

# 基于设备生命周期 Petri 网的 WIA-PA 协议一致性测试方法

孙亮<sup>1,2</sup>, 梁炜<sup>1</sup>, 王恺<sup>1</sup>, 张思超<sup>1</sup>, 苗乔木<sup>3</sup>

1. 中国科学院沈阳自动化研究所网络化控制系统重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 天津大学计算机科学与技术学院, 天津 300072

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174026,61202418).

通信作者: 梁炜, weiliang@sia.cn 收稿/录用/修回: 2014-12-22/2015-03-24/2015-04-15

## 摘要

针对传统分层协议测试方法面对 WIA-PA 跨层协议栈架构、混合拓扑结构等情形存在重复测试、测试集不完备等问题, 提出了基于设备生命周期 Petri 网的 WIA-PA 协议一致性测试集生成方法. 针对 WIA-PA 设备从加入网络到离开网络的整个生命周期, 建立 Petri 网模型; 并利用可覆盖性图进行动态特征分析, 进而抽取 WIA-PA 的一致性测试集. 该文设计并开发了 WIA-PA 协议一致性测试平台, 基于该平台比较了分层测试方法和基于设备生命周期的测试方法, 对比结果显示了所提方法的有效性.

## 关键词

WIA-PA 协议  
一致性测试  
Petri 网  
测试平台  
中图分类号: TP273.<sup>+</sup>2  
文献标识码: A

## WIA-PA Protocol Conformance Testing Method Based on Petri Net Model for Device Life Cycle

SUN Liang<sup>1,2</sup>, LIANG Wei<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, ZHANG Sichao<sup>1</sup>, MIAO Qiaomu<sup>3</sup>

1. Key Laboratory of Networked Control Systems, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;  
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;  
3. School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 3000072, China

## Abstract

The problems associated with the traditional layered protocol conformance testing method include repetitive and incomplete testing when confronted with the cross-layer stack architecture and hybrid topology of the WIA-PA communication standards. We propose a new WIA-PA conformance testing method based on the Petri-net model for device life cycles. The Petri-net model was established to cover the entire device life cycle, from the time of configuration, to operation, and decommissioning. We analyze its dynamic features using a coverability graph, and then extract the WIA-PA test suites. We also design and develop a WIA-PA conformance test platform, and verify the efficiency of the proposed method by comparing its results with those of the traditional layered conformance testing method.

## Keywords

WIA-PA protocol;  
conformance testing;  
Petri net;  
testing platform

## 1 引言

无线技术具有低成本、易使用、易维护等优点, 使得以较低投资和使用成本实现“泛在感知”和“全流程优化控制”的工业测控系统成为可能, 已成为工业测控和无线领域新的研究热点. 美国能源部(DOE)曾指出: 这种基于工业无线网络的低成本测控系统代表着工业自动化系统技术的发展方向, 在石化、冶金、污水处理等高耗能、高污染行业有着广泛的应用前景<sup>[1]</sup>.

我国研制的具有自主知识产权的 WIA-PA 工业无线网络协议标准是与 Wireless HART、ISA100.11a 并列的 IEC 正式国际标准<sup>[2-5]</sup>. 国际知名咨询机构 IMS Research 在

2011 年发布的市场分析报告中预测, 未来 5 年 WIA-PA 技术的市场规模将以每年超过 150% 的速度快速增长.

由于网络协议通常是以自然语言描述的文本, 协议实现者对于同一标准的不同理解会导致相同标准的不同甚至是错误实现. 这些错误将导致不同设备提供商所开发的产品无法实现互联、互通和互操作. 为此, 协议测试是标准应用和推广的前提.

协议测试一般采用黑盒测试的思想<sup>[6]</sup>, 包括一致性测试、互操作性测试、性能测试和健壮性测试 4 个方面. 其中, 一致性测试是最基本的测试内容, 是其它测试的基础.

目前, 最为成熟的协议一致性测试规范是国际标准化组织 ISO 制定的 ISO/IEC 9646 标准. ISO/IEC 9646 标准用

自然语言描述了基于 OSI 7 层参考模型的协议一致性测试过程、概念和方法<sup>[7]</sup>。由于 ISO/IEC 9646 侧重于测试通用性,其中定义的测试框架未考虑被测协议的特点,对特定协议的测试缺乏具体的指导。为此,出现了大量针对具体协议的测试方法和测试规范<sup>[8-11]</sup>。

随着 WIA-PA 标准成为中国国家标准(GB/T 26790.1-2011)和 IEC 国际标准(IEC 62601),针对 WIA-PA 协议测试的研究逐渐涌现。文[12-14]研究针对 WIA-PA 协议的分层测试框架以及原语测试集的分类方法。文[15-16]研究一致性测试平台的搭建与实现,并给出了部分测试用例。目前针对 WIA-PA 一致性测试的相关研究存在以下问题:

(1) WIA-PA 协议栈采用跨层架构,传统的分层测试方法存在重复测试率高、测试效率低、完备性不足和部分测试用例无法执行的问题。

(2) 由于 WIA-PA 标准定义了网状和星型混合的两层拓扑结构,现有测试方法无法覆盖这种复杂拓扑结构的不同场景,导致测试集不完备。

(3) 目前没有一套完善的 WIA-PA 协议测试系统,测试过程缺乏平台支撑。

针对上述问题,本文提出了一种基于设备生命周期 Petri 网的 WIA-PA 协议一致性测试方法,设计开发了 WIA-PA 协议的一致性测试平台,并在该平台上验证了本文所提方法的有效性。

