

doi: 10.7690/bgzdh.2023.07.011

基于拍卖算法的动态防空武器目标分配

强裕功, 宋贵宝, 刘 铁, 刘镇毓
(海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 为解决网络化防空作战中“制导平台-武器-目标”三者的优化匹配问题, 提出一种基于拍卖算法的武器目标分配(weapon-target assignment, WTA)问题求解方法。建立多约束条件下的动态武器目标优化分配模型, 将动态作战过程离散化为静态分配问题处理。实例验证结果表明, 该方法具备有效性、快速性。

关键词: 防空武器; 目标分配; 拍卖算法

中图分类号: TJ762 **文献标志码:** A

Dynamic Air Defense Weapon Target Assignment Based on Auction Algorithm

Qiang Yugong, Song Guibao, Liu Tie, Liu Zhenyu
(College of Coast Guard, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to solve the problem of optimal matching among guidance platform, weapon and target in networked air defense, a method for solving weapon-target assignment (WTA) problem based on auction algorithm is proposed. The dynamic weapon target optimal allocation model under multiple constraints is established, and the dynamic combat process is discretized into a static allocation problem. The example shows that the method is effective and fast.

Keywords: air defense weapon; target assignment; auction algorithm

0 引言

武器目标分配(WTA)问题也被称为导弹分配问题(missile allocation problem, MAP), 是军事运筹学领域中一个经典的约束组合优化问题, 最初由Manne引入作战研究领域。WTA问题的目标是将有限的防御武器分配给来袭目标, 以最大化防御效能, 是战场决策需要解决的重要问题^[1]。防空武器目标分配实质上就是防御作战资源与来袭目标的优化匹配, 这里的防御作战资源主要指防御武器及制导平台, 目标分配问题演变为“制导平台-武器-目标”三者的匹配优化问题^[2]。

在网络中心战(network-centric warfare, NCW)中, 分散的作战资源必须相互协调才能产生协同作战能力(cooperative engagement capability, CEC)。武器和制导平台作为防空作战系统的2种主要资源有着紧密的关系, 两者之间的相互协调是充分发挥协同作战能力的关键^[3]。在经典的OODA(观察、定位、决策、行动)作战循环中, 制导平台和武器分别发挥着观察和行动的作用^[4], “制导平台-武器-目标”配对是比较复杂的组合优化问题, 其复杂性主要来源于制导平台、武器的相互依赖, 这一问题对严重依赖于所有可用制导平台、武器智能使用的

网络中心战至关重要。在动态环境中, 制导平台、武器、目标是运动的, 这使得任一时刻对位置的预测存在不确定性, 同时还要考虑目标毁伤、新目标出现等随机情况的发生。

目前, 国内外对武器目标分配问题的研究已经较为深入, 主要集中于模型构建和求解算法设计²方面。现有研究成果对武器目标分配问题的研究大多考虑的是“武器-目标”匹配问题^[5-6], 很少将制导平台考虑在内。文献[7]建立了“传感器-武器-目标”三元组优化匹配模型, 并采用启发式方法对问题进行求解, 但并未考虑作战过程的动态随机性对所构建模型和求解算法的影响。笔者针对动态防空武器目标分配问题, 建立基于目标的优化分配模型并给出了约束处理方法, 介绍基于拍卖算法的决策过程, 并通过仿真实例验证了算法的有效性。

1 基于目标的优化分配模型

动态武器目标分配(dynamic weapon target allocation, DWTA)问题属于多阶段决策问题, 需要考虑战场态势的实时变化, 当前阶段的交战结果会影响后续决策, 其常用的射击策略为“射击-观察-射击”^[5], 如图1所示。

