



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

一种面向SDN的移动网络可靠性评估算法

包春晖, 庄毅, 郭黎烨

引用本文

包春晖, 庄毅, 郭黎烨. 一种面向SDN的移动网络可靠性评估算法[J]. 计算机科学, 2022, 49(11A): 211000080-8.

BAO Chun-hui, ZHUANG Yi, GUO Li-ye. SDN Oriented Mobile Network Reliability Evaluation Algorithm [J]. Computer Science, 2022, 49(11A): 211000080-8.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于最小生成树的vSDN故障快速恢复算法](#)

vSDN Fault Recovery Algorithm Based on Minimum Spanning Tree

计算机科学, 2022, 49(11A): 211200034-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.211200034>

[基于混合软件定义网络的单节点故障保护方法](#)

Single Node Failure Routing Protection Algorithm Based on Hybrid Software Defined Networks

计算机科学, 2022, 49(2): 329-335. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210100051>

[边缘环境下基于模糊理论的科学工作流调度研究](#)

Study on Scientific Workflow Scheduling Based on Fuzzy Theory Under Edge Environment

计算机科学, 2022, 49(2): 312-320. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201000102>

[基于元模型的协同建模模型组装与更新方法](#)

Cooperative Modeling Model Combination and Update Method Based on Meta-model

计算机科学, 2021, 48(12): 67-74. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201100024>

[基于加权图的链路映射算法](#)

Link Mapping Algorithm Based on Weighted Graph

计算机科学, 2021, 48(11A): 476-480. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201200216>

一种面向 SDN 的移动网络可靠性评估算法

包春晖¹ 庄毅¹ 郭黎焯²

¹ 南京航空航天大学计算机科学与技术学院 南京 211106

² 上海航天电子技术研究所 上海 201108

(1354274021@qq.com)

摘要 针对现有的可靠性评估算法无法直接应用于软件定义网络(SDN),以及传统网络可靠性评估过程中专家权重难以合理设置等问题,提出了一种面向 SDN 的移动网络可靠性评估算法,设计了细粒度的专家权重自适应调整方法,并详细地给出了网络可靠性评估的流程。首先,对 SDN 中的移动网络节点设备进行可靠性评估,在评估过程中引入专家评估模糊数,以更细粒度地对专家权重进行应调整;其次,根据基于 SDN 的移动网络拓扑结构对移动网络节点进行关键重要程度分析,来衡量不同类型节点设备在网络功能服务中的关键程度,以此计算出节点对网络整体可靠性的影响;最后,综合以上两个结果对整体网络进行可靠性分析与评估。通过实例和仿真实验验证了所提算法的有效性,相比同类算法可达到更高的评估准确性。

关键词: 软件定义网络; 可靠性评估; 专家权重; 模糊数

中图分类号 TP393

SDN Oriented Mobile Network Reliability Evaluation Algorithm

BAO Chun-hui¹, ZHUANG Yi¹ and GUO Li-ye²

¹ College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

² Shanghai Aerospace Electronic Technology Research Institute, Shanghai 201108, China

Abstract Aiming at the problems that existing reliability evaluation algorithms can not be directly applied to software defined network(SDN), and it is difficult to reasonably set the expert weight in the traditional network reliability evaluation process, a SDN oriented mobile network reliability evaluation algorithm is proposed, a fine-grained expert weight adaptive adjustment method is designed, and the network reliability evaluation process is given in detail. Firstly, the reliability of mobile network node equipment in SDN is evaluated, and the expert evaluation fuzzy number is introduced in the evaluation process to adaptively adjust the expert weight in a finer granularity. Secondly, according to the mobile network topology based on SDN, the critical importance of mobile network nodes is analyzed to measure the critical degree of different types of node devices in network function services, so as to calculate the impact of nodes on the overall reliability of the network. Finally, based on the above two results, the reliability of the whole network is analyzed and evaluated. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by examples and simulation experiments. Compared with similar algorithms, the proposed algorithm can achieve higher evaluation accuracy.

Keywords Software defined network, Reliability assessment, Expert weight, Fuzzy number

1 引言

随着计算机及网络技术的高速发展,人类进入了信息化时代。而伴随着信息化技术的发展,移动网络的应用已经渗入人们的日常生活中,随着大数据时代的来临,网络传输的数据业务剧增,业务功能更加复杂,这对移动网络提出了更高的要求。如今移动网络承载着越来越多的流量以及越来越丰富的服务,一旦发生故障导致服务中断,则会降低移动网络的服务质量,甚至造成巨大的损失。然而由于多种原因,如硬件设备老化、软件缺陷、恶劣的工作环境等,网络故障又无法避免^[1]。

随着网络技术的发展,软件定义网络(Software Defined Network, SDN)成为了下一代网络浪潮里一个令人瞩目的

发展方向。在 SDN 结构中,当遇到的复杂和特异性的问题时,其能够采用比一般网络更加快速灵活的方法来解决^[2]。作为一种新兴的网络技术,其控制与转发分离机制可以实现可编程化控制,集中控制方式使得网络控制管理与应用业务配置更加灵活和便捷,运用 SDN 技术来解决移动网络在复杂环境下难以控制管理的问题,可以起到很好的效果^[3]。

可靠性一直是网络可用性的一个关键问题。作为识别和分析脆弱性的有效方法,可靠性评估在各个领域得到了广泛应用。评估方法主要分为定性评估方法、定量评估方法以及定性与定量相结合的综合评估方法^[4]。在 SDN 中,可靠性也是一个值得研究的问题,对 SDN 进行可靠性分析与评估是提高 SDN 可靠性的重要技术途径^[5-7]。

目前移动网络的可靠性评估过程中仍面临如下的挑战:

基金项目:航空科学基金(2016ZC52030)

This work was supported by the Aeronautical Science Foundation of China(2016ZC52030).

