

# 网络可靠性评估方法综述

江逸楠 李瑞莹 黄宁 康锐

(北京航空航天大学可靠性与系统工程学院 北京 100191)

**摘要** 网络可靠性评估随着网络技术的发展已成为一个广受关注的焦点问题,但网络的复杂性、动态性、多态性等特点使得传统可靠性评估方法很难适用于网络。就网络可靠性评估方法这一问题,对近10年的相关文献按连通可靠性、容量可靠性和性能可靠性3个方面进行了综述,并介绍了在这3类研究的基础上综合考虑网络业务支持能力的业务可靠性,总结了近10年网络可靠性评估方法的研究进展、存在的问题及未来的研究方向。

**关键词** 网络可靠性,可靠性评估,拓扑模型,网络流量,网络应用

中图分类号 TB114.3 文献标识码 A

## Survey on Network Reliability Evaluation Methods

JIANG Yi-nan LI Rui-ying HUANG Ning KANG Rui

(School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** With the development of the network technology, network reliability evaluation has been a hot research topic in these years. But the traditional reliability evaluation methods are hard to be applied to network evaluation due to the complexity, dynamic and multi-state characteristics of a network. This paper divided the related literatures into three main types: connecting reliability, capacity reliability and performance reliability, and introduced the new application reliability which is based on the three types of reliability and considers the service support capacity of a network, then reviewed the research progress and the existing problems. Finally, the direction of future research was discussed.

**Keywords** Network reliability, Reliability evaluation, Topology model, Network flow, Network application

## 1 引言

如今,网络变得越来越快捷、廉价、无处不在,随之而来的网络可靠性问题逐渐成为用户们关注的焦点,也给网络供应商、运营商带来严峻的挑战。科学理解网络的定量与定性特征,已成为网络时代科学研究中一个极其重要的挑战性课题,甚至被称为“网络的新科学”。但网络的复杂性、动态性、多态性等特点使得传统成熟的可靠性评估方法,如可靠性框图(RBD)法、故障树分析(FTA)法等很难用于网络。近10年来,对网络可靠性的研究取得了很多成果,网络可靠性的内涵也由传统的基于网络拓扑结构的连通可靠性逐渐拓展到考虑网络流的容量可靠性,并向基于业务等考虑用户需求的性能可靠性延伸。

本文就网络可靠性评估方法这一问题对近10年的相关文献进行了整理、分类和综述。

根据这些文献的研究内容,网络可靠性评估主要分为3类:(1)网络连通可靠性评估,指的是仅考虑网络拓扑结构,将“网络实现连通功能的概率”作为可靠性度量;(2)网络容量可靠性评估,它在考虑网络是否连通的基础上,还考虑了网络中链路和节点的容量,将“存在满足一定流量需求的连通路径的概率”作为可靠性度量;(3)网络性能可靠性评估,关注的是网

络性能动态变化对可靠性的影响,多以“某些性能参数不超过其规定阈值的概率”作为可靠性的度量。近几年来还出现了以业务为中心的可靠性评估,综合考虑了网络的连通可靠性、容量可靠性和性能可靠性,将“网络对某业务的支持能力”作为业务可靠性的度量。

从各类文献的数量上来看,其中一半以上是关于网络连通性的,关于网络容量和用户对网络性能的研究较少。然而,随着时间的推移,研究内容逐渐从网络连通可靠性向网络容量可靠性、网络性能可靠性转移;研究方法逐渐从网络解析计算向网络可靠性仿真、试验转移;研究对象逐渐从有线网络向无线网络转换。

## 2 网络连通可靠性评估

### 2.1 问题的提出

网络可以抽象为由一组节点集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  与一组链路集  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  构成的图  $G(V, E)$ 。1955年, Lee在“Analysis of Switching Networks”(交换网络分析)一文中,定义了以“能实现连通功能的概率”为度量的端可靠度,首次使用了以连通为规定功能的可靠性指标<sup>[1]</sup>。连通可靠性也是最早提出的网络可靠性指标。研究将网络按照有无指定的源点分为有源网络与无源网络。有源网络可靠性指标分为3

到稿日期:2011-05-20 返修日期:2011-10-17 本文受北京市自然科学基金(4113074)资助。

江逸楠(1988—),女,硕士生,主要研究方向为网络可靠性, E-mail:jiang.yinan@yahoo.com.cn;李瑞莹(1982—),女,博士,讲师,主要研究方向为网络可靠性、系统工程。

