

西北工业大学

研究生学位论文开题报告表

攻读学位级别： ☒ 博士 ☐ 硕士

学 院	_____
姓 名	_____
学 号	_____
学科、专业	飞行器设计
指导 教师	_____
填表 日期	2021 年 10 月 29 日

西北工业大学研究生院

研究生学位论文开题报告的要求

- 一、硕士生的开题报告内容应包括文献综述、选题意义、研究内容、研究方案，论文工作量的估计、工作条件，预期达到的水平，存在的问题及拟采取的解决措施。
- 二、博士生的开题报告内容应包括文献综述、选题背景及其意义、研究内容、研究特色、工作难点、预期成果及其可能的创新点。
- 三、正式开题之前，研究生应在广泛阅读中、外文资料的基础上，深入了解拟选课题的国内外研究动态，把握所选课题的目的、意义和预期结果，明确课题工作的设想、方法和研究路径。
- 四、博士生在规定的时间内，写出开题报告初稿，经指导教师审阅同意后，进行开题报告的送审。开题报告评审未通过者，修后重新送审，若第二次送审仍通不过者，则按有关规定终止学籍。
- 五、不能按期申请开题评议者，应及时向学院提出延期申请。
- 六、本表若不够填写时，可另加附页。

论文题目	多机编队协同对地攻击任务规划系统研究			
开题次数	<input checked="" type="checkbox"/> 第一次 <input type="checkbox"/> 第二次			
论文类型 (请在有关项目 下作√记号)	基础研究	应用研究	工程技术	跨学科研究
	√			
<p>一、学位论文研究依据</p> <p>学位论文的选题依据和研究意义，国内外研究现状和发展态势，主要参考文献，以及已有的工作积累和研究成果。</p> <p>1.1 选题依据和研究意义</p> <p>空中力量是现代战争中的主导力量。海湾战争、科索沃战争、伊拉克战争等现代战争的实践表明，现代战争主要是从空中发起的，由战斗机投射制导武器，对敌方重要地面目标实施精确打击^[1]。空地导弹作为空地打击中被广泛使用的武器，具有射程远、隐身性好、毁伤效率高等特点^{[2][3]}，是世界各军事强国大力研制的先进空中突击武器之一，在大国博弈中的地位不断凸显^[4]。空地导弹起源于二十世纪五十年代，经过了几十年的发展，技术逐渐成熟，代表型号包括美国“幼畜”AGM-65空地导弹、“百舌鸟”AGM-45空地反辐射导弹，俄罗斯PKE-500A型空地导弹，法国ASMP中程战略/战术空地导弹，以及我国AKD10空地导弹、KD88空地导弹等^{[5][6]}，在现代战争中得到了广泛的应用，是提升部队杀伤力、遂行大规模进攻性作战的重要依托^[7]。例如，在1991年的海湾战争中，美国空军发射了约5100枚AGM-65空地导弹，对伊拉克的装甲目标、导弹发射架、核生化武器工厂、指挥控制中心等实施打击；在2003年的伊拉克战争中，又有918枚AGM-65空地导弹投入了战场，使美军获得了极大的战争优势。空地导弹在“反恐”行动也取得了显著的成果：2020年，美军在叙利亚利用无人机发射了AGM-114R9X空地导弹，成功击毁“基地”组织恐怖分子所乘车辆。作为现代化的战争“利器”，在未来的军事行动中，空地导弹必将继续发挥举足轻重的作用。</p> <p>在传统的空地打击模式中，对目标的探测、跟踪以及对空地导弹的制导、控制等过程主要依靠各飞机平台自身的传感器与武器系统进行^[8]。随着航空武器装备制造能力的进步，现代空地导弹在速度、射程、威力、精度等方面的性能不断提升，单架飞机有限的探测与制导能力难以与现代空地导弹的优良性能相匹配，而且在复杂的电磁环境中，单架飞机的探测与制导能力受到了进一步削弱^[9]。在未来数字化、信息化战争中，空地打击将不再局限于单平台、单系统作战，而向着体系化、网络化方向发展^[10]。为了在未来战争中继续发挥空地导弹的优势，提升在复杂战场环境中的探测、制导与打击能力，多机编队协同对地攻击模式成为当前的研究热点。多机编队协同对地攻击模式采用多平台协同制导技术^{[11][12]}，涉及多数量、多种类、多方位平台，包括地面/海面平台（例如：地面雷达、舰载雷达）、空中平台（例如：战斗机、预警机、侦察机等有人/无人飞机）、天基平台（例</p>				

如：军事卫星），且主要由空中平台即有人/无人机编队执行作战任务。各平台通过数据链实现信息共享，根据各自的功能特点有着不同的任务分工，包括目标的探测与跟踪、空地导弹的发射与制导等。当探测到敌方地面目标后，由编队内的某架有人战斗机或无人战斗机发射空地导弹，导弹在多个平台的接力制导下，规避敌方威胁区域并飞向目标所在区域，实现对地面目标的精确打击。与单机对地攻击模式相比，多机编队协同对地攻击模式具有以下优点：

①打击范围更广：多机编队协同对地攻击方式扩展了单架战斗机有限的探测与制导范围，增加了空地导弹在最大飞行时间内的有效射程，扩大了空地导弹的打击范围。

②抗干扰能力更强：由单架战斗机进行发射与制导的空地导弹，在战斗机受到干扰时，容易丢失目标或失去控制，造成作战任务的失败，而在多机编队协同对地攻击中，受干扰平台的制导任务可由其他制导平台接替，因此抗干扰能力有所增强。

③具备多目标打击能力：同时打击不同区域内的多个地面目标，对于单架战斗机较为困难。在多机编队协同对地攻击中，多枚空地导弹可从编队中的一架或多架攻击机发射，并由多个制导平台分别接力制导，沿不同的航迹飞向多个目标所在区域，因此具备多目标打击能力。

在多机编队协同对地攻击过程中，任务规划技术至关重要，贯穿整个作战过程^[13]，包括编队内火力节点、制导节点与目标的任务分配，各空地导弹的飞行航迹规划、导弹的多平台制导交接控制等。与单机对地攻击模式相比，多机编队协同对地攻击模式面临作战与制导单元更多、系统更复杂、决策难度更大等挑战，在求解速度、求解质量等方面对任务规划系统提出了更高的要求。目前国内外在武器-目标分配、航迹规划等子问题上取得了较多的研究成果，但如何将这些子问题进行整合，对多机编队协同对地攻击的整体流程进行系统规划，相关研究较少。

导弹攻击区是导弹系统作战效能的综合体现^[14]。研究多机编队协同制导下的空地导弹综合攻击区，并以多机编队综合攻击区为核心指导任务规划，是多机编队协同对地攻击任务规划研究的新思路，对指挥人员掌握导弹性能，科学设计编队构型、部署武器发射与制导平台，并快速进行空地导弹攻击决策具有重要意义。目前国内外对于导弹攻击区的研究成果集中在空空导弹、舰空导弹攻击区的快速、精确解算方法，对多机编队综合攻击区解算的研究具有一定的参考价值，但是现有方法存在以下问题：

①对制导交接的考虑较为简单：目前国内外在空空导弹多机协同攻击区上有一定的研究成果，但对协同制导的考虑较为理想化，通常将不同飞机的制导区域进行简单的合并，而在制导交接涉及的交接空域、交接时机、交接误差等方面考虑较为简单，与实际情况产生较大差别。

②忽略了环境因素对攻击区的影响：舰空/空空导弹的主要作战区域在高空，战场环境较为简单，而目标运动特性复杂，因此研究重点多放在应对目标机动而忽略了环境因素对攻击区的影响。在空

地导弹综合攻击区的研究中，由于目标在地面，导弹的航迹规划需要考虑地形因素、敌方防空雷达威胁区等环境因素，这些因素都会对空地导弹的攻击区造成一定的影响。

③难以处理不规则攻击区：目前国内外关于攻击区的解算方法大多基于龙格库塔-黄金分割算法，这种方法求解的攻击区一般为规则的扇形区域，在以导弹发射载机为中心的任一搜索方向上最多有一对攻击区远近边界点。而受到多平台接力制导、敌方威胁区等因素的影响，空地导弹的攻击区可能不再是规则的扇形区域，而在某一搜索方向上出现多对攻击区边界点。当前研究尚未给出不规则攻击区的处理方法。

本研究针对在复杂的战场环境中，由多架战斗机、预警机、侦察机等组成的多机编队，采用中远程空地导弹，同时攻击敌方多个地面目标的作战任务，设计与实现以编队综合攻击区为核心的多机编队协同对地攻击任务规划系统。对编队协同对地打击下的空地导弹多机接力中制导方法进行研究，分析多机接力制导与制导交接流程，并采用启发式算法对制导交接律进行优化设计；在此基础上，结合深度强化学习算法，提出复杂战场环境中编队协同制导下的空地导弹航迹规划方法，以航迹规划结果作为攻击区解算的依据；然后采用改进的黄金分割算法，对编队中各攻击机的攻击区进行解算，并获得多机编队协同对地综合攻击区；最后利用编队综合攻击区，进行多机编队武器-目标分配与制导通路优化。通过搭建仿真平台，对以上研究内容进行仿真验证。本研究将为多机编队协同对地攻击的理论研究和工程应用提供技术支撑，提升武器装备作战能力。

1.2 国内外研究现状和发展态势

本章节主要从多平台协同制导技术、导弹航迹智能规划算法、多机编队综合攻击区解算方法、武器-目标分配智能优化方法四个方面，对国内外研究概况、水平和发展态势进行总结归纳。

①多平台协同制导技术

多平台协同制导是空地导弹实现中远程打击的关键技术之一，国外已将多平台协同制导技术应用于新型导弹的研发中，例如美国正在研制的远程反舰导弹LRASM(Long-range Anti-ship Missile)，基于数据链CEC(Cooperative Engagement Capability)技术，可通过多个平台对导弹进行接力制导^[15]。但是关于多平台协同制导的具体实现方法，国外公开文献较少。国内学者多以舰空导弹和空空导弹的多平台协同制导为研究对象^{[16][17]}，在协同制导架构、制导交接误差分析、交接律设计等方面有一定的研究成果，对空地导弹多平台协同制导研究的开展具有指导意义。关于多平台协同制导架构，文献[18]设计了舰空导弹的多平台分布式制导体系，空中平台、地面平台和海上平台通过数据链共享传感器信息，实现舰空导弹的协同制导；文献[19]构建了包含前出探测机、预警机及其护航战斗机群、舰船、天基卫星群等平台的空空导弹网络化制导体系，并对多源信息融合技术与网络化动态