通信作者:庄毅(zy16@nuaa.edu.cn)

(1)由于移动网络的日益复杂化^[8],针对不同的网络结构,可靠性评估指标体系呈现形式不同,专家对不同结构体系的移动网络评估方法的不同导致评分可能不合理;

(2)在评估过程中,专家的权重一般根据经验静态赋值或采用等值法,主观性强,难以根据评估过程中具体情况动态调整,缺乏自适应性;

(3)评估过程比较单一,往往不具备从其他方面对移动网络的单一节点和整体状态进行可靠性评估的能力。

针对以上问题,本文开展了基于SDN的移动网络可靠性评估与加固算法的研究。主要贡献如下:

(1)建了一种基于SDN的移动网络可靠性评估模型,提出了基于SDN的移动网络可靠性评估算法(A SDN Reliability Evaluation Algorithm With Three Dimensions, REATD),给出了完整的评估框架;

(2)提出了基于SDN的移动网络单一节点可靠性评估算法,可自适应地调节专家权重,采用专家模糊数分值对专家的权重进行更细粒度的调整;

(3)设计了从其他方面对SDN中节点的关键程度评估分析的可靠性评估框架,考虑了网络的整体特性与结构,给出了较为完善的可靠性评估框架。

根据上述工作编码实现了可靠性评估算法,进行了仿真评估实验^[9],并给出了结果分析,验证了所提算法的有效性,其相比于同类算法可更简单高效地实现基于SDN的移动网络可靠性评估,并具有准确性与有效性。

2 相关研究

提升可靠性一直是解决网络可用性的一个关键技术,针对网络的可靠性评估也一直是研究的热点之一。1955年Lee通过研究电信交换网络,最早对网络化系统的可靠性进行了研究,主要提出了以连通度作为可靠性的评估指标^[10]。已有的网络评估算法中,代表算法可大致分为3类:传统的精确评估算法、基于近似计算的评估算法和基于机器学习的可靠性评估算法。

早期传统的精确评估算法有:状态枚举法、不交和积法、容斥原理方法和因子分解法。但这些算法都有非确定性问题,在网络可靠性评估上都是NP难题,所以很难应用于如今的大型网络中来衡量网络的可靠性。因此,近年来很多针对大规模网络的近似算法被研究及运用于可靠性评估中,如Rosenthal提出图变化法^[11],Esary以及Provan提出了定上下界法^[12],还有一些仿真方法包括蒙特卡罗仿真方法、Petri网方法、神经元网络法等也常用于基于近似计算的可靠性评估中。长期以来,我国也开展了大量的网络系统的可靠性技术研究,如国防科技大学Zhao等提出了基于Petri网的仿真评估方法以及基于信息流动力学的通信网络性能可靠性的仿真评估方法^[13],它们虽然具有较强的灵活性及可操作性,但在大型网络系统中的应用仍有待进一步提高。北京邮电大学Shao等提出了一种采用概率法计算网络元件故障造成的业务损失,然后计算业务网络风险的评估方法。该方法易于理解,但概率法得到的故障概率起伏比较大,得到的结果不够稳定^[14]。以上的可靠性评估方法由于网络系统的差异性,通常不具有通用性,往往无法直接应用于SDN。

近年来,随着机器学习技术的发展,已有不少国内外学者将其引入到可靠性评估过程^[15]。基于机器学习的可靠性评估算法非常适用于对节点和链路数目较多、规模较大的网络的可靠度进行可靠性评估近似计算。Moshnikov等采用蒙特卡罗方法来确定MTBF和故障概率^[16],对三级信息传输的网络结构进行评估。Liang提出了一种基于灰色关系分析的连接可靠性评估方法,从有限的知识中计算出成为良好质量链接的概率^[17],验证了提出算法的有效性;但在成本受约束的情况下优化程度不高。Nie等提出将一种机器学习算法和层次分析法综合运用以计算分布网络线路风险的评估方法,可以有效评估分布网络线路风险^[18],但所需时间开销大且精度受限于指定网络,局限性较大。

综上所述,虽然上述传统方法与基于机器学习的方法研究已取得了较多进展及应用,然而因为SDN网络与传统网络的差异性,一般的可靠性评估方法不能直接应用于基于SDN的移动网络;另一方面,基于机器学习的评估模型通常有局限性,并且所需时间与开销很大,已有方法存在训练困难、鲁棒性差等问题,难以满足对网络进行全面的可靠性评估的需求。因此本文针对节点可靠性评估过程中专家权重可能存在设置不合理的问题,借鉴三角模糊数思想,考虑权重自适应调整算法;针对评估过程中无法考虑网络整体状态的问题,从拓扑层面进行网络可靠性分析的算法研究,旨在为基于SDN的移动网络提供多维度的网络可靠性评估方法,从而提高评估结果的准确性。

3 基于SDN的移动网络可靠性评估计算方法

基于SDN的移动网络设有一个或多个控制器对数据层面的多个转发器网络进行控制,多个控制器组成控制层面对转发器组成的数据层面进行集中控制,且具有完全的调度与控制权,而转发器只具有简单的数据转发功能。因此在对其进行可靠性评估时不可一概而论。

本文从节点的可靠性和节点对网络的关键影响程度来评估基于SDN的移动网络可靠性,对比网络完全可用时的状态与现有网络状态,从而得出最终评估结论。通过分析节点的可靠性,可以将网络的整体可靠性从网络宏观层面剥离出来,在最终获得整体评估结果时,更好地了解每一个节点可能失效的概率,从整体与局部得出分析结果;通过分析节点对网络的关键影响程度,可以从网络整体维度分析网络连通状态与节点的关联性,为后续的可靠性分析甚至加固提供数据支持。具体分析与计算方法为:分析移动网络中单一节点的可靠性,给出了基于自适应专家权重的评估算法;在此基础上针对整体网络的可运行状态,从网络连通功能的缩减对网络进行可靠性分析。

3.1 基于SDN的移动网络可靠性评估相关定义

定义1 基于SDN的移动网络总体可靠性可描述为式(1)所示的二元组。

$$Reli = \langle Urisk, Crisk \rangle \quad (1)$$

其中:

(1)Reli为网络的总体可靠性评估值, $Reli \in [0, S^{boken} \times (\mu x + \sigma y) \times 100\%]$,其中 S^{boken} 表示节点故障时的设定值, μ 和 σ 分别为基于SDN的移动网络中控制器重要度系数和

