

基于多智能体的海上垂直补给规划仿真研究

董鹏 吴翀 余鹏 文昊林

(海军工程大学管理工程与装备经济系 武汉 430033)

摘要 为了优化编队内海上垂直补给规划问题,制定了垂直补给运输方案。首先,分析了海上垂直补给的过程及可能出现的物资排队情况;然后,运用多智能体系统对海上补给过程进行了仿真建模,分别建立了“补给舰”“接收舰”“直升机”3种智能体,构建了基于多智能体的海上垂直补给规划模型。最后,分别对平时和战时两种环境下的垂直补给规划问题分别进行了仿真实验和分析,仿真结果验证了仿真模型的合理性。

关键词 多智能体,海上补给,垂直补给,规划,仿真

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A

Simulation Research on Offshore Vertical Replenishment Planning Based on Multi-agent

DONG Peng WU Chong YU Peng WEN Hao-lin

(Department of Management Engineering and Equipment Economic, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract In order to optimize the planning of vertical replenishment at sea in formation, this paper developed the optimal vertical replenishment transportation scheme. Firstly, the process of vertical replenishment at sea and the possible situation of material queuing are analyzed. Then, the multi-agent system is used to simulate and model the process of marine replenishment, and the replenishment ship, receiving ship and helicopter are established respectively. Three kinds of agents are used to build a vertical replenishment planning model at sea based on the multi-agent system. The simulation experiments and analysis of the vertical replenishment planning problems in peacetime and wartime were carried out respectively. The simulation results verify the rationality of the simulation model.

Keywords Multi-agent, Underway replenishment, Vertical replenishment, Planning, Simulation

1 引言

海上垂直补给是海上补给的主要方式之一。相较于横向补给等连接补给,其物资的运输时间较短,出库和入库时间相对较长,导致甲板上的物资搬运效率成了制约补给效率的关键因素。合理规划垂直补给对有效减弱搬运效率低下带来的影响具有重要意义。

海上垂直补给规划主要解决如何确定编队中舰船的补给顺序和物资运输次序问题。目前关于海上补给规划问题的研究主要是将海上补给规划抽象为数学问题,例如旅行商问题^[1]、改进旅行商问题^[2-3]、多目标规划问题^[4-6],或者构建系统动力学模型^[7]、排队论以及随机步长模型^[8-10],然后利用算法进行解析求解。然而,以往的研究中并没有考虑物资出入库的排队情况,而加入分析后,由于垂直补给各阶段的相关性以及时间的不确定性,难以用数学模型对其进行描述。

针对上述问题,可依托 Anylogic 仿真平台对问题进行求解,平台中采用的多智能体系统在表达实际系统时,通过各智能体间的通讯、合作、互解、协调、调度、管理及控制来表达系统的结构、功能及行为特性^[11]。运用各个智能体中的状态组件、变迁组件、消息组件等对海上垂直补给建模,使复杂问题抽象成了单一对象,每个智能体有自身的状态变迁及行为,具有良好的独立性,同时信息在智能体之间的传递,较好地解决

了海上垂直补给中的时间不确定性问题。

2 海上垂直补给过程分析

2.1 海上垂直补给步骤分析

海上垂直补给中,物资由补给舰的舱室出库至甲板,直升机在装载完成后,向接收舰所在位置移动,抵达接收舰上空后进行物资卸载并返航,然后重新回到补给舰甲板上空,准备下一批物资的吊运,同时接收舰甲板上的物资入库。按照实际的垂直补给作业过程,完整的补给循环可以分为6个步骤:物资出库、装载、运输、卸载、物资入库以及载具返还。

由于物资出入库排队情况并不会影响物资装载及运输两个步骤的连续性,因此将补给环节缩减为5个步骤。定义第*i*批物资从补给舰舱室出库的时间为 A_i ,第*i*批物资装载并运输到接收舰的时间为 D_i ,第*i*批物资卸载的时间为 U_i ,第*i*批物资入库的时间为 S_i ,第*i*批物资运输完毕后载具返回补给舰的时间为 R_i 。

