

doi: 10.7690/bgzd.2023.05.018

海上编队防空作战行动效能评估方法应用统计分析

樊辉锦^{1,2}, 巫银花¹, 宋勇¹, 毕月³, 宫照焜²

(1. 海军指挥学院作战实验室, 南京 210018;

2. 中国人民解放军 92635 部队, 山东 青岛 266001;

3. 中国人民解放军 92326 部队, 广东 湛江 524001)

摘要: 为满足部队作战的实际需求, 对 5 种应用最广泛最成熟的海上编队防空作战效能评估方法进行分析。阐述 5 种方法的应用及其研究现状, 提出下一步主要发展方向是结合作战仿真实验研究体系作战效能、引入智能化算法和融合多种方法多元数据。结果表明: 各种防空作战行动效能评估方法的运用并不能完全满足部队作战的实际需求, 该分析可为后续研究者提供一定参考。

关键词: 编队防空作战; 效能评估; 综述

中图分类号: TJ83 **文献标志码:** A

Statistical Analysis of Operational Effectiveness Evaluation Method for Air Defense Combat of Naval Formation

Fan Huijin^{1,2}, Wu Yinhua¹, Song Yong¹, Bi Yue³, Gong Zhaokun²(1. *Combat Research Center, Naval Command College, Nanjing 210018, China;*2. *No. 92635 Unit of PLA, Qingdao 266001, China;*3. *No. 92326 Unit of PLA, Zhanjiang 524001, China)*

Abstract: In order to meet the actual needs of the army combat, five kinds of the most widely used and the most mature air defense combat effectiveness evaluation methods of naval formation are analyzed. The application and research status of the five methods are described, and it is proposed that the next main development direction is to study the combat effectiveness of the system combined with combat simulation experiments, to introduce intelligent algorithms and to integrate multiple methods and multiple data. The results show that the application of various air defense operational effectiveness evaluation methods can not fully meet the actual needs of the army combat, and the analysis can provide some reference for subsequent researchers.

Keywords: formation air defense operations; effectiveness evaluation; summary

0 引言

随着海上军事斗争的不断发展, 海上舰艇编队遂行多样性任务的能力不断提高; 同时, 面对的空威胁也越来越严峻, 防空作战能力得到研究者的广泛关注。近年来, 海上编队防空作战效能评估成为理论研究的重点, 国内外相关部门和机构均开展了一系列防空作战效能评估相关工作^[1], 运用了众多方法, 但是由于条件、目标和环境的变化, 目前对各种防空作战行动效能评估方法的运用并不能完全满足部队作战的实际需求, 且呈现出新的发展趋势^[2]。笔者以海上舰艇编队防空作战行动的效能评估为研究对象, 对其效能评估的主要方法、研究现状和下一步研究重点进行阐述分析, 并借助 Citespace 知识图谱技术^[3]进行可视化展示。

1 防空作战效能评估统计分析

笔者利用开源软件 Citespace 知识图谱可视化工具^[4], 对 CNKI 数据库中以“防空”和“效能评估”为主题词的 403 篇文献进行分析。检索时间为 2004—2021 年, 不限定文献来源类别, 过程中已手动删除与笔者研究领域不相关的数据。

1.1 文献数量分析

发文数量和时间是一个领域研究历程的表现, 根据文献发表数量和时间分布特点, 绘制图 1。可以看出舰艇编队防空效能评估大概分为 3 个发展阶段: 1) 在 2004—2006 年, 随着“作战效能”研究的兴起, 编队防空作战效能评估也得到突飞猛进的发展, 发文数量迅速上涨; 2) 2006—2014 年, 热点

收稿日期: 2023-01-16; 修回日期: 2023-02-18

基金项目: 全军军事类研究生资助课题(JY2021B059)

