

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.06.016

面向电力测试装置远程校准的网络服务质量可靠性 建模与分析

汪 泉¹, 周 玮¹, 王 昊², 梁国鼎³, 陈习文¹, 王 旭¹, 付济良¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430074; 2. 中国计量科学研究院电磁所, 北京 100029;

3. 辽宁省检测检验认证中心/辽宁省计量科学研究院, 沈阳 110004)

摘要: 网络通信服务可靠性是仪表远程校准的重要基础前提,而通信网拓扑结构、规模不同,导致网络行为特征建模和性能评价非常有挑战性,致使通信网的可靠性难以确定。证据理论(DST)能有效刻画不精确、不完整、不可靠等不确定性问题,针对电力仪表远程校准通信网的不确定性,文中基于组合证据融合方法,提出通用远程校准模型的网络服务质量不确定性评价方法。鉴于电力远程校准数据业务、音(视)频多媒体业务、远程校准Web服务,在可靠性、安全性、实时性方面的不同网络QoS需求,构建D-S证据理论的可靠性评估模型,利用OPNET对网络实时通信进行了仿真与验证分析,兼顾了定性与定量、客观性与主观性,阐明校准系统的网络通信的可靠性和有效性,提高了评价的可信度。

关键词: 远程校准; 组合证据理论; OPNET; 异构网络; 层次化结构

Modeling and Analysis of Network Service Quality Reliability for Power Meter Remote Calibration

WANG Quan¹, ZHOU Wei¹, WANG Hao², LIANG Guoding³, CHEN Xiwen¹, WANG Xu¹, FU Jiliang¹

(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. National Institute of Metrology PR China, Division of Electricity and Magnetism Metrology, Beijing 100029, China; 3. Liaoning Testing and Certification Center/Liaoning Institute of Metrology, Shenyang 110004, China)

Abstract: The reliability of network communication services is an important prerequisite for remote calibration of instruments. Due to different topology and scale of the communication network, the modeling and performance evaluation of the network behavior characteristics are challengeable, which makes the reliability of the communication network difficult to determine. The Dempster-Shafer evidence theory (DST) can effectively characterize uncertainties such as inaccuracy, incompleteness, and unreliability. Aiming at the uncertainty of remote calibration communication network of power meter, this paper proposes a network service quality uncertainty evaluation method based on the method of combined evidence fusion, this paper proposes a method for evaluating the uncertainty of network service quality of general remote calibration model. In view of the power remote calibration data service, audio (video) multimedia service, remote calibration Web service, and the different network QoS requirements in terms of reliability, security and real-time, a reliability evaluation model based on the D-S evidence theory is constructed. OPNET is used to simulate and verify the network real-time communication, taking into account the qualification and quantitation, objectivity and subjectivity. The reliability and effectiveness of the network communication of the calibration system are expounded, and the evaluation credibility is improved.

Key words: remote calibration; combined evidence theory; OPNET; heterogeneous network; hierarchical structure

收稿日期:2019-01-15; 修回日期:2019-03-17

基金项目:国家电网公司科技项目(基于互联网+的电力设备专用测试装置综合校准平台及远程校准关键技术研究)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (Based on Internet + Special Test Device for Power Equipment Comprehensive Calibration Platform and Research on Key Technologies of Remote Calibration).

0 引言

电力仪表远程校准利用互联网将传统的校准中心和被校准中心联系起来,通过网络发送接收指令、传递校准数据和被校准数据以及多媒体流(如语音通话和视频监控)来完成校准任务^[1-3]。随着5G时代和互联网+技术的发展,给远程校准创造了条件,但通信网络的异构特性、拓扑结构、规模各不相同,是一个复杂的系统,其性能有不确定性。导致对网络进行描述和分析的极大困难,其可靠性易受网络设备、网络管理、网络拓扑等的影响,致使通信网的可靠性难以确定^[4-5]。一般来说,其不确定度的大小与所使用的评价对象、评价方法、评价条件、以及被评价的对象指标均有关系,因此给远程校准也提出了诸多挑战。