转发器重要度系数, $\mu > \sigma$; x 和 y 分别是控制器节点数量和转发器节点数量。

(2) $Urisk = (Urisk_1, Urisk_2, \dots, Urisk_n)^{1 \times n}$ 为基于 SDN 的移动网络中节点的可靠性脆弱值矩阵, 矩阵中值为 $Urisk_i \in [0, S^{\text{boken}}]$; 其中 n 为基于 SDN 的移动网络控制器节点和转发器节点数量总和, $x + y = n$ 。

(3) $Crisk = ((Crisk_u^{\text{con}})^{1 \times x}, (Crisk_v^{\text{change}})^{1 \times y})^{1 \times n}$ 为基于 SDN 的移动网络中节点关键影响程度脆弱值矩阵; $Crisk_u^{\text{con}}$ 表示控制器节点的影响脆弱值, $Crisk_u^{\text{con}} \in [0, 1]$; $Crisk_v^{\text{change}}$ 表示转发器节点影响脆弱值, $Crisk_v^{\text{change}} \in [0, 1]$ 。

定义 2 节点可靠性的影响因素可分为式(2)所示的两种:

$$\begin{cases} risk^{\text{con}} = (t^{\text{con}}, r^{\text{con}}) \\ risk^{\text{change}} = (t^{\text{change}}, r^{\text{change}}) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $risk^{\text{con}}$ 表示 SDN 中的控制器节点的可靠性评估影响因素; t^{con} 表示在该指标体系中所评估控制器节点的危险程度值, 包括控制器节点的使用时长、所处环境、内存使用情况、数据下发时延、控制器之间通信时延以及此控制器节点的备份控制器节点数等影响控制器节点危险程度的因素^[19]; r^{con} 表示在该指标体系中控制器节点的故障应对措施的有效值; $risk^{\text{change}}$ 代表转发器节点的可靠性评估影响因素; t^{change} 表示在该指标体系中所评估转发器节点的危险脆弱值, 包括转发器节点的使用时长、所处环境、转发状态、转发时延、转发数据输入输出率和吞吐量以及此转发器节点的备份转发器节点数等影响转发器节点危险程度的因素; r^{change} 表示在该指标体系中转发器节点的故障应对措施的有效值。

定义 3 网络节点的危险脆弱值模糊矩阵 \mathbf{T} 和故障应对措施有效值模糊矩阵 \mathbf{R} 分别表示为 $\mathbf{T} = [t_{ij}] (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m)$, $\mathbf{R} = [r_{ij}] (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m)$, 其中 i 为不同节点编号, j 为不同专家编号。 \mathbf{T} 和 \mathbf{R} 中节点危险脆弱值、故障应对措施有效值都采用模糊向量表示: $t_{ij} = (t_{ij}^l, t_{ij}^m, t_{ij}^u)$, $r_{ij} = (r_{ij}^l, r_{ij}^m, r_{ij}^u)$ 。其中, $0 \leq t_{ij}^l \leq t_{ij}^m \leq t_{ij}^u \leq S^{\text{boken}}$, $0 \leq r_{ij}^l \leq r_{ij}^m \leq r_{ij}^u \leq S^{\text{boken}}$, 两个上限值 S^{boken} 相同表示节点危险脆弱值和故障应对措施有效值采用不同的评估体系, 但评估取值区间一致; 当等号成立时表示该节点的危险脆弱值和故障应对措施的有效值退化为具体的精确值。 t_{ij}^l 表示专家给出的节点危险脆弱值的下界值, t_{ij}^m 表示节点危险脆弱值最可能的取值, t_{ij}^u 则表示节点危险脆弱值的上界值, r_{ij}^l, r_{ij}^m 和 r_{ij}^u 与其类同。

3.2 节点可靠性

3.2.1 节点可靠性的计算

节点的可靠性反应节点的综合状态, 本文根据所有专家给出的所有网络节点的危险脆弱值模糊矩阵和故障应对措施有效值模糊矩阵, 以及所有专家的综合权重向量 $[\varphi]^{m \times 1}$, 计算所有节点本次分析的可靠性脆弱值矩阵 \mathbf{Urisk} , 以模糊矩阵的形式更细粒度地衡量节点的危险程度以及故障应对措施的有效性。

参考文献[20], \mathbf{Urisk} 计算方法如式(6)所示。

$$\mathbf{Urisk} = \left(\left[\left(S^{\text{boken}} - \frac{1}{2} (\tau_{ij} r_{ij}^u + r_{ij}^m + (1 - \tau_{ij}) r_{ij}^l) \right) / S^{\text{boken}} \right] \times \frac{1}{2} (\tau_{ij} t_{ij}^u + t_{ij}^m + (1 - \tau_{ij}) t_{ij}^l) \right)^{n \times m} \times [\varphi]^{m \times 1} \quad (6)$$

其中 τ_{ij} 表示上下界重要系数, τ_{ij} 越大表示越倾向于专家的上

界预测值, 反之则越倾向于专家的下界预测值; 矩阵 \mathbf{Urisk} 中节点 i 的可靠性脆弱值 $Urisk_i$ 越高表明节点 i 越容易发生故障事件。

3.2.2 专家权重自适应调整

进行节点可靠性分析后, 给出初始节点可靠性脆弱值 $risk$, 其值为 $0 \sim S^{\text{boken}}$, 默认节点开始时为正常节点, 设初始值为 0, 即 $\mathbf{Urisk} = (Urisk_i) = (0, 0, \dots, 0)$, $i=1, 2, \dots, n, i=1, 2, \dots, n, i$ 为节点编号。

由数位专家对节点的可靠性进行预测, 给出 m 位专家的初始权重 $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m) = \left(\frac{1}{m}, \frac{1}{m}, \dots, \frac{1}{m} \right)$, 其中 $\sum_{i=0}^m \varphi_i = 1$ 。由 m 位专家对不同节点进行可靠性的脆弱性分析, 综合得出所有网络节点的危险脆弱值模糊矩阵 \mathbf{T} 和故障应对措施有效值模糊矩阵 \mathbf{R} 。

