

# 条件能量网络中信息流行为的研究

许荣飞 范通让

(石家庄铁道大学信息科学与技术学院 石家庄 050043)

**摘要** 网络应用的日益普及关系到人们日常活动的各个方面。为了更好地研究网络交互行为,从网络信息流出发,将网络行为抽象成一种依靠信息资源供应关系驱动的形式,借助物理学概念将这种供应关系用节点间引力来表示,构造出一种不基于网络行为实现细节的抽象的条件能量网络模型,并根据定义的“相对能”意义将网络模型分为能量网络和混沌网络两种状态。最后,通过实验验证利用具有能量意义的网络交互规则研究信息流行为的可行性,结果显示,条件能量网络模型能简单、准确地描述现实网络中的信息流行为,对于网络策略运用的普遍性和网络研究的一致性具有深远意义。

**关键词** 网络模型,能量网络,信息流,资源供求,驱动力

**中图分类号** TP309 **文献标识码** A

## Study of Information Flow Behavior on Conditioned Energy Networks

XU Rong-fei FAN Tong-rang

(School of Information Science and Technology, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract** The increasing popularity of network applications has touched various aspects of human daily activities. In order to study network interactive behavior better, the network information flow was abstracted as a form driven by the relation of information resource supply and demand. The drive of supply and demand was described by physics concept as the gravity between a pair of nodes. A conditioned energy network model which is not based on details of network behavior mode was built and divided into energy network status and chaotic network status according to the concept of “relative energy”. At last, the feasibility that information flow behavior could be studied by the network rule having the mean of energy was verified. It was demonstrated that the model could express information flow behavior of real networks briefly and accurately, had a profound and lasting significance in universality of the application of network strategies and consistency of network study.

**Keywords** Network model, Energy network, Information flow, Resource supply and demand, Driving force

计算机网络系统具有开放性、复杂性、动态性等特征,且始终处于不断地演化之中。但是,这些网络突现行为都是由简单、一般规律支配的组织过程来完成<sup>[1]</sup>。为了从根本上对网络信息传输等行为进行研究,尤其是现在云计算技术的出现和快速兴起对传统网络服务模式以及信息安全领域的影响<sup>[2,3]</sup>,都迫切需要对网络结构及支配其信息行为的规律进行研究分析。

在网络高速发展过程中,网络通信技术的日趋成熟使得网络连接更加容易。随着社会的发展,人与人之间的网络交互行为变得越来越频繁、多样,导致各种不同形态、规模、交互规则的网络层出不穷,甚至同一个网络也时刻处于不断发展变化之中。随着现阶段云服务的出现和兴起,更加深了网络环境及之上行为的复杂程度。此外,网络信息交互行为具有很强的时间变化性、动态突发性以及交互不确定性等特点。那么,直接通过网络结构等实体信息研究网络信息传播交互行为显然是困难甚至不可能的,因此,研究出一种不基于具体

网络类型(interactive mode free)的抽象模型,以对动态的网络构建和信息交互形态进行特征提取,并使之静态、简单化,已成为必需之举。

本文第 1 节介绍当今对网络结构及信息行为研究的现状和特点;第 2 节在现有理论的支撑下,提出一种抽象的条件能量网络模型,介绍了该模型的基本原理和行为研究方法,并提供数学方法的描述;第 3 节通过实验验证分析该网络模型表达现实网络的可行性与准确性;最后进行总结。

## 1 背景知识

包括计算机网络在内的复杂网络中个体单元之间的动态行为都和底层的网络结构环境息息相关<sup>[4]</sup>,因此许多学者对网络结构的构成规则以及与其信息动态行为之间的关系进行相关研究。Milo R 等人从网络基本单元图的角度来剖析网络的拓扑规则及构成形式<sup>[5]</sup>。Shandilya S G 提供了一种通过观察收集动态的网络行为痕迹来直接推断网络连接拓扑结

