

# 基于分布式网络资源的数学求解模型及应用<sup>\*</sup>)

张 军 王建华 季伟东

(哈尔滨师范大学计算机科学系 哈尔滨 150025)

**摘 要** 本文针对计算机网络资源分布式优化问题建立了多维弹性网络的物理模型和数学模型,将优化分配计算机网络资源问题转变为计算多维弹性网络空间的形变过程。该模型和方法能够刻画多维弹性网络空间中的基类节点之间的复杂的社会交互行为,并能描述基类节点随着局势的变化各自采取的动态策略和自治行为。

**关键词** 分布式网络,网络模型,动态策略

## An Allotted Solving Model of Distributed Network Resources

ZHANG Jun WANG Jian-Hua JI Wei-Dong

(Computer Science, Harbin Normal Univ, Harbin 150025)

**Abstract** In this paper, we set up a physics and math model of multi-dimensional elastic network which solves the distributed optimization for computer network resources. It converts the problem about optimizing allocation computer network resources into shape-transformed process of computing multi-dimension elastic cyberspace. The model and the method can depict complicated social mutual behavior among the basic class node in the multi-dimensional elastic cyberspace, also it can depict respective adopted dynamic strategy and autonomic behavior with the situation changes.

**Keywords** Distributed network, Network model, Dynamic strategy

## 1 引言

随着 Internet 的迅速发展,Internet 已成为开放性的巨大复杂分布式系统<sup>[1]</sup>,网络中存在多发的随机性的社会交互行为。目前已有的一些利用价格手段进行网络资源分配的方法,如基于优先级定价<sup>[2]</sup>,基于边界定价的资源分配方法<sup>[3]</sup>等,这些方法尽管在一定程度上提高了资源的利用率,但仍无法动态反映不同应用的资源需求和系统资源的使用情况。本文提出的多维弹性网络空间模型和方法,它们具有高度的并行性、交互性和动态性,可以充分体现网络基类节点间复杂的社会交互行为,能描述随局势的变化各基类节点采取的动态策略和自治行为。

## 2 多维弹性网络模型

Internet 是一个复杂的巨系统,我们可以把 Internet 看作是一个具有弹性形变的网络空间,称为多维弹性网络空间,其主要特点是具有弹性形变和自身的生长性。

我们在系统的方向上进行研究,可以把互联网上的每一个网络实体看作是一个有活性的生长基,称为实体母基。在弹性网络的条件下,每个实体母基具有高度的并行性、交互性和动态性。可以充分体现母基间复杂的社会交互行为,能描述随局势的变化各母基所采取的动态策略和自治行为,并能够反映出随着网络资源的利用的动态形式的变化,网络的市场机制的作用。实体母基从个体上看是随机的分布在网络的每一个地方,但是由于其自身的活性及其母基之间的动态作用,他们在整体上处于一种有秩序的状态。

在本文的多维弹性网络空间模型中,各实体母基间的非线性社会行为可用其间的复合特性来表达,实体母基可以在

各种力的合力作用下移动。

下面给出在多维弹性网络空间下的概念。

**定义** 把互联网上的每一个网络实体看作是一个有活性的生长基,称为实体母基,实体母基所拥有的网络资源,我们称为元类基。实体母基又可分为需求类基和供给类基。

供给类基表示网络上的某类实体,如主机服务器、路由器和宽带链路等。资源可以是网络上的主机服务器或路由器的处理能力,链路的带宽,Web 服务器上的信息,或者是网络上可用的其他资源。优化求解网络资源分配问题,就是各个供给类基之间通过竞争、协作和诱导等各种复杂的社会交换行为,力求自身利益的最大化,同时各个需求类基将根据局势不断调整其价格策略,最终得出在某种环境下的最优的资源分配。

多维弹性网络空间的物理模型:

狭义的网络空间我们可以简单地把它想象为一个球体,它具有弹性形变,逐渐膨胀。它的基本组成单位是实体母基,即需求类基和供给类基。同类基中各个基点按等间隔角度分布于圆心周围。为了分析问题的方便,我们把球体分为横向和纵向。横向分布着供给类基,纵向分布着需求类基。

