

8-7-2020

Discrete-Event Simulation-Engine Technology Based on Mailbox-mechanism in C⁴ISR System

Wendi Cheng

1. The 28th Research Institute of China Electronic Group Corporation, Nanjing 210007, China;;2. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, Nanjing 210007, China;

Fengxin Sun

1. The 28th Research Institute of China Electronic Group Corporation, Nanjing 210007, China;;2. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, Nanjing 210007, China;

Chu Wei

1. The 28th Research Institute of China Electronic Group Corporation, Nanjing 210007, China;;2. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, Nanjing 210007, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Discrete-Event Simulation-Engine Technology Based on Mailbox-mechanism in C⁴ISR System

Abstract

Abstract: For the design of discrete event simulation engine about combat simulation platform tools in C4ISR System, discrete events were divided into several types according to the C4ISR System's functional components and operational deduction process. *The advantage of centralized management and convenient access was made use of by the mechanism of sending and receiving emails in mailbox to support the circulation of discrete events.* Besides, *the fixed-step driven and event-driven discrete event engine strategies were compared and analyzed.* The result shows that, discrete event-driven clock algorithm, which can greatly reduce the consumed machine-time in simulation, is more applicable at discrete event simulation system with different time granularity.

Keywords

C4ISR systems, discrete event, simulation engine, mailbox

Recommended Citation

Cheng Wendi, Sun Fengxin, Chu Wei. Discrete-Event Simulation-Engine Technology Based on Mailbox-mechanism in C⁴ISR System[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 2025-2030.

C⁴ISR 系统基于邮箱机制的离散事件仿真引擎技术

程文迪^{1,2}, 孙丰鑫^{1,2}, 楚威^{1,2}

(1.中国电子科技集团公司第二十八研究所, 江苏 南京 210007; 2.信息系统工程重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要: 针对 C⁴ISR 系统仿真作战平台工具中离散事件仿真引擎的设计问题, 结合 C⁴ISR 系统功能组成和作战推演流程划分了三种基本离散事件类型; 利用邮箱收发邮件的缓存机制可进行集中管理和存取便捷的特点, 辅助仿真引擎支撑离散事件的运行流转过程; 在此基础上比较分析了固定步长驱动法和事件驱动法两种离散事件引擎策略。试验结果表明: 在时间粒度不同的离散事件仿真系统中, 离散事件驱动的时钟算法比固定步长法更适用, 可以大大节省仿真过程耗费的机器时间。

关键词: C⁴ISR 系统; 离散事件; 仿真引擎; 邮箱

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 09-2025-06

Discrete-Event Simulation-Engine Technology Based on Mailbox-mechanism in C⁴ISR System

Cheng Wendi^{1,2}, Sun Fengxin^{1,2}, Chu Wei^{1,2}

(1. The 28th Research Institute of China Electronic Group Corporation, Nanjing 210007, China;

2. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, Nanjing 210007, China)

Abstract: For the design of discrete event simulation engine about combat simulation platform tools in C4ISR System, discrete events were divided into several types according to the C4ISR System's functional components and operational deduction process. *The advantage of centralized management and convenient access was made use of by the mechanism of sending and receiving emails in mailbox to support the circulation of discrete events.* Besides, *the fixed-step driven and event-driven discrete event engine strategies were compared and analyzed.* The result shows that, discrete event-driven clock algorithm, which can greatly reduce the consumed machine-time in simulation, is more applicable at discrete event simulation system with different time granularity.

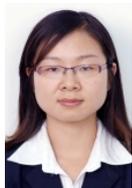
Keywords: C⁴ISR systems; discrete event; simulation engine; mailbox

引言

建立 C⁴ISR 系统及其作战应用环境的仿真模型, 是研究与分析未来 C⁴ISR 系统的一种重要手段和工具。在典型作战想定驱动下, 演示 C⁴ISR 系统的组成结构、主要功能及席位、处理流程、操作方

式、关键作战能力等, 为 C⁴ISR 系统领域新概念、新方法和新技术的研究与开发提供了有力的支撑。通过直观、有形的系统概念和功能演示结合定量的仿真试验数据分析, 加深人们对未来系统研究成果的理解, 有助于人们对研究成果做出科学合理的评价。因此, 设计合理的模型、高效的仿真平台架构、灵活的仿真支撑工具是仿真技术的关键^[1]。

