

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.07.005

舰艇编队航材快速补给的系统动力学模型

岳奎志¹, 韩维¹, 宋岩¹, 陈伟², 史建国¹

(1. 海军航空工程学院 7 系, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 92514 部队 9 分队, 山东 烟台 264000)

摘要: 为解决对大型水面舰艇编队所需的航材的供给不足问题, 建立带有自动调节系统的舰艇编队航材快速补给趋势的预测模型, 对舰艇编队航材快速补给进行研究。采用系统动力学方法, 构建影响舰载机分遣队快速补给效率的各元素因果回路图与存量流量图及预测模型, 并以系统动力学软件 Vensim PLE 5.9 为平台进行建模仿真。运行结果表明: 该模型在扰动条件下能进行航材快速补给趋势的预测, 可为舰载运输机分遣队快速补给方案的制定提供理论依据。

关键词: 航材补给; 舰载运输机; 系统动力学; 预测**中图分类号:** N945.12 **文献标志码:** A

System Dynamics Model on Rapid Supply of Spare Parts in Carrier Formation

Yue Kuizhi¹, Han Wei¹, Song Yan¹, Chen Wei², Shi Jianguo¹(1. No.7 Department, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. No. 9 Unit, No. 92514 Army of PLA, Yantai 264000, China)

Abstract: Establish the automatic regulatory systematic forecasting model about rapid supply of spare parts trend in carrier formation to solve the shortage of spare parts in the major surface carrier formation. Studied the rapid supply of spare parts for carrier formation with the method of system dynamics, this article built causal loop diagrams and stock and flow diagrams about every element of impacting the rapid supply rate of detachment in carrier plane and simulated on the basis of system dynamics software of Vensim PLE 5.9. The simulation results show that this model can predict the rapid supply trend of spare parts under condition of perturbation, and provide the theoretical evidence for scheduling the rapid supply method from detachment in carrier aircraft.

Keywords: spare parts supply; carrier aircraft; system dynamics; predict

0 引言

现代大型水面舰艇编队的主要作战兵力是舰载机联队。舰载机联队中舰载机的种类比较多, 有战斗/攻击机、预警机、电子战飞机、直升机、反潜机、运输机和无人机等, 每种类型飞机的型号也有几种。因此, 舰载机联队中所需航材的型号和数量众多。舰艇编队在远洋作战训练时, 不可能在舰艇编队的航材库中配齐配足所有的航材。如果航材不足, 就需要进行航材补给。关于航材保障的研究有许多^[1-4], 但针对预测舰艇编队航材保障快速补给方案的研究并不多。使用舰载运输机分遣队对大型水面舰艇编队进行航材补给, 是一种快速有效的补给方案, 但在外界扰动条件下航材库存趋势如何, 相应的补给方案如何制定, 需要建立模型进行预测。因此, 笔者采用系统动力学方法, 建立带自动调节系统的舰艇编队航材快速补给模型。

1 系统动力学原理简介

系统动力学是系统科学理论与计算机仿真紧密

结合、研究系统反馈结构与行为的一门科学, 是系统科学和管理科学的一个重要分支^[5], 于 20 世纪 50 年代中期创立, 经过多年的发展和完善, 已经形成了完整的理论和方法学体系, 并开发出了一系列建模仿真软件, 如 DYNAMO、Vensim、DYSMAP 等, 由于它在实现复杂系统建模和行为模拟方面具有方法学优势, 已被多个学科作为方法学引入。

系统动力学模型将定量模型与概念模型相结合, 以反馈回路为基础。多重反馈环的存在使系统行为模式对大多数参数不敏感, 只要参数估计在其宽容度内, 系统行为模式就不会发生变化, 使其能够对存在的多重反馈因素、多维线性、高阶以及存在参数关系难以量化或数据缺乏的复杂时变系统进行研究^[6]。系统动力学原理无论在宏观领域、项目管理领域、学习型组织领域, 还是在物流与供应量领域、公司战略领域等中都有广泛应用, 解决了人们在经济、军事、生态等各种领域复杂的非线性巨系统反馈结构问题^[7-14]。

收稿日期: 2011-03-21; 修回日期: 2011-04-12

资助项目: 中国博士后科学基金(20080431386)