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-04-20

作者简介: 强裕功(1998—), 男, 山西人, 从事武器系统与运用工程研究。E-mail: 1443648847@qq.com。

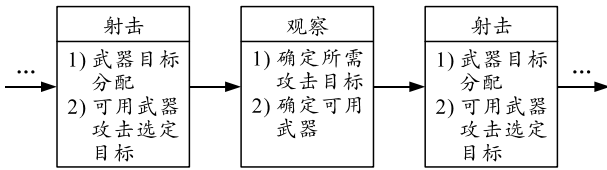


图 1 “射击—观察—射击”射击策略

在射击阶段，根据计算的武器目标分配方案对目标进行攻击，在观察阶段，决策者根据战场态势

确定可用的攻击武器以及所需攻击的目标。“观察—射击”过程类似于静态武器目标分配 (static weapon target allocation, SWTA) 问题^[1]，则 DWTA 问题可表示为^[5]：

$$DWTA = \{SWTA^{(1)}, SWTA^{(2)}, \dots, SWTA^{(T)}\}。 (1)$$

式中 T 为划分的阶段数。为表述清晰，给出所使用的变量及其意义如表 1 所示。

表 1 符号说明

符号	说明
$X^p = (x_{i,j,k}^p)_{s \times w \times t}$	制导平台—武器—目标分配矩阵 (如果阶段 P 制导平台 i 、武器 j 分配给目标 k ，则 $x_{i,j,k}^p = 1$ ；否则 $x_{i,j,k}^p = 0$)
$Y^p = (y_{ik}^p)_{s \times t}$	制导平台—目标分配矩阵 (如果阶段 P 制导平台 i 分配给目标 k ，则 $y_{ik}^p = 1$ ；否则 $y_{ik}^p = 0$)
$Z^p = (z_{jk}^p)_{w \times t}$	武器—目标分配矩阵 (如果阶段 P 武器 j 分配给目标 k ，则 $z_{jk}^p = 1$ ；否则 $z_{jk}^p = 0$)
$P^p = (p_{ik}^p)_{s \times t}$	阶段 P 制导平台捕获能力矩阵 (p_{ik}^p 表示阶段 P 目标 k 被制导平台 i 捕获的概率)
$Q^p = (q_{jk}^p)_{w \times t}$	阶段 P 武器杀伤能力矩阵 (q_{jk}^p 表示阶段 P 目标 k 被武器 j 杀伤的概率)
$V^p = (v_k^p)_{1 \times t}$	阶段 P 目标威胁矩阵 (v_k^p 表示阶段 P 目标 k 的威胁值)
m_k	同时分配给目标 k 的最大制导平台数
n_k	同时分配给目标 k 的最大武器数

笔者考虑 t 个来袭目标、 w 个防御武器以及 s 个制导平台的作战想定，以最大化目标毁伤为目标函数建立如下的优化分配模型：

$$\max J(X) = \max \{J(X^{(1)}), J(X^{(2)}), \dots, J(X^{(T)})\}; (2)$$

$$J(X^{(p)}) = J(Y^{(p)}, Z^{(p)}) = \sum_{k=1}^t v_k^p [1 - \prod_{i=1}^s (1 - p_{ik}^p)^{y_{ik}^p}] [1 - \prod_{j=1}^w (1 - q_{jk}^p)^{z_{jk}^p}]. (3)$$

约束条件为：

$$\sum_{k=1}^t y_{ik}^p \leq 1 \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, s\}, \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, T\}; (4)$$

$$\sum_{k=1}^t z_{jk}^p \leq 1 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, w\}, \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, T\}; (5)$$

$$\sum_{i=1}^s y_{ik}^p \leq m_k \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, t\}, \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, T\}; (6)$$

$$\sum_{j=1}^w z_{jk}^p \leq n_k \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, t\}, \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, T\}。 (7)$$

式(4)表示制导平台的最大跟踪能力，假设每个制导平台只能同时跟踪一个目标；式(5)表示武器的最大杀伤能力，本文中假设每个武器只能同时射击一个目标；式(6)和(7)分别表示分配给单一目标的最大制导平台数和最大武器数， m_k 、 n_k 通常根据来袭目标的威胁值、可用制导平台和武器的作战性能设定。如果一个制导平台或武器能够同时分配给多个目标，则进行如下处理：

