

人工鱼群高级行为的自组织算法与实现^{*})

班晓娟 彭立 王晓红 曾广平

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)

摘要 论文在人工鱼行为模型的基础上,建立面向群体行为的人工鱼体系结构与模型,提出了一种基于多 Agent 的人工鱼群自组织行为的研究方法:将基于这种体系结构人工鱼作为 Agent,其能感知环境信息,产生意图,规划行为,最后通过运动系统产生运动来完成行为和实现意图。在群体的移动过程中,如果两个个体之间的距离小于某个给定的值,则它们互相称为对方的邻居,个体倾向于与自己的“邻居”保持一致。每个个体以固定的速率运动,在给定时刻,个体的运动方向为上一时刻它的“邻居”运动方向的平均,鱼群中的个体一个时步一个时步连续完成同步这种运动。

关键词 自组织,认知,集群,捕食,逃逸

Multi-agent-based Algorithm Research on a Self-organization Behavior of Artificial Fish Colony

BAN Xiao-Juan PENG Li WANG Xiao-Hong ZENG Guang-Ping

(School of Information Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract A inter-operated behavior Module is added that can fulfill the communication among fishes and interact with environments to cognition-based behavior model of artificial fish, in order to build up architecture and model of colony behavior oriented artificial fish. A method which study the colony of artificial fish based on multi-agent system is given. Each artificial fish in colony based on that kind of architecture is modeled as an agent, which can perceive information from the virtual environment, generate appropriate intentions, manage rational behaviors, and create motion to realize the intention. In schooling motion process, if distances between two individual are smaller than the value which is assigned, they are called opposite party neighbor mutually, and the individual favors in maintains consistently with its own “neighbor”. Each individual moves by the fixed speed, at the assigned time, the individual heads for its the neighbor’s average heading at the last time, and fishes continuously complete synchronized this kind of movement step by step.

Keywords Self-organization, Cognition, Schooling, Pursuit, Evasion

1 引言

生物世界中,相对简单的鱼类个体在没有一个集中控制的情况下,通过相互作用产生复杂的群体行为,是属于复杂系统研究的范围。鉴于此,本文从复杂系统的角度以基于认知的“人工鱼”为基础来研究人工鱼群的高级行为的自组织方法并实现人工鱼群体行为的动画^[1]。

华人女学者涂晓媛博士将人工生命的方法引入到计算机动画的创作中,开拓了计算机动画的一种新途径:计算机动画的人工生命方法。利用动物形态、习性和行为模型成功地创作了“人工鱼”,用计算机动画实现了“人工动物”共有的基本特征—生物力学、运动、感知和行为,被学术界称为“Xiao-yuan’s Fish”。人工鱼由三部分组成(如图 1 所示):运动系统、感知系统和行为系统。

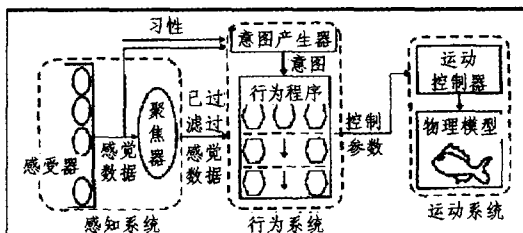


图 1 人工鱼的组成

而基于认知的“人工鱼”是将认知的观点引入计算机动画的创作上,建立人工鱼的认知模型,提高人工鱼的智能水平,

实现基于“动物逻辑”(Animal Logic)与“感知反馈”相结合的具有认知能力的高级行为规划功能^[3,4]。

动物的集群行为(Swarm behavior),最早由生物学家观测到并作了大量报导。其后,美国的 Santi Fe 研究所及许多计算机专家提出和研究了“人工生命”,用计算机仿真的方法由简单规律再现了许多群集行为。

目前群体行为模拟研究工作主要集中在对群体角色进行建模。1986 年 Craig Reynolds 提出了一个集群行为计算模型,在这个模型中,每个个体只需遵循以下 3 条规则:避免碰撞、速度一致以及向中心聚集。

但是以往这种通过简单的规则产生类似生命的群体行为并不能保证真实的生态系统的确遵循这些简单的规则。这就需要从新的角度来探讨鱼群的行为,因此本文将以涂晓媛等研究发展的人工鱼个体的自然生命模型为基础,通过复杂系统的理论来研究人工鱼的群体行为。