根据物体运动发展变化的规律,我们作如下规定:纵向节点需求类基  $D_i$  到圆心的距离与  $D_i$  当前付出的报酬成反比。横向节点供给类基到圆心的距离与  $E_i$  在当前局势下的收益成正比。各节点处于圆周形成的巨大引力场中,沿着径向尽量向引力圈的边缘移动,这意味着各供给类基力图获取自身最大收益及各需求类基力图支付最少报酬。同类基之间存在的竞争、协作或诱导等社会交互行为,可用具有相应的扩张的系数来表示,而且不同的扩张系数可以表达竞争或协作的强度。在这个模型中,基类在圆周引力场和其他基类对它的合

<sup>\*</sup>黑龙江省教育厅科研项目资助(10541093);哈尔滨师范大学校骨干教师项目资助(KG2005-06)。张 军 副教授,主要研究方向为网络安全、计算机辅助教学。

力的作用下运动,直到供给类基节点和需求类基节点在运动中的位置都不再明显发生变化,即它们都达到一种较为稳定的平衡状态为止,从而得出网络资源优化的稳定解。

根据上述物理模型,多维弹性网络空间的数学求解模型定义如下:对于给定的供给类基 E 和需求类基 D,供给类基在多维弹性网络空间的能量函数定义为

$$J_E = \alpha_E k_E \ln \sum_{E_i \in E} \Phi(f_i, k_e) + \beta \sum_{E_i \in E} \left| \sum_{D_j \in D} a_{ij} - r_i \right|^2 + \gamma \sum_{D_j \in D} \left| \sum_{E_i \in E} a_{ij} - d_j \right|^2 + \delta_E \sum_{\substack{E_i, E_j \in E \\ i \neq j}} \Psi_{ij}(\|e_i - e_j\|) \quad (1)$$

$$\|e_i - e_j\|^2 = (\cos(i \cdot 2\pi/n) \cdot R \cdot (1 - f_i) - \cos(j \cdot 2\pi/n) \cdot R \cdot (1 - f_j))^2 + (\sin(i \cdot 2\pi/n) \cdot R \cdot (1 - f_i) - \sin(j \cdot 2\pi/n) \cdot R \cdot (1 - f_j))^2 \quad (2)$$

式中  $\alpha_E, \beta, \gamma, \delta_E$  为权值系数,参数  $k_E$  用来避免陷入能量局部极小。 $e_i$  为供给类基  $E_i$  的坐标,  $f_i$  为供给类基  $E_i$  对当前局势的评价函数值,  $\Phi(f_i, k_e) = \exp(f_i^2/2k_e^2)$ ,  $\Psi_{ij}(x)$  为供给类基  $E_i$  和  $E_j$  间能量作用函数。 $\| \cdot \|$  表示向量的某种距离度量。 $R$  是物理模型中引力圆周的半径。

供给类基对当前局势的评价函数定义为

$$f_i = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{j=1}^m (a_{ij} * p_{ij}) - \sum_{j=1}^m \text{comm}(a_{ij}) - \sum_{j=1}^m a_{ij} * c_i}, & \text{若分母} > 1 \\ 1, & \text{若分母} \leq 1 \end{cases}$$

其分母表示供给类基点  $E_i$  的总收入与总支出之差,即它的净收益。 $c_i$  为基点  $E_i$  的单位资源损耗的费用向量,  $*$  为向量之间的内积运算,  $\sum_{j=1}^m \text{comm}(a_{ij})$  表示供给类基  $E_i$  分配给各需求类基的资源向量之间存在的协调通信费用。 $f_i$  越小,则供给类基  $E_i$  的收益越大。

需求类基  $D_j$  的评价函数  $g_j$  可定义为该请求付出的报酬,即

$$g_j = \sum_{i=1}^m (a_{ij} * p_{ij})$$

把式(1)中第一项记为  $J_1$ ,第二项和第三项记为  $J_2$ ,它们涉及基点自身资源的约束条件,第四项记为  $J_3$ 。

类似地,可定义需求类基在多维弹性网络空间的能量函数为

$$J_D = \alpha_D k_D \ln \sum_{D_j \in D} \Phi(g_j, k_D) + \delta_D \sum_{\substack{D_i, D_j \in D \\ i \neq j}} \Psi_{ij}(\|e_i - e_j\|) \quad (3)$$