## 2 WIA-PA 概述

WIA-PA 标准中定义的关键设备包括:现场设备、路由设备和网关设备。

●现场设备(field device, FD):安装在工业现场,连接或者控制生产过程的设备,包括无线传感器、执行器和控制器。

●路由设备(routing device, RD):网络中完成管理现场设备和转发报文等功能的设备。

●网关设备(GateWay device, GW):负责连接 WIA-PA 网络与其它工厂网络的设备。

WIA-PA 支持两种拓扑结构:一种是现场设备直接与网关设备连接构成的星型结构;一种是如图 1 所示的网状和星型混合的两层拓扑结构(第 1 层网状结构,由网关设备和路由设备组成;第 2 层星型结构,由路由设备、现场设备或手持设备构成)<sup>[4]</sup>。

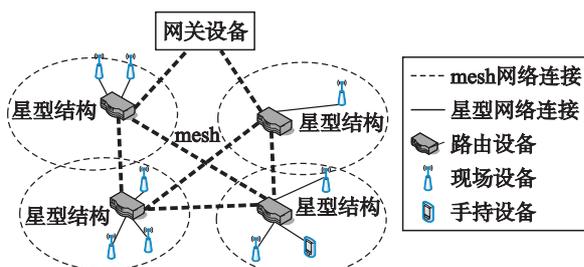


图 1 WIA-PA 网状和星型结合的拓扑结构

Fig.1 WIA-PA topology combination of star and mesh

如图 2 所示, WIA-PA 采用跨层协议栈架构。尽管 WIA-PA 在 IEEE STD 802.15.4 物理层技术上定义了数据链路层、网络层和应用层,但负责 WIA-PA 系统管理功能的设备管理应用进程(device management application process, DMAP)采用跨层架构,可同时与各协议层进行交互。DMAP 是每个设备中完成系统管理功能的实体,包括网络管理模块、安全管理模块和管理信息库模块(management information base, MIB)。WIA-PA 的 DMAP 实现跨层管理,改进了协议栈效率和最优性。图 2 中灰色区域的应用层,由用户自定义。灰色部分的 DMAP 不在测试集生成中体现。

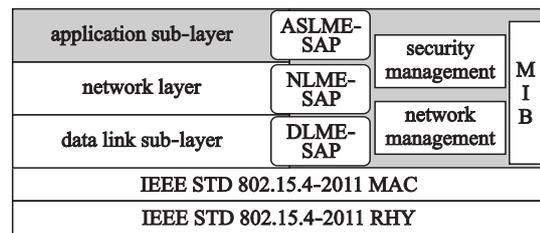


图 2 WIA-PA 的跨层架构

Fig.2 Cross-layer architecture in WIA-PA protocol

## 3 基于 Petri 网的 WIA-PA 协议一致性测试集生成方法

### 3.1 WIA-PA 协议一致性测试架构

不同的拓扑结构和网络场景将生成不同的测试集。根据 WIA-PA 协议定义的网状和星型混合的两层拓扑结构,将测试过程划分为 4 类子拓扑予以考虑,如图 3 所示,分别为:(1) 网关设备—现场设备;(2) 网关设备—路由设备;(3) 网关设备—路由设备—现场设备;(4) 网关设备—路由设备—路由设备。

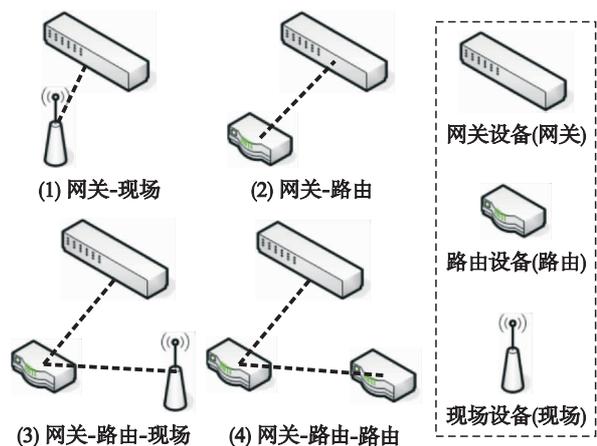


图 3 WIA-PA 一致性测试模拟的具体场景

Fig.3 Specific test scenarios of WIA-PA conformance test

### 3.2 基于 WIA-PA 设备生命周期的 Petri 网模型

针对前文所述的 WIA-PA 协议的一致性测试方法存在的问题,本文对 WIA-PA 设备从加入网络、在网运行到离开网络的全过程,建立 Petri 网模型。然而,不同 WIA-PA

设备具有不同的生命周期模型, 且不同的测试场景也会产生不同的测试集. 本文按照 WIA-PA 设备类型对一致性测

试集进行分类, 每一类对应设备的使用寿命以及对应的测试场景, 具体分类如图 4 所示.

测试集					
现场设备		路由设备		网关设备	
生命周期	测试场景	生命周期	测试场景	生命周期	测试场景
加入过程 运行过程 离开过程	网关—现场 网关—路由—现场	加入过程 运行过程 离开过程	网关—现场 网关—路由—现场 网关—路由—路由	运行过程 离开过程	网关—现场 网关—路由 网关—路由—现场 网关—路由—路由

图 4 基于 WIA-PA 设备生命周期一致性测试集分类

Fig.4 Classification of WIA-PA protocol conformance testing based on life cycle

### 3.2.1 Petri 网模型

基于 3.1 节 WIA-PA 协议一致性测试场景, 本文将分别模拟这 4 种场景生成测试集. 本文以“现场设备和网关设备直接相连的星型拓扑结构”测试场景下的现场设备为例, 介绍其测试方法, 并在附录给出基于协议栈分层的 WIA-PA 一致性测试方法, 用于比较研究.

测试集中的测试用例是根据测试序列构造的. 测试序列是指在 Petri 网中, 在设定最大自循环次数的基础上, 起始于初始库所, 终止于初始库所或者终止库所的一条有向路径.

本文所提基于生命周期的 Petri 网模型就是以现场设备从加入网络, 到运行, 再到离开网络的生命周期为行为主线, 建立 Petri 网模型. 建成后的 Petri 网模型如图 5 所示, 该 Petri 网模型中库所和变迁的具体含义如表 1 所示. 从中可知各部分状态和转换之间的逻辑关系, 具体由 4 个部分构成:

●第 1 部分为现场设备通过扫描信道, 进行时间同步后, 加入网关设备的行为.