类:ST可靠度(源点 $s$ 与终点 $t$ 保持连通的概率)。SK可靠度(源点 $s$ 与特定的端点集 $K(K \subset V, V$ 是网络中所有端点的集合)保持连通的概率)。SAT可靠度(源点 $s$ 与网络中所有其它端点保持连通的概率)。无源网络可靠性指标也分为3类:两端可靠度(网络中两个端点间保持连通的概率)、 $k$ 端可靠度(网络中 $k$ 个端点间保持连通的概率)、全端可靠度(网络中所有端点保持连通的概率)。

## 2.2 经典方法

计算网络连通可靠性的经典解析算法往往做如下假设:

(1)链路只有故障、正常两种状态;(2)网络中链路故障的概率是统计独立的。

经典算法有5种,见表1。它们往往面临计算复杂度随网络节点数增加而指数增长的“组合爆炸”问题,因此只适用于节点数较少或者网络拓扑结构特殊的情况。

表1 经典连通可靠性算法

经典算法	算法原理与实现步骤
状态枚举法	通过枚举出网络正常的所有元件状态而计算相应的可靠度。
容斥原理法	将网络可靠度表述为全部最小路集的并(或将网络不可靠度表述为全部最小割集的并),然后采用容斥原理去掉相容事件相交的部分,计算相应的可靠度。
不交积和法	将网络可靠度表述为全部最小路集的并(或将网络不可靠度表述为全部最小割集的并),再求解这个并的不交和,计算相应的可靠度。
因子分解法	选择网络中的一个元件,按照其可靠与不可靠逐步进行分解,从而迭代获得网络可靠度。
图形拓扑方法	主要指简化图形的精确算法。最早针对串并联网络,以“将串联链路的可靠度相乘、并联链路的可靠度相加”为原则简化图形。后来针对非串并联网络,结合因子分解法,以“链路正常则压缩链路两端为一个节点、链路故障则删除该链路”为原则简化图形。

## 2.3 近10年的新方法

为了解决经典解析算法中的“组合爆炸”问题,之后的可靠性工作者们又提出了一些近似算法,如图变换法(简化网络得到可靠性指标的上/下界)、定界法、蒙特卡罗法等。但这些方法普遍存在所得界不理想的问题;并且,随着网络的不断发展,原有的一些网络模型和假设并不能很好地体现真实网络的特点。

因此,10年来在网络可靠性评估方面研究者们主要致力于解决以下几个问题:

- (1)精确计算网络可靠性的效率太低。如何减少计算复杂度及提高计算效率?
- (2)近似算法所得界不能使人满意。怎样获得更为准确的上/下界?
- (3)在有些情况下,网络部件并非只有正常、故障两种状态,即存在多态(Multi-State)故障;而故障间也并非一定是统计独立的,如存在一些共因故障,如何考虑多态故障及故障的非统计独立性?

围绕着这些问题,研究者们提出了一些新的解决方法。

### 2.3.1 二态、故障统计独立假设下新的精确算法

#### (1)节点绝对可靠

为了简化问题,突出研究重点,研究中往往假设网络中节点完全可靠,只有链路可能发生故障。近10年的研究中,主要通过经典算法的改进来提高评估效率。

#### ①基于不交积和的算法

使用不交积和法的前提是已知网络的所有最小割集或者

最小路集。但搜索网络的最小割集/路集存在大量的计算冗余,增加了复杂度。文献[2]提出了一个简单的算法,它利用矩阵产生节点集,通过节点集形成链路最小割集,然后将该最小割集作为基于不交积和方法的多变量转置输入,来获得不可靠度的表达式。该算法不仅适用于两端可靠性问题,还可以无冗余地枚举 $k$ 端或全端网络割集。在计算全局网络可靠度时,与生成树法相比,该算法可有效获得最小割集;但计算两端网络时,没有此优势。

#### ②基于因子分解的算法

文献[3]提出了一种有效的计算通信网络故障频率的因子分解算法。该方法将因子分解算法通过矩阵形式的分解公式应用于 $k$ 端网络,在计算较大网络时比很多相关算法有效。该方法的优点是因子分解法扩展到计算网络故障频率,不足之处是它要求链路的故障率必须为常数,故障概率分布模型单一。

#### ③基于BDD的算法

文献[4]提出基于二元决策图(Binary Decision Diagrams, BDD)的网络分解法来计算网络的可靠性。该方法的指数因子只依赖于部分节点的数量,因此减少了计算拥有上百个节点的网络可靠性的时间。

#### ④基于OBDD的算法

文献[5]提出了一种使用有序二元决策图(Ordered Binary Decision Diagrams, OBDD)的边扩张图(Edge Expansion Diagrams)方法来评估终端节点对的可靠性。该方法首先利用边扩张图生成的OBDD来构建给定函数的成功路径函数,然后直接递归地评估该网络可靠性。该算法的优点是构成OBDD的节点数随网络阶数的增加呈线性增长,这比之前复杂度呈指数增长的基于不交积和的算法好很多。但是算法的效率依赖于所选择的二元决策图的变量排序,例如广度优先搜索(Breadth-first Search, BFS)产生的变量顺序和深度优先搜索(Depth-first Search, DFS)产生的变量顺序是不同的,即使对它们进行同样的算法处理,二者的计算效率也不相同。因此,要想对OBDD进行操作和应用,如何快速地产生高效的变量排序是一个非常值得研究的问题。

