

doi: 10.7690/bgzdh.2019.02.005

基于 Lanchester 的航母编队弹药补给时机 SD 建模

王城超¹, 邹强², 王栋², 贾汝娜²

(1. 海军 91959 部队, 海南 三亚 572016; 2. 海军航空大学研究生队, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对因航母编队弹药消耗不确定而引起编队弹药补给时机的不确定性, 提出采用多元 Lanchester 方程对航母编队作战格斗进行建模, 对航母弹药补给时机进行了 SD 建模与仿真分析, 得到了航母及其附属舰艇弹药补给时间窗。仿真结果表明: 该模型具有可行性和有效性, 为航母编队弹药补给时机的确定提供了一种新方法和新思路。

关键词: 航母编队; 弹药补给时机; Lanchester 方程; SD

中图分类号: TJ41 **文献标志码:** A

SD Modeling of Ammunition Supply Timing Based on Lanchester

Wang Chengchao¹, Zou Qiang², Wang Dong², Jia Ru'na²

(1. No. 91959 Unit of Navy, Sanya 572016, China;

2. Brigade of Postgraduate, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Due to uncertainty of carrier battle group ammunition supply time because of uncertain ammunition consumption, the multiple Lanchester equation of the formation combat model is established based on the combat plan. SD modeling is established for the ammunition supply time of carrier battle group, simulation analysis is carried out and subordinate warship ammunition supply time window is acquired. The simulation analysis results show that the model is feasibly and effectively, and it can provide ammunition supply time determination with a new method and new thinking

Keywords: carrier battle group; ammunition supply time; Lanchester equation; SD

0 引言

由于航母编队作战的特殊性, 将导致其弹药消耗的不确定, 进而使航母编队弹药补给时机不确定, 所以开展航母编队弹药补给时机方面的研究尤其重要。国外方面, 暂未查到航母编队弹药补给时机方面的公开文献。国内方面, 未有航母编队弹药补给时机方面的公开文献, 仅能查到少数与弹药补给相关的文献[1-5]。这些文献大多数都是对弹药补给时机的定性描述, 弹药补给时机的定量研究较少。基于此, 笔者将 Lanchester 方程和 SD 结合起来, 从定量角度分析航母及其附属作战舰艇弹药补给时机。

1 基于 Lanchester 方程的编队作战建模与实现

1.1 基于 Lanchester 方程的编队作战建模

在 Lanchester 方程^[6-9]之后, 有人提出了针对多种作战单元的多元 Lanchester^[10]。笔者借用多元 Lanchester 来描述编队海上作战格斗模型中作战单元的多元化。

多元 Lanchester 方程突破了传统 Lanchester 方程单一作战单元类型的限制, 多元 Lanchester 方程

可以表示如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_i(t)}{dt} &= -\sum_{j=1}^n \varphi_{ji} \beta_{ji} y_j(t) \\ \frac{dy_j(t)}{dt} &= -\sum_{i=1}^m \lambda_{ji} \alpha_{ji} x_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$

式中参数及变量的含义如表 1 所示。

表 1 多元 Lanchester 方程中参数及变量含义

参数或变量	含义
m	红方作战单元种类数
n	蓝方作战单元种类数
$x_i(t)$	红方第 i 类作战单元在 t 时刻剩余的数量
φ_{ji}	蓝方作战单元的火力分配系数, 即蓝方第 j 类作战单元向红方第 i 类作战单元的射击比例
β_{ji}	蓝方 j 类作战单元对红方第 i 类作战单元的损耗系数
$y_j(t)$	蓝方第 j 类作战单元在 t 时刻剩余的数量
λ_{ji}	红方作战单元的火力分配系数, 即红方第 j 类作战单元向蓝方第 i 类作战单元的射击比例
α_{ji}	红方 i 类作战单元对蓝方第 j 类作战单元的损耗系数

1.2 基本作战作战想定

笔者将多元 Lanchester 方程用于航母编队作战格斗建模与实现, 而合理的航母编队作战格斗多元 Lanchester 方程的实现必然建立在特定作战想定的

收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2018-11-22

作者简介: 王城超(1993—), 男, 四川人, 硕士, 从事武器系统作战与保障管理研究。

基础上。笔者提出了编队海上作战建模方法和确定航母编队内作战舰艇弹药补给时机的方法，设置作战想定目的是为了验证所提方法的合理性；如果作战想定中设置的双方兵力(即编队中作战舰艇的数量)过多，可能会导致难以验证所提方法的合理性，如果作战想定中设置的双方兵力过少，达不到验证该方法的目标。基于此，双方作战想定如下，重点在于验证笔者所提方法的合理性。

基本态势想定：蓝方由 1 艘巡洋舰和 1 艘驱逐舰组成的舰艇编队以 30 kn 航速向红方航母编队行驶，红方的航母编队向蓝方舰艇编队相向航行；当双方编队相距在双方可攻击范围内时，双方编队进行相互攻击，假设双方编队作战平台上的作战单元均在对方可攻击范围内(即作战单元均满足攻击对方作战平台条件)。

红蓝双方的具体作战兵力见表 2。

表 2 红蓝双方的作战兵力

交战双方	作战平台	作战平台编号	作战单元	作战单元编号
红方	航母	红方作战平台 1	携空舰导弹的舰载机	红方作战单元 1
			携空空导弹的舰载机	红方作战单元 2
	驱逐舰	红方作战平台 2	反舰导弹武器系统	红方作战单元 3
			舰空导弹武器系统	红方作战单元 4
			反舰导弹武器系统	红方作战单元 5
			舰空导弹武器系统	红方作战单元 6
护卫舰	红方作战平台 3	反舰导弹武器系统	红方作战单元 1	
蓝方	巡洋舰	蓝方作战平台 1	反舰导弹武器系统	蓝方作战单元 1
			舰空导弹武器系统	蓝方作战单元 2
	驱逐舰	蓝方作战平台 2	反舰导弹武器系统	蓝方作战单元 3
			舰空导弹武器系统	蓝方作战单元 4

