

# 6LoWPAN 协议一致性测试方法及仪表设计<sup>①</sup>

孙雪芹, 程绍银, 蒋 凡

(中国科学技术大学 计算机科学与技术学院, 合肥 230027)

(中国科学技术大学 信息安全测评中心, 合肥 230027)

**摘要:** 针对 6LoWPAN 协议栈的 MAC 层、适配层、网络层及路由协议, 研究 6LoWPAN 协议的一致性测试方法, 将 TTCN-3 测试标准引入到无线传感器网络协议的一致性测试领域, 设计了一套以 TTCN-3 为协议测试描述语言、以 ISO9646 中定义的协议一致性测试模型为方法的 6LoWPAN 协议一致性测试仪表。

**关键词:** 6LoWPAN; 一致性测试; TTCN-3; 无线传感器网络; 仪表

## Conformance Testing Method and Instrument Design of 6LoWPAN Protocol

SUN Xue-Qin, CHENG Shao-Yin, JANG Fan

(School of Computer Science & Technology, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China)

(Information Technology Security Evaluation Center, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Aiming to MAC layer, Adapter layer, Network layer and Router protocol of 6LoWPAN protocol stack, this paper studies the conformance testing method of 6LoWPAN protocol stack, introduces the TTCN-3 testing standard into the conformance testing of wireless sensor network, and designs a 6LoWPAN protocol conformance testing instrument, which uses both TTCN-3 as protocol testing description language and protocol conformance testing model defined in ISO9646 as method.

**Key words:** 6LoWPAN; conformance testing; TTCN-3; wireless sensor network; instrument

将 IPv6 技术应用到无线传感器网络是当前物联网领域的研究热点. IETF 于 2004 年 11 月成立了 6LoWPAN(IPv6 over Low Power WPAN-Wireless Personal Area Network)工作组<sup>[1]</sup>, 主要研究 IPv6 协议如何在 IEEE 802.15.4 上进行传输<sup>[2]</sup>. IETF 6LoWPAN 工作组在 RFC4919 中对问题做了讨论点<sup>[3]</sup>; 在 RFC4944 中对 6LoWPAN 的适配层协议格式做了定义, 并建议 6LoWPAN 协议栈的底层使用 IEEE 802.15.4 标准<sup>[4]</sup>; 在 RFC4861 中提出了 6LoWPAN 的启动和邻居发现协议的优化方法<sup>[5]</sup>. 总体上对 6LoWPAN 协议栈的研究还存在不确定性.

国内也有一些高校和研究所相继开始相关的研究, 并实现了一些实验平台. 文献[6]从 6LoWPAN 适配层帧格式、适配层分片和重组、Mesh 支持、头部压

缩等进行了深入研究, 设计和实现了一个基于 TinyOS 的 6LoWPAN 无线传感器网络. 文献[7]在结合一致性测试规范的基础上设计了一套传感器网络的超轻量化的 IPv6 协议栈一致性测试系统, 该测试系统采用 C++ 作为测试描述语言. 在文献[7]设计的基础上, 文献[8]为 6LoWPAN 适配层协议设计和实现了一致性测试的测试用例和测试平台.

本文通过对 6LoWPAN 协议一致性测试方法进行的研究, 开发设计无线传感器网络协议一致性测试的测试工具, 将标准化的协议测试描述语言 TTCN-3<sup>[9]</sup>引入到测试仪表中, 在此基础上设计一套 6LoWPAN 协议一致性测试仪表, 详细描述了仪表各个模块的组成及功能, 并对该仪表的使用场景进行了一定的研究, 可以应用到 IPv6 无线传感器网络的一致性测试中.

