

DOI: 10.13382/j.jemi.B2002909

基于 PCA 的空战机动高阶重构与评估

卞华棋¹ 王育辉² 王 栋¹ 姜龙亭¹ 王 衡³

(1. 空军工程大学 航空工程学院 西安 710038; 2. 空军工程大学 装备管理与无人机工程学院 西安 710051;
3. 中国人民解放军空军装备部驻合肥地区第一代表室 合肥 230031)

摘要:针对空战机动的高阶重构与评估问题进行研究,以飞机的飞行状态数据为研究对象,通过引入急动度的概念,构建机动决策重构指标模型。为了减少主观的评价方法对评估结果的影响,通过引入物理学中的急动度理论,利用主成分分析法(PCA)确定各指标权重,并获得综合评价值。然后构建机动决策点综合重构函数,提取机动决策点。结合态势函数及机动决策点对空战训练中记录的客观数据进行比对分析,仿真结果表明该方法提取的机动决策点符合空战实际,机动决策点的分类符合实际空战场景。

关键词: 急动度;主成分分析法;空战机动;高阶重构;态势评估

中图分类号: TP391;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

High order reconstruction and evaluation of air combat maneuver based on PCA

Bian Huaqi¹ Wang Yuhui² Wang Dong¹ Jiang Longting¹ Wang Heng³

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
3. The first representative office of the air force armament department in hefei district of PLA, Hefei 230031, China)

Abstract: Aiming at the high-order reconstruction and evaluation of air combat maneuvers, this paper takes the flight state data of aircraft as the research object, and constructs the maneuver decision reconstruction index model by introducing the concept of jerkiness. In order to reduce the impact of subjective evaluation method on the evaluation results, this paper introduces the degree of jerk theory in physics, USES principal component analysis (PCA) to determine the weight of each index, and obtains the comprehensive evaluation value. Then the synthetic reconstruction function of maneuver decision point is constructed and the maneuver decision point is extracted. Based on the situation function and maneuver decision points, the objective data recorded in the air combat training are compared and analyzed.

Keywords: degree of jerkiness; PCA; maneuver decision; high order reconstruction; situation assessment

0 引言

空战对抗训练^[1]是提升航空兵战斗力的重要途径。通过开展相应的战术训练,提升飞行员的空战水平,掌握空战机动的基本规律。因此,开展空战机动的重构研究,以及空战对抗评估,对于空战训练具有举足轻重的作用。

目前,专家学者对空战的研究以空战态势评估^[2-4]以及威胁评估^[5]为主。多数研究集中于空战结果“是什么”的问题,对空战结果“为什么”研究的较少,也即对空

战机动过程的决策重构问题研究较少。为了更进一步研究空战的制胜机理,本文以空战机动的重构问题为切入点对该问题进行研究。文献[6]以关键点划分机动作,给出不同的风险等级,利用贝叶斯定理获得关键点的风险值,再利用模糊层次分析法获得关键点的指标权重,从而实现对机动作风险的定量评估。文献[7]在空战决策重构过程中,提出了战术机动决策点的概念,通过模糊聚类方法,获得典型的战术机动决策点,为空战评估提供了条件。

虽然上述文献都在战机的机动决策方面有一定的突

破,但是都局限于对整个机动动作的分析,较少涉及对空战机动决策点的分析。现实中,分析评价机动决策点,对于空战制胜具有至关重要的作用,机动决策点的优劣关乎空战的胜利与否。对空战决策点的重构研究有助于后续开展进一步的针对性训练。其次,决策点优劣评估的客观性决定着指导训练的意义大小,客观公正的评估对空战训练有促进作用,主观性强则无法发挥评估对训练的指导意义。

因此,本文以某型空战训练系统记录的空战训练数据为研究对象,借助物理学的急动度^[8]概念,对空战中战机的机动重构和评估问题进行研究。基于主成分分析法(PCA)具有较强的数据降维能力和指标提取能力,本文首先建立机动决策点评价指标体系,采用主成分分析法对相关指标进行约简,并确定其权重,构建近距空战机动决策评估模型,最终实现空战机动的高阶重构和态势评估。

