

放射性污染物多智能体系统免疫克隆选择优化

戴剑勇, 邹树梁^①, 汪 敏^②

(核设施应急安全技术装备湖南省重点实验室, 湖南 衡阳, 421001)

[摘 要] 根据放射性污染物迁移动力学机制及其相应的控制措施,应用多智能体技术构建放射性污染物控制系统多智能体系统结构与协商机制,应用免疫克隆选择优化算法实现其系统全局最优控制。并以铀矿山放射性污染物控制系统为例,探讨了铀矿开采系统、尾矿覆盖系统、废水治理系统及废物处理技术等多智能体分布式自治与系统协商机制,为实现铀矿山放射性污染物最优控制提供了理论基础与实现平台。

[关键词] 多智能体系统; 放射性污染物; 免疫克隆选择优化; 放射性污染治理

[中图分类号] X591;TL75 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-0755(2016)03-0010-05

放射性污染物扩散迁移及其防治系统涉及核系统领域较多,如铀矿的开采和冶炼、核燃料的制备、储存和使用、核废物的回收处理等多个环节,每一个环节都会排放种类、数量不同的放射性污染物,对环境造成程度不同的污染。随着多孔介质污染物迁移机制理论不断完善和发展,人们开始从放射性核素在大气以及多孔介质中的迁移规律、数值模拟、多场耦合以及污染修复等方面对放射性污染场地进行了相关的研究工作。如铀矿山开采系统中的通风降氡是铀矿通风防护的主要内容,降低铀矿井下工作地点的氡及子体浓度,在通风降氡的过程中必须有效地处理风量、风压和风流方向这三者与降氡的关系,实现最优化的通风,这是发展铀矿通风防护新理论、新技术的重要基础^[1-3]。徐卫东、徐啸川等人根据氡析出率与覆盖厚度是呈指数减弱规律的原理,针对某一特定尾矿库,研究了尾矿堆表面氡析出率与覆盖材料的容重、覆盖厚度以及尾矿砂含水量之间的关系,最后确定了在最佳覆土参数以及最小氡析出率条件下的安全粘土覆盖厚度和费用^[4]。此外,还有很多学者通过建立覆盖的物理模型,对氡在覆盖层中的运移规律进行了数值模拟,这对进一步研究覆土材料与降氡效果的关系奠定了理论基础^[5-8]。

综上所述,放射性污染物控制系统涉及到多个

影响因素,其动态性与分布性的增强要求系统不仅有被动地响应信息需求的能力,而且能以一定程度的智能化、自适应化地完成系统的复杂功能。智能体(Agent)是一种处于特定环境下的、能够感知环境的计算机系统,能够实现设计者和使用者的一系列目标,并能在那种环境下灵活地、自主地运行的计算实体或程序^[9-10]。复杂系统涉及功能属性较多,单个智能体往往无法描述和解决,而多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)则是集多个智能体于一体的系统,它不仅具备自身的问题求解能力和各自目标,而且能够相互协作,来达到共同的整体目标,它将系统分成多个组,每一组智能体提供一个具有全局知识的控制,并且由一个消息传递智能体来承担消息传递任务,而整个系统采用同样的方式对各成员智能体组进行管理^[11-12]。鉴于智能体系统分布式自治与系统集成是实现放射性污染物最优控制的理论基础,单一的智能算法存在着诸如算法的精度、速度、效率及适用范围的缺陷,而免疫克隆选择优化算法是综合了抗体选择的多样性及能识别和消灭相应抗原的免疫细胞,使之激活、分化和增殖,进行免疫应答,最终消除抗原,被选择的细胞受制于亲和力成熟过程,该过程改善对抗原的亲和力,该算法能够解决复杂系统优化问题^[13-15],能够在一定程度上较好地解决复杂系统全局优化问题。

[收稿日期] 2016-02-20

[基金项目] 国家自然科学基金项目“基于 multi-agent 技术的地下铀矿山安全系统动态机制设计与群体智能优化控制研究”资助(编号:51174116)