到稿日期:2011-12-12 返修日期:2012-03-22 本文受国家自然科学基金(60873208),河北省自然科学基金(F2009000927)资助。

许荣飞(1988-),男,硕士生,主要研究方向为网络安全与技术,E-mail:xurongfeik@163.com;范通让(1965-),女,博士,教授,主要研究方向为网络技术与信息处理。

构的方法<sup>[6]</sup>。Karsai M 发现网络中信息传播速度的降低主要是由权值拓扑之间的相互关系和个体的突发性行为导致的<sup>[7]</sup>。Larremore D B 等人提出耦合激励网络系统对外部刺激反应的动态性取决于网络中的连接拓扑<sup>[8]</sup>。Perotti J I 指出网络中成员之间的关系取决于成员拓扑角色对网络全局稳定性的影响,并提出了基于全局行为稳定性的网络进化机制<sup>[9]</sup>。

吕琳媛等人通过已知的网络结构和网络行为等信息预测网络中尚未产生连接的两个节点之间链路存在的可能性<sup>[10-11]</sup>。文献<sup>[12]</sup>针对混沌时间序列解析方程的不确定性,提出了 Antis-量子组合预测网络来对网络中的动态行为进行相关预测。Zhu G M 等人使用邻接矩阵中具有代表性的特征向量来研究复杂网络的结构特征以及网络行为的局部化特性<sup>[13]</sup>。Wang X F 对网络拓扑的基本模型、性质以及复杂网络上的传播机理和动力学进行了详细的论述分析<sup>[14]</sup>。

当今对网络信息行为的研究大多是从网络拓扑结构入手,但忽略了网络节点间相互作用关系才是影响网络动态行为的最直接因素。现实网络规模庞大、类型迥异等特点造成了网络连接复杂以致结构的不可得。此外,不同类型网络的形态、规则势必会导致网络中信息交互方式的差异,相应地,指导网络行为策略的研究也会受到限制,从而导致网络控制行为的复杂性,这都源于网络行为策略研究与网络连接结构之间的断层。因此,对网络结构及其行为规则的抽象统一成为网络研究策略行之有效与简单化的重要举措。

本文将从不同视角研究现有网络的特征与共性,力图将数量庞大、层次不同、规则各异的现实网络抽象为统一的条件能量网络(包括能量网络状态和混沌网络状态),从网络节点间关系着手搭建网络结构复杂性和行为研究统一性之间的桥梁,降低网络行为研究对拓扑结构的依赖性。该网络模型上行为策略的研究仅与产生此行为的网络节点本身相关,而不考虑其具体的实现方式,屏蔽了底层不相关的细节,使作用于网络行为策略的研究具有整体化、简单化等特点,网络策略具有对网络演化的适应性、普遍性和可移植性。

## 2 关键技术

本文借鉴复杂网络、传播动力学和量子技术等相关理论,将不同类型的现实网络归纳抽象为统一的条件能量网络模型,其网络行为通过节点间信息资源供求关系来驱动。这种驱动关系表现形式为与此行为相关的网络节点间(在信息资源问题上)的相互引力,各种关系的引力作用形成了网络中行为主体信息流以资源形式交互的能量场。根据定义的“相对能”概念来标识网络所处的状态,将其划分为能量网络和混沌网络,从而针对网络状态的差异,利用相应的方法策略来研究网络模型中信息流的交互行为。

### 2.1 相关知识

#### 2.1.1 信息资源供求关系

计算机网络中主机节点间的信息交互与生活中人际关系网络的行为类似,尤其随着现在云计算技术的兴起,云网络服务模式启发了学者从网络资源供求的角度来研究网络信息流过程。Zhao K 等人将网络中的交互行为看作是资源的供应过程,提出了致力于供应链管理的研究,因为这种供应链构建了复杂网络和对应的具有适应力供给网络之间的纽带<sup>[15]</sup>。

