

基于信息流动力学的通信网络性能可靠性建模与分析

赵娟^{1,2}, 郭平¹, 邓宏钟², 吴俊², 谭跃进², 李建平¹

(1. 中国人民解放军后勤工程学院 网管中心, 重庆 401311; 2. 国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 为了分析流量变化对网络性能可靠性的影响, 首先基于信息流动力学建立了通信网络流量模型, 在此基础上定义了信息流传输时延和分组丢失率表征网络性能可靠性的指标和评估模型, 进而分析了某局域网络在泊松流量和突发性约束流量下的网络性能可靠性。结果表明, 2 种流量模型下的网络性能可靠性都存在明显相变行为, 相变点刻画了网络在性能约束下的最大传输能力。

关键词: 性能可靠性; 通信网络; 信息流动力学; QoS

中图分类号: TN913.2

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2011)08-0159-06

Modeling and analysis of performance reliability for communication networks based on traffic dynamics

ZHAO Juan^{1,2}, GUO Ping¹, DENG Hong-zhong², WU Jun², TAN Yue-jin², LI Jian-ping¹

(1. Center of Network Management Logistical Engineering University, PLA, Chongqing 401311, China;

2. Coll. of Information Systems and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To investigate the impact of the amount and change of traffic loads on the performance reliability of network, a simple traffic model for computer networks was established based on the traffic dynamics. The ratio between the expected and the practical delay and the packet loss rate of each demand were used to characterize the performance reliability of the network. The performance reliability of a special local network was simulated and analyzed using the proposed approach. It was shown that the performance reliability of the network exhibited an obvious phase transition, no matter whether traffic loads were the Poisson traffic model or the Burstiness Constraints traffic model. In addition, the value of transition point can be considered as a measurement of network communication capability under special performance constraints.

Key words: performance reliability; communication network; traffic dynamics; quality of service

1 引言

随着计算机和通信技术的快速发展, 基于网络的通信服务成为军事、商业、国家安全以及公众的重要部分, 其可靠性问题受到越来越多的关注^[1-4]。20 世纪 60 年代, 网络可靠性的研究工作主要是以网络的连通性作为网络可靠性标准来研究^[5,6]。20

世纪 80 年代以后, 衡量网络可靠性的标准随着实际情况发生了变化^[7]。通信网络的广泛应用, 使其通信传输量不断增加, 网络堵塞和时延增加等性能下降的现象时常发生, 这引发了网络性能可靠性的研究^[8-13]。

大量的研究工作集中在网络部件失效情况下对网络性能分析的研究, 主要利用概率加权法, 即

收稿日期: 2010-01-28; 修回日期: 2010-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70771111, 60904065)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (70771111, 60904065)

对满足业务要求的状态概率求和^[14-17]。对于通信网络而言,这种方法主要存在 2 个方面的不足:一是假设网络部件的状态变化是离散的,实际中,通信网络部件的工作、失效、恢复状态的变化是一个连续过程,而不是瞬态变化的;二是仅考虑了网络容量和业务要求,但忽略了路由策略、信息流变化等影响网络业务性能的关键因素。因此,需要建立新的网络性能可靠性评估模型,使网络可靠性分析、综合以及优化设计等研究工作取得新突破和进展,以适应通信网络的发展。

网络性能可靠性的测度主要包括有效性^[18]、完成性^[19]、可行性^[20]等,它们都是在网络部件失效的条件下,利用网络在性能约束下完成业务的概率来度量其性能可靠性。实际上,通信网络的性能下降往往是由信息流变化引起,因此本文关注的性能可靠性是指在一个流量周期内,网络在 QoS 约束的条件下完成传输任务的质量水平。

本文首先基于信息流动力学建立通信网络的流量模型,在此基础上定义了信息流传输时延和分组丢失率表征网络性能可靠性的指标和评估模型,进而分析了某局域网络在泊松流量和突发性约束流量下的性能可靠性。结果表明,2 种流量模型下的网络性能可靠性都存在明显相变行为,相变点可以刻画网络在性能约束下的最大传输能力。此外,分析了相变前后的网络性能可靠性在一个流量变化周期内的连续变化曲线以及网络节点的拥塞状况。