<sup>①</sup> 基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(WK0110000007); 高等学校博士学科点专项科研基金新教师类资助课题(20113402120026); 国家高技术研究发展计划(863)(2011AA1006)

收稿时间:2011-12-27;收到修改稿时间:2012-02-12

# 1 6LoWPAN一致性测试简介

## 1.1 一致性测试方法

根据 ISO 9646 标准<sup>[10]</sup>提出的协议一致性测试的基本框架和方法, 在一定的网络环境下, 使用一组测试用例对被测实体 IUT(Implementation Under Test)进行黑盒测试, 通过观察提供给上下层的抽象服务原语 ASP(Abstract Service Primitives)和对等实体的协议报文 PDU(Protocol Data Unit), 比较 IUT 的实际输出与预期输出, 判定 IUT 与协议描述是否相符。

在基本模型基础上, ISO9646 根据被测协议实体的不同形式定义了一致性测试的四种基本测试方法<sup>[10]</sup>, 如图 1 所示。

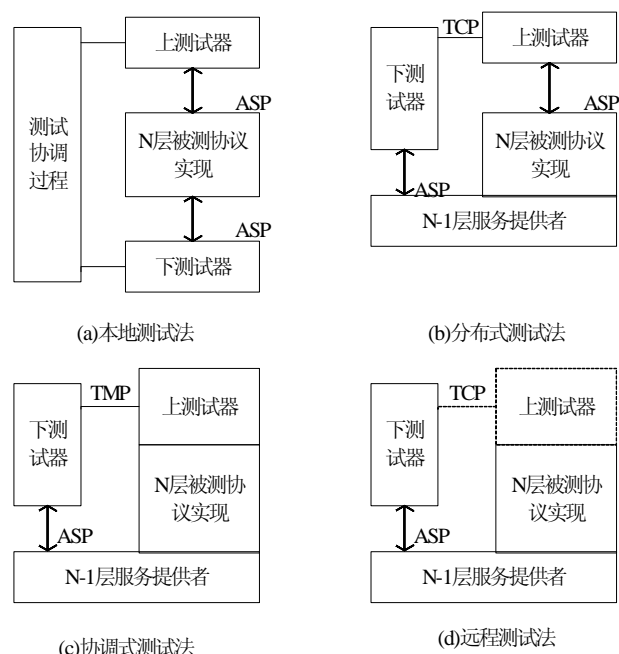


图 1 ISO9646 定义的四中抽象方法

本地测试法: 作为协议一致性测试中最基本的方法, 如图 1(a)所示的上测试器、下测试器和 N 层被测协议实现都是同一台机器中。

分布式测试法: 如图 1(b)所示, 在该方法中下测试器被单独分布在其他机器上, 需要通过被测实现与上测试器和被测协议实现进行通信, 同步有一定的难度。下测试器和被测实现借助于 N-1 层服务交换报文。

协调式测试法: 该方法如图 1(c)所示, 引入了一个标准化的测试管理协议 TMP(Test Management Protocol)来协调测试过程, 其上测试器是有关 TMP 的实现, 这个协议用来协同或者同步上测试器和下测试

器, 这样就弥补了分布式测试方法中不能同步的问题, 但同时增加了测试系统的复杂性。

远程测试法: 如图 1(d)所示, 该方法中没有上测试器, 因此不需要上测试器和下测试器之间的协同, 但是上测试器的一些功能可由被测系统执行。该方法适用于被动式协议实体或者服务型协议实体的测试。

本文中设计的仪表主要适用于 ISO9646 中定义的本地测试法和远程测试法; 在对路由协议进行测试的时候, 可采用分布式测试法。

## 1.2 测试例生成

测试集是针对特定协议的一致性测试产生的一组测试例的完整集合。测试例的选取将直接影响整个测试结果, 因此测试用例的设计需要保证在有限的测试代价下获得高的测试覆盖度。6LoWPAN 协议一致性测试集的管理、组织和开发根据 ISO9646 标准采用分层结构, 在一个测试集中有多个测试组, 测试组可嵌套任意深度, 测试组包含任意的测试例, 一个测试用例又可以由多个测试步组成。采用这种分层结构, 有助于测试集的规划、开发、理解和执行。根据 6LoWPAN 协议的层次结构对测试集可以分为 MAC 层、适配层和网络层四大组, 针对各个组分别设计相应的测试例。如对适配层测试例的设计可分为: 适配层报文的正确处理、分片和重组机制、地址自动配置、报文头部压缩和解压缩算法的验证、邻居发现协议等。针对适配层报文处理的测试集可以分为报文的发送、接收和转发等。