2.2 海上垂直补给排队情况分析

物资出入库排队情况分别指补给舰物资出库甲板空闲情况和接收舰物资入库甲板拥堵情况。

补给舰物资出库甲板空闲指补给舰装卸搬运能力不足导致甲板空闲,从而使物资供给速度不足的情况。在连续的物资补给过程中,很可能发生如下情况:当上一批物资补给完成

且直升机返回到补给舰甲板时,当前批次的物资还未出库成功,从而直接导致补给作业进入等待状态,只有等到物资出库成功,才能开始补给作业。以第一次和第二次补给为例,当第一次补给完毕载具返回抵达补给舰甲板时,第二批物资还未出库完成,即 $A_1 + D_1 + U_1 + R_1 < A_1 + A_2$, 补给作业进入等待状态。第二批物资出库完成时,才能够开始第二批物资的补给作业,如图 1 所示,其中 T_1 即为直升机等待装载的时间。

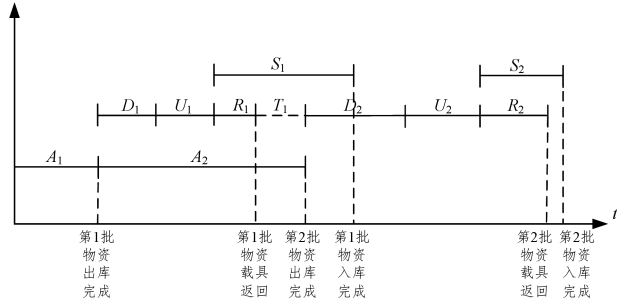


图 1 考虑补给舰物资排队情况的补给时间图

接收舰物资入库甲板拥堵情况指因接收舰装卸搬运能力不足导致物资在甲板堆积等待入库的情况。而且由于接收舰甲板容量有限,物资不能无限堆积,当处于排队状况的物资数量达到甲板容量上限时,就会导致补给作业进入等待状态,只有当甲板上的排队物资数量低于甲板容量时才能开始下一批次物资的补给。以第一次和第二次补给为例,假设接收舰接收甲板物资容量上限仅为 1。如果下一批物资抵达甲板时,上批物资未入库完成,即 $A_1 + D_1 + U_1 + R_1 + D_2 < A_1 + D_1 + U_1 + S_1$, 补给作业进入等待状态。第一批物资入库完成后,才能进行第二批物资的卸载作业,如图 2 所示,其中 T_2 即为直升机等待卸载的时间。

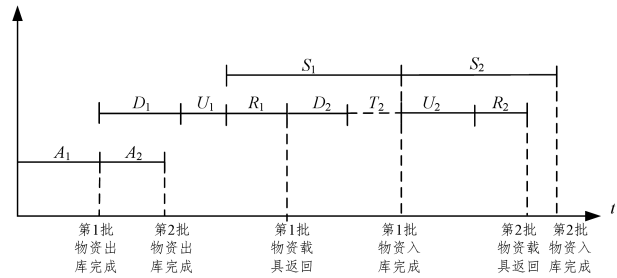


图 2 考虑接收舰排队情况的补给时间图

3 海上垂直补给模型建立

智能体作为具有自生行为及判断的实体对象,按照海上垂直补给的过程分析,分别建立“补给舰”“接收舰”“直升机”3 个智能体类型,3 个智能体之间的相互作用、相互联系共同构成了海上运输补给规划模型,如图 3 所示。

