

# 基于免疫 Agent 机电装备故障智能自愈系统建模

仇惠娟, 张广明

(南京工业大学 自动化与电气工程学院, 江苏 南京 211816)

**摘要:** 为了减少和消除机电装备系统失效及故障的发生, 尝试在系统设计阶段引入装备免疫自愈思想。结合已有自愈理论研究和机电装备系统特点, 提出了机电装备故障智能自愈系统的定义。从提高系统自身“免疫”能力的角度出发, 探讨一种具有普适性的故障自愈系统设计方法, 并以机电装备主控系统为例, 构建基于免疫 Agent 的故障自愈系统模型, 对自愈策略和相关算法进行了初步分析。利用二级放大电路组成的简化控制系统进行仿真研究, 验证了该模型算法的可行性。

**关键词:** 机电装备系统; 自愈; 免疫系统; 主控系统; 免疫 Agent

**中图分类号:** TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7024 (2011) 10-3494-05

## Modeling of mechanical and electrical self-healing system based on immune Agent

QIU Hui-juan, ZHANG Guang-ming

(School of Electrical Engineering and Automation, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** In order to reduce the faults and invalidations of the system, try to induce the ideas of immune and self-healing in the system design stage. Firstly, combined the existed studies of self-healing theory with the characteristics of the mechanical and electrical systems, the definition of self-healing system is presented. Secondly, from improving the self immune competence standpoint, based on the immune agent, a universal design method for the systems, with self-healing capability is discussed. Taking the master control system of the mechanical and electrical system as an example, the fault-healing model and preliminary analysis of the self-healing strategies and related algorithms are analyzed and studied. Finally, the feasibility of the method is validated by simulation study of the two-stage amplifier, the simplified master control system.

**Key words:** mechanical and electrical system; self-healing; immune system; master control system; immune Agent

## 0 引言

众所周知, 机电装备系统大多工作在较为恶劣的环境中, 这使得元件加速老化损坏、大量电磁干扰窜入系统, 再加上软件失效和人为操作错误等原因, 使得机电装备系统故障停机时常发生, 不仅给企业带来巨大的经济损失, 严重时还将危及人的生命。传统的基于监测的故障诊断和事后维修方法显然不能解决上述问题。随着机电装备大型化、高速化、智能化的发展趋势, 如何保证系统持续可靠运行是目前设计开发大型复杂机电装备的主要技术难题。针对上述问题, 装备自愈思想应运而生。该理论的研究起源于 20 世纪中期, 用以满足航天飞机、人造卫星、空间探测器等高科技装备和系统安全可靠运行的需要, 并逐渐受到各国研究人员的高度重视。我国学者对自愈系统的研究主要集中在飞行器自修复、高速压缩机轴位移故障自愈、高速转子系统故障自愈等领域, 主要是利用自主调理思想, 针对具体单一应用, 基于外部监测实现系统状态的调整, 缺少自主性和智能性。本文考虑将生物自愈机制赋予

机电装备系统, 使之具有自感知、自诊断、自恢复的能力; 从结构和功能两方面入手使系统能够抵抗外来破坏和干扰, 探讨一种具有普适性的装备故障自愈系统设计方法, 以改变传统的靠紧急停车保护机器和信赖人工检修消除故障的传统方法。

## 1 自愈理论及自愈系统

目前, 自愈理论的研究才刚刚起步, 还没有形成相对完整的理论体系, 应用多局限于某一领域, 如自修复材料的研发、计算机网络安全和软件设计以及电力系统安全等方面<sup>[1-3]</sup>。

机电装备系统自愈的实现依赖于系统状态的渐变性。机电系统的正常状态与故障状态 (定义为系统不能完成运行最低要求的状态) 之间存在一个模糊的区间 (可以认为这个模糊区域代表了系统的“衰退”状态, 系统的衰退状态和故障状态统称为异常状态)。一定条件下, 系统经由衰退状态在正常与故障两种状态之间缓慢地变化 (如图 1 所示)。因此, 可以考虑从 3 个方面使系统避免陷入故障状态:

(1) 消除系统由衰退状态进入故障状态的条件;

