

基于网络延迟的信息协作效益分析

张送保 张维明 黄金才

(国防科技大学管理科学与工程系 长沙 410073)

摘要 本文针对网络中心战环境下的信息协作问题,提出了一种基于网络延迟的信息协作效益综合测度模型。该模型以网络延迟作为研究的出发点,首先对网络中能用于信息协作的网络结点进行可用知识的分析,在此基础上进行信息协作的效益测度,进而分析信息协作所导致的网络复杂性,并给出综合考虑协作效益和协作惩罚两方面影响后的信息协作整体效益度量。最后,通过系列实验数据对该分析模型进行相应的有效性验证。

关键词 网络中心战,信息协作,协作效益,网络复杂性,协作惩罚

An Analysis of Information Cooperation Benefit Based on Network Delay

ZHANG Song-Bao ZHANG Wei-Ming HUANG Jin-Cai

(Dept. of Management Science and Engineering, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract This paper proposes a synthetically measuring model for information cooperation based on network delay, which aims at some problems of information cooperation in the network-centered warfare. The model treats network delay as the research start. It first analyzes the available knowledge of the network node which can facilitate information cooperation in the network, next measures the cooperation benefit, then considers the network complexity due to information cooperation and takes a synthetically measuring about information cooperation overall benefit after considering both the cooperation benefit and the cooperation punishing. Lastly, this paper also validates the analysis model through some experimental data.

Keywords Network-centered warfare, Information cooperation, Cooperation benefit, Network complexity, Cooperation punishing

1 引言

现代信息化战场环境是一种典型的不确定性环境,必须根据战场态势的变化,通过有效地动态调整联合作战结构,优化整合成员个体、物理资源以及信息资源甚至组织结构,快速形成一个以网络为中心的灵活的联合作战体系。在网络中心战环境下,网络结点互连的主要目的就是进行多作战单元间信息的互连、互通和互操作,从而通过有效的信息协作达成系统间的信息畅通,进而通过信息优势以及由它所转化的决策优势的获取来确保系统的整体作战效能和对抗优势^[1]。

支持网络中心战理论的一个重要论据是“梅特卡夫定律”,该定律断言:网络的威力与网络中节点数量的平方成正比。然而,在网络结构动态变化过程中,节点数量的增加将会导致网络复杂性的同时增加,这必然迫使系统增加额外的开销用于网络复杂性的处理。对此,系统管理者可能会添加一条推论:系统的复杂性将与节点数量的立方成正比^[2]。

因此,通过网络互连建立健壮、灵活的作战体系时,必须同时考虑到信息协作的效益和用于协作的网络互连的复杂性。当前,对于网络信息协作正负影响同时进行考虑的研究性工作有很多^[3~5],但是一般都缺乏相应的定量分析模型,因而对于信息协作的整体效益也就缺少更深层次的具体把握;而本文正是从定量分析着手,针对信息协作网络是否应该增加某一个特定的协作结点问题,分析引入该协作结点时的协作效益和协作惩罚,并且认为只有当新增的效益大于新增的

惩罚时,该协作结点的加入对于问题的解决才是有益的。当然,信息协作效益和网络复杂性影响的度量有很多角度,本文选取具有代表性的网络延迟变化作为研究和分析的出发点,分别建立相应的定量分析模型,然后对其进行综合分析,从正负影响两个方面来确定系统增加网络互连的整体效益。

2 系统初始性能建模

网络中心战中,网络结构一般都是基于作战任务或作战使命而进行动态调整,因此系统的性能应该由系统中为完成特定任务或使命所必需的系列关键结点所组成的关键路径的性能所描述;另一方面,由于信息协作的效益分析都基于网络延迟而展开,因此对信息协作前系统初始性能的建模关键在于对系统关键路径的初始延迟进行建模。

我们可以把信息网络中的各种网络互连归纳成如图 1 所示的三种简单网络连接结点互连形式:简单串联结点、简单并联结点、串并联混合结点。

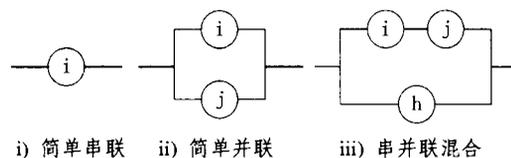


图 1 网络连接的三种连接节点

如果信息网络中单个结点 i 完成其任务所需时间为 $1/$

λ_i , 那么任务经过这三类结点所产生的延迟分别为:

$$T_i = t_i = 1/\lambda_i \quad (1)$$

$$T_{ij} = \max(t_i, t_j) = \max(1/\lambda_i, 1/\lambda_j) \quad (2)$$

$$T_{iii} = \max(t_i + t_j, t_k) = \max\left(\frac{\lambda_i + \lambda_j}{\lambda_i \lambda_j}, \frac{1}{\lambda_k}\right) \quad (3)$$