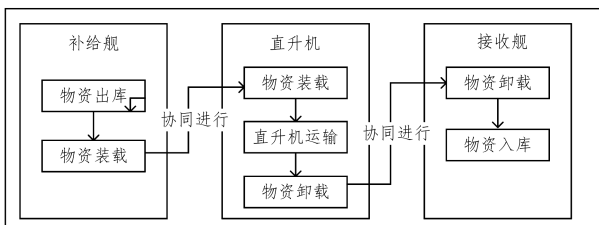


图 3 海上垂直补给模型

3.1 “补给舰”智能体

“补给舰”智能体作为补给活动的起点,负责补给顺序确

定、物资出库及物资装载活动。本文分别从智能体内部的参数、变量、状态变迁 3 个方面对“补给舰”智能体的逻辑行为进行分析。

内部参数有补给舰甲板物资容量、各种物资在补给舰上的出库速率。变量有总体物资需求、补给顺序、剩余待补物资、当前出库物资、当前补给轮次、甲板物资数量、甲板是否空闲。根据“补给舰”智能体所需要执行的行为及判断的变量,设置 4 个状态图(见图 4):甲板状态图、甲板工作图、装载工作图、补给迭代图。甲板状态图负责判断甲板是否空闲,状态的变迁取决于变量甲板物资数量的大小,甲板物资数量为 0 时处于空闲状态,甲板物资数量等于甲板容量时进入忙碌状态,这时补给舰停止出库活动。甲板工作图负责物资出库活动及补给顺序的确定,当甲板状态图不处于忙碌状态时,甲板工作图由空闲状态变迁到出库中状态,在出库中状态,补给舰将会从总体物资需求中选择需要补给的接收舰及物资种类,并将其记录到补给顺序中,同时按照当前出库的物资确定出库速率,在相应的出库时间结束后变迁到完成出库状态,甲板物资数量加一。装载工作图负责物资的装载活动,甲板物资数量不等于 0 时,状态图从装载空闲变迁到装载等待,通过条件进行判断,如果甲板上有直升机空闲就会变迁到装载中状态,经过一段时间的装载后装载完成,甲板物资数量减一。补给迭代状态图负责变量当前补给轮次的赋值,“接收舰”智能体每完成一次物资入库,就会将消息发回“补给舰”智能体,收到消息后,变量当前补给轮次加一,同时补给轮次可以与已记录的补给顺序相联系,方便“直升机”智能体读取所携带的物资种类及补给的接收舰。

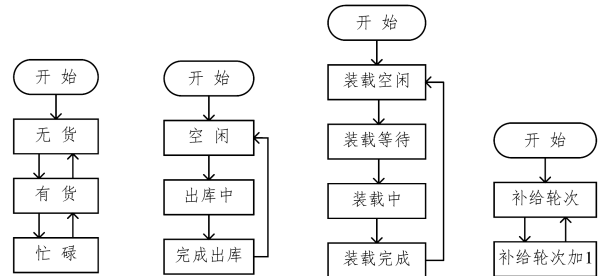


图 4 “补给舰”智能体状态图

3.2 “直升机”智能体

“直升机”智能体负责物资装载、物资运输及物资卸载活动。本文分别从智能体内部的参数、变量、状态变迁 3 个方面对“直升机”智能体的逻辑行为进行分析。

内部参数有直升机的飞行速度。变量有当前目标接收舰、当前运输物资、补给完成次数、是否可以装载。根据“直升机”智能体活动的连续进程,设置一个工作状态图(见图 5)。“直升机”智能体初始处于空闲状态,变量是否可以装载变为 true,当“补给舰”智能体中的变量甲板物资数量不等于 0 时,变迁到装载中状态,接收到补给舰发出的装载完成消息后,变迁至装载完成状态,同时“直升机”智能体会将消息中记录的接收舰和物资种类写入到变量当前目标接收舰及当前运输物资中,并开始向目标接收舰移动,变量是否可以装载变为 false。“直升机”智能体抵达目标接收舰后,进入运输抵达状态,同时判断目标接收舰甲板上的物资是否出现拥堵,如果出现拥堵则进入悬停状态,否则直接进入卸载状态,一定时间后

卸载完成,返回“补给舰”智能体位置,抵达后再次进入空闲状态。

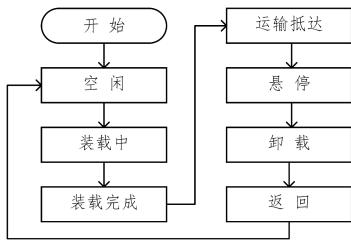


图5 “直升机”智能体状态图

3.3 “接收舰”智能体

“接收舰”智能体负责物资卸载及物资入库活动。本文分别从智能体内部的参数、变量、状态变迁3个方面对“接收舰”智能体的逻辑行为进行分析。

内部参数有接收舰甲板容量、各类物资的入库速度及对应的作战效能。变量有甲板物资数量、当前入库物资、物资入库队列、累计作战效能、是否能卸载。根据“接收舰”智能体所需要执行的活动及判断的变量,设置3个状态图(见图6):甲板工作图、接收状态图和补给状态图。