[作者简介] 戴剑勇(1969-),男,湖南新化人,核设施应急安全技术装备湖南省重点实验室副教授,博士。

①南华大学经济管理学院教授,博士,博士研究生导师。②南华大学核资源工程学院硕士研究生。

一 放射性污染物多智能体系统结构设计及协商机制

(一) 放射性污染物多智能体系统结构设计

多智能体结构一般是由多个集中式多智能体子系统组成的, 子系统之间是分布式结构。子系统核心智能体只协调管理子系统内的其他智能体, 协调分配任务和资源。放射性污染物控制系统所涉及的系统模型是一个比较庞大的系统, 需将一个系统进行功能模块划分, 然后结合每一个功能模块功能属性的不同建立相应的智能体模型, 并根据整个系统工作流程设计各智能体开放的功能接口及智能体间相应的通信机制, 则多个智能体模型及智能体间的通信机制就构成了针对此系统的多智能体系统结构。

不妨以铀矿山放射性污染物优化治理为例, 分

析与构建铀矿山放射性污染防治多智能体系统体系结构与协商机制。铀矿山开采过程中产生大量的放射性废水、废渣和废气, 会破坏铀矿山的生态, 对矿区及周围环境造成污染。铀矿山环境污染主要指铀矿山在采冶过程中给环境带来的破坏, 其中废水、废气、废渣都具有放射性危害。现着重从铀矿开采(通风降氡)系统智能体、尾矿多层覆盖系统智能体、铀矿废水治理系统智能体、废物处理技术系统智能体等多智能体系统来展开描述。首先结合放射性污染物扩散迁移性能及其环境条件, 考虑各类控氡智能体性能及其防治标准, 构建各多智能体分布式自治结构, 然后分析各智能体关联关系并通过主控系统来实现系统集成, 为实现铀矿山放射性污染物最优控制提供理论基础与实现平台。

