数。

定义 3 已知信号集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 和单信号 A 。

(1)若 $\forall s_k \in S$ ，有 $s_k \cong A$ ，则称信号集 S 与 A 同构，同样记作 $S \cong A$ ，并称 S 为 A 的同构集。

(2)若 $\exists s_k \in S$ ，使得 $s_k \cong A$ ，则称信号集 S 与 A 广义同构，记作 $S \cong \cong A$ ，并称 S 为 A 的广义同构集。

(3)若 $\forall s_k \in S$ ，有 $s_k \succ A$ ，则称信号集 S 覆盖 A ，同样记作 $S \succ A$ ，并称 S 为 A 的覆盖集。

(4)若 $\exists s_k \in S$ ，使得 $s_k \succ A$ ，则称信号集 S 广义覆盖 A ，记作 $S \succ \succ A$ ，并称 S 为 A 的广义覆盖集。

5.3 匹配函数

一般来说，仪器功能具有多样性，其端口 h 的性能可用信号集 $S(h) = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 描述，而测点 c 上的信号是单一的，不妨记为 s_c 。设 ATS 备选仪器资源集所有端口为 $H = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$ ，端口 h_i 所属仪器的平均故障间隔时间 MTBF 记作 $r(h_i)$ ，价格成本记作 $q(h_i)$ ，仪器平均设置时间 MST 记作 $w(h_i)$ 。仪器端口 h_i 能完成测点 c 测试的前提条件是： h_i 上的信号集 $S(h_i)$ 中存在与 s_c 功能和类型一样且属性参数值能覆盖 s_c 的信号，即 $S(h_i) \succ \succ s_c$ 。记 $S^c(h_i)$ 为端口 h_i 上与 s_c 匹配的信号集，即 $S^c(h_i) = \{s_j | s_j \in S(h_i) \wedge s_j \succ s_c\}$ ； H^c 为能够完成测点 c 测试的仪器端口集： $H^c = \{h_k | h_k \in H \wedge S(h_k) \succ \succ s_c\}$ ； $Z^c(h_i) = \{s_j | s_j \in S(h_i) \wedge s_j \cong s_c\}$ ， $Z^c(h_i)$ 中的信号虽然可能不能匹配 s_c ，但却与 s_c 同构，其经过适当信号调理之后就可与 s_c 匹配了； G^c 为所有能与测点 c 同构的

仪器端口的集合, $G^c = \{h_k | h_k \in H \wedge S(h_k) \cong s_c\}$ 。

因此, 测点 c 与仪器端口 h 的匹配函数可定义为

$$M(c, h) = \begin{cases} e^{-x} \times R(h) \times Q(h) \times W(h) & |S^c(h)| > 0 \\ -1 & |S^c(h)| = 0 \wedge |Z^c(h)| > 0 \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

其中, x 为信号距离, $x = \min\{\|s_j - s_c\| | s_j \in S^c(h)\}$; $|S^c(h)|$ 为 $S^c(h)$ 的元素个数; $|Z^c(h)|$ 为 $Z^c(h)$ 的元素个数; $R(h)$ 为可靠性相对因子; $Q(h)$ 为成本相对因子; $W(h)$ 为操作复杂度相对因子, 它们的表达式分别为

$$R(h) = \frac{r(h) - \min_{h_i \in H^c} \{r(h_i)\}}{\max_{h_i \in H^c} \{r(h_i)\} - \min_{h_i \in H^c} \{r(h_i)\}}$$

$$Q(h) = \frac{\max_{h_i \in H^c} \{q(h_i)\} - q(h)}{\max_{h_i \in H^c} \{q(h_i)\} - \min_{h_i \in H^c} \{q(h_i)\}}$$

$$W(h) = \frac{\max_{h_i \in H^c} \{w(h_i)\} - w(h)}{\max_{h_i \in H^c} \{w(h_i)\} - \min_{h_i \in H^c} \{w(h_i)\}}$$

