

引用格式:邵彦昊,朱荣刚,贺建良,等.基于深度学习的不可逃逸区内的规避决策研究[J].电光与控制,2019,26(11):60-64. SHAO Y H, ZHU R G, HE J L, et al. Evasive decision-making in inescapable areas based on deep learning[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(11):60-64.

基于深度学习的不可逃逸区内的规避决策研究

邵彦昊^{1,2}, 朱荣刚^{1,2}, 贺建良^{1,2}, 孔繁峨^{1,2}

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000;

2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 由于隐身技术的发展和攻击战术的需要, 载机可能会进入敌方导弹不可逃逸攻击区。针对雷达型中远程空空导弹的不可逃逸攻击区内部的机动规避问题, 设计了一种基于深度学习网络的规避决策的模型, 通过蒙特卡罗仿真法建立了机动可逃逸数据库, 对网络模型进行了学习, 并仿真验证了网络输出的有效性。仿真结果表明, 学习后的网络输出在满足机动可逃的条件下, 在追逃仿真中有较好的决策效果, 可显著提高在导弹不可逃逸攻击区内的逃逸成功概率, 同时也可作为飞行员执行高风险任务时的机动决策提供参考。

关键词: 深度学习; 机动规避; 空空导弹; 不可逃逸攻击区; 逃逸成功概率

中图分类号: TJ765.4

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.11.013

Evasive Decision-Making in Inescapable Areas Based on Deep Learning

SHAO Yan-hao^{1,2}, ZHU Rong-gang^{1,2}, HE Jian-liang^{1,2}, KONG Fan-e^{1,2}

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: Due to the development of stealth technology and the requirement of attack tactics, the carrier aircraft may enter the enemy missile's inescapable attack area. To solve the problem of maneuvering evasion of the aircraft in the inescapable attack area of radar-type medium/long-range air-to-air missiles, a model of evasion decision-making based on deep-learning network is designed. A maneuverable flight database is established by using Monte Carlo simulation method, and the network model is learned. The effectiveness of network output is verified by simulation. The simulation results show that, the network output after learning can satisfy the condition of maneuverable flight and has better decision-making effect in the pursuit-evasion simulation, which can significantly improve the probability of successful escape in the missile's inescapable attack area and provide a reference for the pilots' maneuvering decision-making when they perform high-risk missions.

Key words: deep learning; evasive maneuver; air-to-air missile; inescapable attack area; probability of successful escape

0 引言

新型的中远距空空导弹在攻击过程中, 过载最高可达到30~40个重力加速度, 飞行马赫数最高可达到5~6, 并且具有远射程、高过载、高速度、高机动能力等一系列优点, 已经成为现代空战中的最大威胁。

机动规避作为成本最小也最直接的躲避导弹攻击

方式, 仍然是学术界研究的重点^[1-3]。很多学者对机动规避进行了仿真, 研究了不同机动方式对攻击区的影响^[4-7], 但都是在不可逃逸攻击区外进行机动规避, 而对于不可逃逸攻击区内部逃逸问题, 目前尚无人研究。

在空战中, 有两种情况会进入敌方导弹不可逃逸攻击区: 情况一, 敌方导弹射程比我方远, 为了攻击战术需求我方主动进入; 情况二, 敌方隐身性能较好, 我方在无感知的情况下被动进入。本文重点为利用深度学习(DL)网络研究在不可逃逸攻击区内部何时机动、如何机动才能规避敌方导弹攻击的问题。

收稿日期: 2019-09-17

修回日期: 2019-10-14

作者简介: 邵彦昊(1995—), 男, 山东临沂人, 硕士生, 研究方向为系统工程、航空火力控制。

1 导弹不可逃逸攻击区内逃逸原理

1.1 导弹不可逃逸攻击区的定义

在攻击过程中,目标维持当前飞行状态不作任何机动时,导弹所能攻击到的区域成为导弹最大攻击区。

现有的不可逃逸攻击区多为水平不可逃逸攻击区。假定目标在导弹发射时立即以最大稳定盘旋角速度(常取 $5g$ 过载)转弯置尾,然后全加速加力进行逃逸,此时导弹所能攻击的区域称为水平不可逃逸攻击区。