作者简介: 樊辉锦(1994—), 男, 山西人, 博士, 工程师, 从事海上作战运筹分析研究。E-mail: 386043365@qq.com。

过后震荡向下，发文数量呈现缓慢下降趋势；3) 2014 年至今，进入平稳发展阶段，并在近 2 年有继续上涨趋势。

1.2 发文期刊分析

对数据文献所刊登的期刊情况进行分析，分布如图 2 所示。可以看出《火力与指挥控制》《舰船电子工程》《现代防御技术》和《兵工自动化》4 种期

刊刊发该领域文章最多，占到总文章数的 60%，以舰船领域期刊和指挥控制领域期刊为主，形成较为稳定的发文期刊群。

1.3 评估方法分析

在对发文时间和发文期刊分析的基础上，利用 Citespace 对关键词和研究方法进行聚合性分析，如图 3 所示。

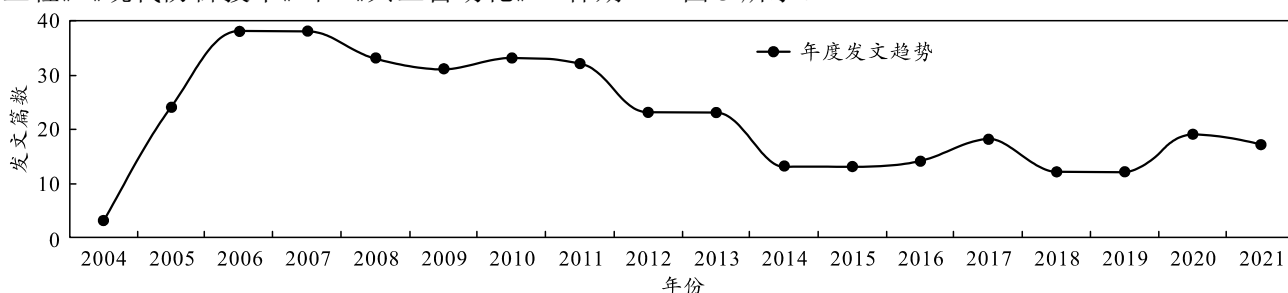


图 1 编队防空作战效能评估文献数量分析

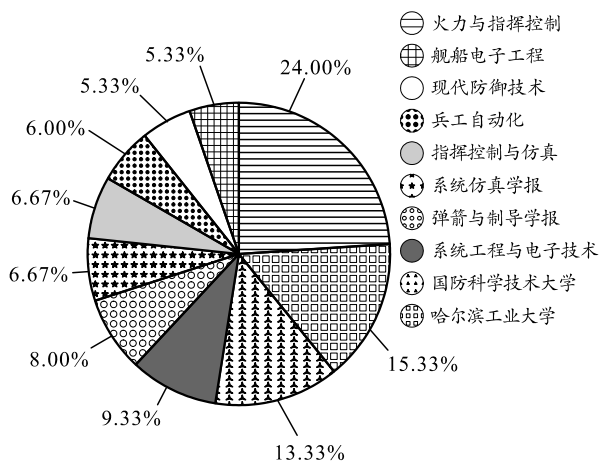


图 2 编队防空作战效能评估文献发文期刊分布

从聚类分析结果来看，关键词“排队论”聚合性较高，同时也是检索结果中出现最多的防空作战效能评估方法，表明该研究方法在防空作战效能评估领域有着广泛应用。其次，应用较多的是 AHP 层次分析法，层次分析法的相关文献数量较多，且从篇名上来看主要针对一些主观性较强问题。另外，作为新兴的效能评估方法出现较多的是“云模型”，由于其推理简单、易操作、兼顾模糊性和随机性的优点，近年来得到了广泛关注。

同时，从近几年防空作战效能评估的相关文献[5]中还能发现，“体系效能”“人工智能”关键词出现频次逐渐增多，可能将成为未来发展方向。

2 主要评估方法应用分析

国内外研究成果中针对作战效能评估的方法众多，文献[1]将其分为专家评估法、解析法、作战模拟法和其他方法 4 类传统作战效能评估方法，同时提出了基于支持向量机、博弈论法等新兴作战效能评估方法分类，重点研究了 AHP、ADC 模型法、作战模拟法、试验统计法和支持向量机评估法这 5 种典型的方法；文献[2]将防空作战效能评估方法分为 4 类：排队论方法、ADC 模型方法、综合评价方法以及其他方法。ADC 方法主要针对武器系统效能评估方法，本文中不将其作为主要研究对象，笔者通过大量阅读文献，按方法应用数量的多少将舰艇编队防空作战效能评估方法分为排队论方法、层次分析法、模糊综合评判法、云理论模型和其他方法 5 类。



图 3 编队防空作战效能评估文献关键词聚类

2.1 排队论方法

排队论方法在防空作战领域有着广泛的应用,主要用于防空武器系统作战效能评估,同时也可应用在编队防空作战行动的效能评估中。

庞学亮等^[6]以排队论为基础建立了海上舰艇编队防空作战的数学模型,研究由不同平台构成的多层次编队防空体系的综合作战效能,并通过实例仿真计算分析影响防空效能的关键因素。