1 机动高阶重构指标的建立

1.1 急动度理论基础

由急动度的定义可知,其本义为加速度在单位时间的变化速率,记为 j 。急动度主要分为平均急动度和瞬时急动度。平均急动度是指加速度在单位时间内的平均速度;瞬时急动度是指时间差足够小的情况下,加速度变化的极限值。

平均急动度是指加速度在 Δt 内的平均速度,计算公式如下:

$$\bar{j} = \frac{a_2 - a_1}{\Delta t} = \frac{\Delta a}{\Delta t} \quad (1)$$

瞬时急动度是平均急动度的极限形式,如下:

$$j = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta a}{\Delta t} = \frac{da}{dt} \quad (2)$$

以位移矢量的急动度为例,位移矢量的一阶导数为速度,速度反映了物体变换位置的快慢程度;位移矢量的二阶导数为加速度,加速度反映了物体运动速度变化的快慢程度,位移矢量的三阶导数为急动度,急动度反映了物体加速度的变化快慢程度。急动度与物体质量的乘积实质上反映了物体的受力情况。由牛顿第二定律可知,物体运动状态的改变是由于物体的受力情况发生了变化。因此,飞机运动状态的变化体现了飞机受力情况的变化。对飞机状态变量急动度的研究,实质上反映了空战过程中飞行员对飞机的操纵情况。本文从物体运动的急动度出发,根据飞机运动状态的变化情况,研究航迹运动规律,进而构建机动决策点重构模型。

1.2 机动高阶重构指标的选取

评价指标的选取对于空战的高阶重构具有至关重要

的影响。指标体系建立的合理性关乎机动决策重构的有效性。根据飞机在空战过程中的机动情况,将评价指标分为动力型指标和姿态性指标。动力型指标主要是指加速度^[9-11];姿态性指标主要包括俯仰角急动度、横滚角急动度、航向角急动度。

飞机的加速度,也叫做飞机的过载,反映了飞行员在操纵油门杆时速度的变化快慢。加速度实质上为飞机位移的急动度,具体表示如下:

$$j_d = d'''' = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (3)$$

俯仰角是指平行于飞机机身轴线并指向飞机运动方向的向量与水平面之间的夹角。位于水平面之上则为正,水平面之下则为负。俯仰角急动度反映了飞行员在操纵升降舵方面的机动决策变化。具体表示如下:

$$j_\alpha = \alpha'''' = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \alpha}{\Delta t} \quad (4)$$

横滚角是指飞机机体绕纵轴的转动,绕纵轴顺时针滚转时为横滚角的正向,逆时针滚转时为负。飞机的滚转机动是飞行员操纵飞机副翼的直接结果,横滚角急动度间接反映了飞行员在操纵飞机滚转时决策的变化快慢。具体表示如下:

$$j_\psi = \psi'''' = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \psi}{\Delta t} \quad (5)$$

航向角急动度反映了飞机航向角的变化快慢,其值越大,反映出飞机具有优良的机动性。综合比较敌我双方的航向角急动度,体现了敌我双方在攻击占位时的角度变化。航向角取值范围为 $0 \leq \varphi \leq 2\pi$,当飞机机头对准正北方向时,航向角为 0° ,当机头顺时针偏转时,航向角不断增加。具体表示如下:

$$j_\varphi = \varphi'''' = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} \quad (6)$$

2 构建 PCA 决策点综合提取模型

PCA^[12-15]主要是通过空间变换,将原始高维的数据降成低维、相互独立的数据。降维过程中,尽量保留原有贡献值较大的数据信息,适当剔除贡献值可以忽略不计的数据信息。PCA 算法凭借其易实现、数据类型选择无要求和数据降维^[16-18]减少工作量的优点,广泛应用于数据提取、模式识别和评价排序等领域。本文研究的飞行数据,维度较低,不需要降维,但是其确定的权重体现了各个指标的贡献值大小。通过 PCA 算法,可以分析获得飞行员的机动偏好,使获得的机动决策点更加准确。同时,针对飞行员的机动偏好,可以在下一回合中开展针对性的训练。PCA 确定指标权重步骤如下:

1) 截取某型空战训练系统的数据构建 $m \times n$ 的数据

矩阵 \mathbf{X} 。其中, m 表示截取的数据序列长度, n 表示数据维数, 也即同一时刻记录 n 种属性; 其中数据矩阵为:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

2) 求解每种数据类型的平均值 $\bar{x}_j (j=1, 2, \dots, n)$, 用每一个数据值与该类型数据的平均值相减, 获得 $m \times n$ 的偏差矩阵 \mathbf{Y} ;

平均值求解公式为:

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^m x_{ij}}{m} \quad (7)$$

偏差矩阵为:

$$\mathbf{Y} = (y_{ij})_{mn} = \begin{bmatrix} x_{11} - \bar{x}_1 & x_{12} - \bar{x}_2 & \cdots & x_{1n} - \bar{x}_n \\ x_{21} - \bar{x}_1 & x_{22} - \bar{x}_2 & \cdots & x_{2n} - \bar{x}_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} - \bar{x}_1 & x_{m2} - \bar{x}_2 & \cdots & x_{mn} - \bar{x}_n \end{bmatrix}$$

3) 构造偏差矩阵 \mathbf{Y} 的协方差矩阵 \mathbf{C} , \mathbf{C} 为 m 阶方阵。

协方差公式为:

$$\mathbf{C} = E(\mathbf{Y}\mathbf{Y}^T) \quad (8)$$

4) 求解协方差矩阵 \mathbf{C} 的特征值和特征向量。

5) 第四步中所求的最大特征值对应的特征向量即为各类数据的贡献率, 根据贡献率为各数据类型进行排序, 将贡献率归一化处理, 即为各数据类型的权重。

机动决策点评估流程图如图 1 所示。

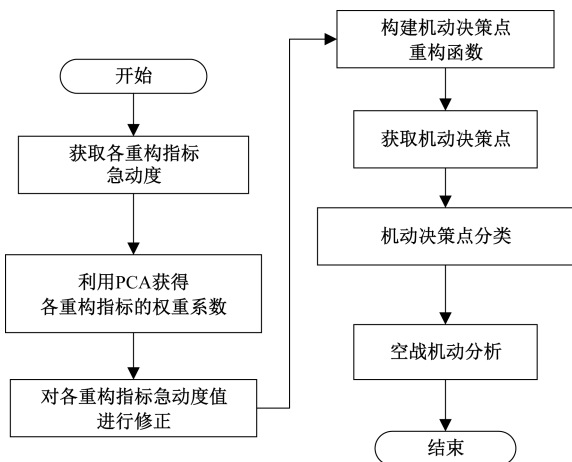


图 1 机动决策评估流程

Fig. 1 Flow chart of maneuver decision evaluation

具体的机动决策评估流程如下:

1) 计算求解各评价指标的急动度

本文数据来源于某型空战训练评估系统^[19], 主要的

飞机状态变量有横滚角, 俯仰角, 航向角和飞机速度。对 4 个状态变量一次求解急动度。由于空战训练系统的数据采样周期较短, 因此, 急动度的计算可以以式 (9) 近似求解得到。

$$\dot{\psi}(i) = \frac{\psi(i) - \psi(i-1)}{\Delta t} \quad (9)$$

式中: $\psi(i)$ 表示当前时刻某一状态变量的参数; $\psi(i-1)$ 表示上一时刻采集的状态变量参数; Δt 表示采样周期。急动度, 也即状态变量的三阶导数, 表示为 $\dot{\psi}(i)$ ⁽³⁾。记位移的急动度为 j_d ; 俯仰角的急动度为 j_α ; 航向角的急动度为 j_ψ ; 横滚角的急动度为 j_φ 。