2 网络信息流动力学模型

在计算机网络的背景下,做如下几点假设:计算机网络大多采用光纤作为传输媒介,制约信息流传输的瓶颈是节点,因此不考虑边对信息流传输的影响;网络节点分为收发节点和转发节点,收发节点仅负责数据分组的发送和接收,转发节点仅负责数据分组的转发;不考虑信息流传输的方向性;网络采用单约束单路由方式;不考虑网络硬件和软件的不可靠性。

在上述假设的基础上,建立一个计算机网络的信流模型,详细描述如下:在 t 时刻,任意 2 个收发节点 v_i 、 v_j ,节点 v_i (或 v_j) 将 $S_{ij}(t)$ 个数据分组向节点 v_j (或 v_i) 发送,这些数据分组按照一定的路径 $P_{ij}(t)$ 在网络中传输, $P_{ij}(t)$ 是根据网络在 $t-1$ 时刻的负载情况以及在 $[t-1, t]$ 单位时间内加载的信息

流情况而选择的性能最优路径,记为信息流 $flow_{ij}(t)=(S_{ij}(t), P_{ij}(t))$;假定每个转发节点的数据分组转发能力是有限的,即是在 t 时刻,任意转发节点 v_k 只能将 $C_k(t)$ 个数据分组传到下一个节点;如果一个数据分组到达转发节点时,已经有数据分组在等待转发,那么新到达的数据分组将排在队列的末尾;转发节点 v_k 的负载变化如下:

$$\begin{cases} W_k(t) = N_k(t) + Q_k(t-1) \\ Q_k(t-1) = \begin{cases} 0, & W_k(t-1) \leq C_k(t-1) \\ W_k(t-1) - C_k(t-1), & \text{否则} \end{cases} \\ N_k(t) = \sum_{v_j \neq v_j \in V_{\text{send-receive}}} (S_{ij}(t) \times \sigma_{ij}(k, t)) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\sigma_{ij}(k, t)$ 是指 t 时刻,信息流 $flow_{ij}(t)$ 的传输路径 $P_{ij}(t)$ 是否经过节点 v_k 。当 $P_{ij}(t)$ 不经过节点 v_k , 则 $\sigma_{ij}(k, t) = 0$; 当 $P_{ij}(t)$ 经过节点 v_k , 则 $\sigma_{ij}(k, t) = 1$ 。 $N_k(t)$ 是指 t 时刻,新到达节点 v_k 的数据分组数量。 $W_k(t)$ 是指 t 时刻,需要节点 v_k 转发的数据分组数量。 $C_k(t-1)$ 是指 $t-1$ 时刻,节点 v_k 能够转发的数据分组数目。 $Q_k(t-1)$ 是指 $t-1$ 时刻,节点 v_k 未能转发的数据分组数量。

3 网络性能可靠性评估模型

网络性能是通过网络传输信息流的性能来体现的,信息流的性能是由信息流传输过程中经过的每个转发节点的工作状态(自由态,拥塞态)决定。随着信息流路由 $P_{ij}(t)$ 或发包率 $S_{ij}(t)$ 的变化,在转发节点 v_k 等待转发的数据分组数量 $W_k(t)$ 就会不断地变化,使得转发节点不断在自由态和拥塞态之间发生相变。当 $W_k(t) \leq C_k(t)$, 数据分组不需要排队等待,则节点 v_k 能快速转发数据分组;当 $W_k(t) > C_k(t)$, 由于节点 v_k 的数据分组转发能力是有限的,则数据分组需要排队等待,这将增加数据分组的时延、分组丢失率等,进而降低信息流的性能,影响整个网络的性能可靠性。

