

# ATML 测试资源与测试需求自动匹配方法研究

范书义, 姜会霞, 魏保华, 王 成  
(军械工程学院, 石家庄 050003)

**摘要:** 基于 ATML 测试描述文档自动生成测试程序过程中, 关键是实现测试资源与测试需求的自动匹配; 首先对 ATML 测试描述文档中测试能力、测试需求、开关、端口、能力与资源的映射等基本数据元素的表示方法进行分析研究, 定义了与其对应的 C++ 数据类型; 然后在研究图论相关理论的基础上, 分析了描述文档中测试路径的表示方法, 确定了采用邻接矩阵表示测试路径的方法; 最后, 在以上研究的基础上, 提出了以稀疏矩阵和单链表为基础的测试能力与测试需求匹配算法, 实现了测试能力与测试需求的自动匹配; 该算法在实际测试程序开发中得到了应用, 结果表明该算法能够实现基于 ATML 描述文档的测试资源与测试需求自动匹配, 并能极大提供测试程序开发效率。

**关键词:** ATML; 测试资源; 测试需求; 自动匹配

## Study of Test Resources and Test Requirements Automatic Matching Method in ATML

Fan Shuyi, Jiang Huixia, Wei Baohua, Wang Cheng  
(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** In the process of test program automatic generation based on ATML test description documents, the key is to realize the automatic matching of test resources and test requirements. Firstly, the basic data elements, such as ATML test ability, test requirement, switch, port, capability and resource mapping, are analyzed, and the corresponding C++ data types are defined. Then, based on the theory of graph theory, the representation method of the test path is analyzed, and the adjacency matrix is used to represent the test path. Finally, on the basis of above research, a test capabilities and test requirements matching algorithm based on sparse matrix and single linked list is proposed. The automatic matching of test capabilities and test requirements is realized. The algorithm has been applied to the development of real test program. The result shows that the algorithm can realize the automatic matching of test resource and test requirements based on ATML description documents. It also can greatly improve the efficiency of the test program development.

**Keywords:** ATML, test resource, test requirements, automatic matching

## 0 引言

在基于自动测试标记语言 (automatic test markup language, ATML) 中的测试描述文档自动生成测试程序过程中, 需要判定一个给定的测试系统能否对指定的 UUT 进行测试。如果测试系统有能力对指定的 UUT 进行测试, 还需要确定具备测试能力的测试仪器与被测 UUT 的之间是否有正确的线缆连接。

文献 [1] 和文献 [2] 通过分析 UUT Description 文档、Instrument Description 文档、Test Adapter 文档和 Test Description 文档, 以确定测试系统中配置的仪器是否满足测试需求。虽然两篇文献提供的方法都可以确定测试系统是否具有某种能力, 但均未涉及测试能力到被测 UUT 端口之间的映射, 因此不能判断测试能力与测试需求之间是否存在测试通路, 即不能判断测试能力是否能够连接到指定的 UUT 测试端口。

## 1 ATML 中的能力和测试需求描述

### 1.1 ATML 能力

ATML 中“能力 (Capabilities)”<sup>[3]</sup>的概念与日常生活中能力概念有所不同, 因为它既包含硬件的测试能力, 又包含测试需求。实际上可以这样理解 ATML 中的能力, 它能以某种方式将测试项目映射到测试仪器或测试系统上, 使得可以确定一个测试系统是否能执行指定的某项测试。为了与日常生活中的概念相一致和便于描述, 后面文章中提到的能力仅仅指测试硬件提供的测试能力, 而不包含测试需求, 而文中提到的测试需求指测试 UUT 时需要测试系统提供的测试能力。

ATML 通过对测试仪器可产生或可测量的信号的描述来表示测试仪器的能力, 通过对需施加给 UUT 的激励信号或需测量的 UUT 响应信号的描述来表示测试需求。

描述 ATML 能力需要的信息包括<sup>[4]</sup>:

- 需要产生的信号;
- 信号之间的同步;
- 信号施加的位置;
- 测试系统的拓扑结构;

收稿日期: 2015-11-19; 修回日期: 2015-12-14。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(61501493)。

作者简介: 范书义(1974-), 男, 河北灵寿人, 博士, 讲师, 主要从事自动测试系统方向的研究。

- 测试系统中每种测试仪器可产生的信号的类型、精度;
- 测试系统中每种测试仪器可测量的信号的类型、精度。

### 1.2 描述能力的主要元素

在描述 ATML 能力时, 用到的主要元素包括连接器 (Connector)、针脚 (Pin)、端口 (Port)、线缆连接 (Wire list) 和资源 (Resource), 为了便于理解, 首先对这些概念进行介绍。

