

# 基于 Petri 网的地质灾害事件空间复杂结构模拟与分析系统

邢细涛<sup>1,2</sup>, 葛咏<sup>1,3</sup>, 成秋明<sup>1,2</sup>, 左仁广<sup>1,2</sup>, 刘小龙<sup>4</sup>

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 加拿大约克大学地球空间科学与工程系, 加拿大多伦多 M3J1P3

3. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

4. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 地球系统中各种空间对象在时空及功能上的直接或间接的依赖关系是研究各种复杂问题的出发点, 模拟和分析这些对象之间的直接和间接制约关系往往是认识复杂系统和进行空间决策的基础, 如在地震、洪水、火灾等突发性事件发生过程中各种应急设施和部门的相互影响和制约往往是复杂的、不协调的关系. 由此产生的级联效应往往会造成意想不到的严重后果. 如何提高对灾害效应的认识, 预警预报灾害的级联效应是提高灾害预防和应急反应能力的重要基础. 在研究灾害事件中相关对象之间的空间复杂结构的基础上, 通过建立定量关系来表示对象之间的相互关系, 采用模糊 Petri 网技术模拟对象之间的级联效应. 以四川汶川大地震后堰塞湖的空间复杂结构为例, 动态模拟堰塞湖的潜在级联效应, 推测出易受影响的堰塞湖, 从而为有效防治地震后的次生灾害提供一种理论与技术思路. 该方法和技术同样可以用于其他地学复杂系统结构的模拟和分析.

**关键词:** Petri 网; 模糊 Petri 网; 空间复杂结构; 模拟系统.

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2009)02-0381-06

收稿日期: 2008-12-25

## Geospatial Complex Structure Simulation and Analysis System of Geological Disasters Using Petri Net

XING Xi-tao<sup>1,2</sup>, GE Yong<sup>1,3</sup>, CHENG Qiu-ming<sup>1,2</sup>, ZUO Ren-guang<sup>1,2</sup>, LIU Xiao-long<sup>4</sup>

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Department of Earth and Space Science and Engineering, York University, Toronto M3J1P3, Canada

3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074 China

**Abstract:** In the domain of earth system, temporal-spatial and functional direct or indirect interdependent relationships between geospatial objects provide the clue for the study of complex issues. The simulation and analysis of the direct and indirect dependent relationships between these geospatial objects are always the foundation to know complex systems and make geospatial decisions. For example, in some emergencies, such as earthquakes, floods, and fire disasters, the interrelated effect and dependency among particular infrastructures and departments are usually complicated and inharmonious. Then, the potential cascading effects may cause unexpected serious consequences. Therefore, how to know more about disaster effects, and forecast corresponding cascading effects becomes quite important and fundamental to increase the capability of disaster prevention and emergency response. Based on the study on geospatial complex structure among relative objects in disasters, this paper quantifies the interrelationships between these objects, and then applies fuzzy Petri net to simulate potential cascading effects between them. Finally, an example is included to illustrate geospatial complex structure of barrier lakes coming from the Wenchuan earthquake in Sichuan Province, China. The potential cascading effects among barrier lakes are dynamically simulated, and then

基金项目: 加拿大自然科学与工程研究协会资助; 加拿大公共安全与应急预防部门资助; 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助.  
作者简介: 邢细涛(1971-), 男, 博士研究生, 从事地理信息系统和软件工程研究. E-mail: xitaox@yorku.ca

the vulnerable barrier lakes can be found out, which provides one specific theory and technical method to efficiently prevent secondary disasters of earthquakes. In the same way, the proposed method and technique would be used to simulate and analyze other geoscientific complex system structures as well.

**Key words:** Petri net; fuzzy Petri net; geospatial complex structure; simulation system.

由于自然或人为灾害事件的复杂空间结构及其所涉及对象的紧密相关性,一种灾害或异常事件的发生往往会产生严重的级联效应(cascade effect),从而扩大其影响范围,造成更大的危害.中国 2008 年的 5.12 大地震造成了人民生命和经济的巨大损失.交通、电力、水利、通讯、商业、教育等所有基础设施完全瘫痪,同时各种地质次生灾害也频频发生或出现险情,如滑坡、泥石流、堰塞湖,许多大坝也出现了崩溃的危险.这种级联效应使得空间对象表现为一种复杂的结构和非线性的特征,无法使用标准的线性函数来描述与预测.对这样的复杂系统,人们通常采用计算机模拟的方法在一种特定的虚拟环境中模拟空间对象之间的相互作用,从而再现整个系统的复杂性(Levy, 1992).理解与建立各空间对象的空间复杂结构,同时模拟其级联效应已经得到了许多学者的关注,一个全新的研究领域也逐步形成.