本文在考虑时延和分组丢失率的基础上,建立了基于信息流动力学的性能可靠性指标和评估模型。时延是可加性指标,分组丢失率是可乘性指标,因此该模型可推广应用到其他可加性或可乘性指标。

在 t 时刻,节点 v_k 转发数据分组的时延 $D_k(t)$ 、分组丢失率 $L_k(t)$ 与 $W_k(t)$ 的关系如下:

$$D_k(t) = \begin{cases} d_k(t), & W_k(t) \leq C_k(t) \\ d_k(t) \times \left(\frac{W_k(t)}{C_k(t)}\right)^\alpha, & W_k(t) > C_k(t) \end{cases} \quad (2)$$

$$L_k(t) = \begin{cases} l_k(t), & W_k(t) \leq C_k(t) \\ l_k(t) \times \left(\frac{W_k(t)}{C_k(t)}\right)^\beta, & W_k(t) > C_k(t) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $d_k(t)$ 、 $l_k(t)$ 是节点 v_k 在 $W_k(t) \leq C_k(t)$ 时, 转发数据分组的时延和分组丢失率, 由硬件性能决定。

α 、 $\beta > 0$, 是队列长度对数据分组性能的影响因子。

任意 2 个收发节点 v_i 、 v_j , 它们之间信息流 $flow_{ij}(t)$ 的时延、分组丢失率等 QoS 要求记为 $D_{ij}(t)$ 、 $L_{ij}(t)$, 其中 $P_{ij}(t) = \{v_i, v_1, \dots, v_k, \dots, v_l, v_j\}$ 可通过路由策略确定, 因此从 v_i 传输到 v_j 的信息流的性能可靠性就可确定。

在 t 时刻, 信息流 $flow_{ij}(t)$ 的性能可靠性如下:

$$\begin{cases} Delay_R_{ij}(t) = \prod_{k=1, v_k \in P_{ij}(t)}^l e^{-\gamma \times f_k(t)} \\ Loss_R_{ij}(t) = \prod_{k=1, v_k \in P_{ij}(t)}^l e^{-\gamma \times g_k(t)} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\gamma > 0$, $f_k(t)$ 、 $g_k(t)$ 分别为

$$\begin{cases} f_k(t) = \frac{\sum_{s=1, v_s \in P_{ij}(t)}^k D_s(t)}{D_{ij}(t)} \\ g_k(t) = \frac{\sum_{s=1, v_s \in P_{ij}(t)}^k L_s(t)}{L_{ij}(t)} \end{cases} \quad (5)$$

γ 是关联参数, 反映节点与路径上游各节点的关联性。 $f_k(t)$ 、 $g_k(t)$ 反映了网络在路径 $P_{ij}(t)$ 上传输信息流的性能 (时延, 分组丢失率) 与用户要求的性能 (时延、分组丢失率) 的差异程度, 即网络传输信息流的质量水平。

在 t 时刻, 网络 G 的性能可靠性为

$$\begin{cases} Delay_R_G(t) = \frac{\sum_{v_i \neq v_j \in V_{send-receive}} Delay_R_{ij}(t)}{Num_flow(t)} \\ Loss_R_G(t) = \frac{\sum_{v_i \neq v_j \in V_{send-receive}} Loss_R_{ij}(t)}{Num_flow(t)} \end{cases} \quad (6)$$

其中,

$$Num_flow(t) = \sum_{v_i \neq v_j \in V_{send-receive}} \|flow_{ij}(t)\| \quad (7)$$

是网络 t 时刻产生信息流的数目, 且

$$\|flow_{ij}(t)\| = \begin{cases} 1, & S_{ij}(t) > 0 \\ 0, & S_{ij}(t) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

在一个流量变化周期内, 网络性能可靠性为

$$\begin{cases} Delay_R(G) = \frac{\sum_{t \in [0, T]} Delay_R_G(t)}{T} \\ Loss_R(G) = \frac{\sum_{t \in [0, T]} Loss_R_G(t)}{T} \end{cases} \quad (9)$$