收稿日期: 2010-10-19; 修订日期: 2010-12-20。

作者简介: 仇惠娟 (1985 -), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 研究方向为机电装备故障自愈系统构建方法; 张广明 (1965 -), 男, 江苏江都人, 博士后, 教授, 研究方向为智能控制理论及应用、机电系统综合控制、新能源及其应用、特种设备安全与管理。E-mail: qhj\_0106@163.com

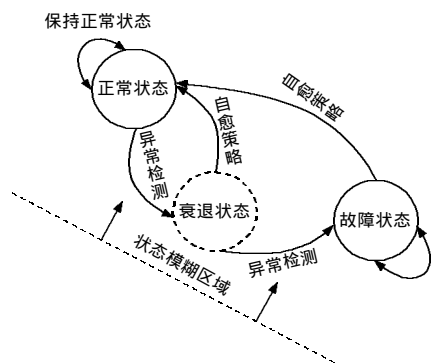


图1 机电装备系统状态变化

(2)创造从衰退状态转化到正常状态的条件;

(3)创造从故障状态进入正常状态的条件。

目前,自愈并没有形成统一的定义。本文结合机电装备系统的特点,特别是电气控制部分的系统软故障特征和规律,对机电装备故障自愈系统进行如下定义<sup>[4-8]</sup>:

**定义1 自愈系统:**在系统运行过程中,能够自行感知系统运行环境和系统内部状态的变化;在期望的时间内,通过系统微单元之间信息的传递及协调,对系统局部的、早期的失效形式和故障实现自诊断,经优化决策后启动有效恢复机制的,具有免疫认知能力的系统。

为了满足上述定义,自愈系统应该具有能够实时监控系统的状态及行为;自主感知系统故障和异常;分析处理系统状态信息,实现故障诊断;自主更新系统知识库;制定优化的故障自愈策略;执行自愈策略,使系统恢复正常运行等特性。

## 2 免疫系统及多 Agent 概述

### 2.1 免疫系统

生物免疫系统是人类和脊椎动物抵御外来物质侵害的防御系统,是一个复杂的自适应系统。它通过免疫应答,执行免疫反应来维持自身稳定。生物系统的免疫可以分为固有免疫和自适应免疫。固有免疫又称先天性免疫,是机体与生俱来的,对入侵生物体的所有外来物质都具有防御作用;自适应免疫又称获得性免疫,是后天学习得到的,只对特定物质具有防御功能,是免疫学主要的研究对象。获得性免疫反应包括B细胞和T细胞,其中B细胞分泌的抗体与抗原相结合,实现抗原的识别与消除,T细胞在免疫反应过程中能刺激和抑制B细胞的增殖和分化,对免疫调节起着重要的作用<sup>[12]</sup>。抗原侵入机体后刺激免疫系统发生抗原呈递、淋巴细胞活化、特异识别、免疫分子形成、免疫效应以及形成免疫记忆等一系列复杂的连锁反应,迅速有效的消灭各种病原体。

### 2.2 免疫系统特征对机电装备自愈系统模型的启示

(1)识别“自己/非己”:生物免疫系统中,只有不与生物体本身发生反应的B细胞才能够成熟,分泌相应的抗体,针对不同的病原体诱导不同类型的免疫应答消除侵入机体的抗原<sup>[9]</sup>。在自愈系统中,可以借鉴该机制,通过定义自己/非己以及抗原/抗体,利用改进的阴性选择算法生成具有高覆盖率的非己检测器,识别系统的异常状态(即非己状态)。

(2)分布性和鲁棒性:免疫系统遍布全身,没有统一的控制中心,对生物体各个位置发生的入侵均能产生免疫反应;系统的稳定性不受外界干扰或系统内部状态变化的影响,免疫系统的鲁棒性依赖于分布性<sup>[12]</sup>。根据这一特征构建的系统在整体上是健壮的,局部功能的失常不会导致整个系统的崩溃。

(3)学习和免疫记忆:当免疫系统与某一种抗原发生反应后,与该抗原具有高亲和力的B细胞经过克隆选择,其中一部分转变为记忆细胞,当再次遭遇此抗原时,记忆细胞使抗体迅速增殖消灭入侵抗原,大大提高反应速度,实现二次免疫应答;同时,经过克隆选择得到具有多样性的B细胞,当遇到相似抗原入侵时,也能够迅速产生免疫反应<sup>[9]</sup>。因此,借鉴免疫系统的这种功能,使系统具有动态学习记忆能力,快速反应能力及良好的适应性。

