

doi: 10.7690/bgzdh.2021.01.018

# 导弹子母战斗部自动化总装系统

袁谋纯, 孙玉全, 刘开国  
(湖南云箭集团有限公司, 长沙 410100)

**摘要:** 针对国内外导弹子母战斗部装配现状及问题, 提出自动化装配总装系统方案。利用机器人视觉识别系统辅助机器人完成重要、高危和重复性的子弹药装填; 采用激光打孔技术, 通过机器人位置变化和刀具的自动更换方式实现蒙皮柔性快速制孔; 利用激光雷达系统实现导弹子母战斗部舱段在线实时测量; 采用 AGV 小车进行导弹子母战斗部快速转运、对接。结果表明, 该方案能显著提高导弹子母战斗部自动化装配生产效率和本质安全度。

**关键词:** 导弹子母战斗部; 子弹药; 装填; 蒙皮

**中图分类号:** TP24 **文献标志码:** A

## Automatic Assembly System of Missile Cluster Warhead

Yuan Mouchun, Sun Yuquan, Liu Kaiguo  
(Hu'nan Vanguard Group Co. Ltd., Changsha 410100, China)

**Abstract:** Aiming at the current status and problems of the assembly of the missile cluster warheads at domestic and abroad, an automatic assembly system solution is proposed. The visual recognition system is used to assist the robot to complete important, high-risk and repetitive submunition loading. Laser drilling technology is used to achieve flexible and fast hole making of the skin through the flexible change of robot position and automatic tool change. The laser radar system is used to realize real-time online measurement of the missile cluster warhead compartment, and the AGV trolley is used for rapid transfer and docking of the missile cluster warhead. The results show that the scheme can significantly improve the efficiency and intrinsic safety of the automated assembly of the missile cluster warhead.

**Keywords:** missile cluster warhead; submunition; loading; skin

### 0 引言

导弹子母战斗部作为导弹的一个重要舱段, 是直接完成预定战斗任务的有效载荷, 可对敌方战略纵深区域高价值目标进行大面积封锁和毁伤。世界各国在研制新一代导弹时都将子母战斗部作为发展的重点, 并努力提升子母战斗部自动化水平, 实现大规模流水线生产。

导弹子母战斗部结构复杂、火工品单元多、作业工序分散且生产周期长、工人劳动强度高、现场安全管控难度大, 易发生安全事故。据统计, 国外火工品从业人员发生意外的概率为百万分之一, 而国内发生意外的概率为十万分之一。原因在于国内自动化生产水平较低, 10 人以上工作场所较多, 安全性差, 易发生事故<sup>[1]</sup>。

针对目前导弹子母战斗部自动化生产水平低、质量一致性控制、安全管控难的问题, 笔者提出一套导弹子母战斗部自动化总装方案, 能够牵引并推动导弹子母战斗部领域安全、高效生产能力的提升, 加速行业适应国家先进制造战略的要求。

### 1 导弹子母战斗部自动化装配现状及问题

国外很早就开展导弹子母战斗部装配方面的自动化改造工作, 自动化设备逐步装备企业, 大量使用机器人从事火工类等危险作业, 将产品装配人员与危险工作分开, 以保证装配人员的安全<sup>[2]</sup>。除了距离产生空间上的安全外, 机器人从事重复性工作一般不会出错, 保证了生产过程的安全性, 满足不断发展的军工产品多样化和个性化需要。图 1 为美国雷锡恩公司导弹自动化装配平台。



图 1 美国雷锡恩公司导弹自动化装配平台<sup>[3]</sup>

国内导弹子母战斗部生产制造经过多年技术创新, 实现了部分工序单机和单元的机械化操作, 生产效率有一定提高, 但生产组织方式、工艺装备还

收稿日期: 2020-09-06; 修回日期: 2020-10-16

基金项目: 国防基础科研计划(JCKY2017209B011)

作者简介: 袁谋纯(1966—), 男, 湖南人, 高级工程师, 从事子母战斗部技术研究。E-mail: yuanmchun@126.com。

没有根本性改变。目前，导弹子母战斗部装配仍以传统人工操作为主，存在生产效率低、质量一致性差和生产过程本质安全度低等问题，无法满足未来弹药生产的“高精、高效、高安全”要求。主要表现在以下方面：