1) 如果制导平台 i 能够同时分配给 m 个目标，

则将该制导平台等效为 m 个只能被分配给单一目标的虚拟制导平台，并且这 m 个虚拟制导平台对任意目标的捕获概率与原制导平台相同。

2) 如果武器 j 能够同时分配给 m 个目标，则将该武器等效为 m 个只能被分配给单一目标的虚拟武器，并且这 m 个虚拟武器对任意目标的杀伤概率与原武器相同。

根据拍卖算法求解问题的特点，需要将武器目标分配问题转化为“一对一”的形式^[8]，为此对式(6)和(7)进行如下处理：

1) 如果目标 k 能够同时被分配 m 个制导平台，则将该目标等效为 m 个只允许分配一个制导平台的虚拟目标，并且各制导平台、武器对这 m 个目标的作战效果相同。

2) 如果目标 k 能够同时被分配 m 个武器，则将该目标等效为 m 个只允许分配一个武器的虚拟目标，并且各制导平台、武器对这 m 个目标的作战效果相同。

此外，为便于构建收益矩阵，引入虚拟的制导平台、武器、目标，使得三者的数量相同，需要注意的是，为使三者数量相同而引入的虚拟制导平台、武器、目标不会带来任何效益，反映在收益矩阵上即相应位置为“0”。

文献[1]指出 DWTA 问题要获得全局最优解，其在每一阶段必须获得最优解。在多阶段 WTA 问题中，各阶段的决策过程类似，且随着作战过程的

进行, 由于作战消耗、作战毁伤等因素所需考虑的制导平台、武器、目标数会减少。笔者以相对复杂的最初阶段为例, 阐述基于拍卖算法的求解思想。

2 基于拍卖算法的武器目标分配

2.1 拍卖算法

拍卖算法由 D.P. Bertsekas 提出, 用于解决资源分配和网络流等问题。现有研究表明拍卖算法计算复杂性低、运行效率高, 能够很好地解决任务分配问题^[6-7], 其基本思想: 将 n 个物品拍卖给 m 个买家, 物品 j 的价格为 p_j , 物品 j 对于买家 i 的价值为 a_{ij} , 则将物品 j 分配给买家 i 的收益为 $a_{ij}-p_j$, 拍卖算法就是要找到能使所有买家的总收益最大的分配方案。实际迭代运算时为避免陷入死循环, 采用“ ε -互补松弛”策略, 限制每次竞标价格的变化范围, 拍卖算法中各买家相互竞争, 某一物品的归属取决于各买家的拍卖价格, 出价最高的买家能够得到其想获得的物品, 但这样也会使其收益降低。

2.2 算法设计

通过引入虚拟的制导平台、武器、目标可使三者的数量相同, 假设有 $s=w=t=n$ (n 为正整数), 此时可构建如下的收益矩阵:

$$B = \begin{pmatrix} b_{1,1}^1 & b_{1,1}^2 & \cdots & b_{1,1}^n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{1,n}^1 & b_{1,n}^2 & \cdots & b_{1,n}^n \\ b_{2,1}^1 & b_{2,1}^2 & \cdots & b_{2,1}^n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{2,n}^1 & b_{2,n}^2 & \cdots & b_{2,n}^n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n,1}^1 & b_{n,1}^2 & \cdots & b_{n,1}^n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n,n}^1 & b_{n,n}^2 & \cdots & b_{n,n}^n \end{pmatrix}。$$

式中 $b_{i,j}^k$ 表示将制导平台 i 和武器 j 分配给目标 k 的收益, 根据文献[3]有:

$$b_{i,j}^k = v_k \times p_{i,k} \times q_{j,k}。 \quad (8)$$

构建矩阵 $X=(x_{i,j})_{n \times n^2}$, 如果将制导平台 i 和武器 j 分配给目标 k , 则 $x_{i',j'}=1$, 其中 $i'=k$ 、 $j'=(i-1) \times n+j$, 否则 $x_{i',j'}=0$, 令

$$C=B \times X。 \quad (9)$$

则问题转化为求解使矩阵 C 梯度最大的 X 。

根据上文, 单一阶段的“制导平台—武器—目

标”匹配问题转化为:

$$\max \sum_{i=1}^{n^2} c_{i,i}。 \quad (10)$$

约束为:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{i,j}^k = 1; \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n x_{i,j}^k = 1; \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n x_{i,j}^k = 1。 \quad (13)$$