目前,空间复杂结构的研究主要集中在两个方面:表达与模拟.在表达上,主要是采用图形的方法(Rinaldi *et al.*, 2001)和矩阵的方法(Dunn and Wigert, 2004).图形的方法较为直观,易于理解,而矩阵方法能够很好地组织空间结构数据,易于对数据进行分析与模拟(Cheng, 2007).本文根据空间对象之间的复杂关系,利用模糊 Petri 网描述其复杂结构,开发了 GeoPN (geospatial Petri net) 模拟系统.该系统可以模拟空间对象之间的级联效应,挖掘出易受影响的对象,从而为有效防治灾害与突发事件提供证据支持,并以 5.12 大地震中造成的堰塞湖为实例,展示了 GeoPN 模拟系统的运行效果.

### 1 随机 Petri 网

Petri 网的概念是 1962 年由德国科学家 Carl Adam Petri 在他的博士论文“Kommunikation mit Automaten”(用自动机通讯)中首先提出来的,主要用于研究信息系统及其相互关系的工作模型(吴哲辉, 2006),具有并行、不确定性、异步以及分布处理的描述与分析能力,成为一种描述和模拟复杂系统的有效工具(林闯, 2005).

tion)、流关系(flow relation)和标识(mark)组成(吴哲辉, 2006).但它无法处理模糊的或不确定的信息,比如“快”与“非常快”、“一定的影响”与“显著的影响”等.模糊 Petri 网综合了 Petri 网理论与模糊集理论,通常被用于解决系统中不确定的问题(Chen, 2002).目前针对模糊 Petri 网的研究主要基于 Zadeh(1965)提出的理论,许多研究表明模糊 Petri 网适于描述与分析具有逻辑特征的模糊关系(Li and Yu, 2001).由于应用背景的不同,模糊 Petri 网的定义也有许多种.例如,吴哲辉(2006)描述了一种六元组的模糊 Petri 网,Chen *et al.* (1990)、Chen (2000, 2002)提出了加权模糊 Petri 网以及基于模糊产生规则的模糊 Petri 网, Li and Rosano(2000)定义了一种适应性模糊 Petri 网.这里我们介绍一种八元组的模糊 Petri 网(Chen *et al.*, 1990):  $FPN=(P, T, D, I, O, f, \alpha, \beta)$ , 其中,  $P=(p_1, p_2, \dots, p_n)$  表示库所集,  $T=(t_1, t_2, \dots, t_m)$  为变迁集,  $D=(d_1, d_2, \dots, d_n)$  定义为命题集,与库所集相对应.三者之间满足  $P \cap T \cap D = \Phi$ .  $I$  为  $T$  的输入函数,  $O$  为  $T$  的输出函数,  $f \in [0, 1]$  定义为关系函数,对应于每一个变迁.  $\alpha: P \rightarrow [0, 1]$  为库所的关系函数或者模糊概率;  $\beta: P \rightarrow D$  为命题与库所之间的关联函数,表明库所的状态和命题的真实程度.

图 1 展示了一个简单的模糊 Petri 网,其中  $P=(p_i, p_j)$ ,  $T=(t_i)$ ,  $D=(d_i, d_j)$ ,  $f(t_i)=u_i$ ,  $I(t_i)=P_i$ ,  $O(t_i)=P_j$ ,  $\beta(P_i)=d_i$ ,  $\beta(P_j)=d_j$ .从图 1,我们可以得到一个基本的模糊生成规则:如果  $d_i$ , 则  $d_j$  ( $CF=u_i$ ), 其中  $CF$  也称为一个特定因子,表征以上规则的可信度.

为了更好地理解模糊 Petri 网的运行规则,如图 2 所示,我们设置一个事件阈值  $\lambda$ .当库所的模糊概率( $\alpha$ )大于或等于  $\lambda$ ,该库所具有对其他库所产生

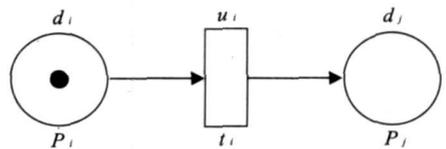


图 1 模糊 Petri 网示意图

Fig. 1 Sketch map of a fuzzy Petri net

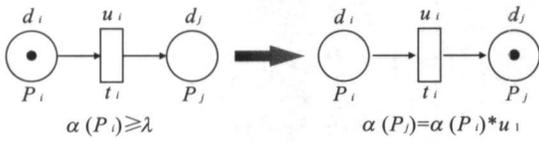


图 2 模糊 Petri 网的运行规则

Fig. 2 Workflow of fuzzy Petri net

影响的能力, 即:

如果  $\alpha(P_i) \geq \lambda$ , 那么  $\alpha(P_j) = \alpha(P_i) * u_i$ .