Lin C N 使用启发式策略来缓解供应网络中结构洞的影响,提出了基于“桥”概念的方法来解决供应链中存在的结构洞问题<sup>[16]</sup>。基于供应链在网络资源传输中的重要性,Tsea Y K 对影响供应链正常运转的潜在现象进行了研究<sup>[17]</sup>。

#### 2.1.2 信息流中物理特性的研究

物理学描述了物质发展变化的现象与规律,一些学者从物理学角度对网络信息流行为过程中体现出来的物理特性进行了研究。Waters J 将网络节点信息的交互和交换用物理力来模拟,信息的提供者和接收者被看作是 agent 粒子<sup>[18]</sup>,通过节点间信息的可见性、需求力的引力表达形式来控制信息流的行为。此外,Waters J 还就影响网络全局决策及交互行为的信息流速提出了基于有效信息流和时间的度量方式<sup>[19]</sup>。文献<sup>[20]</sup>将网络中信息的流动看作是信息宿节点属性的转移,其类似于量子态的隐形传输<sup>[21]</sup>。Ceruti M G 利用热力学理论中包含的压力、温度以及液体间的平衡系统等概念,通过类比物质状态与信息状态之间的关系,对信息系统进行刻画和度量<sup>[22]</sup>。Dodson C T J 通过物理上对晶体无序抑制的手段来分析信息集合中的行为过程<sup>[23]</sup>。

#### 2.1.3 能量信息流的建立

借助于从不同角度对网络信息流行为的研究成果,我们将网络信息交互过程涉及到的资源特征和物理表现进行交叉研究分析,发现网络信息的流通交互其实就是以信息宿节点为主体,利用节点间信息资源供求关系来实现的。本文将这种供求关系抽象为一种行为节点主体间在信息资源问题上的引力关系,那么整体网络信息行为由该作用力<sup>[18]</sup>驱动完成,网络行为实现于引力作用下的能量场<sup>[24]</sup>。这种信息流驱动力将网络按照其行为状态分为两类:当这种驱动力作用有序时,网络行为在上层表现和传统网络类似(但底层实现依赖于关系作用力驱动),可以采用常规的策略来研究网络行为;但当网络中的驱动力行为较为活跃时,信息流的动力范围在一个临界值上会被最大化,进而导致网络信息元的雪崩混乱现象,这种情况下的行为主体和交互行为通过采用熵<sup>[20,25-27]</sup>的概念来进行判断。

基于以上规则,本文构建了条件能量网络模型,通过建立网络信息流行为方式和网络能量<sup>[24]</sup>间的对应关系,利用网络“相对能”(下文将细述)的概念来判断信息行为引发的网络状态。将由驱动力生成的网络能量总和、行为节点主体的交互频率、请求-服务间“资源关系”信息行为与随机网络行为之间的差异程度等因素作为条件能量网络状态划分的依据。

## 2.2 模型抽象

### 2.2.1 基本原理

条件能量网络中信息交互行为通过依赖请求节点和信息资源节点间的供求关系驱动,这种供求关系与信息的易达性、需求程度以及节点间的链路相关。具有信息所有权的节点根据一定的规则(如在供全网共享的情况下保证本地行为的正常运行),对本地信息资源设置相应的存取权限(access)来控制对资源的请求操作,即本地资源对其他节点的可见力(visibility),亦即资源被获得的难易程度。节点由于完成任务的不同而对信息资源的需求程度各异,为了满足紧急任务的请求,可对请求服务操作设置不同的优先级。服务节点根据这种请求优先级来决策信息资源的分配(请求节点可以同时向不同的服务节点发出请求,返回时请求节点上的资源是从多

个服务节点得到资源集的联合)。网络链路状况也是影响信息流通的一个因素,链路状况包括请求节点将请求送到中央处理节点段的链路状况和服务节点将资源推送到中央节点段的链路状况。