由于不可逃逸攻击区在计算时只采取了典型的机动规避方式,则必然存在某种满足特定条件的垂直面上的机动规避方式,可在水平不可逃逸攻击区内逃逸。

1.2 空空导弹规避理论

空空导弹由于体积和质量的限制,燃料有限,发动机工作时间短,大部分时间为无动力滑行。目标进行大机动时,导弹便会跟随机动。由于燃料用尽而导致机动损失的速度和能量无法补充,使得控制能力和机动能力大幅下降;逃逸时采用 S 机动、圆周运动等周期性的机动方式,可以使导弹内部产生谐振,影响导弹的稳定性^[4],从而扩大动态误差,增加导弹的脱靶量,降低命中率。导弹在俯冲段,由于高度低、空气密度大,导弹降低的重力势能远远小于克服空气阻力所需要的能量,导弹速度衰减非常快,因此可以降低高度消耗导弹的动能,降低其威胁。

目前,国内外主流的战斗机机载火控雷达均为脉冲多普勒雷达(PD)。机载 PD 雷达存在主瓣杂波盲区,即当目标的径向速度小于一定值时雷达很难发现目标,因此可以采用航向与雷达波束垂直 90° 的方式来摆脱雷达跟踪锁定^[8]。

1.3 空空导弹遇靶约束条件

空空导弹只有在满足一定的遇靶条件时命中才具有一定的杀伤效果,主要约束有以下 5 种:1) 时间限制:导弹飞行时间不能大于规定时长;2) 速度限制:滑行速度不能小于最小允许速度;3) 过载限制:遇靶段可用过载小于需用过载;4) 高度限制:导弹飞行高度在 $0 \sim 28$ km;5) 遇靶速度和引信解锁时间限制等。

2 机动规避模型建立

在战斗机机动规避中,置尾机动已经是必然的选择^[9],结合雷达盲区,本文选取以下 4 种机动方式。

1) 置尾垂直 S 机动:目标以最大稳定盘旋角速度转弯置尾后(进入角在 $\pm 15^\circ$ 视为置尾,下同),俯仰角在一定幅值(最大值为截止角)范围内发生连续周期性变化。

2) 置尾后俯冲机动:目标以最大稳定盘旋角速度转

弯置尾后,向下俯冲一定高度,然后保持平飞匀速逃逸。

3) 边置尾边俯冲机动:目标以最大稳定盘旋角速度转弯置尾的同时,向下俯冲一定高度,然后保持平飞匀速逃逸。

4) 90° 切向机动:目标以最大稳定盘旋角速度转弯,保持逃逸方向与来袭飞机雷达波束垂直,直至逃逸成功或被击毁。

在本文的仿真中,将针对以上 4 种机动规避方式按相关属性详细分类进行弹道仿真测试。

3 深度学习模型建立

3.1 特征选取

目标在当前情况下选择何时机动、如何机动时,需要依据相当复杂的空战态势和导弹性能来评判。为建立起 DL 训练学习所需要的相关数据库,本文依据相关程度选取如下典型特征:1) 发射时刻载机高度 H (单位为 km);2) 发射时刻载机速度 V ;3) 发射时刻目标高度 H_t (单位为 km);4) 发射时刻目标速度 V_t ;5) 发射时刻机目斜距 D (单位为 km);6) 发射时刻目标进入角 Q_t (单位为 $(^\circ)$);7) 机动距离 D_{Dis} (单位为 km);8) 机动方式 E_t ;9) 机动需用过载 N_t 。其中,前 7 项为输入,后 2 项为输出。此处的过载指的是俯仰过载和偏航过载,不指加速过载。需用过载大于可用过载则表示无法逃逸。

3.2 特征数据处理

以上选取的特征中既有数值特征又有分类特征,不同数值特征之间的数量级差距较大,而分类特征无法直接用学习网络计算。为了便于计算,消除不同特征的数据量纲对网络收敛效率和准确度的影响,需要对特征数据做出如下处理^[10]。