4 网络性能可靠性分析

如图 1 所示, 某局域网络的骨干网络 $G(n = 20, m = 31)$ 由 5 个核心路由器 H3C-S5500, 7 个汇聚路由器 H3C-SR6608, 8 个接入交换机互联而成。接入交换机完成信息流的发送和接收功能, 核心和汇聚路由器完成信息流的转发功能, 分别记为 $V_{send-receive}(G)$, $V_{transmit}(G) = \{V_{kernel}(G), V_{converge}(G)\}$ 。

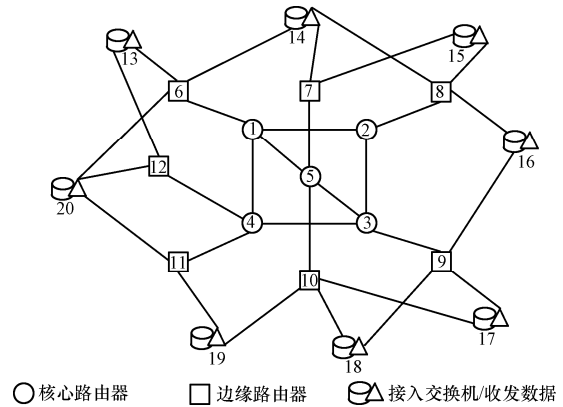


图 1 某局域网络拓扑结构

假定不考虑设备的硬件故障或磨损对其产生的影响, 即 $V_{transmit}(G)$ 中转发节点 v_k 的转发能力和性能 $C_k(t)$ 、 $d_k(t)$ 、 $l_k(t)$ 不随时间发生变化, 是由出厂状态决定的常数。根据路由器产品的规格参数可知, $V_{kernel}(G)$ 中的转发节点 v_g 和 $V_{converge}(G)$ 中的转发节点 v_c 的数据分组转发能力分别为 $C_g = 96 \text{Mpacket/s}$ 、 $C_c = 30 \text{Mpacket/s}$, 通过测试可得到它们的固有转发时延和分组丢失率分别为 $d_g = 3.2 \mu\text{s}$ 、 $d_c = 5.6 \mu\text{s}$ 、 $l_g = 0.0015$ 、 $l_c = 0.005$ 。

该局域网络采用 OSPF 路由协议, 则在本文的信息流模型下, 数据分组按如下方式路由: 任意 2 个节点 v_i 、 $v_j \in V_{send-receive}$, 它们之间信息流的路径 $P_{ij}(t)$ 是根据网络在 $t-1$ 时刻的负载情况以及在 $[t-1, t]$ 单位时间内加载的信息流情况而选择的一条时延最短路径。在 $[t-1, t]$ 单位时间内, 所有的信息流根

据 QoS 要求的高低顺序, 依次加载到网络中。

在仿真实验中, 假定所有端到端之间 $flow_{ij}$ 的发包率是同步变化, 采用的泊松流量模型^[21]为: $S_{ij}(t) \sim Poisson(\lambda_{ij})$, 均值 $E(S_{ij}(t)) = \lambda_{ij}$, $t \in [0, T]$, 信息流 $flow_{ij}(t)$ 在 t 时刻发送的数据分组数目服从泊松分布; 突发性约束流量模型^[22] $S_{ij}(t) = \sigma(t) + \rho \times \sin(\pi t/T)$, 均值 $E(S_{ij}(t)) = 2\rho/\pi + \Sigma\sigma(t)/T$, $t \in [0, T]$, 信息流 $flow_{ij}(t)$ 在 t 时刻发送的数据分组由周期流量和突变流量构成。接下来, 仿真分析网络在 2 种不同流量模型下的性能可靠性。其中, 网络中信息流 $flow_{ij}$ 的 QoS 约束要求如表 1 所示。