但由于网络的开放性、大规模性,面向仪器远程校准的网络服务质量具有明显的不确定性,网络安全也存在威胁、网络节点间的信任问题也越来越明显^[6-8]。远程仪表校正数据的完整性、保密性、可用性会受到影响,而电力仪表校正的数据不允许遭受任何形式的非法插入、删除、修改或重发。网络中存在许多不确定性的因素,监控网络的安全设备提供的安全事件信息,这些信息表征了系统当前的运行状态,然而这些信息的格式又不尽相同,要对网络的安全态势进行评估,必须综合考虑这些不同格式的安全事件信息。网络服务质量的可靠性与可信性与网络服务质量密切相关。在互联网环境下,服务节点向其它服务节点所提供的推荐证据是不精确、不全面、不绝对可靠的。

在对网络服务质量的不确定性分析中,许多中外研究学者提出了各种不同的研究方法。其中有美国加利福尼亚大学教授、控制论专家Zadeh L A于1965年首次提出模糊数学理论^[9-10]。著名运筹学家、美国匹兹堡大学教授Saaty T L于20世纪70年代提出一种层次化、系统化、定性和定量相结合分析方法^[11]。刘普寅等(2000年)综述了布尔代数法、多项式法、模糊可靠性法、人工神经网络法和遗传算法这五种典型的通信网可靠性数学研究方法^[12]。虽然大部分方法使用多种特征来加大检测范围,但没有融合多个特征进行综合评判,或仅根据专家经验给出简单的特征组合公式^[13-16],而没有任何理论根据。相比较之下,证据理论在处理认知不确定性方面有独特的能力^[17-20],它以Bayesian理论的广义化为出发点,用多值映射得出概率的上下界,在表达和处理认知不确定性上具有较强的能力。同时,由于

证据理论可以很好地兼容概率理论,因此也可以处理随机不确定性。

鉴于证据理论在处理认知不确定性方面有独特的优势,文中利用证据理论提出了基于通用远程校准模型业务网络任务的性能评价模型,对远程校准任务中的校准数据、视频、语音传输的不确定性建立网络层次化结构分析模型,并利用OPNET对网络指标进行仿真^[21-23],如链路利用率、互联网丢包率、互联网延时等,最后利用证据理论分析电力通信网可靠性评价的不确定性。

1 远程校准网络任务模型

虽然与传统校准方式不同,远程校准以互联网为媒介,实现了数据的远程通信,计量器具不必经过运输就可直接溯源到上级计量机构的计量标准。远程校准不仅减少了专业技术人员和标准仪器的运输时间,提高了校准效率和重用性,而且也排除了标准仪器在运输过程中由环境天气导致的不确定因素,减小了校准误差。但网络不确定性给远程校准带来新的挑战。

基于远程校准业务本身的特点,文中建立了远程校准业务网络任务模型,见图1。任何系统的服务质量都是以业务为载体的,服务的优劣最终都是以业务的完成程度为衡量标准的。远程校准业务网络任务模型总体上分为4个部分,分别是校准中心、被校准中心、服务器群以及互联网,专家位于校准中心,而计量人员位于被校准中心,以互联网为载体,他们之间通过服务器群共同完成远程校准任务。电力远程校准数据业务是以TCP协议传输的,当互联网丢包率过大或者通信连接超时将导致数据传输失败;音(视)频多媒体业务是以UDP协议传输的,当用户并发节点数超过阈值或者网络链路带宽不够时将导致网络拥塞,互联网延时过大时将导致音视频同步传输失败。

从远程校准业务网络任务模型中可以看到互联网是作为连接校准中心、被校准中心和服务器群的中间载体,其网络服务质量的可靠性是完成远程校准任务的重要保障,所以文中利用层次分析法(AHP)^[24]建立具有目标层、指标层、特征层这3层的远程校准网络层次化结构分析模型。目标层作为分析模型的最终目标,对远程校准电力通信网可靠性的综合评价;指标层是构造出评价的主指标体系,即决定评价可靠性的主要因素;特征层是对指标层进行具体化和量化,以便对指标层进行定量分析,针对特征具有不确定性问题,利用D-S证据理