假设表中舰空导弹武器系统和携带空空导弹的舰载机只能打击空中目标(如弹药和飞机等)，故红方作战单元 2、红方作战单元 4、红方作战单元 6、蓝方作战单元 2 和蓝方作战单元 4 不会对对方作战平台造成损耗，即不影响火力分配系数，但会降低

敌方弹药对己方的损耗。

1.3 编队海上作战模型的 Lanchester 方程实现

根据上述红蓝双方作战兵力情况，红方有 6 个作战单元，蓝方有 4 个作战单元，建立编队双方作战格斗模型的多元 Lanchester 方程。

$$\begin{bmatrix} \frac{dy_1(t)}{dt} \\ \frac{dy_2(t)}{dt} \\ \frac{dy_3(t)}{dt} \\ \frac{dy_4(t)}{dt} \\ \frac{dx_1(t)}{dt} \\ \frac{dx_2(t)}{dt} \\ \vdots \\ \frac{dx_6(t)}{dt} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{11}\lambda_{11} & \alpha_{11}\lambda_{11} & \dots & \alpha_{16}\lambda_{16} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{21}\lambda_{21} & \alpha_{22}\lambda_{22} & \dots & \alpha_{26}\lambda_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{31}\lambda_{31} & \alpha_{32}\lambda_{32} & \dots & \alpha_{36}\lambda_{36} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{41}\lambda_{41} & \alpha_{42}\lambda_{42} & \dots & \alpha_{46}\lambda_{46} \\ \beta_{11}\varphi_{11} & \beta_{12}\varphi_{12} & \beta_{13}\varphi_{13} & \beta_{14}\varphi_{14} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \beta_{21}\varphi_{21} & \beta_{22}\varphi_{22} & \beta_{23}\varphi_{23} & \beta_{24}\varphi_{24} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta_{61}\varphi_{61} & \beta_{62}\varphi_{62} & \dots & \beta_{64}\varphi_{64} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \\ y_4(t) \\ x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_6(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中： $x_i(t)$ 表示红方第 i 类作战单元在 t 时间的剩余数量； $y_j(t)$ 表示蓝方第 j 类作战单元在 t 时间的剩余数量。

由于篇幅有限，笔者假定该多元 Lanchester 方程的损耗系数矩阵和火力分配系数矩阵为设置好的常数。

红方作战单元对蓝方作战单元和蓝方作战单元对红方作战单元的火力分配系数为 λ 和 φ 分别为：

$$\lambda = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \varphi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

多元 Lanchester 方程的损耗系数为每枚弹药单发攻击下的作战单元损耗。为了便于研究，将其转

换为每吨弹药攻击下敌方作战单元损耗系数，假设每枚弹药的平均质量为 1 000 kg，所以每吨弹药攻击下敌方作战单元损耗系数矩阵如下：

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0.0181 & 0.0242 & 0.0123 & 0.0234 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0127 & 0.0232 & 0.0154 & 0.0167 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0121 & 0.0220 & 0.0105 & 0.0253 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\beta = \begin{bmatrix} 0.0189 & 0.0148 & 0.0309 & 0.0253 & 0.0325 & 0.0325 \\ 0.0230 & 0.0193 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0249 & 0.0287 & 0.0277 & 0.0232 & 0.0388 & 0.0329 \\ 0.0212 & 0.0153 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

2 航母编队弹药补给时机 SD 建模^[11-13]

2.1 系统边界确定与基本假设

由于人类知识有限等因素，不可能对一个包含众多因素的模型进行分析，因此在建立系统动力学模型前，首先应该做的工作是确定系统边界。确定补给系统边界主要取决于研究的状态变量及其时间跨度。由于研究的主体是航母编队内航母及附属舰艇的弹药补给时机，所以系统边界只涉及研究主体相关的状态变量，具体包括航母弹药储备量、驱逐舰弹药储备量、护卫舰的弹药储备量以及红蓝双方作战单元兵力数量等。笔者研究以上状态变量及其影响要素构成的系统，而不考虑其他要素对该系统的影响。笔者研究的系统包括航母弹药补给子系统、驱逐舰弹药补给子系统、护卫舰弹药补给子系统和多元 Lanchester 对抗子系统。在航母编队作战过程中，影响编队弹药补给时机的因素中具有诸多不确定性，故对所建模型进行适当的抽象和简化，提出如下基本假设：

- 1) 对编队内各作战舰艇的弹药补给仅从弹药补给数量方面进行考虑，而不考虑弹药补给种类、体积的差异；
- 2) 弹药补给船储备量充足，能及时对编队内各作战舰艇补给弹药；
- 3) 编队内各作战舰艇的弹药补给在时间上是连续的，补给开始到结束之间的补给时间极短；
- 4) 在实际作战中，编队内各作战舰艇的兵力损耗和弹药消耗是离散化的，而文中假设兵力损耗和弹药消耗随时间变化是连续的。

2.2 系统因果关系分析

因果关系图能把复杂化的问题以简单因果关系

的形式表示出来。笔者分别以航母、驱逐舰和护卫舰为对象，绘制航母弹药补给子系统、驱逐舰弹药补给子系统、护卫舰弹药补给子系统和多元 Lanchester 格斗子系统的因果关系图。

1) 航母弹药补给子系统、驱逐舰弹药补给子系统和护卫舰弹药补给子系统。

由于航母弹药补给子系统、驱逐舰弹药补给子系统和护卫舰弹药补给子系统，三者因果关系具有较高相似性，所以重点对航母弹药补给子系统因果关系进行阐述，其余 2 个补给子系统不再赘述。