王威等^[7]针对舰艇编队网络化防空作战体系,建立基于排队论的效能评估模型,研究编队防空作战能力,并通过简化模型进行算例分析。

刘志成等^[8]从突防过程和突防概率 2 方面应用排队论理论,建立舰艇编队防空作战效能模型,解决传统方法的局限性并提出优化兵力部署方案。

排队论方法具有实时性强、计算速度快的优点,且结果较为客观、定量属性强,但作战过程的抽象简化过程复杂,作战效能难以用简单的服务过程全面描述。

2.2 层次分析法

自 20 世纪 70 年代中期被提出以来,层次分析法至今被应用广泛,在舰艇编队防空作战效能评估问题中的指标体系权重确定部分应用最多。

徐亚光等^[9]结合电磁兼容管控对编队防空作战效能的影响,利用层次分析法的指数合成模型对作战效能进行评估,将电磁兼容的频域、时域和空域等评估模型加入作战效能评估模型中,更全面地对作战效能进行评估分析。

陈国宾^[10]以层次分析法为主,综合防空作战主要能力建立 3 层作战效能指标体系,构建了基于灰色层次分析法的海上编队防空作战效能评估模型,减少评估过程的不确定性因素,并通过实例计算验证了方法的可行性和有效性。

位秀雷等^[11]以航母编队防空问题为研究对象,利用层次分析法将评价指标量化处理并构建动态与静态相结合的指标体系,进而建立了基于模糊综合评判的航母编队防空作战效能评估模型,实例分析表明该方法便于实践运用且能较为直观地展现防空作战效能。陈国生等^[12]同样通过建立三层指标体系,构建基于遗传层次分析法的舰艇编队防空作战效能评估模型,结合实例分析舰艇编队在平台模式和网络模式下的效能验证模型的可行性。

层次分析法的优点是定性定量相结合,针对多目标复杂系统可利用较少信息完成效能评估,把人

的思维过程层次化、数量化,在编队防空作战领域适用性较好,但其主观性在战场情况发生变化的情况下对结果有较大影响。

2.3 模糊综合评判法

模糊综合评判法是模糊数学的一种具体应用方法,主要针对一些边界不清、不易定量的问题进行综合评价,在军事和经济领域应用广泛,应用模糊综合评价法可较好地解决编队防空作战效能评估问题,特别是作战过程的复杂性、系统性。

杜源^[13]建立三级编队综合防空效能评估指标体系,采用层次分析法、专家咨询法等方法设置权重,综合用于模糊数排序方法和匈牙利算法求解综合效能,过程中重点考虑防线和防御兵力分配情况。

黄斌斌等^[14]分析影响舰艇编队防空作战效能的各项因素,建立评价指标体系,采用层次分析法确定评价指标中各项的权重,并基于多级模糊综合评判法对防空作战效能进行评估。评估指标权重的确定依然有较多的人为成分,模型还有待进一步完善和提高。

张旭东等^[15]为将不用编队防空作战效能统一度量,建立基于指挥控制、侦查预警、火力打击和电子战能力 4 个要素的编队防空作战效能评估指标体系,进而利用模糊综合评判法计算隶属度函数和模糊关系矩阵,并通过实例验证其可操作性。

模糊综合评判法具有数学模型简单、应用简便的优点,对编队防空作战效能评估中的多因素、多层次、多维度具有较好的评判效果。

2.4 云理论模型

云理论模型将概率论原理与模糊数学方法相结合,以降低对象的随机不确定性,在编队防空作战效能评估中可用于描述作战过程的随机不确定性和认知不确定性,提高效能评估的可操作性和有效性。

巫银花等^[16]利用云理论中的云重心评价法,着力解决舰艇编队防空作战效能综合评价方法中评估标准的不确定性以及人为因素的主观性和模糊性,给出基于云模型的评价方法,并应用在舰艇编队防空作战效能评估中,结合实例阐述了应用的具体步骤、方法和结论,拓展了编队防空作战效能评估研究方法。

肖丁等^[17]针对水面舰艇防空作战中导弹作战能力、火炮作战能力和电子干扰能力 3 方面建立效能评估指标体系,利用云重心评估方法对舰艇防空作战能力进行评估,实例验证其科学性和简便性,