2 人工鱼群体高级行为的自组织模型

自组织是一种极为普遍的现象。在系统实现空间的、时间的或功能的结构过程中,如果没有外界的特定干扰,仅是依靠系统内部的相互作用来达到,则称是自组织的。在鱼群的行为中无论是运动、逃逸还是捕食都不存在外界控制,而是由鱼群个体的相互作用来实现的,因而是自组织行为。下面是我们建立的人工鱼个体的行为模型。

下面将每个人工鱼(记为 Fish)行为模型 FishBehModel 定义为一个五元组 $FishBehModel = \langle ID, Atb, Listate, AutoBehCon(), IntOptBehCon() \rangle$

^{*})基金项目:国家自然科学基金;基于认知的人工动物高级行为规划研究(No. 60503024)。班晓娟 副教授,博士,主要研究方向:人工智能,人工生命;曾广平 教授,博导;彭立 硕士。

其中:

ID 是 Afish 的标识名,用于区别鱼群中不同的个体鱼;

Atb={Sex, Age, Mass, Type} 是 Fish 的属性,包括鱼群中个体性别、寿命、质量、类别等;

Listate 是 Fish 诱发集群自组织调度行为发生的内部状态集合,包括饥饿度 $S(t)$ 、 $H(t)$ 疲劳度等。其变化函数分别为:

$$S(t) = S_{\max}^* \exp(-t^2/\delta^2), t \geq 0 \quad (1)$$

$$H(t) = \min[1 - \exp(u(1 - \rho_0 \Delta t^H)/C) + \alpha_h S^h(t), 1] \quad (2)$$

我们可以根据公式(1),(2)计算任意时间内 Fish 内部状态的取值。只有当 $S(t)$ 、 $H(t)$ 不低于某一阈值时,人工鱼才可能参加集群。

AutoBehCon()是自主行为约束,是局部约束,指与人工鱼内在状态、海底环境有关的执行规则。这里简单考虑人工鱼受以下几个约束的制约,躲避海底环境中的障碍物、个体间的排斥作用程度、个体间的吸引力大小、个体间的速度匹配等,并为每种约束设定相应权值,根据人工鱼当时的内部状态实时地调整各种约束的权值。各权值的优先关系为 $w_{avoid} > w_{repulsive} > w_{attractive} > w_{match}$ 。尽管各种约束存在着优先级关系,但任意时刻权值的大小是由人工鱼的内部状态决定的。例如当其饥饿时将觅食为首要任务,则其增加排斥 $w_{repulsive}$ 的权重,尽量靠近鱼群外围,以获取机会得到更多食物。

IntOptBehCon()是互操作行为约束,指该 Fish 与其它 Fish 或环境之间的行为消息执行规则,设消息类型为危险 (I_{danger})、障碍物 (I_{avoid})、求偶 (I_{mate}),则跟据紧迫程度消息发送和接收处理的优先级为: $I_{danger} > I_{avoid} > I_{mate}$ 。即当人工鱼同时遇到危险和障碍物的时候,先处理接收、发送优先级高的危险信息,从而调整其在群体中的运动状态。

3 基于多 Agent 系统鱼群自组织模型

复杂系统理论已经具有了相当成熟的模型与算法,针对人工鱼的特点下面采用多智能体系统建模。多智能体(Multi agent)最早源于人工智能中的 Agent,然而当把多个这样的 Agent 聚集到一起会产生什么行为则是多智能体系统的研究目标。Agent 是具有特定完整功能的、独立的、高度智能化的个体,同时具有代理、智能、自主、交互、反应、主动、学习和自生长等特性。在一个复杂系统中,系统整体往往可由许多的 Agent 按一定规则结合而成,因而基于多 Agent 的复杂系统建模方法成为一种研究复杂系统的新方法。下面将每个人工鱼个体定义为一个 FishAgent,其行为模型为 FishBehModel。借助 FishAgent 之间的局部连接准则和 FishAgent 的局部细节模型,建立鱼群复杂系统的整体模型。