2) 确定指标权重

用步骤 1) 获得的各属性急动度构建 PCA 协方差矩阵, 根据 PCA 实现步骤求解各属性急动度的权重系数为:

$$\boldsymbol{\omega} = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4]$$

3) 急动度修正

在求解得到的急动度矩阵 \mathbf{X} 中, 元素有正数, 有负数。小于 0 的状态变量反映了飞机受力在增大, 大于 0 的状态变量反映了飞机受力在减小。变量的绝对值反映了力的变化剧烈程度。绝对值越大, 则反映了受力变化越剧烈。

对急动度矩阵中各元素按下列公式进行修正:

$$f(\dot{\psi}(i)^{(3)}) = \begin{cases} -\dot{\psi}(i)^{(3)}, \dot{\psi}(i)^{(3)} < 0 \\ \dot{\psi}(i)^{(3)}, \dot{\psi}(i)^{(3)} \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

4) 机动决策点重构函数

根据步骤 3) 和 4) 求出的各急动度权重系数和各急动度修正元素, 得机动决策点重构函数为:

$$W_i = \sum_{j=1}^4 \omega_j f(\varphi(i)'_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, n-1, n \quad (11)$$

5) 机动决策点的筛选

在重构指标体系的基础上, 利用主成分分析法获得各个运动参数在本次空战中所做机动的贡献值, 贡献值越大, 说明飞行员更偏好通过改变该参数进行机动, 获得对方飞行员的机动偏好, 可以有针对性的做相应机动; 对贡献值进行归一化处理, 获得各参量的权重, 构建机动决策点综合重构函数, 通过函数值的大小从采样点中选取机动决策点。

6) 机动决策点分类

根据文献[20]所构造的态势函数的变化, 对机动决策点进行归类。机动决策点主要分为优秀决策点、中性决策点和不良决策点。

(1) 优秀决策点, 优秀决策点为使空战态势不断增加的点和有效遏制空战态势减小的点。

(2) 中性决策点, 中性决策点是使空战态势未发生

变化的决策点。

(3)不良决策点,不良决策点是使空战态势不断减小的点和遏制空战态势增加的点。

7)空战机动分析

根据空战态势的变化和机动决策点的类别对空战机动进行分析。

3 仿真分析

本文的数据来源于某型空战训练评估系统^[1],仿真截取某场一对一近距空战的对抗训练数据,假设空战时间共计 120 s。双方开始于 0 s,经过 120 s 后,该回合的空战对抗训练结束。

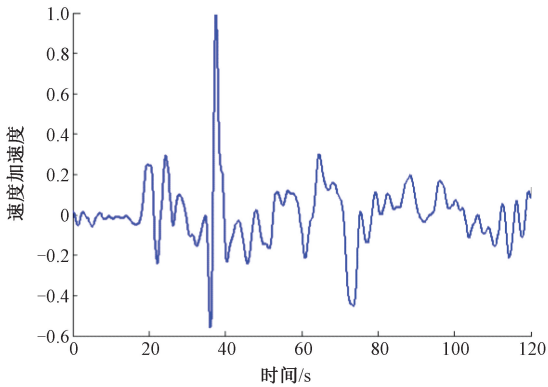
以该回合的对抗数据为研究对象,根据急动度公式求解速度加速度(即位置急动度)、俯仰急动度、横滚急动度和航向角急动度,构建数据矩阵,计算各评价指标的急动度,各急动度的变化示意图如图 2 所示。

根据 PCA 算法求解急动度权重系数,协方差矩阵的特征值为:

$$\lambda = [0.1197, 0.2158, 0.3045, 0.3600]$$

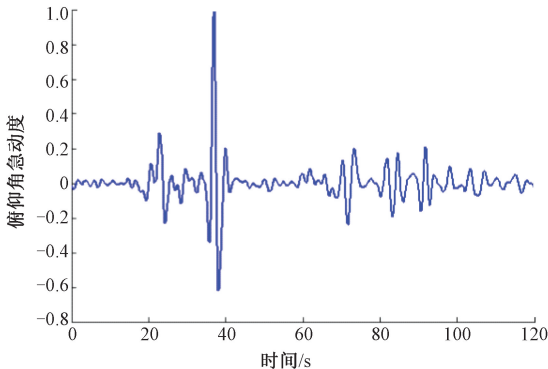
取特征值中的最大值所对应的特征向量,即 λ_4 所对应的特征向量,得:

$$U = [0.0866, 0.0303, 0.3456, 0.0418]$$



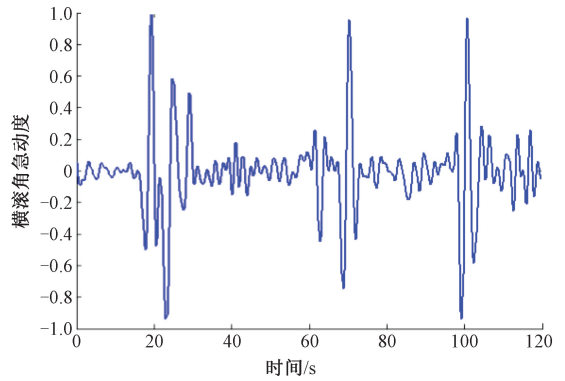
(a) 位置急动度变化示意图

(a) Schematic diagram of change of position jerkiness



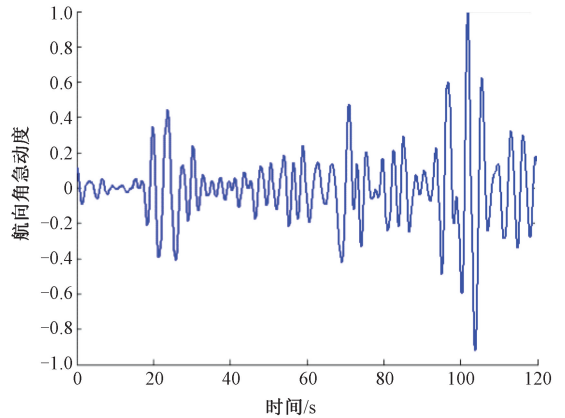
(a) 俯仰角急动度变化示意图

(b) Schematic diagram of change of pitch jerkiness



(c) 横滚角急动度变化示意图

(c) Schematic diagram of change of roll angle jerkiness



(d) 航向角急动度变化示意图

(d) Schematic diagram of change of course angle jerkiness

图 2 各指标急动度变化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the change of the jerk of each index

对特征向量进行归一化处理,获得权重系数:

$$\omega = [0.1717, 0.0601, 0.6853, 0.0829]$$

通过观察各急动度的权重系数,发现横滚角急动度所占权重较大,其次为速度加速度,俯仰角和航向角,说明在这一段空战过程中,蓝方飞机喜欢通过改变横滚角和改变航向角操纵飞机进行机动。

蓝方飞机机动决策点重构函数值变化如图 3 所示。由急动度的物理意义可知,机动决策点重构函数值某一时刻发生突变,则可以推断出该时刻飞行员采取了机动,因此,取脉冲区域的时刻为决策点。由图 3 可知,本次空战蓝方共做出 10 次机动决策,每次机动决策点对应时间和评价价值如表 1。

根据定义的优秀决策点、不良决策点、中性决策点,统计整个空战过程的决策点类别,由于空战过程受不良决策点和优秀决策点影响较大,因此,主要对不良决策点和优秀决策点进行分析。红蓝双方机动决策点分类统计如表 2 所示,表 2 只考虑优秀决策点和恶劣决策点。

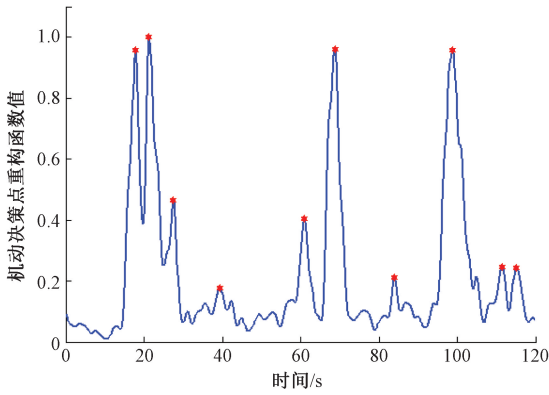


图 3 蓝方飞机机动决策点重构函数数值变化

Fig. 3 The function value variation diagram of blue square aircraft maneuver decision point reconstruction