组网技术进行了研究。具体到导弹制导交接方面，文献[20]分析了导弹制导交接的两种方式，即基于导弹实时跟踪数据的直接交接方式，以及基于导弹实时预测数据的间接交接方式；文献[21]和[22]对舰空导弹制导权在不同平台之间的交接过程进行了详细分析，包括制导交接的空域、时机、指令信息等。

制导误差分析与制导交接律设计是多平台协同制导中的关键技术。误差分析方面，文献[11]对协同制导交接指令误差来源进行了分析，并采用最小二乘法、极大似然配准法等，实现不同平台对导弹测量参数与目标测量参数误差的消减；文献[23]对直升机协同制导下反舰导弹的制导误差进行了分析，探究了直升机、舰船与目标的相对位置对制导误差的影响；文献[24]综合考虑了导弹和目标的距离误差、高低角误差、方位角误差以及制导交接成功概率对制导节点能力的影响，实现协同制导通道优选。制导交接律设计方面，文献[25]对协同制导交接的约束条件进行了分析，包括导弹飞行性能约束、通信范围约束、接班平台安全性约束等；文献[26]针对制导交接过程中交接班平台提供制导信息不一致的问题，设计余弦函数形式的交接平滑因子，在规定时间内，实现制导指令从交班平台到接班平台的平滑过渡；文献[27]在文献[26]的基础上提出名为“虚拟目标”法的制导交接方法，设计了匀速交接、匀加减速交接、变加减速交接三种交接律，并通过仿真对比了三种交接律的性能；文献[28]以不同周期的正余弦三角函数为基函数，采用待定系数法设计交接平滑因子，保证导弹过载0~3阶导数的连续性，从而保证制导交接的平滑性。这些制导交接律均通过基本函数构造制导交接平滑因子，构造方式具有一定的主观性，而且缺少制导交接效果的定量评价标准。通过启发式算法对协同制导交接律进行优化，是多平台协同制导交接研究的新思路。当前已有学者将遗传算法（Genetic Algorithm, GA）、粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization, PSO）等启发式算法用于导弹的自适应控制^[29]、制导律设计^[30]、助推策略优化^[31]等，这些方法将为本研究的开展提供借鉴。

②导弹航迹智能规划算法

导弹航迹规划是综合考虑导弹的飞行性能约束、制导约束、敌方威胁、目标特性等因素的前提下，为导弹规划出一条较优的飞行轨迹以保证完成任务。国内外关于导弹、无人机等飞行器的航迹规划算法（以及车辆、船舶等工具的路径规划算法），研究成果较为丰富。航迹规划算法按照航迹的表示方法可分为两类：一种是基于航迹点的航迹规划算法，用航迹点以及相邻航迹点之间的连线表示完整航迹；另一种是基于控制量的航迹规划算法，规划飞行器的控制量序列，进而解算飞行器动力学方程得到完整航迹^[32]。

基于航迹点的航迹规划算法可分为传统算法和启发式算法^[33]。传统航迹规划算法包括可视图法^[34]、人工势场法^[35]、Dijkstra法^[36]、Voronoi 图法^[37]等，启发式航迹规划算法包括A*算法^[38]、遗传

算法^[39]、粒子群算法^[40]、蚁群算法^[41]等。当前航迹规划算法的研究趋势是将不同的算法进行融合，包括启发式算法与传统算法的融合，以及不同启发式算法的融合，提升航迹规划的效果。文献[42]将蚁群算法与Voronoi图法结合，实现对陆巡航导弹的航迹规划，通过改进状态转移规则、动态调节信息蒸发因子以及局部信息素更新机制的引入，提高了算法的全局寻优性能和收敛稳定性；文献[43]将人工势场法的思想融入蝙蝠算法，通过目标引力场与障碍物斥力场引导机器人规避障碍，向着目标点运动，并引入相邻路径节点势场，缩短路径长度，加快算法收敛速度；文献[44]将稀疏A*算法与遗传算法结合，基于稀疏A*算法规划初始路径，并提取路径的特征点，以特征点为基因生成初始种群并通过遗传算法选择、交叉、变异等操作不断迭代优化，实现降低航迹长度代价的同时降低威胁代价；文献[45]将遗传算法与灰狼算法结合，在遗传算法的选择算子中引入灰狼算法的思想，使用种群中最优的三个个体对其他个体的位置进行更新，有利于发现潜在最优解，避免陷入局部最优，仿真结果表明该方法收敛速度更快，得到的路径更优。基于航迹点的航迹规划算法结果直观、计算速度快，但对飞行器的运动与控制考虑较为简单，所得航迹与飞行器实际飞行航迹差异较大。

基于控制量的航迹规划算法，通过对飞行器的过载、姿态角等控制量进行规划，并根据飞行器的动力学方程解算得到完整的航迹，所得航迹与实际更为接近。近年来，深度学习、强化学习等技术在自动驾驶^[46]、机器人控制^[47]、机械臂控制^[48]等智能控制领域取得了广泛的应用，一些学者尝试采用深度强化学习算法，以飞行器的控制量为动作集，实现连续动作空间^[49]的飞行器航迹规划。文献[50]提出了一种改进深度确定性策略梯度法的无人机航迹规划算法，无人机的动作空间包括方向角和俯仰角，训练Actor-Critic网络，并采用人工蜂群算法对网络参数进行优化，提升网络的训练效率，网络输出连续的飞行动作，最终得到连续平滑的无人机飞行航迹；文献[51]建立基于马尔可夫决策过程的巡飞弹突防控制决策模型，通过深度强化学习算法求解最优航向角变化量，实现导弹在固定高度水平面内的突防轨迹规划；文献[52]同样基于深度强化学习算法对无人机的航迹规划问题进行研究，利用飞行约束条件设计 UAV 的状态及动作模式，采用卷积神经网络对飞行环境进行处理，并采用蒙特卡洛树搜索算法提高策略迭代学习效率。当前关于导弹航迹规划算法的研究存在的问题包括：缺少多平台协同制导约束或对该约束的考虑较为简单；模型训练多在固定的战场环境中进行，当环境发生改变时需要重新训练；模型的训练速度与求解质量有待进一步提升。

③多机编队综合攻击区解算方法

导弹攻击区是以导弹发射载机为中心的区域，在此区域内的目标满足导弹的过载、射程等攻击条件，将以一定的概率被导弹命中并摧毁^[53]。目前关于空空导弹二维与三维攻击区解算的研究成果较为丰富，而空地导弹攻击区解算的研究成果相对较少，需要借鉴空空导弹攻击区解算的相关方法。

国内外对基于战斗机单机作战平台的导弹攻击区解算方法的研究已较为成熟，包括快速模拟

法、插值法、多项式拟合法等。文献[54]提出了一种空地导弹攻击区的快速解算方法，通过气动参数拟合、自适应变步长积分和黄金分割等方法，提高攻击区的解算速度。文献[55]对二维水平面内的空空导弹攻击区进行研究，采用二分法确定攻击区的边界，并采用四阶龙格库塔方法解算导弹轨迹，通过仿真验证了导弹离轴发射角对导弹攻击区的影响。文献[56]对提出了一种空空导弹动态攻击区的高精度快速解算方法，先通过进退法解算目标不机动且无风场干扰的导弹攻击区，再通过平移数值算法，计算目标机动且存在风场干扰的导弹动态攻击区。文献[57]对传统空空导弹动态攻击区的概念进行了扩充，提出了一种新概念空空导弹动态攻击区的计算方法，对导弹发射时刻的动态攻击区以及导弹发射后任意时刻的动态攻击区进行计算，在计算过程中考虑了随机风场的影响。这些传统的导弹攻击区解算方法存在计算量大、实时性较差等问题。近年来，随着人工智能技术的不断发展，导弹攻击区的智能解算方法逐渐成为研究热点，为提高导弹攻击区解算的速度与精度做出了一定的贡献。文献[58]针对空空导弹多种攻击区同时解算问题，建立了多函数深度拟合网络

（Multi-Function Deep Fitting Network，MFDFN）模型，使用改进的进退法精确解算多种空空导弹攻击区，构建训练样本集，并采用“整体预训练+局部微调”的策略对网络进行训练，仿真结果表明通过训练后的MFDFN模型进行空空导弹攻击区解算，具有较高的实时性与准确性。文献[59]采用BP（Back Propagation）神经网络对空空导弹攻击区进行拟合，实现导弹攻击区的快速解算，并采用灰狼优化算法对神经网络的初始权值与阈值进行优化，减小求解误差，提升了攻击区解算的准确性。文献[60]使用黄金分割法对空空导弹攻击区边界进行解算，并采用贝叶斯网络（Bayesian Networks，BN）模拟导弹和目标的运动学参数与导弹动态发射区之间的概率依赖关系，通过贝叶斯网络的推理与分析，对导弹的过载指令进行修正，提高导弹的命中率。

近年来，关于多机编队综合攻击区解算的研究也取得了一定的成果。文献[61]对双机协同制导下的空空导弹三维攻击区进行研究，攻击区解算方法为黄金分割法，在解算过程中不仅考虑导弹自身的飞行时间、速度、高度等约束，还考虑了协同制导的距离约束与角度约束。文献[62]以网络中心战为背景，研究网络瞄准（Network Targeting）环境中多机协同制导下的空空导弹攻击区，仿真结果表明多机协同制导方式增大了导弹的发射角和攻击距离，从而获得更大的导弹攻击区。文献[63]对双机编队空空导弹的协同攻击区进行了研究，通过仿真验证了双机的相对距离与相对方位对协同攻击区的影响。当前研究涉及协同制导平台的数量较少，种类较为单一，对制导交接条件的考虑较为简单，而且忽略了威胁区等战场环境因素对攻击区的影响，在导弹综合攻击区的解算中需要考虑更为复杂的情况。

