

自组织应对“突发事件”协同模型

杨 虎, 张东戈, 黄 匆, 白天松, 陶九阳

(解放军理工大学指挥自动化学学院, 江苏 南京 210007)

摘 要: 针对处置突发事件本身具有时间敏感性的特点, 运用多 Agent 建模方法, 设计了一种快速、灵活的“处置单元”自组织应对突发事件协同模型。在考虑事件会向周临动态扩散的情况下, 对“处置单元”自组织协同应对突发事件, 进行了仿真分析。通过传统的“层级式集中控制”组织机制下突发事件处置模型进行对比, 发现当突发事件初始规模较大时, 采用该自组织协同组织机制能更快地控制突发事件, 并且将事件的扩散控制在更小的范围内。

关键词: 自组织; 协同模型; 突发事件; 事件处置

中图分类号: TP 11

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.10.16

Self-organized collaborative model for emergency events

YANG Hu, ZHANG Dong-ge, HUANG Cong, BAI Tian-song, TAO Jiu-yang

(Institute of Command Automation, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: With the consideration of the time sensitive characteristics in emergency events processing, a model of self-organization for multi-disposition-units that process the emergency events quickly and flexibly is proposed based on multi-Agent modeling. Considering emergency events can spread dynamically, a simulation of multi-disposition-units that process the emergency events using the self-organization model is performed. By comparing the result with the centralization model, the self-organization model can control and eliminate the emergency events more quickly and do better in restrain the spreading of the emergency events when the original emergency events' scale is large.

Keywords: self-organization; model of collaboration; emergency event; event processing

0 引 言

突发事件的产生具有很强的偶然性, 事先难以预知, 并会随着时间的推移而快速发展蔓延。例如在火灾、骚乱等事件中, 如果处置单元对突发事件的处置不够及时和合理, 则事件可能会扩散到很大的范围, 造成不可估量的后果, 这就给突发事件处置的组织提出了很高的时效性要求。

文献[1]认为, 从组织的进化形式来看, 它分为两类: 他组织和自组织。如果一个系统靠外部指令而形成组织, 就是他组织。如果不存在外部指令, 系统按照相互默契的某种规则, 各尽其责而又协调地自动地形成有序结构, 就是自组织。在应对突发事件时, 传统的组织机制大多采用“层级式集中控制”, 即处置单元发现事件后逐级上报, 待上级决策单元决策后通过命令的方式指挥处置单元处置, 这种组织方式属于典型的他组织方式。在该机制下, 由于信息逐

级传递的时延较长, 且决策单元的决策协同工作比较复杂, 需要花费较多的时间, 因此对突发事件的响应和处置缓慢, 事件容易迅速扩散。如果处置单元间采用更灵活的自组织协同组织机制, 处置单元之间通过直接的信息沟通和相互作用, 自组织地对突发事件进行处置, 那么决策过程耗费的时间就能大大减少, 从而能够更加快速有效的对突发事件进行控制^[2-4]。

多处置单元自组织应对突发事件属于典型的多 Agent 系统 (multi-Agent system, MAS) 问题^[5]。基于多 Agent 的群体建模方法首先利用自底向上的思想建立虚拟个体 Agent, 再构造虚拟社会, 然后建立个体 Agent 之间的相互作用和局部规则, 涌现出群体行为^[6]。文献[7]表明, 复杂的个体行为和个体间的相互作用通过基于 Agent 建模方法能够涌现出群体行为, 而且, 基于 Agent 建模方法可深入研究群体行为的产生和演化机制。国内外在多 Agent 群体建模仿真研究方面, 有着较多的研究成果, 近年来比较有代表