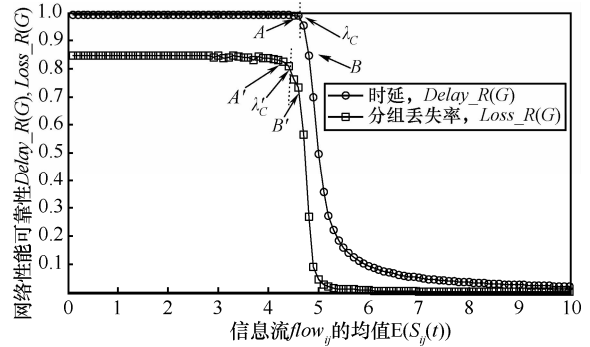
表 1 局域网络信息流的传输任务

$flow_{ij}$	QoS 要求
$i=13 \quad j=[14,20]$	$D_{ij}=3ms \quad L_{ij}=0.025$
$i=14 \quad j=[15,20]$	$D_{ij}=5ms \quad L_{ij}=0.045$
$i=15/16 \quad j=[16/17,20]$	$D_{ij}=9ms \quad L_{ij}=0.065$
$i=17/18 \quad j=[18/19,20]$	$D_{ij}=12ms \quad L_{ij}=0.07$
$i=19 \quad j=20$	$D_{ij}=15ms \quad L_{ij}=0.08$

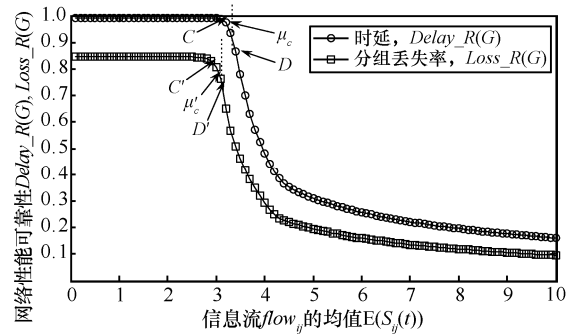
图 2 显示了在泊松流量模型和突发性约束流量模型下, 网络完成具有特定 QoS 约束的传输任务的质量水平 ($Delay_R(G)$, $Loss_R(G)$) 与端端信息流的大小 $E(S_{ij}(t))$ 之间的关系曲线。随着 $E(S_{ij}(t))$ 的逐渐增大, 到达一个临界值 λ_c (或 μ_c) 时, 网络的性能可靠性出现了明显的相变行为。当 $E(S_{ij}(t)) \leq \lambda_c$ (或 μ_c), 网络可以在满足 QoS 要求的条件下完成信息流的传输; 当 $E(S_{ij}(t)) > \lambda_c$ (或 μ_c), 网络节点的排队数据分组增多, 其转发性能下降, 使网络无法提供满足一定性能要求的传输服务。在 2 种不同流量模型下, 网络都存在尖锐的相变, 相变点刻画了网络在性能约束下的最大传输能力。

在不同的流量模型下, 网络的传输能力是不同的, 泊松流量模型下的临界值 λ_c 明显大于突发性约束流量模型下的临界值 μ_c , 这说明网络的传输能力明显受到流量接入方式的影响。

在泊松流量模型下, 以网络相变前后的 A 点 ($E(S_{ij}(t))=4.5Mpacket/s$) 和 B 点 ($E(S_{ij}(t))=4.8Mpacket/s$) 为例, 分析时延表征的网络性能可靠性参数 $Delay_R_G(t)$ 在一个流量周期内的变化情况, 如图 3(a) 所示, 在相变之后, 网络性能可靠性迅速趋于 0。此外, 以分组丢失率表征的指标 $Loss_R_G(t)$ 在相变前后的 A' 点和 B' 点的变化也是如此。因为在整个泊松流量周期内, 网络都将持续不断地接收大量信息流, 致使等待转发的数据分组逐渐累积, 迅速堵塞, 网络的性能可靠性直线下降。

