

doi: 10.7690/bgzdh.2019.10.014

# 基于蚁群算法的舰载武器共架发射时域协调方法

郭小威, 向哲

(中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

**摘要:** 为解决舰载共架武器发射弹位及点火时机确定的问题, 以发射令控制的同心筒结构共架发射系统为对象, 提出一种新的时域协调方法。在分析燃气排导影响和初始弹道交叉等影响因素的基础上, 构建时域协调模型, 引入蚁群算法的核心思想, 通过对算法的调整与改进得到对时域协调模型的求解, 并通过实例进行验证。结果表明: 该方法可给出优化的舰载武器共架发射空域协调方案, 最大程度地发挥系统作战效能。

**关键词:** 共架发射; 时域协调; 发射时间间隔; 弹位选择; 蚁群算法

**中图分类号:** TJ760.2 **文献标志码:** A

## Time Coordination Method in Ship-borne Common-frame Weapons Launch Based on Ant Colony Algorithm

Guo Xiaowei, Xiang Zhe

(No. 92941 Unit of PLA, Huludao 125001, China)

**Abstract:** To determine fire unit selection and fire time of ship borne common-frame weapons, the concentric canister launcher controlled by launch order is taken as the object, and a new time coordination method is proposed. The time coordination model is built based on combustion gas exhaust, initial trajectory intersection and so on, and core concept of ant colony algorithm is brought in, adjusted and modified to solve the model. The model and the algorithm are verified with an arithmetic example. The results show that the method could offer optimized time coordination scheme to make fully effectiveness of the launcher extremely.

**Keywords:** common-frame launch; time coordination; launch time spacing; weapon unit selection; ant colony algorithm

### 0 引言

时域协调是指在时间上通过协调各武器控制系统发射点火时刻, 控制武器发射间隔时间, 以保证发射系统安全<sup>[1]</sup>。高密度的发射任务在有效的时域协调方法下, 可避免相邻发射武器间的相互干扰等问题, 保证较高的武器发射速率<sup>[2-4]</sup>。

时域协调的实质是序列武器发射时间间隔的控制。与空域协调一样, 时域协调的主要影响因素是燃气排导和初始飞行弹道交叉。根据作战任务, 在各型武器发射次序确定的情况下, 如何确定各型武器的发射弹位及点火时机将是影响共架发射系统作战效能发挥的主要因素, 也是笔者研究的主要内容。

### 1 时域协调模型建立

在舰载共架武器发射时域协调活动中, 武控系统可分为发射令控制和点火授权形式; 发射系统结构分为公共燃气排导和同心筒结构排导形式。笔者以基于发射令控制的同心筒结构共架发射系统为对象, 研究舰载武器共架发射的时域协调问题。

#### 1.1 符号说明

为便于舰载共架武器发射时域协调模型的数学表达, 将符号说明如下: 共架发射系统包含  $N$  个发射单元, 顺次编号为  $1, 2, \dots, N$ , 任一发射单元编号为  $n \in N = \{1, 2, \dots, N\}$ ; 共计装载武器型号  $M$  种, 顺次编号  $1, 2, \dots, M$ , 任一武器型号编号  $m \in M = \{1, 2, \dots, M\}$ ; 各单元装载的武器型号为  $v_n \in M$ , 若此单元没有装载武器或者武器已发射, 则  $v_n = 0$ ; 某次作战任务中发射武器数量为  $S$ , 武器型号依次为  $F = [F_1, F_2, \dots, F_s, \dots, F_S]$ , 其中,  $F_s \in M$ , 在武器发射坐标系下的位置为  $P^W = [P_1^W P_2^W \dots P_s^W \dots P_S^W]$ ; 所对应的攻击目标在武器发射坐标系下的位置为  $P^T = [P_1^T P_2^T \dots P_s^T \dots P_S^T]$ 。

共架武器发射相邻影响的表示:

将第  $s$  个发射的武器弹位号  $H_s$  在发射系统中的位置用第  $R_s$  行和第  $L_s$  列表示, 为  $\begin{bmatrix} R_s \\ L_s \end{bmatrix}$ ; 同理, 第  $s'$

收稿日期: 2019-04-24; 修回日期: 2019-06-01

作者简介: 郭小威(1986—), 男, 河南人, 博士, 工程师, 从事导弹武器装备试验建模与仿真研究。E-mail: hailangxianshen@163.com。

个发射的武器位置表示为  $\begin{bmatrix} R_s \\ L_s \end{bmatrix}$ 。用  $B_{s,s'}$  标识第  $s$  和  $s'$  个发射武器是否相邻, 值为 1 表示相邻, 0 表示不相邻, 即有

$$B_{s,s'} = \begin{cases} 1, \max\{|R_s - R_{s'}|, |L_s - L_{s'}|\} \leq 1 \\ 0, \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

弹道交叉影响的表示:

为简化计算, 将武器发射后在发射坐标系水平面上的投影作为判断是否交叉的依据。如图 1 所示, 弹道方向由武器发射位置  $P_s^W$  和攻击目标位置  $P_s^T$  确定。用  $C_{s,s'}$  标识第  $s$  和  $s'$  个发射武器是否发生初始弹道交叉, 交叉为 1, 否则为 0。弹道交叉判断方法为:

1) 判断所攻击目标是否在直线  $ss'$  同侧, 如果在同侧转 2), 否则弹道不交叉,  $C_{s,s'} = 0$ ;

2) 计算夹角  $\alpha$  和  $\alpha'$ , 如果  $\alpha + \alpha' < 180^\circ$ , 转 3), 否则弹道不交叉,  $C_{s,s'} = 0$ ;

3) 计算交点, 距离发射系原点的距离  $D_{OJ}$ , 如果大于设定值  $D_{\max}$ , 交点过远, 可认为不交叉,  $C_{s,s'} = 0$ , 否则  $C_{s,s'} = 1$ 。

综合有

$$C_{s,s'} = \begin{cases} 1, ss' \text{ 同侧}, \alpha + \alpha' < 180^\circ, D_{OJ} < D_{\max} \\ 0, \text{others} \end{cases} \quad (2)$$

共架武器发射的时域协调即是确定作战任务中依次发射武器的弹位号(即所在发射单元), 在考虑相邻发射武器间影响及弹道交叉情况下, 在最短的时间内将任务中所需武器发射完毕。这里将所发射武器的弹位号集合称为时域协调方案, 表示为:

$H = [H_1, H_2, \dots, H_s, \dots, H_S]$ , 其中,  $H_s \in N_{F_s}$ ,  $N_{F_s}$  为装载武器型号为  $F_s$  的弹位号集合  $N_{F_s} = \arg\{n | v_n = F_s\}$ 。

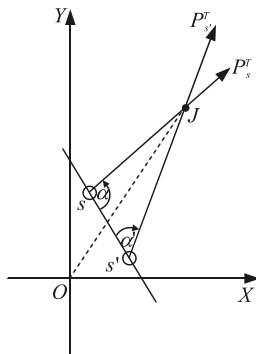


图 1 弹道交叉

### 1.2 发射时间间隔模型

基于发射令的共架发射武器发射时序反映了其发射活动的基本过程, 通用表示模型如图 2 所示, 主要时间节点表示为  $t_1, t_2, \dots, t_6$ 。