表 1 蓝方机动决策点

Table 1 Blue maneuver decision points

序号	时间	评价值
1	17.75	0.957 8
2	21.25	0.959 4
3	27.5	0.465 4
4	39.5	0.177 0
5	61	0.404 2
6	68.75	0.960 0
7	84	0.220 3
8	98.75	0.958 9
9	111.5	0.245 8
10	115	0.242 1

由表 2 可知,红方飞机机动决策点的个数多于蓝方飞机,说明红方飞行员更加主动,通过机动决策改变态势,但是由于对态势把握不足或经验不够,多次出现不良决策点,丧失了良好的战机,最终双方均达成了两次攻击条件。说明要想获得空战胜利,不仅需要主动机动,而且需要掌握合理的时机,使态势不断增加。

空战双方机动决策点集合如图 4 所示,标注了各类机动决策点和满足导弹发射条件的 4 个时刻的飞机位置。

表 2 机动决策点信息统计

Table 2 Maneuver decision point information statistics

决策点类别	红方飞机		蓝方飞机	
	数量	时刻	数量	时刻
优秀决策点	8	7.25	5	17.5
		13.25		21.25
		30.25		61
		33.5		68.75
		49.75		
		61.75		
		76		
		101.75		
不良决策点	4	36.75	2	39.5
		41		98.75
		65		
		71		

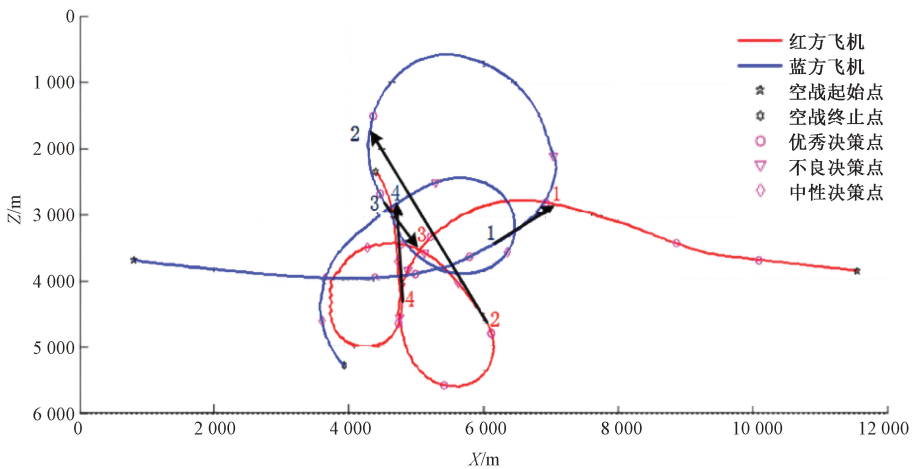


图 4 空战双方机动决策点集合

Fig. 4 Collection of maneuvering decision points of both sides in air combat

结合空战态势及机动决策点分析结论如下。

1) 起始状态至状态 1,红方飞机以高空高速进入空战,蓝方进入高度相对较低,且以不断向上爬升,红方飞机首先开始做机动,态势增加;蓝方飞机速度不断增加向上爬升,随着与红方飞机高度差减小态势迅速增大,蓝方

飞机多次做优秀机动决策,使态势不断增加,在状态 1 时刻满足发射条件。

2) 状态 1 至状态 2,红方飞机在状态 1 形成被攻击条件,迅速做出机动决策,改变转弯方向,向反方向转弯,态势增加;蓝方飞机由于速度过快,由红方前方冲至后

方,双方进入盘旋状态,由于距离增大,且角度优势丧失,双方态势减少;状态 2 至状态 3,红方飞机做出多次决策,努力缩小转弯半径,在状态 2 时红方达到武器攻击条件。