航母弹药补给子系统因果关系如图 1。

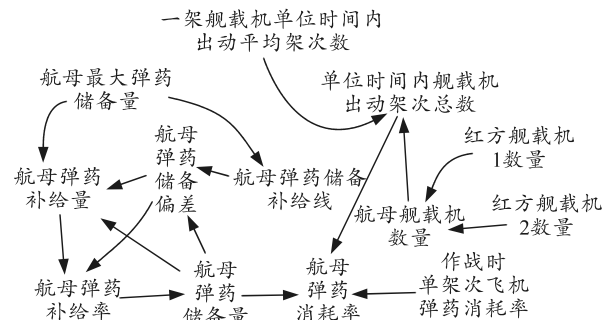


图 1 航母弹药补给子系统因果关系

依次类推，可得到驱逐舰弹药补给子系统及护卫舰弹药补给子系统因果关系，如图 2、图 3 所示。

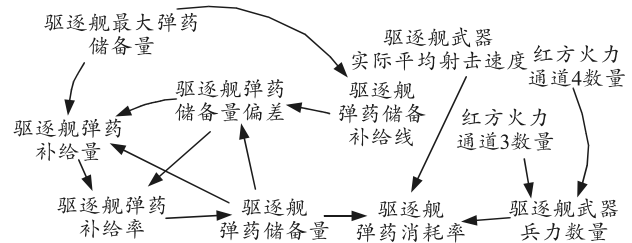


图 2 驱逐舰弹药补给子系统因果关系

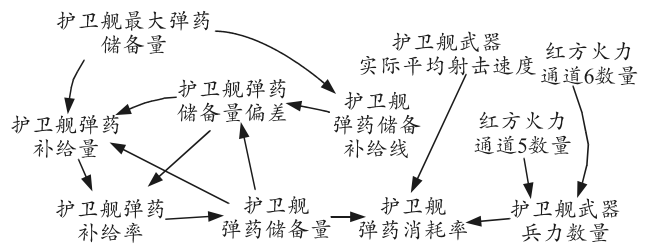


图 3 护卫舰弹药补给子系统因果关系

2) 多元 Lanchester 格斗子系统。

多元 Lanchester 格斗子系统因果关系如图 4。

2.3 系统流图模型

在系统边界确定及系统因果关系分析的基础上，结合编队弹药补给时机的实际情况，建立编队补给时机的流图模型。笔者使用 Vensim_PLE 软件将系统内各要素联系起来，建立系统流图模型，如图 5。