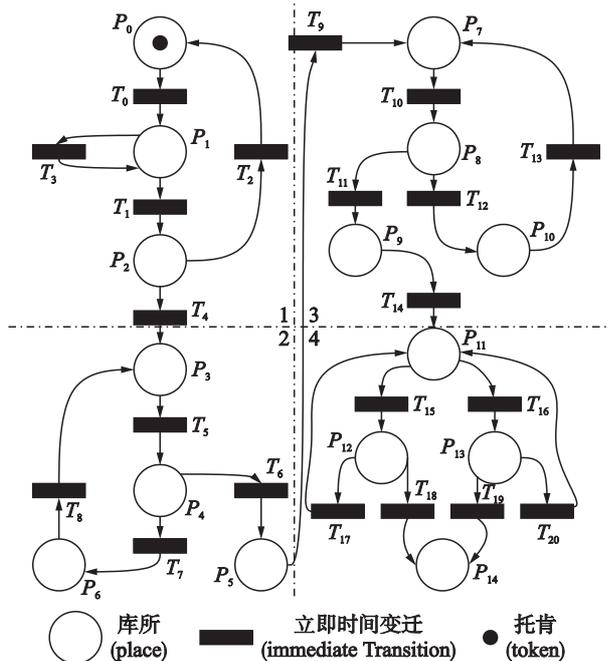


图 5 WIA-PA 现场设备生命周期 Petri 网模型

Fig.5 Petri net model of field device of WIA-PA based on life cycle

●第 2、3 部分为网关设备为现场设备分配通信资源的行为, 包括链路分配和超帧分配, 随后进入正常运行过程.

●第 4 部分为现场设备离开网络的行为, 包括主动离开过程和被动离开过程.

图 5 中的 Petri 网模型, 由于每次只允许有一个变迁点火, 所以 Petri 模型中只有一个 token. 附录中的 Petri 网 token 数量, 与此模型相同.

### 3.2.2 可覆盖性图

利用可覆盖性树的建立方法<sup>[14]</sup>, 构造本文 Petri 网模型的可覆盖性树. 在可覆盖性树的基础上, 合并相同的状态节点(State)之后, 得到如图 6 所示的可覆盖性图. 根据 Petri 网的可达性定义, 表 1 中存在变迁序列  $T_0, T_1, \dots, T_{20}$  和标识序列  $P_0, P_1, \dots, P_{14}$ , 使得变迁序列在初始标识  $P_0$  发生后, 能得到最终标识  $P_{14}$ , 故该 Petri 网是可达的. 由所建立的可覆盖性图可知, 模型中的全状态均可达, 可以用于抽取一致性测试集.

### 3.2.3 测试集生成算法

本文在可覆盖性图遍历<sup>[17-18]</sup>的基础上, 提出了一种基于 WIA-PA 设备生命周期 Petri 网的测试集生成算法.

对于本文所述的安全 Petri 网<sup>[19]</sup>, 即 Petri 网模型中所有库所的容量不超过 1, 用  $P_N = (P, T, F, M_0)$  表示, 其中  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  为库所集合, 其中  $n$  为库所总数;

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  为变迁集合 ( $P \cap T = \emptyset, P \cup T \neq \emptyset$ ), 其中  $m$  为变迁总数;

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  为流关系 (关系弧);

$M_0$ : 为初始标识向量 (状态)<sup>[18]</sup>. 若使用  $E_t$  表示变迁  $t$  的使能标识集的特征函数, 即

$$E_t = \prod_{p_i \in \cdot t} p_i \prod_{p_j \in t \cdot} \bar{p}_j$$

在标识  $M$  下使能迁移  $t$  的迁移函数  $\delta^t$  将每个属于  $E_t$  的标识  $M$  变为新的标识  $M'$ , 定义为

$$M' = \delta^t(M) = \begin{cases} 1 & \text{若 } p_i \in \cdot t \\ 0 & \text{若 } p_i \in t \cdot \\ p_i & \text{其它} \end{cases}$$

由图 5 可以看出, 本文所涉及的标识集中, 没有两个并发变迁  $t$  的情况. 在迁移函数  $\delta^t$  导出中, 求一个标识集下由于迁移  $t$  引发而得到的可达标识集的运算, 称作 *img* 运算, *img* 运算可表达为

表 1 现场设备生命周期的 Petri 网说明表  
Tab.1 Petri net interpretation of field device life cycle

状态(库所)	行为(变迁)
$P_0$ : 初始化 Scanning 状态	$T_0$ : 接收到网关 Beacon 信标帧
$P_1$ : Synchronizing 状态, 发送 Joining Request 加入请求	$T_1$ : 接收到应答 ACK
$P_2$ : 接收到 ACK, 等待加入响应	$T_2$ : 接收到错误加入响应 Joining Response: FAILURE
$P_3$ : 成功加入, Joined 状态	$T_3$ : 超时重传
$P_4$ : 回应 ACK	$T_4$ : 接收到正确加入响应 Joining Response: SUCCESS
$P_5$ : 接收到超帧配置响应 SUCCESS, 等待 ACK	$T_5$ : 接收到网关发出的超帧配置请求
$P_6$ : 接收到超帧配置响应 FAILURE, 等待 ACK	$T_6$ : 现场设备发送超帧配置响应 SUCCESS
$P_7$ : 成功配置超帧	$T_7$ : 现场设备发送超帧配置响应 FAILURE
$P_8$ : 回应 ACK	$T_8$ : 接收到应答 ACK
$P_9$ : 接收到链路增加响应 SUCCESS, 等待 ACK	$T_9$ : 接收到应答 ACK
$P_{10}$ : 接收到链路增加响应 FAILURE, 等待 ACK	$T_{10}$ : 接收到网关发出的链路增加请求
$P_{11}$ : 成功完成链路增加, 加入全状态完成	$T_{11}$ : 现场设备发送链路增加相应 SUCCESS
$P_{12}$ : 现场设备被动离开, 向网关发送离开响应	$T_{12}$ : 现场设备发送链路增加相应 FAILURE
$P_{13}$ : 现场设备主动离开, 等待网关离开响应	$T_{13}$ : 接收到应答 ACK
$P_{14}$ : 现场设备成功离开网关设备	$T_{14}$ : 接收到应答 ACK
	$T_{15}$ : 现场设备接收离开请求
	$T_{16}$ : 现场设备发送离开请求
	$T_{17}$ : 接收到被动离开响应 SUCCESS
	$T_{18}$ : 接收到主动离开响应 SUCCESS
	$T_{19}$ : 接收到主动离开响应 FAILURE
	$T_{20}$ : 接收到被动离开响应 FAILURE