收稿日期: 2011-12-14; 修回日期: 2012-05-15。

基金项目: 国家自然科学基金(61174198); 全军军事学研究生课题(2011JY002-163)资助课题

作者简介: 杨虎(1984-), 男, 硕士, 主要研究方向为复杂适应性系统、指控系统运筹分析和设计。E-mail: yanghu_nj@126.com

性的研究成果有:文献[8]利用多 Agent 建模方法对失火的地铁进行建模,得出高效可行的紧急预案。文献[9]利用多 Agent 建模方法和社会力方法模拟了紧急情况下虚拟个体的相互作用,并研究了不同地板、墙和障碍物对虚拟个体的影响作用。文献[10]利用多 Agent 模型开发了密集自治人群(high-density autonomous crowds, HiDAC)模型,可以模拟出正常情况下或紧急情况下不同类型的密集群体涌现出的社会行为。文献[11-12]利用多 Agent 建模方法,设计并开发了虚拟民众个体和虚拟智能环境,定义了战争危机条件群体决策规则,对虚拟社会中大规模民众群体行为进行了建模和研究。文献[13]利用多 Agent 建模技术对作战智能体的攻击行为进行了建模,分别建立了一次进攻多个作战对象、阵地作战和机动作战的作战对象选择模型,面目标杀伤武器和单目标杀伤武器选择模型。文献[14]设计了一种基于多 Agent 的多机协同空战仿真系统,分别对该系统的建模框架和仿真框架进行了构建。国内外研究成果中,还未发现有从 Agent 之间的组织角度出发,针对突发事件处置的时间敏感特点,对多 Agent 处置突发事件的协同模型进行的分析和研究。

为此,本文运用多 Agent 建模方法,设计了一种多“处置单元”自组织应对“突发事件”的协同模型,在考虑事件会动态扩散的情况下,对多处置单元应对突发事件进行了仿真分析,并与传统的层级式集中控制组织机制下突发事件处置模型进行了对比。

1 应对突发事件问题描述

在应对突发事件中,如果采用传统的层级式集中控制组织机制(其组织结构示意图如图 1 所示),在突发事件发生后,离突发事件发生地域最近的处置单元,会将事件情况向上级决策单元汇报,由上级决策单元进行统一决策和部署,处置单元按照上级决策单元的指令对事件进行处置。如果采用自组织协同机制(其组织结构示意图如图 2 所示),发现事件后,处置单元会与逻辑上的友邻单元或者是地域上的友邻单元(图 2 中,虚线内部包含的单元,表示的是此时涉及的相关相邻单元)实时地共享态势信息,友邻单元依据态势信息进行行动决策。处置单元之间通过事件态势信息的传播而相互影响和作用,最终自组织地进行协同以对事件进行处置。

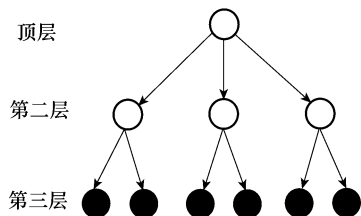


图 1 集中控制组织结构示意图

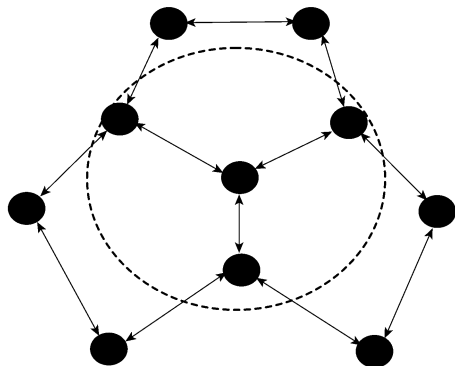


图 2 自组织结构示意图

为了深入研究应对突发事件问题,建立自组织应对突发事件模型,需对问题进行一定的简化、形式化定义。

用一个 $N \times N$ 的矩阵来表示突发事件可能产生的地域,某一地点的坐标用 (x, y) ($1 \leq x \leq N, 1 \leq y \leq N$) 来表示。 M 个处置单元随机均匀地分布在该地域中,突发事件随机地在该地域中的某一地点发生。

用 $Threat(t) = (P(t), x, y)$ 来记录突发事件信息,其中 $P(t)$ 表示 t 时刻事件的规模。在现实中,事件的规模可用火灾中着火的范围、骚乱中暴徒的人数等数量参量来衡量。 x 和 y 用来表示突发事件发生的位置,其中 $1 \leq x \leq N, 1 \leq y \leq N$ 。

假设事件会向相邻地域动态扩散,但同时,事件的扩散也会因为处置单元的处置而得到抑制,由此事件的规模会随时间发生动态变化。

用 $U_i = (x_i(t), y_i(t), Pow_i, v_i, Stat_i(t))$ 来记录第 i 个处置单元 U_i ($1 \leq i \leq M$) 在时刻 t 的状态信息。 $x_i(t), y_i(t)$ 用来记录处置单元 U_i 在 t 时刻的位置,其中 ($1 \leq x_i(t) \leq N, 1 \leq y_i(t) \leq N$)。 Pow_i 表示处置单元 i 的处置力量,反映了处置单元 U_i 处置事件的能力值,对于现实问题,该能力值可由该单元包含的人数、装备数量、训练水平等来综合衡量。 v_i 表示处置单元的机动速度。 $Stat_i(t)$ 表示处置单元 U_i 在 t 时刻的行动状态,取值为 0 表示该单元还未加入事件处置行动,取值为 1 表示该单元已加入事件处置行动,但处于向事件处置地点机动的状态,取值为 2 表示该单元已加入事件处置行动,并且已经到达事件处置地点,正在参与对事件的处置。