3.1 鱼群形成流程

Step1 判断 FishAgen 的内部状态是否符合集群的条件,读取 Listate 的值,自主行为约束计算 AutoBehCon()如果 $S(t)$ 、 $H(t)$ 不低于阈值; $w_{attractive}$ 权重较大则符合集群的条件则进入下一步。

Step2 寻找最近的同种类的鱼并向其游去。如图 3 所示的 R-A 模型当 FishAgent i 与鱼 FishAgent j 的距离 $r_{ij} > r_m$ 时,会表现出一种吸引力,这时 FishAgent i 将加速向鱼 FishAgent j 游去;当 i 与 j 的距离 $0 < r_{ij} < r$ 时,表现为一种排斥作用,为防止它们出现碰撞冲突, FishAgent i 将与鱼 FishAgent j 保持大致相同的运动速度和方向,游动集群行为形成;当 FishAgent i 与鱼 FishAgent 的距离 $r_m \geq r_{ij} \geq r$ 时,这时处于一个相对平衡的状态, i 会与 j 进行速度匹配,避免打破这种平衡,出现潜在的冲突,保证鱼群朝着相同的方向前进。其中 $r_a > r_m > r_r$ 。

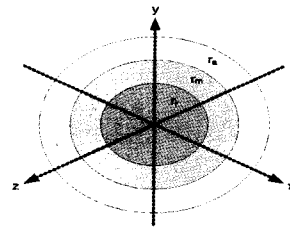


图 2 R-A 模型

Step3 按照上述步骤反复执行形成最初的人工鱼群模型。

3.2 多 Agent 鱼群运动模型设计

生物学中动物群体,如鸟群、鱼群、兽群等,都是多个体系统的典型例子。生物学家对它们飞行、游动和迁徙的机制进行了详细描述和探讨^[5]。在移动过程中,群体中的个体倾向于与自己的“邻居”保持一致。基于这种规律我们设计以下模型:

该模型由空间上的有限个人工鱼个体组成,每个个体以固定的速率运动。在给定时刻,个体的运动方向为上一时刻它的“邻居”运动方向的平均,其中如果两个个体之间的距离小于某个给定的值 r ,则它们互相称为对方的邻居。将空间上 n 个 FishAgent 标号为 FishAgent1, FishAgent2, ..., FishAgentn。个体以相同的速率运动,在 t 时刻,个体 k (黑点)的运动方向为它的全体邻居(白点) $t-1$ 时刻运动速度矢量平均的方向。这里 t 时刻个体 k 的邻居定义为:

$$N_k(t) = \{j: (x_k(t) - x_j(t))^2 + (y_k(t) - y_j(t))^2 + (z_k(t) - z_j(t))^2 < r_n^2\} \quad (3)$$

其中 $x_k(t)$, $y_k(t)$, $z_k(t)$ 为个体在三维空间上的横坐标、纵坐标和竖坐标, $r_n > 0$ 为邻域半径。记邻居个数 $n_k(t) = \# N_k(t)$ 。个体速度向量定义为 $V = |v| \{\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma\}$ 其中 $|v|$ 为运动速率, α, β, γ 为速度向量与三条坐标轴的夹角即方向角。则个体 k 运动方向的迭代规则为:

$$\alpha_k(t) = \frac{1}{n_k(t-1)} \sum_{j \in N_k(t-1)} \alpha_j(t-1) \quad (4)$$

$$\beta_k(t) = \frac{1}{n_k(t-1)} \sum_{j \in N_k(t-1)} \beta_j(t-1) \quad (5)$$

$$\gamma_k(t) = \frac{1}{n_k(t-1)} \sum_{j \in N_k(t-1)} \gamma_j(t-1) \quad (6)$$

如上(6),(7),(8)式所示, $\alpha_k(t)$, $\beta_k(t)$, $\gamma_k(t)$ 分别为 t 时刻个体 k 全体邻居 $t-1$ 时刻运动速度矢量方向的平均值。在个体运动速率为 $v_n = |v|$, 个体 k 的位置迭代规则为:

$$\begin{cases} x_k(t) = x_k(t-1) + v_n \cos \alpha_k(t-1) \\ y_k(t) = y_k(t-1) + v_n \cos \beta_k(t-1) \\ z_k(t) = z_k(t-1) + v_n \cos \gamma_k(t-1) \end{cases} \quad (7)$$

