

# 空战临战态势评估方法研究

曹慧敏, 黄安祥, 雷祥

(空军指挥学院, 北京 210007)

**摘要:** 空战临战状态下, 态势瞬息万变, 快速准确的对当前态势进行评估并做出决策, 是取得空战胜利, 保存我方实力的关键。针对临战状态下态势评估, 从现代空战作战特点以及实际需求出发, 将飞行员个人实战能力以及编队协同战术任务对单机作战约束等因素纳入评估指标体系, 使评估更加合理全面, 更加贴近实战, 采用 BP 神经网络算法对该评估方法进行仿真实验, 为空战临战态势评估提供了一个较为准确的评估方法, 也为飞行员和指挥人员后续决策提供更加准确的依据。该研究运用到某战术级空战仿真模拟系统, 补充和完善了飞行模拟训练系统的训练内容, 提升了飞行员训练的效益, 增强了飞行员的临战决策能力。

**关键词:** 空战; 临战态势; 评估方法; 辅助决策

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 01-0257-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0218

## Evaluation Method of Imminent Battle Situation in Air Combat

Cao Huimin, Huang Anxiang, Lei Xiang

(Air Force Command College, Beijing 210007, China)

**Abstract:** In the state of air combat, the situation change rapidly. Quick and accurate assessment of the current situation and making decisions is the key to the victory of air combat and the preservation of own strength. Based on the specialty of the modern air battle and pelagic operation, this article adds the political factor, the pilot individual actual combat ability, and the formation cooperative tactical task to fight against the single constraint into the evaluation index system. This makes the evaluation more reasonable and comprehensive and closer to the actual combat, so as to provide more accurate basis for subsequent decisions. This method is applied to a tactical air combat training simulation system, which completes the flight training content and strengthens the efficiency of the combat training and the ability of pilot decision-making.

**Keywords:** air combat; situation of close to fire; assessment; decision-making

## 引言

空战临战状态下, 态势瞬息万变, 快速准确的对当前态势进行评估并做出决策, 是取得空战胜

利, 保存我方实力的关键。在临战态势下, 仅仅依靠飞行员以及指挥人员的个人分析和判断不仅容易出现失误, 而且容易错失战机。特别是在远程远海作战, 指挥控制受距离影响, 容易产生延迟, 这时候更加依赖飞行员本人对空中态势的准确快速的评估和判断。

目前, 国内外相关领域的研究多集中在空战态势评估和威胁评估两个方面, 评估的主要是双方战



收稿日期: 2017-05-15

修回日期: 2017-07-27;

作者简介: 曹慧敏(1985-), 女, 安徽含山, 博士生, 工程师, 研究方向为空军合同战斗模拟; 黄安祥(1962-), 男, 山东单县, 博士, 高工, 研究方向为作战仿真模拟; 雷祥(1985-), 男, 贵州兴义, 硕士, 讲师, 研究方向为计算机仿真。

<http://www.china-simulation.com>

机的位置、距离、机载武器等因素,国内的很多相关研究也多集中在“一对一”的单机空战问题上<sup>[1-2]</sup>。并且现在的战术级飞行训练多集中在战术动作、如何编队等战术方法上,对飞行员的情况处置、决策训练的比较少。而现代空战,政治影响大,对飞行员的实战能力要求高,作战方式也多以编队协同作战为主,特别是远程远海作战,关注度高,突发情况多,作战力量编程多样,指挥控制难度大,协同作战复杂,飞行员和指挥人员空情态势判断和指挥决策难度大。本文从现代空战特别是远程远海空中作战特点以及实际需求出发,将飞行员个人实战能力以及编队协同战术任务对单机作战约束等因素纳入评估指标体系,使评估更加合理全面,为后续决策提供更加准确的依据。

## 1 临战态势下可攻击条件评估指标体系构建

临战状态下可攻击条件评估指标选取应当遵循全面、简明、独立以及便于快速进行评估的原则。可攻击条件评估因素众多,一些因素处于动态变化中,同时由于战场信息不能够做到完全准确、透明和全面,可攻击条件评估过程是一个多因素多层次多目标的过程,需要根据不断变化的情况来对各因素进行评估<sup>[3]</sup>。