连接器指硬件 (如 UUT、仪器、测试适配器、测试平台等) 的物理实体, 如 RS232 口、D 型口等。端口是一个逻辑实体, 它指的是可以映射到一个或一组信号的抽象接口, 信号可以流入或流出端口, 端口只是表示逻辑上的接口和接口信号的存在。连接器、针脚和端口之间的关系如图 1 所示。

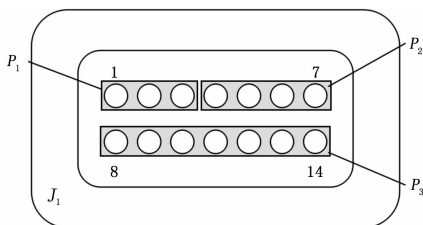


图 1 连接器、端口和针脚

图 1 中  $J_1$  为连接器,  $J_1$  包含 14 个针脚, 分为 3 个端口  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  (注意: 这里的端口是第二种类型的端口)。

资源指一个逻辑实体, 表示仪器的内在能力。在 ATML 中, 仪器能力是通过一组资源来描述的。一个仪器可以包含一个或多个资源, 而一个资源也可以对应一个或多个能力。ATML 中资源只是作为一个逻辑实体实现信号到端口的映射, 并且它还可以定义对信号的约束以及同一个仪器中不同能力之间的关系。

线缆连接用于描述 ATS 组件间的互连信息, 可以提供信号在 ATS 中的连接路径。线缆连接除了包含硬件之间的静态连接之外, 还包括针对每项具体测试的测试路径线缆连接, 利用这些信息可以生成测试图。

### 1.3 仪器能力和 ATML 测试需求描述

ATML 对仪器能力的描述是通过以下步骤实现的:

- 1) 定义仪器物理接口;
- 2) 定义仪器能力, 主要部分为信号定义;
- 3) 定义资源;
- 4) 将能力映射到资源;
- 5) 将资源接口连接到仪器接口。

通过以上步骤就可以将仪器的物理接口与信号连接在一起。

ATML 提供了 TestDescription. xsd 模式文档来描述测试需求。ATML 中的测试需求的主要部分是在 ATML 测试描述文档中利用 IEEE Std 1641 中定义的信号描述的。ATML 支持以下测试需求信息的描述:

- 信号类型, 如 AC\_SIGNAL;
- 信号角色, 包括 Source、Sensor 或 Monitor;
- 测量、监视或控制的信号属性, 如直流电压等;
- 信号属性值的范围、分辨率、精度;

- 信号同步关系;
- 与 UUT 针脚的信号连接。

## 2 ATML 测试资源能力与测试需求的匹配算法

### 2.1 测试设备与 UUT 间的互连

要实现 ATE 对特定 UUT 的测试, 需要将 UUT 连接到测试系统中, 大多数情况下还需要使用 ITA 来匹配 ATE 和 UUT 的连接。ATE、ITA 和 UUT 的连接示例如图 2 所示。

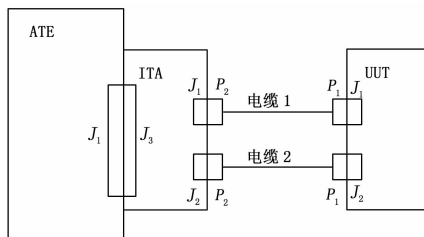


图 2 ATE、ITA 和 UUT 之间的互连

图 2 中的 UUT 有两个连接器  $J_1$  和  $J_2$ , 这两个连接器及其针脚信息在 ATML UUT 描述文档中定义。ITA 有 3 个连接器  $J_1$ 、 $J_2$  和  $J_3$ , 这 3 个连接器及其针脚信息在 ATML 测试适配器描述文档中定义。ATE 有一个连接器  $J_1$ , 它在测试平台描述文档中定义。连接 ITA 和 UUT 的两根电缆, 以及 ATE、ITA 和 UUT 的连接都是在 ATML 的 WireLists 描述文档中定义的。

