

空中进攻作战安全返航通道容量评估

韩雪艳, 沈堤, 余付平, 霍丹

(空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051)

摘要 针对军航战时空中进攻作战安全返航通道容量评估问题, 提出节点合流调控元胞自动机模型(MRCA模型)。根据空中进攻作战安全返航通道设置构型, 聚焦通道交叉处的节点运行特性, 将节点安全间距保持量化到合流规则中, 研究不同可接受间隔条件下节点合流通道最大流量。并基于节点合流通道的交通运行特性, 建立最小风险通道进入时间窗, 将容流平衡调控的时间节点前移, 在战略管理和预战术管理中消解个体战机在节点处的潜在航迹冲突, 实现最大通行能力。仿真结果表明: 节点合流后通道容量随间隔减小而增大, 最大达到102架/h; 在最小风险通道可进入时间窗范围内, 通过MRCA模型在决策圆处对战机进行动态调控, 能够保证节点安全合流, 实现流量最大化。

关键词 空中进攻作战安全返航通道; 容量评估; 时间窗; 元胞自动机

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.05.008

中图分类号 V355 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)05-0063-09

Evaluation of Safe Return Channel Capacity in Air Offensive Operations

HAN Xueyan, SHEN Di, YU Fuping, HUO Dan

(Air Traffic Control and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract In order to evaluate the capacity of the safe return channel of offensive operations in the time and space of military aviation warfare, this paper proposes the node confluence control cellular automata model (MRCA model). According to the configuration of the safe return passage in air attack operations, focus on the operational characteristics of nodes at the intersection of the passage, quantify the safe spacing of nodes into the confluence rules, and study the maximum flow of the passage before and after the nodes under different acceptable spacing conditions. And based on the traffic operation characteristics of the channel before and after the node, the minimum risk channel entry time window is established to move forward the time node of capacity balance regulation, eliminate the potential conflict of the fighter at the node in the strategic management and pre tactical management, and achieve the maximum traffic capacity. The simulation results show that the channel capacity increases with the decrease of the interval after the node confluence, and the maximum is 102 frames/h. Within the time window that the minimum risk channel can enter, the MRCA model is used to dynamically control the aircraft at the decision circle, which can ensure the safe confluence of nodes and maximize the flow.

Key words safe return channel for air offensive operations; capacity assessment; entry time window; cellular automata

收稿日期: 2022-12-19

作者简介: 韩雪艳(1991—), 女, 安徽涡阳人, 讲师, 博士, 研究方向为空域规划与管理。E-mail: hanxueyan19911018@163.com

引用格式: 韩雪艳, 沈堤, 余付平, 等. 空中进攻作战安全返航通道容量评估[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(5): 63-71. HAN Xueyan, SHEN Di, YU Fuping, et al. Evaluation of Safe Return Channel Capacity in Air Offensive Operations[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(5): 63-71.

军民用航空中,无论是军航作战还是民航发展,在有限的空域资源内通过流量管理实现流量最大化,一直是国际学术研究的焦点^[1-4]。由于军航战时与民航平时的运行方式、运行目的以及运行机型不同,尽管目前民航已有大量学者对航路容量展开研究^[5-9],但针对军航战时特有返航方式下的返航通道容量研究目前较少。评估军航战时特有返航通道的容量,进而基于容量科学管理流量,是保障战机安全、有序、高效完成作战任务的重要基础。