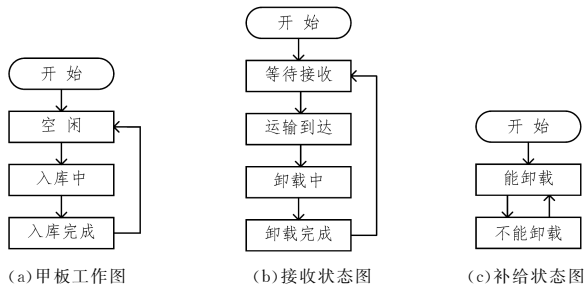


图6 “接收舰”智能体状态图

甲板工作图负责物资入库活动,初始甲板处于空闲状态,当变量甲板物资数量不等于0时,变迁到入库中状态,根据当前入库物资确定相应的入库速度,在相应的入库时间结束后入库完成,甲板物资数量减一。接收状态图负责物资卸载活动,最初处于等待接收状态,当直升机抵达接收舰后,变迁至运输到达状态,当补给状态图处于能卸载状态时,变迁至卸载中状态,经过一段时间后卸载完成,甲板物资数量加一。补给状态图负责判断变量是否能卸载,变迁条件取决于甲板物资

数量是否超过甲板容量。

3.4 参数变化实验

由于海上编队的作战任务不同,海上垂直补给的目标也不同,本文主要考虑平时、战时两种不同目标下的补给规划。平时的补给规划问题不确定性较小,以完成补给时间最短为目标建立模型。战时的补给需要考虑作战效能的特殊需求、物资的优先级等问题,通过以效能最大为目标、确定时间为约束建立模型。针对平时、战时不同的规划目标,分别进行参数变化实验。

4 案例仿真及结果分析

任务设定一个海上舰艇编队,有一艘补给舰进行伴随补给,携带有4种补给物资,编号为物资[1]—物资[4],补给舰配备有一架运输直升机,编队内有6艘作战舰艇需要补给,编号接收舰[0]—接收舰[5],需要找出平时补给时间最短目标下的补给顺序以及特定时间内作战效能最大目标下的补给顺序。为了方便衡量作战效能,物资数量统一以直升机运输批次为单位,作战效能为每类物资每批次边际作战效能,出入库速度单位统一为每小时出/入库的批次数量,编队内的各个作战舰艇对于各项物资的需求如表1所列,总计需要59批次的物资。

表1 物资需求表

	接收舰 [0]	接收舰 [1]	接收舰 [2]	接收舰 [3]	接收舰 [4]	接收舰 [5]	合计
物资[1]	5	1	1	1	3	2	13
物资[2]	1	2	3	3	5	4	18
物资[3]	2	4	3	2	1	1	13
物资[4]	1	3	4	4	2	1	15
合计	9	10	11	10	11	8	59

接收舰位置信息、物资入库速度及作战效能如表2所列,各接收舰甲板物资容量都设为2个批次。

补给舰位置设定为(250,250),4类物资的出库速度为(10,6,3,5),补给舰甲板物资容量为3个批次。

假设作战舰艇只需要4类物资,且补给舰所携带的物资数量始终能够满足作战舰艇的物资需求,即不存在物资短缺的情况,分别建立不同目标下的基于多智能体的海上垂直补给规划模型参数变化实验。

表2 接收舰信息

接收舰 序号	X坐标	Y坐标	物资1 入库时间	物资2 入库时间	物资3 入库时间	物资4 入库时间	物资1 作战效能	物资2 作战效能	物资3 作战效能	物资4 作战效能
[0]	50	50	5	2	1	2	4	2	1	2
[1]	450	50	4	2	1	4	3	1	1	3
[2]	250	100	7	3	2	3	2	3	1	2
[3]	100	400	6	4	3	4	3	3	2	3
[4]	400	400	4	2	2	3	4	1	1	2
[5]	250	500	7	2	1	4	4	1	1	3

平时最短时间目标下的参数变化实验中,设置迭代次数为10000次,模型运行结束后结果如图7所示,完成所有批次物资补给的最小时间为1038.063min,最优补给顺序如表3所列。