其中  $g_j$  为需求类基  $D_j$  对当前局势的评价函数值。 $g_j$  越小,该需求类基付出的代价越少。为了使能量函数  $J_E, J_D$  不断减小,  $a_{ij}$  的变化量  $\Delta a_{ij}$  和  $p_{ij}$  的变化量  $\Delta p_{ij}$  应分别为

$$\Delta a_{ij} = -\eta_E k_E \frac{\partial J_E}{\partial a_{ij}} = -\eta_E k_E \left[ \sum_{E_q \in E} \left| \frac{\partial J_1}{\partial f_q} \cdot \frac{\partial f_q}{\partial a_{ij}} \right| + \frac{\partial J_2}{\partial a_{ij}} + \sum_{E_q \in E} \left| \frac{\partial J_3}{\partial f_q} \cdot \frac{\partial f_q}{\partial a_{ij}} \right| \right]$$

$$= -\eta_E \sum_{E_q \in E} \left[ \alpha_E \omega_{E_q} f_q \cdot \frac{\partial f_q}{\partial a_{ij}} \right] - 2\eta_E k_E \left[ \beta \left| \sum_{D_j \in D} a_{ij} - r_i \right| \right]$$

$$+ \gamma \left| \sum_{E_j \in E} a_{ij} - d_j \right| - \eta_E k_E \delta_E \sum_{E_x \in E} \left[ \frac{\partial \sum_{\substack{E_i, E_j \in E \\ i \neq j}} \Psi_{ij}(\|e_i - e_j\|)}{\partial f_q} \cdot \frac{\partial f_q}{\partial a_{ij}} \right] \quad (4)$$

$$\Delta p_{ij} = -\eta_D k_D \frac{\partial J_D}{\partial p_{ij}} = -\eta_D \sum_{D_q \in D} \left[ \alpha_D \omega_{D_q} g_q \frac{\partial g_q}{\partial a_{ij}} \right] - \eta_D k_D \delta_D$$

$$\sum_{D_q \in D} \left[ \frac{\partial \sum_{\substack{D_i, D_j \in D \\ i \neq j}} \Psi_{ij}(\|e_i - e_j\|)}{\partial g_q} \cdot \frac{\partial g_q}{\partial p_{ij}} \right] \quad (5)$$

$$\omega_{E_q} = \frac{e^{f_q^2/2k_E^2}}{\sum_{E_q \in E} e^{f_q^2/2k_E^2}}, \quad \omega_{D_q} = \frac{e^{g_q^2/2k_D^2}}{\sum_{D_q \in D} e^{g_q^2/2k_D^2}}$$

其中正常数  $\eta_E, \eta_D$  是学习系数。

### 3 多维弹性网络空间的数学求解模型的应用

集群服务器的负载均衡、宽带网络带宽的动态分配、路由器的负载分配和路由选择等问题都是典型的计算机网络资源优化问题。下面讨论网络带宽分配优化问题实例。

在带宽网络中,广域分布的多个局部网之间需要通过具有一定带宽的半永久性的虚通道连接起来。网络两个节点之间的虚通道可能包含多条虚路径,一条虚路径由多条链路级连而成。网络中的一条链路看作一个供给类基,对应于表一中的一行。网络中的一条虚路径看作作为一个需求类基,对应于表一中的一列。某些链路之间以及虚路径之间存在着竞争、协作、诱导等交换行为。用上述算法优化问题时,弹性势能函数中的约束条件为

$$b_j = \min_i \{a_{ij}\}, \text{对于所有虚路径 } p_j, 1 \leq j \leq m;$$

$$\sum_{j=1}^m b_j \leq C_i, \text{对于所有链路 } L_i, 1 \leq i \leq n;$$

$$\sum_{j=q(1)}^{q(h)} b_j \geq B_q, \text{对于所有虚通道 } P_q;$$

其中  $B_q$  为某两个节点之间虚通道  $P_q$  的总带宽需求,  $P_q = \{p_{q(1)}, p_{q(2)}, \dots, p_{q(n)}\}$  包含  $h$  条虚路径。 $b_j$  为虚路径  $p_j$  上所分配的带宽,  $C_i$  为链路  $L_i$  的最大带宽。