其中, t_i 表示任务经过单个结点 i 时所产生的延迟。

易知, 信息网络中为完成某个特定任务而形成的关键路径即为这三类结点的简单串连。设关键路径中所包含的这三类结点总数量为 τ , 则此关键路径上的初始延迟(相对于信息协作后的延迟而言)总和为:

$$T_c = \sum_{i=1}^{\tau} T_i + t_m \quad (4)$$

其中, t_m 为终端攻击系统移动到终端攻击区域所需的时间。

3 网络信息协作效益分析

信息网络的协作效益分析主要由效益分析和惩罚分析两部分组成。其中, 效益分析衡量协作所带来的信息畅通的效益, 而惩罚分析是对协作引起的网络复杂性负面影响的度量。另外, 知识作为信息的综合表现, 协作效益分析前必须对能用于信息协作的结点知识进行有效的分析。

3.1 信息协作的可用知识分析

定义知识为决策者对战场态势确定性或完成指定任务所需时间确定性把握的程度, 那么当前知识的拥有量就应该为所描述对象的最大不确定性和当前不确定性二者的差^[6]。如果用熵量来表示不确定性, 那么当前知识就可以表示为:

$$K = H_{\max} - H_{\text{Curr}} \quad (5)$$

其中, K 为当前知识, H_{\max} 为最大熵量, H_{Curr} 为当前熵。

如果设信息网络中单个结点 i 完成其任务所需时间为 $1/\lambda_i$, 并且设该结点 i 在时间 t 内完成其任务的概率服从如下的指数分布(指数分布常用于事件或者是完成任务所需时间的建模):

$$f_i(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t} \quad (6)$$

进而可以定义协作结点 j 的可用知识(处理信息和提供有效协作的能力)为该结点处理完其任务所需时间的概率分布 $f_j(t)$ 的函数, 设其香农熵为 $H_j(t)$, 则:

$$H_j(t) = - \int_0^{\infty} \ln(\lambda_j e^{-\lambda_j t}) \lambda_j e^{-\lambda_j t} dt$$

即:

$$H_j(t) = \ln\left(\frac{e}{\lambda_j}\right) \quad (7)$$

那么, 按照(5)式中知识的定义可知该节点所包含的知识量^[6]应该为:

$$K_j(t) = \ln\left(\frac{e}{\lambda_{j, \min}}\right) - \ln\left(\frac{e}{\lambda_j}\right) = \begin{cases} \ln\left(\frac{\lambda_j}{\lambda_{j, \min}}\right) & \text{if } \lambda_j \min \leq \lambda_j \leq e\lambda_{j, \min} \\ 0 & \text{if } \lambda_j < \lambda_{j, \min} \\ 1 & \text{if } \lambda_j > e\lambda_{j, \min} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\lambda_{j, \min}$ 表示结点 j 完成其任务所需最大时间时的 λ 取值。

3.2 网络信息协作的效益分析

信息网络中, 由于信息协作的存在, 因而可以通过充分利用其它相连结点的知识来提高本结点的信息处理速度, 即减少本节点的处理延迟。假定结点 i 位于关键路径上, 而结点 j 是与结点 i 相连的另一个网络结点, 那么结点 i 通过与结点 j

进行有效信息协作而产生的延迟缩减因子 C_{ij} 为:

$$C_{ij} = (1 - h_{ij} e_{ij} K_j(t))^{\omega_{ij}} \quad h_{ij}, e_{ij} \in [0, 1] \quad (9)$$

其中, $K_j(t)$ 表示结点 j 所拥有的知识量, e_{ij} 表示结点 j 和结点 i 的相关系数, 即结点 j 所拥有的知识对完成结点 i 的任务的有用程度, h_{ij} 表示本次协作结点 i 对结点 j 知识的利用百分率, 而 ω_{ij} 表示协作延迟, 它与网络本身结构和性能有关, 当结点 i 和结点 j 之间的网络协作延迟可忽略不计取 1, 否则取 0.5。