同样是这3位作者<sup>[6]</sup>,他们于2002年在两端可靠性函数的基础上提出了一种确定无向 $k$ 端网络可靠性的方法。该方法将 $k$ 端问题分解为求解多个两端可靠性函数问题,再用OBDD加以计算。与因子分解算法相比,它减少了多余计算,提高了计算效率。

#### (2)节点、链路均不可靠

实际上,网络中的节点和链路都有可能发生故障。最早在1975年,Aggarwal就提出了一个修改概率的方程式,亦即将已有的对理想节点网络可靠性的算法转化为考虑失效节点时的算法,但该方法和基于该方法的改进都存在计算效率不高的问题。新的解决方法有如下两种思路:

#### ①基于状态枚举的算法

文献[7]将使用了压缩算法(compression algorithm)的可靠性框图(Reliability Block Diagram, RBD)作为工具来描述网络。该算法以波兰编码方法(Polish Encoding Approach)辅助进行状态枚举,首先枚举所有存在路径,然后在算法上压缩所有的重复组件,最后将其编码为一个串并联的框图来计算精确的可靠性。它消除了重复的状态组合,节省了时间和存

储空间,不足之处是该算法仅适用于且尤其适用于对复杂串并联网络的计算,而且计算大型网络的速度较慢。

## ②基于 OBDD 的算法

文献[8]提出了两个精确算法即 EE(Entangled Expansion)算法和 CAE(Composition After Expansion)算法来准确评估节点及链路均不完全可靠的网络的可靠性。这些算法基于 OBDD 的方法,较其它方法的一个重大改进就是充分应用 OBDD 结构减少了冗余状态。但是算法的效率同样依赖于所选择的二元决策图的变量排序。与①中提到的 RBD 方法相比,它的优点是没有仅限于串并网络。

### 2.3.2 二态、故障统计独立假设下新的近似方法

如上所述,精确算法在计算复杂网络时效率很低,甚至存在“组合爆炸”的问题。因此,提出一些近似算法,如图变换法(简化网络得到可靠性指标的上/下界)、定界法、蒙特卡罗法等。虽然已经开展了大量研究,但普遍存在的问题是所获得的可靠性“界”的准确度和精确度非常不理想。10年来,研究把定界法及仿真方法作为突破口,获得了一些进展。

#### (1)定界法

文献[9]提出了一个边界近似算法——递归截断算法。该算法先扫描所有的最小割集,通过比较割集的失效概率找出薄弱割集(Weak Cutset),再通过连续截断来近似估算一个预先给定绝对误差  $\delta > 0$  的网络的全终端可靠性(给出可靠度上界及下界)。如果近似误差超过了一个临界值,其递归子程序的迭代次数增长非常快。

#### (2)仿真方法

文献[10]清楚完整地阐述了 Fishman 提出的蒙特卡罗抽样计划,并将其由两端网络扩展到  $k$  端网络。同时,其描述了如何组织蒙特卡罗仿真程序。文献[11]将普通的蒙特卡罗仿真方法创新应用于移动自组无线网络(Mobile Adhoc Wireless Networks, MAWN),它通过包含变动模型来适应 MAWN 节点移动性的特点。其优点是能快速接近一个移动自组无线网络的可靠度精确值且对两端可靠性和全端可靠性问题都能适用。文献[12]提出了一个新的响应曲面方法——挤压响应曲面方法(Squeeze Response Surface Methodology, SRSM)。该算法能产生复杂网络的近似网络可靠性函数,而不用提前知道所有的最小路集和最小割集。在运行时间和结果准确度方面,该算法都优于同样能产生近似网络可靠度函数的最好算法——线性平方近似法及蒙特卡罗仿真-响应曲面方法。

文献[13]提出了一种新的递归方差缩减仿真算法,它可以显著减少仿真执行时间,适用于  $k$  端可靠性的评估。

### 2.3.3 考虑多态、共因故障的方法研究

文献[14]提出了无线传感器网络可靠性和安全性的综合模型。该模型区分了两种类型的故障:由于发生恶意入侵造成的安全故障和由于系统的构成组件故障引发的传统故障。该方法考虑了模块化的不完善覆盖和从属共因故障这两个实际问题(前者造成多态故障,后者造成故障统计非独立),并提出可根据模型用马尔可夫链和一些组合法计算。文献[15]又提出基于 BDD 组合的方法来隔离不完善故障覆盖(Imperfect Fault Coverage, IPC)和共因故障(common-cause failures, CCF)两个问题。根据隔离顺序的不同,提出了两个基于 BDD 的等价的方法。作者认为所提方法优于基于马尔可夫链的方