战时最大效能目标下的参数变化实验中,设置迭代次数为10000次,单次模型截止时间为700min,结果如图8所示,700min内所能取得的最大作战效能为103,最优补给顺序如表4所列。

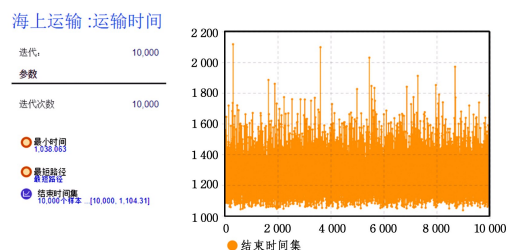


图7 基于平时目标下的参数变化实验结果

表 3 基于平时目标下的最优补给顺序

补给轮次	运输物资种类	目标接收舰	补给轮次	运输物资种类	目标接收舰	补给轮次	运输物资种类	目标接收舰
1	物资[1]	接收舰[3]	2	物资[1]	接收舰[2]	3	物资[1]	接收舰[0]
4	物资[2]	接收舰[2]	5	物资[2]	接收舰[2]	6	物资[2]	接收舰[5]
7	物资[3]	接收舰[2]	8	物资[4]	接收舰[4]	9	物资[4]	接收舰[1]
10	物资[2]	接收舰[0]	11	物资[1]	接收舰[4]	12	物资[2]	接收舰[3]
13	物资[4]	接收舰[4]	14	物资[4]	接收舰[5]	15	物资[2]	接收舰[1]
16	物资[1]	接收舰[5]	17	物资[4]	接收舰[3]	18	物资[4]	接收舰[1]
19	物资[3]	接收舰[4]	20	物资[2]	接收舰[1]	21	物资[4]	接收舰[2]
22	物资[3]	接收舰[5]	23	物资[4]	接收舰[0]	24	物资[2]	接收舰[4]
25	物资[4]	接收舰[2]	26	物资[4]	接收舰[3]	27	物资[2]	接收舰[2]
28	物资[1]	接收舰[1]	29	物资[4]	接收舰[2]	30	物资[2]	接收舰[3]
31	物资[2]	接收舰[4]	32	物资[1]	接收舰[5]	33	物资[3]	接收舰[0]
34	物资[3]	接收舰[1]	35	物资[2]	接收舰[4]	36	物资[2]	接收舰[3]
37	物资[3]	接收舰[1]	38	物资[2]	接收舰[4]	39	物资[4]	接收舰[1]
40	物资[4]	接收舰[2]	41	物资[1]	接收舰[0]	42	物资[3]	接收舰[2]
43	物资[1]	接收舰[0]	44	物资[3]	接收舰[2]	45	物资[3]	接收舰[0]
46	物资[2]	接收舰[5]	47	物资[2]	接收舰[5]	48	物资[2]	接收舰[4]
49	物资[2]	接收舰[5]	50	物资[4]	接收舰[3]	51	物资[3]	接收舰[1]
52	物资[1]	接收舰[4]	53	物资[3]	接收舰[3]	54	物资[4]	接收舰[3]
55	物资[1]	接收舰[4]	56	物资[3]	接收舰[1]	57	物资[1]	接收舰[0]
58	物资[3]	接收舰[3]	59	物资[1]	接收舰[0]			

通过参数变化实验可以得出,由于物资出入库排队情况的存在,平时目标下,若不进行海上垂直补给规划,一次补给计划的完成最大时间消耗可以超过 2 100 min,达到了最短时间的两倍之多,补给效率较低。战时目标下,若不进行海上垂直补给规划,700 min 时的作战效能最低接近 15,不足最大作战效能的 20%,补给效率低。因此,海上垂直补给规划对于有效减弱搬运效率低下带来的影响具有重要意义。