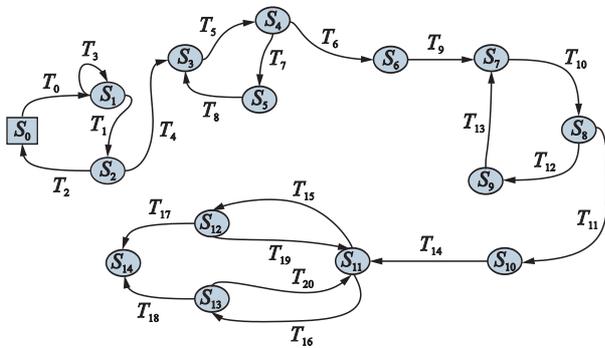


图 6 可覆盖性图  
Fig.6 Coverability graph

$M_2 = img(M_1, t) = \{M_2 \mid \exists M_1 \in M_1 \wedge E_t, \delta'(M_1) = M_2\}$   
标识集  $M$  下一步能到达的标识集, 即可达标识集为

$$\Delta(M) = \sum_{t \in T} (img(M, t))$$

标识集  $M$  的可达标识集  $\Delta(M)$  可通过基于  $img$  运算的符号遍历算法求出. 该算法在宽度优先搜索算法的基础上, 引用贪婪链技术实现了求可达标识集的计算, 即每次计算都是求一个标识集的可达标识集, 而不是求某个标识的可达标识, 进而减少了生成 Petri 网所有可达标识集的运算次数<sup>[20]</sup>. Petri 网的符号遍历算法:

```

TraversalAPetriNet ( $P_N = (P, T, F, M_0)$ )
{
for (Start = Get =  $\{M_0\}$ ; Left != 0; Get = Get + Left)

```

```

    for each  $t \in T$  do
        Start = Start +  $img(Start, t)$ ;
        Left = Start - Get;
        Start = Left;
    end for
}
end for
return Get; //  $M_0$  的可达标识集
}

```

### 3.2.4 抽象测试集

TTCN (tree and tabular combined notation), 即数表结合的标识方法, 用来描述抽象测试集及定义测试系统和被测系统协议实现的行为. TTCN 可以提供一种能将抽象测试集标识为标准化测试集的方法和一种独立于测试方法及协议层的标识方法<sup>[21]</sup>, 并能清楚地反应抽象测试集的层次结构. 故本文采用 TTCN 表示抽象测试集. 由可覆盖性图抽取出的抽象测试集如表 2 所示.

抽象测试集的 TTCN 如图 7 所示.

针对以上现场设备从加入网络到离开网络全过程的抽象测试序列说明如下:

- 一致性测试集中的每个测试序列, 可以对应一个或多个测试用例. 例如测试用例  $TS_{11}$ , 包含的测试用例为  $S_0 T_0 S_1 T_1 S_2 T_2 S_0$ .

- 对每个测试序列可以进行具体描述, 并根据序列描

表 2 抽象测试集  
Tab.2 Abstract test suit

测试集	
第 1 部分	$TS_{11} = S_0 T_0 S_1 T_1 S_2 T_2 S_0$
	$TS_{12} = S_0 T_0 S_1 T_1 S_2 T_4 S_3$
	$TS_{13} = S_0 T_0 S_1 T_3 S_1$
第 2 部分	$TS_{21} = S_3 T_5 S_4 T_7 S_5 T_8 S_3$
	$TS_{22} = S_3 T_5 S_4 T_6 S_6 T_9 S_7$
第 3 部分	$TS_{31} = S_7 T_{10} S_8 T_{12} S_9 T_{13} S_7$
	$TS_{32} = S_7 T_{10} S_8 T_{11} S_{10} T_{14} S_{11}$
第 4 部分	$TS_{41} = S_{11} T_{15} S_{13} T_{17} S_{14}$
	$TS_{42} = S_{11} T_{16} S_{12} T_{18} S_{14}$
	$TS_{43} = S_{11} T_{16} S_{12} T_{19} S_{11}$
	$TS_{44} = S_{11} T_{15} S_{13} T_{20} S_{11}$

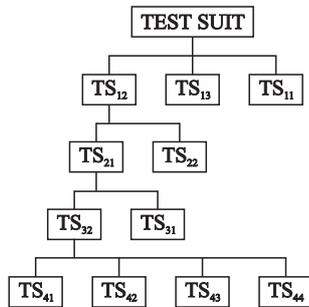


图 7 基于设备生命周期的测试集的数表结合的标识方法  
Fig.7 TTCN of test sets based on device life cycle

述进行测试用例划分. 具体划分方法可以根据实际情况进行. 例如, 对  $TS_{13} = S_0 T_0 S_1 T_3 S_1$ , 可以描述为: 现场设备初始化 Scanning 状态; 收到 Beacon 信标帧后发送加入请求; 现场设备未收到加入响应, 超时重传, 回到状态  $S_1$ ,  $TS_{13}$  结束.