1) 导弹子母战斗部原材料种类和规格多，零部件数量大，各零件的加工进度差异较大，协同组织生产困难，迫切需要建立一套高效的生产管理系统，跟踪、管理所有零部件从下料、加工、装配的整个过程。

2) 导弹子母战斗部装填子弹药数量多，目前我国子弹药装填工序主要采用人工作业，不仅装配工作量大，而且十分危险，装填效率低。

3) 蒙皮与子母战斗部骨架连接的螺孔数量多，导致安装时间长且人力需求量大，据统计打孔占据工人工作量 20%以上，用机器人代替人工打孔和安装螺钉，可显著提高生产效率，降低工人劳动强度。

4) 导弹子母战斗部舱段的外形尺寸、形位公差和接口尺寸精度要求较高，传统检测方法费时费力且精度不高，迫切需要采用数字化测量设备进行导弹子母战斗部参数的快速自动化精确测量。

5) 导弹子母战斗部转运一般采用吊车或叉车，运输过程中可能发生跌落、磕碰等安全事故，运输效率低。

综上所述：以上生产瓶颈造成导弹子母战斗部装配过程周期长、产量低，工人劳动强度大，产品质量难以保证；因此，开展自动化装配研究对于提高产品质量和生产效率，显得尤为重要。

## 2 导弹子母战斗部自动化总装系统

### 2.1 总体方案

导弹子母战斗部总装过程采用统一、系统的的生产管理系统，从原材料加工到成品件装配完成，均在一套管理系统内进行数据的统计和管理。装配全过程采用自动导引运输车 (automated guided vehicle, AGV)，实现舱段自动化转运，减少工件的转运和定位次数，降低装配误差和工时消耗。利用机器人视觉识别系统辅助机器人完成重要、高危或重复性的工作，如子弹药装填、蒙皮制孔、蒙皮连接螺钉安装等。通过机器人位置的灵活变化和刀具的自动更换，采用激光打孔技术实现柔性快速制孔。利用激光雷达系统完成舱段的在线测量，同时进行轮廓扫描以生成单体高精 3 维模型，并与设计模型进行尺寸比对，提高了产品检测的准确度，保

证了产品装配质量的一致性。

### 2.2 生产管理系统

柔性装配生产线智能管控系统是以生产服务为核心的在线物料管理系统，下联工业实时控制系统，集物流生产保障管理、物料管理、库存管理于一身，是自动化装配系统的调度核心和信息存储处理中心。它构建在先进的工业控制网上，运行于网络系统与数据库环境下，以集成技术为核心，实现作业指令快速、准确的执行及作业信息的采集、处理、传送、存储和分析，并做出正确的决策以协调各业务环节，从而实现高效、有序、科学的生产管理，以满足工厂作业计划的需要。整个装配过程采用统一的生产管理系统，从原材料加工到成品件装配完成均在一套系统内进行数据的统计和管理。其流程见图 2。

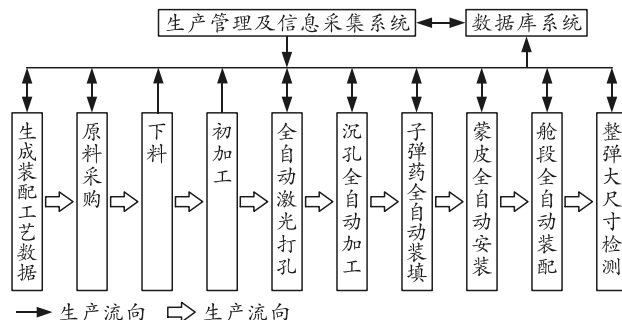


图 2 导弹子母战斗部自动化装配流程

装配过程中每个零部件均有独立编码，并将生产、物流、加工、装配、仓储的全部设计、工艺、生产信息统一管理，所有生产信息可追溯，对产量、质量的管控有重大作用，可实现生产管理的自动化。

柔性装配生产线智能管控系统能够实现轻松、规范、细致的生产业务、物流业务、库存业务一体化管理工作，提高管理效率，及时、准确、全面掌握生产动态，有效控制生产过程。

### 2.3 子弹药自动化装填系统

如图 3 所示，子弹药自动化装填系统主要由六轴机器人、子弹药抓取推送机构、子弹药传输系统、舱段传输系统等组成。

首先将子弹药信息参数(如产品编号、质量质心、装药当量等)通过条码或 2 维码赋予到每个产品中，供机器人识别分析，随后装好子弹药的工装通过子弹药传输系统进入装配区；利用机器人上的视觉识别系统分辨子弹药的位置并引导机器人实现子弹药的自动抓取，还能辅助机器人完成子弹药与舱段的精确对位。机器人按照规划的动作路径运动到