仿真引擎技术^[2]又是仿真平台中最重要的环节, 它是整个体系结构仿真框架的枢纽, 推进各个模块的运转, 联动整个系统的推演。目前较常见的



收稿日期: 2015-05-05 修回日期: 2015-07-16;
作者简介: 程文迪(1986-), 女, 湖北, 硕士, 高工, 研究方向为 ISR 建模与仿真; 孙丰鑫(1984-), 男, 山东, 硕士, 工程师, 研究方向为 C4ISR 系统仿真与建模; 楚威(1979-), 男, 江苏, 硕士, 高工, 研究方向为 C⁴ISR 系统仿真与建模。

<http://www.china-simulation.com>

• 2025 •

仿真引擎技术是 workflow 仿真引擎。workflow 仿真引擎采用 petri^[3]网模型的离散事件动态系统, 侧重描述系统的结构、状态演化, 可以从模型实体上分析判断是否存在死锁、状态空间无限等异常情况, 可以及早发现 workflow 瓶颈, 便于做出修改设计的决策。因此, 离散事件 workflow 的作用和目的是做出一系列检错和优化措施^[4]。本文通过邮箱机制实现各个实体模型之间的消息交互, 在离散事件仿真引擎推动之下运转。系统这种低耦合的特点, 更适合实体模型的扩展, 也使得系统灵活性更高。

离散事件仿真领域的研究热点聚焦在并行离散事件仿真^[5-6], 其难点在于时间同步、负载均衡、高效通信等算法, 以及如何在某些特殊应用领域大幅提升仿真性能等方面, 忽视了影响应用的其他因素, 如模型开发的简单性、可重用性、可维护性、正确性以及仿真结果分析等^[7]。本文重点分析的是实体模型的事件类型划分与处理, 注重模型的简单性和正确性, 避免了并行离散事件仿真的事件管理、信息交互、同步等诸多复杂问题。

1 离散事件动态系统简介

离散事件动态系统是受事件驱动, 系统状态的变化发生在一连串离散时间点上的动态系统^[8]。对离散事件动态仿真系统而言, 最重要的基本概念包括: 实体、随机离散事件、仿真时钟等^[9]。离散事件系统中内部状态在一段时间内保持不变, 只在离散的时间点上发生变化, 因此建立仿真模型时, 需要将 C⁴ISR 系统中的作战要素的仿真推演过程描述成离散的二维序列时间-事件表。系统仿真主要作战要素包含实体单元如预警探测、情报处理、决策指挥、武力打击等各个单元模块的功能性仿真活动, 还包括目标推演、实体毁伤等战场环境活动。

图 1 给出了仿真引擎架构图。离散事件仿真引擎主要包含事件产生器、处理控制器、状态管理器、资源管理器^[4]。仿真环境和条件信息输入到仿真引擎, 在基础平台工具的基础上, 根据规则库的标准规范, 生成离散事件。处理控制器按照处理规则,

调度资源管理器中注册资源, 按照时间顺序依次处理离散事件, 并更新状态管理器的状态, 从而推进仿真系统的运行。

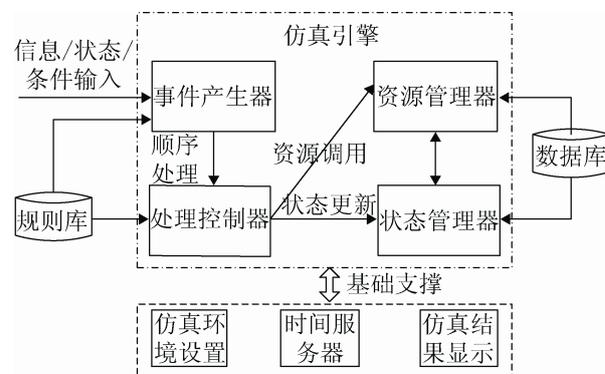


图 1 仿真引擎架构图

事件产生器: 指系统中按照规则库的设计原则生成一系列使系统状态发生变化的离散事件。通过解析想定文件, 设置初始状态信息、条件信息等战场环境变量, 初始化产生不同实体的周期性事件, 并形成二维时间-事件序列表。