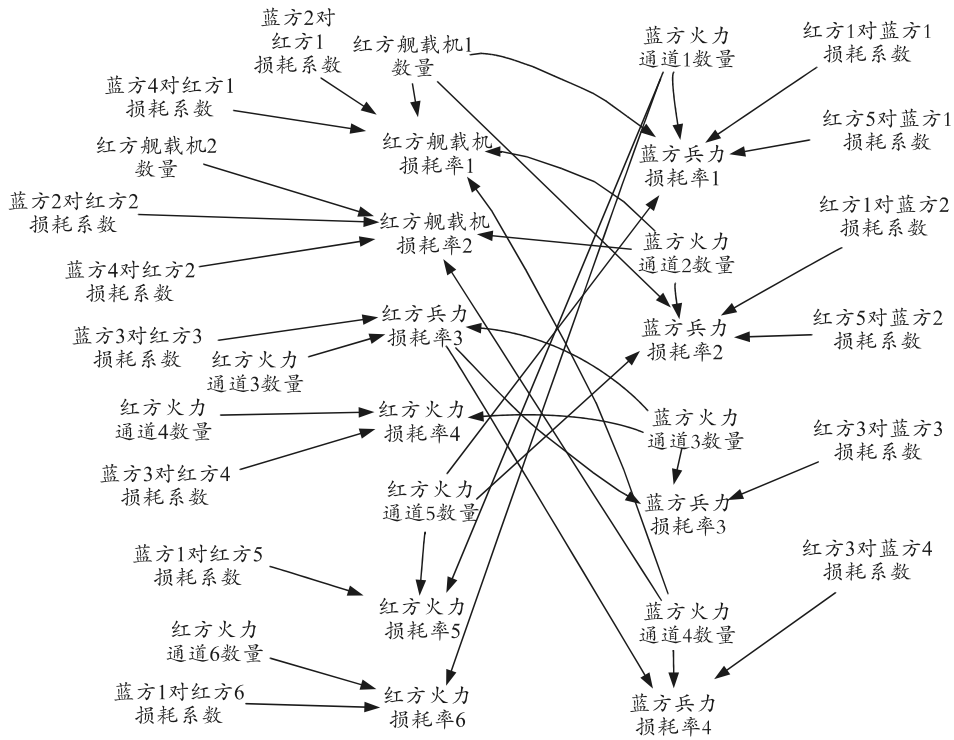


图 4 多元 Lanchester 格斗子系统因果关系

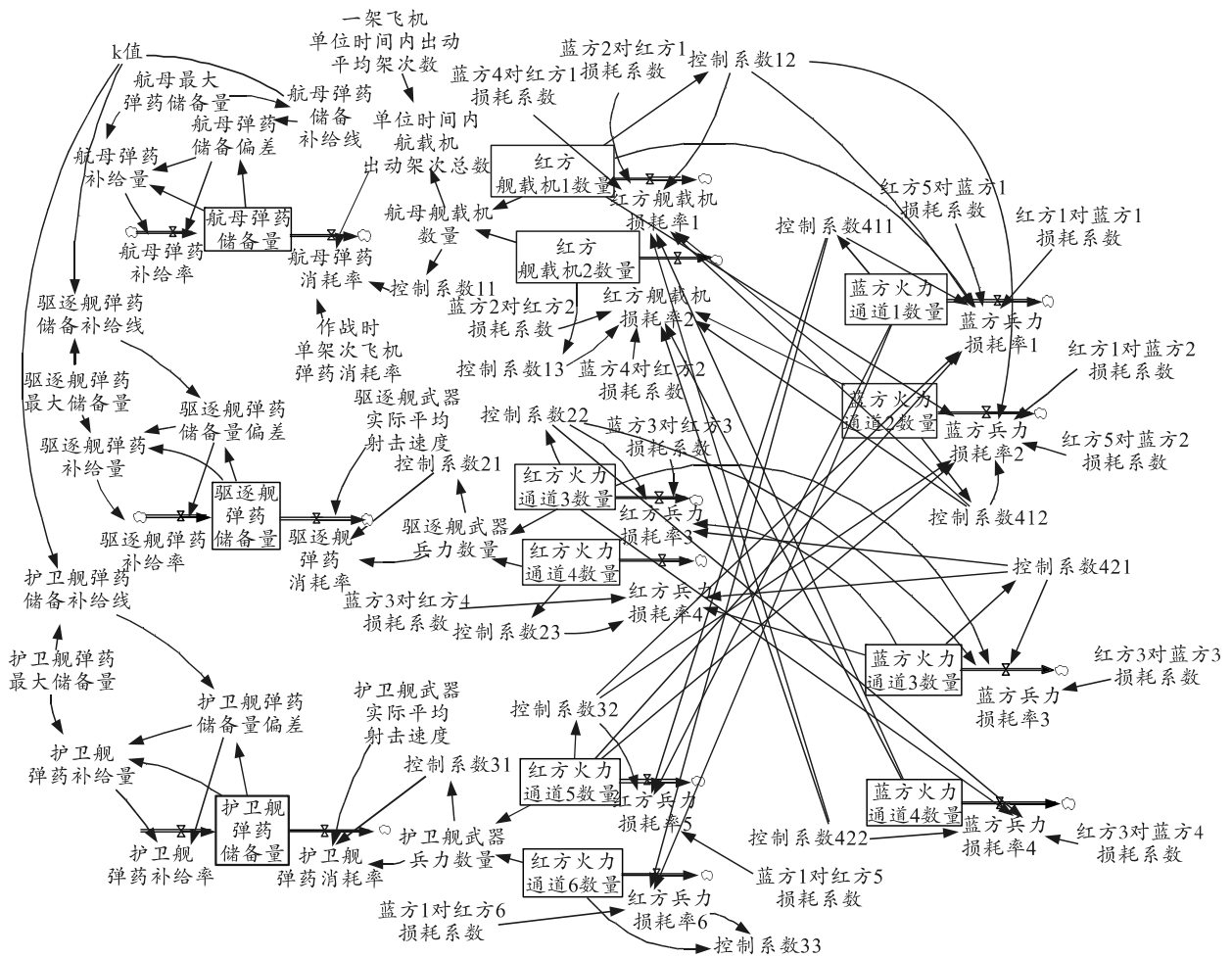


图 5 编队弹药补给存量流量

2.4 系统动力学模型变量及 DYNAMO 方程

在建立的模型存量流量图中，2 种最基本的变量是水平变量 (level variable) 和速率变量 (rate variable)，此外，还有辅助变量 (auxiliary variable) 和常量 (constant variable) 等重要变量。

基于建立的系统因果关系图和系统流图模型，进一步分析模型中变量间的定量关系，并将量化的变量关系转化为数学公式 (即 DYNAMO 方程)。

DYNAMO 方程是描述系统内变量之间关系的数学公式，DYNAMO 方程的构建是下文实例仿真分析中不可缺少的关键环节。

文中 DYNAMO 方程包括水平变量方程 (简称 *L*)、速率变量方程 (简称 *R*)、辅助变量方程 (简称 *A*) 和常量方程 (简称 *C*) 等。根据系统流图模型，结合上文作战想定及编队海上作战格斗建模与实现，建立的 DYNAMO 方程如表 3。