### 1.1 飞行员作战能力

强大的战斗力是飞行员自身优秀的作战能力和武器装备优良的性能相结合的产物,飞行员和作战平台是一个有机整体,二者缺一不可。因此,飞行员自身的实战能力也是必须考虑的因素。飞行员的技战术水平主要从以下两方面进行考量:一是飞行员的飞行总时间,飞行总时间同飞行员的战斗能力基本成正比;二是飞行员复训、战术、编队等实战比武成绩的评定。

### 1.2 武器装备水平

武器装备水平是战机决定是否进行攻击的关

键因素。本文根据实际的作战需要,选取飞机的机动性能、火力、目标探测能力以及电子对抗能力四个因素,同时增加是否具备隐身性能这个因素进行考察评估。目前评估空战能力的方法有性能对比法、专家评估法、实兵演习、仿真模拟、计算评估方法。本文根据所选取指标是空战能力下各子系统下的单项指标,具有很明显的层次性,因此采用层次分析法进行评估。

### 1.3 空战态势

空战态势是能否进行攻击的关键因素之一,空战态势评估就是总和融合战场上的各种因素,充分分析敌我双方的战斗状态和优劣势,针对特定的战斗环境,量化估计相关事件信息,实时反映敌我态势动态变化过程。目前空战态势评估的方法有参量法和非参量法<sup>[4]</sup>。不同的空战模式,影响空战态势的因素和影响程度也不同。本文按超视距空战和视距内空战分别进行了分析和评估。

### 1.4 战场环境

除了评估我方的作战对抗的过程中,战场环境对空战过程影响也很大,根据空战特点,本文主要考虑 3 个方面<sup>[5]</sup>:电磁环境、地理环境和气象环境。电磁环境是空战中信息传输的重要基础,战场电磁环境效应包含静电放电、电磁兼容性、电磁敏感性、电磁辐射危害、雷电效应、电子对抗、干扰/阻断,电磁干扰、电磁易损性,电磁脉冲、射频能的威胁等方面,对空战中预警探测、武器制导、雷达探测都会产生影响。同时,气象环境会直接影响到整个作战进程,作战过程中战术的使用和武器装备的选择都和气象条件息息相关。例如光电武器、巡航导弹、超视距雷达等,不仅受风云、雨、雪等常规气象要素和宏观天气环境的影响,而且对云雨粒子、气溶胶、低空风切变、大气电场、大气折射、大气湍流等大气环境要素和微小尺度天气现象的影响十分敏感。

由此临战态势下可攻击条件评估指标体系构建如图 1 所示。

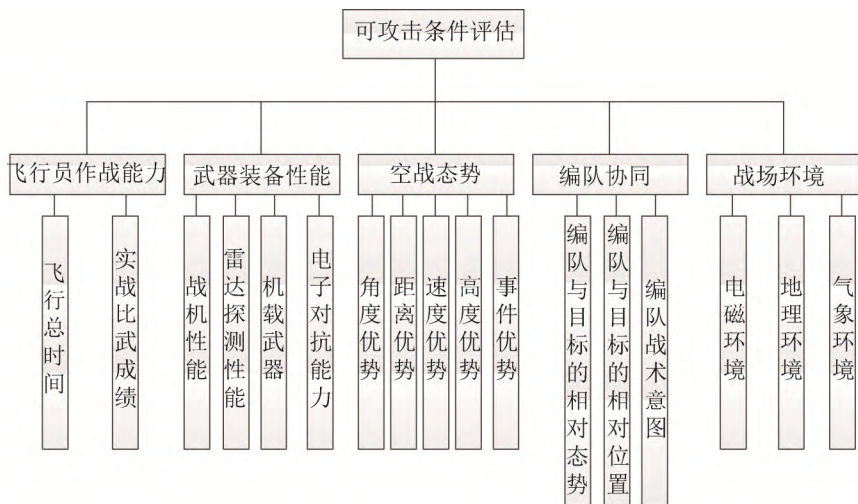


图 1 可攻击条件评估指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of attack conditions