注: 令 $i=k'$, $j=(i'-1) \times n+j'$, 则 $x_{i',j'}$ 与 $x_{i,j}$ 表示的意义相同。

结合上述模型, 笔者提出的基于拍卖算法的“制导平台—武器—目标”优化匹配方法步骤如下:

1) 初始化相关参数: 取 $\varepsilon < 1/n$, 迭代计数器 $m=1$, 目标初始价格 $v_1 = \cdots = v_n = 0$, 制导平台初始价格 $w_1 = \cdots = w_n = 0$, 收益矩阵 B 乘以某一常数使得其中各元素均为整数, 分配矩阵 $X=(x_{i,j})_{n \times n^2}$ 中各元素均为 0。

2) 如果所有制导平台均被分配, 则迭代过程结束, 否则任选一制导平台, 记为 i_m 。

3) 求出 i_m 对应的收益最优的“制导平台—武器—目标”匹配方案, 记为 $i_m-j_1-k_1$ 。

4) 求出 i_m 对应的收益次优的“制导平台—武器—目标”匹配方案, 记为 $i_m-j_2-k_2$ 。

5) 计算 $\varphi = b_{i_m,j_1}^{k_1} - b_{i_m,j_2}^{k_2}$ 。

6) 更新相应价格: $v_{k_1} = \max(v_{k_1}, w_{j_1}) + \varphi + \varepsilon$, $w_{j_1} = v_{k_1}$ 。

7) 更新分配矩阵 X : 如果 $x_{i',j'}=1$, 并且 $i'=k_1$ 与 $\text{mod}(j',n) = \text{mod}(j_1,n)$ 至少有一个成立, 则 $x_{i',j'}=0$ 。

注: $\text{mod}(a,b)$ 表示 a 除以 b 的余数。

8) 令 $x_{k_1,(i-1) \times n+j_1} = 1$, $m=m+1$, 返回步骤 2)。

步骤 1) 为算法的初始化操作, 文献[9]指出 $\varepsilon < 1/n$ 是确保拍卖算法所求分配方案最优的关键, 将收益矩阵各元素均变换为整数能够保证算法的时间有效性。步骤 2) — 8) 为算法的单次迭代过程, 在步骤 2) 中, 一般按照各制导平台的编号顺序依次选择; 步骤 6) 为“ ε -互补松弛”策略的具体应用, 目的是保证出价递增、防止迭代过程陷入死循环; 步骤 7)

确保所得分配矩阵满足式(11)–(13)的约束条件，即在引入虚拟制导平台、武器、目标后，每个制导平台、武器最多只能分配给一个目标，每个目标最多只会得到一个“制导平台–武器”组合。

3 仿真

基于 Matlab 2018b，对提出的基于拍卖算法的防空武器目标分配方法进行仿真验证。

3.1 测试实例生成

1) 生成目标威胁值 V 。

测试实例中假设各目标的威胁值为 1–700 均匀分布的随机整数。

2) 生成武器杀伤概率 Q 。

$$q_{jk} = q_l + (q_h - q_l) \times \text{rand}。 \quad (14)$$

式中 q_l 和 q_h 为预先设定的常数，分别表示武器对目标杀伤概率的上、下限，有 $0 < q_l < q_h < 1$ 。本文中假设 $q_l=0.6$ ， $q_h=0.85$ 。

3) 生成制导平台捕获概率 P 。

$$p_k = p_l + (p_h - p_l) \times \text{rand}。 \quad (15)$$

式中 p_l 和 p_h 为预先设定的常数，分别表示制导平台对目标杀伤概率的上、下限，有 $0 < p_l < p_h < 1$ 。本文中假设 $p_l=0.75$ ， $p_h=0.95$ 。

4) 生成 m_k 、 n_k 。

威胁度越大的目标需要分配越多的制导平台进行跟踪、更多的武器进行杀伤；因此，在测试实例中采用如下的方式生成 m_k 、 n_k ：

$$m_k = \begin{cases} 1 & 0 < v_k < 400 \\ 2 & 400 < v_k < 600 ; \\ 3 & 600 < v_k < 700 \end{cases} \quad (16)$$

$$n_k = \begin{cases} 1 & 0 < v_k < 400 \\ 2 & 400 < v_k < 600。 \\ 3 & 600 < v_k < 700 \end{cases} \quad (17)$$