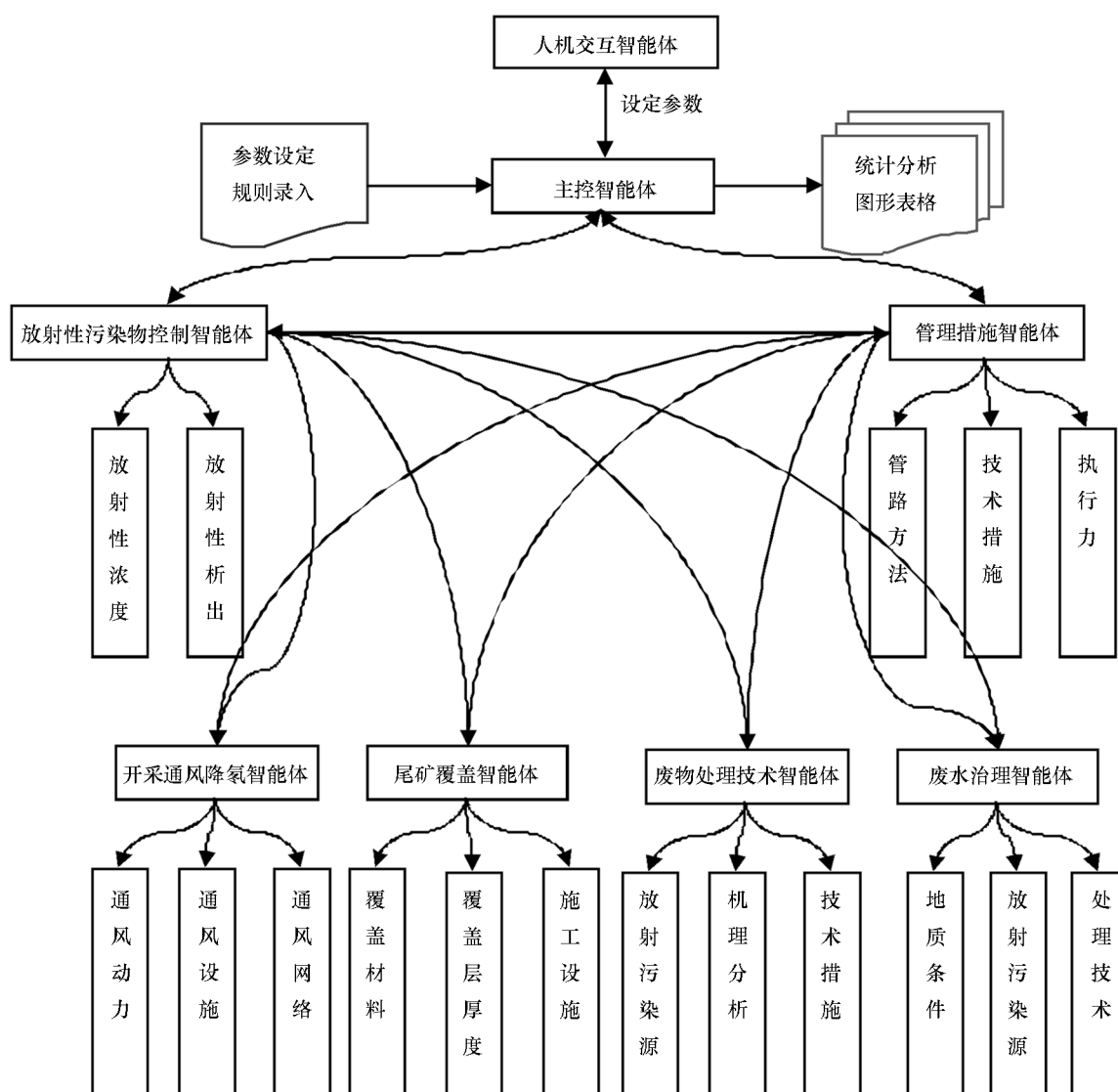


图1 放射性防治系统多智能体系统结构设计

铀矿山开采(通风降氡)系统智能体。氡及其子体的来源氡是镭的衰变产物,属于放射性气体。铀矿山开采产生废气,主要来自铀矿开采过程中凿岩、爆破、放矿、装卸和运输过程中扬起的矿尘及已沉落在岩壁、巷道内的矿尘因爆破、通风等再次飞扬的二次矿尘等。铀矿山生产过程中通过风压、风量、温度等通风参数调节来改变氡的浓度与氡的析出,以改善铀矿山生产作业条件。

铀尾矿覆盖系统智能体。铀矿山废石及部分尾矿应尽可能用来充填地下采空区,以减少地表的堆存量,从而减轻环境污染,这是铀矿山废石无害处理的重要途径。此外,铀尾矿多层覆盖是重要的防氡降氡技术手段,覆盖铀尾矿堆的防氡效率取决于该堆的性状、覆盖材料的性质和对空气渗流的控制程度。扩散系数小、孔隙度低、渗透性差的材料适于做覆盖材料。

铀矿废水治理系统智能体。放射性废水直接注入地下含水层、放射性废水通过地面渗透进入地下含水层、放射性废物理入地下等。地下水中的放射性污染物也可以通过地下水的运移进入地表水中污染地表水。放射性核素对地下水和地表水造成污染,严重影响饮用水水质,并且污染水生生物和附近土壤,最终通过食物链进入人体,在人体产生内照射。因此科学改善铀矿废水治理技术,规避环境危害风险尤其重要。

废物处理技术系统智能体。放射性废物中的放射性物质,采用一般的物理、化学及生物学方法都不能将其消灭或破坏,只有通过放射性核素的自身衰变才能使放射性衰减到一定水平。需借助放射性污染物常规处理方法构建技术处理数据库,应用数据挖掘、计算机技术、智能技术来组建相关废物处理技术仓库,来实现放射性污染物智能优化控制。