用 $v_{Threat}(t)$ 来表示 t 时刻突发事件扩散的速度。在事件处置过程中,正在参与事件处置的单元 ($Stat_i(t) = 2$) 都能够实时感受到事件扩散的速度。

假设 1 设某一时刻事件的扩散速度与该时刻所有正在处置事件的处置单元的处置力量总和成反比,即

$$v_{Threat}(t) = \frac{d_{P(t)}}{d_t} = k \cdot \left(1 - \frac{\sum_{j \in D(t)} Pow_j}{P(t)}\right)。$$

这是由于,在某一时刻,参与事件处置的力量越大,事件的扩散就能得到更好的抑制,那么事件的扩散速度就越慢。

其中 k 为事件扩散速率系数,且 $v_{Threat}(0)=k$ 。用 $D(t)$ 表示 t 时刻正在参与事件处置的所有处置单元集合,即 $D(t)=\{U_j | Stat_j(t)=2, 1 \leq j \leq M\}$ 。

为量化分析,设定这样的边界判断条件: $v_{Threat}(t)>0$ 表示事件还在继续扩散,尚未得到有效控制; $v_{Threat}(t)=0$ 表示事件的控制处于临界状态,即事件恰好得到控制,不再扩散;当 $v_{Threat}(t)<0$ 时表示事件已被有效控制,且事件规模逐渐减小,事件逐渐消除。

由假设 1 可知, $t+1$ 时刻事件的规模 $P(t+1)$ 为

$$P(t+1) = P(t) + P(t) \cdot v_{Threat}(t) = P(t) + P(t) \cdot k \cdot \left(1 - \frac{\sum_{i \in D(t)} P_{0w_i}}{P(t)}\right)$$

当 $P(t)=0$ 时,视为突发事件已被消除。

2 突发事件处置协同模型

根据组织机制不同,可以将多处置单元应对突发事件的协同模型分为两种进行研究,一种是自组织机制下的多处置单元应对突发事件协同模型,它适合于描述采用自组织机制时,多处置单元协同处置突发事件的过程;另一种是他组织机制下的多处置单元应对突发事件协同模型,适合于描述采用层级式集中控制机制时,多处置单元协同处置突发事件的过程。

2.1 自组织协同机制下的突发事件处置模型

当采用自组织协同机制时,突发事件发生后,最先发现突发事件的处置单元立即对事件进行处置,并向友邻单元广播事件信息,事件信息包括事件扩散速度信息和事件发生的位置信息。友邻单元收到事件信息后,也会向自己的友邻单元转发这一事件信息,接收到事件信息的处置单元,会通过收到的事件信息决定下一步的行动。需要指出的是,事件处置单元可能会同时收到多个友邻单元的事件信息,在这种情况下,处置单元会对收到的事件信息进行甄别处理。各事件处置单元通过事件信息的传递和自主决策,最终自组织协同地对突发事件进行处置。

为了描述多处置单元自组织应对突发事件协同模型,对处置单元的友邻单元进行如下定义:

定义 1 记 $Neb_{U_i}(t)$ 为事件处置单元 U_i 在 t 时刻的友邻单元集合, $Neb_{U_i}(t)=\{U_j | \sqrt{(x_j(t)-x_i(t))^2+(y_j(t)-y_i(t))^2} \leq RN, 1 \leq j \leq M, j \neq i\}$, 其中 RN 为友邻半径,当 RN 取得足够大时视为所有单元都是单元 U_i 的友邻单元。

用 $(vThrt_i(t), x, y)$ 来记录事件处置单元 U_i 在 t 时刻感知到的事件信息,同时 U_i 也会向友邻单元传递该事件信息。其中, $vThrt_i(t)$ 表示处置单元 U_i 在 t 时刻感知到的事件扩散的速度信息。当单元 U_i 正在处置事件时(即