此外, WireLists 模式文档中还定义了元素 TestWireList, 该元素用于定义 TestDescription 文档描述的每项测试的信号激励和测量路径<sup>[5]</sup>。该元素可用于生成测试程序的测试图, 测试图可以提供从测试平台仪器到 UUT 端口的完整路径。

### 2.2 基本数据结构定义

根据 ATML 能力描述, 可以判断 ATML 描述的测试系统是否能够对 UUT 进行测试, 其中包含对测试路径的判断。但 ATML 文档作为一种半结构化的数据表示方式, 检索非常不方便且处理速度慢。而在匹配 ATML 资源能力与测试需求时, 需要用到大量的检索操作, 所以直接访问 XML 格式的 ATML 文档显然不是一个合理的选择。所以需要将它们换成计算机方便检索的数据存储结构, 以方便计算机处理。

#### 2.2.1 连接器、端口、资源、针脚和物理接口

连接器、端口、资源、针脚和物理接口是具有关联关系的, 根据这些数据描述文档的特点, 宜采用 struct 类型表示, 它们的定义及其关系如图 3 所示 (篇幅所限, 图中没有给出每个 struct 类型的数据域名称和类型)。

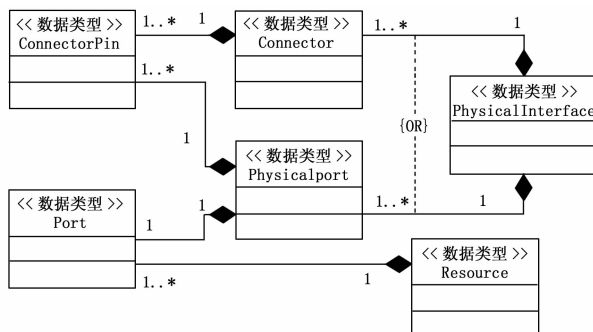


图 3 连接器、端口、资源、针脚和物理接口

### 2.2.2 信号和能力

ATML 中的能力表示采用了 IEEE Std 1641 中定义的信号。IEEE Std 1641 中基本信号组件库 (BSC) 和测试信号框架库 (TSF) 中 Signal 元素的定义分别如图 4 和图 5 所示。

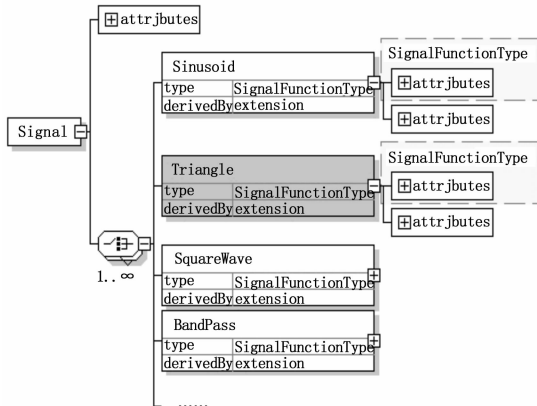


图 4 BSC 中的信号定义

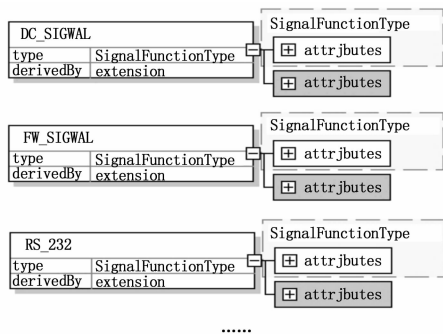


图 5 TSF 中的信号定义

比较两图可以看出，这两个库中信号的结构类似，所以可以定义一个统一的信号类型 `Signal` 表示这两个库中的信号，通过综合分析各种数据类型的特点和程序开发要求，将其定义为 `union` 类型比较合适，这样可以将所有信号统一用一个 `union` 类型定义即可，简化了数据类型的种类，方便了使用。

这些类型之间的关系如图 6 所示。无论是描述仪器、测试平台或测试适配器的能力，还是描述测试需求中的信号需求描述，只要是符合 IEEE Std 1641 规范，都可以采用上面定义的能力类型来表示。

### 2.2.3 能力、资源和仪器端口间的映射

能力、资源和仪器端口间的映射关系也需要相应的数据结构表示, 由于能力和资源之间、资源和仪器端口之间是多对多的映射关系, 并且能力和资源之间的映射可以有多种含义, 因