$\alpha(P_j)$  表明  $d_j$  的可能性.

## 2 地理空间 Petri 网

从高层体系结构上讲, 空间域由一定数量的空间对象组成. 我们可以将空间对象抽象为一系列的点 (node), 对象之间存在的相互关系或作用表征为一序列的边 (edge) (Dudenhoeffer *et al.*, 2006). 在模糊 Petri 网中, 这些点对应于库所, 边表现为流向, 作用规则定义为变迁. 在 GeoPN 中, 每条边被赋予一个模糊数值, 处于 0 与 1 之间, 代表两个相关空间对象的关系强度. 根据空间对象之间作用规则的不同, 空间结构被划分为单一结构 (定义 1) 与复合结构 (定义 2). GeoPN 中的空间复杂结构可以用这两种基本结构来描述.

定义 1:  $t$  为单一结构, 如果  $x$  是  $t$  的前集,  $y$  是  $t$  的后集, 则  $x$  决定  $y$  的状态. 数学表达为:

$$x \Rightarrow y, x \in {}^*t \text{ and } y \in t^*$$

在图 3 中,  $S = (x, y)$ ,  $T = (t_1)$ , 关系强度  $R = (u_1)$ ,  $u_1 \in [0, 1)$ .  $\beta(\cdot)$  表示空间对象的状态 (0 或者 1),  $u_1 \in [0, 1)$  为  $x$  对  $y$  的影响因子或关系强度. 如果  $\alpha(\cdot) \geq \alpha_{\text{threshold}}$ , 则  $\beta(\cdot) = 1$ ;  $\alpha(\cdot) \in (0, 1]$  为空间对象的发生概率. 对于单一结构而言,  $\alpha(y) = \alpha(x) * u_1$ .

定义 2:  $t$  为复合结构, 如果  $x_i (i = 1, \dots, n)$  是  $t$  的前集,  $y$  是  $t$  的后集,  $(x_1 \cup x_2 \dots x_n)$  决定  $y$  的状态. 数学表达为:

$$(x_1 \cup x_2 \dots x_n) \Rightarrow y, (x_1 \cup x_2 \dots x_n) \in {}^*t \text{ and}$$

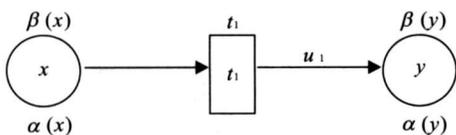


图 3 单一结构示意图

Fig. 3 Sketch map of single structure

$$y \in t^*.$$

图 4 中,  $S = (x_1, x_2, x_3, y)$ ,  $T = (t_1)$ , 关系强度  $R = (u_1, u_2, u_3)$ ,  $u_i \in [0, 1)$ . 对于复合结构而言, 变迁中定义的前集对象必须均被激发 ( $\beta(x_1) = \beta(x_2) = \beta(x_3) = 1$ ),  $t_1$  变迁才会发生.

$$\alpha(y) = \min(\alpha(x_1) * u_1, \alpha(x_2) * u_2, \alpha(x_3) * u_3),$$

当  $\alpha(y) \geq \alpha_{\text{threshold}}$ , 则  $\beta(y) = 1$ .

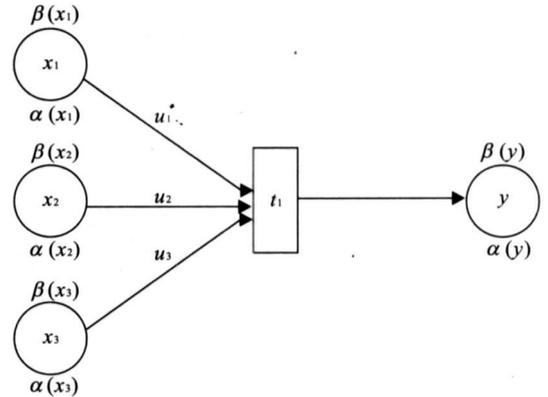


图 4 复合结构示意图

Fig. 4 Sketch map of complex structure

在 GeoPN 中, 不同的空间对象往往具有不同的特性, 这使得作用规则与关系强度的定义有时变得比较复杂, 需要对大量的地理空间信息、人文信息等进行分析. 在地质灾害领域, 需要对灾害体的特性进行分析, 如在下面介绍的实例中, 堰塞湖就具有单一流向的特性. 这种单一流向使得堰塞湖之间的作用是单向的.