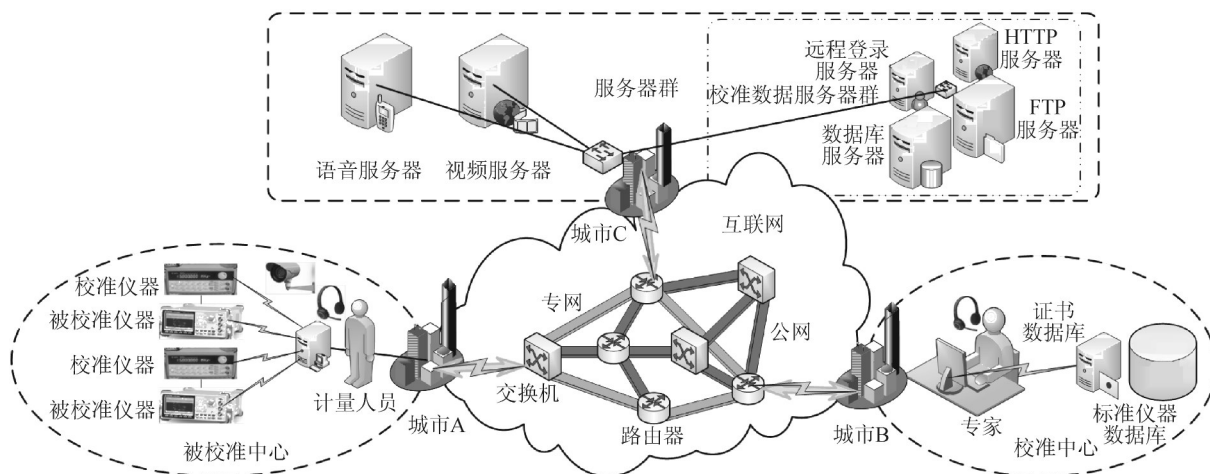


图1 远程校准业务网络任务模型

Fig. 1 Remote calibration service network task model

论对其进行不确定性评估。在网络安全的前提下,文中利用OPNET对远程校准系统网络进行仿真,总结出指标层中的主要指标 B_i ,即链路带宽 B_1 、互联网延时 B_2 、互联网丢包率 B_3 以及用户并发节点数

B_4 以及特征层中的主要特征 A_i ,即数据库查询录入反应时间 A_1 、音视频包端对端传输延迟 A_2 、互联网到服务器群链路利用率 A_3 、网络丢包率 A_4 ,远程校准网络层次化结构分析模型见图2。

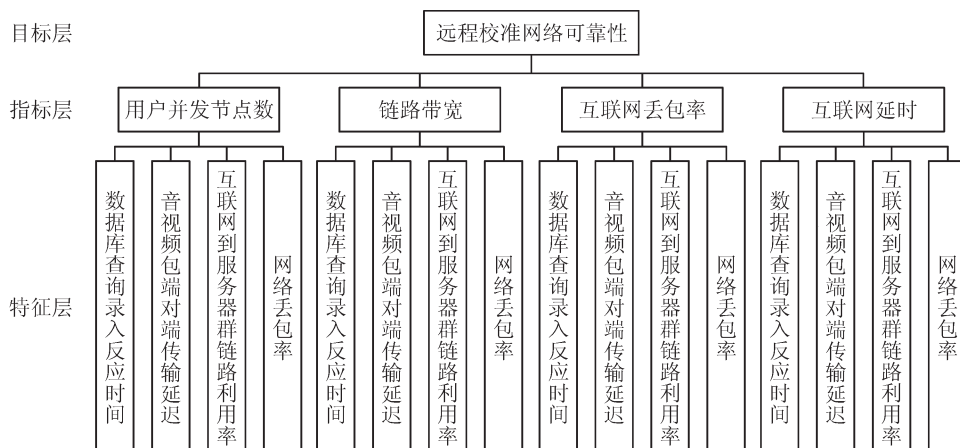


图2 远程校准网络层次化结构分析模型

Fig. 2 Hierarchical structure analysis model of remote calibration network

2 组合证据QoS可靠性评价

2.1 D-S证据识别框架

定义1: 设 Θ 为识别框架, 如果集函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ (2^Θ 为 Θ 的幂集) 满足 1) $m(\varphi) = 0$, 2) $\sum m(A) = 1$, 则称 m 为识别框架 Θ 上的基本信度分配; $\forall A \subseteq \Theta$, $m(A)$ 称为 A 的基本信度值。 $m(A)$ 反映了对 A 本身的信度的大小。

