

doi: 10.7690/bgzdh.2022.11.012

基于 ADAMS 的某航炮动力学仿真分析

陈雨丰¹, 孙波¹, 蔡红明², 张海龙¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210014; 2. 南京航空航天大学航天学院, 南京 210016)

摘要: 为减小航炮在发射过程中的最大后坐冲击载荷, 对某航炮虚拟样机进行建模及仿真分析。在 Solidworks 中建立该航炮的 3 维模型, 基于刚柔耦合动力学理论, 借助动力学仿真软件 ADAMS 建立该航炮虚拟样机模型, 在此基础上对航炮进行仿真分析。仿真结果表明: 航炮缓冲装置结构参数的合理设计能够达到减小后坐冲击载荷的目的, 对航炮其他结构参数的优化设计有一定参考价值。

关键词: 航炮; 后坐; 虚拟样机; 动力学; 缓冲装置

中图分类号: TJ392 **文献标志码:** A

Dynamic Simulation Analysis of Certain Type Aircraft Gun Based on ADAMS

Chen Yufeng¹, Sun Bo¹, Cai Hongming², Zhang Hailong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210014, China;

2. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to reduce the maximum recoil impact load of an aircraft gun in the process of launching, the virtual prototype of an aircraft gun was modeled and simulated. The 3D model of the aircraft gun was established in Solidworks, and the virtual prototype model of the aircraft gun was established by using the dynamic simulation software ADAMS based on the rigid-flexible coupling dynamics theory, and then the simulation analysis of the gun was carried out. The simulation results show that the reasonable design of the structural parameters of the aircraft gun buffer device can achieve the purpose of reducing the recoil impact load, which has a certain reference value for the optimization design of other structural parameters of the aircraft gun.

Keywords: aircraft gun; recoil; virtual prototype; dynamics; buffer device

0 引言

后坐力是航炮重要的战术技术性能指标之一。后坐力会加剧枪炮的振动, 使枪炮发射状态更难控制^[1], 对军机飞行产生众多不良影响, 如使之减速、掉高、偏航和侧滑等, 后坐力过大将使飞机结构强度和机载设备的正常工作受到威胁^[2], 危及飞机的安全; 因此, 需要采取合理的方法减小航炮发射过程中的最大后坐载荷。

对于减小后坐冲击载荷有众多的方法, 主要有添加缓冲材料、减小膛压和改进缓冲机构 3 种方法。例如: 史瑞明^[3]采用了在撞击处添加缓冲材料的方法来降低最大后坐冲击载荷, 得出其设计的缓冲器能有 90% 以上的缓冲效率; 王菲^[4]与咸东鹏^[5]等分别从不同的角度来采用导出火药气流的方式减小后坐冲击载荷; 印圣等^[6]通过采用改变缓冲装置结构的方式来达到减小后坐冲击载荷的目的; E·Kathe 等^[7]介绍一种关于软后坐力的理论方法; R·Gast 等^[8]介绍名为 FOOB 的减少载荷的方法; 也有蒋潇

蓉等^[9]研究无后座炮时提到的炮管结构例如线膛滑膛的不同形式。

笔者以某身管短后坐式航炮为研究对象, 结合多体系统动力学对航炮进行动力学建模与仿真, 从缓冲装置结构和布置位置的角度出发, 对该航炮在后坐过程中的动力学特性进行分析。

1 航炮工作原理简介

该航炮为身管短后坐式航炮。发射时, 身管在火药的作用下开始向后运动并且压缩炮管簧。当身管运动到一定距离时, 减振簧和液压缓冲器分别开始起作用。当身管达到最大后坐位移时, 在炮管簧、减振簧和液压缓冲器的作用下复进回原位以及等待下次发射。

在该航炮后坐运动过程中起作用的缓冲装置有 3 个: 1) 炮管簧, 为小刚度弹簧, 在航炮后坐全程都起作用, 主要目的是维持身管的后坐复进运动, 避免身管在后坐过程中有过大的速度; 2) 减振簧, 为大刚度弹簧, 在身管后坐到一定距离时开始起作