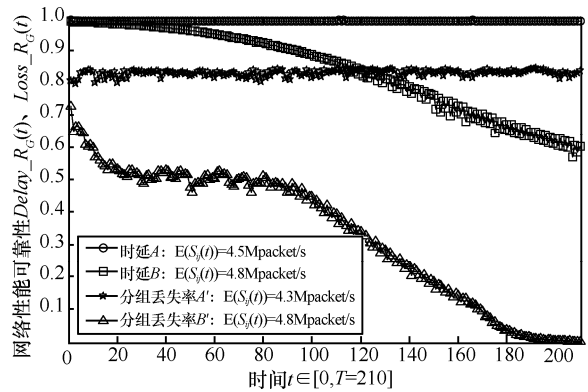


(a) 泊松流量模型

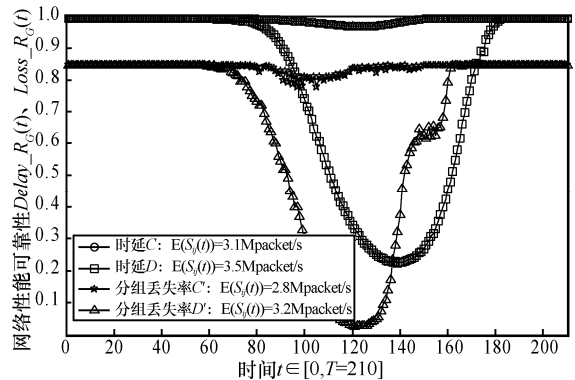


(b) 突发性约束流量模型

图 2 网络性能可靠性与 $E(S_{ij}(t))$ 的关系



(a) 泊松流量模型

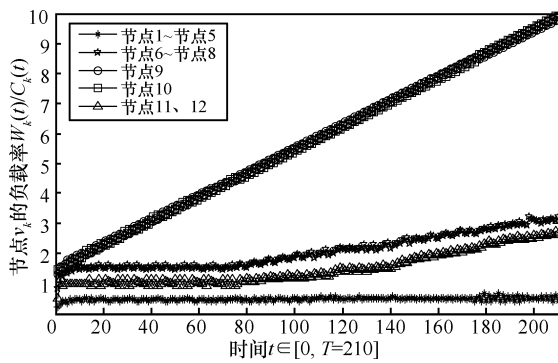


(b) 突发性约束流量模型

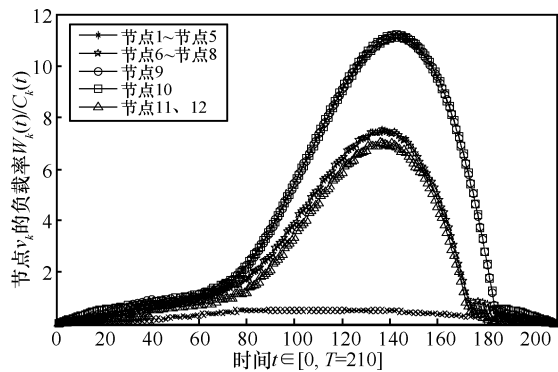
图 3 相变点前后网络性能可靠性的变化曲线

在突发性约束流量模型下，以相变前后的 C 点 ($E(S_{ij}(t)) = 3.1\text{Mpacket/s}$) 和 D 点 ($E(S_{ij}(t)) = 3.5\text{Mpacket/s}$) 为例，分析 $\text{Delay}_{R_G}(t)$ 在一个流量周期内的变化情况，如图 3(b) 所示，在相变之后，网络并不会在整个周期内都处于拥塞状态，而是在一定时间段内不能可靠地传输数据。此外， $\text{Loss}_{R_G}(t)$ 在相变前后的 C' 点和 D' 点的变化也如此。这主要是由于网络流具有突发性，不断从小到大、从大到小的变化，使得网络在流量减少时，有缓冲时间处理网络堵塞时累积的数据分组，而不会一直处于拥塞状态。