3.2.1 归一化与反归一化

本文采取的归一化基础思想是将单个数值特征属性 x 对应的数据向量 $A_x = (a_{x1}, a_{x2}, \dots, a_{xn})$ ($x = 1, 2, \dots, 6, m, m$ 为数值特征属性总个数, n 为数据量总数) 中的 a_{xi} 采用如下映射,映射成 $[0, 1]$ 区间内的 a'_{xi} , 即

$$f: a_{xi} \rightarrow a'_{xi} \in [0, 1] \quad (1)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$ 。学习结束之后进行测试时再进行反归一化映射解析数据, 即

$$f^{-1}: a'_{xi} \rightarrow a_{xi} \in [\min A_x, \max A_x] \quad (2)$$

式中, $\min A_x, \max A_x$ 分别为特征 x 的数据向量 A_x 元素中的最小值和最大值。

3.2.2 数值化与重分类化

分类特征的数据向量 $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ (n 为数据量总数, $b_i \in \Omega, \Omega$ 为分类空间) 中的数值 b_i 映射成 $[0, 1]$ 区间内的 b'_i , 即

$$g : b_i \rightarrow b'_i \in [0, 1] \quad (3)$$

在进行数据解析时采用其逆过程重新对其分类化,即

$$g^{-1} : b'_i \rightarrow b_i \in \Omega \quad (4)$$

作为唯一的分类特征,不同机动条件的机动方式与分类标签之间的对应关系如表1所示。

表1 机动方式与分类标签对应关系表

Table 1 Correspondence between maneuvering modes and classification labels

机动方式	机动属性	分类标签
置尾垂直S机动	截止角 30°	1
	截止角 45°	2
	截止角 60°	3
置尾后俯冲机动	俯冲 1.5 km	4
	俯冲 2.5 km	5
	俯冲 3 km	6
边置尾边俯冲机动	俯冲 1.5 km	7
	俯冲 2.5 km	8
	俯冲 3 km	9
90°切向机动	—	10

3.3 DL 算法构建

3.3.1 基于 LM(Levenberg-Marquardt) 算法的训练过程

针对梯度下降法收敛速度慢、训练时间长、容易陷入局部极值等问题,本文的仿真采用 LM 算法。LM 算法是一种经过优化的训练算法,其参数更新的数学表达式为

$$\Delta w = - (J^T J + \mu I)^{-1} J^T \quad (5)$$

$$w = w + \Delta w \quad (6)$$

式中: μ 为阻尼项,当 $\mu = 0$ 时,LM 算法退化为最小二乘解的高斯牛顿法, μ 很大时,式中的 $J^T J$ 项的作用变小,学习过程由 $\mu^{-1} J^T$ 决定,LM 算法退化为最速下降法。

该算法具有强鲁棒性、自适应性和快速收敛性等优点,对于大型网络的学习具有很好的效果,训练过程采用误差反向传播方式校正更新权值。

3.3.2 激活函数

Sigmoid 函数及其变形作为经典的激活函数仍然具有较好的效果而被广泛运用。本文中,学习网络各层之间激活函数选择 tan Sigmoid 函数,将输入映射到区间 $(-1, 1)$ 中,其算式为

$$\tan \text{sig}(x) = (1 - e^{-2x}) / (1 + e^{-2x}) \quad (7)$$

3.3.3 损失函数

本文仿真中的深度学习的评价指标采取均方误差 (MSE) 作为损失函数,其算式为

$$L(Y, \hat{Y}) = E_{\text{MSE}}(Y, \hat{Y}) = \frac{1}{n_{\text{samples}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{samples}}} (Y_i - \hat{Y})^2 \quad (8)$$