## 2 可攻击条件评估方法

可攻击条件涉及政治背景、作战能力、目标情况、飞行员作战能力等各个要素,各要素模型构成复杂,各要素所包含的信息量也非常大,而指挥员、作战人员对各要素信息的精准程度也越来越高,因此,精准评估各个要素至关重要。

由于各个要素的复杂性和不确定性,在进行评估时要根据各个要素的特点进行评估。采用多种方法相结合。

### 2.1 飞行员作战能力分析

飞行员的作战能力可以根据飞行员的飞行时间长度以及飞行员参加实战训练以及比武的成绩来进行评估。通常情况下,飞行员的飞行时间越长,战斗经验越丰富,作战能力也相应较高。在实战训练和空战比武竞赛中,飞行员获得的名次越靠前,奖励越多,则飞行员的作战能力越强。可邀请一定数量的对飞行员的作战能力进行打分,分值越高作战能力越强。同时综合考虑日常训练、技战术养成、理论水平、心理素质等方面,采用专家评判法,根据“优、良、中、可”的等级标准进行打分,最后将专家评估的均值作为飞行员作战能力高低值。

### 2.2 空战能力评估分析

对某一类型战机的空战能力进行分析评估,选

取与空战能力相关的几个重要因素:战机性能、雷达探测距离、机载武器火力和电子对抗能力进行分析<sup>[6]</sup>。单机空战能力表示为:

$$C = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i \times \prod_{j=2}^m E_{ij})$$

式中:  $C$  为单机空战能力指数;  $n$  为选取的评估指标个数;  $\varepsilon_i$  为单项指标  $i$  对于指标期望值的隶属度;  $m$  为指标所在的层级;  $E_{ij}$  为某一指标在第  $j$  层中的权重度。另外,  $E_{ij}$  也可以理解为某项指标对空战能力  $C$  的贡献度。

### 2.3 态势评估

只有在态势上占有一定优势才能对目标进行攻击,本文选取了角度优势、距离优势、速度优势、高度优势、事件优势 5 个指标来量化分析我方相对敌方的优势程度。超视距作战和视距内作战有各自的作战特点,不同的指标在不同的作战态势中的影响也各自不同<sup>[7]</sup>。

#### 2.3.1 超视距作战

##### (1) 角度优势<sup>[8]</sup>

将方位角划分为 3 个区域,雷达搜索区域、导弹攻击区域,建立角度优势函数:

$$R_{\varphi} = \begin{cases} 0.1 - \frac{|\varphi| - 85^0}{10(180^0 - 85^0)}, |\varphi| \geq 85^0 \\ 0.2 - \frac{|\varphi| - \varphi_{AR \max}}{10(180^0 - \varphi_{AR \max})}, \varphi_{AR \max} \leq |\varphi| \leq 85^0 \\ 0.3 - \frac{|\varphi| - \varphi_{AM \max}}{10(\varphi_{AR \max} - \varphi_{AM \max})}, \varphi_{AM \max} \leq |\varphi| \leq \varphi_{AR \max} \\ 0.8 - \frac{|\varphi| - \varphi_{AMK}}{2(\varphi_{AR \max} - \varphi_{AMK})}, \varphi_{AMK} \leq |\varphi| \leq \varphi_{AM \max} \\ 1 - \frac{|\varphi|}{5\varphi_{AMK}}, 0 \leq |\varphi| < \varphi_{AMK} \end{cases}$$

式中： $R_{\varphi}$ 为我机相对于敌机的角度优势； $\varphi$ 为敌机的方位角； $\varphi_{AR \max}$ 为机载雷达最大搜索方位角； $\varphi_{AM \max}$ 为我机载弹最大离轴发射角； $\varphi_{AMK}$ 为我机不可逃逸角度。超视距空战中，敌我双方迎头接近时，雷达探测范围最大，且可以在最远的距离发射空空导弹，因此角度优势最大；同理在敌机尾部时，角度优势较小。由此可得出进入角优势函数：

$$R_{q=} \begin{cases} e^{-|180-\varphi-q|/(180/\pi)}, \varphi \geq 0 \\ (\text{若 } q < -\varphi, q = q + 360; \text{若 } \varphi > 90^0, \varphi = 180 - \varphi) \\ e^{-|180+\varphi+q|/(180/\pi)}, \varphi < 0 \\ (\text{若 } q > -\varphi, q = q - 360; \text{若 } \varphi < -90^0, \varphi = -180 - \varphi) \end{cases}$$