收稿日期: 2022-07-11; 修回日期: 2022-08-25

作者简介: 陈雨丰(1997—), 男, 安徽人, 硕士, 从事航炮后坐冲击载荷抑制技术研究。E-mail: 1845417946@qq.com。

用，主要目的是尽快吸收身管后坐的能量，使身管速度快速降低从而复进到最大后坐位移处；3) 液压缓冲器，在身管后坐到一定距离时开始起作用，主要功能是在身管后坐以及复进过程中对身管的运动都起到抑制作用，防止身管复进速度过快撞击到炮架上，起到吸收身管能量的作用。

航炮-军机结构耦合系统作用传递如图 1 所示。

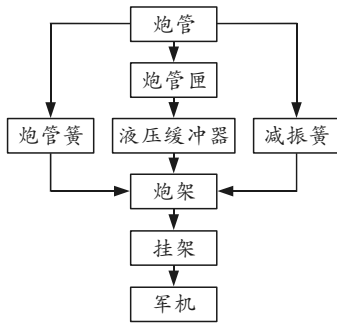


图 1 航炮-军机系统作用力传递

该航炮结构简图如图 2 所示。

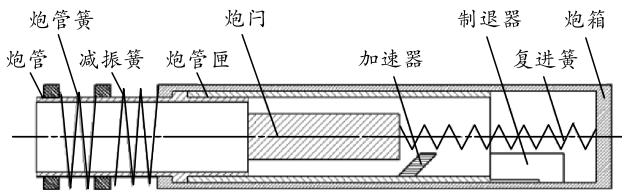


图 2 航炮结构简图

2 虚拟样机建模

2.1 基本假设

根据该航炮中的结构特点和在射击过程中的运动规律，在不影响虚拟样机仿真分析的情况下作出如下假设：1) 炮箱固定在大地上，忽略固定在炮箱上且不影响仿真分析的零件^[10]；2) 在仿真过程中，假设除了炮身之外的其他构件都是刚体^[11]；3) 对于对机构运动影响不大的零件倒角和圆角等特征，在建模时进行一定的简化^[12]；4) 该航炮的方向射角和高低射角为 0。

2.2 建立模型

航炮模型零件众多、结构复杂，采用 ADAMS 软件直接建模不方便操作且模型质量不够好；因此，可以先通过 SolidWorks 软件建立该航炮各个零件的 3 维模型，输出保存为 STEP 格式再导入 ADAMS 中建立动力学模型。同时，通过 HyperMesh 对炮身进行柔性化处理生成 MNF 中性文件，再导入 ADAMS 中建立刚柔耦合模型。模型导入后在 ADAMS 软件中赋予各部分组件相关的材料属性。

考虑到炮管长度较长，炮管在航炮发射过程中

会因为自身重力和后坐冲击载荷而有着相较于其他部件更明显的变形；因此，将炮管进行柔性化处理，而航炮其他部分仍然是刚性件。炮管柔性体通过建立的刚性节点与炮管匣进行固定连接，从而保证炮管柔性体和航炮刚性结构之间的耦合。炮管柔性体在 HyperMesh 中采用六面体进行划分，炮管网格模型如图 3 所示。



图 3 航炮炮管网格模型

2.3 添加约束

在该模型进行仿真分析之前，需要对模型添加约束，按照航炮后坐过程中各组件的实际相互运动情况，对动力学模型各部分设定相互约束关系。

该模型所添加的约束主要包括移动副、固定副和接触副。其中主要运动构件的相互约束关系如表 1 所示。

表 1 航炮主要构件之间约束关系

构件一	构件二	约束关系
炮管	炮管匣	固定副
炮管匣	炮箱	移动副
炮门	炮箱	移动副
炮箱	地面	固定副
复进加速器	炮箱	旋转副
后坐加速器	炮箱	旋转副

2.4 施加载荷

对航炮虚拟样机模型施加的载荷主要有 4 种：

1) 碰撞和接触。

航炮在发射过程中会产生许多的碰撞，存在相互碰撞的构件之间需要定义接触力。ADAMS 采用的是 Dubosky 弹簧阻尼接触理论，是把存在接触的 2 个刚体当成一个弹簧阻尼系统，再通过 IMPACT 函数进行计算。