一位专家的预测值若与其他专家的预测结果偏差过大, 则应降低此专家的权重值。

专家偏移量可分为专家预测最可能取值的偏离量 $T_{ij}^{\text{deviation may}}$ 和总体偏移量 $T_{ij}^{\text{deviation all}}$ 。就第 i 个节点的危险脆弱程度, 通过计算第 j 位专家给出的节点危险脆弱值的最可能的值 t_{ij}^m 与 m 个专家的平均值 $\bar{t}_i^m = \varphi_j \sum_{j=1}^m t_{ij}^m$, 可计算出专家预测最可能取值的偏离量和总体偏移量, 通过分别计算最可能取值的偏移量和总体偏移量, 可以更准确全面地判断专家偏移量。 $T_{ij}^{\text{deviation may}}$ 和 $T_{ij}^{\text{deviation all}}$ 的计算方法如式(3)与式(4)所示:

$$T_{ij}^{\text{deviation may}} = \sqrt{(t_{ij}^m - \bar{t}_i^m)^2} \quad (3)$$

$$T_{ij}^{\text{deviation all}} = \sqrt{\frac{|t_{ij}^l - \bar{t}_i^l|^2 + |t_{ij}^m - \bar{t}_i^m|^2 + |t_{ij}^u - \bar{t}_i^u|^2}{3}} \quad (4)$$

其中, $T_{ij}^{\text{deviation may}}$ 越大则表明对于正在分析的节点而言, 此专家预测的最可能节点危险脆弱值与专家群体总体预测的最可能节点危险脆弱值结果越偏离, 差距越大; $T_{ij}^{\text{deviation all}}$ 越大, 表明此专家预测的节点危险脆弱模糊值与专家群体总体预测的节点危险脆弱模糊值越偏离, 差距越大。专家预测的故障应对措施最可能值的偏离量 $R_{ij}^{\text{deviation may}}$ 和总体偏移量 $R_{ij}^{\text{deviation all}}$ 含义与 $T_{ij}^{\text{deviation may}}$ 和 $T_{ij}^{\text{deviation all}}$ 类似。

通过第 i 个节点专家预测的危险脆弱程度和故障应对措施有效程度, 可以得出专家预测的危险脆弱值的最终偏移量 $T_{ij}^{\text{deviation}}$ 和故障应对措施有效值的最终偏移量 $R_{ij}^{\text{deviation}}$ 。 $T_{ij}^{\text{deviation}}$ 的计算方式如式(5)所示。

$$T_{ij}^{\text{deviation}} = \alpha T_{ij}^{\text{deviation may}} + (1 - \alpha) T_{ij}^{\text{deviation all}} \quad (5)$$

其中, $T_{ij}^{\text{deviation}}$ 表示专家预测的节点危险脆弱值的最终偏离量, α 越大表示越在意专家预测的最可能的值, 反之则表示越在意专家预测的模糊预测值; $R_{ij}^{\text{deviation may}}$, $R_{ij}^{\text{deviation all}}$ 和 $R_{ij}^{\text{deviation}}$ 的含义与 $T_{ij}^{\text{deviation may}}$, $T_{ij}^{\text{deviation all}}$ 和 $T_{ij}^{\text{deviation}}$ 类似。

权重向量的自适应调节方法如下:

步骤 1 根据危险脆弱值模糊矩阵 \mathbf{T} 和故障应对措施有效值模糊矩阵 \mathbf{R} 计算第 i 个节点专家预测最可能值的偏离量 $T_{ij}^{\text{deviation may}}$ 和总体偏移量 $T_{ij}^{\text{deviation all}}$, 根据最可能值的偏离量和总体偏移量计算专家预测的节点危险脆弱值的最终偏离量 $T_{ij}^{\text{deviation}}$ 。 $R_{ij}^{\text{deviation may}}$, $R_{ij}^{\text{deviation all}}$ 和 $R_{ij}^{\text{deviation}}$ 的计算方式与 $T_{ij}^{\text{deviation may}}$, $T_{ij}^{\text{deviation all}}$ 和 $T_{ij}^{\text{deviation}}$ 类似。

步骤 2 计算专家预测的节点可靠性脆弱值偏移量

$risk_{ij}^{deviation}$ 的方法如式(7)所示:

$$risk_{ij}^{deviation} = \beta T_{ij}^{deviation} + (1-\beta)R_{ij}^{deviation} \quad (7)$$

β 值越高则表示越在乎专家预测的危险脆弱值偏移量, 越小则表示越在乎预测的故障应对措施有效值偏移量。

步骤3 根据上述计算结果, 累加得出所有节点的单个专家的偏移量, 第 j 位专家的偏移量 $risk_j^{deviation}$ 的计算方法如式(8)所示:

$$risk_j^{deviation} = \gamma \left(\frac{\sum_{u=1}^x risk_{uj}^{deviation}}{x} \right) + (1-\gamma) \left(\frac{\sum_{v=1}^y risk_{vj}^{deviation}}{y} \right) \quad (8)$$

其中, x 为 SDN 中控制器节点数, y 为 SDN 中转发器节点数, $x+y=n$; $\gamma > 0.5$ 表示控制器的偏移比重应比转发器所占偏移比重更大。

步骤4 根据所有专家的最终偏离量, 计算第 j 个专家的本次客观权重 φ_j' , 若不存在某个 $risk_j^{deviation} = 0$, 则 φ_j' 的计算方式如式(9)所示:

$$\varphi_j' = \frac{risk_j^{deviation}}{\sum_{j=1}^m risk_j^{deviation}} \quad (9)$$

若存在某个 $risk_j^{deviation} = 0$, 即说明此专家预测结果无偏差, 则客观权重的计算方式如式(10)所示:

$$\varphi_j' = \begin{cases} \frac{\rho \times risk_j^{deviation}}{\sum_{j=1}^m risk_j^{deviation}}, & risk_j^{deviation} \neq 0 \\ \rho, & risk_j^{deviation} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中, ρ 表示预测无偏差专家在所有专家中应占权重的百分比。

步骤5 计算专家 j 的综合权重 φ_j , 计算方法如式(11)所示。

$$\varphi_j = \delta \varphi_j' + (1-\delta) \varphi_j'' \quad (11)$$

其中, φ_j' 为专家此次评估的客观权重, φ_j'' 为专家历史评估的客观权重平均值; $\delta \in [0, 1]$ 表示综合调整因子, δ 取值越大, 表示权重越倾向于专家的本次权重, 否则表示更倾向于专家的历史权重。