条件能量网络中信息资源的请求和分配过程如图1所示,其中请求节点是信息流接收端,用于请求信息资源;服务节点是信息流发送端,用于信息资源供给;中央处理是在一个巨大的能量团中发生,其中能量场的强度决定信息流行为,图中实线表示资源请求过程,虚线表示资源供应过程。在条件能量网络交互模型中,建立连接后,请求节点*i*先向中央处理节点提交请求资源标识,同时附上对该资源的请求优先级。中央节点将接收到的请求信息放在排队器中进行排队(按照优先级),然后按照排队顺序将请求传递给服务节点*j*,服务节点*j*按照接收到的请求进行资源分配就绪工作。资源确定允许分配以后,节点*j*将本地资源可见力传送到中央节点上,中央节点根据请求优先级、资源可见力以及两端的链路状况决定信息流的行为。服务节点可以根据网络需求和本身的供应能力动态地对资源的 access 权限进行设置。

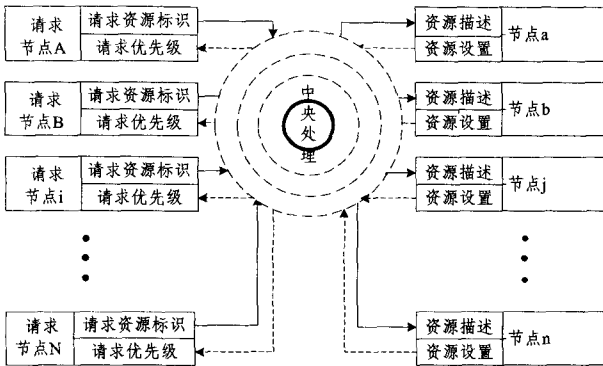


图1 网络模型中信息资源请求分配过程

网络信息资源交互行为通过相关节点间描述供求关系的相互作用力来驱动,请求优先级越高,资源越容易获得,也就越有利于信息资源传送行为的实现。此外,请求节点到中央处理节点和服务节点到中央节点的链路状况直接影响信息流与宿节点的成功分离,从而导致信息资源搬运的难度增加,即当两类节点到中央处理节点间的链路状况越差时,信息传送行为就越难实现。因此,本文将请求节点*i*向服务节点*j*请求信息的资源交互行为为驱动力表示为:

$$F = \frac{GP_i V_j}{C_i C_j} \quad (1)$$

式中, $P_i$ 是请求服务的优先级, $V_j$ 是服务端信息资源的可见力,即获得此资源的难易程度, $C_i$ 、 $C_j$ 是两端节点到中央节点段的网络链路状况, $G$ 是一个可调参数,可以根据资源的不同类型进行相关修正。中央节点接到信息资源请求优先级和共享权限后,根据该资源相对于请求节点可达的驱动力大小决定信息资源流向及相关行为。

### 2.2.2 行为研究

从物理学角度来看,能量变化是力做功的结果,条件能量网络中的能量变化通过信息资源的转移来体现,网络中所有节点间信息交互实现的能量总和表示为:

$$E_{\text{总}} = \sum_{k=1}^{k=N} E_k = \sum_{i=1, i \neq j}^{i=N} \sum_{j=1}^{j=N} F_{ij} (C_i + C_j) = \sum_{i=1, i \neq j}^{i=N} \sum_{j=1}^{j=N} \frac{GP_i V_j (C_i + C_j)}{C_i C_j} \quad (2)$$

式(2)说明了网络中的能量过程和请求-服务节点间的引力及路径相关,所有资源请求引起的网络总能量阐释了网络中资源供应量、服务请求以及网络状况等与实现信息资源交互行为相关要素之间的相互关系。图1中的虚线展示了传送信息资源的做功过程。

在条件能量网络中可以通过驱动力产生的能量来研究网络信息交互行为。本文借助文献[25]中对网络的划分技术,将能量网络按照“相对能”来划分网络交互行为所属的网络状态,“相对能” $E_r$ 的概念定义如下:

$$E_r = \frac{|E_{\text{总}}|}{I^{1/2} \omega_q} \quad (3)$$

其中,

$$I = \sum |P - P'| = \sum_{i=1}^{i=N} \sum_{j=1}^{j=N} \left| \frac{F_{ij}}{\sum_{k=1}^{k=m} F_k} - \frac{D_i}{\sum_{k=1}^{k=m} D_k} \right|$$