$Stat_i(t)=2$), $vThrt_i(t)=v_{Threat}(t)$, 可以理解为正在处置事件的单元可以直观的感受到的事件扩散速度信息。否则,单元 U_i 感知到的事件扩散速度信息,来自上一时刻友邻单元的广播信息。此时 U_i 选择接收到的事件扩散速度信息中的最小值作为感知到的事件扩散速度信息,即

$$vThrt_i(t) = \min(vThrt_j(t-1)), j \in N_{U_i}(t-1)$$

式中, x 和 y 用来表示突发事件发生的位置。

用 θ_i 表示事件处置单元 U_i 在 t 时刻判断是否应该加入突发事件处置行动的阈值。在 t 时刻,如果单元 U_i 还未加入事件处置行动(即 $Stat_i(t)=0$),那么仅当该单元在 t 时刻感受到的事件扩散速度 $vThrt_i(t)>\theta_i$ 时,该单元才会加入事件处置行动。

所有事件处置单元在每一时刻都会按照感知到的事件扩散速度 $vThrt_i(t)$ 选择下一步行动,事件处置单元在每一时间步的活动规则如下:

步骤 1 在时刻 t , 单元 U_i 根据事件信息判断事件是否还在扩散。当 $vThrt_i(t)>0$ 时表示事件还在继续扩散,那么转到步骤 2。当 $vThrt_i(t)<0$ 时,表示事件已经得到有效控制,则转到步骤 4。

步骤 2 如果 $Stat_i(t)=2$, 表示单元正在对事件进行处置,那么该单元继续处置事件,向友邻单元转发事件信息,同时在 $t+1$ 时刻重新转到步骤 1; 如果 $Stat_i(t)=1$, 表示单元已加入事件处置行动,那么该单元继续向事件发生地机动,且向友邻单元转发事件信息,同时在 $t+1$ 时刻重新转到步骤 1; 如果 $Stat_i(t)=0$, 表示该单元还未加入事件处置行动,则转到步骤 3。

步骤 3 如果 $vThrt_i(t) \geq \theta_i$, 那么单元 U_i 以概率 $p = \frac{\sqrt{2}N - \sqrt{(x_i(t)-x)^2+(y_i(t)-y)^2}}{\sqrt{2}N}$ 加入事件处置行动。

如果 $vThrt_i(t) < \theta_i$, 那么单元 U_i 仅向友邻单元转发事件信息,同时在 $t+1$ 时刻重新转到步骤 1。

步骤 4 如果 $Stat_i(t)=2$, 那么该单元继续处置事件,向友邻单元转发事件信息,同时在 $t+1$ 时刻重新转到步骤 1; 如果 $Stat_i(t)=1$, 那么该单元退出事件处置行动(将 $Stat_i(t)$ 置为 0), 并停止向事件发生地域机动,且向友邻单元转发事件信息,同时在 $t+1$ 时刻重新转到步骤 1; 如果 $Stat_i(t)=0$, 那么该单元仅向友邻单元广播事件信息,同时在 $t+1$ 时刻重新转到步骤 1。

在步骤 3 中, 处置单元感知到的事件扩散速度大于自身的阈值后, 是以一定的概率加入事件处置行动, 主要是为了充分考虑现实中影响事件处置行动的随机因素, 有利于确保该机制的可靠性。

记 tb 为事件处置单元 U_i 广播一次事件信息的时延。

如果 U_i 在时刻 t 时加入事件处置, 那么 U_i 在 $t +$

$\frac{\sqrt{(x_i(t)-x)^2+(y_i(t)-y)^2}}{v_i}$ 时刻到达事件发生地域,并开始对事件进行处置。

2.2 层级式集中控制机制下的突发事件处置模型

当采用层级式集中控制组织机制时,在突发事件发生后,采用层层上报,逐级指挥的他组织方式对突发事件进行处置。当上级决策单元接收到下级传来的事件信息后,需对事件情况进行评估。经过评估,如果本级力量能够有效处置事件,该决策单元就以命令形式调动所属的事件处置单元对事件进行处置。如果本级力量不能有效处置事件,那么在调动所属单元进行处置的同时,该决策单元会向更高级决策单元进行报告,由更高级的决策单元进行统一的决策和部署。在上述过程中,事件处置单元会实时向上级决策单元汇报事件处置情况,上级决策单元则通过实时的事件处置情况不断调整决策和部署。在该组织机制下,从事件的发生到事件得到有效处置所消耗的时间,主要是事件信息传递时延、决策单元决策时间、事件处置单元部署时间,以及事件处置单元对事件的处置时间。