易于军事领域应用。

陆欣等^[18]梳理防空作战流程，建立总的四级作战能力评估指标体系，分为传感器节点、决策节点和响应节点3大方面，各节点又分3层建立指标体系，在评估环节引入云理论中的云重心模型，明确评估具体步骤，实现定性与量化的不确定转换，具有一定参考意义。

云理论模型拥有推理简单、易操作、兼顾模糊性和随机性的优点，为编队防空作战效能评估方法提供了新思路。

2.5 其他方法

上述方法之外，主成分分析法和解析法也有少量相关研究，周国祥等^[19]针对编队防空作战效能评估中大量要素难以具体量化且相关性较高的问题，采用主成分分析法建立效能评估模型，有效降低了变量维度和评估过程的复杂度，同时提高了效能评估的客观性。在建立效能评估模型的过程中，同样通过建立指标体系和实例计算完成对模型科学性和可行性的验证。

陈健等^[20]利用混合优先有序加权平均算子建立舰艇编队防空作战效能评估变权模型，解决效能评估中主观因素以及属性信息变化迅速对评估结果的影响，为解决防空效能评估问题提供了不同的解决方法。

严永峰等^[21]基于美军的CEC理论分析目前舰艇编队面临的防空作战需求，从舰载雷达组网和舰载预警机2方面对舰艇编队防空能力进行分析建模，为防空体系建设提供参考。

陈军等^[22]建立网络化编队防空作战效能模型，综合编队探测模型、制导模型和指挥控制协调模型等，并通过简单的效能评估来验证效能模型的可行性，过程中较为注重效能模型的建立，效能评估方法较为简单。

总的来看，主要方法依然集中在利用结构化思路评估防空作战效能，通过建立评估指标体系和评估模型，来分析作战过程、战法运用等要素，评估过程中大多用到多种方法模型，以提高评估的全面性和客观性。其中，利用新思路新方法的文献数量不多，但具有代表性，有一定参考意义。

3 评估方法发展方向研究

3.1 体系化

当前以信息技术为主导的海上作战中，各作战

要素的相互联系更加紧密，作战模式不断向体系化、整体化转变，体系作战已经成为主要作战样式。体系作战的复杂性、整体性和不确定性等特征，使得海上防空作战行动效能不再是各分系统作战效能的叠加，而具有一定的涌现性。

从第2节主要评估方法应用分析可以看出，过去十年中应用较多的依然是结构化评估模型，通过建立评估指标体系和评估模型再进一步分析优化的效能评估方法，很难较好地反映防空作战各作战要素之间的整体性和耦合性^[23-24]。而近年来，除了基于指标的评估方法外，新的思路是利用仿真实验推演防空作战体系对抗，将得到的数据用于效能评估，并结合智能算法构建混合预测模型用于体系效能评估。任天助等^[25]利用数据驱动的思想，将极限学习机方法应用在体系作战效能评估中，提高可靠性和合理性，解决过程中人为因素干扰和主观性影响。张子伟等^[26]分析了体系作战效能评估与优化特点，针对作战实验模式创新方面提出效能评估方法下一步研究方向。

防空作战行动的协同性和交互性，使得传统基于指标体系的结构化评估模型与作战行动实际有一定差距，采用“体系化”和“整体论”的思想从整体上进行防空作战体系效能评估，能够对海上防空作战过程中的武器装备、人员能力、战场环境和战法运用等要素进行全面系统的分析，更加客观真实地反映作战效能。

3.2 智能化

随着人工智能技术逐步应用于海上信息作战，战争形态将由信息化向智能化方向发展，海上防空作战效能评估方法也将向着智能化方向发展，人工智能、数据挖掘、区块链和云计算等新兴技术的发展给防空作战效能评估方法带来更多的发展空间。

从近几年的发文情况来看，机器学习、深度学习和神经网络在效能评估领域热度逐渐上升。随着防空作战仿真实验体系的完善与发展，将会有更多的实验数据用于效能评估，进而可更好地利用数据挖掘和人工智能等算法，实现对体系作战效能更进一步的认识和分析。李妮等^[27]针对体系作战效能评估，提出了一种基于深度学习和智能算法的智能评估方法，在作战效能优化的过程中加入进化策略，从而更好地迭代出较优方案，具有一定的借鉴意义。任俊等^[28]设计了基于神经网络和支持向量回归机的混合预测模型，对作战效能进行合理预测和分析。