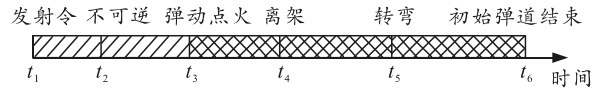


图 2 基于发射令控制的发射时序

如图 3 所示, 若将前一武器发射时序为  $t_{1p}, t_{2p}, \dots, t_{6p}$ , 当前武器发射时序为  $t_{1c}, t_{2c}, \dots, t_{6c}$ , 则发射时间间隔可定义为

$$t_{sp} = t_{1c} - t_{1p} \quad (3)$$

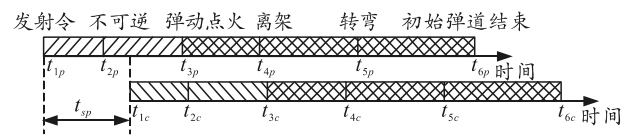


图 3 发射时间间隔

根据相邻发射武器的弹位位置及弹道交叉情况, 发射时间间隔分为:

1) 当  $B_{c,p} = 0$ ,  $C_{c,p} = 0$  时, 当前武器弹动点火时, 必须在前一武器离架并且经过适当的时间延迟之后, 设定延迟时间为  $\Delta t_d$ , 则有

$$t_{3c} \geq t_{4p} + \Delta t_d \quad (4)$$

联立式(3)和式(4), 反映在武器发射时序上, 表示为

$$t_{sp} \geq (t_{4p} - t_{1p}) - (t_{3c} - t_{1c}) + \Delta t_d \quad (5)$$

2) 当  $B_{c,p} = 1$ ,  $C_{c,p} = 0$  时, 当前武器弹动点火时, 必须在前一武器转弯之后, 此时发射时间间隔在武器发射时序上表示为

$$t_{sp} \geq (t_{5p} - t_{1p}) - (t_{3c} - t_{1c}) \quad (6)$$

3) 当  $B_{c,p} = 0$ ,  $C_{c,p} = 1$  时, 当前武器弹动点火时, 必须在前一武器转弯并且过预期弹道交叉点之后。设定前一武器转弯到过预期弹道交叉点所需时间为  $\Delta t_j$ , 则发射时间间隔表示为

$$t_{sp} \geq (t_{5p} - t_{1p}) - (t_{3c} - t_{1c}) + \Delta t_j \quad (7)$$

4) 当  $B_{c,p} = 1$ ,  $C_{c,p} = 1$  时, 发射时间间隔取情况 2)、3) 的最大值, 显然

$$t_{sp} \geq (t_{5p} - t_{1p}) - (t_{3c} - t_{1c}) + \Delta t_j \quad (8)$$

### 1.3 基于最短时间间隔的发射协调模型

空域协调的目的即是获得最优的协调方案, 以

使任务中武器发射用时最短，最大限度地提高发射系统的效能。反映在发射时间间隔方面，即是协调方案  $H$  中顺次发射的武器时间间隔之和最小。

用  $t_s^m$  表示武器型号  $m$  的发射时序， $t_{sp}^s$  表示第  $s$  个发射的武器与前一武器  $s-1$  的时间间隔，取 1.2 节中时间间隔  $t_{sp}$  的临界值，则  $t_{sp}^s$  综合表示为

$$t_{sp}^s = \begin{cases} 0, s=1 \\ \left( t_{4s}^{F_s} - t_{1s}^{F_s} \right) - \left( t_{3(s-1)}^{F_{s-1}} - t_{1(s-1)}^{F_{s-1}} \right) + \Delta t_d^s, s > 1, B_{s,s-1} = 0, C_{s,s-1} = 0 \\ \left( t_{5s}^{F_s} - t_{1s}^{F_s} \right) - \left( t_{3(s-1)}^{F_{s-1}} - t_{1(s-1)}^{F_{s-1}} \right), s > 1, B_{s,s-1} = 1, C_{s,s-1} = 0 \\ \left( t_{5s}^{F_s} - t_{1s}^{F_s} \right) - \left( t_{3(s-1)}^{F_{s-1}} - t_{1(s-1)}^{F_{s-1}} \right) + \Delta t_j^s, s > 1, C_{s,s-1} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