测试用例描述方法关系整个测试系统的性能和功能, 测试系统的其他功能模块的设计都将围绕用例描述方法进行设计。本文中, 6LoWPAN 协议一致性测试用例描述语言采用业界成熟的标准化测试语言 TTCN-3(Testing and Test Control Notation version3)。使用 TTCN-3 逐项描述协议的每一个功能, 产生对应的测试例, 并且开发基于 TTCN-3 的测试环境实现协议的一致性测试。

## 2 6LoWPAN协议一致性测试仪表

6LoWPAN 协议一致性测试仪表需要对 IPv6 无线传感器节点产品设计进行全面验证, 包括物理层、适配层、网络层、传输层和应用层的协议功能、性能和一致性的测试。仪表主要由主控模块、协议栈模块和射频模块组成, 其总体结构如图 2 所示:

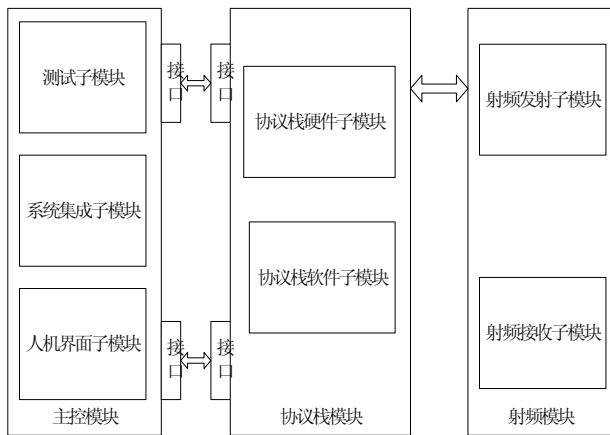


图 2 仪表总体结构图

### 2.1 主控模块

主控模块控制测试仪表对被测无线传感器网络节点进行测试的过程，主要分为测试子模块、系统集成子模块和人机界面子模块。该模块是采用 C++语言在 Windows 的 Visual Studio2008 开发环境下进行开发的。

#### 2.1.1 测试子模块

测试子模块是执行测试的主要模块，通过输入测试例编译生成可执行测试套，调用第三方的编译器生成测试结果，并将信息通过人机界面子模块反映给用户。该模块包括 TTCN-3 编译器(TTC)、测试执行器(TE)、平台适配器(PA)、系统适配器(SA)、编解码器(CD)和测试管理器(TM)等，其框架图如图 3 所示。

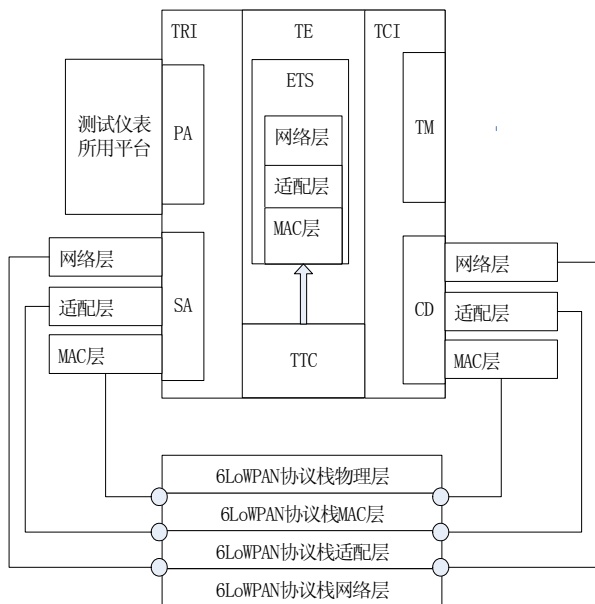


图 3 测试子模块框架图

TTCN-3 编译器(TTC)，是个典型的管道式流水线结构。TTC 首先利用词法分析器将 TTCN-3 测试脚本分解成标记流，然后将标记流输出到语法分析器分析后输出抽象语法树，再经过静态语义检查后输出为属性树，最后通过代码生成被翻译成 C++表示的中间格式。其中词法分析器和语法分析器在正则表达式和上下文无关文法的基础上借助 Antlr 自动生成。