(二)铀矿山多智能体系统动态协作任务协商机制

鉴于铀矿开采通风降氡系统智能体、尾矿多层覆盖系统智能体、铀矿废水治理系统智能体、废物处理技术系统智能体等智能体既与放射性污染物控制系统智能体、管理措施智能体存在着必然的联系,同时各智能体彼此之间也存在关联。因此需借助多智能体系统分布式自治与协商机制,实现铀矿山放射性污染物多智能体系统动态协调优化控制,其动态协作任务求解主要操作步骤如下:

第一,根据铀矿山放射性污染物控制要求生成总目标及总任务,即根据放射性污染物关键控制模块及其关联网络构建铀矿山放射性污染物控制总目

标方程。

第二,根据铀矿山放射性污染物总控制目标方程及其分布式结构构建铀矿开采系统智能体、尾矿覆盖系统智能体、铀矿废水治理系统智能体等智能体放射性污染物控制分目标,然后根据相关专家知识对该目标进行评定。

第三,若不符合要求,则重新制定铀矿山放射性污染物控制总目标与各智能体分目标,直到符合要求为止。如满足要求,则需按要求进行执行,产生任务执行结果。

第四,构建铀矿开采系统智能体、尾矿覆盖系统智能体、铀矿废水治理系统智能体等智能体目标方程与约束方程,结合各自目标任务,执行各智能体分布式自治,将执行结果传送至交互功能组,为实现集成系统的协调提供基础保障。

第五,为实现铀矿山放射性污染总体控制目标,需提供相关的辅助支持管理功能,如所需要的不确定性参数、迁移动力学模型、基础数据、智能优化算法及相关辅助工具。

第六,应用各智能体系统控制方程的关联关系,结合智能优化算法及相关辅助工具进行铀矿山放射性污染物控制系统集成优化,结合模型外部环境信息进行综合分析,制定相关调整措施,将其及时发送给各智能体,而做出相应的调整。

二 放射性污染物多智能体系统免疫克隆选择优化

(一)放射性污染物扩散迁移动力学方程

放射性污染物通过扩散、渗流等作用进行运移,根据 Fick 扩散定律,其一维扩散迁移方程式如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C + \alpha \quad (1)$$

式中: D —孔隙空间中的扩散系数(m^2/s); v —介质中的气体渗流速度(m/s); C —介质孔隙中的放射性污染物浓度(Bq/m^3); λ —放射性污染物的衰变常数; α —射气介质产生可移动放射性污染物的能力。当系统趋于稳定时,根据边界条件可得到放射性污染物浓度解析解

$$C(x,v) = a e^{\left[\frac{v + \sqrt{v^2 + 4\lambda D^2}}{2D_2} \right] x} + b e^{\left[\frac{v - \sqrt{v^2 + 4\lambda D^2}}{2D_2} \right] x} \quad (2)$$

(二)放射性污染物多智能体控制系统目标与约束方程设计

根据放射性污染物关键控制模块及其关联网络构建放射性污染物控制总目标方程。现仍以铀矿山为例,鉴于铀矿生产(通风降氡)系统智能体、尾矿

多层覆盖系统智能体、铀矿废水治理系统智能体、废物处理技术系统智能体等多智能体系统放射性污染物迁移动力学稳定条件下解析解满足式(3)。

$$\begin{cases} \min J_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ \min J_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \min J_3 = f_3(x_1, x_2, \dots, x_p) \\ s.t. \begin{cases} c_1 = g_1(x_1, x_2, \dots, x_m) - C \leq 0 \\ c_2 = g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) - C \leq 0 \\ c_3 = g_3(x_1, x_2, \dots, x_p) - C \leq 0 \\ x_1, x_2, \dots, x_k \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

其中, J_1, J_2, J_3 分别代表通风降氡系统智能体、尾矿多层覆盖系统智能体、铀矿废水治理系统智能体中氡析出方程表达式; c_1, c_2, c_3 分别代表通风降氡系统智能体、尾矿多层覆盖系统智能体、铀矿废水治理系统智能体中氡浓度约束方程; $x_1, x_2, \dots, x_k$ 分别为控制变量。