(4)抗体多样性及动态平衡:在免疫系统中,根据抗体与抗原的亲和力大小,系统动态地调整不同抗体的浓度。亲和力高的抗体有更多的机会进行自我复制,浓度提高;亲和力低的抗体在维持多样性的基础上,浓度降低,长期不被激活则会死亡。在自愈系统中,效仿该机制对抗体进行动态调整及优化。

### 2.3 Agent 及 MAS 概述

Agent是分布式人工智能的一个重要分支,一般指智能机器人、软件系统及替代人去完成特定任务的实体,可以用软件或硬件来实现。Agent的智能性主要表现在:自主性、反射性、前瞻性、移动性、推理能力、学习能力等<sup>[10]</sup>。MAS (multi-agent system)是由多个 Agent 组成的有机集合。各 Agent 是自治的, Agent 间通过通讯及环境相互影响。Multi-Agent 理论是一种建立在分布式结构基础上的智能集成方法,它为了解决复杂、分布式环境下的交互问题提供了新的认识视角和理论框架,为复杂系统的建模、分析、设计和实现提供了一条新的途径<sup>[11]</sup>。

## 3 基于免疫 Agent 的故障智能自愈系统模型

### 3.1 模型假设

#### 3.1.1 研究对象描述

机电装备系统是一个复杂的大系统,为了便于研究,本文主要针对装备的数字化主控系统(不包括机械部分),采用软计算技术进行研究。主控系统,可以存在于任何含有两个以上控制器的系统中,但严格意义上讲,主控系统是将原来独立的多个分立子系统整合成为一个能够协调运行的大系统,通过资源共享和信息互通,实现各子系统的联动和快速反应,提高对事件的反应能力和处理速度<sup>[12]</sup>。主控系统具有以下几个特征<sup>[13-15]</sup>:

(1)应用于大型复杂系统:控制对象为相近的多个设备、多台机组或多个控制回路;

(2)实现基础是监控通讯技术:实时监视系统的运行情况,控制系统地各个模块运行,通过通讯实现控制指令的级级传送,不同层次和模块之间数据的共享;

(3)最主要的功能:协调各组件工作和协同生产运行。

一个完整的生产自动化控制系统从硬件组成方面可大致分为:管控层、通信层和执行层(如图2所示)。主控系统故障可以分为“硬故障”和“软故障”两种。硬故障一旦发生就不可逆转,是不可恢复故障,不属于本文讨论的范围。本文重点针

对软故障,即那些缓慢变化的、通过适当的策略调控得到恢复故障,如输入输出接口设备中,串入的干扰和病毒导致的控制系统参数变化;电子电路中的偏置、漂移;主控计算机中存在的控制程序运行错误<sup>[21]</sup>等。从故障原因角度看,造成机电装备主控制系统软故障的主要原因有:人为操作不当引起的故障,外界干扰导致的故障及主控程序本身健壮性不足引起的故障<sup>[16-17]</sup>。

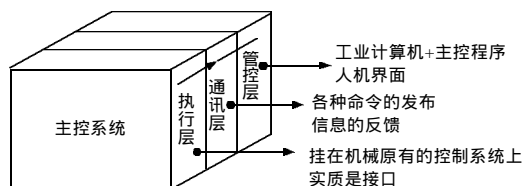


图2 主控制系统结构

### 3.1.2 模型假设

通过上述研究对象的分析,结合机电装备主控制系统的特点,建立如下模型

$$Y = F(f_1, f_2, f_3, \dots, f_m, A, K, COMM) \quad (1)$$

式中:Y——主控制系统输出的控制指令; $f_1, f_2, f_3, \dots, f_m$ ——装备系统中 $m$ 个不同的模块状态;矩阵A给出了这 $m$ 个模块之间的关系,可以反应故障的传播途径;COMM——主控制系统中的通讯;K——有关于控制要求和规则的知识。其中

$$f_i = (\theta_i, \alpha_i) \quad (2)$$

$$\theta_i = (\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}, \dots, \theta_{in}) \quad (3)$$