作者简介: 岳奎志(1981—), 男, 辽宁人, 硕士, 讲师, 从事系统工程、系统动力学、舰载机工程研究。

2 舰艇编队航材快速补给系统动力学模型

2.1 系统边界确定与基本假设

系统边界的确定主要取决于所研究和关心的变量及时间的跨度,以状态变量为中心可以比较容易地确定系统边界。笔者研究的主体是舰艇编队航材的补给,研究的边界只涉及与其相关的军事实体,具体包括舰艇编队航材库存和舰载运输机数量。笔者只研究以上军事实体间由于相互关系而构成的系统,不考虑可能存在的其它因素对于整个系统的影响。

舰艇编队远洋作战,航材补给具有诸多不确定因素。笔者主要对舰艇编队远洋作战时航材补给的关键过程和影响因素,特别是舰艇编队航材库存的动态变化过程进行研究,故对舰艇编队航材补给过程进行了适当的抽象和简化,提出如下假设:1) 舰载运输机可以运输舰艇编队舰载机联队所需的各种航材;2) 航材补给机场的航材库中拥有舰艇编队舰载机联队所需的各类航材,而且数量充足;3) 舰艇编队航材库只考虑由舰载运输机进行空运快速补给,不考虑由综合补给船对航材库进行航材海运补给;4) 航材空运路线防卫得当,并始终保持畅通,不受敌方兵力干扰;5) 航材快速补给在时间上是连续的;6) 在采用舰载运输机快速补给时,忽略航材补给种类和数量的影响,仅考虑航材重量的影响。

2.2 因果回路图分析

在明确系统边界与基本假设之后,就要分析因果回路。因果回路分析采用因果回路图,因果回路图就是系统各要素之间的反馈环分析图,是描绘复杂系统反馈结构的有力工具。

如图 1,舰艇编队航材快速补给因果回路图包含 B_1 和 B_2 2 个回路,其中 B_1 回路为“舰艇编队航材库存→航材库存缺口→航材库存调节量→期望的舰载运输机分遣队补给量→期望的舰载运输机数量→舰载运输机缺口→转场量→舰载运输机数量→舰载运输机分遣队补给量→舰艇编队航材库存”,而 B_2 回路为“舰载运输机数量→舰载运输机缺口→转场量→舰载运输机数量”。图 1 中 B_1 回路是含有延迟的大负反馈环,会引起编队航材快速补给系统的震荡,而 B_2 回路是普通的负反馈环,会引起编队航材补给系统的寻的行为。

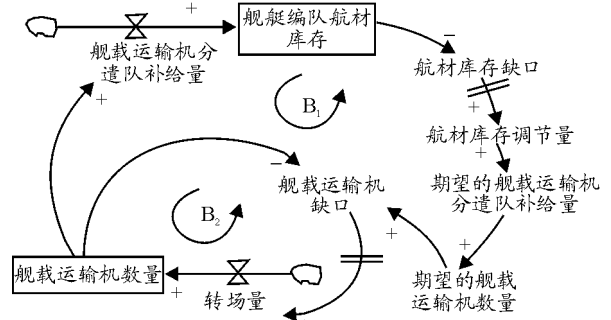


图 1 舰艇编队航材快速补给因果回路图

2.3 存量流量图分析

存量流量图是在因果回路图的基础上进一步区分变量的性质,用更加直观的符号刻画系统各要素之间的逻辑关系,明确系统的反馈形式和控制规律,是为深化研究系统打基础的图形表示法。舰艇编队航材快速补给的存量流量图是一种舰载运输机分遣队快速补给的结构描述,其图形表示所承载的信息远远大于文字叙述和因果关系,所表达的逻辑比叙述更为直观、准确。