由此可得到所有专家的综合权重向量 $\boldsymbol{\varphi} = \{\varphi_i\}$, ($i=1, 2, \dots, m$)。

3.3 节点可靠性关键影响程度

网络的连通程度是网络可靠性的重要评估指标。在评估一个网络是否可靠健壮时, 网络节点之间能否连通以及完成指定的传输功能是一个网络最基本的目标。一般考虑网络连通程度是从网络拓扑结构出发, 所考察的内容为基础节点设备对网络的基本支持能力及对网络整体性能的影响。

在本文中, 节点可靠性关键影响程度表示某节点失效对网络整体的失效面积的影响。若某节点失效时不仅导致节点本身不可用, 还导致未失效节点处于一个不可用的状态, 即网络处于不连通状态, 则此节点需要着重考虑; 反之若此节点失效时没有其他节点处于不可达的状态, 则此节点对网络整体的可靠性影响较小。基于上述原则, 本文在评估计算一个节点对网络连通状态影响的同时, 评估包含此节点在内的多个节点失效的影响面积, 更加综合考虑节点的关键程度。

节点对基于 SDN 的移动网络可靠性的关键影响程度可分为控制器节点的影响程度和转发器节点的影响程度。根据 SDN 中控制器的连通特性, 若某个控制器节点失效, 其下属转发器都无法在网络中与其他节点连通, 控制器节点 u 失效

对网络整体失效的影响 $Crisk_u^{con}$ 的计算方式如式(12)所示:

$$Crisk_u^{con} = c + 1 \quad (12)$$

其中, c 为控制器 u 所连的下属转发器节点数量。对控制器节点统计其所控制的转发器节点数量, 控制器失效影响的总节点数为转发器总数加一。

任何一个转发器都所属于某控制器, 受此控制器控制管理, 此控制器控制的所有转发器节点构成一个转发子网。故转发器节点 v 对基于 SDN 的移动网络可靠性的影响程度仅受限于所属的转发子网。转发器节点 v 失效对网络整体失效的影响计算方式如式(13)所示:

$$Crisk_v^{change} = \sum_{e=1}^3 P_e * \frac{1}{e} (unuse_e) \quad (13)$$

其中, $unuse_e$ 表示转发子网中包括节点 v 在内的 e 个转发器节点失效导致的此转发子网中失联的节点数量, P_e 为节点失效数量的概率。

分别计算控制器节点失效对网络整体失效节点的影响 $Crisk_u^{con}$ 与转发器节点失效对网络整体失效节点的影响 $Crisk_v^{change}$ 。

对某控制器所属的转发器节点, 计算 v 转发器单一节点失效导致的转发器节点失效的数量, 并计算包括 v 转发器在内的多转发器节点失效导致的转发器节点失效数量, 可以较为全面地考虑包含节点 v 的多节点失效情况, 计算此转发子网多节点失效的影响。

由于考虑控制器节点的控制属性, 同一转发子网内的每个转发器都应受此控制器管理控制, 故采用深度优先算法, 从 v 转发器所在转发子网的控制器节点出发, 查找某个节点或多个节点失效后的不可连接的节点数量。对控制器节点和转发器节点进行归一化处理, 由于在 SDN 的网络节点中, 控制器与转发器节点不具备同一性, 节点属性不能统一进行归一, 因此本文给出式(14)和式(15), 可由它们分别得出控制器 u 和转发器 v 的可靠性关键影响程度脆弱值。

$$Crisk_u^{con} = \frac{Crisk_u^{con}}{\text{MAX}(Crisk_1^{con}, \dots, Crisk_c^{con})} \quad (14)$$

$$Crisk_v^{change} = \frac{Crisk_v^{change}}{\text{MAX}(Crisk_1^{change}, \dots, Crisk_c^{change})} \quad (15)$$

其中, x 表示 SDN 中控制器数量, c 为转发器 v 所在的转发子网中转发器总数, 所有转发子网的转发器总数为 y 。

最终计算得出所有节点本次分析的关键影响程度脆弱值矩阵 $((Crisk_u^{con})^{1 \times x}, (Crisk_v^{change})^{1 \times y})^{1 \times n}$ 。

4 基于 SDN 的移动网络可靠性评估模型与算法

4.1 基于 SDN 的移动网络可靠性评估模型

本文运用群体多决策理论进行移动网络的定性与定量评估模型研究, 提出了面向 SDN 的移动网络可靠性评估框架。根据式(1), 网络可靠性评估值 $Reli$ 由两部分决定: 节点可靠性矩阵 $Urisk$ 和节点关键影响程度脆弱值矩阵 $Crisk$, $Urisk$ 和 $Crisk$ 的计算方式分别如上述 3.2 节和 3.3 节部分所示。

$Reli = \langle Urisk, Crisk \rangle$ 计算方式如式(16)所示:

$$Reli = (Crisk^{con}, Crisk^{change})^{1 \times n} \times (Urisk)^{n \times 1} \quad (16)$$

基于 SDN 的移动网络可靠性评估机制框架如图 1 所示, 评估过程包含 4 个阶段: 准备阶段、节点可靠性计算阶段、节点关键影响程度计算阶段和网络总体可靠性评估计算阶段。