测试执行器(TE)，作为支持库为 TTCN-3 编译器的代码生成提供支持，负责加载和执行可执行测试套，包含动态加载编解码器、适配器和执行测试例等工作，并负责与平台适配器、系统适配器以及编解码器进行交互。对于 TTC 生成的 C++代码，TE 首先利用第三方的编译器，编译输出可执行测试套(以 dll 形式)，然后加载该可执行测试套及其相关的其他适配器(如 SA、CD 等)以执行。

系统适配器(SA)，根据 6LoWPAN 协议栈的结构，系统适配器有三种：MAC 层系统适配器、适配层系统适配器和网络层系统适配器。SA 的主要作用是负责将测试子模块与被测协议实现之间进行通信。针对协议栈实现的不同层次的协议，SA 首先要确定连接方式。当适配器收到测试子模块的消息时，适配器需要将消息发送给相应协议层的编解码器，对消息进行解码，再将解码后的消息发送到对应层协议实现体以进行响应；当该适配器有消息需要发送给测试子模块时，需要首先调用该协议层的编解码器对消息进行编码，再将消息发送出去。至于具体适配器实现的方式则依赖于协议栈各个层中实现的协议规范的要求。

编解码器(CD)，根据 6LoWPAN 协议栈的结构，编解码器有三种：MAC 层编解码器、适配层编解码器和网络层编解码器。CD 的作用主要是根据协议栈各个层协议标准规定的消息格式对消息进行编码和解码，主要实现两个接口：Encode 接口和 Decode 接口。当协议实现体接收到来自测试子模块的消息时，调用 Decode 接口对消息进行解码，以使消息编成其可识别的目标格式；反之当协议实现体有消息需要发送到测试子模块时，则需要调用 Encode 接口将消息编码成相应的目标格式。

平台适配器(PA)，主要是实现平台特有的始终功能和一些平台相关的函数等。当测试子模块从一个平台如 Windows 迁移至另一个平台时如 Linux，需要更换相应的平台适配器。当一个具体的抽象测试套需要

一些比较特别的操作,并且这些操作是用一些跨平台的函数表示(如 TTCN-3 的外部函数),则需要具体的平台适配器中实现这些操作.

测试管理器(TM),管理测试执行的过程,实现全局数据管理、运行期处理、工程管理、消息处理和配置管理等功能.

### 2.1.2 系统集成子模块

系统集成子模块是对各软、硬件模块进行配置和功能集成的模块,完成硬件启动、硬件的初始化设置,接收人机界面子模块和远程控制传递过来的执行指令,根据指令,设计执行不同的操作配置,对测试子模块进行配置和调用.

### 2.1.3 人机界面子模块

人机界面子模块主要完成响应用户的手动操作,提供测试环境、测试方式的选择、提供参数配置、显示测试结果(数字或图形)的功能,用户通过界面可直观的跟踪测试的每个环节.

## 2.2 协议栈模块

协议栈模块包括 6LoWPAN 协议栈的软、硬件实现,分为协议栈软件子模块和硬件子模块.该模块的开发环境可以采用 PXI 设备开发平台,主要包括 NI PXIe-1078 PXI Express 机箱、NI PXIe-8102 嵌入式控制器、Aeroflex 3010 模块等开发模块.

### 2.2.1 协议栈软件开发子模块

协议栈软件开发子模块根据 IETF 的设计要求,采用灵活的模块化方法分别实现了 6LoWPAN 协议栈相应物理层软件、MAC 层协议软件、适配层协议软件和网络层协议软件. IETF 6LoWPAN 协议栈参考模型如图 4 所示.