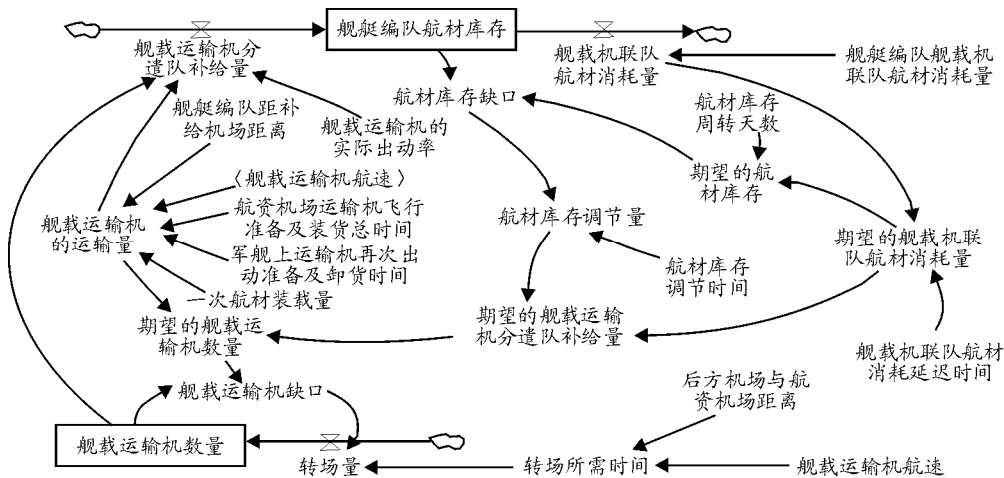


图 2 舰艇编队航材快速补给存量流量图

舰艇编队航材快速补给系统存量流量图由 2 个状态变量、3 个速率变量和 20 辅助变量构成,共计

有 25 个变量。以状态变量为核心建立了 2 个子系统:以舰艇编队航材为中心的舰艇编队航材库存子系

统、以舰载运输机数量为中心的快速补给载体子系统,还建立了以航材库存调节为中心的辅助变量群。子系统内各变量相互影响,子系统间存在关联关系见图 2。

在舰艇编队航材库存子系统中,状态变量是舰艇编队航材库存,速率变量是舰载运输机分遣队补给量和舰载机联队航材消耗量。在快速补给载体子系统中,状态变量是舰载运输机数量,速率变量是转场量。舰载运输机往返于航材补给机场与舰艇编队之间,对舰艇编队航材库进行补给。如果航材消耗量变大,航材库存就会下降,为了保障供给,需要加大补给量。舰载运输机的运输效率一定,为了提高补给量就得增加舰载运输机数量,就需要从本土基地的后方机场调运飞机来转场到航资机场以提高舰载运输机的数量。在航材库存调节辅助变量群中,期望的舰载机联队航材消耗量是带有延迟环节的,而航材库存周转天数是指航材库存能够满足舰载机航材消耗的时间周期,航材库存调节量是指在航材库存调节时间内航材库存缺口被消除的量。

2.4 方程建立

根据舰艇编队航材快速补给系统存量流量图建立方程如下:

$$\frac{dL_1(t)}{dt} = R_1(t) - X_1(t) \quad (1)$$

$$R_1(t) = L_2(t) \times \eta_{ys} \times \lambda \quad (2)$$

$$\eta_{ys} = D_{zz} / [(l_{hmjc} / v_{ys}) + t_{zh} + t_{xh}] \quad (3)$$

$$m_{qw}(t) = \frac{\mu_{bj}(t)}{\eta_{ys}} \quad (4)$$

$$\mu_{bj}(t) = \mu_{ij}(t) + \mu_{qwxh}(t) \quad (5)$$

$$\mu_{ij}(t) = \frac{L_{1qk}(t)}{t_{ij}} \quad (6)$$

$$L_{1qk}(t) = L_{1qw} - L_1(t) \quad (7)$$

$$L_{1qw} = \mu_{qwxh}(t) \times \sigma \quad (8)$$

$$\mu_{qwxh}(t) = \text{SMOOTH}(X_1(t), t_{yc}) \quad (9)$$

$$X_1(t) = X_{1xh}(t) \quad (10)$$

$$\frac{dL_2(t)}{dt} = R_2(t) \quad (11)$$

$$R_2(t) = \frac{m_{qk}(t)}{t_{zc}(t)} \quad (12)$$

$$t_{zc}(t) = \frac{l_{hjhz}}{v_{ys}} \quad (13)$$

$$m_{qk}(t) = m_{qw}(t) - L_2(t) \quad (14)$$

式中: $L_1(t)$ 为舰艇编队航材库存, t; $R_1(t)$ 为舰载运输机分遣队补给量, t/d; $X_1(t)$ 为舰载机联队航材消耗量, t/d; $L_2(t)$ 为舰载运输机架数; η_{ys} 为舰载运输机的运输效率, t/d; λ 为舰载运输机的实际出动率, 无因次; D_{zz} 为一次航材装载量, t; l_{hmjc} 为舰艇编队据补给机场距离, km; v_{ys} 为舰载运输机航速, km/d; t_{zh} 为航资机场运输机飞行准备及装货总时间, d; t_{xh} 为军舰上运输机再次出动准备及卸货时间, d; $m_{qw}(t)$ 为期望的舰载运输机架数; $\mu_{bj}(t)$ 为期望的舰载运输机分遣队补给量, t/d; $\mu_{ij}(t)$ 为航材库存调节量, t/d; $\mu_{qwxh}(t)$ 为期望的舰载机联队航材消耗量, t/d; $L_{1qk}(t)$ 为航材库存缺口, t; t_{ij} 为航材库存调节时间, d; L_{1qw} 为期望的航材库存, t; σ 为航材库存周转天数, d; t_{yc} 为舰载机联队航材消耗延迟时间, d; SMOOTH 为信息延迟函数; $X_{1xh}(t)$ 为舰艇编队舰载机联队航材消耗量, t/d; $R_2(t)$ 为转场量, t/d; $m_{qk}(t)$ 为舰载运输机缺口架数; $t_{zc}(t)$ 为转场所需时间, d; l_{hjhz} 为后方机场与航资机场距离, km。

3 仿真案例与分析

Vensim 是一个可视化的建模软件,可以描述系统动力学模型的结构,模拟系统的行为,并对模型模拟结果进行分析和优化,在系统动力学仿真中被广泛应用。故以系统动力学软件 Vensim PLE 5.9 为平台建模仿真。

舰艇编队远洋作战航材快速补给模拟数据初始值为 $L_1(t_0)=540$ t, $L_2(t_0)=4$ 架, $\lambda=0.75$, $D_{zz}=10$ t, $l_{hmjc}=800$ km, $v_{ys}=19\ 200$ km/d, $t_{zh}=0.125$ d, $t_{xh}=0.125$ d, $t_{ij}=3$ d, $\sigma=7$ d, $t_{yc}=0.25$ d, $l_{hjhz}=4\ 000$ km。本案例重点仿真在平衡状态下舰艇编队舰载机联队航材消耗量突然增加的情况,因此设 $X_{1xh}(t)=[90+\text{STEP}(20,20)]$ t/d, STEP(高度,起始点)为阶跃函数。模拟控制参数:初始时间=0 d,结束时间=90 d,数据记录步长=时间步长,时间步长=0.031 25 d。

图 3 为舰载机联队航材消耗量的实际值与期望值仿真图, X_1 实线表示舰载机联队航材消耗量。前

19 天区间每天消耗 90 t 航材, 在外界扰动条件下, 从第 20 天起突然增加到每天消耗 110 t 航材; μ_{qwxh} 虚线为期望的舰载机联队航材消耗量, 是时间延迟 0.25 d 的航材消耗量。因为航材消耗有一个时间向后延迟的过程, 所以在时间上期望的舰载机联队航材消耗量落后于舰载机联队航材消耗量。

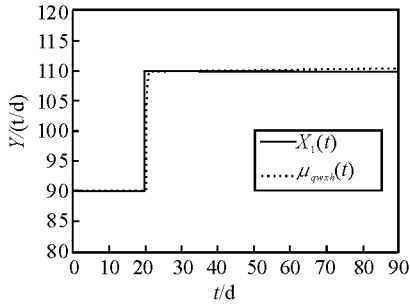


图 3 舰载机联队航材消耗量

图 4 为航材库存缺口仿真图, 航材库存缺口物理意义为期望的航材库存与舰艇编队航材库存之差, 而期望的航材库存的物理意义表示期望的舰载机联队航材消耗量与航材库存周转天数乘积, 换句话说, 期望的航材库存为: 假定航材库不再进行补给了, 所拥有的库存能够维持库存周转天数(本例为 7 d)的消耗量。图 4 中实线表示航材库存前 19 天期间每天缺口 90 t 航材, 从第 20 天起因舰载机联队航材消耗量突然增加到每天消耗 110 t 航材, 所以航材库存缺口突然增大到约 222 t, 达到一个峰值, 然后又快速下降, 最后当库存缺口为 110.004 t 时趋于平稳, 这是因为又增加了新的舰载运输机进行快速补给。