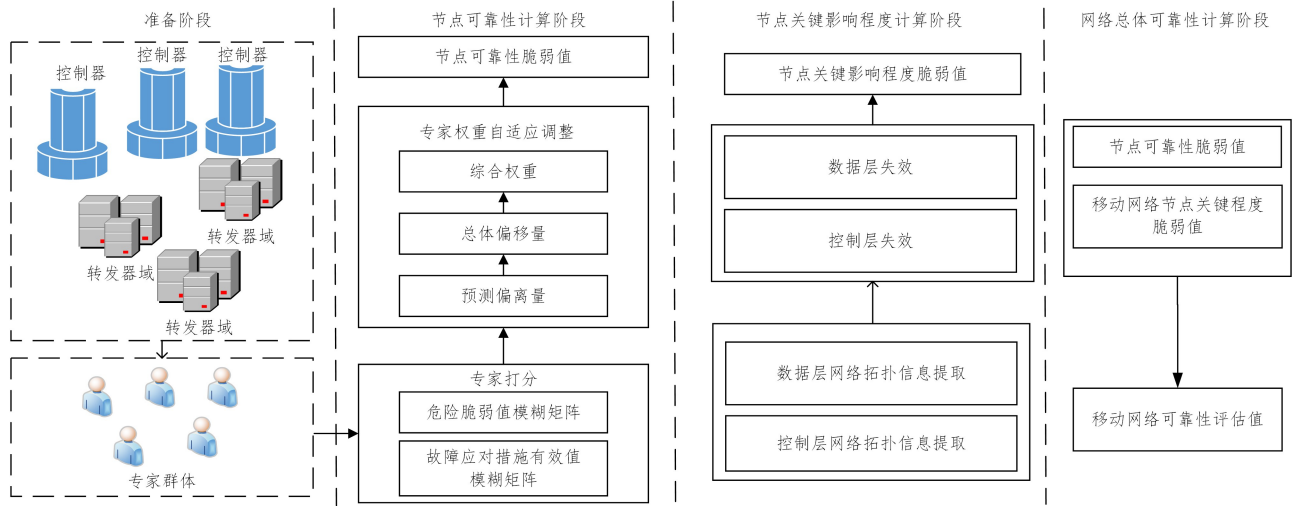


图1 基于 SDN 的移动网络可靠性评估算法框架图

Fig. 1 Framework diagram of SDN based mobile network reliability evaluation algorithm

(1)准备阶段:该阶段主要确定需要可靠性评估的基于 SDN 的移动网络系统,根据移动网络的功能和特点遴选相关领域的专家群体 E 作为评估者集合。

(2)节点可靠性计算阶段:首先分析网络节点的诸多属性要素,构建风险指标体系,并由多位专家计算给出模糊评分,构成威胁度矩阵以及措施有效程度矩阵。根据专家给出的模糊评分与专家群体的偏移量,自适应调整专家的权重值,基于专家调整后的最终权重以及威胁度矩阵、措施程度矩阵,根据式(2)一式(11)最终得出网络节点的可靠性脆弱值矩阵。

(3)节点关键影响程度计算阶段:分别根据控制器层与转发器层节点失效导致的网络割裂,评估网络连通分支的加减情况,以此衡量计算网络节点关键影响程度脆弱值,根据式(12)一式(15)最终得出网络节点关键影响程度脆弱值矩阵。

(4)网络总体可靠性评估计算阶段:该阶段根据式(16)对上述两个计算阶段中取得的结果矩阵进行再计算,最终得出网络总体可靠性评估值。

4.2 基于 SDN 的移动网络可靠性评估算法

本文提出的基于 SDN 的移动网络可靠性评估算法的伪代码如算法 1 所示。

算法 1 可靠性评估机制算法

输入:专家群体 E ,网络节点矩阵 N

输出:专家权重矩阵集 $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m)$ 、节点可靠性脆弱值矩阵

$Urisk$ 、节点关键影响程度脆弱值矩阵 $Crisk$ 和最终可靠性评估值 $Reli$

1. 生成 φ
2. for $e_j (1 \leq j \leq m)$ in E
3. 针对不同指标专家进行打分 (t, r) ;
4. end for
5. 生成节点危险脆弱值 T 、故障应对措施有效值模糊矩阵 R
6. for $n_i (1 \leq i \leq n)$ in N
7. for $e_j (1 \leq j \leq m)$ in E
8. 计算 $risk_{ij}^{deviation}$ from $T_{ij}^{deviation}, R_{ij}^{deviation}$ of e_j ;
9. end for
10. 计算专家偏移量 $risk_{ij}^{deviation_j}$;
11. end for
12. 生成专家权重向量 $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m)$;
13. 生成 $Urisk$,按行和列对其进行规范化;

14. for $n_i (1 \leq i \leq n)$ in N

15. 生成 $Crisk$,按行和列对其进行规范化;

16. end for

17. 计算最终评估值 $Reli$

根据算法 6—12 行可以得到专家群体的权重矩阵集 $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m)$,充分结合了专家的个体权威和客观表现;在此基础上得到节点可靠性矩阵 $Urisk$ 和节点关键程度影响脆弱值矩阵 $Crisk$,可以有效地表现网络的特征属性,最后计算得到网络最终可靠性评估值 $Reli$,从而更好地反应网络的可靠状态情况。

5 实验结果与分析

5.1 实验设计

为了验证本文提出的基于 SDN 的移动网络中可靠性评估的有效性,本文进行了相关实验。实验的软硬件环境配置如下:CPU 为 i5-3470,内存为 8GB;使用的操作系统为 Ubuntu-16.04.1 i686;使用 Mininet 和 OpenDayLight 进行网络实验环境的构建。本文仿真环境实验如图 2 所示,将 SDN 网络作为实验对象,并邀请了 6 位专家对该 SDN 的网络节点进行可靠性评估。

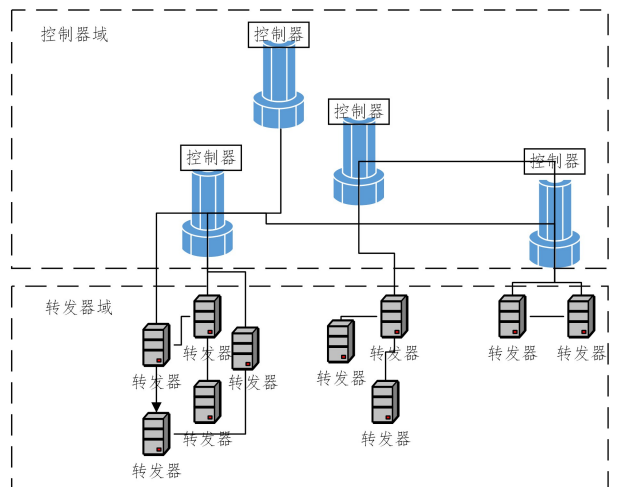


图2 实验示例-基于 SDN 的移动网络结构图

Fig. 2 Experimental example-SDN based mobile network structure diagram

将可靠性等级定性地分为 5 级,即 $S = \{\text{极低, 低, 中等, 高, 极高}\}$ 。参考文献[21-24],可靠性等级定量的取值范围如表 1 所列。