式中: $\theta_i$ ——反应模块主要状态的参数集; $\alpha_i$  (0,1)——模块 $i$ 是否处于工作状态。

## 3.2 相关概念定义

### 3.2.1 免疫 Agent

免疫 Agent 即把免疫机理与 Agent 技术相融合,将免疫机制引入 Agent 结构,构造的一种新型实体 Agent。免疫 Agent 一般都是动态的,相当于生物系统中的免疫细胞,不同类型的免疫 Agent,执行不同的任务,相当于生物系统中不同抗体针对不同的抗原。除了具有传统 Agent 的共性特点(自主性、反应性、社会性)等之外,免疫 Agent 还具有防御性、耐受性、认知性、学习性和进化性等免疫特征。本文在原有免疫 Agent 的基础上进行的改进<sup>[18-19]</sup>,提出了适用于机电装备故障自愈系统的免疫 Agent 结构(如图3所示)

$$IA = \langle ID, COD, REC, STA, APC, MEM, REA, KB, AB, VACC, COMM \rangle \quad (4)$$

式中:ID——免疫 Agent 的标识号;COD——状态信息提取单元,处理编码采集到的系统状态信息;REC——免疫识别单元,用于辨别自己/非己状态,检测抗原;STA——免疫 Agent 当前的状态;APC——抗原提呈单元;MEM——记忆单元;REA——推理决策单元;KB——抗体基因库;AB——记忆抗体库;VACC——疫苗库;COMM——通讯与信息融合单元。

经过自己/非己判别之后,被认定为抗原的状态经过抗原信息编码单元提取有效的抗原信息,完善抗原特征,进入抗体中心,首先在记忆识别单元将抗原特征与记忆抗体库中的抗体(预先存入的各种常见抗体模式)进行匹配,如果匹配成功,则直接进入执行单元;如果匹配不成功,则将抗原特征送推理

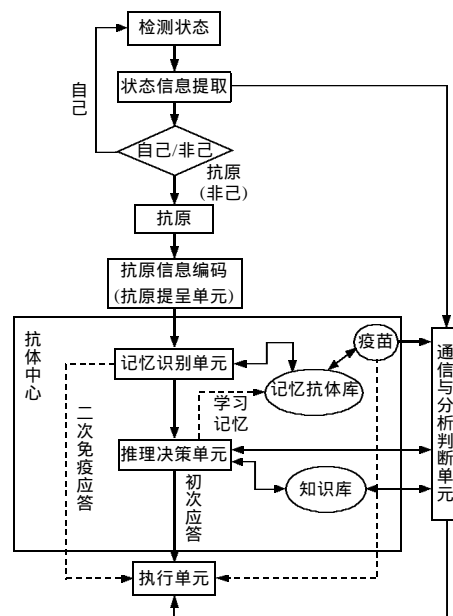


图3 免疫 Agent 结构

决策单元,推理决策单元根据抗体基因库中存放的抗体知识进行推理,产生新抗体及相对应的策略,存入记忆抗体库,并将新抗体对应的策略送到执行单元。执行单元接收到与抗原相对应的自愈策略后,进入等待状态,直到管理 Agent 发送执行信号,再执行相应策略。当通信单元传来关于环境变化或其它模块的故障信息时,经过分析判断,如果故障会对该免疫 Agent 所在区域产生影响,则执行相应疫苗预防该区域故障的发生,防止系统进一步恶化。

### 3.2.2 免疫系统与机电装备故障自愈系统的映射关系

自愈系统主要借鉴了免疫系统免疫监视、阴性选择、克隆选择、免疫学习和免疫记忆等机制,通过分析装备故障自愈原理和免疫应答反应的过程,建立了从免疫系统到机电装备故障自愈系统的映射关系(见表1)。

在这里没有对具体的免疫物质进行区分,统一看作具有识别和消除抗原作用的抗体。不同抗体对应具有不同结构和功能的免疫 Agent。

## 3.3 系统框架模型

在深入研究典型装备自动化系统的功能、特性和共性的基础上,结合人工智能理论、人工免疫系统和故障自愈的思想,分析免疫细胞和 Agent 之间、人工免疫系统和故障自愈系统之间在性质和行为上的相似性,建立具有不同功能的免疫 Agent 组成的具有故障自愈能力的装备自动化主控制系统基本结构模型<sup>[20-21]</sup>(如图4所示)。通过建立各免疫 Agent 之间的协作、协调和通讯机制,由若干个具有不同功能免疫 Agent 形成免疫多 Agent 系统,实现故障或异常的检测、耐受、识别和恢复。