④武器-目标分配智能优化方法

武器-目标分配是将有限的武器弹药，在符合战场要求的情况下，采用合理的优化方法，分配给

相关目标, 获得最优的作战效果。武器-目标分配问题可分为静态武器-目标分配和动态武器-目标分配^[64], 国内外学者对两类问题均有较为深入的研究, 主要研究方法为对作战效能进行评估(一般按照进攻或防御的作战类型, 评估目标拦截综合效能或目标毁伤综合效能), 并以作战效能最大化为优化目标, 建立混合整数非线性单目标或多目标优化模型。求解武器-目标分配的传统方法包括分支定界法、隐枚举法、动态规划法、割平面法等, 这些求解方法过程较为繁琐, 而且难以处理大规模数据。随着武器-目标分配问题的复杂性不断增加, 当前研究主要采用启发式智能优化算法对武器-目标分配模型进行求解。文献[65]针对多阶段动态武器-目标分配问题, 以最小化敌方目标的生存概率为优化目标, 建立武器-目标火力分配模型, 并使用改进的人工蜂群算法进行求解, 通过排序选择、精英指导、启发式初始化等策略, 加快算法收敛速度, 提升解的质量; 文献[66]建立了多约束多目标的动态武器-目标分配模型, 设置了最大化作战效益和最小化武器成本两个目标函数, 考虑了作战资源、可行性、火力转移等约束, 采用改进的多目标粒子群算法进行模型求解, 通过模拟二进制交叉、多项式变异、动态外部归档集维护等策略, 使算法的收敛性与解集的分布性都得到了较大的改善; 文献[67]将自适应NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II) 算法和自适应MOEA/D (Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition) 算法应用于多目标火力分配问题的求解, 仿真结果表明自适应机制使两种算法的性能都得到了提升, 而NSGA-II算法在收敛性和解的多样性方面都优于MOEA/D算法; 文献[68]将反舰导弹的武器-目标分配问题转化为马尔可夫决策过程, 构建了舰艇编队毁伤概率模型, 以当前已发射导弹和舰队毁伤状况为状态空间, 所有可选舰船目标为动作空间, 发射导弹后增加的毁伤数值为回报函数, 通过深度强化学习算法实现反舰导弹的武器-目标分配; 文献[69]针对综合防空火力分配中, 来袭目标、火力节点以及制导节点三者之间的火力优化匹配问题进行研究, 通过深度优先搜索算法穷举来袭目标、火力节点和制导节点的可行匹配方案, 并通过多种群并行布谷鸟搜索算法确定最优的匹配方案, 仿真结果表明该方法收敛速度快, 全局搜索能力强。这些研究成果对本研究的开展具有一定的参考价值, 但这些方法更多关注的是优化算法本身, 而对武器-目标分配过程的考虑较为理想, 需要对环境因素以及武器的实际控制等对武器-目标分配的影响做进一步探究。

1.3 参考文献

- [1] 甄建伟, 刘国庆, 张芳, 等. 空地制导弹药技术现状及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2018(07):23-29.
- [2] 冯德军, 刘佳琦, 张雅舰, 等. 精确打击武器战场环境导论[M]. 国防工业出版社:北京, 2017:61-64.
- [3] 史贤俊, 秦亮, 史小强, 等. 国外空地导弹研究现状及关键技术[J]. 飞航导弹, 2016(05):32-36.

- [4] 耿建福, 王雅琳, 宋怡然, 等. 2020年国外飞航导弹发展综述[J]. 飞航导弹, 2021(01):1-5.
- [5] 程江涛. 航空火力控制原理[M]. 国防工业出版社:北京, 2017:152-156.
- [6] 顾红军, 张少纯. 外军主要攻击机场战机及机载对地攻击弹药[M]. 国防工业出版社:北京, 2012:74-94.
- [7] 张洋, 廖南杰. 美军空地制导弹药发展策略分析[J/OL]. 飞航导弹.
<https://doi.org/10.16338/j.issn.1009-1319.20210858>.
- [8] 刘乾坤, 王成, 穆乐, 等. 空中多平台联合下协同制导模式研究与仿真[A]. 中国计算机用户协会仿真应用分会. 2021全国仿真技术学术会议论文集[C]. 中国计算机用户协会仿真应用分会: 计算机仿真杂志社, 2021:54-57.
- [9] 刘韵竹, 李海军, 吕晓峰, 等. 基于预警机的协同中制导截获概率研究[J]. 电光与控制, 2020,27(01):54-59.
- [10] 任新联, 李刚. 美国无人机载空地导弹发展现状及趋势[J]. 飞航导弹, 2021(04):59-62+67.
- [11] 石章松, 吴玲, 吴中红, 等. 多平台协同制导技术及应用[M]. 电子工业出版社:北京, 2019:1-23+155-186.
- [12] 王新龙, 季家兴. 一种远程空空导弹多平台协同制导系统及其实现方法[P]. 北京: CN101832738A,2010-09-15.
- [13] 杨晨, 张少卿, 孟光磊. 多无人机协同任务规划研究[J]. 指挥与控制学报, 2018, 4(03):234-248.
- [14] 高晓光. 航空军用飞行器导论[M]. 西北工业大学出版社:西安, 2004:142-145.
- [15] Liu D W, Sun J, Huang D G, et al. Research on development status and technology trend of intelligent autonomous ammunition[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, 1721(1): 1-9.
- [16] Xiao W, Wang H, Shi Z. Research on collaborative decision-making in ship-to-air missile relay guidance[C]//2014 IEEE Workshop on Electronics, Computer and Applications. IEEE, 2014: 681-684.
- [17] Wu Y, Song M, Chen X, et al. Cooperative Relay Guidance Task Allocation Technology Based on Dragonfly Algorithm[C]//2020 IEEE 16th International Conference on Control & Automation (ICCA). IEEE, 2020: 708-712.
- [18] Li R, Wang H, Shi Z. MAS based mission planning for distributed guidance system[C]//The Fourth International Workshop on Advanced Computational Intelligence. IEEE, 2011: 387-390.
- [19] 马晨, 崔颢, 陈辛. 多平台协同的远程空空导弹网络化制导研究[J]. 航空兵器, 2019,

26(04):67-74.

- [20] Rui L, Hangyu W. Research on the Multi-platform Cooperative Guidance Tasks Allocation Based on Contract Net Protocol[J]. Affective Computing and Intelligent Interaction, 2012: 561-569.
- [21] 赵永涛, 胡云安, 李静. 舰空导弹作战接力切换式制导交接方案设计[J]. 飞行力学, 2011, 29(01):50-53.
- [22] 王道重, 唐金国, 肖玉杰, 宫明慧. 编队舰空导弹接力制导研究[J]. 电光与控制, 2018, 25(09):84-87.
- [23] Wang J, Yao K, Qun E, et al. Analysis of Shipborne Helicopter' s Guidance Error in Anti-Ship Missile Over-the-horizon Attack[C]. //Proceedings of the First International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy, Atlantis Press, 2015:2134-2138.
- [24] 王道重, 滕克难, 肖玉杰, 等. 基于制导误差的地空导弹接力制导决策研究[J]. 电光与控制, 2019, 26(09):1-4.
- [25] 刘韵竹, 李海军, 吕晓峰, 等. 基于预警机的空空导弹制导交接区仿真[J]. 电光与控制, 2019, 26(04):81-85.
- [26] 余名哲, 张友安, 钱进. 基于遭遇点预测的比例导引与多平台接力制导交接律设计[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(03):255-258+314.
- [27] 刁兴华, 方洋旺, 张磊, 等. 中远程空空导弹多机协同中制导交接方法[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(03):77-82.
- [28] 毕文豪. 信息环境下智能火力与指挥控制关键技术研究[D]. 西北工业大学, 2018.
- [29] Yaghi M, Efe M Ö. Adaptive neural FOPID controller applied for missile guidance system[C]//IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2017: 2955-2960.
- [30] Gözde H, Özden S. Adaptive True Proportional Navigation Guidance based on Heuristic Optimisation Algorithms[J]. Defence Science Journal, 2021, 71(2): 271-281.
- [31] Xu B, Wang Y, Liu L. Twice pulse ignition boost strategy for missile guidance Based on improved particle swarm optimization algorithm[C]//2018 37th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2018: 9907-9912.
- [32] 王琼, 刘美万, 任伟建, 等. 无人机航迹规划常用算法综述[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2019, 37(01):58-67.
- [33] Zhao Y, Zheng Z, Liu Y. Survey on computational-intelligence-based UAV path planning[J].

Knowledge-Based Systems, 2018, 158: 54-64.

- [34] Majeed A, Lee S. A fast global flight path planning algorithm based on space circumscription and sparse visibility graph for unmanned aerial vehicle[J]. Electronics, 2018, 7(12): 1-27.
- [35] Yingkun Z. Flight path planning of agriculture UAV based on improved artificial potential field method[C]//2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). IEEE, 2018: 1526-1530.
- [36] Luo M, Hou X, Yang J. Surface optimal path planning using an extended Dijkstra algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 147827-147838.
- [37] Candeloro M, Lekkas A M, Sørensen A J. A Voronoi-diagram-based dynamic path-planning system for underactuated marine vessels[J]. Control Engineering Practice, 2017, 61: 41-54.
- [38] 李冲. 多UCAV协同作战航路规划研究[D].西北工业大学,2018.
- [39] Lamini C, Benhlila S, Elbekri A. Genetic algorithm based approach for autonomous mobile robot path planning[J]. Procedia Computer Science, 2018, 127: 180-189.
- [40] Shao S, Peng Y, He C, et al. Efficient path planning for UAV formation via comprehensively improved particle swarm optimization[J]. ISA transactions, 2020, 97: 415-430.
- [41] Rashid R, Perumal N, Elamvazuthi I, et al. Mobile robot path planning using Ant Colony Optimization[C]//2016 2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA). IEEE, 2016: 1-6.
- [42] 谢春思, 桑雨, 刘志赢. 基于改进V-ACO算法的对陆巡航导弹航迹规划研究[J]. 战术导弹技术, 2021, (5):122-131.
- [43] 李昶威, 甘屹, 孙福佳, 等. 基于蝙蝠算法-人工势场的机器人路径规划研究[J]. 制造业自动化, 2021, 43(02):76-81.
- [44] 刘群芳. 基于稀疏A*算法与进化算法的无人机动态航迹规划研究[D]. 南昌航空大学, 2016.
- [45] 陈智康. 移动机器人智能路径规划方法的研究[D]. 天津职业技术师范大学, 2021.
- [46] Bai Z, Cai B, ShangGuan W, et al. Deep learning based motion planning for autonomous vehicle using spatiotemporal LSTM network[C]//2018 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2018: 1610-1614.
- [47] Tai L, Paolo G, Liu M. Virtual-to-real deep reinforcement learning: Continuous control of mobile robots for mapless navigation[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2017: 31-36.
- [48] Kalashnikov D, Irpan A, Pastor P, et al. Scalable deep reinforcement learning for vision-based robotic