法,因为基于马尔可夫链的方法通过扩展状态空间来定位 IPC 和 CCF,增加了中间转换次数,更加恶化了“状态爆炸”的问题。文献[16]使用了一个顺序退化方案来考虑易受共因故障影响的无线传感器网络的建模和定向覆盖可靠性评估问题。该方案因为减少了有序二元决策图且考虑到了共因故障的分解合并方案,计算复杂度较低,所以计算效率高。文献[17]研究了一个不存在独立路径(两条路径间发生的故障是独立且互不影响的,称为独立路径)的网络系统的可靠性建模案例,提出了一种旋转方法来处理这种高复杂度模型所涉及的相关性、复杂性。该方法的优点是对任何由于组件故障非统计独立性造成链路故障依赖性的系统都可以使用。

## 3 网络容量可靠性评估

### 3.1 问题的提出及经典方法

对于网络连通可靠性的评估是网络可靠性研究中最开始进行的,因此研究成果很多。但在实际使用网络的过程中,会发现网络中不论是链路的容量还是节点的容量,都不是如连通可靠性研究中所默认的“容量无限”。在网络连通的情况下,网络容量的限制依然会对“传输一定流量”的功能实现产生影响。因此,不仅关心网络中是否存在连通路径,还关心是否存在满足一定流量(物质、能量、信息)需求的连通路径。最早对这一问题进行研究的是美国普林斯顿大学的 Ford 教授等,他于 1956 年针对运输网、通信网、电网等一类容量有限的网络,基于图论提出了网络流模型,并于 1962 年首先给出了求解网络最大流的第一个算法——标号法,其开拓了用数学网络理论来研究运输系统的思路,首次开始将链路容量与网络可靠性相结合<sup>[18]</sup>。随后,出现了对路网能力可靠性的研究,即将路网能力可靠性定义为路段交通量不超过路段能力限制的概率<sup>[19]</sup>。近年来,才开始对“定量信息通过网络的概率”,即流网络(Flow Network)的研究。首先对这一问题进行研究的是 K. K. Aggarwal 等<sup>[20]</sup>,他们将一个系统是否故障定义为其能否成功地在源汇节点间传输要求的流量。为了简化问题,突出重点,他们做了如下假设:(1)网络中节点无容量限制且完全可靠;(2)网络中链路有容量限制,不能通过超出该容量信息流;(3)链路只有故障、正常两种状态,故障时信息流无法通过;(4)网络中链路故障的概率是统计独立的。

### 3.2 近 10 年的新方法

传统的网络流理论虽然考虑了网络容量的问题,但都是针对网络容量固定的网络。而现实世界中的网络系统受到多种不确定因素(如网络构件的降级运行、网络阻塞等)的影响,可能会导致网络拓扑结构、链路容量发生变化,从而表现出网络容量的随机性和多态性。所以,使用传统的网络流理论没有考虑到网络容量的这两个特性,用来解决随机环境下的网络实际问题已经不再合适。

因此,近 10 年来,可靠性工作者们致力于对流网络可靠性评估方法的进一步改善和对随机流网络的研究。

#### 3.2.1 流网络可靠性评估

目前已有的计算流网络的可靠性的方法,大部分都需要已知最小路径或最小割集,再利用不交积和、容斥原理、复合路径等方法求解。

文献[21]提出了一个基于可加性和合格性概念的新算法 LP-EM,它减少了之前的复合路径算法中的冗余计算,从而

减少了计算复杂度。该作者认为子网的快速生成反映了网络各种各样的状态,且每个子网的容量伴随子网生成过程变化,而计算每个子网容量的现有算法会造成大量的重复计算。因此,他们于2004年又提出了一种基于带符号(符号表示流量方向)的最小路径和单向连接的新方法<sup>[22]</sup>,来计算子网的容量,减少重复计算。文献<sup>[23]</sup>提出了一种有效的割集方法——子集切割技术,其通过枚举所有无冗余的子割集来计算一个大的有异构链路容量的通信网络的可靠性。

### 3.2.2 随机流网络(Stochastic-Flow Network)可靠性评估

如前所述,流网络模型并不能解决网络流量的随机性和多态性问题。为了解决这些问题,研究者建立了一些考虑随机性的模型。文献<sup>[24]</sup>正式提出了随机流网络的概念:一个网络中的链路容量为服从已知分布的随机变量。由此,引出了网络中链路容量的多态问题。