定义2: 如果 m 是一个基本信度分配, 则 $\forall A \subseteq \Theta$, $B \neq \varphi$, $\text{Bel} = \sum_{B \subseteq A} m(B)$, 则所定义的函数 Bel 是一个信度函数, $\text{Bel}(A)$ 反映了 A 上所有子集总的信度。

定义3: 对于 $\forall A \subseteq \Theta$, 识别框架 Θ 上的有限个 mass 函数 $m_1, m_2, \dots, m_n$ 的 Dempster 合成规则为

$$m(A) = \begin{cases} \frac{1}{K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(A_i) & A \neq \varphi \\ 0 & A = \varphi \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $A_i (i=1, 2, \dots, N)$ 分别为焦元; K 称为归一化因子

$$K = 1 - \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \varphi} \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(A_i) = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \varphi} \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(A_i) \quad (2)$$

将不同的网络特征看作不同的信息源, 采用 D-S 组合证据理论进行信息融合, 可评价电力仪表远程校准通信网的不确定性的问题。下面对电力仪表远程校准通信网建立网络 QoS 可靠性评估模型。

2.2 网络QoS可靠性特征空间

根据远程校准网络层次化结构分析模型, 对电力仪表远程校准网络可靠性综合评价的层次化体系和模型进行了分析, 采用 D-S 组合证据理论解决电力仪表远程校准通信网的不确定性的问题, 算法分为3个步骤^[25]。

2.2.1 步骤1

计算特征层特征的组合 mass 函数

输入:网络评分小组 m_i 对网络特征 A_i 进行打分

BEGIN

1)根据特征层的特征确定识别框架 Θ ;

2)各个网络评分小组成员对网络特征进行评分,并求取平均数 m_i ;

3)利用式(1)分别求取每个特征的组合 mass 函数 $m(A_i)$ 。

END

输出:特征的组合 mass 函数

2.2.2 步骤2

计算指标层指标的影响系数

输入:特征层的各个特征组合 mass 函数 $m(A_i)$

BEGIN

1)分析特征 A_i 对指标 B_i 的影响程度进行等级划分;

2)采用直接赋值法,给出每个特征 A_i 对指标 B_i 的权重 ω_i ;

3)根据公式

$$B_i = \sum_{i=1}^N \omega_i m(A_i) \quad (3)$$

合成得到量化的指标影响系数 B_i 。

END

输出:各个指标的影响系数 B_i

2.2.3 步骤3

确定目标层远程校准网络可靠性

输入:指标层的指标影响系数 B_i

BEGIN

1)比较指标影响系数 B_i ,选出最大者 $B_{\max}$;

2)对网络中指标 $B_{\max}$ 进行改善;

3)在改善指标 $B_{\max}$ 之后,重新测量远程校准系统网络参数,若各个参数都满足远程校准的要求,则说明远程校准网络是可靠的,完成网络可靠性综合评价;否则,重复步骤1)、2),重新选出 $B_{\max}$ 并进行网络改进和维护,直到所有的 B_i 满足远程校准网络可靠性的要求。

END

输出:确定远程校准网络的可靠性

通过以上3个步骤,首先融合了多个网络特征信息,确定对网络影响最大的指标,然后对其进行改善,直到所有的网络指标满足电力仪表远程校准网络可靠性的要求,从而实现对电力仪表远程校准通信网的不确定性问题分析。