- manipulation[C]//Conference on Robot Learning. PMLR, 2018: 651-673.
- [49] Lillicrap T P, Hunt J J, Pritzel A, et al. Continuous control with deep reinforcement learning[J]. Computer Science, 2015, 8(6): 169-187.
- [50] 高敬鹏,胡欣瑜,江志烨.改进DDPG无人机航迹规划算法[J/OL].计算机工程与应用:1-9[2021-11-17].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20210910.1058.012.html>.
- [51] 高昂, 董志明, 叶红兵, 等. 基于深度强化学习的巡飞弹突防控制决策[J]. 兵工学报, 2021, 42(05):1101-1110.
- [52] 邱月, 郑柏通, 蔡超. 多约束复杂环境下UAV航迹规划策略自学习方法[J]. 计算机工程, 2021, 47(05):44-51.
- [53] Zhang S, Jie L, Zhang Z. The Simulation of Attack Area for Suicide UAV Based on Flight Data[C]// 2019 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). IEEE, 2019:152-156.
- [54] 丁达理, 王铀, 黄涛, 等. 一种空地导弹攻击区快速解算方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2014, 15(06):6-10.
- [55] Li A, Meng Y, He Z. Simulation Research on New Model of Air-to-Air Missile Attack Zone[C]// 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2020:1998-2002.
- [56] 惠耀洛, 南英, 陈哨东,等. 空空导弹动态攻击区的高精度快速算法研究[J]. 弹道学报, 2015(02):39-45.
- [57] Hui Y, Ying N, Chen S, et al. Dynamic attack zone of air-to-air missile after being launched in random wind field[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(005):1519-1528.
- [58] 闫孟达, 杨任农, 左家亮, 等. 基于深度学习的空空导弹多类攻击区实时解算[J]. 兵工学报, 2020, 41(12):2466-2477.
- [59] 史振庆, 梁晓龙, 张佳强, 等. 基于GWO-BP神经网络的攻击区解算方法[J]. 飞行力学, 2019, 37(03):64-67+92.
- [60] Sun Y, Wang X, Wang T, et al. Modeling of Air-to-air Missile Dynamic Attack Zone Based on Bayesian Networks[C]// 2020 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2020: 5596-5601.
- [61] Shi Z, X Liang, Zhang J, et al. Modeling and Simulation Analysis on Three-Dimensional Air-to-Air Missile Attack Zone of Two Aircrafts[C]// 2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC). IEEE, 2020:1-5.
- [62] Meng G, Pan H, Liang X, et al. Allowable missile launch zone calculation for multi-fighter

coordination attack under network targeting environment[C]// 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, 2016:2182-2185.

[63] 徐国训, 梁晓龙, 张佳强, 等. 双机空空导弹协同攻击区仿真研究[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(01):34-39.

[64] Kline A, Ahner D, Hill R. The weapon-target assignment problem[J]. Computers & Operations Research, 2019, 105: 226-236.

[65] 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.

[66] Kong L, Wang J, Zhao P. Solving the Dynamic Weapon Target Assignment Problem by an Improved Multiobjective Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 1-29.

[67] Li J, Chen J, Xin B, et al. Solving multi-objective multi-stage weapon target assignment problem via adaptive NSGA-II and adaptive MOEA/D: A comparison study[C]//2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). IEEE, 2015: 3132-3139.

[68] 阎栋, 苏航, 朱军. 基于DQN的反舰导弹火力分配方法研究[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(05):18-24.

[69] 孙海文, 谢晓方, 庞威, 等. 基于改进火力分配模型的综合防空火力智能优化分配[J]. 控制与决策, 2020, 35(05):1102-1112.

1.4 已有工作积累和研究成果

课题研究者已获得探测制导与控制技术学士学位, 对于空地导弹制导与控制的理论研究以及工程应用具有一定的技术积累, 在研究生课程中又对相关理论进行了深入学习, 并对导弹的制导与控制模型进行了仿真。研究者对于深度学习与启发式算法相关知识较为熟悉, 参与了相关的科研项目, 并已受理 1 项发明专利, 一篇论文已被《APPLIED SOFT COMPUTING》期刊 (SCI 二区) 录用。研究者熟练掌握 C++ 与 Python 编程语言, 熟悉 MATLAB、Visual C++6.0、PyQt 等科学计算与软件开发工具。这些都为本研究打下一定的基础。

二、学位论文研究内容

学位论文的研究目标、研究内容及拟解决的关键性问题（可续页）

2.1 研究目标

本论文的研究目标是：针对多机编队协同对地攻击作战模式，设计以多机编队综合攻击区为核心的多机编队协同对地攻击任务规划系统，实现多平台协同制导下的空地导弹作战规划。构建多机编队协同对地攻击作战体系，明确空地导弹制导权的交接流程，校正制导交接指令中存在的误差，并对制导交接律进行优化设计，提升制导交接的稳定性，减少制导误差；构建典型的战场环境，研究多机编队协同制导下的空地导弹航迹规划方法，通过深度强化学习算法，在连续动作空间中实现空地导弹控制序列及航迹的快速生成；分析战场环境、协同制导平台性能、导弹自身性能、编队构型等因素对攻击区的影响，研究多机编队综合攻击区的精确、快速解算方法；在具体的任务场景中，以多机编队综合攻击区为依据，构建多机编队武器-目标分配与制导通路优化模型，并采用多目标遗传算法进行求解；搭建多机编队协同对地攻击仿真实验平台，对接力中制导、航迹规划、综合攻击区解算、武器-目标分配与制导通路优化算法的有效性和时效性进行验证，为编队构型的优化设计、武器发射与制导平台的科学部署以及空地导弹的攻击决策提供技术支撑。

2.2 研究内容

在国内外现有研究的基础上，根据多机编队协同对地攻击任务规划系统的功能需求，以多机编队协同对地综合攻击区为核心，本研究拟从五个方面开展研究。其中研究内容①“编队协同对地打击下的空地导弹多机接力中制导方法研究”研究了多机编队协同对地攻击的作战流程，并设计了空地导弹多机接力中制导方案与制导交接方案，是多机编队协同对地攻击任务规划的基础，是解决多机编队协同对地综合攻击区解算问题的基础阶段；研究内容②“复杂战场环境中编队协同制导下的空地导弹航迹规划研究”在研究内容①的基础上，研究在复杂战场环境中，空地导弹自编队内某一发射平台发射，经编队内多个制导平台接力制导，到达某一目标所在区域的航迹规划方法，并根据航迹规划结果判断目标是否在该发射平台发射空地导弹的攻击区内，从而为空地导弹攻击区解算提供依据；研究内容③“多机编队协同对地综合攻击区解算方法研究”是本文的核心研究内容，对从编队内每个发射平台发射，并由编队内其他制导平台协同制导的空地导弹的攻击区进行解算，获得多机编队综合攻击区；研究内容④“多机编队武器-目标分配与制导通路优化方法研究”是多机编队协同对地综合攻击区在编队协同对地攻击中的应用，在具体的任务场景中，以多机编队综合攻击区为依据，确定编队中各攻击机的打击目标，以及各攻击机发射的空地导弹由编队中哪些平台进行协同制导；研究内容⑤“多机编队协同对地攻击任务规划系统仿真验证”是运用上述理论和模型的研究

究成果，搭建多机编队协同对地攻击仿真实验平台，并在典型的战场环境中，对上述接力中制导、航迹规划、综合攻击区解算、武器-目标分配与制导通路优化的研究成果进行仿真验证。具体研究内容如下：

①编队协同对地打击下的空地导弹多机接力中制导方法研究

构建多机编队协同对地攻击作战体系，梳理多机编队协同中远程对地精确打击的整体作战流程，并设计多架飞机对空地导弹的接力中制导方案及制导交接方案。针对空地导弹制导交接中亟需解决的制导误差与平滑交接问题，分析制导交接指令中包含的信息，以及制导交接指令的误差来源，基于递推最小二乘法实现误差消减；基于“虚拟弹位”法实现空地导弹弹道及制导指令的平稳过渡，并基于启发式优化算法对制导交接律进行优化设计，使导弹过载变化尽量平滑，导弹航迹与预设航迹偏差尽可能小。研究内容主要包括：

- 多机编队协同对地攻击作战体系构建
- 空地导弹多机接力中制导及制导交接方案设计
- 基于递推最小二乘法的制导交接指令误差消减
- 基于启发式虚拟弹位法的制导交接律优化设计

②复杂战场环境中编队协同制导下的空地导弹航迹规划研究

针对空地导弹在多机编队接力中制导下的航迹规划问题，并考虑复杂战场环境中的地形、气象、敌方威胁区等因素，基于数字高程模型对空地导弹所处的战场环境进行构建；对空地导弹航迹规划的目标函数与约束条件进行分析，构建多机编队协同制导下的空地导弹航迹规划模型；基于深度强化学习算法求解航迹规划模型，采用卷积神经网络（Convolutional Neural Network，CNN）对输入数据进行处理，并通过策略梯度法对神经网络进行训练，在连续的动作空间内生成空地导弹的控制序列，进而得到空地导弹航迹。研究内容主要包括：

- 基于数字高程模型的空地导弹战场环境构建
- 多机编队协同制导下的空地导弹航迹规划模型建立
- 基于CNN-策略梯度法的空地导弹航迹规划算法研究

③多机编队协同对地综合攻击区解算方法研究

分析战场环境、协同制导平台性能、导弹自身性能、编队构型等因素对由编队内每个发射平台发射空地导弹的攻击区的影响，以及对编队综合攻击区的影响；针对因多机接力制导、威胁区域规避等造成的空地导弹攻击区不规则问题，采用改进的黄金分割法进行多机编队综合攻击区的解算；在黄金分割法迭代过程中，将研究内容②中的航迹规划算法与概率神经网络（Probabilistic Neural Network，PNN）融合，快速判断目标位置是否在攻击区内，进而确定攻击区边界的关键点，最终

生成完整的多机编队协同对地综合攻击区。研究内容主要包括：

- 多机编队协同对地综合攻击区影响因素分析
- 基于改进黄金分割法的编队综合攻击区解算
- 基于概率神经网络的目标点类型判断

④多机编队武器-目标分配与制导通路优化方法研究

基于研究内容③得到的多机编队协同对地综合攻击区,实现多机编队武器-目标分配与制导通路的优化。首先构建多机编队协同对地攻击的任务场景,明确环境参数、目标参数和编队参数;然后建立多机编队武器-目标分配与制导通路优化模型,明确武器-目标分配与制导通路优化的约束条件与目标函数;最后基于改进的NSGA-II算法对优化模型进行求解,确定编队中各攻击机的打击目标,以及各攻击机发射的空地导弹由编队中哪些平台进行接力制导。研究内容主要包括:

- 多机编队协同对地攻击任务场景构建
- 多机编队武器-目标分配与制导通路优化模型建立
- 基于改进NSGA-II算法的武器-目标分配与制导通路优化模型求解

⑤多机编队协同对地攻击任务规划系统仿真验证

搭建多机编队协同对地攻击仿真实验平台,使其能够支持典型的战场环境(包括复杂地形、气象、威胁区等)以及导弹发射与制导平台(包括预警机、有人/无人攻击机等)的建模与仿真,并能在给定的战场环境与多机编队空间构型下,对接力中制导、航迹规划、综合攻击区解算、武器-目标分配与制导通路优化算法的有效性和时效性进行验证,为多机编队协同对地攻击任务规划系统的设计优化提供反馈与演示。研究内容主要包括:

- 多机编队协同对地攻击仿真实验平台搭建及仿真架构设计研究
- 仿真软件人机交互界面设计研究
- 典型战场环境与编队空间构型下的算法仿真测试及验证分析方法研究

2.3 拟解决的关键科学问题

2.3.1 空地导弹多机接力中制导方案设计

随着武器装备性能的不不断提升以及现代战争节奏的日益加快,空地导弹制导权的交接时间有限,而且对制导交接的稳定性提出了更高的要求。交接班平台传感器的测量误差可能造成导弹过载的突变,使导弹飞行偏离预设航迹,甚至造成导弹的失控,因此必须提升空地导弹制导交接的稳定性,减少航迹偏差。当前关于导弹制导交接律的设计多采用初等函数构造制导交接平滑因子,构造方式具有较强的主观性。如何对制导交接律进行合理的评价,并将启发式优化算法应用到空地导弹

多机接力中制导方案设计中，是多机编队协同对地打击中的重要问题。

2.3.2 复杂约束下的空地导弹航迹规划与控制问题

在空地导弹航迹规划过程中，不仅要考虑地形、敌方威胁区等战场环境约束，还需要考虑制导平台的制导范围和制导交接的约束，以及空地导弹自身性能的约束等，如何在复杂约束条件下快速生成可行的航迹是本研究的难点。而且传统的航迹规划方法大多仅对航迹点进行规划，对导弹的控制考虑较为简单，与实际情况产生较大差异。如何从空地导弹的机动控制层面出发，生成可行的控制参数序列，进而得到符合约束的导弹航迹，是多平台协同制导下空地导弹航迹规划中的重要问题。

2.3.3 编队协同对地综合攻击区快速精确解算问题

受到威胁区等战场环境以及导弹发射与制导平台空间位置的影响，空地导弹的攻击区不再是传统的较为规则的扇形区域，在以导弹发射载机为中心的某些方向上，有可能出现多个攻击区边界点。传统方法通过对导弹性能的分析直接确定攻击区范围，或者通过黄金分割等方法求解攻击区各方向上的两个边界点（远边界点与近边界点），在本问题中都不再适用。如何快速寻找攻击区在每个方向上的边界点，并根据这些关键点确定整个攻击区的形状，是多机编队综合攻击区解算方法研究中的核心问题。

2.3.4 基于编队综合攻击区的武器-目标分配问题

多机编队武器-目标分配以编队中各发射平台发射的各空地导弹的作战效能作为分配依据，现有方法对武器-目标分配过程考虑较为理想，作战效能评估方法较为简单。多机编队综合攻击区反映了战场环境、协同制导平台性能、导弹自身性能、编队构型等因素对各空地导弹作战效果的影响，如何利用编队综合攻击区，确定编队内各攻击机的打击目标以及各空地导弹的制导平台，是多机编队协同对地攻击中的重要问题。

三、学位论文研究计划及预期目标

1. 拟采取的主要理论、研究方法、技术路线和实施方案（可续页）

3.1.1 研究方法

本研究着眼于多机编队协同对地攻击任务规划亟需解决的实际问题和迫切的军事需求，以系统工程理论方法对问题进行分析，综合运用军事运筹学、数学、控制理论、深度学习等多学科领域知识，采用理论分析、模型建立、算法设计和实验验证等方法，拟从编队协同对地打击下的空地导弹多机接力中制导方法、复杂战场环境中编队协同制导下的空地导弹航迹规划、多机编队协同对地综合攻击区解算方法、多机编队武器-目标分配与制导通路优化方法、多机编队协同对地攻击任务规划系统仿真等内容逐步展开研究。通过创新理论、方法和技术途经，重点解决空地导弹多机接力中制导方案设计、复杂约束下的空地导弹航迹规划与控制、编队协同对地综合攻击区快速精确解算、基于编队综合攻击区的武器-目标分配等关键科学问题，突破传统方法的不足与局限，基于深度学习等理论探索多机编队协同对地攻击任务规划的新理论和新方法，并通过仿真实验平台的构建和仿真测试，验证模型的有效性。

3.1.2 技术路线

在本研究开展的具体过程中，从多机编队协同对地攻击任务规划系统的总体需求出发，提出研究方案，并列出研究方案所需的关键技术，然后按照理论建模分析、数学建模、算法设计以及仿真验证四个层次逐步展开，强调多学科、多领域、多层次的融合研究。具体的技术路线如图 1 所示：



图 1 论文研究技术路线图

详细技术路线如下:

①编队协同对地打击下的空地导弹多机接力中制导方法研究

首先构建多机编队协同对地攻击作战体系。明确体系中的武器装备种类及功能; 梳理多机编队协同制导下空地导弹对地攻击的整体作战流程, 包括导弹的初制导、中制导、末制导阶段, 以及导弹飞行中的制导交接和威胁区规避等; 对空地导弹的制导交接过程进行详细分析, 包括交接班平台种类、交接空域与时机、交接指令信息等。参照基于 DoDAF (Department of Defense Architecture Framework) 的体系描述方法, 给出整体作战流程及制导交接流程的作战视图 (Operational Viewpoint, OV)。

本研究假设空地导弹的初制导阶段时间较短, 可以忽略; 末制导阶段采用自动瞄准制导, 由空地导弹依靠自身传感器接近目标, 完成对地攻击任务; 中制导阶段采用遥控制导, 导弹接收制导平

台的制导指令，按给定的飞行方案飞向目标区域，空地导弹的接力制导发生在导弹的中制导阶段。另外，假设空地导弹在中制导阶段保持高速平飞，因此在给定飞行高度的二维平面内研究空地导弹的多平台制导交接方法。

然后对制导交接过程中的制导指令误差消减方法进行研究。空地导弹的制导指令包括导弹位置参数、导弹控制参数、目标位置与运动参数。假设目标为地面固定目标，目标位置可以准确无误地测量。导弹交班平台与接班平台对导弹位置参数的测量存在误差，包括随机误差与系统误差，其中随机误差可通过多传感器信息融合、Kalman 滤波等方法进行消除，本研究仅对交接班平台测量导弹位置的系统误差的消减方法进行研究。在空地导弹飞行高度所在平面内，交接班平台位置、导弹真实位置、各平台对导弹的测量参数如图 2 所示：

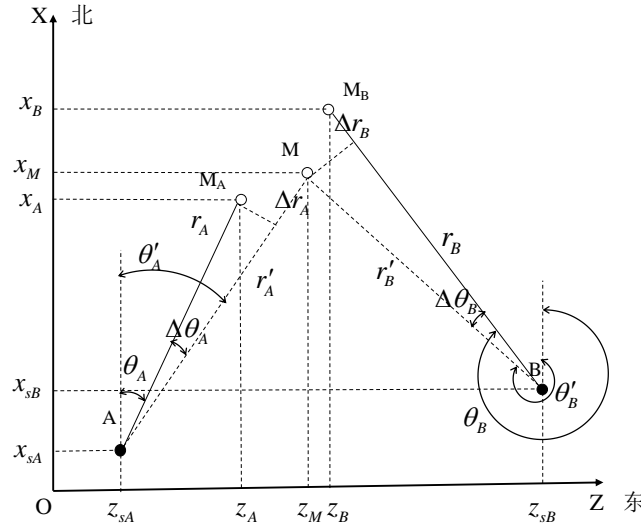


图 2 交接班平台测量参数示意图

在北天东坐标系中对各参数进行描述，在空地导弹飞行高度所在水平面内研究导弹的运动。图中 A 为交班平台位置，B 为接班平台位置，M 为空地导弹真实位置，M_A 和 M_B 分别为交接班平台测量得到的导弹位置。 r_A 与 θ_A 和 r_B 与 θ_B 分别表示交接班平台测得的导弹斜距与方位角， r'_A 、 θ'_A 、 r'_B 、 θ'_B 为真实的导弹斜距与方位角， Δr_A 、 $\Delta \theta_A$ 、 Δr_B 、 $\Delta \theta_B$ 为的导弹斜距与方位角的测量误差。考虑测量误差的正负性，定义每个参数的测量值=真实值+测量误差。根据图 2 中的几何关系，并通过近似计算，得到如下公式：

$$\begin{cases} x_A - x_B \approx \cos \theta_A \Delta r_A - \cos \theta_B \Delta r_B - r_A \sin \theta_A \Delta \theta_A + r_B \sin \theta_B \Delta \theta_B \\ z_A - z_B \approx \sin \theta_A \Delta r_A - \sin \theta_B \Delta r_B + r_A \cos \theta_A \Delta \theta_A - r_B \cos \theta_B \Delta \theta_B \end{cases} \quad (1)$$

需要对交接班平台的系统误差 Δr_A 、 $\Delta \theta_A$ 、 Δr_B 、 $\Delta \theta_B$ 进行估计。对于公式 (1) 中的方程组，待估计参数个数多于方程个数，无法直接进行估计。本研究设计空地导弹的制导交接在 N 个周期内完成，可获得 N 个时刻的测量值，得到如下公式：

$$\begin{cases} x_{An} - x_{Bn} \approx \cos \theta_{An} \Delta r_A - \cos \theta_{Bn} \Delta r_B - r_{An} \sin \theta_{An} \Delta \theta_A + r_{Bn} \sin \theta_{Bn} \Delta \theta_B \\ z_{An} - z_{Bn} \approx \sin \theta_{An} \Delta r_A - \sin \theta_{Bn} \Delta r_B + r_{An} \cos \theta_{An} \Delta \theta_A - r_{Bn} \cos \theta_{Bn} \Delta \theta_B \end{cases} \quad (n=1,2,\dots,N) \quad (2)$$

当 $N \geq 2$ 时即可通过最小二乘法对 Δr_A 、 $\Delta \theta_A$ 、 Δr_B 、 $\Delta \theta_B$ 进行估计。为了保证系统误差估计的实时性，拟采用递推最小二乘法进行误差估计，计算公式如下所示：

$$\begin{cases} \Delta \hat{\mathbf{x}}(k) = \Delta \hat{\mathbf{x}}(k-1) + \left(Z(k) - \boldsymbol{\Psi}^T(k) \Delta \hat{\mathbf{x}}(k-1) \right) \mathbf{K}(k) \\ \mathbf{K}(k) = \frac{\mathbf{P}(k-1) \boldsymbol{\Psi}(k)}{1 + \boldsymbol{\Psi}^T(k) \mathbf{P}(k-1) \boldsymbol{\Psi}(k)} \\ \mathbf{P}(k) = \left[\mathbf{I} - \mathbf{K}(k) \boldsymbol{\Psi}^T(k) \right] \mathbf{P}(k-1) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\Delta \hat{\mathbf{x}}(k) = [\Delta \hat{r}_a, \Delta \hat{\theta}_a, \Delta \hat{r}_b, \Delta \hat{\theta}_b]^T$ ， $\Delta \hat{\mathbf{x}}(k)$ 表示各误差量的第 k 次估计值。由于公式 (2) 中包含两个方程，因此每获得一组新的测量值，进行两次递推， $Z(k)$ 的值为 $x_{An} - x_{Bn}$ 或 $z_{An} - z_{Bn}$ ， $\boldsymbol{\Psi}(k)$ 为对应方程中的各误差项系数生成的列向量。