方位角优势和进入角优势如果其中一项为 0，则整体的角度优势为 0。

## (2) 距离优势

超视距作战中，距离对态势的影响主要是雷达探测概率和空空导弹的杀伤概率上。对于 RCS 一定的敌机，我机与敌机的距离越大，雷达的发现概率越小。而导弹的杀伤概率是在某一距离时较大，在可发射区域的最远和最近处杀伤概率小且变化较快。所以距离优势函数为：

$$R_d = \begin{cases} 0.1839e^{-\frac{d-D_{AR \max}}{D_{AR \max}}}, D_{AR \max} \leq d \\ 0.5e^{-\frac{d-D_{AR \max}}{D_{AR \max}-D_{AM \max}}}, D_{AM \max} \leq d < D_{AR \max} \\ 0.2e^{-\frac{d-D_{AMK \max}}{D_{AM \max}-D_{AMK \max}}}, D_{AMK \max} \leq d < D_{AM \max} \\ 1, D_{AMK \min} \leq d < D_{AMK \max} \\ 2e^{-\frac{d-D_{AMK \max}}{2D_{AMK \max}}}, 0 \leq d < D_{AMK \min} \end{cases}$$

## (3) 能量优势

为了方便运算，简化过程，本文将速度优势何高度优势合成为能量优势。

超视距作战时，载机速度越大，空空导弹对敌机的威胁也越大，由此构建能量优势函数：

$$R_e = \begin{cases} 1, 2E_R \leq E_A \\ 1 + \frac{0.9(E_A - 2E_R)}{1.5E_R}, 0.5E_R \leq E_A \leq 2E_R \\ 0.1, 0.5E_R > E_A \end{cases}$$

## (4) 事件优势

事件优势涉及的因素多，本文选取其中影响较大的事件进行描述：

$$R_f = \begin{cases} 0, \text{雷达未开机} \\ 0.5, \text{对目标实施电子干扰} \\ 0.8, \text{对目标连续跟踪扫描} \\ 1.0, \text{已发射中距弹} \end{cases}$$

综上所述，战机综合空战优势函数构建如下：

$$BS = \begin{cases} \lambda_M \times R_M + \lambda_c \times R_c + \lambda_f \times R_f, R_f \neq 1 \\ 1, R_f = 1 \end{cases}$$

式中： $R_M$ 为相对几何位置优势，由角度优势、距离优势、能量优势组成。

## 2.3.2 视距内作战

视距内空战，选取角度、距离、高度、速度等指标进行评估。近距空战导弹离轴发射角比以往增大了很多，增加了载机的攻击机会，提高了攻击效率。所以事件优势中将导弹是否发射作为一个因素考虑进去。

### (1) 角度优势

构建角度优势函数：

$$R_{\varphi} = 1 - \frac{|q_B| + |\varphi_B|}{180^0}$$

式中： $q_B$ 为敌机的进入角； $\varphi_B$ 为敌机的方位角。

### (2) 距离优势

视距内空战，距离优势由我机和敌机之间的相对距离和近距格斗弹攻击范围所决定。在未达到近距弹最佳攻击距离时，距离优势随敌我机相对距离的减小而增大；超过最佳攻击距离后，距离优势随距离的减小而减小。距离优势函数如下：

$$R_d = e^{-\frac{(d-D_0)^2}{2 \times (D_{\max} - D_{\min})}}$$

式中:  $D_0$  为最佳攻击距离;  $D_{\max}$  为最大攻击距离;  
 $D_{\min}$  为最小攻击距离。

### (3) 速度优势

参考相关文献资料, 构建速度优势函数:

$$R_v = \begin{cases} 0.1, v_A < 0.6v_B \\ -0.5 + v_A / v_B, 0.6v_B \leq v_A \leq 1.5v_B \\ 1, v_A \geq 1.5v_B \end{cases}$$