3) 状态 2 至状态 3,红方飞机满足导弹发射条件后,为了保证自身安全及避免出现双机迎头态势,选择主动转弯,角度优势减小,从而态势减小,蓝方飞机发现红方飞机试图躲避,增大转弯半径,增加速度,态势函数增大,在状态 3 达到自身的武器发射条件。

4) 状态 3 至状态 4,红方飞机被攻击后迅速做机动,空战态势减小趋势被遏制,随后双方各自做转弯机动,态势保持稳定不变,转弯过程红方半径小于蓝方半径,在状态 4 之前改出转弯,在状态 4 达到发射条件。

通过对态势函数和机动决策点的分析,发现在每一次达成发射条件的前一段时间,存在优秀决策点且空战态势不断增加,在顶点附近达到攻击条件,说明空战胜利是一个态势不断积累的过程,而优秀机动决策点则是推动态势增加的源头。仿真结果表明该方法所寻找的机动决策点符合空战实际,对机动决策点的分类符合实际空战场景,所提算法简单,工程实践性强,具有一定实际意义。

4 结 论

本文空战训练数据为研究对象,通过构建机动重构指标体系,采用主成分分析法确定各指标权重。从物理急动度的角度对飞行员机动决策重构问题进行研究。以空战实例仿真验证,实现了机动决策点的重构,并还原了机动决策过程。

通过比对空战综合态势函数值的变化,对机动决策点进行分类,评估了一对一空战中双方的战术机动决策。仿真结果进一步表明空战是一个态势累积的过程。飞行员的决策都伴随着优秀决策点的出现。对机动决策点重构问题的研究,将进一步帮助飞行员,深刻认识空战的制胜机理,对于后续开展空战训练具有重要的指导意义。由于本文只研究了单机对抗的机动决策点提取问题,随着军事训练的持续开展以及多机协同作战开展,在后续的研究中,将着重分析多机空战制胜规律,为飞行员开展协同作战训练提供建设性意见。

参考文献

[1] 寇雅楠,姜龙亭,王栋. 近距离空战机动决策过程的高阶重构[J]. 系统仿真学报,2019,31(10):2085-2092.
KOU Y N, JIANG L T, WANG D. high order reconstruction of maneuver decision-making process in close air combat [J]. Journal of System Simulation, 2019,31(10):2085-2092.
[2] 姜龙亭,寇雅楠,王栋,等. 基于空战环境认知的态势

评估[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(10):66-72.
JIANG L T, KOU Y N, WANG D, et al. Situational assessment based on air combat environment cognition [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33(10):66-72.
[3] ZHOU Y, TANG Y C, ZHAO X Z. A novel uncertainty management approach for air combat situation assessment based on improved belief entropy [J]. Entropy, 2019, 21(5):495.
[4] 张彬超,寇雅楠,郭蒙,等. 基于深度置信网络的近距离空战态势评估[J]. 北京航空航天大学学报,2017, 43(7):1450-1459.
ZHANG B C, KOU Y N, WU M, et al. Situation assessment of close air combat based on deep confidence network [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and astronautics, 2017,43(07):1450-1459.
[5] 吕红亮,杨风暴,吉琳娜,等. 面向空战目标态势威胁评估的改进二元语义云评估模型[J]. 国外电子测量技术,2019,38(12):21-26.
LV H L, YANG F B, JI L N, et al. An improved binary semantic cloud evaluation model for threat assessment of air combat targets [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019,38(12):21-26.
[6] 刘琪. 飞行器战术机动动作最优航迹控制模型研究[D]. 天津:天津大学,2014.
LIU Y. Research on optimal trajectory control model of aircraft tactical maneuvering [D]. Tianjin: Tianjin university, 2014.
[7] 左家亮,杨任农,张滢,等. 基于模糊聚类的近距离空战决策过程重构与评估[J]. 航空学报,2015, 36(5):1650-1660.
ZUO J L, YANG R N, ZHANG Y, et al. Reconstruction and evaluation of decision-making process in short-range air combat based on fuzzy clustering [J]. Acta aeronautica sin, 2015, 36(5):1650-1660.
[8] 陈栋,李世其,王峻峰,等. 并联机构的运动学多目标轨迹规划方法[J]. 机械工程学报,2019,55(15): 163-173.
CHEN D, LI S Q, WANG J F, et al. Kinematic multi-objective trajectory planning method for parallel mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019,55(15):163-173.
[9] SCHOT S H. Jerk: The time rate of change of acceleration[J]. American Journal of Physics (S0002-9505), 1978, 46(11):1090-0.
[10] 孟昭曜. 加速度的力学计算和物理意义[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2005, 28(6):741-743.
MENG ZH Y. Mechanical calculation and physical