表 3 DYNAMO 方程

序号	方程类型	DYNAMO 方程	单位
1	<i>L</i>	航母弹药储备量 $P = \text{INTEG}(\text{航母弹药补给率} - \text{航母弹药消耗率}, 2000)$	t
2	<i>L</i>	驱逐舰弹药数量 $Q = \text{INTEG}(\text{驱逐舰弹药补给率} - \text{驱逐舰弹药消耗率}, 150)$	t
3	<i>L</i>	护卫舰弹药数量 $R = \text{INTEG}(\text{护卫舰弹药补给率} - \text{护卫舰弹药消耗率}, 100)$	t
4	<i>L</i>	红方舰载机 1 数量 $= \text{INTEG}(-\text{红方舰载机损耗率} 1, 40)$	架
5	<i>L</i>	红方舰载机 2 数量 $= \text{INTEG}(-\text{红方舰载机损耗率} 2, 40)$	架
6	<i>L</i>	红方作战单元 3 数量 $= \text{INTEG}(-\text{红方兵力损耗率} 3, 5)$	个
7	<i>L</i>	红方作战单元 4 数量 $= \text{INTEG}(-\text{红方兵力损耗率} 4, 6)$	个
8	<i>L</i>	红方作战单元 5 数量 $= \text{INTEG}(-\text{红方兵力损耗率} 5, 5)$	个
9	<i>L</i>	红方作战单元 6 数量 $= \text{INTEG}(-\text{红方兵力损耗率} 6, 5)$	个
10	<i>L</i>	蓝方作战单元 1 数量 $= \text{INTEG}(-\text{蓝方兵力损耗率} 1, 10)$	个
11	<i>L</i>	蓝方作战单元 2 数量 $= \text{INTEG}(-\text{蓝方兵力损耗率} 2, 10)$	个
12	<i>L</i>	蓝方作战单元 3 数量 $= \text{INTEG}(-\text{蓝方兵力损耗率} 3, 6)$	个
13	<i>L</i>	蓝方作战单元 4 数量 $= \text{INTEG}(-\text{蓝方兵力损耗率} 4, 6)$	个
14	<i>R</i>	航母弹药补给率 $= \text{IF THEN ELSE IF THEN ELSE}(\text{航母弹药储备偏差} \leq 0, \text{航母弹药补给量}, 0)$	t/h
15	<i>R</i>	航母弹药消耗率 $= \text{作战时单架次飞机弹药消耗率} \times \text{单位时间内舰载机出动架次总数} \times \text{控制系数} 11$	t/h
16	<i>R</i>	驱逐舰弹药补给率 $= \text{IF THEN ELSE}(\text{驱逐舰弹药储备偏差} \leq 0, \text{驱逐舰弹药补给量}, 0), 2, 0)$	t/h
17	<i>R</i>	驱逐舰弹药消耗率 $= \text{驱逐舰武器兵力数量} \times \text{驱逐舰武器实际平均射击速度} \times \text{控制系数} 21$	t/h
18	<i>R</i>	护卫舰弹药补给率 $= \text{IF THEN ELSE}(\text{护卫舰弹药储备偏差} \leq 0, \text{护卫舰弹药补给量}, 0)$	t/h
19	<i>R</i>	护卫舰弹药消耗率 $= \text{护卫舰武器兵力数量} \times \text{护卫舰武器实际平均射击速度} \times \text{控制系数} 31$	t/h
20	<i>R</i>	红方舰载机损耗率 1 $= (\text{蓝方作战单元} 2 \text{ 数量} \times \text{蓝方} 2 \text{ 对红方} 1 \text{ 损耗系数} \times \text{控制系数} 412 + \text{蓝方作战单元} 4 \text{ 数量} \times \text{蓝方} 4 \text{ 对红方} 1 \text{ 损耗系数} \times \text{控制系数} 422) \times \text{控制系数} 12$	架/h
21	<i>R</i>	红方舰载机损耗率 2 $= (\text{蓝方作战单元} 4 \text{ 数量} \times \text{蓝方} 4 \text{ 对红方} 2 \text{ 损耗系数} \times \text{控制系数} 422 + \text{蓝方作战单元} 2 \text{ 数量} \times \text{蓝方} 2 \text{ 对红方} 2 \text{ 损耗系数} \times \text{控制系数} 412) \times \text{控制系数} 13$	架/h
22	<i>R</i>	红方兵力损耗率 3 $= \text{蓝方作战单元} 3 \text{ 数量} \times \text{蓝方} 3 \text{ 对红方} 3 \text{ 损耗系数} \times \text{控制系数} 22 \times \text{控制系数} 421$	个/h
23	<i>R</i>	红方兵力损耗率 4 $= \text{蓝方作战单元} 3 \text{ 数量} \times \text{蓝方} 3 \text{ 对红方} 4 \text{ 损耗系数} \times \text{控制系数} 23 \times \text{控制系数} 421$	个/h
24	<i>R</i>	红方兵力损耗率 5 $= \text{蓝方作战单元} 1 \text{ 数量} \times \text{蓝方} 1 \text{ 对红方} 5 \text{ 损耗系数} \times \text{控制系数} 32 \times \text{控制系数} 411$	个/h
25	<i>R</i>	红方兵力损耗率 6 $= \text{蓝方作战单元} 1 \text{ 数量} \times \text{蓝方} 1 \text{ 对红方} 6 \text{ 损耗系数} \times \text{控制系数} 33 \times \text{控制系数} 411$	个/h
26	<i>R</i>	蓝方兵力损耗率 1 $= (\text{红方舰载机} 1 \text{ 数量} \times \text{红方} 1 \text{ 对蓝方} 1 \text{ 损耗系数} \times \text{控制系数} 12 + \text{红方作战单元} 5 \text{ 数量} \times \text{红方} 5 \text{ 对蓝方} 1 \text{ 损耗系数} \times \text{控制系数} 32) \times \text{控制系数} 411$	个/h
27	<i>R</i>	蓝方兵力损耗率 2 $= (\text{红方舰载机} 1 \text{ 数量} \times \text{红方} 1 \text{ 对蓝方} 2 \text{ 损耗系数} \times \text{控制系数} 12 + \text{红方作战单元} 5 \text{ 数量} \times \text{红方} 5 \text{ 对蓝方} 2 \text{ 损耗系数} \times \text{控制系数} 32) \times \text{控制系数} 412$	个/h
28	<i>R</i>	蓝方兵力损耗率 3 $= \text{蓝方作战单元} 3 \text{ 数量} \times \text{红方} 3 \text{ 对蓝方} 3 \text{ 损耗系数} \times \text{控制系数} 22 \times \text{控制系数} 412$	个/h
29	<i>R</i>	蓝方兵力损耗率 4 $= \text{蓝方作战单元} 3 \text{ 数量} \times \text{红方} 3 \text{ 对蓝方} 4 \text{ 损耗系数} \times \text{控制系数} 22 \times \text{控制系数} 422$	个/h
30	<i>A</i>	单位时间内舰载机出动架次总数 $= \text{一架舰载机单位时间内出动平均架次数} \times \text{航母舰载机数量}$	架/h
31	<i>A</i>	航母弹药储备偏差 $= \text{航母弹药储备量} - \text{航母弹药储备补给线}$	t
32	<i>A</i>	航母弹药补给量 $= \text{IF THEN ELSE}(\text{航母弹药储备偏差} \leq 0, \text{航母最大弹药储备量} - \text{航母弹药储备量}, 0)$	t
33	<i>A</i>	航母弹药储备补给线 $= k \times \text{航母最大弹药储备量}$	t
34	<i>A</i>	航母舰载机数量 $= \text{红方舰载机} 1 \text{ 数量} + \text{红方舰载机} 2 \text{ 数量}$	架
35	<i>A</i>	驱逐舰弹药储备补给线 $= k \times \text{驱逐舰最大弹药储备量}$	t
36	<i>A</i>	驱逐舰弹药储备偏差 $= \text{驱逐舰弹药储备量} - \text{驱逐舰弹药储备补给线}$	t
37	<i>A</i>	驱逐舰弹药补给量 $= \text{IF THEN ELSE}(\text{驱逐舰弹药储备偏差} \leq 0, \text{驱逐舰最大弹药储备量} - \text{驱逐舰弹药储备量}, 0)$	t
38	<i>A</i>	驱逐舰武器兵力数量 $= \text{红方作战单元} 3 \text{ 数量} + \text{红方作战单元} 4 \text{ 数量}$	个
39	<i>A</i>	护卫舰弹药储备补给线 $= k \text{ 值} \times \text{护卫舰最大弹药储备量}$	t
40	<i>A</i>	护卫舰弹药储备偏差 $= \text{护卫舰弹药储备量} - \text{护卫舰弹药储备补给线}$	t
41	<i>A</i>	护卫舰弹药补给量 $= \text{IF THEN ELSE}(\text{护卫舰弹药储备偏差} \leq 0, \text{护卫舰最大弹药储备量} - \text{护卫舰弹药储备量}, 0)$	t
42	<i>A</i>	护卫舰武器兵力数量 $= \text{红方作战单元} 5 \text{ 数量} + \text{红方作战单元} 6 \text{ 数量}$	个
43	<i>A</i>	控制系数 11 $= \text{IF THEN ELSE}(\text{航母舰载机数量} > 0, 1, 0)$	—