以上给出采用基本递推最小二乘法消减制导指令系统误差的方法，在研究中将尝试基本递推最小二乘法的改进方法，包括递推增广最小二乘法、递推偏差补偿最小二乘法、递推广义最小二乘法、递推限定记忆最小二乘法等，通过算法对比，选择性能最优的误差消减方法。

最后对空地导弹的制导交接律进行优化设计。导弹的控制方程如下所示：

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \cos \psi_v \\ \frac{dz}{dt} = -v \sin \psi_v \\ \frac{d\psi_v}{dt} = f(x, z, \psi_v, \mathbf{P}_{\text{目标}}, t) \\ n_z = -\frac{v}{g} \frac{d\psi_v}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

式中 x 和 z 表示导弹在北天东坐标系的位置， v 表示导弹速度， ψ_v 表示弹道偏角， n_z 表示导弹的法向过载， f 表示弹道偏角控制函数。根据当前导弹参数（包括导弹位置和弹道偏角）及目标参数 $\mathbf{P}_{\text{目标}}$ 生成弹道偏角的控制指令，进而控制导弹航迹。

在空地导弹的制导交接中，交班平台测得的导弹位置 (x_A, z_A) 、接班平台测得的导弹位置 (x_B, z_B) 、真实的导弹位置 (x_M, z_M) 三者均有差异。如果将控制函数 f 中的导弹位置由 (x_A, z_A) 瞬间切换为 (x_B, z_B) ，可能造成导弹法向过载的 n_z 突变，并带来较大的航迹偏差。为了实现空地导弹的平滑交接，并减少航迹偏差，设计制导交接函数如下所示：

$$\begin{cases} x(t) = \alpha(t)x_A(t) + \beta(t)x_M(t) + (1 - \alpha(t) - \beta(t))x_B(t) \\ z(t) = \alpha(t)z_A(t) + \beta(t)z_M(t) + (1 - \alpha(t) - \beta(t))z_B(t) \\ 0 \leq \alpha(t) \leq 1, 0 \leq \beta(t) \leq 1, 0 \leq \alpha(t) + \beta(t) \leq 1 \\ \alpha(0) = 1, \alpha(NT) = 0, \beta(0) = 0, \beta(NT) = 0 \\ 0 \leq t \leq NT \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 为制导交接平滑因子, T 为每个交接周期的时长, N 为总周期数。公式 (5) 表示根据 (x_A, z_A) 、 (x_B, z_B) 、 (x_M, z_M) , 构造虚拟的导弹位置 (x, z) , 以虚拟导弹位置为输入控制导弹的弹道偏角。虚拟导弹位置从 (x_A, z_A) 出发, 逐渐向 (x_B, z_B) 过渡, 在 N 个周期内完成制导交接。

基于启发式优化算法实现制导交接平滑因子 $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 的设计。目标函数为法向过载变化最小, 导弹航迹与预设航迹偏差最小; 公式 (5) 中给出了 $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 的约束条件; 以每个交接周期结束时刻的平滑因子取值作为决策变量。拟采用遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等启发式优化算法, 实现制导交接平滑因子的优化设计, 对比各算法的收敛性与解的质量, 获得更好的优化效果。以遗传算法为例, 设计遗传算法种群中的染色体编码如图 3 所示:

$\alpha(T)$	$\alpha(2T)$...	$\alpha(NT-T)$	$\beta(T)$	$\beta(2T)$...	$\beta(NT-T)$
-------------	--------------	-----	----------------	------------	-------------	-----	---------------

图 3 染色体编码示意图

每条染色体包含 $2(N-1)$ 个基因, 编码方式为实数编码。通过遗传算法的选择、交叉、变异等操作, 获得每个交接周期结束时刻平滑因子的最优取值, 得到最优的平滑因子函数 $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 。

②复杂战场环境中编队协同制导下的空地导弹航迹规划研究

首先研究空地导弹战场环境的构建方法。根据空地导弹的最远射程、雷达探测的最大范围等确定战场范围, 将战场划分为 $p \times q$ 规模的栅格, 用二维矩阵 $\mathbf{H}_{p \times q}$ 表示各点的高度, 建立战场环境的数字高程模型。高程数据通过仿真生成, 或从公开数据库中获得特定区域的真实数据, 并进行数据插值、平滑等处理。以战场区域的数字高程模型为基础, 添加敌方威胁区域、协同制导区域、目标所在区域等信息, 构建完整的战场环境。拟采用四个矩阵描述战场环境, 除高程矩阵 $\mathbf{H}_{p \times q}$ 外, 还包括: 威胁区矩阵 $\mathbf{T}_{p \times q}$, 记录空地导弹在各点受到的威胁程度; 制导区矩阵 $\mathbf{G}_{p \times q}$, 记录战场各点是否处于我方制导平台制导范围内; 任务区矩阵 $\mathbf{M}_{p \times q}$, 记录某时刻空地导弹的位置以及目标所在区域, 在本航迹规划算法中仅考虑一枚空地导弹攻击一个地面目标的情景。

然后基于马尔科夫决策框架, 构建多机编队协同制导下的空地导弹航迹规划模型。给定高度下空地导弹的二维运动模型由公式 (4) 给出; 状态空间为 $S = \{\mathbf{H}, \mathbf{T}, \mathbf{G}, \mathbf{M}, h, v, \psi_v\}$, 即状态空间包括用于描述战场环境的四个矩阵, 以及导弹的飞行高度 h 、飞行速度 v 和弹道偏角 ψ_v ; 动作空间为 $A = \{\Delta\psi_v\}$, 其中 $\Delta\psi_v$ 表示相邻仿真步长弹道偏角的改变量; 回报函数 R 根据航迹规划的约束条件

和目标函数进行设计。空地导弹航迹规划的约束条件包括：战场边界约束、导弹机动性能约束、制导平台制导范围与制导交接约束、敌方威胁区约束等；目标函数包括总飞行时间最短、总威胁最小等。

最后研究基于深度强化学习算法的航迹规划模型求解。强化学习的基本思想是智能体（进行决策的个体，本研究中为空地导弹）根据自身当前状态，采用某种策略选择一个动作作用于环境，环境依据智能体动作对其进行状态转移，并将奖励或惩罚的信号反馈给智能体，智能体根据信号优化自身策略，并继续与环境交互，不断提升决策水平。采用神经网络对状态-动作值函数 $Q(s,a)$ 进行拟合，以解决强化学习的“维数灾难”问题；由于状态空间 S 中包含多个二维矩阵，涉及参数较多，故采用卷积神经网络对网络输入进行处理，降低数据维度；为实现连续动作集中智能体最优动作的选择，即确定空地导弹的最优弹道偏角变化量，采用 Actor-Critic 的强化学习算法框架，并采用策略梯度法对网络进行训练；为减少训练样本之间的相关性，采用经验回放策略选取训练样本。算法框架如图 4 所示：

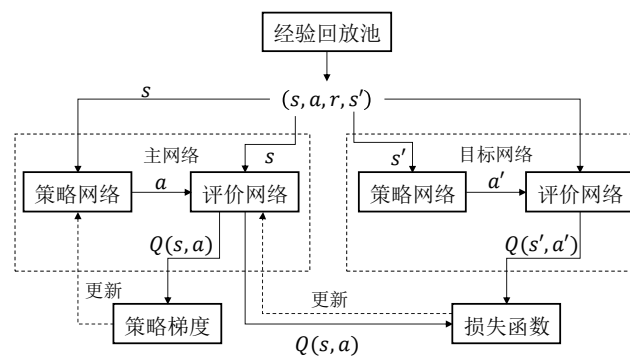


图 4 深度强化学习算法框架

策略网络（Actor 网络）和评价网络（Critic 网络）结构分别如图 5、图 6 所示：

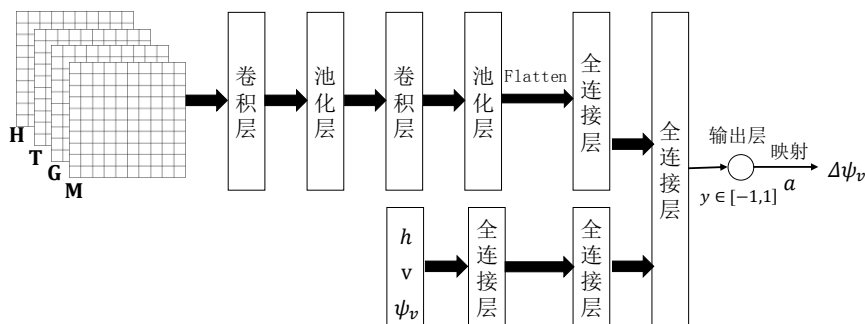


图 5 策略网络结构

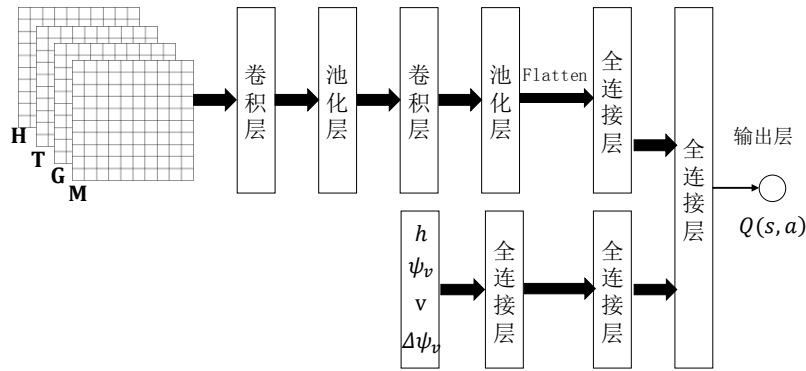


图6 评价网络结构

③多机编队协同对地综合攻击区解算方法研究

首先分析编队内每个发射平台发射空地导弹的攻击区以及编队综合攻击区的大小和形状的影响因素，拟从战场环境、协同制导平台性能、导弹自身性能、编队构型等方面进行分析。战场环境因素主要包括地形因素、敌方威胁区位置与大小等；协同制导平台性能因素包括各制导平台的雷达扫描距离、角度、制导精度等；导弹自身性能因素包括空地导弹飞行高度与速度等；编队构型因素包括编队内各导弹发射平台与制导平台的数量、相对位置、制导交接区域等。