表 1 可靠性等级及取值范围

Table 1 Reliability grade and value range

可靠性等级	极高	高	中等	低	极低
取值范围	[0,28]	[29,56]	[57,84]	[85,112]	[113,140]

5.2 实验结果与分析

5.2.1 评估结果及分析

本文通过定量的可靠性评估算法、基于机器学习的可靠性评估算法与本文提出的算法 REATD 针对图 2 所示的基于 SDN 的移动网络进行对比评估实验,选取文献[14]中提出的定量网络可靠性评估算法(Network Risk Assessment Methodology for Power communication business, NRAMP)以及文献[18]中提出的基于机器学习和层次分析法的评估算法(AHP-based Multi-factor Medium Voltage Distribution Network Line Risk Quantitative Assessment Method, AHPML)进行对比实验。因为这些可靠性评估算法都是针对普通计算机网络或传感器网络,因此本文对这两种算法进行了相应修改,增加了本文针对 SDN 中不同类型网络节点对网络影响程度的计算来完成对比实验,以更好地进行对比;对 SDN 的风险划分等级采用表 1 中的可靠性等级与取值范围。

参考文献[20-21],设本文中参数 $\alpha, \beta = 0.5$, 控制器转发器比重 $\gamma = 0.75, \rho = 0.5$, 综合调整因子 $\delta = 0.3$, 上下界重要系数 $\chi_{ij} = 0.5, S^{\text{boken}} = 10$ 。

经过多次实验与结果分析,在设置了可靠性等级基准为高的网络示例对象中,3 种算法的评估结果如表 2 所列。NRAMP 算法给出了评估等级“中等”的结果;AHPML 算法给出了等级“高”的评估结果。NRAMP 算法没有考虑到专家权重的问题,评估结果受专家主观性影响较大;AHPML 算法采用机器学习和层次分析法综合进行评估,评估时间较长,时间开销较大。本文提出的 REATD 算法给出的风险等级为“高”,与 AHPML 所得结果相近。原因是本文提出的算法在设定故障数量与故障节点关键程度有约束的情况下,结合多位专家的评估意见与真实运行情况,可以反应该网络近段时间的实际运行情况,因此,相比于等权重的评估算法,本文提出的算法可以满足评估需求,而相比于基于机器学习的算法,本文算法性能更好,所需时间更短。

表 2 对比实验评估结果

Table 2 Evaluation results of comparative experiments

模型	可靠性评估值	可靠性等级
NRAMP	71	中等
AHPML	51	高
REATD	54	高

本文在多种场景、多种设备条件下进行了多次实验,且通过多次实验对比来消除实验过程中的偶然性和异常性,3 种算法的评估结果差异如图 3 所示,实验中 3 种算法所需时间开销对比如图 4 所示。

通过上述对比实验可以看出,本文提出的评估算法 REATD 与 AHPML 所得评估结果较为相近,且符合该网络的近段时间的实际运行情况;而选取的定量评估算法

NRAMP 与其他两个算法有较大差异,不符合网络的实际运行情况;相比于 AHPML,本文提出的 REATD 所需的时间开销大幅度缩小,可以在更短的时间内完成评估。

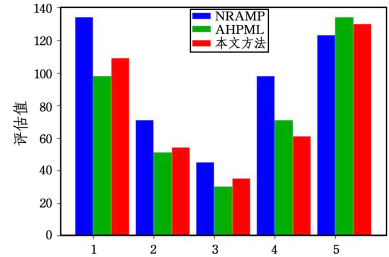


图 3 评估结果对比图

Fig. 3 Comparison chart of evaluation results

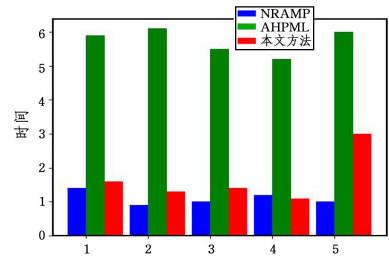


图 4 时间开销对比图

Fig. 4 Chart of time cost comparison

5.2.2 权重分析

本文分别采用等专家权重(Possibility Distribution-Based Approach for MAGDM With Hesitant Fuzzy Linguistic Information, HFLWA)^[25]、基于历史数据的专家权重(Information system security situation index based on business efficiency, BECM)^[26]、基于一致性差异度的专家权重(A posteriori weight determination method based on improved language evaluation scale, PWESLI)^[27]和本文提出的 REATD 算法对专家权重调整方法进行对比,算法对比如表 3 所列。

表 3 专家权重调整算法特点比较

Table 3 Comparison of expert weight adjustment algorithms

评估算法	多专家参与	多节点	专家主观性	权重改变后评估均值动态改变
HFLWA	✓	✓	—	—
BECM	✓	✓	—	—
PWESLI	✓	✓	✓	—
REATD	✓	✓	✓	✓

相比于等权重的评估算法 HFLWA,本文提出的 REATD 算法考虑了多专家评估合理性的问题,可根据群体的评估结果对专家进行权重的调整。对比实验结果表明此算法得到的评估值更加合理。

相对于基于历史数据的专家权重评估算法 BECM,本文的算法通过专家当前的主观意识实时对网络进行评估,不依赖于历史的经验数据,更易操作且精准。

基于一致性差异度的专家权重的评估算法 PWESLI 由于没有考虑到当前权重变化会改变评估均值而导致评估结果不一定准确。基于一致性差异度的专家权重评估的基本思想是:专家给出的所有评估值与其他专家群体的评估值的一致性越高、差异性越小,则此位专家权重应该越大;反之,则

越小。但在改变专家权重以后,专家群体的评估均值也会随之改变,专家评估值的一致性、差异度会随之之前的变化而改变,因此需要在第一次专家权重变化后继续计算专家评估均值,改变专家权重,并考虑专家历史权重,以求更合理,最终实现专家权重的相对稳定。相对而言,本文的专家权重调整算法可以满足上述要求。

相比于专家给出结果为精确值、而无模糊上下界的情况,提出的 REATD 算法可根据专家给出的上下界模糊值以及精确数来对权重进行动态调整,用 3 个参数的偏离值来更精确的对权重进行计算;因此本文算法得到的评估值更精确更合理。