- significance of acceleration [J]. Journal of sichuan normal university (natural science edition), 2005, 28(6):741-743.
- [11] 方振平. 航空飞行器飞行动力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005.
FANG Z P. Flight Dynamics of Aircraft [M]. Beijing university of aeronautics and astronautics press, 2005.
- [12] 刘永虎. 骨干通信网安全态势评估方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011.
LIU Y H. Research on security situation assessment method of backbone communication network [D]. Chengdu: University Of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [13] 朱艺,肖兵,林傲. 基于主成分分析的反导态势要素提取研究[J]. 现代防御技术, 2015, 43(01):31-38+45.
ZHU Y, XIAO B, LIN AO. Research on the extraction of anti-missile situation elements based on principal component analysis [J]. Modern Defense Technology, 2015, 43(01):31-38, 45.
- [14] 董浩,李明星,张淑清,等. 基于核主成分分析和极限学习机的短期电力负荷预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(1):188-193.
DONG H, LI M X, ZHANG SH Q, et al. Short-term power load prediction based on nuclear principal component analysis and ultimate learning machine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(1):188-193.
- [15] 王帅,黄海鸿,韩刚,等. 基于 PCA 与 GA-BP 神经网络的磁记忆信号定量评价[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(10):190-196.
WANG SH, HUANG H H, HAN G, et al. Quantitative evaluation of magnetic memory signal based on PCA and ga-bp neural network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018, 32(10):190-196.
- [16] 付雅斌. 基于飞参数据的直升机飞行动作识别方法研究[D]. 长春:吉林大学, 2015.
FU Y B. Research on helicopter flight motion identification method based on flight data [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [17] 时绍壮,黎明,刘兰军. 基于时间序列搜索的海底电磁采集站数据质量快速预评估方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8):127-135.
SHI SH G, LI M, LIU L J. Research on the method of rapid pre-evaluation of data quality of submarine electromagnetic acquisition station based on time series search [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8):127-135.
- [18] 刘丽娜,马世伟,温加睿. 基于局部约束字典学习的数据降维和重构方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1):99-108.
LIU L N, MA S W, WEN J R. Data reduction and reconstruction method based on locally constrained dictionary learning [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1):99-108.
- [19] 郑小磊. 空战训练状态监控系统的研究[D]. 济南:山东大学, 2016.
ZHENG X L. Research on air combat training status monitoring system [D]. Ji ' nan: Shandong University, 2016.
- [20] 董彦非,王礼沉,张恒喜. 战斗机空战效能评估的综合指数模型[J]. 航空学报, 2006(6):1084-1087.
DONG Y F, WANG L Y, ZHANG H X Comprehensive index model of fighter aircraft air combat effectiveness evaluation [J]. Acta Aeronautica Sinica, 2006(6):1084-1087.

作者简介



卞华棋, 2014 年于空军工程大学获得学士学位, 现为空军工程大学研究生院硕士研究生, 主要研究方向为装备作战使用与保障。

E-mail: 1015635238@qq.com

Bian Huaqi received his B. Sc. degree from Air Force Engineering University in 2014. Now he is a M. Sc. candidate at Air Force Engineering University. His main research interest includes equipment for operational use and support.