接下来研究基于改进黄金分割法的多机编队协同对地综合攻击区解算方法，先解算编队内每个发射平台发射空地导弹的攻击区，设置编队内所有制导平台在各自的制导范围内均能为空地导弹提供制导支持。传统的攻击区解算方法通常以导弹发射平台为中心，将整个空间划分为若干扇区，通过黄金分割法确定每个方向上的攻击区近边界点与远边界点，将各点相连得到完整的攻击区。这种方法要求在每个方向上最多有一对边界点，且远近边界点之间的所有点都在攻击区内，若受到多平台接力制导或敌方威胁区的影响，攻击区形状不规则，则传统方法不再适用。图7给出了敌方威胁区影响下的不规则攻击区示意：

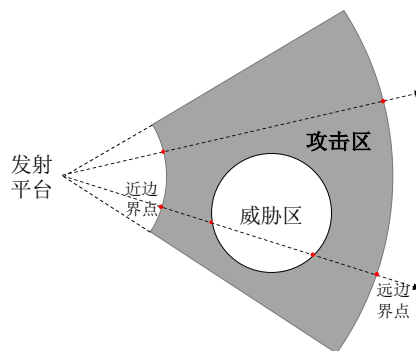


图7 威胁区影响下的不规则攻击区

由图7可以看出，当威胁区存在时，某一方向上的边界点数量可能超过两个，且不同方向上的边界点数量可能有所不同。传统方法难以根据各方向上的边界点确定攻击区的形状。

本研究拟提出基于改进黄金分割法的空地导弹攻击区解算方法，算法思路如下所示：

1) 以空地导弹发射平台为中心建立极坐标系, 根据空地导弹的最小射程和最大射程, 确定总搜索区域, 按照等角度间隔选取搜索方向, 在每个搜索方向上按一定的间隔划分搜索线段, 总搜索区域被划分为若干扇形搜索区域, 如图 8 所示:

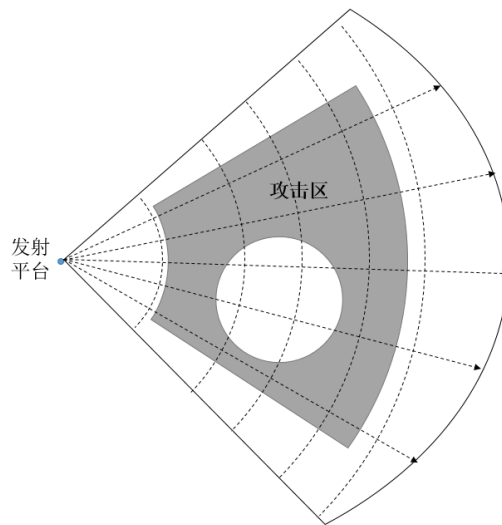


图 8 搜索区域划分

2) 根据研究内容②中的航迹规划算法, 确定每条搜索线段的端点是否在攻击区内, 定义在攻击区内的点为内点, 不在攻击区内的点为外点。

3) 根据各搜索线段的端点类型, 判断搜索线段类型。定义两端点均为外点的线段为外线段, 两端点均为内点的线段为内线段, 两端点类型不同的线段为入线段(进入攻击区)或出线段(穿出攻击区)。对于入线段和出线段, 通过黄金分割法解算线段中的攻击区边界点。

4) 根据各搜索区域边界的两个线段类型, 确定搜索区域类型。若两边线段均为外线段, 则认为该区域完全位于攻击区外; 若两边线段均为内线段, 则认为该区域完全位于攻击区内; 若两边线段均为入线段或均为出线段, 则将两边线段上的边界点的连线视为攻击区边界; 对于其他类型的区域, 作进一步划分, 并确定子区域类型, 直到达到给定的最小搜索区域。

5) 对仍不能确定类型的最小搜索区域进行处理, 拟处理方法为直接设为不在攻击区内, 或在区域内进行采样, 比较在攻击区内外的样本个数, 确定区域类型。

将编队内每个发射平台的攻击区取并集, 得到多机编队协同对地综合攻击区。以两架飞机的编队为例, 假设两架飞机均具有空地导弹的发射与制导能力, 则编队综合攻击区如图 9 所示:

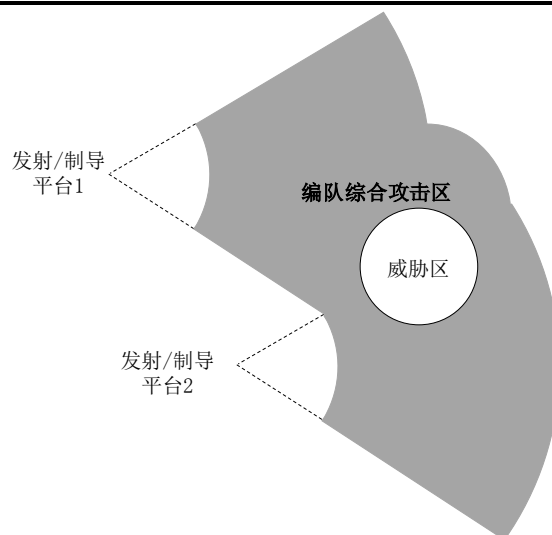


图 9 编队综合攻击区示意图

根据目标点的位置及航迹规划算法，判断该目标点是否在攻击区内，是在攻击区解算过程中涉及较多的计算操作。为了加快攻击区解算速度，拟采用概率神经网络判断目标点类型。概率神经网络是径向基网络的一种变化形式，具有结构简单、训练快捷的特点，被广泛应用于分类问题。概率神经网络包括输入层、模式层、求和层、输出层，以研究内容②中的状态量为网络输入，网络输出目标点是否在攻击区内。为了降低输入数据的维度，在模式层前加入多个卷积层与池化层，网络结构如图 10 所示：

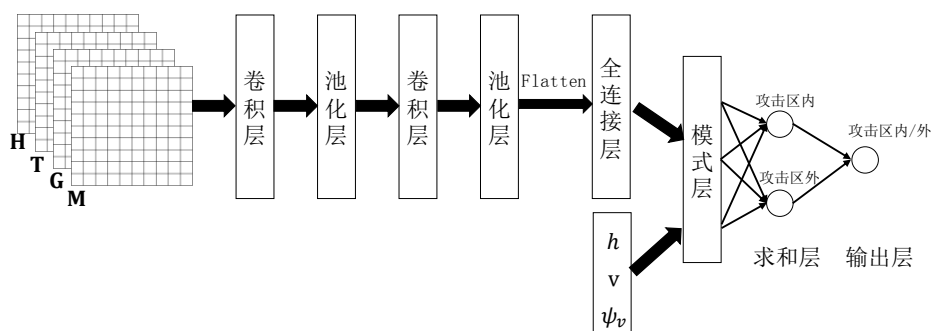


图 10 概率神经网络结构

④多机编队武器-目标分配与制导通路优化方法研究

首先构建多机编队协同对地攻击的任务场景，给定环境参数、目标参数和编队参数。环境参数包括战场的地形信息、威胁区、禁飞区等；目标参数包括目标的数量、位置、价值信息等；编队参数包括编队中各平台的位置、攻击机火力配置、制导平台性能、空地导弹性能等。在给定的任务场景中，根据研究内容③中的多机编队协同对地综合攻击区解算方法，计算我方编队综合攻击区以及各攻击机的攻击区，并判断各目标是否位于攻击区内，为多机编队武器-目标分配与制导通路优化提供依据。

然后构建多机编队武器-目标分配与制导通路优化模型。武器-目标分配用来确定各个目标由编

队中的哪架攻击机发射空地导弹进行攻击，根据攻击区确定承担各目标打击任务的备选攻击机；制导通路优化用来确定各空地导弹由编队中的哪些平台依次接力制导，飞向目标所在区域，采用二维 01 矩阵表示各个制导平台制导区域的连通关系。武器-目标分配与制导通路优化结果的表示形式如下所示：

$$\begin{cases} T_n = [u^{(n)}, g_{n1}, g_{n2}, \dots, g_{nk^{(n)}}]^T & n = 1, 2, \dots, N \\ u^{(n)} \in U \\ g_{xx} \in G \end{cases} \quad (6)$$

式中 T_n 表示由攻击机 $u^{(n)}$ 承担第 n 个目标攻击任务，该攻击机发射的空地导弹由我机编队中的制导平台 $g_{n1}, g_{n2}, \dots, g_{nk^{(n)}}$ 依次进行接力制导， $k^{(n)}$ 表示攻击第 n 个目标所需的制导平台的数量， N 为目标的数量， U 表示我机编队中攻击机的集合， G 表示我机编队中具有制导能力的飞机集合。拟考虑多机编队武器-目标分配与制导通路优化的目标函数包括各空地导弹总航迹或最长航迹最短，各导弹受到总威胁或最大威胁最小，高价值目标优先攻击等；约束条件包括空地导弹航迹规划算法的约束条件，还应考虑每架攻击机的空地导弹数量约束，以及制导平台的制导性能约束等。各空地导弹的航迹长度与受到的总威胁程度通过航迹规划算法进行确定：每次在状态空间中仅保留一发空地导弹和该导弹的打击目标，以及制导通路上的制导平台，再调用航迹规划算法，获得该导弹的航迹长度与受到的总威胁程度。

最后研究基于改进 NSGA-II 算法的多机编队武器-目标分配与制导通路优化模型求解方法。NSGA-II 算法是解决多目标优化问题的一种常用方法，具有复杂程度低、搜索能力强、运算速度快、鲁棒性强等优点。本研究对 NSGA-II 算法的改进体现在种群个体的染色体编码方式的设计上，算法思路如图 11 所示。

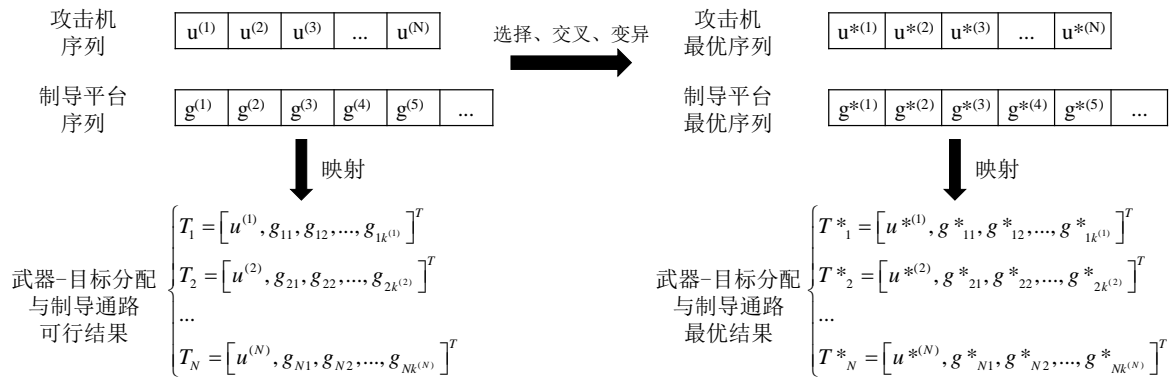


图 11 改进 NSGA-II 算法的编码方式

根据公式 (6)，每个目标对应一架攻击机与若干制导平台，且制导平台数量不统一，若设计每个个体包含的染色体数量与目标数量相同，则解空间以及交叉、变异等操作较为复杂。拟设计每个