2) 弹簧力。

在航炮后坐系统中主要存在炮管簧、减振簧和复进簧 3 个弹簧。对 3 个弹簧需要按实际情况选择合适的作用对象，以及进行刚度系数、预紧力等参数的定义。

3) 液压缓冲器。

液压缓冲器的力^[13]与其运动速度、位移、加速度、结构等参数相关，表达式复杂而无法直接在 ADAMS 中进行表示，可通过外部编写用户子程序再在 ADAMS 中进行调用。

液压缓冲器内部如图 4 所示。

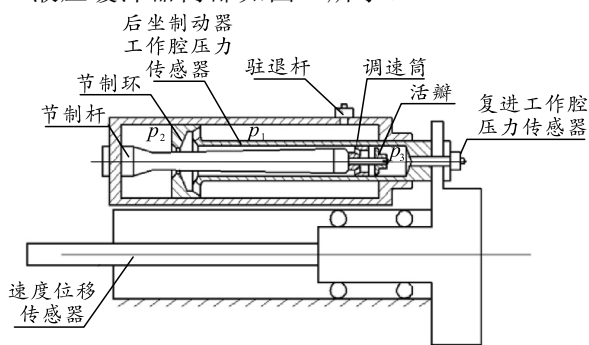


图 4 液压缓冲器内部

4) 膛压合力。

膛压合力通过内弹道方程式^[14]进行计算再通过 AKISPL 函数进行拟合取值,通过 IF 函数编写单向力的表达式。

膛压合力随时间变化曲线如图 5 所示。

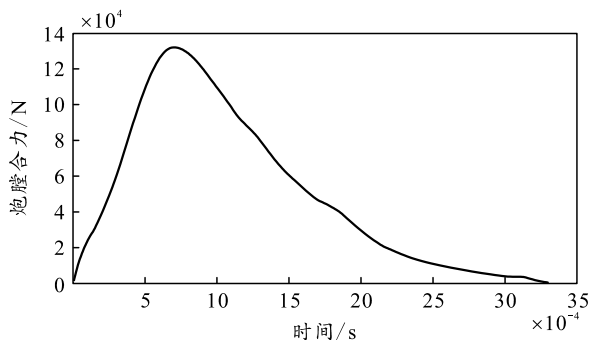


图 5 炮膛合力

航炮虚拟样机模型如图 6 所示,其中炮身只显示一部分。

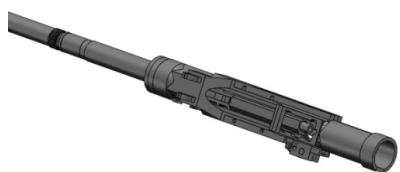


图 6 某航炮虚拟样机模型

3 仿真结果

3.1 仿真结果验证

航炮进行刚柔耦合动力学仿真分析,其最后结果主要包括后坐位移与后坐冲击载荷 2 部分。按照其他学者^[15]在相同型号航炮相同射击条件下(射击速度、射击角度、炮身质量等相同)的射击结果,进行仿真结果的正确性分析。其中,仿真后坐位移与实际后坐位移误差较小,仿真后坐冲击载荷满足实际后坐冲击载荷大小要求(最大后坐冲击载荷不大于 26 000 N),因此该次仿真结果是正确的。

航炮仿真结果与航炮实际数据对比如表 2 所示。

表 2 仿真结果与实际要求对照

参数名称	仿真结果	实际要求	误差值/%	是否满足要求
航炮后坐位移/mm	93.786	86	9.05	
航炮后坐冲击载荷/N	23 168	≤26 000		满足

3.2 仿真结果分析

航炮后坐缓冲装置主要由炮管簧、减振簧和液压缓冲器 3 部分组成。液压缓冲器的结构比炮管簧、减振簧复杂,对后坐的影响因素更多。笔者从液压缓冲器的不同结构出发,分析其对航炮后坐位移及后坐冲击载荷的影响。