舱段位置，准备进行推装；通过视觉系统以及测距传感器实时采集装配参数，将子弹药推入指定位置完成安装；随后舱段通过高精度分度机构进行旋转调整自身角度，待下一枚子弹药的安装，重复以上操作完成导弹子母战斗部各舱位子弹药的装填<sup>[4]</sup>。

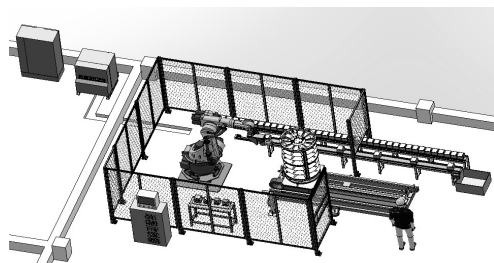


图 3 子弹药自动装填系统

子弹药自动化装填系统具有安全性高、装填速度快、装配精度高、装配产品一致性好、系统运行稳定、安装灵活、使用方便等特点。同时采用柔性设计子弹药夹持工装(见图 4)，夹爪机构安装在机器人第六轴端部，初始状态为夹爪张开状态，气缸达到最大行程。抓取前工装位置已进行定位，抓取时由机器人提供抓取的精确位置，机器人到位后，夹爪气缸活塞缩回，夹爪定位销端部深入到弹药工装的定位孔中，弹药位置由于定位销轴的插入进行定位与抓取。可满足不同类型子弹药和不同工况的装填需求<sup>[5]</sup>。

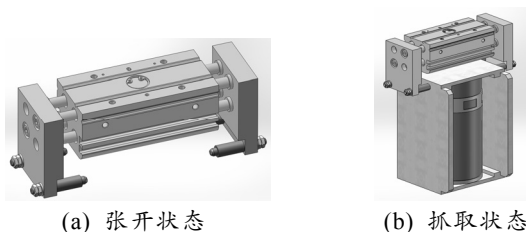


图 4 夹爪机构

此工装参数如下：气缸缸径 20 mm，以 5 bar 的气压计算，2 个活塞杆一共可以输出 30 kg 的夹持力；气缸行程 80 mm，可以满足 2 种宽度的弹药的夹取功能。

#### 2.4 蒙皮快速制孔

如图 5 所示，蒙皮快速制孔设备由上下料工位、激光打孔工位和铰扩孔工位组成。机器人柔性制孔采用六轴工业机器人携带激光切割头等相关工艺设备，利用机器人运动实现激光束与蒙皮表面的垂直，利用激光烧蚀将金属融化来实现基孔的制备。该装置由六轴工业机器人携带电主轴及铣刀配合工装完成工作，利用机器人完成铰孔位置的变换，利用电主轴系统实现铰刀的运转，利用专用铣刀实现沉孔

的成型加工。当同一尺寸刀具加工数量较多时，刀具会出现较严重的磨损，利用自动研磨机对磨损的刀具进行修复。利用换刀装置对不同尺寸刀具进行快速更换，可提高设备的使用范围，刀座具有 2 维码，在系统内输入刀具信息(例如刀具长度等)可自动完成刀具补偿。利用机器人视觉系统可辅助机器人对工件进行定位以确保加工精度。