虽然,目前相关防空作战实验筹备难度大,实施过程复杂,数据获取较难,且数据量有限,但是随着作战实验方法的推广和实验能力的提高,将“智能化”的算法引入防空作战效能评估,能更好地提高效能评估的科学性和全面性,未来将成为作战效能评估的新思路。

3.3 融合化

海上防空作战过程的复杂性使得单一的效能评估方法难以满足需要,且存在着评估不够全面的问题,“融合化”成为重要的发展路径^[29]。

从效能评估方法应用统计分析中可以看出:一方面是多种评估方法的融合,文献中大多采用多种评估方法相结合的方式,在指标体系建立过程中和效能评估过程中融合多种方法,以达到更加全面、客观地分析作战效能的目的;另一方面是效能评估过程中数据来源的融合化,在数据层对专家打分数据、经验历史数据、仿真模拟数据等多种评估数据来源进行融合。周磊等^[30]对如何有效融合异构数据源并建立稳定有效的效能评估指标体系和方法进行研究,提出了修正 DS 推理方法针对效能评估中异构信息进行决策融合。

防空作战行动不断变化的样式和更加多元的结构,使得其效能评估方法也需要不断变化。在效能评估的过程中,“融合化”将能够利用更多样的评估方法和更多元的数据信息来进行更为科学合理的评估分析,为作战指挥决策奠定基础。

4 结束语

海上编队防空作战在未来局部战争中对于夺取制海权制空权至关重要,其效能评估的科学性、合理性、实用性对备战打仗有着不可忽视的影响。笔者阐述了 5 种应用最广泛最成熟的效能评估方法及研究现状,并利用 Citespace 知识图谱软件对发展历程和趋势进行分析,提出其“体系化”“智能化”“融合化”的下一步发展方向。研究结果具有一定参考和借鉴意义,但还存在分析方法不够全面等问题,后续将对文献所涉及的效能评估方法进一步深入挖掘。

参考文献:

[1] 程恺,张宏军,柳亚婷,等.作战效能及其评估方法研究综述[J].系统科学学报,2014,22(1):88-92.
[2] 吕卫民,张天琦,臧恒波,等.DoDAF建模与效能评估综述[J].兵器装备工程学报,2021,42(9):26-33.

[3] 夏正洪,万健,朱新平.基于科学知识图谱的效能评估研究可视化分析[J].火力与指挥控制,2020,45(3):133-137.
[4] 赵颜利,余红梅,董博.作战效能评估研究的可视化分析[J].海军航空工程学院学报,2019,34(6):521-528.
[5] 刘泽宇,董晨,师鹏,等.防空体系作战能力评估方法[J].火力与指挥控制,2019,44(11):35-40.
[6] 庞学亮,程锦房.基于排队论的协同防空作战效能分析[J].指挥控制与仿真,2014(3):66-69.
[7] 王威,谭乐祖,李大鹏.基于排队论的舰艇编队网络化协同防空效能分析[J].舰船电子工程,2011,31(10):25-27.
[8] 刘志成,严建钢.排队模型仿真分析在舰艇编队防空方面的应用[J].大学数学,2012,28(5):119-124.
[9] 徐亚光,夏惠诚,徐佳.基于电磁兼容管控的舰艇编队防空作战效能评估[J].舰船科学技术,2010,32(11):87-89.
[10] 陈国宾.基于 GAHP 的水面舰艇编队防空作战效能评估[J].舰船电子工程,2008,28(5):65-69.
[11] 位秀雷,张曦.航母编队防空作战效能指标体系构建与评估方法研究[J].舰船电子工程,2019,39(1):14-17,26.
[12] 陈国生,马良,张明.舰艇编队协同防空作战效能评估[J].舰船科学技术,2011,33(2):105-107.
[13] 杜源.海上编队综合防空作战效能评估方法[J].舰船科学技术,2008,30(4):80-84.
[14] 黄斌斌,王玮.舰艇编队协同防空作战效能评估研究[J].舰船电子工程,2012,32(3):26-27,58.
[15] 张旭东,彭杰,王健,等.基于模糊理论的舰艇编队防空作战能力评估[J].兵工自动化,2011,30(10):39-42.
[16] 巫银花,冯伟强,赵斯强.云理论在舰艇编队协同防空作战效能评估中的应用[J].舰船电子工程,2013,33(11):20-22,133.
[17] 肖丁,赵金超,陈勇.基于云重心理论的单舰防空作战能力评估[J].现代防御技术,2011,39(5):30-34,46.
[18] 陆欣,谭乐相,高传斌.水面舰艇平台防空作战能力指标体系与评估[J].舰船电子工程,2012,32(9):23-25.
[19] 周国祥,许玲.一种舰艇编队区域防空效能评估方法[J].舰船电子工程,2012,32(4):30-32.
[20] 陈健,杜源,杨秀庭.基于 HPOWA 算子的舰艇编队协同防空作战效能评估方法[J].系统工程与电子技术,2013,35(3):527-531.
[21] 严永锋,王小军.海上编队对空防御作战能力研究[J].舰船电子工程,2012,32(5):15-16,21.
[22] 陈军,张新伟,张修社,等.网络化舰艇编队的协同防空效能分析[J].电光与控制,2015,22(3):15-19.
[23] 汪浩.基于 OODA 的舰艇编队防空体系作战效能评估研究[J].现代防御技术,2020,48(6):19-25,38.
[24] 黄树江,王超,郭基联,等.基于超网络的作战体系演化模型构建方法[J].火力与指挥控制,2021,46(6):64-70.
[25] 任天助,辛万青,严晔隽,等.基于极限学习机的体系