1) 节制环内径对航炮后坐的影响。

在节制环内径允许的变化范围内改变节制杆内径的大小。后坐位移随时间变化曲线如图 7 所示,后坐冲击载荷随时间变化曲线如图 8 所示。

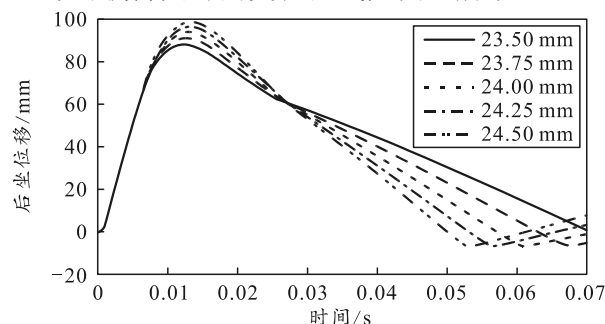


图 7 节制环不同内径下后坐位移随时间变化

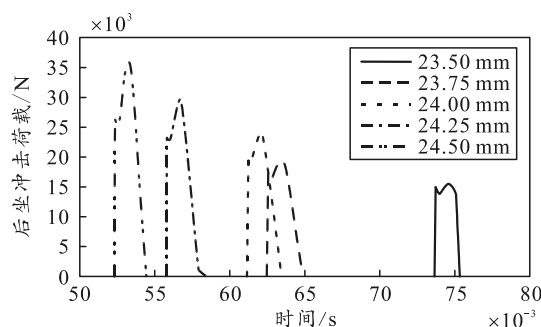


图 8 节制环不同内径下冲击载荷随时间变化

当节制环内径增大时,后坐最大位移变大,而后坐复进到位总时间变短;同时,后坐冲击载荷最大值变大,而其作用时间提前。

后坐最大位移及后坐最大冲击载荷随节制环变化如表 3 所示。

表 3 后坐位移及冲击载荷随节制环内径变化

节制环内径/mm	后坐位移/mm	冲击载荷/N
23.50	88.028	14 573
23.75	91.027	18 335
24.00	93.786	23 168
24.25	96.306	28 245
24.50	98.592	33 529

2) 驻退杆内径对航炮后坐的影响。

在驻退杆内径允许的变化范围内改变驻退杆内径的大小，后坐位移随时间变化曲线如图 9 所示，后坐冲击载荷随时间变化曲线如图 10 所示。

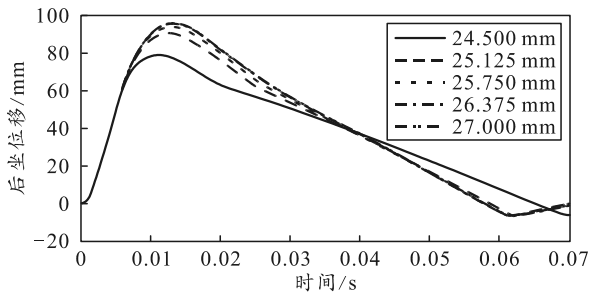


图 9 驻退杆不同内径下后坐位移随时间变化

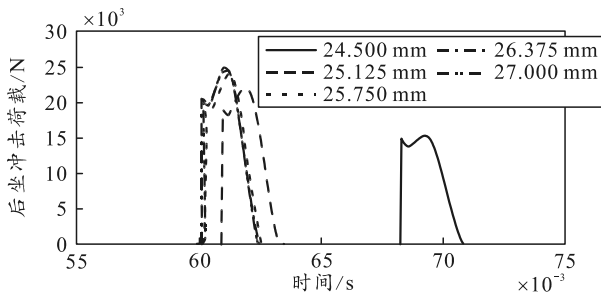


图 10 驻退杆不同内径下冲击载荷随时间变化

当驻退杆内径增大时，后坐最大位移变大，而后坐复进到位总时间先是缩短，再几乎不变；同时，后坐冲击载荷最大值变大，而其作用时间先是提前，再几乎不变。

后坐最大位移及后坐最大冲击载荷随驻退杆内径变化如表 4 所示。

表 4 后坐位移及冲击载荷随节制环内径变化

节制环内径/mm	后坐位移/mm	冲击载荷/N
24.500	78.222	14 626
25.125	89.692	20 940
25.750	93.110	22 345
26.375	94.470	22 917
27.000	95.143	23 544