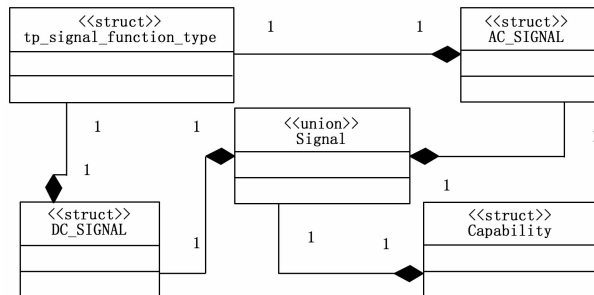


图 6 信号类型和能力类型

此数据结构不但要表示能力与资源之间的关联，还要表示关系的具体含义。

ATML 中能力、资源和仪器端口之间的映射采用了 XML 的 XPath 表达式, XPath 采用类似于 Window 操作系统文件目录的表示方式。能力与资源之间的映射可以采用邻接矩阵<sup>[6]</sup>的方式进行存储, 矩阵中值为 1 的位置表示对应的能力和资源有关联关系。典型万用表的各种能力和对应的万用表资源的邻接矩阵如表 1 所示。

从表 1 可以看出,表中的许多元素都为空,表明该矩阵是稀疏矩阵,这也说明一个能力端口只和一个或少数个资源端口之间有关联关系,对于稀疏矩阵来说,没有哪一种存储结构是最好的,应结合稀疏矩阵的具体情况来选择存储结构<sup>[7-8]</sup>。结合测试系统实际应用情况,选择 CSR 存储需要 19 个存储单元,如下所示:

存储 A 中值为 1 的元素的列坐标数组  $C = \{1, 3, 9, 11, 2, 4, 5, 7, 10, 12, 6, 8, 13, 14\}$ 。

存储 A 中每一行在数组 C 中起始元素序号的数组  $R = \{1, 5, 11, 14, 14\}$ 。

为了表示关联之间的具体含义，需要将表示矩阵的数组元素定义为 struct 类型，利用其中的数据域指明能力和资源之间的关系。实际上，只需区分当一种能力对应多种资源时，能力是否占用资源即可。

与此类似,资源与仪器端口之间的映射,测试平台、适配器内部线缆连接,ATE、ITA 和 UUT 间的连接及测试项目的测试通路同样适宜采用稀疏矩阵进行存储。

### 2.2.4 开关

自动测试系统中,为了复用测试仪器,不可避免地要使用开关。开关拓扑可根据复杂程度分成三类:简单继电器开关、多路开关和矩阵开关<sup>[9]</sup>。

无论对于哪种类型的开关，其针脚数量和可能的连接数量都是不确定的，所以定义的开关数据结构应能适应这种要求。因此，可以采用 C++ 支持的标准模板库（standard template library, STL）中的 `vector` 容器来存储针脚和可能的连接。最

表1 能力、资源邻接矩阵

[illegible]

---

终定义两种开关数据结构的类 C++ 代码如下所示。

```
typedef struct _switch_pin_conn{//定义开关两针脚的连接结构
string conn_description; //连接说明
string pin_from;
string pin_to;
}switch_pin_conn;
typedef struct _switch{ //简单继电器开关
vector<string> pin;
vector<switch_pin_conn> pins_conn; //存储开关节点的连接
状态
.....
}switch;

矩阵开关有可以是单线或多线矩阵开关, 可将多线矩阵开
关看作是多线单线矩阵开关。有的多路开关模块可以配置成多
种模式, 如果在测试系统中使用了多种配置方式, 应将不同的
配置方式看作是不同的资源。

typedef struct _matrix_switch{//矩阵开关
vector<string> rows;
vector<string> cols;
vector<switch_pin_conn> pins_conn; //存储当前开关节点的
连接状态
.....
}matrix_switch;
```

### 2.3 能力与测试需求匹配算法

定义数据结构之后, 还要根据数据结构设计合适的算法来实现 ATML 中描述的能力与测试需求之间匹配。能力与测试需求之间匹配的目的是要检查测试系统提供的测试能力是否能够满足测试需求。如果测试系统不能满足 UUT 的测试需求, 则表示该测试系统不能对指定 UUT 进行测试, 系统应给出相应的提示, 并停止测试程序的生成过程。