3.2 仿真实例及分析

采用如下 6 组实例验证基于拍卖算法求解防空武器目标分配方案的有效性、快速性，如表 2。

表 2 实例参数

序号	s	w	t	数量最少	数量最多
1	5	4	3	目标	制导平台
2	13	16	14	制导平台	武器
3	15	18	21	制导平台	目标
4	19	14	15	武器	制导平台
5	20	22	15	目标	武器
6	25	20	28	武器	目标

在防空作战中，要集中有限的防御资源优先对威胁值较大的目标进行有效拦截，反映在本文中即将性能较好的制导平台、武器分配给威胁值较大的目标以最大化对目标的毁伤概率，如图 2 所示。

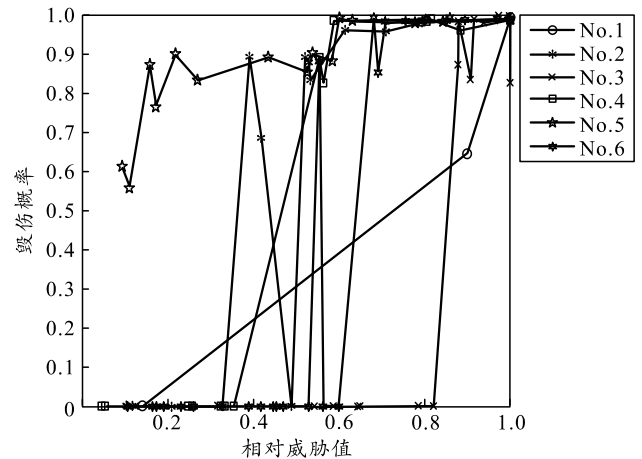


图 2 目标毁伤概率

上图中：横坐标为目标相对威胁值即各目标威胁值与其中最大威胁值的比值，并按比值大小排序；纵坐标为对目标的毁伤概率。由图可知，各实例中所得分配方案对威胁值较高的目标有较大的毁伤概率。

针对上述每个例子运行 20 次以得到算法求解问题的时间性能，结果如表 3 所示。

表 3 求解时间

序号	求解时间	序号	求解时间
1	0.005 5 ± 0.000 03	4	0.285 3 ± 0.000 12
2	0.106 0 ± 0.000 11	5	0.956 5 ± 0.000 17
3	0.598 5 ± 0.000 30	6	8.628 2 ± 0.012 20

上例中制导平台、武器、目标的数量均不同，仿真结果表明引入虚拟制导平台、武器、目标的处理方法是切实可行的。根据算法的运行时间可知，笔者设计的基于拍卖算法的求解方法能够及时、高效地求解防空武器目标分配问题，很好地满足防空作战实时性要求。同时可以看出，随着制导平台、武器、目标数的增加，算法的运行时间变化较大；因此，上述算法不适宜求解较大规模的“制导平台—武器—目标”优化分配问题。

4 结束语

笔者建立“制导平台—武器—目标”三者的优化分配模型，将防空作战过程离散化为若干阶段，给出了基于拍卖算法求解单一阶段武器目标分配问题的方法。仿真结果表明：拍卖算法能够很好地满足防空作战的实时性要求，有效杀伤威胁值较大的

目标。需要指出的是,虽然拍卖算法能够及时、高效求解小规模“制导平台—武器—目标”匹配问题,但是随着问题规模增大,算法性能变化较大。

针对笔者所提算法,还需从以下方面展开进一步研究:1)使拍卖算法具有 Anytime 特性,任何时刻终止均能得到当前最优方案;2)求解过程中将武器的消耗、目标的毁伤考虑在内;3)引入适宜的操作使算法在保证及时性、准确性的前提下能够处理大规模的分配问题。

参考文献:

[1] CHANG T, KONG D, HAO N, et al. Solving the dynamic weapon target assignment problem by an improved artificial bee colony algorithm with heuristic factor initialization[J]. Applied Soft Computing, 2018, 70: 845-863.