如果结点 i 的入度为 d_i , 那么通过充分信息协作后结点 i 的延迟变化为:

$$t_i^* = t_i^0 + \left(\frac{1}{\lambda_i} - t_i^0\right) \prod_{j=1}^{d_i} C_{ij} = t_i^0 + \left(\frac{1}{\lambda_i} - t_i^0\right) \prod_{j=1}^{d_i} (1 - h_{ij} e_{ij} K_j(t))^{\omega_{ij}} \quad (10)$$

其中, $\left(\frac{1}{\lambda_i} - t_i^0\right)$ 表示结点 i 的信息障碍延迟, t_i^0 表示结点 i 所固有的硬件和处理算法等非信息障碍延迟。显然, 对于某一特定任务, 赋予结点 i 全信息(即结点 i 处理该任务所需的全部有用信息), 此时该结点的延迟即为其非信息障碍延迟, 也就是说, 信息协作只能减少结点间的信息障碍延迟。

将(1)~(3)式中的 t_i 用 t_i^* 取代(t_j, t_k 的取代方法依次类推), 即可得到信息协作后三类结点的延迟 T_i^*, T_{ij}^* 和 T_{iii}^* 。此时, 关键路径的总延迟为:

$$T_c^* = \sum_{i=1}^{\tau} T_i^* + t_m \quad (11)$$

显然:

$$T_c - T_c^* \geq 0$$

也就是说通过信息协作使得关键路径的总延迟要比初始延迟小, 这便是信息协作的效益。系统通过网络间的信息协作, 使得完成某任务的关键路径的延迟减少, 从而提高信息处理的速度。也许协作并不会直接缩减延迟, 但是可以在等同的时间内产生与缩减延迟等价的其它行为, 这也是使用知识的一种表现。

3.3 网络信息协作的惩罚分析

网络信息协作一方面减少了信息障碍带来的延迟, 从而提高信息处理的速度; 另一方面, 随着用于协作的网络连接的数量增加, 网络复杂性也在不断增加, 这必然会使得系统要花费一定的额外时间来处理这种复杂性, 从而降低了信息处理的速度, 即信息协作在带来效益的同时, 也会造成一定的惩罚。因此, 要想充分有效地利用网络信息协作, 提高网络信息处理的质量, 必须在信息协作的效益和惩罚间进行适当的权衡^[7]。

显然, 对于某个特定任务, 信息协作所造成的网络连接复杂性是完成该任务的关键路径上各结点信息协作入度的函数, 即:

$$g(C) = f(d_1, d_2, \dots, d_\rho) \quad (12)$$

其中, ρ 表示关键路径所包含的结点数量, $C = (d_1, d_2, \dots, d_\rho)^T$ 表示影响网络连接复杂性的因素。函数形 $f(d_1, d_2, \dots, d_\rho)$ 的选择具有很大的灵活性, 此处采用其应用最为广泛的一种形式, 即取其为 d_1, d_2, \dots, d_ρ 的线性函数:

$$f(d_1, d_2, \dots, d_\rho) = \beta_0 + \beta_1 d_1 + \beta_2 d_2 + \dots + \beta_\rho d_\rho = \beta_0 + \sum_{i=1}^{\rho} \beta_i d_i \quad (13)$$

同时, 对复杂性度量值 $g(C)$ 作归一化处理:

$$\ln\left(\frac{g(C)}{1 - g(C)}\right) = \beta_0 + \sum_{i=1}^{\rho} \beta_i d_i$$

即:

$$g(C) = \frac{\exp(\beta_0 + \sum_{i=1}^{\rho} \beta_i d_i)}{1 + \exp(\beta_0 + \sum_{i=1}^{\rho} \beta_i d_i)} \quad (14)$$

显然 $g(C) \in (0, 1)$, 而系数 $\beta_i (0 \leq i \leq \rho)$ 与网络连接的具体结构和性能有关。

同理, 网络连接复杂性带来的信息处理延迟增益也是其复杂性的函数, 采用类似的 Logistic 回归分析^[8], 相关因素的函数形根据实际可能性取网络连接复杂性的幂函数, 其中参数 $\theta \in N$, 可根据网络结构和特性进行调整, 最后可得延迟增益系数 p :

$$p(g) = \frac{\exp(g^\theta)}{1 + \exp(g^\theta)} \quad (15)$$

由于 $g^\theta(C) \in (0, 1)$, 因而 $p(g) \in (1/2, e/(1+e))$, 为获得合理的增益系数取值, 将上式中的 $g^\theta(C)$ 用 $1/(1-g^\theta(C))$, 并对增益系数进行如下变换处理:

$$P(p) = \frac{1}{1-p} - e$$

即:

$$P(g) = 1 + \exp\left(\frac{1}{1-g^\theta}\right) - e \quad (16)$$

$P(g)$ 为网络中信息协作导致的最终延迟增益系数, 其取值范围为 $(0, \infty)$ 。

综合考虑信息网络协作的协作效益和协作惩罚, 可得网络系统为完成某一特定任务的关键路径的总延迟:

$$T_{c,c}^* = P(g) \sum_{i=1}^{\rho} T_i^* + t_m \quad (17)$$

4 实验验证

为了进一步说明上述信息协作效益定量分析模型的合理性, 我们进行了大量的实验数据验证。该实验中系列参数 (如: h_{ij} 、 e_{ij} 、 ω_{ij} 、 β_i 等) 的确定都来源于大量数据的反复实验, 并采用一定的样本参数估计方法进行选定^[9]; 除此之外, 只有系统关键路径的初始延迟为作为已知条件给出 (如表 1 中 t_i 行所示), 而表 1~4 中的其它数据都按照上述定量分析模型计算得出。

选择如图 2 所示简单信息网络连接作为实验数据分析的目标系统, 其中结点 1~6 所形成的序列表示为完成某一特定任务而组成的关键路径, 由于协同完成任务时信息处理所具有的特定流向, 因而该关键路径也具有特定的方向性 (图中箭头所示); 结点 T 表示系统任务终端完成区域; 网络中其它各结点可能对该任务的解决具有一定的影响, 但不是其所必需的, 因而也就不具有明显的信息流向了。

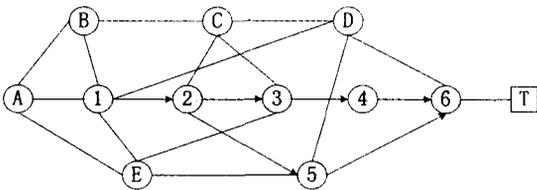


图 2 简单信息网络连接图

确定目标信息网络连接图以后, 实验分析的第一步就是进行关键路径初始总延迟的计算如表 1 所示, 其中 $\lambda_i = 1/t_i$, 主要用于各结点知识度的计算。可见, 关键路径在 t_i 所示的各结点延迟设定下的初始总延迟为 18.84。

表 1 关键路径初始总延迟计算

| | | | | | | |
|-------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| λ_i | .3571 | .3175 | .3333 | .3333 | .2427 | .2571 |
| t_i | 2.80 | 3.15 | 3.00 | 3.00 | 4.12 | 3.89 |
| T_i | 2.80 | 3.15 | 6.00 | | 3.89 | |
| t_m | 3.00 | | | | | |
| T_c | 2.80+3.15+6.00+3.89+3.00=18.84 | | | | | |

在进行信息协作效益定量分析之前, 必须先计算网络中各结点可用于信息协作的知识度的, 具体数值如表 2 所示。

表 2 信息网络中各结点的知识度计算

| | | | | | | | |
|-----|-------------|------------------|-------|-----|-------------|------------------|-------|
| j | λ_j | $\lambda_j \min$ | K_j | j | λ_j | $\lambda_j \min$ | K_j |
| 1 | .3571 | .3000 | .1742 | A | .2554 | .2440 | .0457 |
| 2 | .3175 | .3000 | .0567 | B | .3455 | .2850 | .1925 |
| 3 | .3333 | .3000 | .1053 | C | .3105 | .2500 | .2167 |
| 4 | .3333 | .3000 | .1053 | D | .4422 | .1600 | 1.000 |
| 5 | .2427 | .2121 | .1348 | E | .2550 | .2400 | .0606 |
| 6 | .2571 | .2000 | .2511 | | | | |

信息协作的效益从一定角度上讲就是提高信息处理的速度, 即减少延迟。为了简化计算, 假定网络信息协作对各协作结点知识的利用率 h_{ij} 均为 100%, 协作延迟系数 ω_{ij} 也都为 1; 对于相关系数 e_{ij} , 假定当协作结点位于关键路径上时为 0.8, 当协作结点不位于关键路径但对任务完成有重要影响时为 0.5, 否则为 0.1; 另外, 设所有结点所固有的非信息障碍延迟 t_i^0 为 1.0。信息协作后的网络总延迟计算如表 3 所示。