式中: Y 为真实值; \hat{Y} 为学习网络输出值。

4 仿真过程与结果分析

建立机动规避仿真的流程如图1所示,并根据仿真流程图编写代码进行仿真。

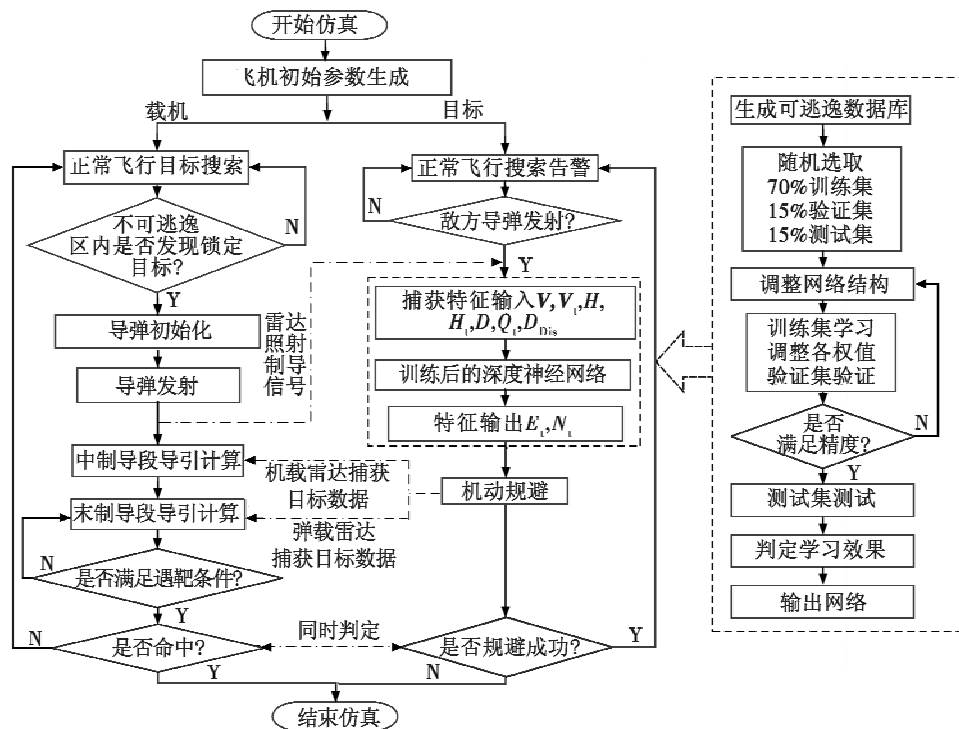


图1 机动规避仿真流程图

Fig.1 Flow chart of maneuvering evasion simulation

4.1 可逃逸数据库建立

深度学习网络学习数据库需要大量逃逸成功的数据作为支撑,因此本文采取蒙特卡罗仿真法生成数据库。

首先,建立考虑气动因素和雷达因素的三维追逃模型用于弹道仿真。为提高解算效率、减小计算量和复杂度,本文采用三自由度质点模型^[6],并对整个攻击过程做出如下合理的假设:1)将飞机、导弹等运动单元全部视为质点;2)暂不考虑风速和地球自转的影响;3)单个步长时间内运动单元参数不发生变化。

仿真采用变步长方式,假定目标最大机动过载为 5g,进入角 0°代表尾追,顺时针为正;导弹发射倾角和偏角均为 0°,导弹杀伤范围取 10 m,导弹雷达导引头截获距离为 15 km,导引方式为扩展比例导引。

为保证深度学习网络训练结果的可靠性,随机生成不同高度(6~12 km)、马赫数(0.8~1.2)、进入角(0°~360°)、初始距离(小于不可逃逸距离)的双方进行弹道仿真,采用表 1 中不同的机动方式(1~10)和机动过载(0~5g)计算弹道接近 700 万条,生成训练数据 5 万条,构成机动可逃逸数据库进行有监督学习,训练基础数据较大。

4.2 网络结构确定与网络学习

本文选取 9 个特征,其中包括 7 个输入,2 个输出。由于机动方式和过载作为输出存在一定的相关性,需要对输出进行解耦。本文采用数据位置代表机动方式,对应位置输出相应的机动所需过载,因此网络的输入层和输出层节点数分别为 7 和 10。

由于 DL 网络的结构不同,其学习效果不同,为了得到一个较优的学习结果,需要确定隐藏层层数和各层节点数。图 2 给出了不同的网络结构在数据集中的学习结果与目标值的相关度 R。