目前,国内外对容流管理的研究主要是基于当前扇区运行方式,考虑扇区容量进行航路流量管理^[5]。对扇区容量的研究是基于交通流运行特性展开的,研究分为两类,第一类通过建立交通流模型进行研究,主要包括队列模型、流体力学模型和微观行为模型。第二类通过建立管制员模型进行研究,主要包括认知模型与计算模型^[8]。在第一类交通流模型中,元胞自动机(cellular automata, CA)作为微观模型,是用来描述个体性格的模型,在交通流研究领域有着极其重要的地位^[10-12],文献[13]最早将元胞自动机模型应用于空中交通流理论,以开发交通流性能和容量提升的新理念。随后,文献[14]基于欧拉方法建立二维元胞自动机模型,定义每个单元代表一个扇区,建立扇区进入规则进而对扇区容流进行分析。文献[15]在针对终端区运行效率的研究中,基于连续下降方法(CDA)提出元胞自动机模型,通过模型进行仿真,证明了在最小化目标交通流总延迟的情况下,能够得到进近过程近似最优的流量。文献[16]将安全间距引入元胞自动机模型,利用统计物理方法研究了空中交通系统平衡,以期空中交通管制提供决策。文献[17]以机场飞机起飞时间为变量建立模型,通过元胞自动机研究微小起飞时间变化对流量影响,提出优化航班时刻表。文献[18]利用元胞自动机对地面滑行、起飞以及着陆飞机进行建模,进而对进场运行效率进行定量分析,以此预测空中交通。可以看到,随着空中交通管理新技术的提出,研究者们开始聚焦于个体航空器,CA模型因其具有描述并记录单个航空器运行特点的优势,并且由于其固有的离散性,使得其具有高效仿真特点,近些年被广泛应用于空中交通运行分析各个阶段。

综上所述可以看出,基于CA模型对空中交通的分析主要集中在利用CA模型进行建模仿真,对运行结果进行评估以验证所提模型的有效性。鲜有研究者从微观角度,基于CA模型记录个体航空器交通运行特性,针对航空器在不同管控措施下的交通运行特性展开流量管控研究;尤其是考虑战时返航战机在预设安全返航通道的运行特性,展开战时战机返航流量管控研究还处于空白阶段。本文结合战时,战机通过安全

返航通道返航的特点,针对安全返航的指定返航模式,从微观角度进行安全返航通道的容量评估研究。通过建立返航通道节点合流动态调控元胞自动机模型(cellular automata model based on merge point regulation, MRCA)。对返航通道节点合流容量进行分析;并基于模型确定返航通道进入时间窗,将容流平衡调控的时间节点前移,强化网络航迹管理能力,在战略管理和预战术管理中消解个体航空器在战术运行中的潜在航迹冲突。

1 空中进攻作战安全返航通道

空中进攻作战安全返航通道用于战时前出实施空中进攻作战如空中遮断、纵深打击的航空器安全返航时使用。在战机通过安全返航通道返航过程中,利用容流协同措施,并配合各类技术识别手段,可确保敌我识别的可靠性。安全返航通道包括最小风险通道(枚红色通道)、低空穿越通道(蓝色通道)和空中通道(黄色通道),设置如图1所示。

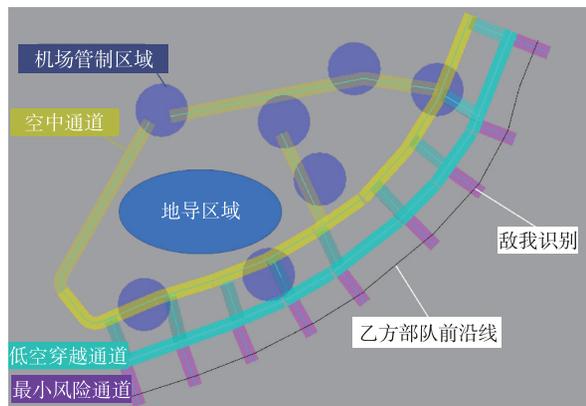


图1 返航通道划设

如图所示,返航战机加入指定最小风险通道,在己方部队前沿线进行敌我识别,利用最小风险通道飞行所获取的传感器位置信息与敌我识别器信息进行综合识别,完成敌我识别后加入低空穿越通道,最后进入空中通道返回指定机场着陆。返航通道由最小风险通道、低空穿越通道和空中通道,根据战场前沿打击战术以及返回我方空域敌我识别要求,返航战机低高度加入返航通道,随后高度依次增加,设置参数如表1所示。

表1 安全返航通道参数设置

通道名称	参数设置
最小风险通道	设置于战场前沿区域,宽 10 n mile, 海拔高度 600~1 200 m
低高度层穿越通道	连接最小风险通道和空中通道,宽 10 n mile,海拔高度 1 200~1 800 m
空中通道	布设于后方区域,连接机场管制区域,宽 10 n mile,海拔高度 1 800~3 800 m,根据需要可设置更高的高度层