按照执行功能的不同将自愈系统分作免疫监测层、自愈协调层和自愈执行层。免疫监测层通过机电装备通讯单元获取系统状态和数据,对各个模块的运行状况进行监测和初步免疫决策;自愈协调层主要进行信息的处理和综合,在充分利用已有知识和各个免疫 Agent 提供信息的基础上对系统状态

表 1 免疫系统到自愈系统的映射关系

生物体	机电装备主控系统
免疫系统	自愈系统
抗体基因	关于系统异常处理的知识
自己	系统的正常状态
非己	系统的异常状态
细胞	系统各个模块
抗原	编码后表征系统异常的特征量
抗体	自愈策略
抗原的提呈(细胞)/巨噬细胞	对采集到的异常信息进行处理(特征提取)
抗原与抗体的绑定/特异性识别	系统异常与自愈策略的匹配
抗体间的促进与抑制	自愈策略的优化
疫苗	与已知异常相对应的自恢复预调整策略
记忆抗体/记忆细胞	已知自愈策略
细胞克隆、高频变异	自愈策略的进化、学习、调整策略优先级
免疫应答	抗体介导免疫/免疫应答
交叉反应应答	记忆联想，二次应答中消除相似异常情况

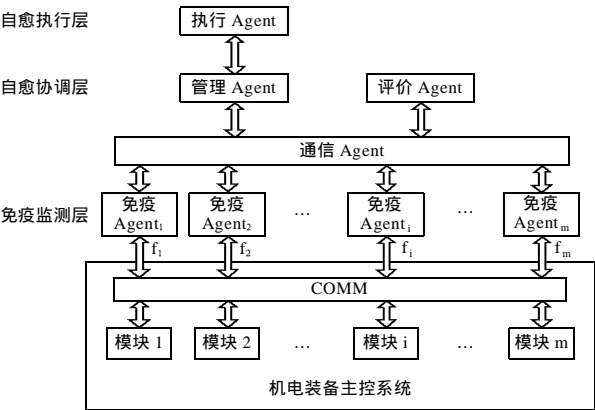


图 4 具有故障自愈能力的装备自动化主控系统框架模型

进行评估,处理免疫 Agent 的冲突消解与协商等问题,从全局角度给出系统最优免疫决策方案;自愈执行层根据系统评估结果,执行不同任务。

3.4 模型工作原理

首先,自愈系统对获取的主控系统状态参数进行特征提取和编码后送免疫识别单元,根据阴性选择和克隆选择原理,由训练和运行两个过程完成自己和非己识别。训练过程利用系统的正常状态,经过编码得到“自己”,按照改进的阴性选择算法(融合了克隆选择过程),生成对“非己”空间有较高覆盖率的异常诊断器检测系统异常,即“非己”。

在免疫 Agent 中,系统的“非己”状态被定义为“抗原”,免疫策略是“抗体”。根据免疫系统中抗体对抗原的记忆、防御和耐受以及抗体之间相互作用机制,实现自愈策略的优化匹配和学习记忆,模仿免疫系统的一次和二次免疫应答,得到该异常的初步自愈策略;

管理 Agent 根据主控系统各模块的知识和评估单元分析得出的系统运行情况,通过综合分析对各个模块的初步自愈

策略进行统筹安排,按照最优的自愈方案,有序地将执行信号发送给各个免疫 Agent 的执行单元。

评估 Agent,接收来自各个免疫 Agent 的模块监测结果,并给出一个介于(0,1)之间的评估值 $a$ :

- (1)当  $0 < a < 0.1$  时,认为系统状态的正常偏差;
- (2)当  $0.1 < a < 0.6$  转入管理 Agent,生成最优自愈策略,并发送信号给各个免疫 Agent 的待执行单元,执行相应的模块修复。
- (3)当  $0.6 < a < 0.8$  时,认为故障严重,采取抑制作用,迅速隔离/停止相关模块运行,系统低性能运行,争取时间故障导致停机之前得到排除,或采取细粒度技术处理个别模块;
- (4)当  $a > 0.8$  时,则迅速停机,防止发生事故。