个体包含两条染色体，一条染色体为攻击机序列，基因数量与目标数量相同，代表承担各个目标攻击任务的攻击机；另一条染色体为制导平台序列，是我机编队中所有具有制导能力的飞机编号的某种排列。根据攻击机序列确定多机编队武器-目标分配结果，并通过搜索算法在制导平台序列中依次搜索各空地导弹可行的制导通路，即建立从两条染色体到火力分配与制导通路结果的映射。通过 NSGA-II 算法的选择、交叉、变异等操作，获得最优染色体，并通过上述映射方法得到最优的多机编队武器-目标分配与制导通路。

⑤多机编队协同对地攻击任务规划系统仿真验证

搭建多机编队协同对地攻击仿真实验平台，使其能够支持典型的战场环境（包括复杂地形、气象、威胁区等）以及导弹发射与制导平台（包括预警机、有人/无人攻击机等）的建模与仿真，并能在给定的战场环境与多机编队空间构型下，对接力中制导、航迹规划、综合攻击区解算、武器-目标分配与制导通路优化算法的有效性和时效性进行验证，为多机编队协同对地攻击任务规划系统的设计优化提供反馈与演示。多机编队协同对地攻击仿真实验平台架构如图12所示：

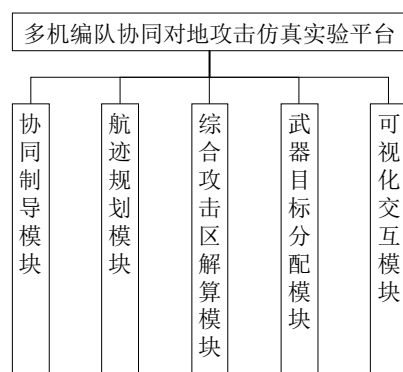


图 12 多机编队协同对地攻击仿真实验平台架构

2. 研究计划可行性，研究条件落实情况，可能存在的问题及解决办法（可续页）

3.2.1 研究计划可行性

在接力中制导方面，本研究涉及的主要技术点包括基于递推最小二乘法的制导交接指令误差消减方法和基于启发式算法的制导交接律优化设计。其中最小二乘方法已在数据拟合、系统辨识等问题中得到了广泛的应用，并衍生出很多改进的方法，可为本研究提供支持；启发式算法是解决优化问题的常用方法，不同的启发式算法在收敛性、鲁棒性、可扩展性等方面有各自的优点，通过对操作算子的合理设计或算法融合，可用于不同场景的优化问题中，现有研究中已设计了一些基于基本函数的导弹制导交接律，在此基础上通过启发式算法进一步优化制导交接律，具有理论可行性。

在航迹规划方面，本研究涉及的主要技术点包括战场环境的构建和基于 CNN-策略梯度法的航迹规划算法。数字高程模型是描述战场地形的一种常用方法，对战场环境中其他信息的描述（包括威胁区、制导区、目标区等）可参照数字高程模型的数据结构；策略梯度法是一种动作集连续的强化学习方法，能够支持本研究对空地导弹连续控制量的优化选择；卷积神经网络在图像处理中得到了广泛的应用，而本研究通过多个二维矩阵描述战场环境，数据结构与 RGB 图片类似，故采用卷积神经网络对输入数据进行处理，具有理论可行性。

在攻击区解算方面，本研究涉及的主要技术点包括基于改进黄金分割法的攻击区解算和基于概率神经网络的目标点类型判断。通过黄金分割法解算攻击区的边界点是各类导弹攻击区解算的常用方法，本研究保持黄金分割法迭代的基本流程不变，对其改进效果体现在对某一搜索方向上多个边界点的处理上；概率神经网络在故障分类、飞机结冰情况分类、图像分类等问题中已经取得了良好的效果，本研究需要判断目标位置是否位于攻击区内，分类类别少，采用概率神经网络进行处理，具有理论可行性。

在武器-目标分配方面，本研究涉及的主要技术点为基于改进 NSGA-II 算法的多机编队武器-目标分配与制导通路优化模型求解。NSGA-II 算法是目前应用最广泛的多目标优化算法之一，具有复杂程度低、搜索能力强、运算速度快、鲁棒性强等优点，本研究拟对种群个体的染色体编码方式进行改进，以提升算法的性能，类似的该改进措施已在课题研究者参与的科研项目及已录用的论文中取得了良好的效果，将其应用于本研究具有理论可行性。

综上，本论文中拟解决的关键技术均有国内外相似领域的研究成果作为支撑，在研究过程中存在的问题不会产生颠覆性的困难，其研究内容、研究方案及技术路线均切实可行。

3.2.2 研究条件落实情况

课题研究者所在的研究团队具备坚实高效、完善系统的软硬件保障，已建成作战效能仿真实验室、航空火力控制半物理仿真实验室和综合航空电子系统实验室等，建有综合航电武器系统实验平台、航电综合火控系统仿真平台及相应的测试分析仪器、云协同仿真平台、GPU 服务器等，为论文研究目标的完成提供了设备保障。同时，团队具有浓厚的学术氛围和良好的工作环境，课题研究者专业基础扎实（博士第一学年课程加权成绩排名年级第 2），获得全国计算机等级考试四级合格证书（数据库工程师），曾参与 CR929 试飞顶层优化算法设计项目，已申请国家发明专利一项（已受理），一篇论文已被《APPLIED SOFT COMPUTING》期刊（SCI 二区）录用。综上所述，课题研究者已具备了高质量完成论文研究的基础，也已经为本论文研究的开展做好了充分的准备。

3.2.3 可能存在的问题及解决办法

①模型参数选择问题

本研究涉及的模型参数较多，包括遗传算法种群规模、神经网络的层数、节点数、训练速率等，这些参数会对模型的收敛速度、计算时间等产生较大影响，需要合理选取模型的参数。拟采取的措施包括深入研究算法结构，对非必要的网络连接进行合理的删减；比较不同参数组合下的算法性能，并在运算的速度与精度之间寻找平衡；设计模型参数的自适应调整策略，或使用其他智能优化算法（如粒子群算法、灰狼算法等）对模型参数进行优化。

②初始训练样本生成问题

在空地导弹航迹规划算法中，深度强化学习算法理论上不依赖于先验知识，但训练样本的质量会对算法性能产生较大影响，若初始采用随机样本进行训练，可能造成算法收敛较慢。拟采用A*算法、蚁群算法等智能优化算法生成可行的航迹点，或在可视化的战场环境中人工规划航迹点，并将航迹点转换为空地导弹的控制序列，构造初始训练样本集。

③攻击区解算结果评价问题

需要对攻击区解算的结果进行评价，从而评估算法的有效性。拟采用随机采样的方法，选取一些目标点位置，通过精确解算确定其是否在攻击区内，并与通过改进黄金分割法得到的攻击区解算结果进行比较，从虚报率（实际不在攻击区内的点经解算在攻击区内）和漏报率（实际应在攻击区内的点经解算不在攻击区内）两方面对攻击区解算结果进行评价。

3. 研究计划及预期成果

	起止年月	完成内容
研 究 计 划	2022.1~2022.6	阅读大量有关文献，构建多机编队协同对地攻击作战体系，并设计空地导弹多机接力中制导与制导交接方案； 提出制导交接指令误差消减方法与制导交接律启发式优化设计方法； 对空地导弹多机接力中制导方法进行初步仿真验证。
	2022.7~2022.12	完成空地导弹战场环境构建及导弹航迹规划模型构建； 完成神经网络搭建，实现空地导弹航迹规划算法； 实现多机编队综合攻击区解算算法； 整理已有研究成果，完成中期报告。
	2023.1~2023.6	实现多机编队武器-目标分配与制导通路优化算法； 完成多机编队协同对地攻击仿真实验平台搭建，对接力中制导、航迹规划、综合攻击区解算、武器-目标分配与制导通路优化算法进行系统测试； 整理仿真实验数据并进行深入分析，进行比较和总结。
	2023.7~2023.12	完成博士论文撰写工作，并整理相关论文和专利等成果。

预期创新点及成果形式

预期创新点：

本研究针对在复杂的战场环境中，由多架战斗机、预警机、侦察机等组成的多机编队，采用中远程空地导弹，同时攻击敌方多个地面目标的作战任务，综合多种理论方法，通过创新理论和技术手段，设计多机编队协同对地攻击任务规划系统，提出以多机编队综合攻击区为核心的任务规划方法。本研究紧密围绕着迫切的军事需求和多机编队协同对地攻击的实际问题展开，具有明确的应用背景，而且预期成果可以为编队构型的优化设计、武器发射与制导平台的科学部署以及空地导弹的多目标攻击决策提供有力的技术支撑，因此，本研究具有广阔的研究前景、重要的理论意义和实际应用价值。本研究的创新点主要体现在：

1.本研究拟提出多机编队协同中远程对地多目标精确打击背景下的空地导弹多机接力中制导方法，解决多架飞机对空地导弹进行接力中制导的过程中，交接班平台传感器对导弹参数测量误差影响下的制导交接稳定性与准确性问题，创新性地将启发式算法用于空地导弹制导交接律的优化设计中，有别于传统的基于基本函数形式的制导交接律设计，有利于消除交接律设计的主观性。

2.本研究拟提出复杂战场环境中多机编队协同制导下的空地导弹智能航迹规划算法以及编队综合攻击区精确、快速解算方法。通过深度强化学习、卷积神经网络等实现空地导弹的智能航迹规划，以航迹规划结果作为多机编队综合攻击区的解算依据，设计改进的黄金分割算法，实现综合攻击区的精确解算，并通过概率神经网络提升综合攻击区解算的快速性。

3.本研究拟提出基于改进NSGA-II算法的多机编队武器-目标分配与制导通路优化模型求解方法，对遗传算法的编码方式进行了改进，通过建立攻击机与制导平台序列到武器-目标分配与制导通路优化结果的映射，使遗传算法的解空间以及交叉、变异操作得到了简化，有利于提升算法性能。

预期成果：

- 申请多机编队协同对地攻击相关专利 1 项；
- 发表 4 篇相关论文（2 篇 SCI 索引以及 2 篇 EI 索引）。

备注	
----	--