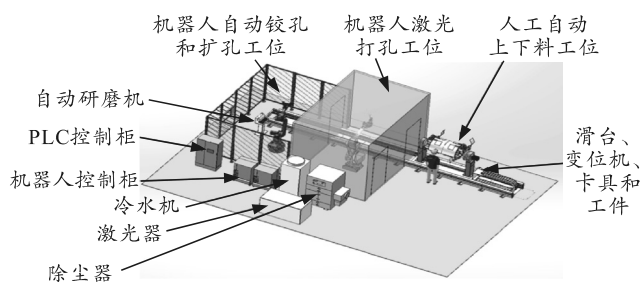


图 5 蒙皮柔性快速制孔成套设备

激光打孔的优点在于加工速度快，尺寸稳定，无需更换刀具，从而降低使用成本。为确保加工精度，设计了蒙皮制孔工装装置，在加工前先将蒙皮固定在工装上以防止加工变形影响装配精度，装置内设置了冷却系统，可防止加工过热导致的变形<sup>[6]</sup>。激光切割的光速直径只有 0.1 mm，功率密度极大，所以加工速度很快，这样既提高了效率，又能保证各孔的位置精度及尺寸精度达到 H9 以上。安装要求蒙皮上的孔一般为沉头孔，还需进行沉孔的加工，为此设置了自动加工设备。为保证与激光打孔精度一致，采用连线形式利用激光打孔时的工装来进行铣孔的工件装夹，工件一次装夹完成打孔铣孔 2 道工序，工序间转换为全自动完成。

蒙皮制孔工装(见图 6)采用模块化设计，可根据不同尺寸的工件设计模块化工装适应装夹不同尺寸的蒙皮工件，使蒙皮制孔设备具备柔性加工能力。

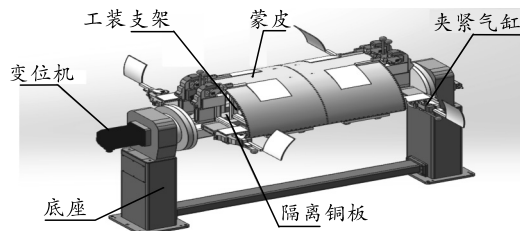


图 6 工装部分

搬运装置将 AGV 转运来的蒙皮搬运到蒙皮制孔工位，将蒙皮固定在工装上，通过气动夹紧机构完成定位。通过滑台导轨转运到激光打孔工位。激光打孔工位由六轴机器人带光纤激光器组成。机器人找到各孔位置，激光器完成激光切割工作。所有孔加工完成后，通过滑台导轨转运到铰，扩孔工位。

此工位由六轴机器人载铰，铣孔转换装置组成。机器人找到各孔位置，完成铰孔和铣孔的工作。完成铰孔工作后，滑台将工件送到上、下料工位，工件夹具释放工件，由搬运装置将工件搬运到另外一台 AGV 上，当这台 AGV 装载足够数量的蒙皮后会自动运行到蒙皮自动装配工作站，随后另外一台 AGV 来到上、下料工位等待下料。

## 2.5 蒙皮与骨架连接螺钉自动化安装

如图 7，螺钉快速安装模块采用六轴机器人携带电动拧紧器，通过舱段举升旋转台、震动料斗(自动送钉系统)等设备配合实现螺钉的自动化安装。

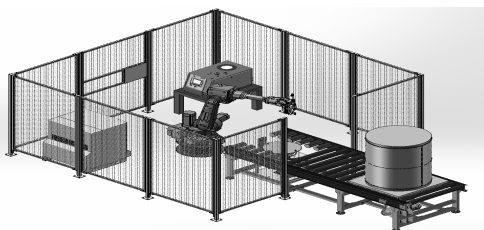


图 7 蒙皮与骨架连接螺钉快速安装系统

子弹药装填完成后的舱段，先由人工将蒙皮预先安装几个螺钉完成初步定位，通过 AGV 运送到辊子传送线入件端，辊子线将托盘和舱段传送到装配区域(举升旋转台上方)，举升旋转台举升托盘及舱段到装配位置，同时将定位销引入托盘定位孔中完成定位。机器人载电动拧紧器到装配区域，通过自动送钉系统将螺钉输送到拧紧器前端，视觉检测系统完成孔位寻找。机器人进给，拧紧器控制扭力拧紧螺钉。举升旋转台具有单轴变位机的功能，可沿舱段轴线旋转，从而调整舱段轴向安装的位置，高度位置由机器人来实现。

采用机器人拧紧螺钉，不仅锁付精度高，位置精度可达 0.01 mm；而且锁付效率高，运动模组移动速度可达 500 mm/s。平均一个工件锁付周期 4 s 以内。适用范围广，采用柔性治具设计，可配合生产线作业，适用于各种不同产品锁付，真正做到一机多用。

## 2.6 导弹子母战斗部数字化外形测量

如图 8 所示，采用激光雷达 3 维扫描系统进行导弹子母战斗部的整体测量，扫描轮廓以生成单体高精 3 维模型并与设计模型进行尺寸对比，还可利用单点高精检测的功能确定工件位置，以辅助主要部件的装配工作。该装置操作简单，只需 1 人即可完成测量工作，其具有强大的处理软件，可根据需要进行计算，并可根据工作进行软件的二次开