表 3 信息协作后的网络总延迟计算

| | | | | | | |
|---------|--|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-------------------|
| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| j | $A_{0.5} B_{0.5}$ | $I_{0.8}$ | $2_{0.8} C_{0.5}$ | $3_{0.8}$ | $2_{0.8} D_{0.1}$ | $4_{0.8} 5_{0.8}$ |
| | $D_{0.1} E_{0.1}$ | $C_{0.1}$ | $E_{0.1}$ | | $E_{0.1}$ | $D_{0.5}$ |
| c_i | .7900 | .8420 | .8460 | .9158 | .8540 | .4085 |
| t_i^0 | 2.42 | 2.81 | 2.69 | 2.83 | 3.66 | 2.18 |
| T_i^0 | 2.42+2.81+max(2.69+2.83, 3.66)+2.18+3.00=15.93 | | | | | |

表 3 中, j 表示与结点 i 所进行网络连接的一个或多个信息协作结点, 其结点上标表示该结点 j 对结点 i 任务完成的相关系数 e_{ij} , 而 c_i 表示结点 i 进行所有的信息协作后所产生的延迟缩减因子。由表可知, 进行信息协作后的网络总延迟为 15.93 (小于初始总延迟), 也就是说信息协作确实从一定程度上提高了信息处理的速度。

但是, 信息协作的同时也增加了网络复杂性。当复杂度量式中的系数 $\beta_i (0 \leq i \leq \rho)$ 均为非负数时, $g^\theta \in [0.5^\theta, 1]$, 其中 0.5^θ 表示网络中所存在的最小复杂性。实验中取 β_0 为 0, $\beta_i (0 < i \leq \rho)$ 为 0.03, 且 θ 为 10。如表 4 所示, 综合考虑协作效益和协作惩罚后, 网络的最终总延迟为 16.22, 该结果值比只考虑网络协作效益的总延迟要大, 但是仍然小于初始总延迟, 即该协作仍具有一定的总体效益。

表 4 综合考虑协作效益和惩罚的网络总延迟计算

| | | | | | | |
|---------------|---------------|---|---|---|-------------------|---|
| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 |
| d_i | 4 | 2 | 3 | 1 | 3 | 3 |
| $g(C)=0.6177$ | $P(g)=1.0223$ | | | | $T_{c,c}^*=16.22$ | |

当然, 如果协作不当或是协作过于复杂, 就很有可能使得

(下转第 189 页)

结果表明,我们的方法能够大大提高对复杂光照和带阴影人脸图像的识别性能。识别结果要远远优于原来的商图像

方法。

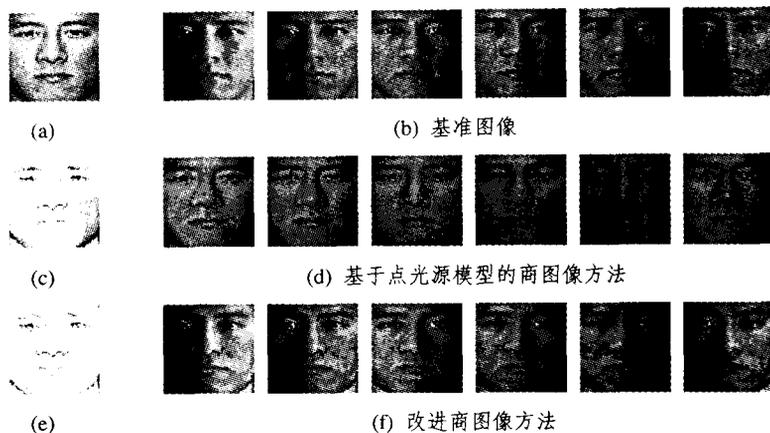


图5 光照归一化实验结果对比

表1 CMU PIE 库上的人脸识别率测试结果

| | 直接相关性方法 | 商图像方法 | 改进商图像方法 |
|-----|---------|-------|---------|
| 子集1 | 97% | 91.4% | 100% |
| 子集2 | 57% | 45.8% | 92% |

结论 在本文中,我们从理论和实验上分析了 Shashua et al. 提出的商图像方法的主要不足之处:不准确的理想类假设和过于简单的三维点光源模型。并针对性地提出了一种基于图像子空间的改进商图像方法,这种方法较好地满足了商图像的理论假设前提,从而克服了原来的商图像方法的局限。图像合成实验表明我们的方法能够合成更复杂光照情况下的人脸图像。人脸识别实验表明,我们的方法能够大大提高人脸识别系统在光线变化条件下的识别性能。