能力与测试需求的匹配包含两方面的内容, 一是能力的判断, 即测试系统提供的测试能力是否满足 UUT 的测试需求。二是路径的判断, 即满足 UUT 测试需求的能力与测试需求之间是否存在线缆连接。如果能力不能满足测试需求或不存在测试路径, 则表明测试系统提供的测试能力与 UUT 的测试需求不匹配, 则表示测试系统提供的测试能力与 UUT 的测试需求匹配, 测试系统能够对指定的 UUT 进行测试。

能力与测试需求匹配算法描述如下:

步骤 1: 检查测试系统的 ATML 描述文档是否完整, 如不完整, 则提示并退出程序;

步骤 2: 建立表示测试能力与资源、资源与仪器端口或测试设备端口之间映射关系的邻接矩阵。从测试平台描述文档、测试适配器描述文档、仪器描述文档、仪器实例文档中提取这些信息;

步骤 3: 建立表示 ATE、ITA 和 UUT 之间连接关系的邻接矩阵, 以及测试项目测试通路邻接矩阵。从 WireLists 描述文档中提取这些信息;

步骤 4: 建立测试系统能力链表 capLists 和 UUT 测试需求链表 reqLists。从测试平台描述文档、测试适配器描述文档、仪器描述文档、仪器实例文档、测试描述文档中提取这些信息;

步骤 5: 对于 reqLists 中的每一个测试需求 req, 根据线缆连接中测试项目线缆连接查找链表 capLists 中对应的测试能

力 cap;

步骤 6: 如果不能找到满足当前 req 的测试能力, 则返回匹配不成功, 程序退出;

步骤 7: 如果找到了满足当前测试需求 req 的测试能力 cap, 则返回匹配成功, 程序退出。

以上步骤中关键的两点是判断测试能力能否满足测试需求和查找能力映射到的物理端口与测试需求物理端口之间的物理通路。

测试能力能否满足测试需求的判断比较简单, 此处不再赘述。能力映射到的物理端口与测试需求物理端口之间的物理通路实际上构成了一个图, 所以可以应用离散数学中图论<sup>[10]</sup>的相关知识来考察测试能力到测试需求间的可达路径。文献 11 讨论了几种常见的由邻接矩阵求图的可达矩阵<sup>[10]</sup>算法, 也就是图中任意两个顶点之间是否存在通路的算法, 其中效率最高的是 Warshall 算法。

## 3 结论

本文结合 ATML 测试描述文档及测试程序自动生成的相关要求, 定义了 ATML 文档中相应元素的数据存储结构。在此基础上, 结合图论相关知识设计了测试能力与测试需求的匹配算法。该算法在我院研制的通用机电检测平台测试程序自动生成过程中得到了应用, 节约测试程序开发时间成本达 70%, 体现出了巨大优势, 证明了算法的有效性和正确性。本文提出的匹配算法也可以为其它类似研究提供方法指导。

### 参考文献:

- [1] John Ralph. A proposed comprehensive architecture utilizing the automatic test Markup language (IEEE 1671 and 1636. 1) [A]. IEEE AutoTestCon [C]. 2007: 179-185.
- [2] Pirker—Frühauf A. A knowledge—based test program following the ATML Standard [A]. IEEE AutoTestCon. [C]. 2009: 195-199.
- [3] IEEE Std 1671—2010. Standard for Automatic Test Markup Language (ATML) for Exchanging Automatic Test Equipment and Test Information via XML [S]. 2011, 01.
- [4] IEEE Std 1671. 2. Trial—Use Standard for Automatic Test Markup Language (ATML) for Exchanging Automatic Test Equipment and Test Information via XML; Exchanging Instrument Descriptions [S]. 2008, 12.
- [5] IEEE Std 1671. 5. Trial—Use Standard for Automatic Test Markup Language (ATML) for Exchanging Automatic Test Equipment and Test Information via XML, Exchanging Test Adapter Information [S]. 2008, 12.
- [6] 严蔚敏, 吴伟民. 数据结构 (C 语言版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [7] 张永杰, 孙 秦. 稀疏矩阵存储技术 [J]. 长春工业大学学报, 2006, 29 (3): 38-41.
- [8] Smailbegovic F, Georgi N, Vassiliadis G S. Sparse matrix storage format [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2005 (4): 445-448.
- [9] 测试系统信号开关 [EB/OL]. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/988-8627CHCN.pdf>. 2005.
- [10] 耿素云, 屈婉玲. 离散数学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [11] 王欣欣, 李金保. 关于由邻接矩阵求可达性矩阵的方法 [J]. 吉林化工学院学报, 2005, 22 (4): 89-93.