处理控制器: 根据仿真配置的信息, 处理器从二维时间-事件序列表中抽取第一个事件, 触发流程引擎产生一个流程实例。流程实例运行过程中, 需要进行资源调度、状态查询和更新等操作。

资源管理器: 负责仿真系统资源的调度管理、状态维护, 本文中主要涉及到对公共发件箱和公共收件箱的访问, 通信网节点路由链路计算, 通信节点带宽、处理时延及内存大小等。

状态管理器: 负责管理流程实例的状态, 目标、单元实体、战场环境、通信网络、通信节点忙闲状态。

规则库: 包括事件产生周期、事件产生和状态转变等原则; 作战筹划规则; 实体活动规则等。

数据库: 包含专用数据、平台软件专用数据、装备性能数据、试验配置数据、试验档案数据等, 其为仿真软件的开发、运行与应用提供完备的底层数据支持。

时间服务器: 控制仿真进程的时间的推进, 用于表示仿真时间的变化。

仿真环境设置: 包括席位设计, 网络布局, 战情设计等。

仿真结果显示: 目标飞行位置状态、网络节点拓扑结构、通信链路运行状态等信息显示在地图界面上。

2 离散事件仿真引擎时钟算法

根据所有实体的活动及所有事件的调度方式, 仿真时钟有两种推进方式^[6,10]:

(1) 时间步长法: 在该机制中的事件列表是按照时间先后顺序排列的。在进行系统仿真时, 仿真时钟按照固定的时间间隔进行推进, 设仿真步长为 ΔT , 初始时刻为 T_0 , 则第 n 时刻的仿真时间为:

$$T_n = T_0 + \Delta T * (n - 1) \quad (1)$$

每推进到一个新时刻, 就判断排在事件列表中的第一个事件是否处于当前仿真时间区间内, 若是则立即执行, 并按规则生成相应的新事件, 再按照时间先后顺序插入到事件表中; 否则, 仿真时钟继续向前推进。时间步长法流程如图 1 所示。

(2) 事件驱动法: 以事件发生的时间为增量, 按照时间的进展, 一步一步地对系统的行为进行仿真, 直到预定的仿真时间结束为止。设第 i 个离散事件按照仿真逻辑推理的发生时刻为 T_i' , 则 n 时刻的仿真时间为当前第 n 个离散事件的发生时刻:

$$T_n = T_i' |_{i=n} \quad (2)$$

该时钟推进机制下, 仿真时钟的推进呈现跳跃性和随机性。事件驱动法流程图如图 2 所示。

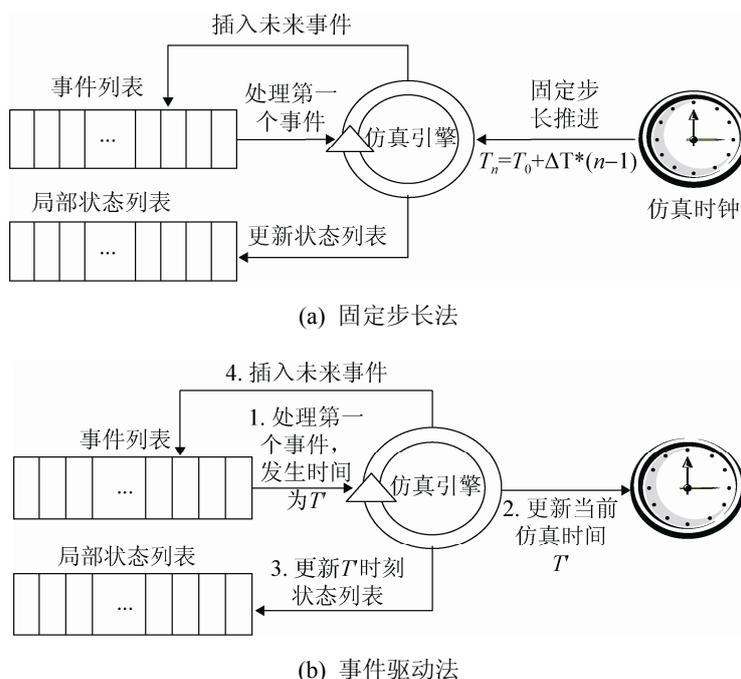


图 2 离散事件引擎算法

在固定步长机制中, 仿真步长越小仿真效率越低, 但是仿真步长变大后, 由于每步内所有发生的事件均视为在该步末端时刻发生, 使得一些时间间隔较小的事件表现为同步同时发生, 导致仿真精度变小。

一般地讲, 当判断比较的数目较大或事件变化成周期性特点时, 用时间步长法可以节省机时, 而

当相继两个事件出现的平均间隔较长时, 更适合用事件驱动法。

3 离散事件类型分类

采用离散事件仿真模型模拟 C⁴ISR 系统, 需要根据系统功能组成、作战推演流程、试验环境需求分析事件类型和事件规则。表 1 列出了 3 种基本事

件类型^[1]，分为单元类事件、战场环境事件、网络转发事件。按照事件产生的规则，分为周期性推进事件、随机型事件和触发型事件。周期性事件主要是指系统中实体单元和目标的基本活动情况，实体单元的基本操作包含读取邮箱、业务处理、发邮件等，目标的基本活动主要是指目标运动轨迹推演情况。触发型事件主要是对公共发件箱中的邮件进行发送时产生的网络转发通信事件。随机型事件主要是指按照试验需求设计的随机事件，如目标受到武器平台打击后按照一定的毁伤概率产生毁伤事件，某一单元在某时刻发生失效事件等。表 1 中用 UE 代表单元类事件；EE 代表战场环境类事件；WE 代表网络转发事件。事件产生原则中，C 代表周期性；R 代表随机；T 代表触发型。

表 1 事件类型分类表

事件名称	事件产生原则	事件类型
探测单元模拟事件	C	UE
情报单元模拟事件	C	UE
指挥单元模拟事件	C	UE
武器单元模拟事件	C	UE
目标击毁事件	R	EE
单元失效事件	R	EE
目标状态推演事件	C	EE
通信节点转发事件	T	WE
通信节点忙等待事件	T	WE
通信节点置闲事件	T	WE
出网事件	T	WE

4 仿真推演流程

离散事件驱动仿真引擎的仿真推演流程图如图 4 所示。首先进行战场环境初始化，包括单元离散事件初始化和目标推演离散事件初始化。离散事件仿真引擎在外部控制下开启，并顺序执行排列在事件列表中的离散事件。单元实体在处理周期性离散事件时，首先读取公共收件箱的邮件。如果发现自身的邮件，则读取该邮件并进行相应的操作，随后清除该邮件。之后，按照情报处理、指挥决策、武器打击等实体之间的交互关系，产生邮件送入公共发件箱。通信网实体读取公共发件箱中邮件，按

照邮件中源和目的地址选择最优的通信节点路径，生成通信网中流转的离散事件，同时清空发件箱。到下一个通信节点时，会产生一个新的离散转发事件。由于路由中通信节点众多，发件箱中的一个邮件会派生出多个节点转发事件。因此离散事件列表中这种触发型事件的数量会随着目标数量增加而成倍增加。当通信网离散转发事件到达目的节点时，就将其送入公共收件箱。仿真引擎一直运行下去，直到指定的运行时间结束为止或者人工干预停止。