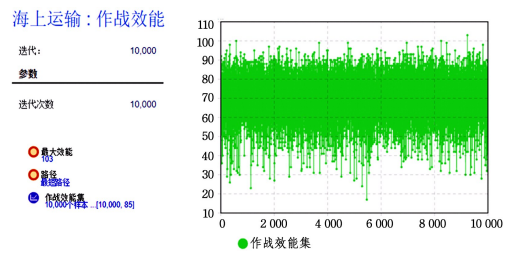


图 8 基于战时目标下的参数变化实验结果

表 4 基于战时目标下的最优补给顺序

补给轮次	运输物资种类	目标接收舰	补给轮次	运输物资种类	目标接收舰	补给轮次	运输物资种类	目标接收舰
1	物资[2]	接收舰[1]	2	物资[3]	接收舰[3]	3	物资[4]	接收舰[1]
4	物资[2]	接收舰[2]	5	物资[1]	接收舰[0]	6	物资[1]	接收舰[0]
7	物资[2]	接收舰[1]	8	物资[4]	接收舰[3]	9	物资[4]	接收舰[4]
10	物资[1]	接收舰[3]	11	物资[4]	接收舰[2]	12	物资[4]	接收舰[1]
13	物资[1]	接收舰[0]	14	物资[1]	接收舰[5]	15	物资[4]	接收舰[5]
16	物资[2]	接收舰[4]	17	物资[1]	接收舰[5]	18	物资[4]	接收舰[3]
19	物资[1]	接收舰[0]	20	物资[3]	接收舰[3]	21	物资[3]	接收舰[5]
22	物资[2]	接收舰[2]	23	物资[3]	接收舰[4]	24	物资[4]	接收舰[2]
25	物资[1]	接收舰[0]	26	物资[2]	接收舰[3]	27	物资[1]	接收舰[4]
28	物资[3]	接收舰[0]	29	物资[4]	接收舰[3]	30	物资[4]	接收舰[0]
31	物资[2]	接收舰[2]	32	物资[4]	接收舰[4]	33	物资[1]	接收舰[1]
34	物资[2]	接收舰[4]	35	物资[2]	接收舰[5]	36	物资[1]	接收舰[4]
37	物资[4]	接收舰[1]	38	物资[1]	接收舰[4]	39	物资[1]	接收舰[2]

结束语 海上编队的垂直补给规划关系到海上补给的效率及编队作战能力的保障,本文通过海上垂直补给过程分析,建立基于多智能体的海上垂直补给规划仿真模型,利用参数变化实验,得出在不同目标下的海上补给规划顺序,能够最大化补给效率及编队作战效能。本文模型还具有一定的延展性,模型仅仅考虑了一次补给计划的规划问题,并没有挖掘出各个具体参数对目标的影响,可以考虑通过调节时间比例,来进行补给效率对各个时间参数的敏感性分析,从而寻找下一步提升海上垂直补给效率的关键因素。

参 考 文 献

[1] HARDGRAVE,STEPHEN W. Determining the Feasibility of Replenishing a Dispersed Carrier Battle Group [D]. California: Naval Postgraduate School,1989.

[2] 余鹏,何学军. 基于蚁群算法的舰艇编队海上补给路径规划方法[J]. 海军工程大学学报,2014(2):108-112.

[3] 秦芙蓉,罗朝晖,董鹏. 基于 GTSP 问题的舰艇编队海上补给规划[J]. 兵工自动化,2018(10):28-31.

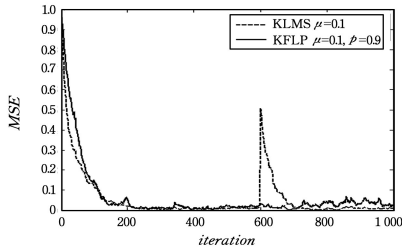


图2 在第600次迭代过程中出现冲激噪声时各算法的性能对比

从图2中可以很清晰地看出,KFLP算法的收敛速率小于KLMS算法。其原因在于KFLP算法是一个低阶范数类的算法,而此类算法的收敛速度普遍较慢。此外,在第600次迭代过程中出现一个冲激噪声干扰时,KLMS算法无法抑制干扰,而KFLP算法能有效地避免冲激噪声对算法收敛性能的影响。