用 R 表示层级式集中控制组织中上级单元拥有(或者控制)的下一级单元数量,即每 R 个下级单元属于一个上级单元。那么通过上取整运算,可得到 M 个事件处置单元构成的层级式集中控制组织共分为 $h = \lceil \log_R M \rceil + 1$ 层,其中第 $1 \sim \lceil \log_R M \rceil$ 层为决策单元,第 $\lceil \log_R M \rceil + 1$ 层为 M 个处置单元,第 1 层决策单元为最高级单元,拥有对所有 M 个处置单元的指挥和控制权限。记 Ud_j 为第 j 层决策单元,其中 $1 \leq j \leq \lceil \log_R M \rceil$ 。

记 $NumUd_j$ 为第 j 层决策单元拥有的处置单元总数,那么 $NumUd_j = R^{h-j}$ 。

记 td_{Ud_j} 为决策单元 Ud_j 所属的处置单元的部署时间,即其所属的所有处置单元全部机动到事件发生地域的时间, $td_{Ud_j} = \max_{k \in Uud(j)} \frac{\sqrt{(x_k(0)-x)^2+(y_k(0)-y)^2}}{v_k}$, 式中 $Uud(j)$ 表示决策单元 Ud_j 下属的事件处置单元集合。

记 tl 为层级式集中控制组织中上下级单元之间信息传递的时延。

记处置单元 U_i 在接到命令后机动到事件发生地域并开始对事件进行处置花费的时间为 tm , $tm = \frac{\sqrt{(x_i(0)-x)^2+(y_i(0)-y)^2}}{v_i}$ 。

当突发事件发生后,最先发现突发事件的处置单元 U_i 立即向其上级决策单元 Ud_j 传递事件信息。决策单元 Ud_j 收到事件信息后,首先判断其下属的处置单元能否有效处置事件,判断方法如下:决策单元 Ud_j 首先对 $td_{Ud_j} + tl$ 时间后的事件规模进行评估,评估值记为 $Ud_j P(td_{Ud_j} + tl)$ 。如

果 $\sum_{i=1}^{NumUd_j} pow_i \geq Ud_j P(td_{Ud_j} + tl)$, 那么表示决策单元 Ud_j 认

为所属的处置单元能够有效处置事件,如果 $\sum_{i=1}^{NumUd_j} pow_i < Ud_j P(td_{Ud_j} + tl)$, 表示决策单元 Ud_j 认为所属的处置单元不能够有效处置事件。如果决策单元 Ud_j 通过判断,认为所属的处置单元能够有效处置事件,那么 Ud_j 通过命令的形式指挥所属的处置单元进行事件处置。如果决策单元 Ud_j 通过判断,认为所属的处置单元不能够有效处置事件,那么在 Ud_j 通过命令的形式指挥所属的处置单元进行事件处置的同时,向其上级决策单元报告事件信息,由其上级决策单元进行同样的一套决策流程。

在现实处理过程中,决策单元对某一时刻事件规模的估计与实际值通常会存在一定的偏差值,在考虑到存在偏差的情况下进行如下假设:

假设 2 假设在 t 时刻,决策单元 Ud_j 在决策过程中对 $td_{Ud_j} + tl$ 时间后的事件规模的估计值 $Ud_j P(td_{Ud_j} + tl)$ 服从 $N(P(t + td_{Ud_j} + tl), \sigma)$ 分布。

其中, $P(t + td_{Ud_j} + tl)$ 为 $td_{Ud_j} + tl$ 时间后,事件规模的估计值, σ 值大小取决于决策单元 Ud_j 的决策能力。

记 td_{Ud_j} 为第 j 层决策单元在应对突发事件而进行决策时所花费的时间,考虑到决策单元的决策时间会受到下属单元规模影响的原因,进行如下假设:

假设 3 假设在应对突发事件行动中决策单元进行决策所花费的时间与其下属的处置单元总数成正比,即 $td_{Ud_j} = \vartheta \cdot NumUd_j$, 其中 ϑ 为决策时间的复杂系数,决策越复杂,复杂系数越大。