参考文献

- 1 Belhumeur P N, Kriegman D J. What is the set of Images of an Object Under All possible Lighting Conditions?. IEEE conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 1996
- 2 Georgiades A S, Belhumeur P N. Illumination cone models for recognition under variable lighting; Faces. CVPR, 1998
- 3 Georgiades A S, Belhumeur P N. From Few to many; Illumina-

- tion cone models for face recognition under variable lighting and pose. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(6): 643~660
- 4 Shashua A, Riklin-Raviv T. The quotient image; Class-based re-rendering and recognition with varying illuminations. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(2): 129~139
- 5 Ramanamorthi R, Hanrahan P. On the relationship between radiance and irradiance; determining the illumination from images of a convex Lambertian object. J. Opt. Soc. Am. , 2001, 18(10)
- 6 Basri R, Jacobs D. Lambertian Reflectance and Linear Subspaces; [NEC Research Institute Technical Report, 2000-172
- 7 Adnin Y, Moses Y, Ullman S. Face recognition; The problem of compensating for changes in illumination direction. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(7)
- 8 Hallanan P. A Low-Dimensional Representation of Human Faces for Arbitrary Lighting Conditions. IEEE Conf. On Computer Vision and Pattern Recognition, 1994. 995~999
- 9 Epstein R, Hallanan P, Yuille A L. 5 ± 2 Eigenimages Suffice: An Empirical Investigation of Low-Dimensional Lighting Models. IEEE Conf. Workshop on Physics-Based Vision, 1995. 108~116
- 10 Sim T, Baker S, Bsat M. The CMU Pose, Illumination, and Expression (PIE) Database. In: Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition, May, 2002
- 11 Turk M A, Pentland A P. Eigenfaces for recognition. Journal of Cognitive Neuroscience, 1991, 3(1): 71~86
- 12 Wang Haitao, Li Stan, Wang Yangsheng, Zhang Weiwei. illumination Analysis and Modeling of Faces. J. ICCV 2003 Workshop, IEEE International Workshop on Analysis and Modeling of Faces and Gestures, 2003. 104~111

(上接第 178 页)

协作的总体效益消失甚至产生负效益,即协作后的最终网络延迟比初始延迟还要大。值得注意的是,为了简化,本实验实际考虑的是一次性增加某些协作结点而不是每次增加某一个特定协作结点后的效益分析。

结束语 本文针对网络中心战环境下的信息协作提出了一种协作效益的综合衡量方法,其中所构建的协作效益和协作惩罚等定量分析模型及其思想不仅可用于网络中心战网络结点互连的参考,而且也可用于其它信息组织网络的类似分析。

另外,由于信息网络的性质或不同结构,因而其定量分析模型中的参数确定也将各不相同;而且为了简化分析,协作结点的可用知识分析中,协作结点时间 t 内完成所有任务的概率分布采取了统一的指数形,并且知识的定义也简单地用最大不确定和当前不确定二者的差表示;最后,本文对信息协作效益和惩罚的分析都是基于网络时间延迟的,并没有从多个衡量角度去同时考虑。这些都有待于今后研究的进一步

完善与提高。

参考文献

- 1 黄志澄. 信息优势与决策优势. 电子展望与决策, 2000(5)
- 2 史越东 编译. 网络中心战面临的技术挑战. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2001(6)
- 3 Gachet A. A Framework for Developing Distributed Cooperative Decision Support Systems-Inception Phase. Informing Science, Challenges to Informing Clients; A Transdisciplinary Approach, 2001. 6
- 4 Kettani D, Roy J. A qualitative spatial model for information fusion and situation analysis. In: Proc. 3rd Int. Conf. Information Fusion (FUSION2000)Paris, 2000. 7
- 5 James R H. The Synthetic Environment. Orion Development Group, 1997. 8
- 6 Moffat J. Complexity theory and network centric warfare. Information age transformation series. London, UK, 2003. 9
- 7 Moffat J. Command and Control in the Information Age; Representing its Impact. The Stationery Office. London, UK, 2002
- 8 范金城,梅长林,编著. 数据分析. 北京: 科学出版社, 2002
- 9 余寅. 高等工程数学(第三版). 武汉: 华中科技大学出版社, 2001