续表 3 DYNAMO 方程

序号	方程类型	DYNAMO 方程	单位
44	A	控制系数 12=IF THEN ELSE(红方舰载机 1 数量>0, 1, 0)	—
45	A	控制系数 13=IF THEN ELSE(红方舰载机 2 数量>0, 1, 0)	—
46	A	控制系数 21=IF THEN ELSE(驱逐舰武器兵力数量>0, 1, 0)	—
47	A	控制系数 22=IF THEN ELSE(红方作战单元 3 数量>0, 1, 0)	—
48	A	控制系数 23=IF THEN ELSE(红方作战单元 4 数量>0, 1, 0)	—
49	A	控制系数 31=IF THEN ELSE(护卫舰武器兵力数量>0, 1, 0)	—
50	A	控制系数 32=IF THEN ELSE(红方作战单元 5 数量>0, 1, 0)	—
51	A	控制系数 33=IF THEN ELSE(红方作战单元 6 数量>0, 1, 0)	—
52	A	控制系数 411=IF THEN ELSE(蓝方作战单元 1 数量>0, 1, 0)	—
53	A	控制系数 412=IF THEN ELSE(蓝方作战单元 2 数量>0, 1, 0)	—
54	A	控制系数 421=IF THEN ELSE(蓝方作战单元 3 数量>0, 1, 0)	—
55	A	控制系数 422=IF THEN ELSE(蓝方作战单元 4 数量>0, 1, 0)	—
56	C	k_1, k_2 =待定(实例仿真时确定)	—

表中的相关说明：

1) 序号 4、5、15、20、21 和 30 中 DYNAMO 方程阐述了航母弹药消耗率和航母作战兵力(航母舰载机)损耗的定量关系；

2) 序号 6、7、17、22 和 23 中 DYNAMO 方程阐述了驱逐舰弹药消耗率与驱逐舰兵力损耗的定量关系；

3) 序号 8、9、19、24 和 25 中 DYNAMO 方程阐述了护卫舰弹药消耗率与护卫舰兵力损耗的定量关系；

4) k_1, k_2 的含义如下：通过设置弹药储备急补线 $Q_{急}$ 和弹药储备视补线 $Q_{视}$ ，将编队内作战舰艇的弹药储备量 $Q(t)$ 划分为不补区、视补区和急补区 3 个区域。不补区： $Q_{视} \leq Q(t)$ ；视补区： $Q_{急} < Q(t) < Q_{视}$ ；急补区： $Q(t) \leq Q_{急}$ 。记 $Q_{急} = k_1 Q_{max}$ ， $Q_{视} = k_2 Q_{max}$ ， Q_{max} 表示舰艇最大弹药储备量。

3 模型仿真及结果分析

3.1 基本数据输入

笔者选用的仿真软件是 Vensim PLE。在建立模型时，系统要求对模型的时间参数进行定义。时间参数定义如下：

INITIAL TIME=0;

FINAL TIME=100;

TIME STEP=1;

Unites for Time=小时。

流图模型中参数的输入如下：

航母最大储备量=2 000 t；作战时单架次飞机弹药消耗率=3 t/架；驱逐舰最大弹药储备量=150 t；护卫舰最大弹药储备量=100 t；蓝方 4 对红方 1 损耗系数=0.212 架/h；蓝方 2 对红方 1 损耗系数=0.023 架/h；蓝方 2 对红方 2 损耗系数=0.019 3 架/h；蓝方

4 对红方 2 损耗系数=0.015 3 架/h；蓝方 3 对红方 3 损耗系数=0.027 7 架/h；蓝方 3 对红方 4 损耗系数=0.023 2 架/h；蓝方 1 对红方 6 损耗系数=0.032 5 架/h；蓝方 1 对红方 3 损耗系数=0.030 9 架/h；红方 5 对蓝方 1 损耗系数=0.012 1 架/h；红方 5 对蓝方 1 损耗系数=0.012 1 架/h；红方 1 对蓝方 1 损耗系数=0.018 1 架/h；红方 1 对蓝方 2 损耗系数=0.024 2 架/h；红方 5 对蓝方 2 损耗系数=0.022 架/h；红方 3 对蓝方 3 损耗系数=0.015 4 架/h；红方 3 对蓝方 4 损耗系数=0.016 7 架/h；一架舰载机单位时间内出动平均架次数=1/12 架/h；驱逐舰武器实际平均射击速度=1/3 t/h 护卫舰武器实际平均射击速度=1/6 t/h； $k_1=0.7$ ， $k_2=0.6$ 。