式中, $E_{\text{总}}$ 表示网络中的总能量, $\omega_q$ 是网络中的交互频率。 $I$ 中*m*是某一资源同时的请求数, $P$ 和 $P'$ 分别表示具有能量网络和随机网络的各自特征(分别用驱动力和节点度之间的关系表示), $F_{ij}$ 是请求-服务资源的需求驱动力, $D_i$ 是请求节点自身的度,绝对值表示了能量状态网络和随机网络之间的差异程度。 $I$ 的值表示网络中所有节点在分别作为请求和服务节点时,节点间各种资源供求行为下网络与随机网络的相似程度叠加。

根据“相对能”满足的一定条件,对网络在不同信息流行为下表现的网络状态进行划分,如图2所示。由于网络中“相对能” $E_r$ 的值是一个和能量相关的量,因此 $E_r > 0$ 。 $E_r^+$ 和 $E_r^-$ 分别表示“相对能”在能量网络状态下的上界和混沌网络状态下的下界,随着 $E_r$ 值的增加,网络中混沌的现象愈发无序。介于这两种网络状态之间的转变是一个渐进过程,因此存在两种纯网络状态之间的过渡态。

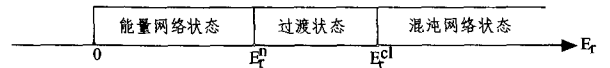


图2 不同条件下网络的状态特性

结合图2与“相对能”的定义分析得出,网络能量过程中导致混沌网络状态的两种情况:①总能量越大,意味着网络中信息资源交互的需求越强烈,随着服务行为的增加,可能会导致系统的非正常运行,从而出现混沌现象;②网络节点间交互的次数越少,则出错的可能性将会越大(交互多次以后,网络信息流行为将变成熟,从而减少错误的发生),也会导致网络的混沌现象。

在条件能量网络模型下研究信息流行为时,如果待研究的网络表现出来的状态特性和能量网络状态越相似,其网络信息交互行为便可以利用描述资源需求关系的相互引力来描述信息流行为,并决定信息是否交互以及如何交互,从而使全网范围内的信息交互得以正常运转。对该状态下的网络行为进行研究时,只需将现存的网络策略直接移植到此模型中即可(或者说此模型中的网络策略应用于所有类型的现实网络,这也是抽象条件能量网络模型的初衷)。

但若网络行为处于混沌网络状态时,就需要通过分析混沌网络中的不确定性因素,从统计学的角度判断网络中的行为主体和信息交互,从而使条件能量网络模型在两种状态下的行为规则都确定化,进而建立能量指导下的统一网络行为模型。

混沌网络状态下节点的参与和信息交互行为通过“熵”的不确定概念进行判断。通过采用概率分布函数(PDF)描述在混沌网络状态下节点间的信息流行为过程。首先,定义了每个节点上具有代表性状态的  $N$  维度量,如  $W=(W_1, W_2, \dots, W_N)$  ( $0 \leq W_k \leq 1, k=1, 2, \dots, N$ ), 那么每个节点上状态  $k$  发生的概率  $\rho_k = |W_k|^2, k=1, 2, \dots, N$ 。节点状态的局部扩展(即发生节点信息流行为, 状态越易扩展说明越有可能发生信息流行为)可以用初级参与率来量化描述:

$$Q = \frac{1}{N \sum_{k=1}^N \rho_k^2} \quad (4)$$

对于一个完全可扩展状态的节点,  $Q=1$ ; 而对于状态局限在一个节点上时,  $Q=1/N$ , 通常,  $Q \in [1/N, 1]$ 。

在局部属性的次级复杂性上, 通过结构熵的抽象来描述与节点交互分布函数 PDF 的偏离:

$$S_{gr} = - \sum_{k=1}^N \rho_k \ln \rho_k - \ln(QN) \quad (5)$$

最后通过“局部状态量对”( $Q, S_{gr}$ )来判断混沌网络状态下节点是否参与信息交互。

行为节点确定以后, 节点间的信息流过程将通过马尔科夫随机游走来获得, 信息从节点  $i$  传送到节点  $j$  的概率为:

$$p_{ij} = \frac{a_{ij} V_j}{\lambda P_i} \quad (6)$$

式中,  $\lambda$  是网络节点图  $A = \{a_{ij}\}$  邻接矩阵的最大特征值 ( $a_{ij}$  表示节点  $i$  和  $j$  之间的距离),  $P_i$  表示请求节点赋予请求资源的优先级,  $V_j$  表示被请求信息资源的可见度。

### 3 仿真验证

条件能量网络模型中信息流行为实现方式的仿真内容为各类节点(包括: 请求信息节点、信息服务节点和中央处理节点)的行为过程, 即请求节点向信息服务节点发起信息资源请求, 中央处理节点根据信息服务节点提供的资源, 负责信息分配的决策和实现。观察分析节点间引力对于资源分配的影响以及网络能量与信息流之间的关系, 验证利用条件能量网络模型来研究现实网络中的信息流行为的可行性。

#### 3.1 仿真实验

实验采用 Repast 软件对以上研究内容进行仿真, 网络节点通过 Agent 模拟。实验中网络环境是  $10 \times 10$  的网格, 其中每一列表示同一层网络, 网络中 3 类节点分别为:  $\oplus$  请求信息节点,  $\blacktriangle$  信息服务节点,  $\bullet$  中央处理节点。初始网络中各类节点的分布如图 3 所示。

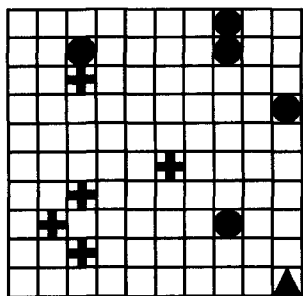


图 3 初始网络节点分布

规则: 仿真网络中, 请求信息节点根据对某种信息资源的需求, 首先从本层网络中寻找是否存在拥有此类信息资源的服务节点, 如果没有, 则从最近的网络开始向外寻找(这是基于现实网络中服务节点距离请求节点越近就越有利于信息流

行为的完成及同种信息类聚的原则)。找到服务节点以后, 请求节点将请求优先级, 服务节点将信息资源的可见度传送给中央处理节点, 由中央节点决定该次信息流行为是否发生以及如何发生。

实验随机地为服务节点分配各类信息资源, 请求节点按需对服务节点进行资源请求。经过中央处理节点决策, 网络中信息流交互一段时间(20 step)后, 网络总能量和信息流的变化如图 4、图 5 所示。