测点与仪器端口的匹配程度不仅取决于测点的信号属性和仪器的性能参数相近的程度, 还受到仪器可靠性、成本、操作复杂度等因素的制约。

5.4 资源配置策略

ATS 备选仪器的数量和性能对测点能否匹配到最合适的仪器至关重要。测点根据信号类型寻找合适的仪器, 测点在匹配仪器的过程中存在以下 3 种情况^[5]:

(1) 存在合适的仪器端口。当有多个仪器满足匹配要求时, 应当对各匹配仪器进行综合评价, 并给出选择列表以便选择最合适的仪器, 如式(1)的第 1 种情况。

(2) 仪器端口信号功能和类型匹配但不满足量程或范围要求。这时必须选择合适的信号调理模块进行适当的信号放大或衰减等, 如式(1)的第 2 种情况。

(3) 没有合适的仪器端口。这时只有增加新测试仪器或设计专用测试电路, 如式(1)的第 3 种情况。

在匹配过程中还应考虑测点之间的并行测试。要实现并行测试要对 UUT 的测试任务进行合理的分解, 找到可以并行测试的测点, 将能够实现并行测试的多个测试点同时引入到仪器端口, 并且仪器端口不冲突。

6 开关网络设计

开关网络包括 ATE 开关系统和 RTUA 中的一系列跨接线。在完成通用端口设计和测点与仪器端口的自动匹配后就可以进行适配器的开关网络设计。测点经通用端口映射到仪器端口的过程如图 3 所示。

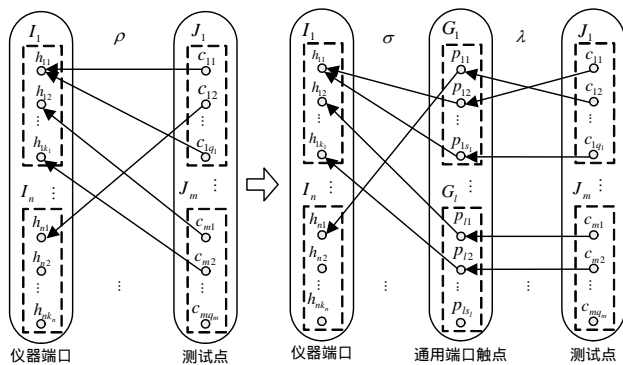


图 3 测点经通用端口映射到仪器端口的过程

设 ATS 备选仪器资源集为 $\{I_1, I_2, \dots, I_n\}$, 仪器 I_i 的端口集为 $\{h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{ik_i}\}$, k_i 为仪器 I_i 的端口总数, $i=1, 2, \dots, n$ 。UUT 测试端口集为 $\{J_1, J_2, \dots, J_m\}$, 端口 J_f 的测试点集为 $\{c_{f1}, c_{f2}, \dots, c_{fq_f}\}$, q_f 为端口 J_f 的测点总数, $f=1, 2, \dots, m$ 。RTUA 的通用端口集为 $\{G_1, G_2, \dots, G_l\}$, 端口 G_t 的触点集为 $\{p_{t1}, p_{t2}, \dots, p_{ts_t}\}$, s_t 为端口 G_t 的触点总数, $t=1, 2, \dots, l$ 。测点与仪器端口的匹配关系 $\rho \subseteq U \times R$, 其中, 前域 U 是所有 UUT 端口测点集合,

$$U = \bigcup_{i=1}^m J_i$$

陪域 R 是所有仪器端口集合,

$$R = \bigcup_{i=1}^n I_i$$

将 ρ 分解为 2 级关系的合成 $\rho = \lambda \times \sigma$, 且 λ, σ 满足如下条件:

(1) $\lambda \subseteq U \times D$, 陪域 D 是所有通用端口触点集合,

$$D = \bigcup_{i=1}^l G_i;$$

(2) $\sigma \subseteq D \times R$, 则 σ 即为所求开关网络的逻辑连接关系。

7 RTUA 内部硬件设计

7.1 总体架构

所有的测试资源均不直接与被测对象相连, 而是通过 RTUA 间接实现, 这样使得整个测试系统对于测试对象是透明的, 当被测对象发生改变时, 只需更换 RTUA 中的有关模块和配置文件, 而不必重新设计系统的硬件设备环境, 大大提高了系统的通用性和可扩展性。RTUA 采用“总线+调理模块”结构形式, 信号调理模块采用欧式标准, 可通过插件导轨、96 芯欧式插针与总线构成插拔结构。RTUA 总体架构如图 4 所示。