式中:  $v_A$  为我机的速度;  $v_B$  为敌机的速度。

### (4) 高度优势

$$R_h = \begin{cases} 0, \Delta H \leq -5km \\ 0.5 + 0.1\Delta H, -5km \leq \Delta H \leq 5km \\ 1, \Delta H \geq 5km \end{cases}$$

式中:  $\Delta H$  为我机和敌机的高度差(我机的高度减去敌机的高度)。

### (5) 事件优势

视距内的事件优势, 简化考虑是否发射了近距离格斗弹。如果已经发射了格斗弹, 则优势为 1, 否则为 0。

综上所述, 视距内态势评估模型为:

$$S = \begin{cases} \alpha_\phi \times R_\phi + \alpha_d \times R_d + \alpha_v \times R_v + \alpha_h \times R_h + \alpha_c \times R_c, R_f = 0 \\ 1, R_f = 1 \end{cases}$$

### (6) 空战能力优势

视距内作战对空战能力要求非常高, 在此增加了空战能力优势计算。

$$R_c = \begin{cases} 1, C_A / C_B \geq 1.5 \\ 0.75, 1.5 > C_A / C_B \geq 1.05 \\ 0.5, 1.05 > C_A / C_B \geq 0.95 \\ 0.25, 0.95 > C_A / C_B \geq 0.3 \\ 0, C_A / C_B < 0.3 \end{cases}$$

式中:  $C_A, C_B$  分别为我机和敌机的空战能力指数。

## 2.4 编队作战情况下单目标攻击综合空战态势<sup>[8]</sup>

实际空战中, 往往是编队作战, 因此要综合考虑编队作战情况下的综合空态势。因为编队作战复杂, 这里将问题简化为我方编队所有战机相对目标

敌机(单架)的空战态势优势之和。当我方选定敌方编队中某一架战机为攻击目标时, 我方相对敌方的优势计算函数为

$$S = S_A - S_B$$

式中:  $S_A$  为我方编队综合态势,  $S_A = s_{1A} + s_{2A} + \dots + s_{iA}$ ;  $S_B$  为我方选定敌某一架飞机作为攻击目标后, 敌方编队的综合态势,  $S_B = s_{1B} + s_{2B} + \dots + s_{iB}$ 。

敌我双方的空战综合态势可利用上述的超视距空战态势和视距内空战态势评估模型进行评估。

在编队协同作战时, 单机作战要服从编队作战任务, 由长机或者指挥人员按照任务需要和当前态势给单机下达作战命令。单机应及时将态势及时汇报给长机或指挥人员。单机不仅要评估自身的态势优劣, 同时还要综合考虑编队的态势, 分析下一步行动给编队态势带来的影响, 以随后能否完成编队作战任务为根本依据。如果单机态势处于优势而整个编队态势处于劣势, 不利于任务完成, 则编队应当进行战术调整, 直至编队整体态势处于优势, 利于任务完成为止。

## 3 BP 神经网络评估模型<sup>[9]</sup>

运用 BP 神经网络评估模型具有收敛速度快, 局部收敛速度快, 具有很强的非线性映射能力, 本文采用这种算法对攻击条件进行评估。采用 3 层 BP 网络模型, 如图 2 所示。

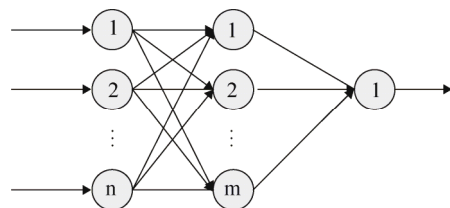


图 2 BP 神经网络可攻击条件评估模型  
Fig. 2 BP neural network based the attack condition evaluation model

输入层节点共 18 个, 输出层节点 1 个, 隐含层节点数用公式  $m = \sqrt{n+1} + k$  确定,  $k \in [1, 10]$  对于样本的归一化处理, 目前可攻击条件的评估数据十分有限, 利用空战仿真飞行试验的若干数据组成样本, 将可攻击条件的值进行如下划分:



$y \in [0.7, 1]$ , 攻击条件具备, 立即开火  
 $y \in (0.5, 0.7]$ , 攻击条件占优势, 需再进一步调整  
 $y \in (0.0, 0.5]$ , 攻击条件不具备  
 仿真实验流程如图 3 所示。