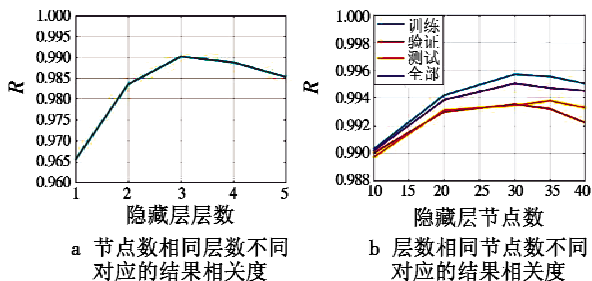


图 2 不同结构的学习网络的结果相关度

Fig. 2 Relevance of learning networks with different structures

图 2a 表示各个隐藏层节点数固定为 15 时,不同隐藏层数目对应的结果相关度,可以看出 3 个隐藏层时效果最好;图 2b 表示含有 3 个隐藏层时,每层不同

节点数对应的结果相关度(不同的曲线代表不同的数据集),可以看出每层 30 个节点为最优选择。故本文选取图 3 所示的学习网络结构对 4.1 节中生成的可逃逸数据库进行长时间的学习训练。

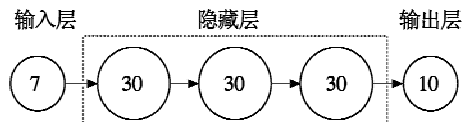


图 3 学习网络结构图

Fig. 3 Structure diagram of learning network

4.3 学习结果验证

为验证训练后学习网络的有效性,实验中随机生成了 500 个不同高度、速度、进入角、发射时刻机目距离、机动时刻机目距离作为输入,由经过训练的深度学习网络得到机动方式和机动过载输出值,根据输入输出进行弹道仿真计算逃逸结果。仿真中为构成在不可逃逸攻击距离内进行机动的情形,选取初始条件:发射机目斜距 $D \in [0.8R_{thr}, R_{thr}]$,机动距离 $D_{dis} \in [D - 3000, D]$ 。其中, R_{thr} 为发射时刻双方当前态势条件下,载机导弹的不可逃逸攻击距离。

表 2 统计了不同机动方式的满足可逃逸情形次数及占比,满足可逃逸条件下逃逸成功次数和逃逸成功概率。从表 2 中可以看出:目标很难构成可逃逸条件,在不可逃逸攻击区内逃逸仍有较大难度;对于同种机动方式,机动幅度越大(分类标签 3,6,9),越容易构成可逃逸条件;对于垂直置尾 S 机动,满足可逃逸条件的占比相对较小,即不容易构成逃逸条件,构成逃逸条件时逃逸成功的概率也相对较小(大于 45%);对于置尾后俯冲机动,同样较难构成可逃逸条件,比置尾垂直 S 机动更难,但是满足条件时的逃逸成功概率高于前者(大于 66%);对于 90°切向机动,机动规避条件最为宽泛,且满足可逃逸条件时逃逸概率能达到 93%;对于边置尾边俯冲机动,虽然满足可逃逸条件稍逊于切向机动,但满足可逃逸条件时逃逸概率最高可达到 99%。

表 2 可逃逸情形的不同机动方式统计

Table 2 Statistics of different maneuvering modes in escapable situations

	机动方式										总数
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
满足逃逸条件次数	140	362	413	195	296	330	187	426	438	500	3287
满足率/%	28	72	82	39	59	66	37	85	87	100	—
逃逸成功次数	63	272	390	130	283	315	151	422	434	469	2929
逃逸成功率/%	45	75	94	66	95	95	80	99	99	93	平均值 89.11

表 3 给出了训练好的 DL 网络模型的输出决策在弹道仿真中的部分结果。从表 3 中可以看出,对于不同高度、不同速度、不同距离、不同进入角的载机与目标,当

目标在载机的不可逃逸攻击区内且满足逃逸条件时,目标采取 DL 网络训练后输出的机动方式和机动过载能以较高概率有效地规避敌方导弹的攻击。

表 3 学习网络模型输出结果的部分弹道仿真

Table 3 Partial ballistic simulation results of the output of learning network model