发，以便更快、更好地完成工作<sup>[7]</sup>。

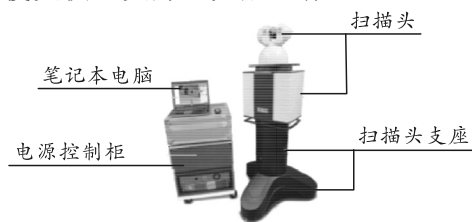


图 8 激光雷达测量系统组成

激光雷达能够以每秒 100 万点的速度进行扫描，可快速生成高精度、高分辨率的 3 维点云数据。激光雷达使用自带软件对生成模型与预设模型进行对比，对比时间短、精度高，可快速实现工件外形检测。

## 2.7 导弹子母战斗部自动化转运

利用 AGV 对装配完成的舱段进行转运并在其上完成模拟舱段的对接实验和舱段尺寸测量，完成后 AGV 直接载着产品舱段前往成品库保存，状态如图 9 所示。该系统能有效减少成品在检测入库过程中的转载次数，降低生产风险，提高产品生产的稳定性和效率，减少生产过程中对人员业务技能和数量上的要求。

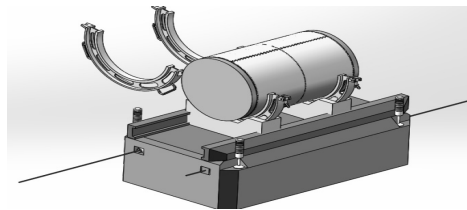


图 9 导弹子母战斗部舱段转运装配 AGV 装弹舱状态

该系统采用柔性生产的设计理念，通过更换部分弹体夹具即可实现多弹种通用，提高了设备的使用效率及适应性。AGV 行走安全系统可提示 AGV 的工作状态，提醒工作人员注意避让，如果工作人员无意间进入 AGV 工作区域，AGV 可以自行报警，并在紧急情况下停车避让。

## 3 结束语

导弹子母战斗部自动化装配的核心设备为工业六轴机器人、视觉识别系统、激光雷达 3 维扫描系统、激光切割系统、自动拧紧系统和 AGV 等智能设备，配合生产管理系统，实现子弹药自动装填，蒙皮自动化加工、安装，外形自动化数字化检测，物流自动化转运，以及生产过程管理、控制、信息收集等功能。在保证安全生产的前提下，提高了产品质量及生产效率，减少了人为因素对产品的影响，为进一步建立数字化的智能工厂提供参考依据。

参考文献：

[1] 胡晓东, 蒋学乔, 熊伟, 等. 国外弹药战斗部先进制造技术发展与思考[J]. 兵工自动化, 2019, 38(8): 7-9.

[2] 唐迎佳, 雷艾. 国外弹药装药装配发展趋势[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(8): 117-119.

[3] 胡冬冬, 苏鑫鑫. 雷锡恩公司建成世界最先进的导弹总装厂[J]. 飞航导弹, 2013(2): 9-11.

[4] 高超, 刘军考. 导弹柔性装配系统关键技术研究[D].

哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 10-20.

[5] 赵抢抢. 弹药自动装填系统可靠性初步研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 12-32.

[6] 李兴, 管迎春. 浅析几种典型激光加工技术在航空制造领域的应用现状[J]. 航空制造技术, 2019(12): 38-45.

[7] 高瑞. 飞机蒙皮外形自动化激光扫描测量关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 11-17.

\*\*\*\*\*

(上接第 73 页)