图 4 6LoWPAN 协议栈参考模型

6LoWPAN 协议栈的 PHY(Physical Layer, 物理层)

子模块采用大容量的 FPGA 处理器实现 IEEE802.15.4 物理层中定义的低功耗操作、低速率通信等功能. MAC(Media Access Control, 介质访问控制)层子模块实现 802.15.4MAC 层定义的各项功能,并实现向上提供的服务原语. 适配层子模块实现报文首部的压缩、解压缩、分片、重组等功能,并提供 NDP(Neighbor Discovery Protocol, 邻居发现协议)所需要的服务. IPv6 子模块实现 IP 报文的传递服务,其中还实现了如下两种协议: ICMPv6(Internet Control Message Protocol Version 6, 第 6 版因特网控制消息协议)作为 IPv6 协议的一个重要组成部分,通过 IPv6 包传送实现网络层的差错处理与信息查询功能; RPL(Routing Protocol for LLN-Low Power and Lossy Networks, 低功耗网络的路由协议)路由协议工作在网络层,通过转发从源到目标的分组实现网络层路由. 传输层子模块的功能与互联网传输层类似,负责总体的数据传输和控制,提供端到端的交换数据机制,并对网络层提供可靠的目的地站信息. 应用层子模块提供应用基础设施、中间件和各种网络应用.

### 2.2.2 协议栈硬件开发子模块

协议栈硬件开发子模块是软件子模块的硬件基础,采用 FPGA+ARM 联合设计方案,实现 6LoWPAN 协议栈的物理层、MAC 层、适配层和网络层路由协议开发的硬件支持. FPGA 处理器内部都集成有专用功能的 IP 核,简化软件开发周期,如图 5 所示.

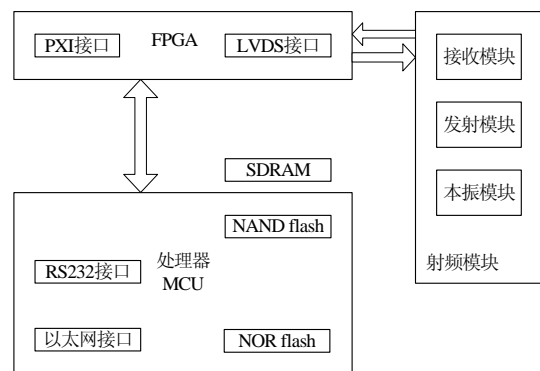


图 5 协议栈硬件平台

协议处理器主要采用通用大容量的 FPGA 处理计算量大的高速基带信号,其中 PXI 接口实现协议栈与上位机测试套额通信, LVDS 接口实现协议栈与射频模块的基带信号. SDRAM 用来存储 FPGA 和 ARM 处理

器之间交互的信息. 采用 ARM 处理器来实现 MAC 层和网络层协议, 其硬件资源丰富, 可用作无线传感网络中协议的仿真、验证, 便于开展新型技术实用化的工作, 其中 RS232 接口实现数据终端设备和数据通讯设备之间的串行通信, 以太网接口负责协议栈硬件和以太网之间的通信, 由于使用速度要求的不同, 同时采用 NAND flash 和 NOR flash 来存储数据. 本系统可远程更新、维护、可满足规范升级或软件版本更新后的自动维护.

### 2.3 射频模块

射频模块包括射频发射模块和射频接收模块, 主要用来发送和接受与无线传感器节点通信的射频信号. 设计实现射频模块功能和性能可以采用网络分析仪 ZVB8, 本振模块的开发可以选用信号源分析仪 FSUP8.

#### 2.3.1 射频发射子模块

射频发射子模块包括本振单元、分频单元、调制单元、功率控制单元等部分, 基带信号通过调制及上变频方式转化为射频信号进行发送. 该模块通过 LVDS(Low Voltage Differential Signaling, 低电压差分信号)接口输入数字基带成形数据, 分成 IQ 两路后通过 D/A 转换成模拟 IQ 基带信号; 载波信号和模拟 IQ 基带信号输入到 IQ 调制器进行直接上变频调制; 调制信号通过自动电平控制(Automatic level control, ALC)保证电平精度, 经过小面积宽动态范围衰减器(五级衰减器, 120dB 范围)进行电平调节送到双工器模块.