2.3 实验仿真与分析

根据图1的远程校准业务网络任务模型,利用 OPNET 对其进行网络仿真,在校准中心、被校准中

心和服务器之间配置了网页、数据库、远程登录、FTP、语音、视频这6种业务传输,进行了5组实验,实验预设置参数和仿真收集参数见表1。

表1 5组实验的结果参数比较

Table 1 Comparison of result parameters of five groups of experiments

实验分组	参数设置	1	2	3	4	5
预设置参数	用户节点并发数 B_4	10/20	10/20	10/20	10/20	40 60
	互联网丢包率 $B_3/\%$	0.0	0.5	0.5	3.0	0.5 0.5
	互联网延时 B_2/ms	0	100	500	100	100 100
	互联网到服务器群链路带宽 B_1	PPP_SONET_OC24(1 244.16 Mbps)				
	路由器到视频服务器链路带宽	1000BaseX 双绞线(1 000 Mbps)				
	数据库查询录入反应时间 A_1/s	0.1	1.5	9.0	3.3	1.5 >10.0
	网络延时/ms	0.38	0.35	0.35	0.35	0.35 0.35
	FTP上传下载反应时间/s	0.05	1.10	4.20	2.00	1.10 >10.00
	Http 页面反应时间/s	0.085	2.000	8.500	3.500	2.000 >10.000
	远程登录反应时间	0.11	0.23	1.00	0.38	0.23 >6.00
仿真收集参数	音视频包端对端传输延迟 A_2/s	<0.09	<0.18	<0.60	<0.20	<0.18 <0.18
	服务器/路由器的CPU利用率/%	<11	<11	<10	<9	<19 <23
	互联网到服务器群链路利用率 $A_3/\%$	<36	<33	<36	<33	84 $\approx$ 100
	视频服务器到路由器链路利用率/%	<43	<43	<43	<40	72 $\approx$ 100
	网络丢包率 $A_4/\%$	0.0	<1.8	<1.6	<10.0	3.5 4.2

通过上述实验结果数据比较可以看出,在远程校准应用服务的延时中,互联网延时 B_2 比互联网丢包率 B_3 影响更大;在远程校准应用服务的丢包率中,互联网丢包率 B_3 比互联网延时 B_2 影响更大;网络用户并发节点数 B_4 和链路带宽 B_1 直接影响网络的整体性能,当网络带宽不够,将出现网络拥塞,甚至可以直接影响远程校准的正常业务。

假设现在只有表1实验3的仿真收集参数,需要评估该网络指标的不确定性。根据3.2节中采用D-S组合证据理论评估电力仪表远程校准通信网的不确定性问题的3大步骤如下。

2.3.1 步骤1

1) 根据 D - S 证据理论的定义1,由 A_1, A_2, A_3, A_4 这4个特征组成的识别框架为 $\Theta = \{\phi, A_1, A_2, A_3, A_4, A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{23}, A_{24}, A_{34}, A_{123}, A_{124}, A_{234}, A_{134}, A_{1234}\}$ 为简化文中的计算量,建立识别框架为 $\Theta' = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ 。

2) 文中选用两组评分小组 m_i 对网络特征 A_i 进行打分,打分的结果为 $\begin{cases} m_1 = (0.20, 0.10, 0.10, 0.60) \\ m_2 = (0.30, 0.15, 0.05, 0.50) \end{cases}$ 。

3) 利用式(1)求网络特征 A_i 的组合 mass 函数 $m(A_i)$ 得: $m(A_i) = (0.1579, 0.0395, 0.0132, 0.7895)$ 。

2.3.2 步骤2

1) 根据特征 A_i 对指标 B_i 的影响程度划分为3个等级,分别是重要 $[0.50, 1.0)$ 、中等 $[0.20, 0.50)$ 和轻微 $[0, 0.20)$ 。