4 部队火力优化分配模型

假设在某场战斗中, 我方陆军部队共有  $W$  个兵力、武器装备单元, 则可得到总的信息单元  $W_I$ 、主战单元  $W_B$ 、指挥单元  $W_C$  和保障单元  $W_S$  数量如下:

$$[W_I \ W_B \ W_C \ W_S] = f(W).$$

将各类作战单元编成分队如下:

$$E_{Ii} = f(W_I), \quad E_{Bi} = f(W_B),$$

$$E_{Ci} = f(W_C), \quad E_{Si} = f(W_S).$$

计算出各分队的作战效能如下:

$$A_{Ii} = f(E_{Ii}), \quad A_{Bi} = f(E_{Bi}),$$

$$A_{Ci} = f(E_{Ci}), \quad A_{Si} = f(E_{Si}).$$

依据作战任务  $CT$ 、战斗类型  $CF$ 、上级具体意图  $SI$ 、战场环境  $BE$  和敌方兵力装备部署  $EA$  等, 确定参战分队规模如下:

$$\lambda_1 = f(CT, CF, SI), \quad \lambda_B = f(CT, CF, SI),$$

$$\lambda_C = f(\lambda_1, \lambda_B, SI, BE, EA), \quad \lambda_S = f(\lambda_1, \lambda_B, SI, BE, EA).$$

确定具体参战分队如下:

$$\hat{E}_I = [\hat{E}_{I1} \ \hat{E}_{I2} \ \dots \ \hat{E}_{Ii} \ \dots \ \hat{E}_{I\hat{n}_I}] = f(E_I, \lambda_1),$$

$$\hat{E}_B = [\hat{E}_{B1} \ \hat{E}_{B2} \ \dots \ \hat{E}_{Bi} \ \dots \ \hat{E}_{B\hat{n}_B}] = f(E_B, \lambda_B),$$

$$\hat{E}_C = [\hat{E}_{C1} \ \hat{E}_{C2} \ \dots \ \hat{E}_{Ci} \ \dots \ \hat{E}_{C\hat{n}_C}] = f(\hat{E}_C, \lambda_C),$$

$$\hat{E}_S = [\hat{E}_{S1} \ \hat{E}_{S2} \ \dots \ \hat{E}_{Si} \ \dots \ \hat{E}_{S\hat{n}_S}] = f(\hat{E}_S, \lambda_S).$$

确定最优信息分队作战分配:

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^{\hat{n}_I} \lambda_{Di} A_{Ii}, \max \left\{ \sum_{i=1}^{\hat{n}_I} \sum_{j=1}^2 \lambda_{Dij} A_{Ii} \right\}, \max \left\{ \sum_{i=1}^{\hat{n}_I} \sum_{j=1}^3 \lambda_{Dij} A_{Ii} \right\} \right\}.$$

式中包含了 1、2、3 个主要进攻方向的信息分队分配情况。其中:  $i$  表示信息分队编号;  $j$  表示进攻方向;  $\lambda_{Di}$  表示当只有一个进攻方向时, 第  $i$  个信息分

队对该进攻方向进行信息活动的适合程度;  $\lambda_{Dij}$  表示第  $i$  个信息分队对第  $j$  个进攻方向进行信息活动的适合程度。确定最优信息分队作战分配的同时, 可以确定进攻方向的数量  $SD=j$ 。

确定最优主战分队作战分配:

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^{\hat{n}_B} \sum_{j=1}^{SD} \lambda_{DBij} A_{Bi} \right\}.$$

至此, 陆军部队火力优化分配模型建立完毕。

5 结论

该模型已多次用于陆军部队作战仿真。当满足部队火力优化方案生成条件时, 选定本批次参战的各类作战单元, 运用改进的遗传群算法求解出信息分队和主战分队的最优分配方案, 明确各单元的作战目标。仿真结果显示火力优化配置方案科学合理。

参考文献:

[1] 陈森, 徐克虎.  $C^4$ ISR 信息融合系统中的态势评估[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(4): 5-8.

[2] 刘传波, 邱志明, 吴玲, 等. 动态武器目标分配问题的研究现状与展望[J]. 电光与控制, 2010, 17(11): 43-48.

[3] 张志伟. 陆军火力战[M]. 北京: 军事科学出版社, 2009: 139-143.

[4] 车延连. 火力筹划论[M]. 北京: 军事科学出版社, 2009: 75-81.

[5] 王伊婧心, 刘宇, 于仁清, 等. 基于 SD 模型的对岸火力支援弹药消耗规律分析[J]. 兵工自动化, 2019, 38(11): 75-78.

[6] 徐克虎, 黄大山, 王天召. 装甲部(分)队整体作战效能评估[J]. 科技导报, 2012, 30(14): 59-62.

[7] 曹延平. 坦克兵作战指挥学[M]. 北京: 解放军出版社, 2003: 247-251.

[8] 邹宇皇. 高寒山地作战炮兵火力分配研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010: 42-51.