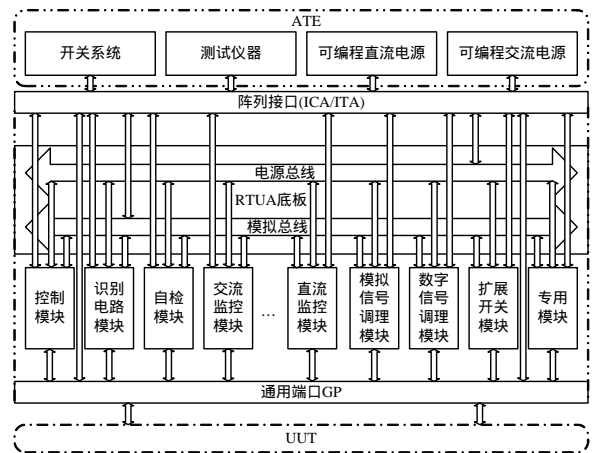


图 4 RTUA 总体架构

7.2 内部模块具体实现

RTUA 内部模块包括控制模块、交/直流监控模块、识别电路模块、自检模块、模拟信号调理模块、数字信号调理模块、扩展开关模块和一些专用模块等。限于篇幅, 本文只介绍控制模块的设计。

控制模块与上位机(测控计算机)进行实时通信, 根据上位机发送的命令进行各调理模块的配置、监控信息和参数的上传等, 可根据不同需要采用 RS232/422/485、USB 等总线实现。控制模块与其他模块之间的数据通信采用 SCI, SPI, I²C 等总线实现。

控制模块主要由控制器和接口电路组成。控制模块采用 SOPC 技术实现,其原理框图如图 5 所示。用硬件描述语言 Verilog HDL 建立各接口模型,然后使用 SOPC Builder 软件定制符合设计需要的 Nios II 软核处理器系统,再用 Quartus II 软件将 Nios II 处理器系统与接口的 Verilog HDL 模型一起编译综合,并下载到 FPGA 中,从而生成一个硬件系统。使用 Nios II IDE 来为此系统中的 CPU 开发系统软件并下载运行,最终得到一个完整的 SOPC 控制模块。

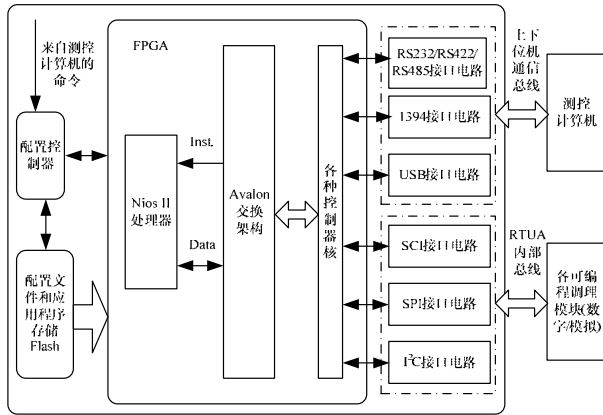


图 5 控制模块原理框图

在图 5 中,配置控制器根据上位机发来的命令从配置文件 Flash 存储器中调用相应的配置文件对 FPGA 进行配置。一般来说,先将被测对象进行分类,同种类型的被测对象其信号调理电路具有较大的共性,可采用一个配置文件。控制模块根据当前的被测对象类型采用 FPGA 重新配置的方式可以形成一个匹配的下位机环境。同时,通过上下机通信总线可以对信号调理模块实时编程配置以适应被测对象不同信号的测试需求,实现了硬件系统可重构和信号调理电路可复用,为被测对象的并行测试提供了有力的硬件支持。