### 4 实验验证

在建立 Petri 网模型并抽取一致性测试集之后, 本文设计并开发了 WIA-PA 协议一致性测试平台, 利用重复执行指数和有效执行率对一致性测试集的选取进行性能上的评估和比较.

#### 4.1 测试平台设计与开发

测试平台的整体架构如图 8 所示, 包括用户交互模块、测试集内部解释执行模块、通信前端交互模块以及测试集支持模块. 其中用户交互模块、测试集内部解释执行模块以及测试集支持模块全部在 Linux 上位机上开发. 测试前端交互模块的实现采用 MSP430 平台的无线通信模块, 选用 TIChipcon CC2420 作为无线射频芯片.

- (1) 用户交互模块: 用于测试人员定义测试相关的人机交互功能.
- (2) 测试集内部解释执行模块: 用于执行测试集, 并根据被测设备的表现, 进行一致性分析.
- (3) 测试前端交互模块: 用于和被测设备进行 RF (radio frequency) 信息交互, 并实现测试主机与被测设备之间的信息传递.
- (4) 测试集支持模块: 包括规则库和一致性测试集, 提供 WIA-PA 标准支持.

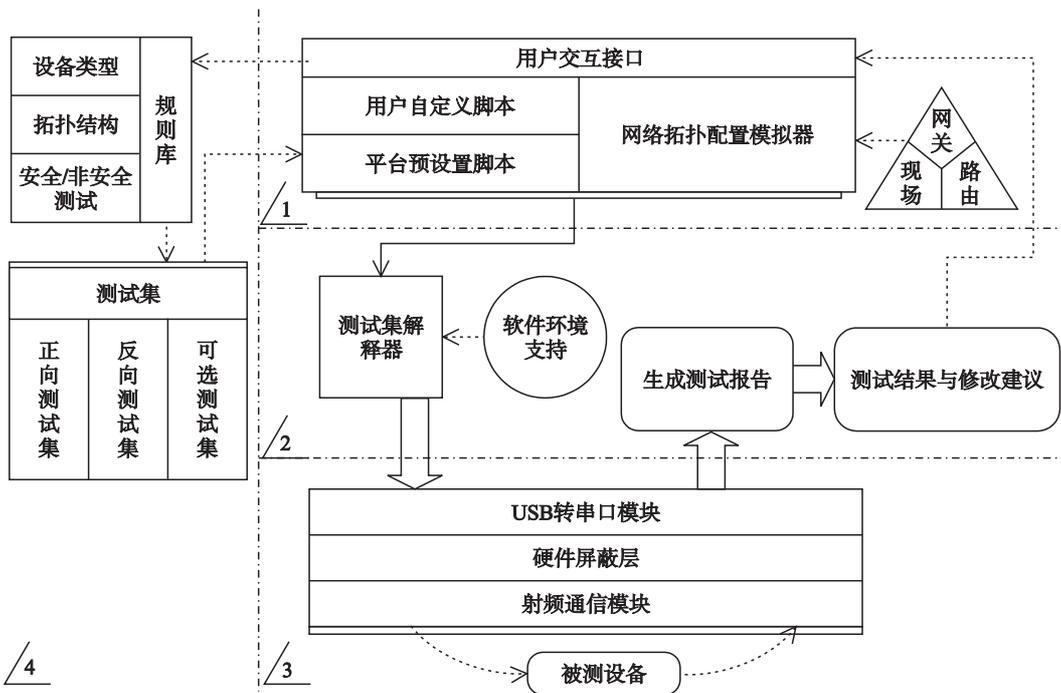


图 8 WIA-PA 一致性测试测试平台总体设计框架  
Fig.8 Framework of WIA-PA conformance testing platform

## 4.2 评价指标

本文定义了重复执行指数和有效执行率两个性能评价指标。

**重复执行指数:** 用于表征所生成测试用例的重复执行程度。具体定义为: 在根据 Petri 网建立模型的基础上而抽象出测试集的过程中, 单个状态和变迁出现的总数与测试集总数的比值越大说明单个状态或变迁在一致性测试中的重复度越高, 也就是重复执行测试用例越多, 测试效率越低。状态重复指数  $\bar{P}$  定义为

$$\bar{P} = \sum_{i=0}^m \frac{S_i}{N} + \sum_{j=0}^n \frac{T_j}{N} \quad (1)$$

其中,  $S_i$  表示 Petri 网模型中的库所,  $T_j$  表示 Petri 网模型中的变迁,  $N$  表示测试集总数。

**有效执行率:** 用于表征所生成测试用例集的测试难度和可测试性。在无线协议测试中, 双方收发报文是测试的基本依据, 生成的测试用例是否有报文收发直接决定测试难度, 甚至是否可测试。有效执行率定义为测试集生成交互报文总数与状态变迁总数的比值。比值越大, 说明所生成测试集更易于进行测试。有效覆盖率  $\eta$  的定义为

$$\eta = \frac{W}{M} \quad (2)$$

其中,  $W$  表示测试报文的总数,  $M$  表示状态和变迁总数。

## 4.3 实验结果

基于所开发 WIA-PA 一致性测试平台, 本文比较了所提方法和分层测试方法的重复执行指数和有效执行率, 如表 3 所示。

表 3 测试性能对比结果  
Tab.3 Results of performance test

测试方法	重复执行指数	有效执行率/%
基于协议分层测试	9.58	50.00
基于生命周期测试	5.72	86.11

本文所提方法在测试重复指数和有效执行率方面优于分层测试方法, 原因在于:

WIA-PA 的跨层设计协议栈导致分层测试过程中出现层间反复调用问题, 增加了测试用例重复执行率。例如, 在基于协议分层的测试中, 参见附录中的分层模型, 分层模型当数据链路层(DLL)测试运行至  $S_3$  状态时(见图 12), 测试需要跨层调用网络层(NL)测试集  $TS_5$ (见图 9), 重复调用次数与  $S_3$  状态被调用次数相同, 从而造成重复测试用例增多导致重复执行指数过高。