- 作战效能评估建模方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2019(6): 107-111.
- [26] 张子伟, 郭齐胜, 董志明, 等. 体系作战效能评估与优化方法综述[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(2): 303-313.
- [27] 李妮, 李玉红, 龚光红, 等. 基于深度学习的体系作战效能智能评估及优化[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(8): 1425-1435.
- *****
- (上接第 63 页)
- [11] 刘卫锋, 杜迎雪, 常娟. 毕达哥拉斯模糊交叉影响集成算子及其决策应用[J]. 控制与决策, 2017, 32(6): 1033-1040.
- [12] 张毛银. 区间值毕达哥拉斯犹豫模糊理论及其在群决策中的应用[D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- [13] TORRA V, NARUKAWA Y. On the hesitant fuzzy sets and decision[C]//Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Korea: Jeju Island, 2009: 1378-1382.
- [14] 李海珠, 邓瑞祥, 王选仓. 基于区间值犹豫模糊熵的 DB 模式元素权重确定[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(5): 96-101.
- [15] 程道虎. 基于区间值犹豫模糊熵-云模型的公路工程 DB 模式风险评价研究[J]. 公路, 2020, 65(11): 278-284.
- [16] YAGER R R. Pythagorean membership grades in multi-criteria decision making[J]. Fuzzy Systems IEEE Transactions, 2014, 22(4): 958-965.
- [17] 孙致远, 郑坚, 熊超. 基于变权 TFN-AHP 的装备健康状况评估[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(4): 29-34.
- [18] 彭炎亮, 李汪根, 刘娇, 等. 基于动态权重和模糊综合评价法的健康评估模型[J]. 计算机系统应用, 2017, 26(1): 37-43.
- [19] 李香英. 区间犹豫模糊熵和区间犹豫模糊相似度[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(19): 227-231.
- [20] GRZEGOZYEWski P. Distances between intuitionistic fuzzy sets and/or interval-valued fuzzy sets based on the Hausdorff metric[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2004, 148(2): 211-214.
- [21] ZHANG X L, XU Z S. Extension of TOPSIS to multiple criteria decision making with pythagorean fuzzy sets[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2014, 29(12): 138-143.
- *****
- (上接第 81 页)
- [4] 刘晋霞, 胡仁喜, 康士廷, 等. ADAMS 2012 虚拟样机从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 19-50.
- [5] 陈华荣. 某型冲锋枪设计与分析研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [6] 郑秋, 吴永军. 基于 ADAMS 的某榴弹发射器动力学仿真分析[J]. 兵工自动化, 2010, 29(7): 28-31, 39.
- [7] 濮波. 某复杂机械的建模、仿真与优化[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [8] 张小兵. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 76-116.
- [9] 胡晟荣, 张瑞洁, 沈嫣秋. 某小型遥控武器站发射动力学仿真[J]. 兵工自动化, 2020, 39(5): 37-40.
- [10] 贺磊, 姚养无, 李树军, 等. 基于刚柔耦合模型的某手枪自动机动力学仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(1): 55-58.
- [11] 徐宁. 某复杂自动机械产品动力学建模与仿真分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.