## 3 GeoPN 模拟系统

为了研究空间对象中的级联效应, 挖掘出易受影响的实体对象, 我们开发了 GeoPN 模拟系统. GeoPN 模拟系统主要由空间数据可视化与预处理子系统以及 GeoPN 模拟器组成, 见图 5.

空间数据可视化与预处理子系统又称为 GIS 子系统, 能够对空间数据进行管理、显示和处理. 它包含多个功能模块, 其中空间数据管理、空间关系定义与空间作用规则完成数据预处理, 构建空间对象的复杂结构, 为 GeoPN 模拟器提供空间结构矩阵. GeoPN 模拟器由多个动态库组成, 完成对空间对象中级联效应的模拟. 其输出的结果返回到空间数据可视化与预处理子系统, 由模拟结果分析模块对模拟结果进行分析, 找出易受影响的对象, 最后空间对

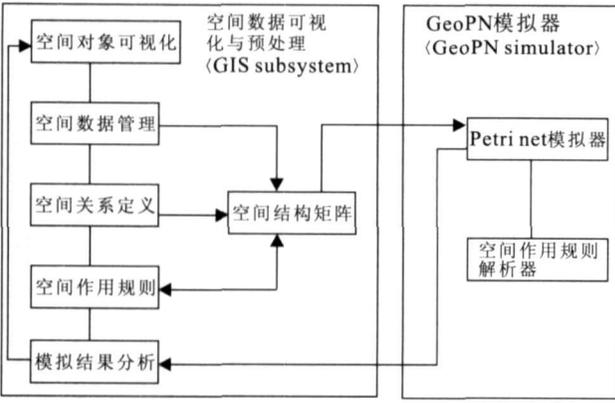


图 5 GeoPN 模拟系统结构

Fig. 5 GeoPN simulation system framework

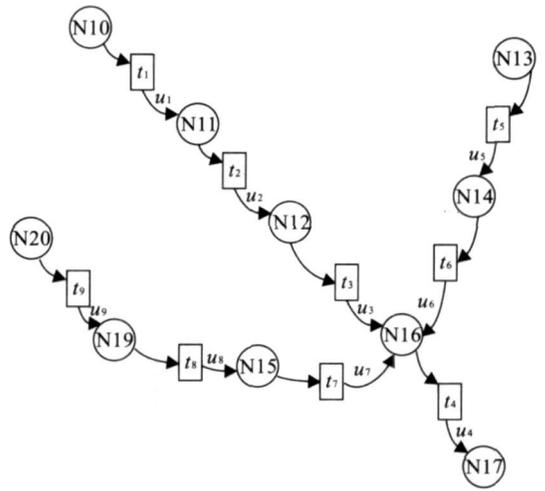


图 7 堰塞湖的 GeoPN 结构

Fig. 7 GeoPN structure of barrier lakes

象可视化模块展示这些对象的空间分布.

### 4 实例分析

2008 年 5 月 12 日四川汶川特大地震, 使山体岩石崩塌下来堵截河谷或河床后贮水而形成了上百个不同大小的堰塞湖泊. 堰塞湖的堵塞物不是永远不变的, 会受冲刷、侵蚀、溶解而发生崩塌. 随着堰塞湖水位的不断上升, 一旦堵塞物被破坏, 湖水便漫溢而出, 倾泻而下, 对下游形成洪峰, 极其危险. 堰塞湖一般与原有的水系有一定的关系. 图 6 展示了一些有关联的堰塞湖的空间分布, 图中白色的曲线表示原有的水系, 三角形符号为堰塞湖的位置, 与三角形对应的多边形为堰塞湖的实际形状. 各个堰塞湖用简易标号与其海拔高度来标识. 图 6 中, 背景为 DEM 模型, 海拔高度随着颜色的渐浅而增大. 从各