以图 1 网络拓扑为例。其中链路  $L_1 \sim L_9$  的最大带宽分别为 10, 15, 30, 16, 20, 18, 20, 27, 25。需要建立以下节点之间的连接虚通道: 1-4, 1-5, 1-6, 3-4, 3-6, 所需分配的带宽分别为 25, 10, 12, 15, 8。各虚通道包含的虚路径如下:

$$P_1 = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}, P_2 = \{p_6, p_7\},$$

$$P_3 = \{p_8, p_9, p_{10}\}, P_4 = \{p_{11}, p_{12}\}, P_5 = \{p_{13}\}.$$

其中各虚路径分别由以下链路级连而成:

$$p_1 = [L_1, L_5], p_2 = [L_3, L_8], p_3 = [L_2, L_6, L_9, L_8],$$

$$p_4 = [L_2, L_7], p_5 = [L_1, L_4, L_9, L_8], p_6 = [L_1, L_4],$$

$$p_7 = [L_2, L_6], p_8 = [L_3], p_9 = [L_2, L_6, L_9],$$

$$p_{10} = [L_1, L_4, L_9], p_{11} = [L_7],$$

$$p_{12} = [L_6, L_9, L_8], p_{13} = [L_6, L_9].$$

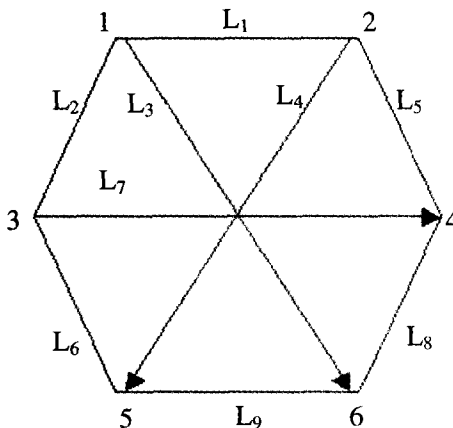


图 1 需分配带宽的网络拓扑结构(要求在 5 条虚通道 13 条虚路径和 9 条链路之间优化分配带宽)

设初始时刻不同虚路径对于单位带宽所提供的报酬相同,然后根据算法进行求解。其中关于网络中基点评价函数的权值,主要遵循最短路优先的原则,即到达目的地的虚路径中包含的链路数越少,其权值越大。而对于交互行为,主要考虑各链路之间以及各虚路径之间的相互竞争。由于在本例中链路的总带宽供大于求,随着算法叠代过程的进行,各虚路径都不同程度地降低了其所提供的报酬,表现为内部的请求节点不断向外扩张。对于大部分链路,其整体收益能基本维持不便。但是对于个别较特殊的链路,例如  $L_5$ ,因为它只能给虚路径  $p_1$  提供带宽,与其它链路竞争的结果,使得其收益的变化较明显。叠代稳定后的结果为

$$P_1 = \{0.9, 13.3, 1.1, 7.2, 2.5\}, P_2 = \{5.7, 4.3\}, \\ P_3 = \{11.2, 0.0, 0.8\}, P_4 = \{10.4, 4.6\}, P_5 = \{8.0\}.$$

**结论** 本文提出的网络模型及其算法,将优化分配计算机网络资源问题转变为计算多维弹性网络空间的形变过程。分析表明该模型和方法能够刻画多维弹性网络空间中的基类

节点之间的复杂的社会交互行为,并能描述基类节点随着局势的变化各自采取的动态策略和自治行为。

## 参 考 文 献

- 1 操龙兵,戴汝为. 集智慧之大成的信息系统--Internet [J]. 模式识别与人工智能, 2001, 14(1): 1~8
- 2 Gupta A, Stahl D, Whinston A. Priority pricing of integrated services networks, In: Mcknight W, Bailey J. eds. Internet Economics. Cambridge, MA: MIT press, 1997
- 3 Shenker S, Clark D, Estrin D, et al. Pricing in computer network; Reshaping the research agenda. Computer Communications Review, 1996, 26(2): 19~43
- 4 Shehory O, Kraus S. Methods for task allocation via agent coalition formation. Artificial Intelligence, 1998, 101(1): 165~200
- 5 帅典勋,王亮. 一种新的基于复合弹簧网络的多 Agent 系统分布式问题求解方法[J]. 计算机学报, 2002, 25(8): 853~859

(上接第 3 页)

Concepts:  
lecture, literature, writer  
Roles:  
given by, on, written by  
Tbox:  
 $\exists =$  given by. writer  $\equiv$  lecture (表示每个发言都有唯一一个发言人)  
 $\exists =$  written by. writer  $\equiv$  literature  
 $\exists =$  on. literature  $\equiv$  lecture  
 $\exists =$  on. lecture  $\equiv$  literature (对每个作品都有一个专门发言)