8 RTUA 软件设计与实现

本文采用 Nios II IDE 进行 RTUA 软件开发。Nios II IDE 提供的硬件抽象层(HAL)系统库可以使上层应用程序方便地访问系统硬件,用户只要改变上层应用程序就可以实现对系统硬件的不同调用,从而改变系统的功能,达到重构的目的。RTUA 软件体系结构如图 6 所示。

HAL 系统库与 ANSI C 标准库一起构成 HAL 的运行环境。控制模块应用程序基于 HAL 开发,与测控计算机进行实时交互。测控计算机采用 COM 组件 RTUA_COM 对 RTUA 进行通信和配置管理等功能。基于 COM 规范,当 RTUA 需要升级改版时,如需添加新类型的插件板,只要增加新的 COM 接口即可,并且新接口可以不影响老接口的使用,可在不更新代码情况下继续使用老的接口,从而实现了软件组件功能重构,便于主测控软件的编写和管理。各外围设备的驱动也是基于 HAL 的。

在实际测试过程中,主测控软件先根据当前被测对象类型通过 RTUA_COM 组件调用合适的配置文件对 RTUA 进行配置,构建一个适合被测对象的 RTUA 下位机环境。下位机与上位机进行实时通信,下位机根据上位机发送的命令进行各调理模块的配置、监控信息和参数的上传等。

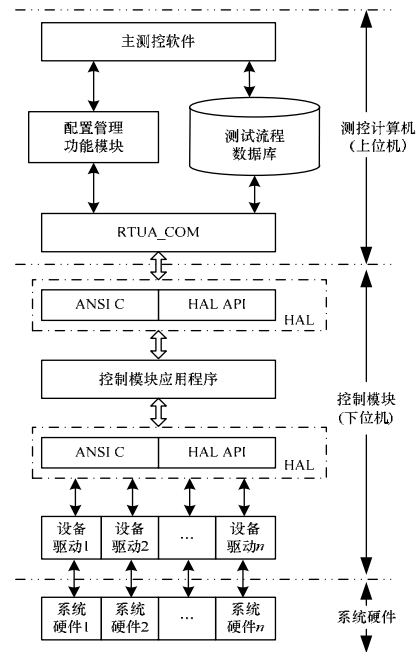


图 6 RTUA 软件体系结构

9 结束语

本文提出一种自动测试系统可重构测试接口适配器设计思想,与传统 TUA 设计相比,RTUA 的设计过程较复杂,但却实现了 TUA 的通用性和扩展性。采用 RTUA 可以减少适配器的数量、降低测试系统的构建成本,有效解决了资源专用和适配器重复开发问题。

参考文献

- [1] 李行善,左毅,孙杰.自动测试系统集成技术[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [2] 刘京威,曹原,郑全弟,等.基于 USB 总线技术的 ATS 信号调理平台硬件设计[J].微计算机信息,2005,21(7):6-8.
- [3] Sun Baojiang, Qin Honglei, Shen Shituan. An Automatic Design Technique for Hardware System of ATS[C]//Proceedings of AUTOTESTCON'06. New York, USA: [s. n.], 2006.
- [4] 陈粤,边泽强,孟晓风.基于信号参数集最小距离的并行测试任务调度算法[J].系统仿真学报,2006,18(9):2409-2411.
- [5] 孙宝江,秦红磊,胡文明,等.自动测试系统适配器自动设计技术[J].航空学报,2007,28(3):703-707.

编辑 顾姣健

(上接第 224 页)

参考文献

- [1] 罗佳.通信侦察测频接收机的建模与仿真[J].系统仿真学报,2006,18(10):2940-2944.
- [2] 王启峰.外差式接收机的动态性能分析[J].舰船电子工程,2007,27(6):61-63.

- [3] 徐明远,邵玉斌. Matlab 仿真在通信与电子工程中的应用[M].西安:电子科技大学出版社,2005.
- [4] 邵玉斌. Matlab/Simulink 通信系统建模与仿真实例分析[M].北京:清华大学出版社,2008.

编辑 张帆