#### (1)精确算法

文献<sup>[25]</sup>提出了一个贪婪分支定界容斥算法来计算精确的多态网络可靠性。该算法利用最小路集和最小割集的交集特点,首次开发了一个贪婪程序来记录最小路集和最小割集,以提高检测和删除程序的速度。该算法比其它基于容斥原理的算法在计算复杂度上有所改善,但若将其应用于在有限的时间内计算现实中由数以千计的节点或路由组成的因特网的精确可靠性,是不可能实现的;并且,因特网是动态的,带宽、传输速度这些参数变化很快。因此,对近似算法的研究应该是重点研究方向。

#### (2)近似算法

文献<sup>[26]</sup>提出了一种完全枚举的算法,来计算在有预算约束 $C$ 下能传输 $d$ 个单位信息的下节点,并通过仿真结果证明了其有效性。文献<sup>[27]</sup>提出了一个基于最小割集来产生最大向量以满足流量需求和预算限制的算法<sup>[27]</sup>。该算法针对单重商品(Single-Commodity)随机流网络和双重商品(Two-Commodity)(即两种类型的信息流)随机流网络。此时对可靠度的定义是网络的最大流大于或等于给定需求量的概率。同年,文献<sup>[28]</sup>又进一步扩展了信息流种类,研究了多重商品(Multicommodity)有限流(Limited-Flow)网络的可靠性,提出一个新的指标来衡量该网络的质量等级:在预算约束下系统容量上界等于所需量的概率;且提出了一个基于最小割集的分支定界算法来产生所有的上界点,以计算该指标。

文献<sup>[29]</sup>利用多路由算法和最小改进路径算法,提出了一个新的计算多态网络的可靠性下界算法,该算法通过减少计算可靠性下界的迭代次数来提高计算效率。

## 4 网络性能可靠性评估

虽然对于链路容量的可靠性评估方法已经考虑了网络流的负荷问题,但在实际的网络中,保证网络流量的路径并不像考虑链路容量的方法中所假设的那样自动依据拓扑结构生成(有路由算法参与其中),并且网络的拥塞、时延等故障也成为日渐关注的焦点。就10年来的研究成果来看,目前对于网络性能可靠性的评估还处于探索和尝试阶段,对于“网络性能可靠性”并没有如前两种可靠性那样明确的定义,而多以“某些性能参数(如吞吐量、丢包率、延迟时间等)不超过其规定阈值的概率”作为可靠性的度量。因此,网络性能可靠性研究需要解决的主要有以下3个难点:(1)如何针对网络的动态性、多

态性等特点建立合理的可靠性分析数学模型?(2)基于网络性能可靠性的评估的指标是什么?(3)有哪些方法可以用于网络性能可靠性评估?

围绕着对这3个问题的研究,近10年来的研究有以下进展。

### 4.1 建立网络性能可靠性的数学模型

文献<sup>[30]</sup>提出了一个新的网络可靠性评估模型——流量路径模型。作者认为,传统的概率图模型根本没有考虑网络的性能降级,而概率容量模型不合理的假设(如基于图论的最大流假设)导致其只能通过网络拓扑结构来评估性能降级。作者提出的这一新模型并没有以拓扑信息为中心,而是集中关注于流量路径的信息,通过从流量路径到物理构件和容量的映射,能简单明了地反映网络的性能降级情况,从而能通过一种由上到下的方法评估通信网络的可靠性。

### 4.2 网络性能可靠性的指标和解析算法

文献<sup>[31]</sup>提出了一个考虑网络及时可靠性评估的指标,即以源信号在规定时间内到达终点的概率为该网络的及时可靠度。作者还提出了一种评估非循环传输网络(Acyclic Transmission Network, ATN)可靠性的新算法,该算法基于使用状态枚举的扩展通用生成函数方法。

同年,文献<sup>[32]</sup>提出将路由缓冲区溢出的概率作为衡量网络拥塞的标准,提出了一个基于状态空间的算法,来计算网络在IP层的性能可靠度。该算法假设网络中数据包的重选路由只由物理链路故障造成。

### 4.3 网络性能可靠性的仿真方法

文献<sup>[33]</sup>提出了考虑网络拥塞的可靠性仿真方法。方法假设网络节点完全可靠,链路可靠度为常数,数据包到达时间服从泊松分布,以成功数据包的数量与成功数据包及丢失数据包的数量和之比作为网络的拥塞可靠度(当存在数据包丢失时),或者将成功数据包数量与仿真产生的所有数据包数量之比作为拥塞可靠度(当没有数据包丢失时)。仿真采用事件驱动方法,考虑3种事件:数据包产生、数据包传输、数据包接收。先将时间清单初始化,再按照所有事件发生的时间顺序,将事件添加到事件清单上。该仿真考虑了3种路由选择算法:更替路由法、泛洪法、静态最短路径法。