协调方案  $H$  下武器发射时间间隔之和为：

$$T(H) = \sum_{s=1}^S t_{sp}^s, F_s \in M, H_s \in N_{F_s} \quad (10)$$

最优时域协调方案  $H_{\text{best}}$  即是使  $T(H)$  值最小化。

时域协调方案的寻优与各型武器的发射时间参数直接相关，发射时序时间参数  $t_s^m$  及延迟时间  $\Delta t_d^m$  由武器设计特性确定；在弹道交叉情况下过预期弹道交叉点所需时间为  $\Delta t_j^s$ ，与前一武器初始飞行过程和距交叉点距离有关，对其进行简化处理，假设武器  $s-1$  在过交叉点前的平均飞行速度为  $v_{\text{mean}}^{s-1}$ ，则

$$\text{由图 1 可得 } \Delta t_j^s = \frac{D_{\text{OJ}}}{v_{\text{mean}}^{s-1}}.$$

## 2 改进蚁群算法求解

### 2.1 蚁群算法原理说明

蚁群算法 (ant colony optimization, ACO) 由意大利学者于 20 世纪 90 年代提出，解决了组合优化问题。该算法一般理解为蚂蚁构建解、信息素更新和操作执行 3 个过程的相互作用，产生之初是用于著名的旅行商问题 (traveling salesman problem, TSP) 求解<sup>[5-7]</sup>。笔者以此问题引入算法核心思想，为空域协调模型求解的算法实现打下基础。

TSP 是典型的组合优化难题，要求确定长度最短的 Hamilton 回路，遍历且只访问一次所有节点 (城市)。算法中蚂蚁随机选择下一个访问的城市，选择概率是相邻城市路径上存有轨迹量的函数；所有蚂蚁搜索到合法路径后，根据其走过的路线更新各个路径上的信息素。设蚁群规模为  $m$ ；城市个数  $n$ 、 $d_{ij}$  为两城市  $i$  和  $j$  间的距离； $\tau_{ij}$  是路径  $(i, j)$  上的信息素轨迹强度，初始时刻各路径强度  $\tau_{ij}(t)$  相同，

为一常数； $\eta_{ij}$  为路径  $(i, j)$  的能见度，表示由城市  $i$  转移到  $j$  的启发程度，由  $d_{ij}$  决定。 $P_{ij}^k$  表示  $t$  时间蚂蚁  $k$  由城市  $i$  转移到  $j$  的概率，公式为：

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t)}, j \in \text{allowed}_k \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

其中： $\text{allowed}_k = \{1, 2, \dots, n\} - \text{tabu}_k$  表示蚂蚁下一步允许选择的的城市集合， $\text{tabu}_k$  记录蚂蚁  $k$  走过的城市集合，随搜索过程动态调整； $\alpha$  和  $\beta$  为 2 个参数，分别反映了蚂蚁在搜索过程中所积累的信息和启发信息在蚂蚁选择路径中的相对重要度。

蚁群完成一次路径搜索为一个循环，路径信息素由下式调整：

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t, t+1); \quad (12)$$

$$\Delta \tau_{ij}(t, t+1) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t, t+1); \quad (13)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k(t, t+1) = \begin{cases} Q/L_k, \text{蚂蚁 } k \text{ 在本次循环中经过路径 } (i, j) \\ 0, \text{ 否则} \end{cases} \quad (14)$$

其中： $\Delta \tau_{ij}(t, t+1)$  表示本次循环中路径  $(i, j)$  上的信息素量； $1-\rho$  为信息素轨迹的衰减系数，通常设置系数  $0 < \rho < 1$  来避免路径上信息素的无限累加； $\Delta \tau_{ij}^k(t, t+1)$  表示蚂蚁  $k$  在时间  $(t, t+1)$  留在路径  $(i, j)$  上的信息素量； $L_k$  为蚂蚁  $k$  在本次循环中走过的路径总长度； $Q$  为调整系数。