按照上述规则所有鱼群中的个体同步运动,这种运动是一个时步一个时步连续完成的。

3.3 鱼群觅食模型

鱼群的自组织研究中很重要的一部份是鱼群的觅食行为。鱼类在群体中比单独行动时能更多更快地找到食物。如果鱼群中的一个成员找到了食物,其他成员也可以捕食。当鱼群中各成员之间的距离勉强保持在各自视线之内,则搜索面积最大。在个体鱼觅食时考虑嗅觉感知,鱼的感知范围如图 3 所示。

觅食行为的输出为 θ, ω, V , 分别代表人工鱼下一个时步的水平、竖直转角和运动速度。设 d_{fg} 为人工鱼当前位置到目标的距离,当 $V_r < d_{fg} < O_r$ 时,主要靠嗅觉感知。 θ, ω, V 输出如下所示:

$$\theta = \begin{cases} -\pi/8, & \text{目标在左前方} \\ \pi/8, & \text{目标在右前方} \\ \theta_c, & \text{目标在前方} \\ -\pi/4, & \text{目标在左后方或后方} \\ \pi/4, & \text{目标在右后方} \end{cases} \quad (8)$$

$$\omega = \begin{cases} \pi/8, & \text{目标在上方} \\ -\pi/8, & \text{目标在下方} \\ \omega_c, & \text{目标在前方} \end{cases} \quad (9)$$

$$V = V_{max} \quad (10)$$

式(8),(9)中,目标即为实物, θ_c 和 ω_c 为前一个时间步的水平 and 竖直方向。左前方的定义为人工鱼速度方向的 $(-\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{6})$ 范围,右前方为 $(\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{2})$,前方为 $(-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6})$,左后方为 $(-\frac{5\pi}{6}, -\frac{\pi}{2})$,右后方为 $(\frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{6})$,后方为 $(-\pi, -\frac{5\pi}{6}) \cup (\frac{5\pi}{6}, \pi)$,如图4所示。

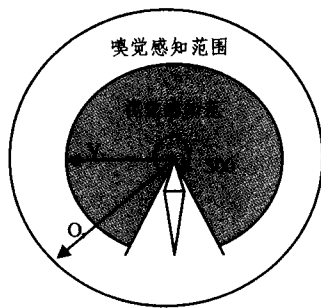


图3 人工鱼感知范围

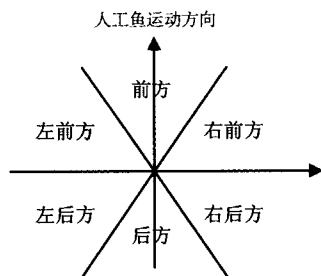


图4 人工鱼感知区域水平截面图

对于前上方,前下方,后上方,后下方和后方的划分与上图类似,上方包含前上方和后上方,下方包括了前下方和后下方,如图5所示。

当 $d_{fg} < V_r$ 时, θ, ω, V 输出为:

$$\theta = \begin{cases} \pi/4, & \theta_{fg} > \pi/4 \\ -\pi/4, & \theta_{fg} < -\pi/4 \\ \theta_{fg}, & |\theta_{fg}| < \pi/4 \end{cases} \quad (11)$$

$$\omega = \begin{cases} \pi/4, & \omega_{fg} > \pi/4 \\ -\pi/4, & \omega_{fg} < -\pi/4 \\ \omega_{fg}, & |\omega_{fg}| < \pi/4 \end{cases} \quad (12)$$

$$V = \begin{cases} V_{max}, & d_{fg} > d_0 \\ 0, & d_{fg} \leq d_0 \end{cases} \quad (13)$$

式(11)到(13)中, θ_{fg}, ω_{fg} 分别为人工鱼当前运动方向与人工鱼和目标连线的水平夹角和竖直夹角,并设人工鱼的一次的最大转动角度为45度; d_0 为一个阈值,当人工鱼与目标距离小于等于阈值时就认为人工鱼追逐目标成功。因此觅食行为完成的判定条件即为 $d_{fg} \leq d_0$ 。