#### 2.3.2 射频接收子模块

射频接收子模块是将接收到的射频信号通过与本振信号的混频进行下变频, 得到中频信号, 然后通过中频采样得到数字中频, 通过数字中频处理还原出基带信号. 本振模块输入 1.5GHz~3GHz 信号, 经过两个可选的二分频器的分频, 产生范围为 375MHz~3GHz 的本振信号去一次混频. 来自双工器的射频信号经过滤波及增益处理后和本振信号一次混频, 下变频为 62.5MHz 或 187.5MHz 的固定模拟中频信号. 把模拟中频信号经过镜像滤波、增益处理、抗混频滤波后进行高速 AD 采集, 产生中频数字信号. 中频数字信号经过数字下变频和数数据速度变换等数字信号处理, 分别通过 PCI 接口和 LVDS 接口传到其它模块. 同时, 外部的控制信号和触发信号通过这两个接口对接

收模块进行控制.

#### 2.3.3 本振模块

通过将双模终端综合测试仪中的本振模块通过升级后能满足 6LoWPAN 协议一致性测试仪表中射频模块的要求. 本振模块主要由输入参考时基, 鉴相器、环路滤波器(包括宽带和窄带类型)、压控振荡器(500-667MHz VCO)、倍频器、电可调滤波器、二分频器、小数分频技术组成锁相环路. 通过 PCI 总线进行系统控制产生射频本振信号, 包括设置小数分频系数、压控振荡器、电可调滤波器.

## 3 应用场景

针对本文中设计的 6LoWPAN 协议一致性测试仪表对无线传感器节点进行测试时, 有三种应用场景, 分别是本地测试、远程测试和路由测试. 测试场景如图 6 所示.

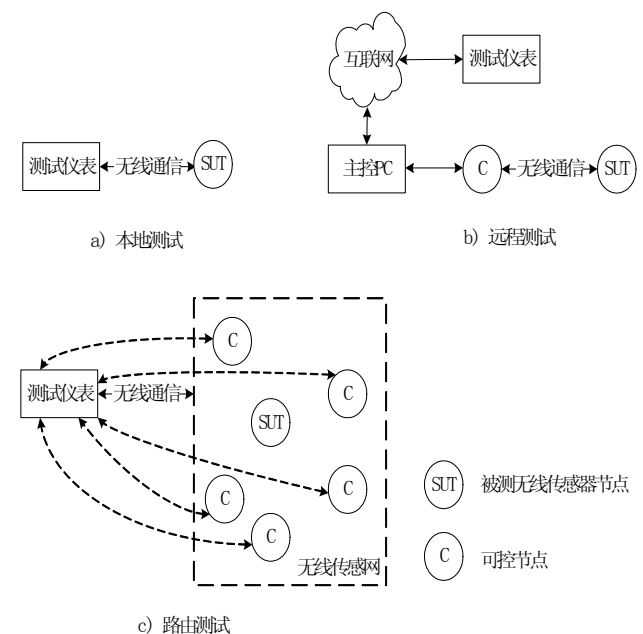


图 6 仪表使用场景

本地测试, 即直接拿测试仪表对无线传感器节点进行现场测试, 测试仪表生成可执行测试套, 直接测试节点内部 6LoWPAN 协议栈实现, 无需通过其他设备进行通信和控制.

远程测试, 测试仪表提供基于 web 的远程测试服务. 主控 PC 是一台普通的 PC/笔记本, 可控节点具有测试仪表中的协议栈模块和射频模块的功能. 测试时,

主控 PC 首先通过互联网访问测试仪表, 提交 TTCN-3 语言编写的测试套, 由测试仪表生成可执行测试套, 返回给主控 PC, 然后主控 PC 控制可控节点, 对无线传感器节点进行现场测试。

路由测试: 主要用于测试路由协议。被测无线传感器节点和若干个可控节点组成一个无线传感网, 其中每个可控节点都与测试仪器通过有线方式相连, 以实现分布式测试时的可观察性。测试时, 测试仪表给被测无线传感器网发送一个信号。通过监测所有可控节点, 来判断被测无线传感器节点 SUT(System Under Test)是否正确实现路由协议