### 2.2 协调模型的蚁群算法实现

受基本蚁群算法解决 TSP 问题启发，将空域协调方案表示为类似 TSP 中的一条路径。如图 4 所示，箭线经过的节点集合即是可行的协调方案。

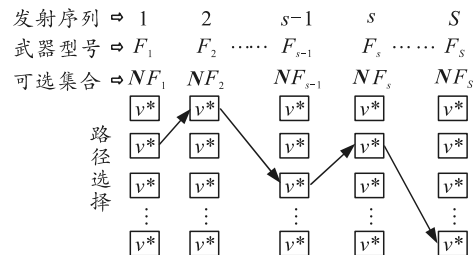


图 4 空域协调方案的蚂蚁路径表示

用蚁群算法对协调方案寻优，必须做以下调整：

- 1) 算法中禁忌表不是一个，而是有  $M$  个 (分别表示  $M$  种武器的可选弹位号)； $\text{allowed}_k^s$  初始为  $N_{F_s}$ ，

并随蚂蚁的选择而逐步减少；蚂蚁根据作战发射任务逐步随机选择。

2) 选择路径后，蚂蚁信息素  $\Delta\tau_{ij}$  不是留在路径  $(i, j)$  上，而是留在表示弹位号的节点  $i$  上。

3) 启发信息  $\eta_{ij}$  不由路径  $(i, j)$  长度  $d_{ij}$  决定，而由协调方案时间  $T(H)$  决定，表示共架发射间隔时间之和小的弹位号集合对蚂蚁更有吸引力，表示为

$$\eta_{ij} = Q_n / T(H) \tag{15}$$

式中  $Q_n$  为算法调节常数。

4) 式(14)中的  $L_k$  用协调方案发射时间间隔时间之和  $T(H)$  表示。

5) 通过引入参数  $q_0$  以充分利用先验信息，防止协调方案的跳跃变化，按照下式给出的规则使蚂蚁选择下一个节点：

$$g = \begin{cases} \arg \max_{j \in \text{allowed}_k} \{ \tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta \}, q < q_0 \\ G, \text{否则按式(11)进行概率搜索} \end{cases} \tag{16}$$

式中： $q$  是在  $[0,1]$  区间均匀分布的随机数； $G$  是根据式(11)给出概率随机选择的下一节点。

6) 引入节点上积累的信息素上下限  $\tau_{\max}$ 、 $\tau_{\min}$ ，以防止蚁群算法陷入局部最优。

### 2.3 算法的改进

蚁群算法作为启发式优化算法，路径按概率随机选择，也有可能陷入局部最优或出现算法停滞现象。这里对算法路径信息素更新机制进行改进，以弥补算法可能出现的缺陷。

1) 信息素变异更新。

蚁群算法中信息素是引导蚂蚁进行路径选择的唯一因素，而按照式(14)信息素更新具有迟滞性，即：如果更新不及时，有可能导致搜索到的更新最优解丢失。对此，作出以下规定：如果本次寻优过程发现更优的路径，将此路径上所有节点的信息素与原最优路径节点上的信息素互换，以尽量防止蚂蚁重新回归到原路径。

2) 精英策略。

类似于遗传算法中对优秀个体的保护，为了使蚁群算法中当前最优解在下一循环中对蚂蚁更有吸引力，在每次循环之后给予最优解以额外的信息素量。找出这个解的蚂蚁称作精英蚂蚁，这里只对找到最优解的蚂蚁采取精英策略。

精英策略防止了当前最优解的丢失，提高了最

优路径各节点上的信息素量，保证蚁群在当前最优解的基础上探索新的更优解。

3) 交叉算子。

随着信息素的累积，蚁群很容易倾向于选择信息素量大的节点，导致目标解可能陷于局部最优而无法扩大搜索范围。针对这一问题并结合本模型特点，笔者引入遗传算法中的交叉算子，对蚁群建立的路径产生“扰动”。操作方法如下：