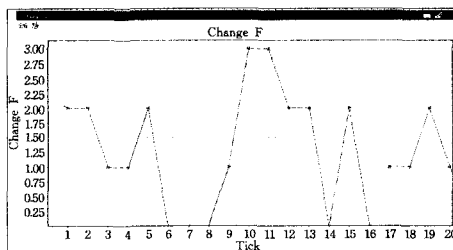


图 4 网络信息流的变化量

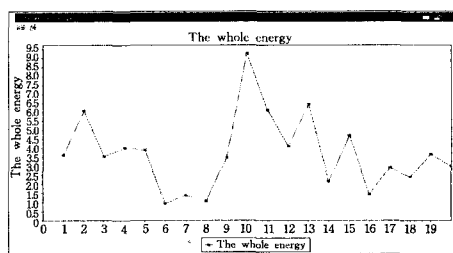


图 5 网络总能量的变化

#### 3.2 结果分析

从实验结果可以看出, 在 Tick 位于(1,2)的时间段中, 网络信息流始终以 2.00 的速度进行, 同时, 图 5 显示网络总能量由 3.6 变为 6.1; 在 Tick 位于(10,11)的时间段中, 网络信息流的速度为 3.00, 此时网络总能量达到最大值 9.3。而在 Tick 分别为 6, 7, 8, 14, 16 处, 网络总能量较小, 网络信息流行为相应地几乎不再发生。从总体上可以看出本文定义的网络能量直接影响着网络中的信息流行为, 当网络总能量较大时, 网络的信息流行为也较频繁。观察图 4 和图 5 发现, 网络信息流行为变化和 network 总能量的起伏几乎吻合, 从而说明网络节点间资源驱动力作用下形成的网络能量和信息流行为息息相关。通过对网络能量概念的改进, 将影响信息流行为相关的网络因素都考虑进去以后, 利用“相对能”来对条件能量网络状态进行划分是可取的。

**结束语** 基于网络结构规则不统一的现状, 本文将现实网络行为进行抽象, 提出了一种条件能量网络模型。该模型将网络节点间的信息流行为看作是资源的供应关系, 具有供应关系的节点间引力驱动着网络的交互行为, 这种网络处于由驱动力构成的能量团中来完成其各种信息流行为活动。基于网络能量和各种相关要素提出“相对能”的概念, 将网络行为划分为能量网络和混沌网络两种状态。该条件能量网络模型能够简单、准确地表现现实网络中的信息流行为, 对于网络策略的适用性和网络研究的一致性具有深远意义。

#### 参考文献

- [1] Rabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286: 509-512

- [5] Pickard L M, Kitchenham B A, Jones P. Combining empirical results in software engineering [J]. *Information and Software Technology*, 1998, 40(14): 811-821
- [6] Hayes W. Research synthesis in software engineering; a case for meta-analysis [C]// *Proceedings the 6th International Software Metrics Symposium*. 1999; 143-151
- [7] Succi G, Spasojevic R, Hayes J, et al. Application of statistical meta-analysis to software engineering metrics data [C]// *Proceedings of the World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics*. 2000; 709-714
- [8] Djokic S, Succi G, Pedrycz W, et al. Meta-analysis—A method of combining empirical results and its application in object-oriented software systems [C]// *Proceedings of the 7th International Conference on Object-Oriented Information Systems*. 2001
- [9] Succi G, Pedrycz W, Djokic S, et al. An empirical exploration of the distributions of the Chidamber and Kemerer object-oriented metrics suite [J]. *Empirical Software Engineering*, 2005, 10(1): 81-104
- [10] Manso M E, Cruz-Lemus J A, Genero M, et al. Empirical validation of measures for UML class diagrams; A meta-analysis study [C]// *MoDELS Workshops*. 2008; 303-313
- [11] Hannay J, Dybå T, Arisholm E, et al. The effectiveness of pair programming; A meta-analysis [J]. *Information and Software Technology*, 2009, 51(7): 1110-1122
- [12] Rafique Y, Mišić V B. The effects of test-driven development on external quality and productivity; A meta-analysis [J]. *IEEE Transactions on Software Engineering*, May 2012
- [13] Dieste O, Fernandez E, Martinez R G, et al. Comparative analysis of meta-analysis methods; when to use which [C]// *EASE*. 2011; 36-45

(上接第 85 页)