3) 液压缓冲器布置位置对航炮后坐的影响。

改变液压缓冲器的布置位置会使液压缓冲器对炮身的作用时机发生改变。当液压缓冲器处于不同布置位置上时，后坐位移随时间变化曲线如图 11 所示，后坐冲击载荷随时间变化曲线如图 12 所示。

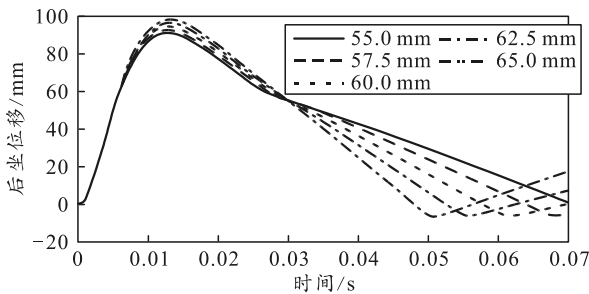


图 11 液压缓冲器布置位置改变时后坐位移随时间变化

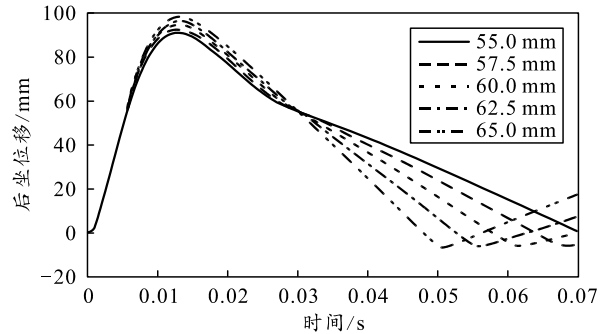


图 12 液压缓冲器布置位置改变时冲击载荷随时间变化

当液压缓冲器布置位置变远时，后坐最大位移变大，而后坐复进到位总时间变短；同时，后坐冲击载荷最大值变大，而其作用时间提前。

后坐最大位移及后坐最大冲击载荷随液压缓冲器布置位置变化如表 5 所示。

表 5 后坐位移及冲击载荷随节制环内径变化

节制环内径/mm	后坐位移/mm	冲击载荷/N
55.0	90.460	14 316
57.5	92.033	1 766
60.0	93.786	23 168
62.5	95.535	30 325
65.0	97.111	41 030

4 结论

笔者运用 ADAMS 软件对某航炮建立虚拟样机模型，并对其进行动力学仿真分析，从液压缓冲器中节制环内径、驻推杆内径及液压缓冲器布置位置的角度分析航炮的运动情况，找到这些结构参数变化时对航炮后坐位移及后坐冲击载荷的影响规律，为其他有关航炮后坐及缓冲装置的研究提供了一定参考。

参考文献：

- [1] 赵艳, 廖振强. 基于 ADAMS 的某机枪浮动装置动力学仿真分析[J]. 兵工自动化, 2014, 33(4): 84-87.
- [2] 何志强. 现代航炮降低后坐力的技术[J]. 现代兵器, 1990(2): 16-18.
- [3] 史瑞明. 一种新原理的高效缓冲装置[J]. 轻兵器, 2001(4): 16-17.
- [4] 王菲. 机枪喷管气流反推减后坐动力学建模分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [5] 咸东鹏, 廖振强, 李洪强, 等. 双孔式拉瓦尔喷管减后坐结构效能分析[J]. 弹道学报, 2013(1): 99-102.
- [6] 印圣, 邱明, 宋杰, 等. 基于刚度可变弹簧缓冲的某航炮后坐过程动力学建模及仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(6): 7-11, 41.
- [7] KATHE E, GAST R. A Fire Out of Battery Tank Gun: Theory and Simulation[R]. U.S. Army Benit Labs TACOM-ARDEC, Watervliet Arsenal, NY 12189, 2001.