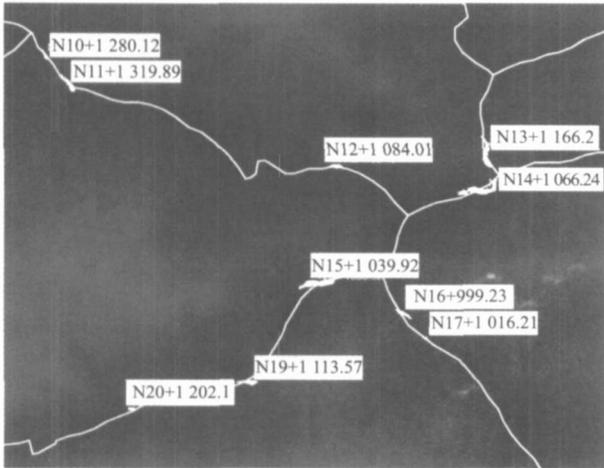


图 6 DEM 中堰塞湖的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution map of barrier lakes with DEM

个堰塞湖的海拔高度以及原有的水系可以看出, 一旦上游堰塞湖发生崩塌, 可能对下游的堰塞湖产生一系列的连锁反应. 利用 GeoPN 模拟系统, 可以分析出在一定条件下, 各个相关堰塞湖的风险程度. 在这里, 我们假设各个堰塞湖当前发生崩塌的可能性均为 50%, 极限深度相同.

#### 4.1 GeoPN 结构

根据图 6 中堰塞湖的空间分布, 图 7 展示了堰塞湖的 GeoPN 结构, 圆形表示堰塞湖, 标识为  $N_i$ ; 矩形表示变迁规则, 标识为  $t_i$ ; 带箭头的曲线表示影响的方向;  $u_i$  为堰塞湖之间的关系强度. 从图中可以看出, 由于水具有单一流向的特性, 因此本文中堰塞湖的影响方向具有单一性. 例如, N10 直接影响 N11, 而 N11 对 N10 没有影响. 但是由于级联效应, N10 的影响可能会传递到 N12、N16、N17.

#### 4.2 关系强度的计算

关系强度用于量化两个空间对象之间的关系. 空间对象不同, 关系强度的计算也可能不同. 在本实例中, 我们需要考虑堰塞湖的空间位置、流向、最大容量以及目前的风险程度. 利用公式 (1)、(2)、(3), 可以计算出堰塞湖的关系强度, 如表 1. 公式 (1) 中,  $S_A$ 、 $S_B$  表示堰塞湖的面积;  $H_A^C$ 、 $H_B^C$  表示堰塞湖的极限深度. 公式 (3) 中,  $P_B^-$  表示堰塞湖当前发生崩塌的可能性.

$$\text{容量比例} (r) = \frac{S_A \times H_A^C}{S_B \times H_B^C}, \tag{1}$$

$$\text{影响系数} (w) = \begin{cases} 1, & \text{if } r > 1 \\ r, & \text{if } r \leq 1 \end{cases}, \tag{2}$$

表 1 关系强度矩阵

Table 1 Matrix of relationship strength

堰塞湖	N10	N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N19	N20
N10	1	0.165	0	0	0	0	0	0	0	0
N11	0	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0
N12	0	0	1	0	0	0	0.440	0	0	0
N13	0	0	0	1	0.277	0	0	0	0	0
N14	0	0	0	0	1	0	0.5	0	0	0
N15	0	0	0	0	0	1	0.5	0	0	0
N16	0	0	0	0	0	0	1	0.5	0	0
N17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
N19	0	0	0	0	0	0.154	0	0	1	0
N20	0	0	0	0	0	0	0	0	0.144	1

表 2 堰塞湖的风险值

Table 2 Risk values of barrier lakes

堰塞湖	N10	N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N19	N20
风险值	0.5	0.582	0.791	0.5	0.638	0.588	0.794	0.897	0.572	0.5

$$\text{关系强度}(u) = (1 - P_B) \times w. \quad (3)$$

### 4.3 系统模拟与结果分析

在系统模拟中,我们将变迁规则定义为简单的影响关系,即:堰塞湖 A 可以影响堰塞湖 B. 例如:  $t_1$  定义为 N10 可以影响 N11. 依此类推,来定义其他的变迁规则. 当然,实际的变迁规则需要有准确的数据作为基础,如变迁规则可以是“当 A 溢出的水量达到多少时,会导致 B 溢出,甚至崩塌”,或者“A 的风险程度超过一定阈值时可以对 B 造成影响”,等. 本实例主要展示如何利用 GeoPN 模拟系统挖掘出易受较大影响的堰塞湖,在一定程度上,可以通过堰塞湖的风险程度反映出来. 在运行 GeoPN 模拟系统之后,我们得到表 2 的堰塞湖的风险值.