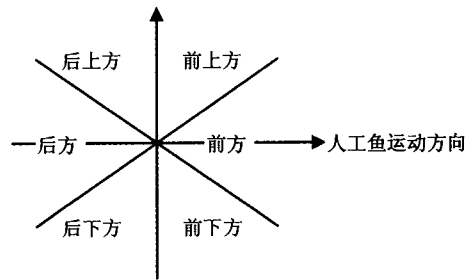


图5 人工鱼感知区域竖直截面图

3.4 群体逃逸算法

1) 生存密度导致逃逸

在自然界生物群中,当物种生存密度过小时,群体觅食搜索的速度就会降低。同样,当鱼群觅食速度小于一定阈值时,人工鱼自动分家并寻找新集落地觅食、繁衍后代。即当速度小于一定阈值时,给予速度一个变异操作——逃逸运动,描述为:

$$\text{If } (v_k(T) < v_d) \text{ then } v_k(t) = \text{rand} \times V_{max} \quad (12)$$

其中, $v_k(T)$ 为时间段T内FishAgent k的平均运动速度,rand为一个在[0,1]范围内服从均匀分布的随机变量。

$$v_k(t) \in [V_{min}, V_{max}]$$

同时它们将会忘记自身的历史最好位置而仅记住种群的最佳位置。描述为:

$$\text{If } (v_k(T) < v_d) \text{ then } P_k = p_g \quad (13)$$

其中 P_k 为FishAgent在空间中所搜索到的最佳食物位置。 P_g 为整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置。

2) 遇到敌人时的逃逸

基于多Agent系统的人工鱼群在遇到天敌时的逃逸通过个体逃逸及过程中相互作用表现群体逃逸行为。当FishAgent发现捕食者时将分析捕食者的位置、方向,自身的心理、生理作出相应逃逸选择。

逃逸行为的输出为 θ, ω, V ,分别代表人工鱼下一个时步的水平、竖直转角和运动速度, d_{fp} 为人工鱼当前位置到捕食者的距离,逃逸行为也需要考虑嗅觉感知。

当 $V_r < d_{fp} < O_r$ 时,主要为嗅觉感知, θ, ω, V 输出为:

$$\theta = \begin{cases} \pi/8, & \text{捕食者在左前方} \\ -\pi/8, & \text{捕食者在右前方} \\ \theta_c, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$\omega = \begin{cases} \pi/8, & \text{捕食者在下方} \\ -\pi/8, & \text{捕食者在上方} \\ \omega_c, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

$$V = \begin{cases} V_{max}, & \text{捕食者在后方} \\ \frac{1}{2}V_c, & \text{捕食者在前方} \end{cases} \quad (16)$$

当 $d_{fp} < V_r$ 时, θ, ω, V 输出为:

$$\theta = \begin{cases} \pi/4, & -\pi/2 < \theta_{fp} < 0 \\ -\pi/4, & \theta_{fp} < \pi/2 \\ \theta_c, & \theta_{fp} < -\pi/2 \text{ 或 } \theta_{fp} > \pi/2 \end{cases} \quad (17)$$

$$\omega = \begin{cases} \pi/4, & -\pi/2 < \omega_{fp} < 0 \\ -\pi/4, & \omega_{fp} < \pi/2 \\ \omega_c, & \omega_{fp} < -\pi/2 \text{ 或 } \omega_{fp} > \pi/2 \end{cases} \quad (18)$$

$$V = \begin{cases} V_{max}, & d_{fp} \leq v_r \\ \frac{1}{2}V_{max}, & d_{fp} > v_r \end{cases} \quad (19)$$

上式中, θ_{fp}, ω_{fp} 分别为人工鱼当前运动方向与人工鱼和捕食者连线的水平夹角和竖直夹角;逃逸行为完成的判定条

件为 $(\theta_{fp} > \pi/2$ 或 $\theta_{fp} < -\pi/2)$ 且 $(\omega_{fp} > \pi/2$ 或 $\omega_{fp} < -\pi/2)$ 且 $d_{fp} > V_r$ 。



图6 人工鱼集群行为的动画实现画面

4 实现效果

下面的画面是采用 Microsoft Visual C++ .net 作开发平台,辅助使用 3DSMax 6.0 作为建模工具,用 Direct3D9 作为渲染工具,创作出来的动画效果。