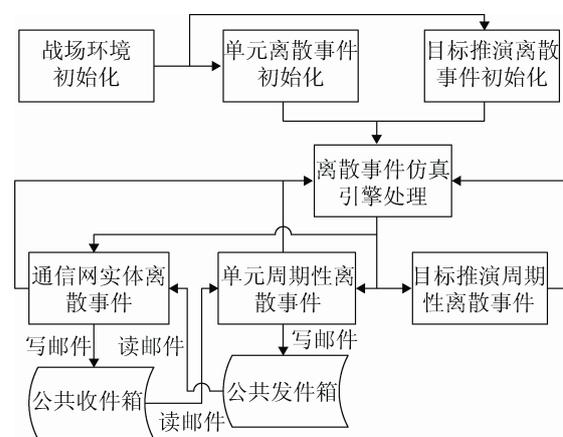


图 3 离散事件驱动仿真引擎的仿真推演流程图

下面的仿真伪码给出了离散事件驱动的仿真引擎运行的流程。

```

Void Processing()
{
    While(flag)
    {
        Event *pEvent= gDiscretEventAgent .
            GetFirstEvent();
        If(pEvent == Null) continue;
        T = pEvent->time; //更新当前系统
        仿真时间
        Switch(pEvent->type)
        {
            Case 单元事件:
                {Unit.ReadMailBox();//读取公共收
                件箱中自己的邮件
    
```

```

Unit.CleanMyMail();//清除公共收
件箱中已读邮件
Unit.Process(); //处理单元实体事
件
Unit.ProduceNewMail(); //按照事
件生成规则生成新的周期事件,写入发件箱
gDiscreteAgent.ProcessMail(); //从
发件箱中读邮件,生成通信网事件
ClearSendMailBox();//栅格网
Agent 处理完公共发件箱后,清空公共发件箱
break;}
Case 网络流转事件:
{gDiscreteAgent.ProcessEvent();//
处理网络流转事件
gDiscreteAgent.ProduceNewTransE
vent();//产生新的网络流转事件
break;}
default:
break;
}
//执行完后删除该事件
delete pEvent;
gDiscreteAgent.m_DiscreteEventArra
y.RemoveAt(0);
}
}

```

对于固定步长法驱动的仿真引擎机制,其事件划分规则保持一致,区别在于系统仿真时间是按照固定步长递增的方式更新的。每更新一次系统仿真时间,就判断离散事件列表中是否有处于该时间片下的事件需要处理,若有,则按规则处理,否则系统仿真时间进入到下一个时刻。

5 仿真结果与分析

基于对以上两种仿真引擎推进机制的分析,设定场景,按照目标数目的不同做了 3 个想定进行仿真分析。战场基础环境:雷达模拟器 12 个,情报

处理中心 4 个,航空兵指挥所 2 个,地空导弹营 2 个,机场 2 个。想定①:目标 20 批;想定②:目标 40 批;想定③:目标 60 批。

前提条件:假定目标击毁率较低,目标数量保持相对稳定,设定仿真时长为 100 秒。仿真结果记录的是完成设定的仿真时长所耗费的机器时间。表中 S 表示固定步长法,D 表示离散事件驱动法。

表 2 固定步长法与离散事件驱动法仿真结果

仿真引擎类型	①	②	③
S	约 36 min	约 156 min	约 352 min
D	约 117 s	约 269 s	约 506 s

从仿真结果可以看出,离散事件驱动法的仿真机时远远小于固定步长法的仿真机时。前面已提到过,周期性事件用固定步长法可以节省机时,而事件之间间隔事件较长或者事件之间的时间粒度相差较大时,用事件驱动法较合适。本文提到的离散仿真事件包含周期型、触发型、随机型 3 种。邮箱中邮件数量取决于想定中目标数量的多少。而这些邮件会转化成通信网中转发的离散事件。由于邮件转发的过程涉及到多跳路由节点,发件箱中的一个邮件会派生出多个节点转发事件。因此离散事件列表中这种触发型事件的数量会随着目标数量增加而成倍增加。此外,由于节点的容量和处理速率有限,因此事件等待处理的时间也相应延长。通常情况下,实体单元周期性的离散事件时间间隔在秒级,而触发型离散事件的时间间隔在毫秒级。假设采用固定步长推进的时钟算法,若固定步长的时间粒度与触发型事件时间粒度相当,则周期型事件等待的时间太长,表现在仿真机时过长;若固定步长的时间粒度与周期型事件时间粒度相当,则同一仿真周期内需要处理的触发型事件数量巨大,无法及时更新系统其它状态变量,可能导致系统运行状态出错和仿真精度过小。基于以上分析考虑,本文选择离散事件驱动仿真时钟推进机制,以当前处理事件的时间记为当前仿真时间,仿真时间具有跳变性,可以大大节省仿真机时。