应用多目标规划原理, 考虑目标与约束的重要度关系, 则铀矿山放射性污染物控制总目标辅助方程为式(4)。

$$\begin{aligned} \min J &= \alpha_1 J_1 + \alpha_2 J_2 + \alpha_3 J_3 + \beta_1 c_1 + \beta_2 c_2 + \beta_3 c_3 \\ s.t. \begin{cases} \sum_{i=1}^3 \alpha_i + \sum_{i=1}^3 \beta_i = 1 \\ 0 \leq \alpha_i, \beta_i \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

如考虑各多智能体系统单元之间的复杂性, 则铀矿山放射性污染物控制总目标辅助方程为式(5)。

$$\min J = F(f_1, f_2, f_3, c_1, c_2, c_3) \quad (5)$$

(三) 放射性污染物多智能体控制系统免疫克隆选择优化

鉴于铀矿山放射性污染物控制总目标辅助方程式(2)或式(3)均是一复杂系统, 经典的优化算法不能解决系统的全局最优控制问题。免疫克隆选择算法是一种群体搜索算法, 是在记忆单元基础上运行, 记忆单元中保留着亲和度较高的多个抗体, 是一个抗体集, 而不是一个抗体, 它为快速收敛得到全局最优解提供了保障。以影响铀矿开采(通风降氡)系统智能体、尾矿多层覆盖系统智能体、铀矿废水治理系统智能体等多智能体放射性污染物因素作为抗体, 以抗体亲和度作为抗原, 并根据放射性污染物控制目标辅助方程进行必要的尺度转换, 设置各智能体模型系统参数相应边界条件, 根据免疫克隆选择优化算法流程进行迭代优化可实现多智能体系统全局最优控制(见图2)。

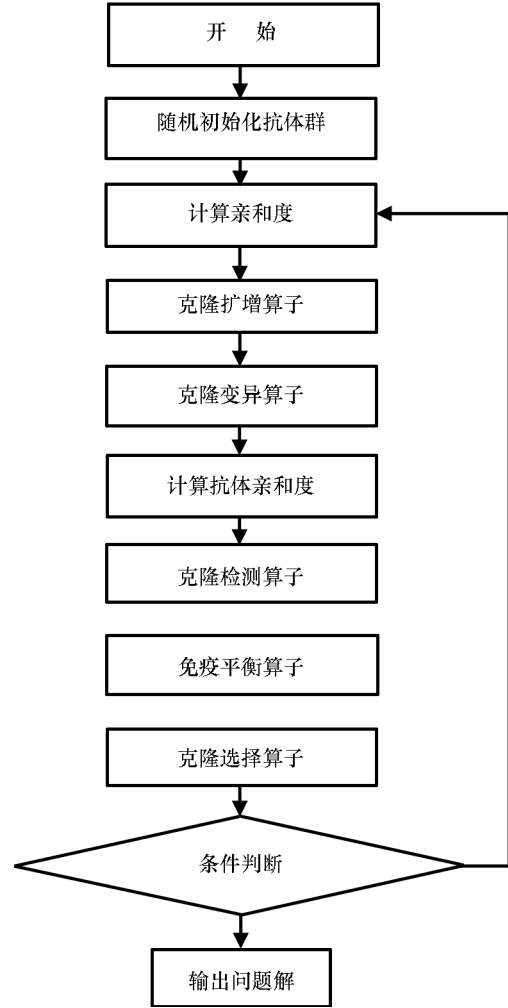


图2 免疫克隆选择算法流程图

三 结论

(一) 放射性污染物点多面广, 加之其扩散迁移特性, 经典的优化管理控制方法一般难以实现全局优化控制。因此, 本文引入多智能体技术构建放射性污染物控制系统多智能体系统结构与协商机制, 较好地解决了放射性污染物优化控制问题。