- [8] GAST R, KATHE E, GULLY M, et al. Design, Testing, and Simulation of an Experimental 105-MM M35 Fire Out-of-Battery (FOOB) Direct fire Gun[R]. Army Armament Research, Development and Engineering Center, Watervliet, NY. Benet Labs, 2003.
- [9] 蒋潇蓉, 郁家耀, 周君涛, 等. 基于 ADAMS 的某无后坐炮发射动态仿真分析[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(8): 17-21.
- [10] 刘寅, 周克栋, 赫雷, 等. 基于 ADAMS 的某防暴榴弹发射器仿真分析[J]. 兵工自动化, 2012, 31(7): 39-41.
- [11] 陈峰华. ADAMS2018 虚拟样机技术从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019: 125-126.
- [12] 尚利民, 宫鹏涵, 康小勇, 等. 基于 ADAMS 某自动步枪虚拟样机建模及仿真分析[J]. 兵工自动化, 2013, 32(7): 19-20.
- [13] 张相炎. 火炮设计理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 121-128.
- [14] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 76-78.
- [15] 张相炎. 火炮自动机设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010: 27-38.

(上接第 36 页)

- [3] 阎洁, 许成志, 刘永前, 等. 基于风速云模型相似日的短期风电功率预测方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 53-59.
- [4] 张宜阳, 严欢. 基于分段分层相似日搜索和自适应脊波神经网络的风电功率多步预测[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(4): 124-131.
- [5] DING M, ZHOU H, XIE H, et al. A time series model based on hybrid-kernel least-squares support vector machine for short-term wind power forecasting[J]. ISA Transactions, 2021, 108: 58-68.
- [6] ZHANG Y G, PAN G F, ZHANG C H, et al. Wind speed prediction research with EMD-BP based on Lorenz disturbance[J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 70(3): 198-207.
- [7] QI M H, GAO H J, WANG L F, et al. Wind power interval forecasting based on adaptive decomposition and probabilistic regularised extreme learning machine[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(16): 3181-3191.
- [8] 曹渝昆, 朱萌. 基于主成分分析和 LightGBM 的风电场发电功率超短期预测[J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(6): 562-566.
- [9] 靳果, 朱清智, 孟阳, 等. 基于多层极限学习机的电能质量扰动多标签分类算法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 96-105.

(上接第 43 页)

4.2 结论

笔者以贝叶斯网络理论为基础, 针对多源毁伤情报支撑下的陆军远程火力毁伤效果评估问题, 构建火力毁伤效果评估模型, 建立贝叶斯网络拓扑结构, 采用 MLE 法和专家修正相结合的方法确定节点概率。实验结果表明: 该模型对陆军远程火力毁伤效果评估具有很强的适用性, 在多源毁伤情报的支撑下, 能准确评估陆军远程火力对打击目标造成的毁伤等级, 为精准评估陆军远程火力毁伤效果提供了有力支撑。

参考文献:

- [1] 吴正龙, 赵忠. 实基于自适应模糊神经网络系统的射击毁伤评估模型研究[J]. 兵工学报, 2012, 22(11): 1352-1357.
- [2] 李阳, 张玉梅, 赵彦东. 基于云贝叶斯网络的毁伤效果评估方法[J]. 火力指挥与控制, 2020, 45(3): 144-149, 155.
- [3] 任富兴, 王雪琴. 联合作战毁伤理论[M]. 北京: 解放军出版社, 2010: 157-159.
- [4] 洪大银, 夏成量. 破片式高炮弹药对武装直升机的毁伤评估研究[J]. 中国设备工程, 2020(4): 221-222.
- [5] 许梅生, 王瀛. 基于贝叶斯网络的目标功能毁伤评估[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(5): 134-137.
- [6] 程浩, 赵瑾, 刘俊友. 基于信息融合的贝叶斯网络毁伤评估方法[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(4): 104-107.
- [7] 程浩, 谢鹏翔, 郝艳红. 基于贝叶斯网络的毁伤评估模型[J]. 兵工自动化, 2010, 29(4): 63-65, 68.
- [8] 韩露, 史贤俊, 秦玉峰. 基于 E 占优 NSGA-2 的测试优化选择方法[J]. 兵工自动化, 2021, 40(9): 22-26, 53.
- [9] 方兴. 基于多证据的对陆远程精确打击毁伤效果评估技术[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(2): 27-30.
- [10] 谷亚辉, 程中华. 基于贝叶斯网络的战时装备维修保障效能评估[J]. 兵工自动化, 2019, 38(10): 80-82, 92.