2) 参照实验3的仿真收集参数,采用直接赋值法,给出每个指标 B_i 对特征 A_i 的权重 ω_i 如下:

$$B_1 = (0.25, 0.10, 0.50, 0.15)$$

$$B_2 = (0.25, 0.50, 0.15, 0.10)$$

$$B_3 = (0.25, 0.15, 0.10, 0.50)$$

$$B_4 = (0.10, 0.15, 0.50, 0.25)$$

3) 根据式(3)合成得到量化的指标影响系数 B_i 为

$$B_1 = \sum_{i=1}^4 \omega_i m(A_i) \approx 0.1685$$

$$B_2 = \sum_{i=1}^4 \omega_i m(A_i) \approx 0.1402$$

$$B_3 = \sum_{i=1}^4 \omega_i m(A_i) \approx 0.4415$$

$$B_4 = \sum_{i=1}^4 \omega_i m(A_i) \approx 0.2257$$

2.3.3 步骤3

1) 比较步骤二得到的指标影响系数 B_i , 选出最

大者 $B_{\max} = B_3$, 即互联网丢包率。

2) 对网络的互联网丢包率进行改善,来达到电力仪表远程校准网络传输的要求。

3) 重新测量远程校准系统网络参数,若各个参数都满足远程校准的要求,则说明远程校准网络是可靠的,完成网络可靠性综合评价;否则,重复步骤1、2,重新选出 $B_{\max}$ 并进行网络改进和维护,直到所有的指标 B_i 满足远程校准网络可靠性的要求。

通过以上网络特征组合证据理论评估的3个步骤可知,表1实验3的仿真收集参数主要是由互联网丢包率 B_3 指标引起的,即与仿真实验的预设置参数相符合,所以成功地用D-S证据理论分析了网络指标的不确定性。

3 结语

文中针对远程校准构建了网络层次化结构分析模型,然后对影响网络指标的不确定性运用D-S证据理论进行了分析,利用OPNET对网络进行仿真采集相关的数据进行验证,最后解决了电力通信网可靠性评价的不确定性问题。通过融合更多的网络特征、网络指标提高了远程校准网络可靠性的评估性能。为电力仪表远程校准网络性能可靠性评估与网络任务管理提供了理论方法与依据。

参考文献:

- [1] 吴卓葵. 开放网络环境远程校准系统建模与可信技术研究[D]. 广州:华南理工大学, 2014.
WU Zhuokui. Research on modeling and trustworthy technology of remote calibration system in open network environment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [2] 于福根. 中航XX院远程校准系统研究[D]. 西安:西北大学, 2009.
YU Fugen. Research on remote calibration system of AVIC XX hospital[D]. Xi'an: Northwest University, 2009.
- [3] 高阳. 基于Web的电力设备远程监控系统的设计与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
GAO Yang. Design and implementation of remote monitoring system for power equipment based on Web[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [4] 王海勇. 无线传感器网络数据可靠传输关键技术研究[D]. 镇江:江苏大学, 2014.
WANG Haiyong. Research on key technologies of reliable data transmission in wireless sensor networks[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014.
- [5] 李建平. 无线传感器网络可靠性评估方法研究[J]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2018.
LI Jianping. Research on reliability evaluation method of