当算法寻优停滞时，将当前最优路径上的随机 2 个节点位置互换，评估新产生的蚂蚁路径，如果新路径更优，交换两节点上的信息素值以引导下一循环中蚂蚁向新路径靠拢；否则，不替换并进入下一循环。

### 2.4 算法步骤

改进后的蚁群算法操作步骤如图 5 所示。

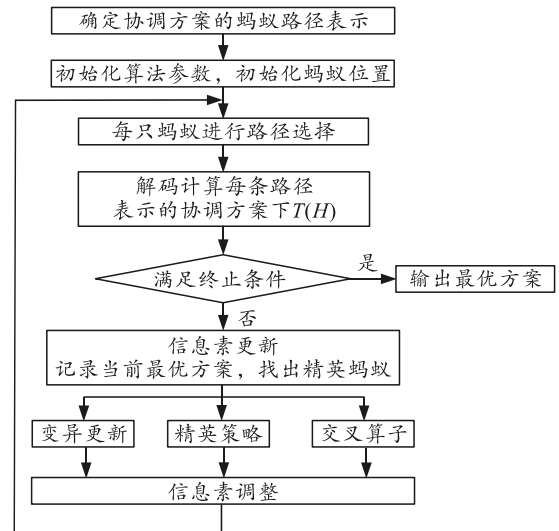


图 5 改进蚁群算法操作步骤

### 3 实例分析

某次作战任务中，共架发射系统武器型号装载数量为  $M=3$ ，弹位号布局及武器装载方案如图 7 所示；高强度发射武器数量  $S=10$ ，发射任务要求为  $F=[1\ 12\ 111\ 3\ 3\ 2\ 1]$ ，弹道交叉判断距离设为  $D_{\max}=2\ 000\ \text{m}$ ，所对应的攻击目标位置为

$$P^T = \begin{bmatrix} 20 & 28 & 30 & 40 & 40 & -5 & 45 & 45 & 30 & -5 \\ 45 & 50 & 50 & 40 & 40 & 55 & 35 & 35 & 50 & 55 \end{bmatrix} \times 10^3\ \text{m}。$$

三型武器发射时序时间参数见表 1。

表 1 武器发射时序参数

型号	$t_1/s$	$t_2/s$	$t_3/s$	$t_4/s$	$t_5/s$	$t_6/s$	$\Delta t_d/s$	$v_{\text{mean}}/(m/s)$
1	0	0.5	0.6	0.5	0.8	0.6	0.4	400
2	0	0.5	0.7	0.4	0.6	0.5	0.4	300
3	0	0.4	0.7	0.5	0.6	0.5	0.5	200

改进蚁群算法参数设置为：蚁群规模  $m=10$ 、痕迹强度因子  $\alpha=1$ 、启发信息因子  $\beta=2$ 、信息素挥发系数  $\rho=0.9$ 、算法调节常数  $Q_n=100$ 、先验选择概率  $q_0=0.4$ 。方案寻优过程如图 6 所示。

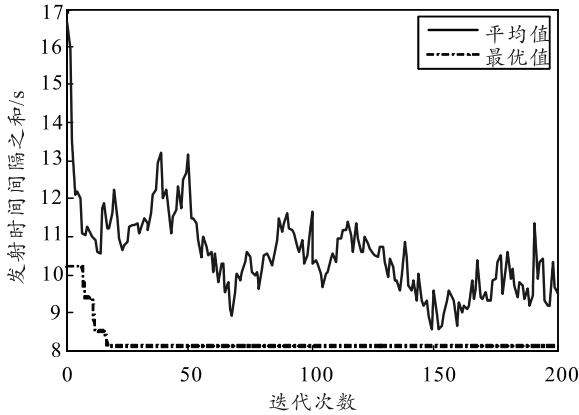


图 6 算法寻优过程

所求得舰载武器共架发射最优时域协调方案如图 7 所示，此时武器发射时间间隔之和为 8.1 s，各种武器发射时序如图 8 所示(以第 1 个武器发射起点为时间基准)。