4 构建自愈系统模型的创新点及关键技术

本文主要完成了以下工作:在分析机电装备系统特点的基础上,以故障/异常的消除和抑制为目的,从系统内部出发,综合运用智能技术、人工免疫原理和自愈理论,提出了具有一定普适性的机电装备自愈系统构建方法。机电装备系统复杂化趋势使得传统建模方法不再适用。本文借鉴免疫 Agent 概念,构造相应的 Multi-agent 系统实现系统结构化建模;效仿生物免疫系统分布、高效、多样的机体健康保持机制,有效改善系统的安全性和可靠性。

关键技术主要集中在:人工免疫系统与故障自愈系统之间的概念映射;利用多种不同结构功能的免疫 Agent 实现故障自愈系统建模;在动态和异步环境下,围绕所构建故障自愈模型,建立系统自修复、更新和重构算法及其策略等问题。

5 模型评价及实验结果分析

本文研究思想来源于人工能理论 (Multi-Agent 理论和技术)、人工免疫原理和故障自愈思想的三者结合,这属于交叉学科的研究内容,具有坚实的理论基础和方法论作支撑。模型体现了一个完整的自愈过程,由状态评估、异常检测、自愈决策和自愈策略实施 4 个子过程组成。总的来说,所构建的自愈系统模型遵循了生物免疫机理,具有合理性和可行性。

利用二级放大电路组成的简化控制系统,对由温度变化引起的系统输出异常、供电电路波动造成的干扰以及集成放大器芯片自身性能下降导致的放大倍数不足等问题进行仿真研究,所用方法能够检出上述异常,并根据异常状态及时执行自恢复策略,保证系统放大效果。实验成功验证了自愈策略和模型算法的可行性和有效性。

6 结束语

本文将人工智能理论、免疫原理和故障自愈思想相结合,构建了一种机电装备智能自愈系统模型,初步分析了相关自愈策略和自愈算法,并通过仿真实验验证了模型算法的合理性和可行性。本文对构建机电装备故障智能自愈系统进行一些探索性的研究,对已有装备自愈思想进行了补充和发展,为进一步研究机电装备免疫自愈系统的构建方法做了准备,但对该模型的应用还停留在简单仿真阶段,仍需要进一步研究机电装备系统的故障合理描述模型和早期检测方法,实现实际应用验证。因此,真正实现装备智能自愈系统还任重而道远。

## 参考文献:

- [1] 万秋兰.大电网实现自愈的理论研究方向[J].电力系统自动化,2009,33(17):29-32.
- [2] 卢旭.分布式系统自愈调控关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009(3):1-16.
- [3] Debanjan G,Sharman R.Self-healing systems—survey and synthesis[J].Decision Support Systems,2007,42(4):2164-2185.
- [4] 李航,刘西洋,陈平.自愈系统构架构建方法研究[J].系统工程与电子技术,2007,29(2):291-293.
- [5] Stefania Montani,Cosimo Anglano.Self-healing in service delivery software systems by means of case-based reasoning[J].Engineering Applications of Artificial Intelligence,2006,42(1):5-18.
- [6] 齐晓慧,杨志军,吴晓蓓.无人机自修复飞行控制系统研究综述[J].控制工程,2006,13(6):513-516.
- [7] 徐滨士,张伟,刘世参,等.现代装备智能自修复技术[J].中国表面工程,2004,17(1):1-4.
- [8] 赵赏鑫,张来斌,王朝晖,等.机械设备故障预测诊断方法综述[J].矿山机械,2005,33(2):65-67.
- [9] 莫宏伟,左兴权.人工免疫系统[M].北京:科学出版社,2009:3-74.
- [10] 朱浩,周莲英,陈东彬.基于免疫 Agent 的入侵检测系统模型的研究[J].计算机应用与软件,2005,22(3):34-36.
- [11] 丁士拥,常天庆,牛春平,等.基于 Agent 的建模技术研究[J].计算机工程与设计,2007,28(8):35-37.
- [12] 杨韬.城市轨道交通主控系统的构成[D].西安:西南交通大学,

2007:1-20.