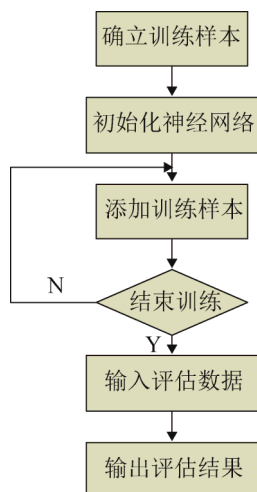


图 3 仿真实验流程  
Fig. 3 Simulation experiment process

运用 matlab 神经网络工具箱对攻击条件评估进行仿真实验, 实验结果如表 1 所示。

表 1 实验值与实测值

Tab. 1 Experimental values and measured values

序号	实验值	实测值	误差
1	8.334 2	8.534 2	0.023 4
2	8.563 4	8.611 1	0.005 5
3	6.435 7	6.467 4	0.004 9
4	7.021 3	7.110 9	0.012 6
5	5.164 1	5.002 1	0.032 4
6	4.635 2	4.552 1	0.018 2
7	3.233 3	3.267 5	0.010 5
8	3.124 3	3.012 3	0.037 2
9	7.458 5	7.674 5	0.028 2
10	2.352 1	2.347 5	0.001 9

由表 1 可以看出, 采用 BP 神经网络进行评估, 最大误差为 2.82%, 最小误差为 0.19%, 平均误差为 1.75%。采用 BP 神经网络进行评估, 误差较小, 为空战攻击条件提供了一种有效方法。

## 4 结论

目前, 空战辅助决策评估的研究发展十分迅速,

产生了很多新的理论和新的方法。本文特别针对空战中的临战状态下的空战态势, 将政治局势、飞行员作战能力以及编队作战等条件纳入态势评估中, 提出了定性和定量相结合的评估方法, 使评估更加合理全面, 为后续决策提供更加准确的依据。采用 BP 神经网络进行评估, 误差较小。本方法运用到某战术级空战仿真模拟训练系统中, 补充和完善了飞行模拟训练系统的训练内容, 提升了飞行员远海训练的效益, 增强了飞行员的临战决策能力。

## 参考文献:

- [1] 马伟江, 姚佩阳, 周翔翔, 等. 改进的超视距空战态势评估方法[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(6): 2096-2107. Ma Wei-jiang, Yao Pei-yang, Zhou Xiang-xiang, et al. Improved method of situation assessment in BVR air combat[J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(6): 2096-2107.
- [2] Tina Erlandsson, Lars Niklasson. Automatic evaluation of air mission routes with respect to combat survival[J]. Information Fusion (S1566-2535), 2014, 200: 88-98.
- [3] 李战武, 常一哲, 杨海燕, 等. 基于动态威力场的协同空战态势评估方法研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(7): 1584-1600. Li Zhan-wu, Chang Yi-Zhe, Yang Hai-yan, et al. Situation Assessment Method for Cooperative Air Combat Based on Dynamic Combat Power Field[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7): 1584-1600.
- [4] 姜广田. 有限理性条件下考虑决策者动态期望的多属性决策方法[J]. 运筹与管理, 2015, 24(3): 20-26. Jiang Guang-tian. Method for Multiple attribute decision making considering Decision maker's Dynamic Aspiration Under Bounded Rationality[J]. Operations Research and Management Science, 2015, 24(3): 20-26.
- [5] 黄安祥. 空战战术仿真技术与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 34-36. Huang An-Xiang. Simulation and Design of Air Combat Tactics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 34-36.
- [6] 罗鹏程, 周经伦, 金光. 武器装备体系作战效能与作战能力评估分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 24-32. Luo Peng-Cheng, Zhou Jing-lun, Jin Guang. Analysis on Assessment Methods for Combat Capability of Weapon SoS[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 24-32.