实验3 此次实验中存在3%的非高斯冲激噪声干扰,其中 $p_r=0.03$ 。

图3给出了在存在3%的非高斯冲激噪声环境中,KFLP和KLMS算法的学习曲线。图3表明,基于分数低阶统计误差准则的核分式低次幂算法受冲激噪声的影响较小,而采用传统的均方误差准则的核最小均方(KLMS)算法的收敛性能较差。其原因在于KFLP算法的权重更新公式中存在瞬时估计误差的倒数系数 $\frac{1}{|e(n)|^{(1-p)}}$,这一特性使得在冲激噪声干扰下KFLP算法的权重向量更新将自动停止。

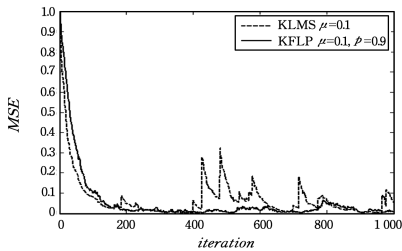


图3 冲激噪声干扰下各算法的归一化学习曲线对比

结束语 为了减少冲激噪声干扰的影响,本文提出了一种基于分数低阶统计误差准则的核分式低次幂算法。理论推导和仿真实验验证了KFLP算法的有效性和鲁棒性。未来的工作将会着重考虑如何提高KFLP算法的收敛速度以及完

善KFLP算法的理论分析。

参考文献

- [1] ENGEL Y, MANNOR S, MEIR R. The kernel recursive least-squares algorithm[J]. IEEE Transactions on signal processing, 2004, 52(8): 2275-2285.
- [2] LIU W, POKHAREL P P, PRINCIPE J C. The kernel least-mean-square algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(2): 543-554.
- [3] PARREIRA W D, BERMUDEZ J C M, RICHARD C, et al. Stochastic behavior analysis of the Gaussian kernel least-mean-square algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(5): 2208-2222.
- [4] CHEN J, GAO W, RICHARD C, et al. Convergence analysis of kernel LMS algorithm with pre-tuned dictionary[C] // 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2014: 7243-7247.
- [5] LIU W, PRINCIPE J C, HAYKIN S. Kernel adaptive filtering: a comprehensive introduction[M]. John Wiley & Sons, 2011.
- [6] GAO W, CHEN J. Kernel Least Mean MYM p MYM-Power Algorithm[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(7): 996-1000.
- [7] PEI S C, TSENG C C. Least mean p-power error criterion for adaptive FIR filter[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1994, 12(9): 1540-1547.
- [8] HAYKIN S. Kernel Adaptive Filtering: A Comprehensive Introduction[M]. 2010.
- [9] VAPNIK V. The nature of statistical learning theory [M]. Springer science & business media, 2013.
- [10] ARONSZAJN N. Theory of reproducing kernels[J]. Transactions of the American Mathematical Society, 1950, 68(3): 337-404.
- [11] BURGESS J C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition [J]. Data mining and knowledge discovery, 1998, 2(2): 121-167.
- [12] ZHU Z, GAO X, CAO L, et al. Analysis on the adaptive filter based on LMS algorithm [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(11): 4698-4704.
- [8] PATTERSON B L. An analytical approach to the operation of replenishment at sea[D]. California: Naval Postgraduate School, 1968.
- [9] WAGGONER M H. An analytical model for application to the operation of replenishment at sea[D]. California: Naval Postgraduate School, 1967.
- [10] BEVERIDGE J D. An analytical and computer simulation approach to the problem of replenishing task forces at sea[D]. California: Naval Postgraduate School, 1970.
- [11] 李杨, 徐峰, 谢光强, 等. 多智能体技术发展及其应用综述[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(9): 13-21.

(上接第75页)

- [4] DUNN J S. Scheduling Underway Replenishment as a Generalized Orienteering Problem [D]. California: Navy Postgraduate School, 1992.
- [5] BROWN G G, DEGRANGE W C, PRICE W L. Scheduling combat logistics force replenishments at sea for the US Navy[J]. Navy Research Logistics, 2017(8): 611-693.
- [6] 曹守启, 邵娇云, 陈莹, 等. 带有等待时间窗的补给运输船航路规划[J]. 计算机工程及应用, 2015, 51(1): 243-249.
- [7] 岳奎志, 韩维, 于承军, 等. 舰艇编队物资海上分段补给的系统动力学模型 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(3).