#### 4 结语

本文分析了 6LoWPAN 协议一致性测试的方法, 将 TTCN-3 测试标准引入到无线传感器网络协议的一致性测试领域, 根据 6LoWPAN 协议栈模型设计了一套 6LoWPAN 协议一致性测试仪表, 并详细描述了仪表各个模块的结构和功能。进一步的工作是开发并实现该仪表, 开发出完整的测试集, 将该仪表应用到实际的测试场景, 并且逐步完善使之能够在 6LoWPAN 协议一致性测试中得到大规模的应用。

致谢: 感谢湖北众友科技实业股份有限公司的张家平高工和华东师范大学的陆刚副教授参与讨论并指导本论文中 6LoWPAN 协议栈和仪表设计工作。

(上接第 143 页)

#### 6 结语

“我心中的中国科学院”征文活动, 对于促中国科学院新时期的整体跨越发展有着重要意义。征文评选活动的设计实现为征文活动提供了支持保障, 并通过引入网友投稿、评稿、打分、转发、讨论, 活跃了交流氛围, 将传统的单向专家评分方向转变为社区性群体参与方式。系统经过设计开发, 已于 2011 年 5 月正式上线和开通应用, 平台网站网址 <http://www.cas.cn/zhengwen>, 评选管理网址为 <http://zhengwen1.cas.cn>。经过近 6 个月的征集评选, 征文活动已完成征集、评委会评选、网络评选、公示、颁奖典礼环节, 已于 2011 年 11 月份评出奖项并对获奖作品结集出版<sup>[4]</sup>。

#### 参考文献

- 1 IETF. IPv6 over Low Power WPAN(6lowpan).[2006-07-07]. <https://onsite.ietf.org/html.charters/6lowpan-charter.html>.
- 2 IEEE. 802.15.4-2003 Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for Low-rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs). IEEE Society,2003.
- 3 Kushalnagar N. 6LoWPAN: Overview, Assumption, Problem Statement and Goals Draft-ietf-6lowpan-problem-02. (2006-02-24). <http://tools.ietf.org/html/draft-6lowpan-problem-02.txt>.
- 4 Montenegro G. Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks Draft-ietf-6lowpan-format-02.(2006-03-6). <http://tools.ietf.org/html/draft-6lowpan-format-02.txt>.
- 5 Narten T. Neighbor Discovery for IP Version 6(IPV6). 2007.
- 6 向浩,李堃,袁家斌.基于 6LoWPAN 的 IPv6 无线传感器网络.南京理工大学学报,2010,34(1):56-50.
- 7 陈小红,王能.传感器网络超轻量化 IPv6 协议栈一致性测试系统的设计.计算机应用,2006,26(12):2817-2820.
- 8 虞航,王能.6LoWPAN 适配层协议的一致性测试.计算机工程,2008,34(13):104-106.
- 9 ETSI ES 201 873-1 v4.1.1: Method for Testing and Specification (MTS); The Testing and Test Control Notation version3; Part1: TTCN-3 Core Language,2009.
- 10 ISO/IEC 9646-1:1994, OSI Conformance Testing Methodology and Framework for Protocol Recommendations for ITU-T Application-General Concepts, 1994.

#### 参考文献

- 1 奚科芳.期刊稿件投稿与评审管理系统的设计分析.无锡南洋学院学报,2008,7(3):42-44.
- 2 王常吉.会议论文评审系统的设计与实现.彭建新现代计算机(专业版),2009,(9).
- 3 中国科学院办公厅.我心中的中国科学院”征文活动在京启动.[http://www.cas.cn/xw/zyxw/ttxw/201105/t20110504\\_3127546.shtml](http://www.cas.cn/xw/zyxw/ttxw/201105/t20110504_3127546.shtml)
- 4 中国科学院办公厅.“我心中的中国科学院”征文活动颁奖仪式在京举行 .[http://www.cas.cn/xw/zyxw/yw/201111/t20111101\\_3388661.shtml](http://www.cas.cn/xw/zyxw/yw/201111/t20111101_3388661.shtml)