- wireless sensor networks[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.
- [6] 王飞跃,王成红. 基于网络控制的若干基本问题的思考和分析[J]. 自动化学报, 2002, 28(s1): 171-176.
WANG Feiyue, WANG Chenghong. Thinking and analysis of some basic problems based on network control[J]. Acta Automatica Sinica, 2002(s1): 171-176.
- [7] 江勇. 网络传输控制的综合性能评价标准[J]. 计算机学报, 2002(8): 869-877.
JIANG Yong. Comprehensive performance evaluation criteria for network transmission control[J]. Chinese Journal of Computers, 2002(8): 869-877.
- [8] 张成龙. 无线传感器网络数据实时可靠传输研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
ZHANG Chenglong. Research on real-time reliable transmission of wireless sensor network data[D]. Guiyang: Guizhou University, 2017.
- [9] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353.
- [10] 杨仕平. 分布式任务关键实时系统的防危(Safety)技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004.
YANG Shiping. Research on the safety technology of distributed mission critical real-time systems[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004.
- [11] SAATY T L. Modeling unstructured decision problems - the theory of analytical hierarchies[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1978, 20(3): 147-158.
- [12] 刘普寅, 张维明. 通信网络可靠性研究中的数学问题[J]. 通信学报, 2000(10): 50-57.
LIU Puyin, ZHANG Weiming. Mathematical problems in the research of communication network reliability[J]. Transactions of Communications, 2000(10): 50-57.
- [13] 爰伟群. 动态测量不确定度问题初探[J]. 计量学报, 2003(3): 245-249.
YAN Weiqun. A preliminary study on the uncertainty of dynamic measurement[J]. Acta Metrologica Sinica, 2003(3): 245-249.
- [14] 梁志国. 数据采集系统误差限的测量不确定度[J]. 计量技术, 2002(9): 45-48.
LIANG Zhiguo. Measurement uncertainty of error limit of data acquisition system[J]. Metrology Technology, 2002(9): 45-48.
- [15] 高会生. 电力通信网可靠性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
GAO Huisheng. Reliability research of power communication network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [16] 孙岩, 吕世聘, 王秀坤, 等. 贝叶斯网络结构模型的构建[J]. 小型微型计算机系统, 2008(5): 859-862.
SUN Yan, LYU Shipin, WANG Xiukun, et al. Construction of bayesiannetwork structure model[J]. Small Computer Systems, 2008(5): 859-862.
- [17] 何小飞, 童晓阳, 孙明蔚. 基于贝叶斯网络和D-S证据理论的分布式电网故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 42-47.
HE Xiaofei, TONG Xiaoyang, SUN Mingwei. Distributed network fault diagnosis based on bayesiannetwork and D-S evidence theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 42-47.
- [18] HAIPING Z. D-S evidence theory based quality evaluation mechanism for network services[J]. Information Technology Journal, 2008, 7(4): 673-678.
- [19] 诸葛建伟, 王大为, 陈昱, 等. 基于D-S证据理论的网络异常检测方法[J]. 软件学报, 2006(3): 463-471.
ZHUGE Jianwei, WANG Dawei, CHEN Wei, et al. Network anomaly detection method based on D-S evidence theory[J]. Journal of Software, 2006(3): 463-471.
- [20] 李德仁, 王树良, 李德毅, 等. 论空间数据挖掘和知识发现的理论与方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002(3): 221-233.
LI Deren, WANG Shuliang, LI Deyi, et al. On the theory and method of spatial data mining and knowledge discovery [J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2002(3): 221-233.
- [21] 吴敏飞. 基于OPNET的校园网设计建模与仿真分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
WU Minfei. Design and simulation analysis of campus network design based on OPNET[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014.
- [22] 周慧. OPNET网络仿真及其应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
ZHOU Hui. OPNET network simulation and its application research[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2009.
- [23] 杜玉昊. 基于OPNET的工业控制系统仿真研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2018.
DU Yuhao. Simulation of industrial control system based on OPNET[D]. Beijing: North China University of Technology, 2018.
- [24] 刘艳秋, 李凡. 基于证据理论的通信网可靠性综合评价方法[C]. 第五届中国不确定系统年会. 中国, 武汉: [S.l.], 2007: 180-183.
LIU Yanqiu, LI Fan. Comprehensive evaluation method of communication network reliability based on evidence theory [C]/The 5th China Uncertain System Annual Meeting. Wuhan, China: [s.n.], 2007: 180-183.
- [25] 刘昕民, 桂卫华, 潘迪宏, 等. 一种基于D-S证据理论的QoS可信度评估方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013(3): 96-101.
LIU Xinmin, GUI Weihua, PAN Dihong, et al. A QoS credibility evaluation method based on D-S evidence theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013(3): 96-101.
- 汪泉(1985—), 男, 工程师, 博士研究生, 研究方向为计量与测试技术。
- 周玮(1986—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为计量与测试技术。
- 王昊(1967—), 女, 高级工程师, 本科, 研究方向为电磁计量及高电压技术。
- 梁国鼎(1981—), 男, 高级工程师, 本科, 研究方向为电磁计量。
- 陈习文(1982—), 男, 工程师, 本科, 研究方向为计量与测试技术。