值得注意的是, 邮箱机制中每个离散事件均被转化为邮件, 并在邮件中附带有收发双发节点信息、事件发生的时间信息。邮箱犹如缓存离散事件的线程池, 其本身存在一定缺陷。邮件处理周期的大小, 事件发生时间间隔, 共同决定了邮箱缓存的大小。我们可以考虑假设邮箱离散事件处理服从泊松分布, 单位时间内进入邮箱的邮件数目为 λ , 单位时间内处理的邮件数目为 μ , 则邮箱缓存池的大小为 $N = \lambda/\mu - \lambda$ 。可见公共邮箱的缓存大小受邮件处理能力和邮件进入邮箱的时间间隔同时制约。

6 结论

本文采用离散事件顺序仿真引擎技术, 注重模型的简单性、可扩展性、可维护性, 避免了并行离散仿真带来的时间同步、负载平衡、高效通信等复杂度高和开销高的不利因素。文章以 C^4ISR 系统仿真作战平台为背景, 结合邮箱收发邮件机制, 利用邮箱机制便于统一集中管理、存取便捷的特点, 搭建了系统结构仿真平台。基于路由链路的事件转发流程划分离散事件类型, 按照离散事件引擎驱动法, 对比分析了按照固定步长和离散事件驱动的时钟算法, 在时间粒度不同的离散事件仿真系统中, 离散事件驱动的时钟算法更适用于 C^4ISR 系统结

构仿真。对 C^4ISR 系统仿真引擎的设计有一定借鉴意义。

参考文献:

- [1] 何骏, 杜斌, 李聪. 面向对象离散事件仿真平台的设计 [J]. 计算机仿真, 2008, 25(7): 290-293.
- [2] 王磊, 陈明燕, 张伟, 等. 基于消息驱动的雷达仿真引擎控制算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(9): 1807-1812.
- [3] 刘军. Petri 网分析软件设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [4] 罗勤. 基于人工任务的工作流仿真引擎与仿真数据的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- [5] 唐文杰, 姚益平. 面向多核的并行离散事件仿真服务优化 [J]. 软件学报, 2013, 24(6): 1376-1389.
- [6] 王学慧, 张磊, 方粮, 等. 并行离散事件仿真中增量状态保存技术研究 [J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(1): 235-238.
- [7] 夏薇, 姚益平, 慕晓冬. 基于事件图的并行离散事件仿真方法 [J]. 计算机工程, 2012, 38(7): 1-3.
- [8] 顾启泰. 离散事件系统建模与仿真 [M]. 北京: 北京清华大学出版社, 1999.
- [9] 邓书晶. 计算机离散事件仿真的原理 [J]. 计算机与现代化, 2009, 166(6): 74-77.
- [10] 夏媛. 工作流仿真模型相关技术的研究 [D]. 湖南: 中南大学, 2007.
- [11] 邓克波, 程文迪, 雷鸣, 等. 基于离散事件仿真的防空 C^4ISR 系统结构评估 [J]. 兵工学报, 2014, 35(10): 1721-1728.

《系统仿真学报》荣获“2014 中国最具国际影响力学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心, 以美国汤森路透 Web of Science 收录的 1.2 万余种期刊为引文统计源, 首次研制发布了 2012《中国学术期刊国际引证年报》(CAJ-IJCR 年报)。第一次给出了我国 5600 余种中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标, 并采用了新的国际影响力综合评价指标 CI 对期刊排序, 发布了“中国最具国际影响力学术期刊”(排序 TOP5%)和“中国国际影响力优秀学术期刊”(排序 TOP5-10%), 在国内外学术界产生了较大反响。之后, 2013 年版年报, 将引文统计源期刊扩展到 1.44 万多种。目前, 2014 版国际、国内年报与 TOP5%和 TOP5-10%期刊的遴选业已完成, 《系统仿真学报》被列入“2014 中国最具国际影响力学术期刊”行列。

我学报连续 2 年被列入 TOP5%国内一流的中国最具国际影响力学术期刊, 走向世界, 进入国际一流, 指日可待!