3.2 仿真结果及其分析

将 DYNAMO 方程及相关参数设置输入到 Vensim 模型中， k 的取值分别 0.6 和 0.7，对建立的系统动力学模型进行 2 次仿真，结果如下。

1) 航母弹药补给时机分析。

图 6 中曲线 1 表示航母弹药补给点设置为航母弹药储备急补线时的弹药储备量变化曲线，曲线 2 表示航母弹药补给点设置为航母弹药储备视补线时的弹药储备量变化曲线。弹药储备量见表 4。

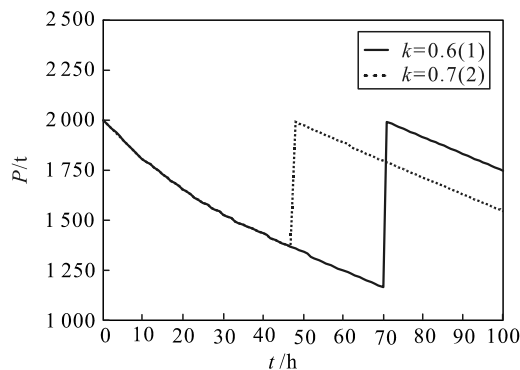


图 6 航母弹药储备量变化

表 4 部分时间航母弹药储备量

时间/h	航母弹药储备量/t	
	k=0.6	k=0.7
46	1 401.13	1 401.13
47	1 392.48	1 392.40
48	1 383.84	1 991.36
⋮	⋮	⋮
69	1 206.42	1 813.95
70	1 198.17	1 805.69
71	1 991.76	1 797.45

结合图 6 和表 4 可知：在该时间内曲线 1 和曲线 2 分别进行了一次弹药补给，其中曲线 2 的弹药补给时间约为 47 h，曲线 1 的弹药补给时间约为 70 h，所以在该段时间内航母弹药补给时间窗为 [47,70]。

2) 驱逐舰弹药补给时机分析。

图 7 中，曲线 1 表示驱逐舰弹药补给点设置为驱逐舰弹药储备急补线时的弹药储备量变化曲线，曲线 2 表示驱逐舰弹药补给点设置为驱逐舰弹药储备视补线时的弹药储备量变化曲线。弹药储备量见表 5。

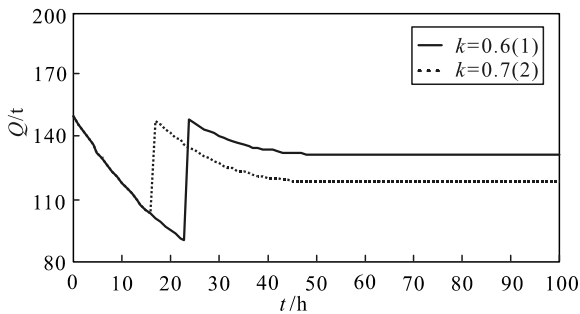


图 7 驱逐舰弹药储备量变化

表 5 部分时间驱逐舰弹药储备量

时间/h	驱逐舰弹药储备量/t	
	k=0.6	k=0.7
16	102.903 0	102.903
17	100.734 0	147.830
18	98.650 0	145.747
⋮	⋮	⋮
22	91.163 9	138.261
23	89.501 5	136.698
24	148.420 0	135.019

结合图 7 和表 5 可知：在该时间内曲线 1 和曲线 2 分别进行了一次弹药补给，其中曲线 2 的弹药补给时间约为 16 h，曲线 1 的弹药补给时间约为 23 h，所以在该段时间内驱逐舰弹药补给时间窗为 [16,23]。同时从图中可看出，t=46 h 之后该驱逐舰的弹药储备量一直未变动。

3) 护卫舰弹药补给时机分析。

图 8 中曲线 1 表示护卫舰弹药补给点设置为护卫舰弹药储备急补线时的弹药储备量变化曲线，曲线 2 表示护卫舰弹药补给点设置为护卫舰弹药储备视补线时的弹药储备量变化曲线。弹药储备量见表 6。

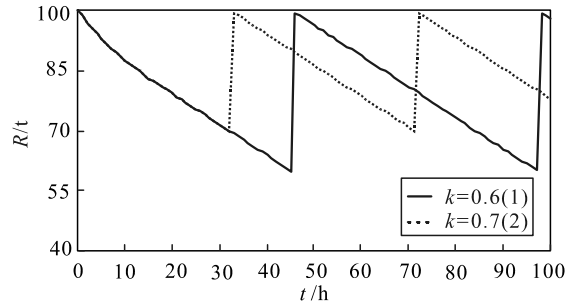


图 8 护卫舰弹药储备量变化

表 6 部分时间护卫舰弹药储备量

时间/h	护卫舰弹药储备量/t	
	k=0.6	k=0.7
32	69.74	69.74
33	68.97	99.23
⋮	⋮	⋮
45	59.68	89.94
46	99.23	89.16
⋮	⋮	⋮
71	79.88	69.82
72	79.10	99.23
⋮	⋮	⋮
97	59.75	79.88
98	99.23	79.10