(二) 以铀矿山放射性污染物控制系统为例, 根据放射性污染物迁移动力学机制及其相应的控制措施, 分析与构建了铀矿开采系统、尾矿覆盖系统、铀矿废水治理系统、废物处理技术系统等多智能体分布式自治与系统协商机制。

(三) 根据铀矿山放射性污染物多智能体自治结构, 构建了铀矿开采系统、尾矿覆盖系统、铀矿废水治理系统等相关放射性污染物单智能体分目标方程, 实现了放射性污染物分布式自治。

(四) 整合各智能体分目标方程构建总控制目标方程, 然后应用免疫克隆选择优化算法实现其系统全局最优控制, 这为放射性污染物最优控制提供

了理论基础与实现平台。

[参考文献]

- [1] Arif Widiatmojo, Kyuro Sasaki, Nuhindro Priagung Widodo. Numerical simulation to evaluate gas diffusion of turbulent flow in mine ventilation system[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(3): 349-355.
- [2] ALEXAKHIN R M. Remediation of areas contaminated after radiation accidents and incidents[R]. Remediation of Contaminated Environments (VOIGT, G., FESENKO, S., Eds), Elsevier, Amsterdam, 2009: 177-222.
- [3] Jia Ting-gui, Liu Jian. Stability of mine ventilation system based on multiple regression analysis[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(4): 463-465.
- [4] 徐卫东, 徐啸川, 尧丽丽. 尾矿库覆土效果参数确定[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(6): 128-129, 176.
- [5] 伍剑波, 张慧, 苏鹤军. 断层气氛在不同类型覆盖层中迁移规律的数值模拟[J]. 地震学报, 2014, 36(1): 118-128, 159.
- [6] 胡永安, 石玉科, 周永海, 沙成金. 土壤覆盖层氨运迁移模拟[J]. 湖南农机, 2014, 41(5): 165-167, 171.
- [7] 黄帅, 彭小勇, 张欣, 郭兰霞, 柴旭昇. 铀尾矿库滩面析出氨在覆土中运移的数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(3): 176-179.
- [8] 刘成, 杨亚新, 彭道峰, 等. 铀矿山废石堆表面氨析出率的变化规律[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2013, 36(4): 385-388.
- [9] 孟宪春, 丁承君, 段萍, 郭胜辉. 多智能体技术的发展和现状[J]. 河北工业大学学报, 2006, 35(3): 6-11.
- [10] 郑延斌, 郭凌云, 刘晶晶. 多智能体系统分散式通信决策研究[J]. 计算机应用, 2012, 32(10): 2875-2878.
- [11] 霍晓宇. 基于 Multi-Agent 技术的露天矿山生产调度系统设计与实现[D]. 衡阳: 南华大学, 2013.
- [12] 李义华. 基于多智能体的物流配送车辆调度决策方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [13] 徐立芳. 免疫克隆选择算法应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [14] 石刚, 马佳, 赵伟. 免疫克隆选择算法的研究与应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2014.
- [15] 罗毅, 多靖赞. 基于免疫记忆克隆选择算法的多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 65-70.

Immune Clonal Selection Optimization of Radioactive Contamination System Based on Multi-agent Technology

DAI Jian-yong, ZOU Shu-liang, WANG Ming

(Key Laboratory of Emergency Safety Technology and Equipment of Nuclear Facilities in Hunan Province, Hengyang 421001, China)

Abstract: According to radioactive pollutants migration dynamic mechanism and its corresponding control measures, it constructs intelligent multi system structure and negotiation mechanism of radioactive pollutants control system by multi agent technology, and achieves the global optimal control by immune clonal selection optimization algorithm. And with uranium mine radioactive pollutants control system as an example, it discusses as the multi-agent intelligent distributed autonomous system and negotiation mechanism the uranium mining system, tailings coverage system, wastewater treatment system and waste treatment technology system the multi-agent, which provides a theoretical basis and the platform of realization for optimal control of uranium mines radioactive pollutants.

Key words: Multi-Agent system; radioactive contamination; immune clonal selection optimization