**结束语** 网络可靠性评估不仅可以在网络的规划阶段提供方案选择依据,还可以在网络的运行验收阶段提供评价网络“好坏”的指标,更可以在优化设计阶段提供指导。相应的评估方法是近年来一个活跃的研究领域,但各类方法还存在各自的局限性。

(1)连通可靠性的评估方法是最早开始同时也是近年来研究成果最多的,但对于大型复杂网络来说,改进后的精确算法在提高计算效率上的作用并不大。因此,近似算法的主要研究成果集中在仿真方法上,尤其是对蒙特卡罗仿真方法的改进和创新应用。此外,对于多态和共因故障的研究是近几年新兴的热点。因此,在连通可靠性评估方面还需要对大型复杂网络或无线网络的仿真方法以及多态、共因故障的处理方法进行进一步研究。

(2)在容量可靠性评估方面,随机流网络概念的提出是一个很大的进展,但目前该领域的成果较少,近10年的新方法主要是基于网络最小割集的方法,其计算效率有待提高。

(3)性能可靠性是近几年的研究新热点,但由于网络的复

杂性、动态性、多态性等特点,性能可靠性的评估难度非常大。近几年的相关研究围绕网络的时延、拥塞等故障因素,但并没有一个综合统一的性能可靠性分析模型,相关的完整评估指标体系也没有建立。

从以上3类网络可靠性评估方法的研究进展中可以看出,网络可靠性的内涵在不断延伸,关注用户需求及网络性能的评估方法逐渐成为研究热点。近几年来还出现了以业务为中心的可靠性评估方法,它将“网络对某业务的支持能力”作为业务可靠性的度量。

文献[34]提出了一个新的以业务为中心的通信网络可靠性模型。作者认为,目前对网络可靠性的相关研究大大简化了网络对象和可靠性模型,对可靠性评价缺乏明确内容,并不包含用户对网络的要求(不同的用户对网络的性能要求可能不同),不能更细致地考察网络对某业务的支持能力。因此,作者提出了网络业务可靠性的相关概念,并在此基础上提出了以业务为中心,分层分析和计算网络可靠性的方法。文献[35,36]提出了网络的性能可靠指数,确定了表征网络业务性能可靠分层评价参数体系,并给出了评价算法。在此基础上,文献[37]提出了基于马尔可夫的业务可靠性算法,并在计算出单业务可靠度的基础上,提出了评估整网可靠度的方法。文献[38]提出了以业务为中心的网络可靠性试验与评估方法,在分层指数评价法的基础上,针对单业务的网络可靠性,研究了计算机局域网业务流量生成、数据收集的方法。

业务可靠性在前3类研究的基础上,从用户的角度出发,关注网络上运行业务对可靠性的影响,从而反映网络对用户业务的满足能力,是未来重要的研究趋势。在相关的可靠性参数体系、评估模型与算法、仿真和试验方法等领域已有一些初步的研究成果,还需要针对网络中软硬件“耦合”故障、业务剖面描述和生成等问题进行更深入的研究。

## 参 考 文 献

[1] 李瑞莹,康锐. 网络可靠性评价研究综述[J]. 可靠性工程,2008,7(3):104-108,136

[2] Mishra R,Chaturvedi S K. A Cutsets-based Unified Framework to Evaluate Network Reliability Measures [J]. IEEE Transactions on Reliability,2009,58(4):658-666

[3] Hayashi M,Abe T. An Efficient Factoring Algorithm for Computing the Failure-Frequencies of Telecommunications Networks [C]// Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2004:110-115

[4] Hardy G,Lucet C,Limnios N. K-Terminal Network Reliability Measures with Binary Decision Diagrams [J]. IEEE Transactions on Reliability,2007,56(3):506-515

[5] Kuo S-Y,Lu S-K,Yeh F-M. Determining Terminal-Pair Reliability Based on Edge Expansion Diagrams Using OBDD [J]. IEEE Transactions on Reliability,1999,48(3):234-246

[6] Yeh F-M,Lu S-K,Kuo S-Y. OBDD-based Evaluation of k-Terminal Network Reliability[J]. IEEE Transactions on Reliability,2002,51(4):443-451

[7] Sahinoglu M,Ramamoorthy C V,Smith A E,et al. A Reliability Block Diagramming Tool to Describe Networks [C]// Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2004:141-145

[8] Kuo S-Y,Yeh F-M,Lin H-Y. Efficient and Exact Reliability Evaluation for Networks with Imperfect Vertices [J]. IEEE