结束语 针对现有的可靠性评估算法无法直接应用于 SDN,现有评估过程中可能存在专家权重不合理,以及评估结果受专家主观性影响导致准确度降低等问题,本文提出了一种面向 SDN 的移动网络可靠性评估算法;给出了一种基于模糊矩阵的细粒度专家权重自适应调整算法,引入专家模糊评估值,结合与专家群体评分的距离,可使专家权重自适应调整,从而计算得到移动网络节点的可靠程度,为基于 SDN 的移动网络可靠性评估提供关键属性信息。通过分析 SDN 整体结构,使用提出的节点关键度量化方法计算网络节点对网络的连通影响程度;最终结合网络节点的可靠程度,计算 SDN 移动网络的可靠性评估值。实验结果表明所提算法能适应 SDN 系统的可靠性评估过程,一定程度上克服了专家权重不合理的不足,评估准确性更高。

参 考 文 献

- [1] XU X, QU K, CHEN A, et al. A new day-to-day dynamic network vulnerability analysis approach with Weibit-based route adjustment process[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 153:102421.
- [2] SHAO L, ZHANG Y. Mathematical model of mobile network reliability control based on nonlinear proportional differential [J]. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2021:1-7.
- [3] FAN Z, XIAO Y, NAYAK A, et al. An improved network security situation assessment approach in software defined networks [J]. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2019, 12(2): 295-309.
- [4] SUN X, HUANG N, ZHOU J. A novel performability assessment approach of Mobile Ad Hoc Network[C]// 2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). IEEE, 2015:1-5.
- [5] WANG P, XU H, HUANG L, et al. Minimizing controller response time through flow redirecting in SDNs[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2018, 26(1):562-575.
- [6] ALIZADEH M, EDSALL T, DHARMAPURIKAR S, et al. CONGA: Distributed congestion-aware load balancing for datacenters[C]// Proceedings of the 2014 ACM Conference on SIGCOMM. 2014:503-514.
- [7] YAO G, BI J, LI Y, et al. On the capacitated controller placement problem in software defined networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(8):1339-1342.
- [8] YANG M, WANG F, WANG S, et al. Reliability assessment method of SOA architecture software system based on complex network[C]// The 4th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent. IEEE, 2014:653-657.
- [9] SUN X, HUANG N, ZHOU J. A novel performability assessment approach of Mobile Ad Hoc Network[C]// 2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). IEEE, 2015:1-5.
- [10] HUANG N, WU Z T. Overview of network reliability evaluation models and algorithms [J]. *Systems Engineering and Electronic Technology*, 2013, 35(12):2651-2660.
- [11] SHOOMAN A M. Algorithms for network reliability and connection availability analysis[C]// Proceedings of Electro/International 1995. IEEE, 1995:309-333.
- [12] JANE C C, LAIH Y W. A dynamic bounding algorithm for approximating multi-state two-terminal reliability [J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 205(3):625-637.
- [13] ZHAO J, GUO P, DENG H Z. Modeling and analysis of communication network performance reliability based on information flow mechanics [J]. *Journal of Communication*, 2011, 32(8): 159-164.
- [14] SHAO Z, WANG Y, CHEN X, et al. A network risk assessment methodology for power communication business [C] // 2016 IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content(IC-NIDC). IEEE, 2016:40-43.
- [15] YEVDOKYMENKO M, MANASSE M, ZALUSHNIY D, et al. Analysis of methods for assessing the reliability and security of infocommunication network[C]// 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology(PIC S&T). IEEE, 2017:199-202.
- [16] MOSHNIKOV A S, KOLOMOITCEV V S. Reliability Assessment of Distributed Control Systems with Network Structure [C]// 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems(WECNF). IEEE, 2020:1-4.
- [17] HONG L, WU C, ZHANG G Q. Link reliability assessment based on grey relational analysis for wireless ad hoc networks [C]// Proceedings of the 29th Chinese Control Conference. IEEE, 2010:4236-4240.
- [18] NIE D, FAN L, WANG K, et al. Research on AHP-based Multi-factor Medium Voltage Distribution Network Line Risk Quantitative Assessment Method[C]// 2021 China International Conference on Electricity Distribution(CICED). IEEE, 2021:38-41.
- [19] YE H W C, LIN Y C, CHUNG Y Y, et al. A particle swarm optimization approach based on Monte Carlo simulation for solving the complex network reliability problem[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2010, 59(1):212-221.
- [20] LU S, ZHUANG Y. Information system risk assessment model based on adaptive expert weight [J]. *Computer and Modernization*, 2021(8):85-93.
- [21] WANG Z Z, CHEN Y X, XIANG H C. Research on an improved expert fuzzy kernel clustering weighting method [J]. *China Management Science*, 2021, 29(2):177-183.
- [22] DUAN Y, CAI Y, WANG Z, et al. A novel network security risk assessment approach by combining subjective and objective

weights under uncertainty[J]. Applied Sciences, 2018, 8(3): 428.

- [23] ABBAS R, SULTAN Z, BHATTI S N. Comparative analysis of automated load testing tools: Apache jmeter, microsoft visual studio(tfs), loadrunner, siege[C] // 2017 International Conference on Communication Technologies(Comtech). IEEE, 2017: 39-44.
- [24] GAO X Z, NALLURI M S R, KANNAN K, et al. Multi-objective optimization of feature selection using hybrid cat swarm optimization[J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(3): 508-520.
- [25] WU Z, XU J. Possibility distribution-based approach for MAGDM with hesitant fuzzy linguistic information[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 46(3): 694-705.
- [26] WANG D C, XU Y, LI B. Information system security situation index based on business efficiency [J]. Journal of Tsinghua Uni-

versity(Natural Science Edition), 2016, 56(5): 517-521, 529.

- [27] LIU A Y, WEI F J. Research on expert a posteriori weight determination method based on improved language evaluation scale [J]. China Management Science, 2011, 19(6): 149-155.



BAO Chun-hui, born in 1997, postgraduate. His main research interests include network reliability and trusted computing.



ZHUANG Yi, born in 1956, professor, Ph.D supervisor, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include trusted computing and formal methods.