这种本体无法表示元素相等的语义,即无法表示“由其作者针对作品发言”。这类本体重点反映 SET 范畴中的包含映射、角色关系和角色关系所确定的函数(例如一个父亲有几个孩子,此关系确定了一个以父亲为自变量,以自然数为值域的函数)。

如果用多类代数的方法分析和描述该问题域,可表达 SET 范畴中函数和相等关系,所得本体包含三个类型、三个函数和一个相等关系,用 OBJ 语言表示为:

```
theory meeting is
  Sorts lecture literature writer.
  Operator on; lecture  $\rightarrow$  literature.
  Operator givenby; lecture  $\rightarrow$  writer.
  Operator writtenby; literature  $\rightarrow$  writer.
  Var f; lecture.
  Equation givenby (f) = writtenby (on (f)).
End theory
```

这种本体无法表示语义:“每个作品都必须由其作者作个发言”。

范畴论本体完整表述了此问题域语义,而且范畴论本体中各类概念和关系非常直观,所用的范畴论概念很少。相反,现有本体方法都不能完全表示该问题的语义,而且现有本体为了适应某类问题的需要,将 SET 范畴中的关系提取出来加以约定,这样它的表述能力虽然增强,但是也导致了更严重的局限性,即它们都更专属于 SET 范畴。

**结论** 计算机科学的内容如此丰富,而且还在不断发展,面对这样的需求,现有的本体方法必然是捉襟见肘,例如模糊集和模糊逻辑已经在计算机科学中有广泛应用,与模糊集范畴相关的语义已经无法用现有本体法表达。

略图作为一种形式化方法在文[14]已经有论述,本文针对不同范畴的重用性的角度进一步澄清了该方法在描述问题域语义方面的优势,这一点对于范畴论在计算机应用领域的推广是很重要的。范畴论的重用结构是对集合论数学中的

结构的归纳和抽象,范畴论是对集合论的发展,范畴论本体的优势正是范畴论在数学理论中的这种地位的体现。

本文论述了范畴论本体的必要性、普适性和直观性,建立了范畴论本体的表示方法。

这种本体的机器推理则是下一步研究的内容。图逻辑和传统的逻辑存在着对应关系<sup>[13]</sup>,它使得图逻辑命题证明的计算复杂性不会超出相应的传统逻辑,并且本体匹配所涉及的命题空间要小于逻辑命题空间,所以在计算性方面范畴论本体有良好的预期。

## 参 考 文 献

- 1 Bench-Capon T, Malcolm G, Shave M. Semantics for Interoperability: relating ontologies and schemata, LNCS 2376, 2003
- 2 Baader F, Horrocks I. Description logics as ontology languages for the semantic web. LNAI, Festschrift in honor of Jorg Siekmann, 2003
- 3 Barwise J. Handbook of Mathematical Logic. NORTH-HOLLAND PUBLISHING COMPANY, 1977
- 4 Diskin Z. Formalizing Graphical Schemas for Conceptual Modeling; Sketch-based Logic vs. Heuristic Pictures. <http://citeseer.ist.psu.edu>, 1995 (Symposium "knowledge Retrieval, use and Storage for Efficiency")
- 5 Barr M, Wells C. Toposes, Triples and Theories. [www.cwru.edu](http://www.cwru.edu), 2001
- 6 Hatcher W S. The Logic Foundations of Mathematics. Pergamon Press, 1982
- 7 Hillman C. A Categorical Primer. University of Washington, 2001
- 8 Goguen J. A Categorical Manifesto. Mathematical Structure in Computer Science, 1991, 1
- 9 Landry E. Category Theory; The Language of Mathematics. Philosophy of Science, 1999, 66
- 10 Novak V, Perfilieva I. Mathematical Principles of Fuzzy Logic. Kluwer Academic Publishers, 1999
- 11 Makkai M. Generalized Sketches as a Framework for Completeness Theorems. Journal of Pure and Applied Algebra, 1997
- 12 Bagchi A, Wells C. Graph-based Logic and Sketches I; The General Framework. [www.cwru.edu](http://www.cwru.edu), 1997
- 13 Visser U, Stuckenschmidt H. Ontologies for geographic information processing. Computers and Geoscience, 2000
- 14 Barr M, Wells C. Category Theory for Computing Science The electronic supplement. [www.cwru.edu](http://www.cwru.edu), 1995