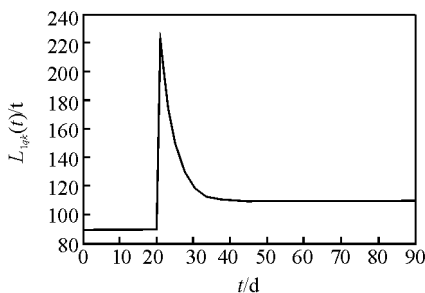


图 4 航材库存缺口

图 5 为航材库存调节量仿真图, 其物理意义为航材库存缺口在航材库存调节时间内的变化量, 本案例航材库存调节时间为 3 d, 前 19 d 时间内航材库存调节量为 30 t/d, 在第 20 天时刻航材库存调节量突然增大到约 74 t/d, 然后又先快后慢, 用时 19 d 下降至约 37 t/d, 最后航材库存调节量在 37 t/d 附近保持平衡。

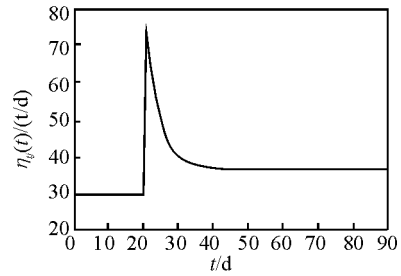


图 5 航材库存调节量

图 6 为舰载运输机分遣队补给量实际值与期望值仿真图, R_1 实线为舰载运输机分遣队补给量, μ_{bj} 虚线为期望的舰载运输机分遣队补给量。舰载运输机分遣队补给量前 19 天期间为 90 t/d 航材, 从第 20 天起, 因舰载机联队航材消耗量突然增加到 110 t/d, 所以舰载运输机分遣队补给量突然增大到约 136.68 t/d, 达到一个峰值, 然后又快速下降, 最后在 110 t/d 平稳地维持着, 时间调整了约 19 d。期望的舰载运输机分遣队补给量前 19 天期间为 120 t/d 航材, 从第 20 天起, 因舰载机联队航材消耗量突然增加到 110 t/d, 所以期望的舰载运输机分遣队补给量突然增大到约 183.47 t/d, 达到一个峰值, 然后又快速下降, 最后在 146.668 t/d 平稳地维持着, 时间调整了约 19 d。

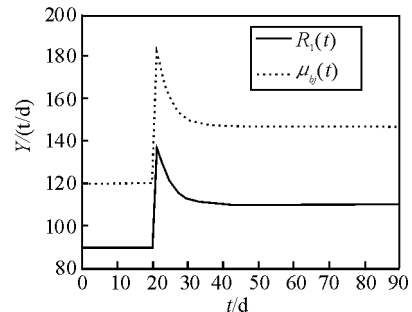


图 6 舰载运输机分遣队补给量

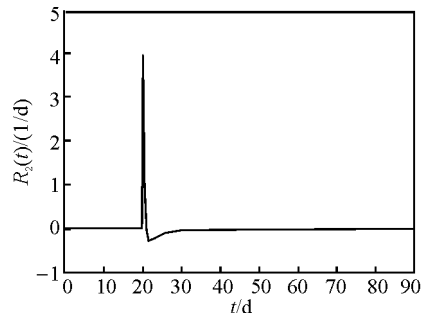


图 7 转场量

图 7 为舰载运输机转场量仿真图, 图中曲线表明: 前 19 天时间内舰载运输机转场量为 0, 从第 20 天起因舰载机联队航材消耗量突然增加到 110 t/d

航材, 舰艇编队航材库存减少, 所以需要增加运输机数量来进行补给航材, 舰载运输机需从本土机场调运转场, 转场量先正后负, 第 20 天转场量达到峰值, 约 4 架/d, 但持续时间很短, 不到 1 d, 接着转场量转负, 但幅度很小。

图 8 为舰载运输机数量实际值与期望值仿真图, 实线 L_2 为舰载运输机数量, 虚线 m_{qw} 为期望的舰载运输机数量。2 条曲线比较接近, 前 19 天 2 条曲线重合; 在外界扰动条件下, 从第 20 天开始, 虚线在实线之上, 到达峰值后, 虚线又改在实线之下, 最后 2 条曲线重合。舰载运输机的数量从 4 架, 升到 6 架, 最后平衡到 5 架。