- Proceedings of the 2013 Seventh International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems. USA: IEEE Computer Society, 2013: 726-731.
- [16] Sanchez S, Roux O L, Gaildrat V, et al. Constraint-based 3d-object layout using a genetic algorithm[EB/OL]. [2018-05-30].[http://www.kartaneon.gr/3ia\\_previous\\_conferences\\_cds/2003/PAPERS/07\\_FullPaper/FullPaper07.pdf](http://www.kartaneon.gr/3ia_previous_conferences_cds/2003/PAPERS/07_FullPaper/FullPaper07.pdf).
- [17] Akazawa Y, Okada Y, Nijima K. Automatic 3D scene generation based on contact constraints[OL]. [2018-05-30].[http://www.kartaneon.gr/3ia\\_previous\\_conferences\\_cds/2005/Papers/Papers/Paper02.pdf](http://www.kartaneon.gr/3ia_previous_conferences_cds/2005/Papers/Papers/Paper02.pdf).
- [18] Xu K, Stewart J, Fiume E. Constraint-based automatic place-ment for scene composition[C]// Proceedings of the Graphics Interface. Calgary: Canadian Human-Computer Communications Society Press, 2002: 25-34.
- [19] Kjølås K A H. Automatic furniture population of large architectural models[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [20] Germer T, Schwarz M. Procedural Arrangement of Furniture for Real Time Walkthroughs[J]. Computer Graphics Forum (S0167-7055), 2010, 28(8): 2068-2078.
- [21] Roux M L O L, Gaildrat V. Using Meta-Heuristics for Constraint-Based 3D Objects Layout[EB/OL]. [2018-05-30]. [http://www.kartaneon.gr/3ia\\_previous\\_conferences\\_cds/2004/Papers/02.pdf](http://www.kartaneon.gr/3ia_previous_conferences_cds/2004/Papers/02.pdf).
- [22] Fisher M, Ritchie D, Savva M, et al. Example-based synthesis of 3D object arrangements[J]. Acm Transactions on Graphics (S0730-0301), 2012, 31(6): 1-11.
- [23] Xu W, Wang B, Yan D M. Wall grid structure for interior scene synthesis[J]. Computers & Graphics (S0097-8493), 2015, 46(1): 231-243.
- [24] Xu K, Chen K, Fu H, et al. Sketch2Scene: sketch-based co-retrieval and co-placement of 3D models[J]. Acm Transactions on Graphics (S0730-0301), 2013, 32(4): 1-15.
- [25] Chang A, Savva M, Manning C D. Interactive Learning of Spatial Knowledge for Text to 3D Scene Generation[EB/OL]. [2018-05-30]. <https://nlp.stanford.edu/pubs/scenegen-aclviz2014.pdf>
- [26] Fisher M, Savva M, Li Y, et al. Activity-centric scene synthesis for functional 3D scene modeling[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2015, 34(6): 212.
- [27] Fu Q, Chen X, Wang X, et al. Adaptive synthesis of indoor scenes via activity-associated object relation graphs[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2017, 36(6): 1-13.
- [28] Watson I D. An introduction to case-based reasoning[J]. Artificial Intelligence Review (S0269-2821), 1992, 6(1): 3-34.
- [29] 荣辉桂, 火生旭, 胡春华, 等. 基于用户相似度的协同过滤推荐算法[J]. 通信学报, 2014, 35(2): 16-24.
- Rong Huigui, Huo Shengxu, Hu Chunhua, et al. User similarity-based collaborative filtering recommendation algorithm[J]. Journal on Communications, 2014, 35(2): 16-24.

(上接 262 页)

- [7] 孙金标. 航空兵空战战术决策建模[M]. 北京: 蓝天出版社, 2013: 51-64.
- Sun Jin-biao. Decision Modeling of Air Tactics[M]. Beijing: Blue Sky Press, 2013: 51-64.
- [8] 肖冰松, 方洋旺, 胡诗国, 等. 一种新的超视距空战威胁评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2163-2166.
- Xiao Bin-song, Fang Yang-wang, Hu Shi-guo, et al. New threat assessment method in beyond-the-horizon range air combat[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(9): 2163-2166.
- [9] 郑玉军, 田康生, 邢晓楠, 等. 基于 BP 神经网络的多功能相控阵雷达威力评估[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(3): 120-122.
- Zheng Yujun, Tian Kangsheng, Xing Xiaonan, et al. Power Evaluation of Multi-function Phased Array Radar Based on BP Neural Networks[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(3): 120-122.