当网络性能下降时，通过分析转发节点的数据分组排队情况，就可以找出网络拥塞的位置。在 2 种流量模型下，以网络相变之后的 B 点和 D 点为例，分析网络各节点的负载在流量周期内的变化情况，如图 4 所示。网络的拥塞主要发生在汇聚层的路由器上，其中节点 9 和节点 10 最严重，由此可见，制约网络传输能力的瓶颈是汇聚层路由器的性能。



(a) 泊松流量模型 $E(S_{ij}(t)) = 4.8\text{Mpacket/s}$



(b) 突发性约束流量模型 $E(S_{ij}(t)) = 3.5\text{Mpacket/s}$

图 4 网络节点的拥塞情况

5 结束语

本文在建立通信网络流量模型的基础上，定义了信息流传输时延和分组丢失率表征网络性能

可靠性的指标和评估模型，进而分析了某局域网在泊松流量和突发性约束流量下的性能可靠性。在 2 种流量模型下，网络性能可靠性都存在明显相变行为，相变点刻画了网络在性能约束下的最大传输能力。结果表明，在不同的流量模型下，网络具有不同的传输能力，泊松流量模型下的网络传输能力明显大于突发性约束流量模型下的传输能力。然后，通过分析相变前后的网络性能可靠性在一个流量周期内的变化情况，结果发现在相变之后，泊松流量模型下的网络性能可靠性会直线下降，一直拥塞；而突发性约束流量模型下的网络性能可靠性虽然也会出现直线下降的情况，但不会在整个周期内都处于拥塞状态。此外，在相变之后，分析了网络节点的负载状况，找出了网络拥塞的瓶颈，进而为网络设计和优化提供了有理依据。

本文提出的网络性能可靠性评估模型是在考虑信息流动态变化的基础上建立的，因此还可用于分析病毒传播、路由策略、流量控制策略、流量优先级等因素对网络性能可靠性的影响以及信息流之间的级联失效现象。

参考文献：

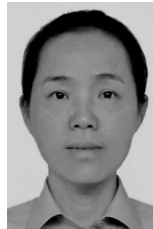
- [1] 李德毅, 于全, 江光杰. C^3I 系统可靠性、抗毁性和抗干扰的统一评测[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(3): 23-27.
LI D Y, YU Q, JIANG G J. A unified assessment of reliability, invulnerability and anti counter for C^3I systems[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 1997, 17(3): 23-27.
- [2] 丁开盛, 张学渊, 梁雄健. 通信网可靠性的定义及其综合测度指标[J]. 通信学报, 1999, 20(10): 75-78.
DING K S, ZHANG X Y, LIANG X J. The definition and general measuring indicator on reliability of communications network[J]. Journal on Communications, 1999, 20(10): 75-78.
- [3] 邓宏钟, 吴俊, 李勇等. 复杂网络拓扑结构对系统抗毁性影响研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(11): 26-29.
DENG H Z, WU J, LI Y, et al. The influencing study of complex network's topologic structure on system's invulnerability[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(11): 26-29.
- [4] 于晓东, 高会生, 杨兴. 光通信网络有效性分析[J]. 电力科学与工程, 2009, 25(1): 69-72.
YU X D, GAO H S, YANG X. Availability analysis of optical communication network[J]. Electric Power Science and Engineering, 2009, 25(1): 69-72.
- [5] FRANK H, FRISCH I T. Analysis and design of survivable networks[J]. IEEE Transactions on Communication Technology, 1970,