图7 鱼群逃逸动画实现画面

其中,图6被圈中的的是不满足集群条件的人工鱼。图7

被圈中的的是捕食者—鲨鱼。

结束语 本文从复杂系统的角度研究了人工鱼群的自组织行为,建立了鱼群的多 Agent 系统模型,并在此基础上建立了鱼群的觅食、逃逸模型。但是只简单地考虑到影响个体鱼集群的几个因素,事实上还有很多生理、心理、遗传等因素需要考虑,同时人工鱼群作为整体,还存在着个体间通信、合作捕食关系等。这些都将是后续需要研究的内容。随着复杂系统和基于认知的人工鱼高级行为规划研究的深入,鱼群自组织行为研究的理论基础也将不断丰富,在这些理论的指导下我们将完善鱼群系统,生动地展现海洋鱼群运动、生活。



图8 鱼群觅食动画实现画面

参考文献

- 1 Shaw E. Fish in Schools. *Natural History*, 1975,84(8):40~46
- 2 班晓娟,曾广平,涂序彦. 基于自学习的人工鱼感知系统设计与实现. *电子学报*, 2004, 32(12)
- 3 Reynolds C W. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model in Computer Graphics, 21(4) (SIGGRAPH 87 Conference Proceedings) pages 25~34. <http://www.red.com/cwr/boids.html>
- 4 Tu Xiaoyuan. *Artificial Animals for Computer Animation: Biomechanics, Locomotion, Perception, and Behavior*, dissertation for doctor degree, 1999

(上接第 186 页)

Step2:知识提供服务进行如下处理。1)根据知识提供服务提供的产品属性值和产品销售属性值,在本地知识库中搜索本地存储的知识,然后将查询结果以一定的格式反馈给用户。2)如果本地反馈的信息不能满足用户的需求,则调用知识发现与匹配服务,通过论文提出的知识俘获机制获取相关知识,并在各个局部本体中进行匹配;

Step3:根据语义映射服务提供的元数据目录、语义知识库和词汇映射表,更新各个不同的局部本体与全局本体之间的映射关系,同时更新本地的其它节点知识索引库,为今后同类知识的需求和获取提供便利;

Step4:知识表示服务将最终查询结果,以一定的格式反馈给用户。

以上过程描述了 Super-P2P 分布式知识管理模型在具体应用中的处理方式,其中一些处理细节,以及知识反馈给用户的表示形式,目前已经有篇文章对其进行研究和论述,不属于论文的研究重点,因此不进行详细的论述。

结论 为了更好地促进知识的交流和共享,论文将 P2P 技术应用于知识管理,提出一种基于 Super-P2P 结构的分布式知识管理模型,以解决集中式知识管理遇到的问题,并对模型提供的知识服务进行了研究和论述。通过应用案例分析,

Super-P2P 分布式知识管理模型促进了分散性组织间的知识交流和知识共享,为企业分布式知识管理系统的构建提供了一种行之有效的解决方案。

参考文献

- 1 段淳林,曹洲涛. 重构企业的知识管理[J]. *经济师*, 2004, 2: 157~158
- 2 沈洁,罗建利. 基于多 Agent 系统的分布式知识管理研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 1(1): 42~47
- 3 罗炜,统秉枢,田凌. 协同知识管理中利用共享本体建立产品状态模型[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 2: 191~196
- 4 李飞,高济. OKMF: 一个基于本体论的知识管理系统框架[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, 12: 1538~1543
- 5 Abdulmajid H M, Lee S P. An ontology-based knowledge model for software experience management[J]. *Journal of Knowledge Management Practice*, May 2004
- 6 Dreamtech software group. *Peer to peer application development: cracking the code*[M]. Wiley Publishing, 2001
- 7 Fiorano Software, *Whitepaper: Super-Peer Architectures for Distributed Computing*[Z]. <http://www.fiorano.com/whitepapers/superpeer.pdf>, 2001
- 8 黄道颖,黄建华,庄雷,李祖鹏. 基于主动网络的分布式 P2P 网络模型[J]. *软件学报*, 2004, 7(15): 1081~1089
- 9 Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small-world networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6): 440~442
- 10 黄屹,顾进广,陈莘萌,陈和平. 网络环境下基于本体的知识库模型研究[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2005, 51(5): 603~608