3 特性仿真分析

对应对突发事件任务中采用自组织协同组织机制和传统的层级式集中控制组织机制处置突发事件进行仿真对比分析,这里使用了 Swarm 仿真平台^[15]。

对两种组织机制进行仿真对比分析,可以选取事件控制时间、事件消除时间、事件扩散范围 3 个指标来衡量组织机制的效率。其中记事件控制时间为 TC , $v_{Threat}(TC) = 0$, 记事件消除时间为 TD , $P(TD) = 0$, 记事件扩散范围 $P_{\max} = \max(p(t))$ 。

仿真选用 $N = 2\ 000$, $M = 100$, $R = 4$, $RN = 50$, 突发事件的发生地点随机产生,事件处置单元在 $t = 0$ 时刻均匀随机分布在任务地域中,自组织协同机制下事件处置单元的行动阈值 θ_i 随机均匀产生。一次仿真的对比结果如图 3 所示。

图 3 中,横轴表示时间,纵轴表示事件规模,突发事件的初始规模为 30。虚线代表传统的层级式集中控制组织机制,实线代表自组织协同式组织机制。从图 3 中可以看出,当突发事件初始规模为 30 时,采用自组织协同组织机

制和传统的层级式集中控制组织机制的事件控制时间分别为 400 和 520,事件扩散范围分别为 50 和 63,事件消除时间分别为 980 和 890。因此,采用自组织协同组织机制处置突发事件能够更早的控制突发事件,同时突发事件的扩散能够控制在更小的范围内,但是采用传统的层级式集中控制组织机制能够更早地消除突发事件。

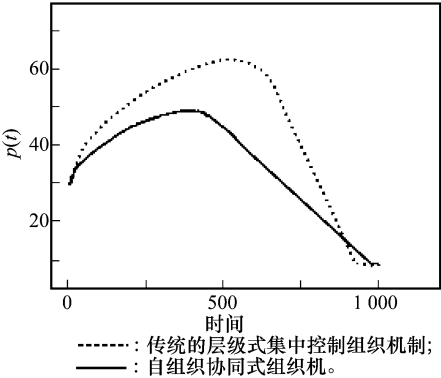


图 3 事件规模时间曲线图

为了进一步分析两种组织机制的效率,在突发事件初始规模 $P(0)=[10,210]$ 的范围内进行多次仿真,每次仿真分别记录下两种不同组织机制的事件控制时间、事件消除时间、事件扩散范围。仿真结果如图 4~ 图 6 所示。

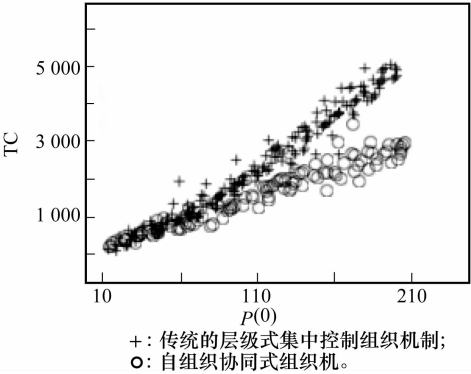


图 4 多次仿真事件控制时间统计图

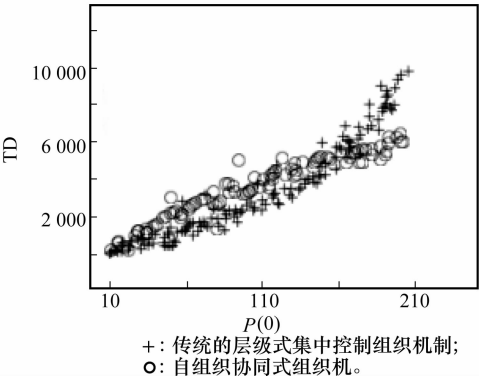


图 5 多次仿真事件消除时间统计图

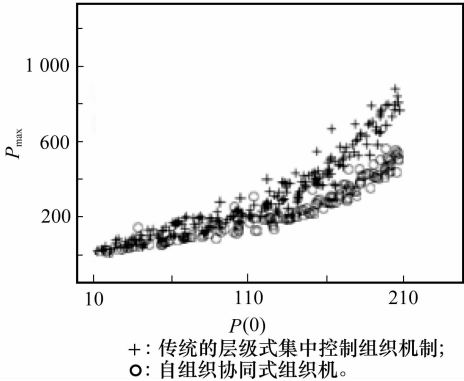


图 6 多次仿真事件扩散范围统计图

从图 4 可以看出,当初始事件规模 $P(0)<110$ 时,采用两种组织机制时的事件控制时间基本一致,但是当初始事件规模 $P(0)>110$ 时,采用自组织协同组织机制能够更快的对事件进行控制。