- 18(5): 501-519.
- [6] SHIER D R. Network Reliability and Algebraic Structures[M]. Oxford: Clarendon Press, 1991.
- [7] 张学渊, 梁雄健. 关于通信网可靠性定义的探讨[J]. 北京邮电大学学报, 1997, 20(2): 30-35.
ZHANG X Y, LIANG X J. On the definition for telecommunication networks reliability[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 1997, 20(2): 30-35.
- [8] AGGARWAL K K. A fast algorithm for the performance index of a telecommunication network[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1988, 37(1): 65-69.
- [9] AGGARWAL K K. Integration of reliability and capacity in performance measure of a telecommunication network[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1985, 34(2): 184-186.
- [10] 熊蔚明, 刘有恒. 关于通信网可靠性的研究进展[J]. 通信学报, 1990, 11(4): 44-49.
XIONG W M, LIU Y H. On the reliability of communication networks-a review[J]. Journal on Communications, 1990, 11(4): 44-49.
- [11] 刘爱民, 刘有恒. 部件不可靠下的通信网业务性能分析[J]. 电子学报, 2002, 30(10): 1-6.
LIU A M, LIU Y H. Traffic performance analysis of network with unreliable components[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(10):1-6.
- [12] 周联红, 伍翔, 王一超等. 一种光纤通信系统可用性的算法及分析[J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1713-1716.
ZHOU L H, WU X, WANG Y C, *et al.* An algorithm and analysis of availability of fiber optic systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12):1713-1716.
- [13] 赵娟, 郭平, 吴俊等. 复杂网络可靠性研究进展[J]. 后勤工程学院学报, 2010, 26(5): 72-79.
ZHAO J, GUO P, WU J, *et al.* Review on the reliability of complex networks[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2010, 26(5): 72-79.
- [14] CARLIER J, LI Y, LUTTON J L. Reliability evaluation of large telecommunication networks[J]. Discrete Applied Mathematics, 1997, 76(1-3): 61-80.
- [15] LIN Y K. Reliability of a computer network in case capacity weight varying with arcs, nodes and types of commodity[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 92(5): 646-652.
- [16] GUNAWAN I. Redundant paths and reliability bounds in gamma networks[J]. Applied Mathematical Modeling, 2008, 32(4): 588-594.
- [17] 陈坚, 孙小茜, 张明德. 一种基于最小路径的通信网络可靠性分析[J]. 电子器件, 2003, 26(4): 447-450.
CHEN J, SUN X H, ZHANG M D. A reliability analysis of communication network based on the shortest path[J]. Journal of Electron Devices, 2003, 26(4): 447-450.
- [18] BARBERIS G, MAZZEI U. Traffic-based criteria for reliability and availability analysis of computer network[A]. Proceedings IEEE ICC'77[C]. Chicago, IL, 1977. 133-138.
- [19] PARK Y J, TANAKA S. Reliability evaluation of a network with delay[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1979, 28(4): 320-324.
- [20] 熊庆旭, 刘有恒. 基于网络状态之间关系的网络的可靠性分析[J]. 通信学报, 1998, 19(3): 55-61.
XIONG Q X, LIU Y H. Analysis of network performability based on relationship of network states[J]. Journal on Communications, 1998, 19(3): 55-61.
- [21] FUCHS E, JACKSON P E. Estimates of distributions of random variables for certain computer communication traffic models[J]. Communication of the ACM, 1970, 13(12): 752-757.
- [22] CRUZ R L. A calculus for network delay, part I: network elements in isolation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1): 114-131.

作者简介:



赵娟 (1982-), 女, 四川苍溪人, 中国人民解放军后勤工程学院博士生, 主要研究方向为复杂网络、网络系统可靠性。



郭平 (1961-), 女, 四川荣县人, 博士, 中国人民解放军后勤工程学院教授, 主要研究方向为网络服务质量、信息安全。



邓宏钟 (1974-), 男, 湖南衡阳人, 博士后, 国防科技大学副教授, 主要研究方向为复杂系统理论、分布式人工智能和遗传算法。

吴俊 (1980-), 男, 湖北荆门人, 博士, 国防科技大学副教授, 主要研究方向为复杂网络理论及其应用。

谭跃进 (1958-), 男, 湖南长沙人, 国防科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为系统优化与综合集成技术。

李建平 (1964-), 男, 湖南祁阳人, 博士, 中国人民解放军后勤工程学院教授, 主要研究方向为信息安全、小波分析与信息处理。