- [2] Li Qiao, Zheng Xiao. Research survey of cloud computing [J]. *Computer Science*, 2011, 38(4): 32-37
- [3] Zhang Yun-yong, Chen Qing-jin, Pan Song-bai, et al. Key security technologies on cloud computing [J]. *Telecommunications Science*, 2010, 26(9): 64-69
- [4] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks; structure and dynamics [J]. *Physics Reports*, 2006, 424(4/5): 175-308
- [5] Milo R, Shen-Orr S, Itzkovitz S. Network motifs; simple building blocks of complex networks [J]. *Science*, 2002, 298(5594): 824-827
- [6] Shandilya S G, Timme M. Inferring network topology from complex dynamics [J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(1): 1-11
- [7] Karsai M, Kivela M, Pan R K, et al. Small but slow world; how network topology and burstiness slow down spreading [J]. *Physics Review E*, 2011, 83(2): 1-4
- [8] Larremore D B, Shew W L, Restrepo J G. Predicting criticality and dynamic range in complex networks; effects of topology [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(5): 1-4
- [9] Perotti J I, Billoni O V, Tamarit F A, et al. Emergent self-organized complex network topology out of stability constraints [J]. *Physics Review Letters*, 2009, 103: 108701-108704
- [10] 吕琳媛. 复杂网络链路预测 [J]. *电子科技大学学报*, 2010, 39(5): 651-661
- [11] 王文强, 张千明. 链路预测的网络演化模型评价方法 [J]. *电子科技大学学报*, 2011, 40(2): 174-179
- [12] Jiang Wen-ke, Tan Yang-hong. Chaotic time series forecasting research based on the combination network [J]. *Computer Engineering & Science*, 2010, 32(8): 134-137
- [13] Zhu Gui-mei, Yang Hui-jie, Yin Chuan-yang, et al. Localizations on complex networks [J]. *Physical Review E*, 2008, 77(6): 1-9
- [14] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006
- [15] Zhao Kang, Kumar A, Harrison T P, et al. Analyzing the resilience of complex supply network topologies against random and targeted disruptions [J]. *IEEE Systems Journal*, 2011, 5(1): 28-39
- [16] Lin Chun-nan, Hsieh K L, Roan J, et al. The application of structural holes theory to supply chain network information flow analysis [J]. *Information Technology Journal*, 2011, 10(1): 146-151
- [17] Tsea Y K, Tana K H. Managing product quality risk in a multi-tier global supply chain [J]. *International Journal of Production Research*, 2011, 49(1): 139-158
- [18] Waters J, Ceruti M G. Modeling and simulation of information flow; a study of infodynamic quantities [C]// *Proc of the 15th International Command and Control Research and Technology Symposium (ICCRTS 2010)*. Santa Monica, CA; Space and Naval Warfare Systems Center Pacific San Diego Ca, 2010; 1-35
- [19] Waters J, Ceruti M, Patel R, et al. Information-velocity metric for the flow of information through an organization; application to decision support [C]// *Proc of the 14th International Command and Control Research and Technology Symposium (ICCRTS 2009)*. Washington, DC; Space and Naval Warfare Systems Center Pacific (SSC Pacific), 2009; 1-46
- [20] Masucci A P, Kalampokis A, Eguiluz V M, et al. Extracting directed information flow networks; an application to genetics and semantics [J]. *Physical Review E*, 2011, 83(2): 1-6
- [21] Kimble H J. The quantum Internet [J]. *Nature*, 2008, 453: 1023-1030
- [22] Ceruti M G, Rubin S H. Infodynamics; analogical analysis of states of matter and information [J]. *Information Sciences*, 2007, 177(4): 969-987
- [23] Dodson C T J. Some illustrations of information geometry in biology and physics [J]. *Handbook of Research on Computational Science and Engineering; Theory and Practice*, 2011, 2: 1-27
- [24] Kowalski A M, Martin M T, Zunino L, et al. The quantum-classical transition as an information flow [J]. *Entropy*, 2010, 12(1): 148-160
- [25] Alvim M S, Andrés M E, Palamidessi C. Probabilistic information flow [C]// *Proc of the 25th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science*. Washington, DC; IEEE Computer Society, 2010; 314-321
- [26] Papana A, Kugiumtzis D. Detection of directionality of information transfer in nonlinear dynamical systems [J]. *Topics On Chaotic Systems*, 2009; 251-264
- [27] Sinatra R, Gómez-Gardeñes J, Lambiotte R, et al. Maximal-entropy random walks in complex networks with limited information [J]. *Physical Review E*, 2011, 83(3): 1-4