Transactions on Reliability,2007,56(2):288-300

[9] Sharafat A R, Ma'rouzi O R. All-terminal Network Reliability Using Recursive Truncation Algorithm[J]. IEEE Transactions on Reliability,2009,58(2):338-347

[10] Manzi E,Labbé M,Latouche G,et al. Fishman's Sampling Plan for Computing Network Reliability [J]. IEEE Transactions on Reliability,2001,50(1):41-46

[11] Cook J L, Ramirez-Marquez J E. Reliability for Cluster-based Ad-hoc Networks [C]// Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2008:244-248

[12] Yeh W-C. A Squeeze Response Surface Methodology for Finding Symbolic Network Reliability Functions [J]. IEEE Transactions on Reliability,2009,58(2):374-382

[13] Cancela H, El Khadiri M. The Recursive Variance-Reduction Simulation Algorithm for Network Reliability Evaluation [J]. IEEE Transactions on Reliability,2003,52(2):207-212

[14] Xing Liu-dong, Michel H E. Integrated Modeling for Wireless Sensor Networks Reliability and Security [C]// Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2006:594-600

[15] Xing Liu-dong. Reliability Evaluation of Phased-Mission Systems Wwth Imperfect Fault Coverage and Common-cause Failures [J]. IEEE Transactions on Reliability,2007,56(1):58-68

[16] Shrestha A,Xing Liu-dong,Liu Hong. Modeling and Evaluating the Reliability of Wireless Sensor Networks [C]// Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2007:186-191

[17] Yin Meng-lai, Arellano R R. A Case Study on Network Reliability Analysis for Systems with Non-independent Paths [C]// Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2008:108-113

[18] 马健霄. 城市局域交通网络容量研究[D]. 南京:南京林业大学,2007

[19] 雷中林. 铁路路网系统运输能力理论[D]. 北京:北京交通大学,2006

[20] Aggarwal K K, Chopra Y C, Bajwa J S. Capacity Consideration in Reliability Analysis of Communication Systems [J]. IEEE Transactions on Reliability,1982,31(2):177-181

[21] Lee S M, Park D H. An Efficient Method for Evaluating Network-reliability with Variable Link-capacities [J]. IEEE Transactions on Reliability,2001,50(4):374-379

[22] Lee S M, Lee C H, Park D H. Sequential Capacity Determination of Subnetworks in Network Performance Analysis [J]. IEEE Transactions on Reliability,2004,53(4):481-486

[23] Soh S, Rai S. An Efficient Cutset Approach for Evaluating Communication-network Reliability with Heterogeneous Link-capacities [J]. IEEE Transactions on Reliability,2005,54(1):133-144

[24] Lin Y-K. On reliability evaluation of a stochastic-flow network in terms of minimal cuts[J]. Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers,2001,18(3):49-54

[25] Yeh W-C. A Greedy Branch-and-Bound Inclusion-Exclusion Algorithm for Calculating the Exact Multi-state Network Reliability [J]. IEEE Transactions on Reliability,2008,57(1):88-93

[26] Lin Y-K. Reliability of a Stochastic-flow Network with Unreliable Branches & Nodes, Under Budget Constraints [J]. IEEE Transactions on Reliability,2004,53(3):381-387

[27] Lin Y-K. Reliability of a Flow Network Subject to Budget Constraints [J]. IEEE Transactions on Reliability,2007,56(1):10-16