从图 5 可以看出,当初始事件规模 $P(0)<160$ 时,采用层级式集中控制组织机制能够更快的消除事件,但是当初始事件规模 $P(0)>160$ 时,采用自组织协同组织机制能够更快的消除事件。

从图 6 可以看出,当初始事件规模 $P(0)<110$ 时,采用两种组织机制时事件的扩散范围基本一致,但是当初始事件规模 $P(0)>110$ 时,采用自组织协同组织机制能够将事件的扩散控制在更小的范围内。

由以上仿真分析可以看出,当初始突发事件规模较小时,采用层级式集中控制组织机制能够将事件的扩散控制在更小的范围。当初始突发事件规模较大时,采用自组织协同组织机制能够更快的控制和消除事件,并且将事件的扩散控制在更小的范围内。

4 结束语

本文在模型建立过程中,对突发事件的扩散模型进行了简化,下一步研究中需要考虑更为复杂的扩散模型。同时,本文提出的自组织协同模型是建立在理想化的任务分配机制上的,在实际应用时还需要设计合理的任务分配机制。另外,为了简化研究,仅考虑了单一突发事件的情况,下一步还需要针对多突发事件的情况进行分析和研究。

参考文献:

[1] Haken H. *Advanced synergetics* [M]. New York: Springer-Verlag, 1983.
[2] Dekker H, Anthony H. Centralization vs self-synchronisation: an agent-based investigation[C]// *Proc. of the 11th International Command and Control Research and Technology Symposium*, 2006:26-28.

- [3] Camazine S, Deneubourg J L, Franks N R, et al. *Self-organization in biological systems* [M]. Princeton; Princeton University Press, 2003.
- [4] Dekker H. Analyzing C2 structures and self-synchronization with simple computational models[C]//*Proc. of the 16th International Command and Control Research and Technology Symposium*, 2011;12-14.
- [5] Michael W. *An introduction to multi-Agent systems* [M]. Chichester: Wiley, 2009.
- [6] Goldstone R L, Janssen M A. Computational models of collective behavior[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2005, 9(9):424-430.
- [7] Bonabeau E. Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2002, 99(Suppl 3):7280-7287.
- [8] Zarboutis N, Marmaras N. Searching efficient plans for emergency rescue through simulation: the case of a metro fire[J]. *Cognition, Technology and Work*, 2004, 6(2): 117-126.
- [9] Braun A, Bodmann B E J, Musse S R. Simulating virtual crowds in emergency simulations[C]//*Proc. of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 2005; 244-252.
- [10] Pelechano N, Allbeck J M, Badler N I. Controlling individual agents in highdensity crowd simulation [C] // *Proc. of the ACM/SIGGRAPH Eurographics Symposium on Computer Animation*, 2007; 99-108.
- [11] 杨志谋, 司光亚, 禹海全, 等. 虚拟社会中大规模民众群体行为建模研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(增刊 1):10-14. (Yang Z M, Si G Y, YU H Q, et al. Crowd behavior modeling on virtual war space system[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(suppl 1):10-14.)
- [12] 宋勇, 司光亚, 李志强, 等. 国家通信基础设施网络拓扑结构模型生成算法研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20(6): 106-111. (Song Y, Si G Y, Li Z Q, et al. Research on the generation algorithm of national telecommunication infrastructure network topology structure model in society simulations[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2009, 20(6):106-111.)
- [13] 迟妍, 邓宏钟, 谭跃进. 作战智能体的攻击行为模型研究[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(11):1897-1899. (Chi Y, Deng H Z, Tan Y J. Research on the attacking behavior model of combat agent [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(11):1897-1899.)
- [14] 高翔, 王宏柯, 王治军, 等. 基于多 Agent 的多机协同空战仿真系统设计和实现[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(4):807-811. (Gao X, Wang H K, Wang Z J, et al. Multi-aircraft coordination warfare simulation system based on multi-Agent[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(4):807-811.)
- [15] Kovacina M A. *Swarm algorithms; simulation and generation* [M]. Cleveland; Case Western Reserve University, 2006.