- [13] 王芳.焦炉生产计算机主控系统[D].大连:大连理工大学,2006:1-62.
- [14] 南京科远自动化集团股份有限公司应用方案. WPCS 风电主控系统方案 [EB/OL].http://www.gkong.com/co/sciylon/solution\_detail.asp? solution\_id=14162,2010.
- [15] 黄春阳. 新型交叉带式分拣机主控系统的建模、设计与实现[D].北京:北京邮电大学,2009:1-46.
- [16] 龚涛,蔡自兴.基于人工免疫系统的移动机器人软件故障诊断系统[P].中国:CN101008917,2007-08-01.
- [17] 乔巍巍,贾亚洲.数控系统软件故障模式影响及危害度分析[J].设计与研究,2008(2):77-78.
- [18] Azzedine Boukerchea,Renato B Machado.An agent based and biological inspired real-time intrusion detection and security model for computer network operations[J].Computer Communications,2007,30(13):2649-2660.
- [19] 李永忠,徐静,罗军生,等.基于免疫 Agent 的网络入侵检测系统[J].计算机科学,2008,35(12):25-28.
- [20] 张伟,明安波,杨正伟,等.基于免疫 Agent 的液体火箭发动机故障诊断[J].计算机应用,2009,29(19):272-274.
- [21] 张玲.基于免疫 Agent 面向服务架构[D].西安:西安理工大学,2008:3-18.
- [22] Sterrit R. Autonomic networks: Engineering the self-healing property[J].Engineering Applications of Artificial Intelligence,2004,17(7):727-739.

(上接第 3480 页)



图 7 坦克实体三维仿真系统

## 4 结束语

本文针对现代仿真系统对作战实体的应用需求,研究了基于多分辨率实体的战场三维仿真系统的总体结构和功能,给出了多分辨率实体三维建模与简化算法、模型库管理以及实体间匹配等技术途径。实例应用表明,系统能够提供“地形实体、地物实体、装备实体多维一体”的战场空间,构建的作战模拟环境逼真可信,解决了战场地形、地面装备以及地面战场设施等作战实体多分辨率等关键技术问题,为提高实体对象的逼真度和层次细节仿真提供了一种可行的技术途径。系统进一步的研究可应用于三维战场态势的推演、实体模型装配过程、细节组成结构过程仿真以及实体模型毁伤与性能评估等方面。

## 参考文献:

- [1] 徐泽敏,何军.战场态势三维图形仿真系统的设计与实现[J].计

算机应用,2009,29(z1):313-316.

- [2] 秦大国,陈小武,李波等.空间态势计算与可视化建模[J].系统工程与电子技术,2009,31(12):2904-2907.
- [3] 殷宏,许继恒,叶伟.作战仿真实体三维模型数据存储方法[J].计算机应用,2007,27(11):2753-2755.
- [4] 殷宏,许继恒,张宏军.作战仿真实体可视化数据模型研究[J].系统仿真学报,2008,20(10):2596-2560.
- [5] 王慧谟,张瑜.联合作战仿真态势数据模型研究[J].系统仿真学报,2008,20(15):4186-4188.
- [6] 洪蕾.导弹飞行仿真可视化系统研究与实现[J].弹箭与制导学报,2007,27(3):91-94.
- [7] 王巍,王玉玫.计算机仿真的实体属性动态获取技术研究[J].计算机工程与设计,2008,29(19):5077-5079.
- [8] 郭明,周晓东,朱敏,等.HLA/RTI 的数据管理方法分析[J].计算机仿真,2006,23(4):118-120.
- [9] 张会兵,韩雯,王志军,等.基于 Vega 的破片式战斗部导弹威力场视景仿真[J].计算机工程与设计,2010,31(15):812-815.
- [10] 温玮,何友,李牧.基于参数数据库的 CGF 实体框架结构研究[J].系统仿真学报,2007,19(6):1231-1233.
- [11] 刘世彬.虚拟现实 LOD 技术研究及可视化[J].网络与信息,2010,24(2):21-22.
- [12] 张荣华,郑顺平.高逼真动态地形实时绘制中碰撞检测的设计与实现[J].计算机应用,2006,26(11):2773-2775.