[2] 代进进, 李相民, 刘培培, 等. 舰艇编队网络化反导作战动态目标分配方法[J]. 电光与控制, 2013, 20(5): 15-20, 24.

[3] XIN B, WANG Y, CHEN J. An efficient marginal-return-based constructive heuristic to solve the

(上接第 33 页)

参考文献:

[1] 王梦谦, 姜建国. 基于 LabVIEW 和 DSP 的数据采集与监测系统[J]. 化工自动化及仪表, 2017, 44(8): 778-779.

[2] 薛一哲, 吴云, 王昭, 等. 基于 DSP 串行通信接口开发的研究[J]. 航空计算技术, 2018, 48(1): 95-96.

[3] 李红燕, 杨珍书. 基于 DSP 的电动舵机用高速串口通信设计[J]. 信息通信, 2019(7): 49-51.

[4] 顾卫钢. 手把手教你学 DSP—基于 TMS320X281x[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 331-364.

[5] 杨家强. TMS320F2833x DSP 原理与应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 324-238.

[6] 关瑞云, 甄国涌, 单彦虎. 基于 DSP 的大气数据解算卡

(上接第 36 页)

[4] 刘锡朋, 石义官, 肖漪帆. 延期部件自动装压药生产线控制系统设计[J]. 兵工自动化, 2022, 41(2): 32-34.

[5] 旷维生. 火工品装配安全自动化系统探究[J]. 硅谷, 2012(24): 27, 42.

sensor-weapon-target assignment problem[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(12): 2536-2547.

[4] 王光源, 毛世超, 刘智勇. 基于 OODA 的单舰实战化防空作战能力评估研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(2): 13-16, 25.

[5] 吴文海, 郭晓峰, 周思羽, 等. 改进差分进化算法求解武器目标分配问题[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(4): 1012-1021.

[6] 许可, 宫华, 秦新立, 等. 基于分布式拍卖算法的多无人机组任务分配[J]. 信息与控制, 2018, 47(3): 341-346.

[7] ZHANG F. A novel hybrid auction algorithm for multi-UAVs dynamic task assignment[J]. IEEE Access, 2019, 8(2169-3536): 86207-88622.

[8] 顾佼佼, 周曰建, 付鹏飞. 基于改进组合拍卖算法的分布式空战攻击决策[J]. 兵工自动化, 2019, 38(5): 67-69, 96.

[9] JIANG H, LI S, LIN C, et al. Research on distributed target assignment based on dynamic allocation auction algorithm[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019, 1419(1): 012001.

串行通信接口设计[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3): 95.

[7] 张银林. 基于 UART 的串口扩展设计[J]. 电视技术, 2020, 44(4): 32-34.

[8] 青泽, 牟东, 廉璞, 等. 基于 DSP 的多通道惯性导航试验系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021(2): 57-60.

[9] 刘铎, 马小博, 段小虎. 一种数据包长度可变的串口通信系统设计[J]. 信息通信, 2019(5): 228-230.

[10] 王蕾, 李淑婧. 一种基于 FPGA+DSP 的高速串口通信设计[J]. 现代电子技术, 2018, 41(15): 23-24.

[11] 夏值飞, 赵雷. 串口数据解包方法的研究[J]. 航空维修与工程, 2020(2): 65-66.

[12] 江耘宇. 一种组合导航计算硬件平台的设计与实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2019: 40-47.

[13] 杨婧瑶. 一款 DSP 的串行接口 SPI 和 SCI 的研究与设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2017: 44.

[6] 刑吉哲, 于瀛, 夏氏, 等. 火工品装配安全自动化的设计应用[J]. 新技术新应用, 2010(6): 98-100.

[7] 金翰林, 李锦, 谷岩波. 某枪弹装配系统的控制系统设计[J]. 兵工自动化, 2020, 39(6): 27-29.

[8] 孟春李, 陈书特, 赵寒阳. 火工品装配安全自动化系统探究[J]. 科技传播, 2016, 8(3): 140-141.