WIA-PA 的跨层设计协议栈以及复杂的拓扑结构等因素, 使得分层测试方法所生成用例存在无报文收发的现象, 从而导致用例的有效执行率低。例如, 附录的基于分层的抽象测试集中, 能够生成实际测试报文的状态集合为  $W = W_{NL} + W_{DLL}$ ,  $W_{NL} = \{T_0, T_1, T_2, T_7, T_8\}$ ;  $W_{DLL} = \{T_0, T_1, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}, T_{11}\}$ 。生命周期测试集中可转换状态集合  $W = \{P_1, P_2, P_4, P_5, P_6, P_8, P_9, P_{10}, P_{12}, P_{13}, T_0, T_1, \dots, T_{20}\}$ 。

## 5 结束语

本文针对 WIA-PA 协议一致性测试过程中测试集生成重复率高、执行率低的问题, 提出了基于设备生命周期 Petri 网的 WIA-PA 一致性测试方法; 设计并开发了一致性测试平台, 依据所定义的重复执行指数和有效执行率两个性能指标, 对所提方法与分层测试方法进行了比较, 验证了所提方法的有效性。下一步拟开展如下工作: 首先, WIA-PA 协议采用了 CSMA(carrier sense multiple access)和 TDMA(time division multiple address)混合接入机制, 对 TDMA 测试流程的分析必然要引入时间变量, 拟建立时间 Petri 网以更好地描述时间特性<sup>[22]</sup>; 其次, 尽管本文方法保证了测试完备性和高效性, 但仍然存在测试用例重复执行的问题, 如何生成最小测试集也是未来的研究方向之一。

## 附录

### A 基于协议栈分层的 WIA-PA 协议一致性测试集

WIA-PA 协议的 MAC 层和物理层基于 IEEE 802.15.4 标准, 在此基础之上定义了数据链路层和网络层, 为此本文将利用分层 Petri 网对以上两层分别进行建模。

#### A.1 网络层

WIA-PA 网络层(NL)实现网络层管理功能, 配置和控制网络层操作。网络层的主要功能包括寻址、路由、通信资源分配、网络层数据包生存周期管理、设备加入和离开管理等。

##### A.1.1 Petri 网模型

根据 WIA-PA 协议的具体规定和本文假定的测试场景, 建立 Petri 网模型如图 9 所示, 具体含义见表 4。

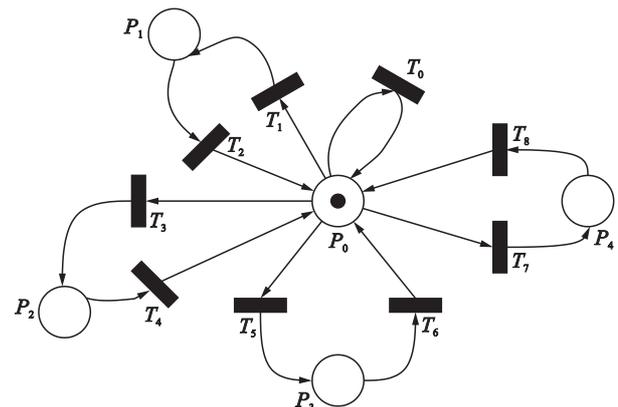


图 9 现场设备网络层 Petri 网模型  
Fig.9 Petri net model of field device NL

##### A.1.2 可覆盖性图

根据所建立的 Petri 网模型, 构造对应的可覆盖性树<sup>[21]</sup>。在此基础上, 合并可覆盖性树中相同的状态节点之后, 得到如图 10 所示的可覆盖性图。由所建立的可覆盖性图可知, 模型中的全状态均可达, 可用于抽取一致性测试集。

表 4 现场设备网络层 Petri 网含义表  
Tab.4 Interpretation of FD Petri Net of NL

库所	变迁
$P_0$ : 空闲状态	$T_0$ : 收到 DLL-DATA.indication 原语
$P_1$ : 数据传输状态	$T_1$ : 收到 NLDE-DATA.request() 原语或 DLL-DATA.confirm() 原语
$P_2$ : 加入状态	$T_2$ : 发送 NLDE-DATA.confirm() 原语到应用层并发送 DLDE-DATA.request() 原语
$P_3$ : 离开状态	$T_3$ : DMAP 发送 NLME-JOIN.request/response()
$P_4$ : 通信资源配置状态	$T_4$ : 发送 NLME-JOIN.confirm() 原语到 DMAP
	$T_5$ : DMAP 发送 NLME-LEAVE.request/response() 原语
	$T_6$ : 发送 NLME-LEAVE.indication/confirm() 到 DMAP
	$T_7$ : 接收到 NLME-ADD/UPDATE/DELETE_TOUTE.request() 或 NLME-ADD/UPDATE/RELEASE-LINK/SRF.request()
	$T_8$ : 发送 NLME-ADD/UPDATE/DELETE_TOUTE.response() 或 NLME-ADD/UPDATE/RELEASE-LINK/SRF.response()

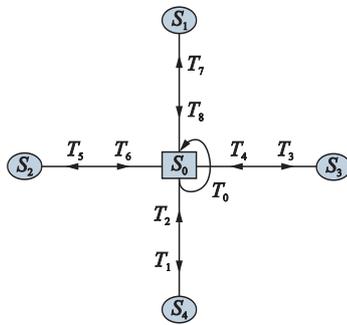


图 10 网络层可覆盖性图  
Fig.10 Coverability graph of NL

A.1.3 抽象测试集

抽象测试集生成方法参照 3.2.3 节, 经过对可覆盖性图的遍历之后, 生成的网络层抽象测试集如下:

- $TS_1 = S_0 T_0 S_0$
- $TS_2 = S_0 T_1 S_4 T_2 S_0$
- $TS_3 = S_0 T_3 S_3 T_4 S_0$
- $TS_4 = S_0 T_5 S_2 T_6 S_0$
- $TS_5 = S_0 T_7 S_1 T_8 S_0$

网络层抽象测试集的 TTCN 如图 11 所示。

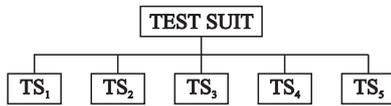


图 11 现场设备网络层抽象测试集的数表表示  
Fig.11 TTCN of test suits of field device NL

A.2 数据链路层

WIA-PA 的数据链路层(DLL) 主要任务是保证 WIA-PA 设备间的可靠、安全、无误、实时地传输。其数据链路层兼容 IEEE STD 802.15.4 超帧结构, 并对其进行了扩展。并且, 支持基于时隙跳频机制、重传机制、TDMA 和 CSMA 混合信道访问机制。

A.2.1 Petri 网模型

根据 WIA-PA 协议的规定和本文假定的测试场景, 建

立 Petri 网模型如图 12 所示, 具体含义见表 5。

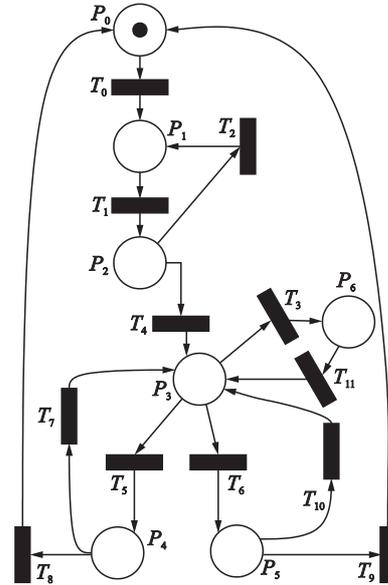


图 12 现场设备数据链路层 Petri 网模型  
Fig.12 Petri net model of field device DLL

A.2.2 可覆盖性图

DLL 的可覆盖性图如图 13 所示。根据 3.2.2 节所述可达条件, 全状态可达, 可用于抽象测试集的建立。

A.2.3 抽象测试集

抽象测试集生成方法参照 3.2.3 节, 经过对可覆盖性图的遍历之后, 生成的数据链路层抽象测试集如下:

- $TS_1 = S_0 T_0 S_1 T_1 S_2 T_2 S_1$
- $TS_2 = S_0 T_0 S_1 T_1 S_2 T_4 S_3$
- $TS_3 = S_3 T_3 S_6 T_{11} S_3$
- $TS_4 = S_3 T_5 S_4 T_7 S_3$
- $TS_5 = S_3 T_6 S_5 T_{10} S_3$
- $TS_6 = S_3 T_5 T_8 S_0$
- $TS_7 = S_3 T_6 S_5 T_9 S_0$

DLL 抽象测试集的 TTCN 如图 14 所示。

表5 现场设备的数据链路层的 Petri 网含义表

Tab.5 Interpretation of FD Petri net of DLL

库所	变迁
$P_0$ : 空闲状态	$T_0$ : 收到来自网关设备的 Beacon 信标帧, 解析 DLME-DISCOVERY.request 原语
$P_1$ : 同步状态	$T_1$ : 发送 DLME-JOIN.request() 到网关设备的网络层
$P_2$ : 等待网络层加入响应	$T_2$ : 解析 MLME-ASSOCIAT.confirm (status != SUCCESS)
$P_3$ : 等待网络层资源配置	$T_3$ : 解析 MCPS-DATA.response
$P_4$ : 主动离开成功	$T_4$ : 解析 MLME-ASSOCIAT.confirm (status == SUCCESS)
$P_5$ : 被动离开成功	$T_5$ : 收到 MLME-DISSOCIATE.indication()
	$T_6$ : 收到 DLME-LEAVE.request()
	$T_7$ : 解析 MLME-DISSOCIATE.confirm() (status != SUCCESS);
	$T_8$ : 解析 MLME-DISSOCIATE.confirm() (status == SUCCESS);
	$T_9$ : 解析 DLME-LEAVE.confirm() (status == SUCCESS)
	$T_{10}$ : 解析 DLME-LEAVE.confirm() (status != SUCCESS)
	$T_{11}$ : 收到 MCPS-DATA.confirm()