结合图 8 和表 6 可知，在该时间内曲线 1 和曲线 2 分别进行了 2 次弹药补给。第一次补给，曲线 2 的弹药补给时间约为 32 h，曲线 1 的弹药补给时间约为 45 h，所以在该段时间内驱逐舰第 1 次弹药补给的时间窗为 [32,45]。第 2 次补给，曲线 2 的弹药补给时间约为 71 h，曲线 1 的弹药补给时间约为 97 h，所以在该段时间内驱逐舰第 1 次弹药补给的时间窗为 [71,97]。

4 结束语

笔者将 Lanchester 方程和 SD 结合起来，对航母及其附属作战舰艇弹药补给时机进行了定量分析。首先利用多元 Lanchester 方程对航母编队作战格斗建模，基于作战想定构建了编队海上作战格斗模型的多元 Lanchester 方程。根据该多元 Lanchester 方程，对航母及其附属作战舰艇的弹药补给时机进行了 SD 建模，确定了系统边界与基本假设，分析了该系统的因果关系，建立了该系统的流图模型和 DYNAMO 方程。最后进行了模型仿真及结果分析，得到了航母及其附属作战舰艇弹药补给时机，为航母编队弹药补给时机的确定提供了一种新方法和新思路。

参考文献：

[1] 徐维江, 陈学广. 弹药保障决策模型的研究[J]. 军械工程学院学报, 2001, 13(3): 52-55.

wb1013-04_proe_assyfem1_sim1 : Solution 1 结果
 Subcase - Static Loads 1, 静态步长 1
 应力 - 单元-节点, 平均, Von Mises
 最小值: 0.00, 最大值: 230.24, 单位 = N/mm²(MPa)
 变形: 位移 - 节点 幅值

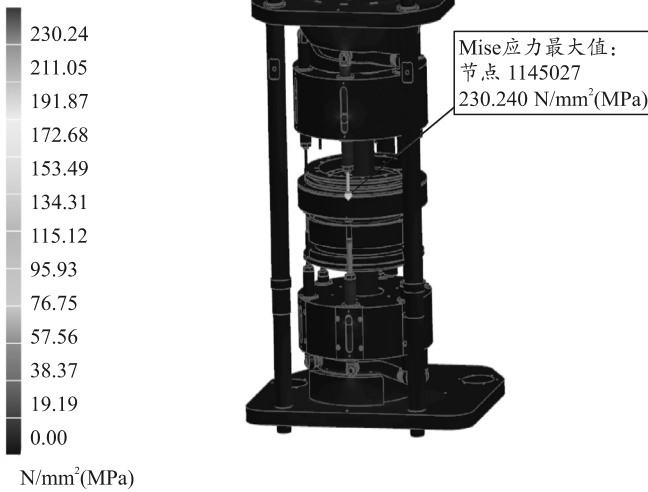


图 5 最大应力点位置

5 结束语

经过调试验证可知：笔者设计的大口径枪弹转子式结弹机结弹效率达到了 100 发/min，实现了大口径枪弹装配领域的技术突破。通过提高供料速度，还可进一步提升整机结弹效率。

参考文献：

[1] 马云富. 我国弹药装药装配技术现状及发展对策[J]. 兵工自动化, 2009, 28(9): 1-3, 14.
 [2] 童卓, 韩银泉, 熊长江, 等. 引信拧紧技术在某枪弹中的研究应用[J]. 兵器装备学报, 2015, 36(7): 148-150.
 [3] 舒泽胜, 刘锡朋, 赵建抒. 小口径炮弹底火自动拧紧专机研究[J]. 兵工自动化, 2014, 33(7): 75-78.
 [4] 高丰. 基于高速转子式结构的小口径枪弹装药装配设备与技术研究[J]. 兵工自动化, 2009, 11(4): 1-4.
 [5] 赵经文, 王宏钰. 结构有限元分析[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988: 144-168.

(上接第 28 页)

[2] 崔小雄, 徐廷学. 机载弹药精确供应保障研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2005, 20(6): 685-689.
 [3] 樊胜利, 柏彦奇, 秦键, 等. 面向装备作战仿真的弹药调拨供应决策建模方法研究[J]. 军械工程学院学报, 2011, 23(2): 1-6.
 [4] 王光源, 沙德鹏, 盛沛. 反舰导弹突击舰艇目标弹药消耗量建模仿真[J]. 兵工自动化, 2017, 36(6): 9-12.
 [5] 马懿, 卢昱, 陈立云, 等. 弹药供应保障指挥系统工作流程建模研究[J]. 指挥控制与仿真, 2011, 33(2): 71-75.
 [6] YAN J J, WANG Y, WANG X Y. Modeling and simulation of Lanchester Equation based on game theory[C]// International Conference on Business Management and Electronic Information. IEEE, 2011: 212-214.
 [7] CHEN X Y, JING Y W, LI C J, et al. Optimal strategies for winning in military conflicts based on Lanchester equation[J]. Control & Decision, 2011, 26(6): 945-948.

[8] JIANG N, CHEN X, HOU C, et al. Warfare Command Decision Making Analysis of Information Support Based on Lanchester Equation[C]// Chinese Control and Decision Conference, 2010: 1351-1353.
 [9] CHEN X Y, JING Y W, CHUN J L I, et al. Analysis of Optimum Strategy Using Lanchester Equation for Naval Battles like Trafalgar[J]. Journal of Northeastern University, 2009, 30(4): 535-538.
 [10] 陆凡, 刘志勤. 多元 Lanchester 方程在装备战损量预计中的应用[J]. 运筹与管理, 2007, 16(3): 90-96.
 [11] BARLAS Y. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics[J]. System Dynamics Review, 1996, 12(3): 183-210.
 [12] RICHARDSON G P, PUGH A L. Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO[J]. Journal of the Operational Research Society, 1997, 48(11): 1146-1146.
 [13] MACFARLANE A G J. Introduction to System Dynamics[J]. Electronics & Power, 2009, 14(1): 42.