- [21] Fujibayashi K, Murata S. Precise simulation model for DNA tile self-assembly[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2009, 8(3):361-368
- [22] Reif J H. Local parallel biomolecular computation[J]. *DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science*, 1999, 48:217-254
- [23] Crocker J C. Nanomaterials: Golden handshake [J]. *Nature*, 2008, 451(31):528-529
- [24] Winfree E, Yang X, Seeman N C. Universal computation via self-assembly of DNA: some theory and experiments[J]. *DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science*, 1999, 44:191-213
- [25] Al-Daoud E, Zaqabeh B, Al-Hanandeh F. 3D DNA nanostructures for vector multiplication[J]. *American Journal of Scientific Research*, 2009, 1:5-11
- [26] Seeman N C. Biochemistry and structural DNA nanotechnology: an evolving symbiotic relationship [J]. *Biochemistry*, 2003, 42(24):7259-7269
- [27] Chen H L, Schulman R, Goel A, et al. Reducing facet nucleation during algorithmic self-assembly[J]. *Nano Letters*, 2007, 7(9):2913-2919
- [28] Winfree E, Liu F, Wenzler L A, et al. Design and self-assembly of two-dimensional DNA crystals[J]. *Nature*, 1998, 394(6693):539-544
- [29] LaBean T H, Reif J H, Seeman N C, et al. Construction, analysis, ligation, and self assembly of DNA triple crossover complexes [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2000, 122(9):1848-1860
- [30] Winfree E. Algorithmic self-assembly of DNA[D]. California: California Institute of Technology, 1998
- [31] Rothmund P W K, Winfree E. The program-size complexity of self-assembled squares[C]// *ACM Symposium on Theory of Computing*. Montreal, Quebec, Canada, 2001:459-468
- [32] Adleman L. Toward a mathematical theory of self-assembly [R]. Los Angeles: University of Southern California, January 2000
- [33] Adleman L M, Cheng Q, Goel A, et al. Combinatorial optimization problems in self-assembly[C]// *Thirty-fourth Annual ACM Symposium on Theory of Computing*. Montreal, Quebec, Canada, 2002:19-21
- [34] Rothmund P W K, Winfree E. The program-size complexity of self-assembled squares[C]// *ACM Symposium on Theory of Computing*. Montreal, Quebec, Canada, 2001:459-468
- [35] Adleman L M, Cheng Q, Goel A, et al. Running time and program size for self-assembled squares[C]// *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on Theory of Computing*. Heraklion, Greece, 2001:740-748
- [36] Aggarwal G, Cheng Q, Goldwasser M H, et al. Complexities for generalized models of self-assembly[J]. *SIAM Journal on Computing*, 2005, 34(6):1493-1515
- [37] Sahu S, Yin P, Reif J H. A self-assembly model of time-dependent glue strength [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 3892:290-304
- [38] Soloveichik D, Winfree E. Complexity of self-assembled shapes [J]. *SIAM Journal on Computing*, 2007, 36(6):1544-1569
- [39] Baryshnikov Y, Coffman E G, Momcilovic P. DNA-based computation times [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, 3384:14-23
- [40] Kao M Y, Schweller R. Reducing tile complexity for self-assembly through temperature programming[C]// *Proceedings of the 17th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*. Miami, USA, January 2006:571-580
- [41] Adleman L M, Cheng Q, Goel A, et al. Running time and program size for self-assembled squares[C]// *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on Theory of Computing*. Heraklion, Greece, 2001:740-748
- [42] Winfree E, Bekbolatov R. Proofreading tile sets: error correction for algorithmic self-assembly[C]// *Proceedings of the 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*. Madison, WI, USA, June 2003, 2943:126-144
- [43] Murata S. Self-assembling DNA tiles-mechanisms of error suppression[C]// *Society of Instrument and Control Engineers Annual Conference in Sapporo*, Hokkaido Institute of Technology. Japan, August 2004:2764-2767
- [44] Fujibayashi K, Murata S. A method of error suppression for self-assembling DNA tiles[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, 3384:113-127
- [45] Fujibayashi K, Zhang D Y, Winfree E, et al. Error suppression mechanisms for DNA tile self-assembly and their simulation [J]. *Natural Computing*, 2009, 8(3):589-612

(上接第 13 页)

- [28] Lin Y-K. System Reliability of a Limited-flow Network in Multicommodity Case [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2007, 56(1):17-25
- [29] Satitsatian S, Kapur K C. An Algorithm for Lower Reliability Bounds of Multistate Two-terminal Networks[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2006, 55(2):199-206
- [30] Hayashi M, Abe T. Evaluating Reliability of Telecommunications Networks Using Traffic Path Information [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2008, 57(2):283-294
- [31] Levitin G. Reliability Evaluation for Acyclic Transmission Networks of Multi-state Elements with Delays [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2003, 52(2):231-237
- [32] Liu Hui-ling, Shooman M L. Reliability Computation of an IP/ATM Network with Congestion [C]// *Annual Reliability and Maintainability Symposium*. 2003:581-586
- [33] Liu Hui-ling, Shooman M L. Simulation of Computer Network Reliability with Congestion [C]// *Annual Reliability and Maintainability Symposium*. 1999:208-213
- [34] 黄宁, 李瑞莹, 陈卫卫. 以业务为中心的通信网络可靠性模型研究[J]. *可靠性工程*, 2010, 9(3):109-114, 129
- [35] Huang Ning, Li Rui-ying, Chen Wei-wei, et al. The layered index method for network reliability analysis[C]// *The 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*. 2009:1155-1159
- [36] Wang Xue-wang, Huang Ning, Chen Wei-wei, et al. A New Method for Evaluating the Performance Reliability of Communications Network[C]// *2010 International Conference on Information, Networking and Automation*. 2010:516-520
- [37] Huang Ning, Hou Dong, Chen Yang, et al. A Network Reliability Evaluation Method Based on Applications and Topological Structure [J]. *Journal of Maintenance and Reliability*, 2011(3)
- [38] 陈阳, 黄宁, 康锐, 等. 局域网 FTP 业务可靠性试验与评估技术 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(1):91-94, 112