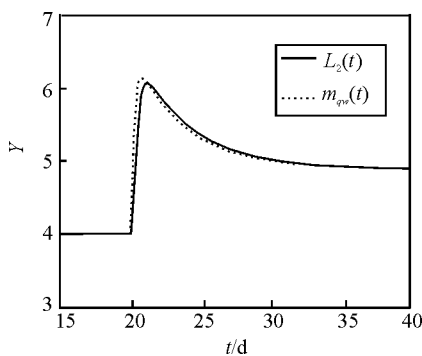


图 8 舰载运输机数量

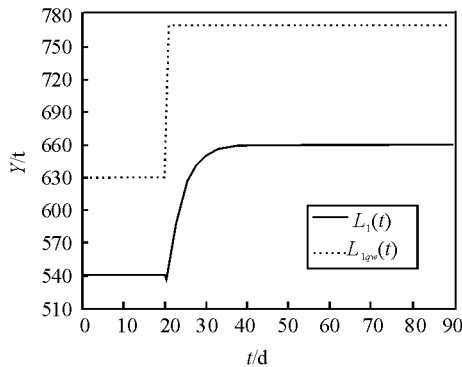


图 9 舰艇编队航材库存

图 9 为舰艇编队航材库存实际值与期望值仿真图, 实线 L_1 为舰艇编队航材库存, 虚线 L_{1qw} 为期望的舰艇编队航材库存。舰艇编队航材库存在前 19 天均为 540 t, 非常平稳; 在外界扰动条件下, 从第 20 天起先减少后增加, 航材库存减少是因为消耗增加而补给跟不上导致的, 增加是因为舰载运输机及时转场增加了舰载运输机的数量。最后, 在舰载运输机快速补给下, 舰艇编队航材库存维持在约

660 t。期望的舰艇编队航材库存前 19 天期间均为 630 t, 然后在第 20 天快速升到 770 t, 并且一直维持到最后。

4 结论

运用舰艇编队航材快速补给的系统动力学模型, 能够预测在扰动条件下舰艇编队航材库存的变化趋势, 以及在自动调节系统下调节舰载运输机数量来调节航材库存的变化趋势, 为舰艇编队远洋作战航材快速补给方案的制定提供了理论依据与技术基础。

参考文献:

- [1] 张瑞昌, 赵嵩正. 航材保障经费的优化配置研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(1): 102-104.
- [2] 车飞, 陈云翔, 王莉莉. 基于集对分析的航材保障效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(11): 140-143.
- [3] 杜俊刚, 杜鑫, 何亚群. 基于飞机使用可用度的航材二级库存优化配置[J]. 兵工自动化, 2009, 28(1): 39-44.
- [4] 陈校平, 车飞, 薛茹玲. 基于集对理论的航材保障效能分析及评估[J]. 兵工自动化, 2010, 29(5): 50-56.
- [5] 钟永光, 贾晓菁, 李旭. 系统动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 3-4.
- [6] 穆中林, 周中良, 于雷. 编队对地攻击作战效能评估的系统动力学方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(3): 565-570.
- [7] 杨东升, 张永安. 产学研合作的系统动力学分析[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(1): 140-144.
- [8] 唐旭, 张宝生, 邓红梅. 基于系统动力学的中国石油产量预测分析[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(2): 207-212.
- [9] Peter Milling. Modeling innovation processes for decision support and management simulation[J]. System Dynamics Review, 1996, 12(3): 211-234.
- [10] Jack B. Homer. A system dynamics model of national cocaine prevalence[J]. System Dynamics Review, 1993, 9(1): 49-78.
- [11] Radboud J. Duintjer Tebbens, Kimberly M. Thompson. Eradication versus control for poliomyelitis: an economic analysis[J]. The Lancet, 2007, 369(9570): 1363-1371.
- [12] Erling Moxnes. Not only the tragedy of the commons: misperceptions of bioeconomics[J]. Management Science, 1998, 44(9): 1234-1248.
- [13] 蔡丽影, 贾希胜, 程中华. 基于系统动力学的核心保障能力建设研究[J]. 系统仿真技术, 2011, 7(1): 29-35.
- [14] 李琰, 杨勇, 钟念. 基于知识传播的集群聚集能力系统动力学研究[J]. 系统管理学报, 2011, 20(1): 94-97.