从表 2 中,我们可以看出 N12、N16、N17 的风险值比较高. 结合本实例中堰塞湖的空间分布与最大储水容量, N12 之所以风险值比较高,是因为上游 N11 的最大储水容量远大于 N12 的最大储水容量,也就是 N12 可能会受到 N11 的显著影响. N16 受到 N12、N14、N15 的综合影响,根据 GeoPN 的计算方法,以最小风险值作为参考,更能反映出其风险程度. N16 的最大储水容量远大于 N17 的最大储水容量,也更进一步加大了 N17 的风险值. 从分析来看,模拟结果在一定程度上反映出了各个堰塞湖的风险程度.

## 5 结论

由于自然或人为灾害事件的复杂空间结构及其所涉及对象的紧密相关性,一种灾害或异常事件的发生往往会产生严重的级联效应,造成更大的危害. 本文在模糊 Petri 网的基础上,提出了地理空间 Petri 网的概念,并根据空间对象之间的复杂关系,建立了相应的空间复杂结构,最后开发了 GeoPN 模拟系统来模拟空间对象之间的级联效应. 在地理空间 Petri 网中,关系强度的计算与变迁规则的定义往往取决于研究的目的、空间对象的性质、以及用户掌握的信息量. 虽然本文使用的堰塞湖实例假设了部分变量,但是通过系统所展示的模拟结果以及对模拟结果的分析,使该模拟系统在一定程度上反映出了易受影响的堰塞湖,有望对堰塞湖的治理决策提供一定的支持,同时也为灾害与应急处理提供一种理论与技术思路. 在后期获得堰塞湖足够信息的情况下,利用本系统可以得到更准确的预测信息,也能对更多的堰塞湖进行分析.

致谢: 本文相关研究工作受加拿大自然科学与工程研究协会(The Natural Science and Engineering Research Council of Canada)以及加拿大公共安全与应急预防部门(The Public Safety and Emergency Preparedness Canada)的联合资助. 同时也感谢中国科学院地质与地球物理研究所的祁生文博士提供的堰塞湖数据.

## References

- Chen, S. M., 2000. Fuzzy backward reasoning using fuzzy Petri nets. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 30(6): 846–856.
- Chen, S. M., 2002. Weighted fuzzy reasoning using weighted fuzzy Petri nets. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 14(2): 386–397.
- Chen, S. M., Ke, J. S., Chang, J. F., 1990. Knowledge representation using fuzzy Petri nets. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2(3): 311–319.
- Cheng, Q. M., 2007. A fuzzy relation analysis method implemented in GIS for modeling infrastructure interdependency. In: *Lecture notes in geoinformation and cartography*. Heidelberg, Springer, Berlin.
- Dudenhofer, D. D., Permann, M. R., Manic, M., 2006. CIMS: A framework for infrastructure interdependency modeling and analysis. *IEEE Winter Simulation Conference*. USA, IEEE, 478–485.
- Dunn, M., Wigert, I., 2004. *International CIIP handbook 2004: An inventory and analysis of protection policies in fourteen countries*. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 243.
- Levy, S., 1992. *Artificial life—A report from the frontier where computers meet biology*. Vintage, New York.
- Li, X., Rosano, F. L., 2000. Adaptive fuzzy Petri nets for dynamic knowledge representation and inference. *Expert Systems with Applications*, 19(3): 235–241.
- Li, X., Yu, W., 2001. Object oriented fuzzy Petri net for complex knowledge system modeling. *Proceeding of the IEEE international conference on control applications*. September 5–7, 2001. Mexico City, Mexico.
- Lin, C., 2005. Stochastic Petri nets and system performance evaluation. *Tsinghua University Press*, Beijing, 1–2 (in Chinese).
- Murata, T., 1989. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proc. IEEE*, 77(44): 541–580.
- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., Kelly, T. K., 2001. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*, 12(6): 11–25.
- Schneis, T. D., Collins, L., 2000. *Disaster management and preparedness*. Lewis Publishers, Washington, D. C., USA.
- Wu, Z. H., 2006. *Petri nets guide*. China Machine Industry Press, Beijing, 1–2, 264–265 (in Chinese).
- Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3): 338–353.
- Zurawski, R., Zhou, M. C., 1994. Petri nets and industrial applications: A tutorial. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 41(6): 567–583.

## 附中文参考文献

- 林闯, 2005. 随机 Petri 网和系统性能评价. 北京: 清华大学出版社, 1–2.
- 吴哲辉, 2006. Petri 网导论. 北京: 机械工业出版社, 1–2, 264–265.