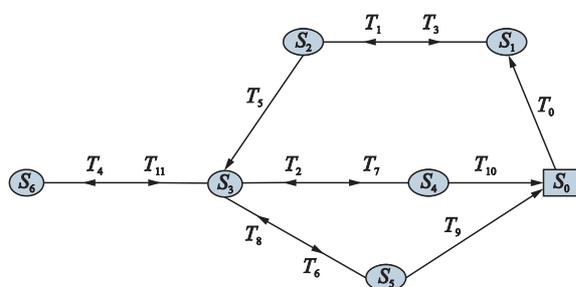


图13 数据链路层可覆盖性图

Fig.13 Coverability graph of DLL

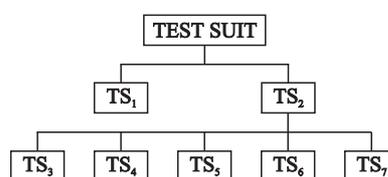


图14 数据链路层测试集的数表表示

Fig.14 TTCN of test suits of field device DLL

## 参考文献

- [1] Liang W, Zhang X L, Xiao Y, et al. Survey and experiments of WIA-PA specification of industrial wireless network[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2011, 11(8): 1197-1212.
- [2] IEEE Standard 802.15.4.2011. Part 15.4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs) [S]. 2011.
- [3] Wireless HART TM Technical Data Sheet[S]. The official source for HART communication technology. www.hartcomm.org.
- [4] 工业无线网络 WIA 规范, 第1部分: 用于过程自动化的 WIA 系统结构与通信规范[S]. 中华人民共和国国家标准, 2010.
- [5] ISA 100.11a Draft Standard. Wireless systems for industrial automation: Process control and related applications[S]. ISA 100.11a Working Group. 2009.
- [6] 中国科学院计算技术研究所. 含有复杂计算过程协议的一致性测试框架及其方法[P]. 中国发明专利, CN 1564135 A, 2005-1-12.
- [7] ISO/IEC 9656-7 Information technology-open systems interconnection-conformance testing methodology and frame-work[S].
- [8] Aho A V, Dahbura A T, Lee D, et al. An optimization technique for protocol conformance test generation based on UIO sequences and rural Chinese postman tours[J]. IEEE Transactions on Communications, 1991, 39(11): 1604-1615.
- [9] Sun H, Ma L. Research on the conformance test method of wireless sensor network protocol based on IPv6[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(2): 29-31.
- [10] Noel L, Brousse P. Low-cost EVM test methodology for wireless transmitters applied to W-CDMA[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(1): 170-175.
- [11] Xie H, Ren N, Wang P. Design and realization of object-oriented system for ISA100.11a protocol conformance testing[C]//2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 525-529.
- [12] 谢昊飞, 姚俊, 陆楠, 等. WIA-PA 协议一致性测试方法研究[J]. 电子技术应用, 2012, 38(8): 86-88.  
Xie H F, Yao J, Lu N, et al. Research on the conformance test method of WIA-PA protocol[J]. Application of Electronic Technique, 2012, 38(8): 86-88.
- [13] 张琼, 肖金超. 第三十五讲基于工业无线 WIA 网络的在线测试平台的设计与实现[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2012(5): 16-20.

(下转第 716 页)

- [14] Guo Y F, Zhu F L. New results on stability and stabilization of Markovian jump systems with partly known transition probabilities[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012(S1): 1–11.
- [15] Wang W Q, Zhong S M, Nguang S K, et al. Novel delay-dependent stability criterion for uncertain genetic regulatory networks with interval time-varying delays[J]. *Neurocomputing*, 2013, 121(18): 170–178.
- [16] Lou Y H, Ye Q, Cui B T. Exponential stability of genetic regulatory networks with random delays[J]. *Neurocomputing*, 2010, 73(4/5/6): 759–769.
- [17] 张艳. 基于自由连接权矩阵的 Markov 切换系统鲁棒控制[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
Zhang Y. Robust control for Markov switching system based on free-connection weighting matrices[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [18] Kushner H J. Stochastic stability and control[M]. New York, USA: Academic Press, 1967.
- [19] Skorohod A V. Asymptotic methods in the theory of stochastic differential equation[M]. Providence, RI, USA: American Mathematical society, 1989.
- [20] Sun J, Liu G P, Chen J. Delay-dependent stability and stabilization of neutral time-delay system[J]. *International Journal of Robust and Non-linear Control*, 2009, 19(12): 1364–1375.
- [21] Seuret A, Gouaisbaud F. Wirtinger-based integral inequality: Application to time-delay systems[J]. *Automatica*, 2013, 49(9): 2860–2866.

## 作者简介

张 艳(1983–), 女, 博士, 讲师. 研究领域为鲁棒控制, 随机控制.

(上接第 710 页)

- Zhang Q, Xiao J C. Chapter 35: Design and implementation of on line testing platform for WIA[J]. *Instrument Standardization and Metrology*, 2012(5): 16–20.
- [14] 王晓伟. WIA-PA 协议一致性测试方法的研究与实现[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2011.  
Wang X W. Research and implement on the WIA-PA protocol conformance test[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [15] 重庆邮电大学. 工业无线网络协议一致性测试系统及测试方法[P]. 中国发明专利. CN 101808355 B. 2013–3–20.  
Chongqing University of Posts and Telecommunications. Industrial wireless network protocol conformance testing system and test method[P]. CN 101808355 B. 2013–3–20.
- [16] 谢昊飞, 李艳丽, 罗志勇, 等. 基于 Web 的 WIA-PA 一致性测试系统的设计和实现[J]. *自动化与仪表*, 2013, 28(9): 18–23.  
Xie H F, Li Y L, Luo Z Y, et al. Design and implementation of WIA-PA conformance test system based on Web[J]. *Automation & Instrumentation*, 2013, 28(9): 18–23.
- [17] 牟小玲, 丁晓明, 张望. 基于 Petri 网的测试用例生成研究进展[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2012, 31(1): 163–167.  
Mu X L, Ding X M, Zhang W. Research progress in test case generation based on Petri nets[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Sciences*, 2012, 31(1): 163–167.
- [18] Peterson J L. Petri net theory and the modeling of systems[M]. New York, USA: the ACM, 1981.
- [19] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
Wu Z H. Petri net introduction[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [20] 李凤英, 古天龙, 徐周波. Petri 网的符号 ZBDD 可达树分析技术[J]. *计算机学报*, 2009(12): 2420–2428.  
Li F Y, Gu T L, Xu Z B. Symbolic reachability analysis of Petri nets using ZBDDs[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2009(12): 2420–2428.
- [21] Information technology-Open System Interconnection-Conformance testing methodology and framework 2003[S].
- [22] 郑秀红, 胡静涛, 于海斌等. 基于随机 Petri 网的集束装备模型及马尔可夫链分析[J]. *信息与控制*, 2011, 40(4): 477–482.  
Zheng X H, Hu J T, Yu H B. Cluster tools model and markov chain analysis based on stochastic Petri nets[J]. *Information and Control*, 2011, 40(4): 477–482.

## 作者简介

孙 亮(1987–), 男, 硕士生. 研究领域无线传感网络.

梁 炜(1974–), 女, 博士, 研究员, 博士生导师. 研究方向为无线传感网络, 工业通信, 躯感网, 系统仿真.

王 恺(1986–), 男, 硕士, 助理研究员. 研究方向为无线传感网络及其测试.