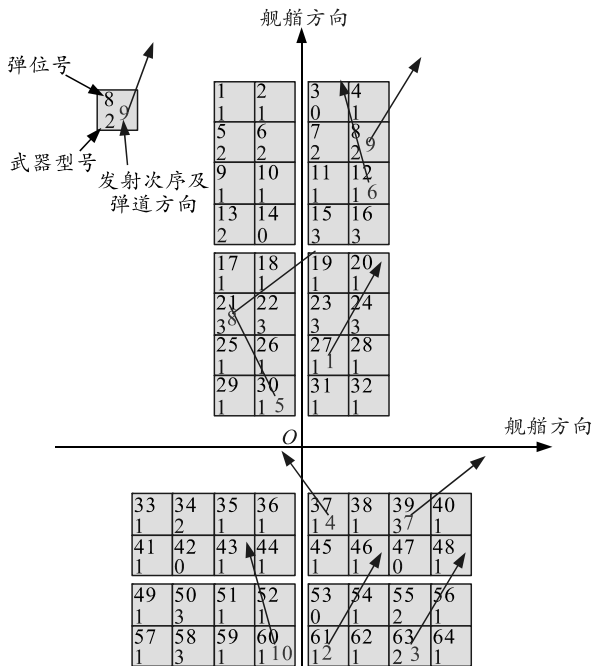


图 7 共架武器协调发射

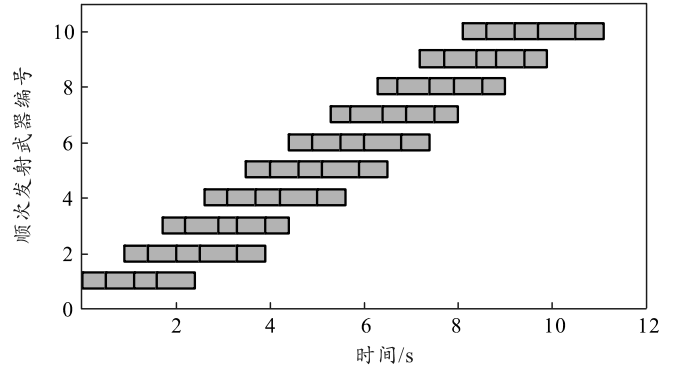


图 8 武器发射时序

### 4 结束语

笔者以基于发射令的同心筒共架发射系统为研究对象，以发射任务武器发射时间间隔之和最小化为优化目标，在考虑共架发射影响因素基础上，建立了时域协调模型，应用改进的蚁群算法进行求解，并得到了实例验证。验证结果表明：该方法运算时间短，可以满足发射任务协调的实时性要求。下一步将考虑易碎盖破片影响、震动冲击、舰艇配重平衡等其他因素的影响，完善协调模型，以实现具体的工程应用。

### 参考文献：

- [1] 邱志明, 王书满, 刘方. 舰载通用垂直发射技术概论 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2014: 13-16.
- [2] 刘方, 辜健, 邱志明, 等. 基于公共燃气排导结构的共架发射系统武器选择与布局方法[J]. 海军工程大学学报, 2013, 24(2): 53-56.
- [3] 刘方, 邱志明, 马溢清, 等. 多类型舰载武器共架发射弹位选择策略[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(5): 87-90.
- [4] 何朝勋, 戴宗妙. 同心筒式发射装置燃气排导研究[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(S1): 71-75.
- [5] 李士勇, 陈永强, 李研. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005: 36-38.
- [6] MAURO B, PAOLA P, MARCO D. On the Invariance of Ant Colony Optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(6): 732-741.
- [7] 黄亚平, 熊婧. 基于改进蚁群算法作业车间调度问题仿真研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(8): 278-282.