序号	学习网络输入							不可逃 R_{Rt}/km	学习网络输出			导弹脱靶 原因
	H/km	载机飞行 马赫数	H_t/km	目标飞行 马赫数	D/km	$Q_t/(\circ)$	D_{Dis}/km		E_t	过载(N_t) g 数	逃逸结果	
1	8.2	0.8	7.3	0.8	28.4	342	27.9	28.7	3	1.5	成功	速度限制
2	7.5	0.8	9.8	0.9	34.9	359	32.8	35.5	6	1.5	成功	速度限制
3	11.9	1.1	11.9	1.1	48.0	10	47.2	57.1	1	2.0	失败	—
4	9.9	0.9	10.8	1.0	58.2	232	57.7	70.1	8	1.5	成功	速度限制
5	11.2	1.1	7.5	0.8	48.7	213	46.2	52.4	2	1.5	成功	速度限制
6	9.0	0.9	9.0	0.9	33.8	342	32.2	41.2	2	1.5	成功	速度限制
7	10.0	1.0	6.9	0.8	32.1	51	29.6	38.2	3	1.5	成功	速度限制
8	7.0	0.8	11.2	1.1	42.0	253	40.4	42.4	1	1.5	成功	速度限制
9	6.7	0.8	6.2	0.8	19.1	32	16.1	23.3	10	2.5	成功	过载限制
10	11.7	1.1	7.9	0.8	54.6	100	52.4	57.5	4	1.5	失败	—
11	6.5	0.8	7.9	0.8	23.5	304	22.1	27.6	10	1.5	成功	速度限制
12	10.3	1.0	10.5	1.0	55.7	318	53.6	68.7	9	1.5	成功	速度限制

5 结束语

为了解决在敌方空空导弹不可逃逸攻击区内部如何进行机动规避的问题,建立了一种基于深度学习网络的不可逃逸攻击区规避决策的模型,通过大量仿真得到如下结论:

1) 本文中建立的 DL 网络模型可以根据实时态势以及开始机动距离,给出相应的机动方式和机动过载,可显著提高不可逃逸攻击区内逃逸成功概率,在满足逃逸条件下,逃逸成功概率接近 90%;

2) 目标在不可逃逸攻击区内采取相应的大幅度机动可以以一定概率逃脱,且幅度越大越容易构成逃逸条件,越容易逃脱;

3) 90°切向机动的机动规避效果相当显著,但由于对飞行员和机载设备的要求较高,实现难度较大,而且对于可二次捕获目标的导弹无较大作战意义;

4) 本文所做的工作可以为有较高作战风险的战术机动决策提供相应的参考。如飞行员可以根据油耗和后续作战计划进行选择机动方式,也可以为飞机是否能继续向前飞行以及可飞行的临界距离提供参考。

参考文献

[1] SINGH L. Autonomous missile avoidance using nonlinear model predictive control [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2004; AIAA 2004-4910.

[2] KARELAHTI J, VIRTANEN K, RAIVIO T. Near-optimal missile avoidance trajectories via receding horizon control [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2006, 30 (5):1287-1298.

[3] REMZI A, ALTILAR D T. Modeling evasion tactics of a fighter against missiles in three dimensions [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2006; AIAA 2006-6604.

[4] 张堃,周德云.空战目标机规避仿真设计研究[J].计算机仿真,2008,25(11):98-101.

[5] 王光辉,吕超,谢宇鹏,等.歼击机规避空空导弹的评价算法[J].系统工程与电子技术,2016,38(11):2561-2566.

[6] 谢新辉,张学斌,李飞,等.战斗机“滚筒”机动的末端规避效果[J].火力与指挥控制,2016,41(2):97-100,107.

[7] 张安柯,孔繁峨,贺建良.目标强机动对中远程空空导弹攻击区的影响[J].弹箭与制导学报,2016,36(2):21-25.

[8] 罗卫平,李战武,孙源源,等.一种利用机载雷达多普勒盲区隐蔽接敌的机动决策方法[J].电光与控制,2015,22(1):28-33,44.

[9] 胡安辉,郑涛,朱石刚,等.未知导引律导弹攻击情况下的规避路径[J].弹箭与制导学报,2010,30(3):32-34.

[10] 周旺旺,姚佩阳,张杰勇,等.基于深度学习网络的空中目标作战意图识别[J].航空学报,2018,39(11):200-208.