战时,通过开通指定高度层的指定通道,配合完成敌我识别,保证识别的可靠性。由图 1 可知,返航通道是网络结构,研究返航通道的容量需要考虑返航通道的构型以及运行具体方式。为便于开展研究,构建返航通道战时的开通形式以及使用着陆机场如图 2 所示。其中,最小风险通道开通 4 条;横向低空穿越通道开通 1 条,纵向低空穿越通道开通 3 条,空中通道开通 2 条,供战机由战场前沿返回后方机场使用。具体飞行路线如图 2 所示。

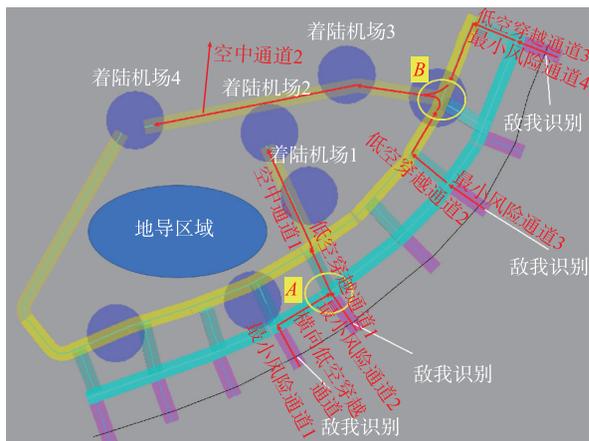


图 2 返航通道开通形式

根据图 2 具体开通形式可以看出,研究返航通道容量,首先需研究空中通道 1 与空中通道 2 的容量,两通道的容量决定了该开通形式下返航通道的总容量。其次由于战机从最小风险通道 1 与最小风险通道 2 返航时,在横向低空穿越通道的节点处存在合流情况如图中黄色圈 A;同时,从最小风险通道 3 与最小风险通道 4 返航时,在分别经过低空穿越通道 2 和低空穿越通道 3 后,向空中通道 2 返航时,在节点处亦存在合流情况如图中黄色圈 B。此时合流之后的通道容量制约合流前各通道的容量,合流前战机在各通道的时空位置又决定了合流处是否存在碰撞风险,进而影响合流点处的合流行为。

因此,针对战时特有返航通道布设,战机在合流节点处的合流特性是制约节点前后通道流量的关键,研究返航通道容量主要应分析节点处的运行特性。下文通过建立模型,确保战机在节点处满足保持安全纵向间隔以及横向间隔的同时,又能达到合流后实现通道的最大流量,进而分析节点交通运行特性,评估返航通道容量。

2 节点合流元胞自动机模型

为研究节点处的运行特性,考虑航空器性能,基

于节点处纵向间隔以及横向安全间隔要求,将安全间隔量化到合流规则中,提出节点合流调控元胞自动机模型(cellular automata model based on merge point regulation, MRCA)。

2.1 节点合流调控元胞自动机模型(MRCA)理论

节点合流原则为进入最小风险通道入口的战机尽量不减速,保证快速返航。对安全返航通道节点处合流理论进行分析,建立 MRCA 模型节点合流理论,如图 3 所示。

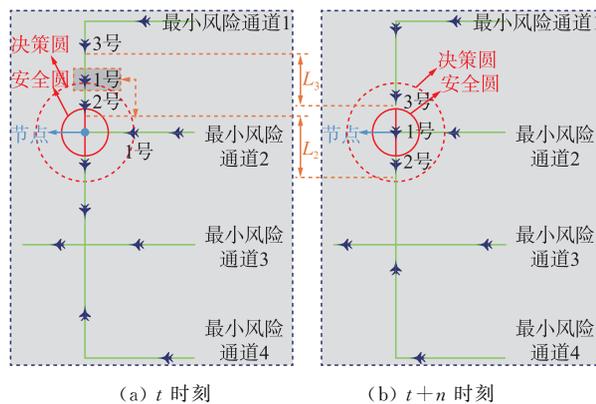


图 3 MRCA 模型节点合流理论

图中,战机 1 号从最小风险通道 2 加入节点,以 1 号到达决策圆边界作为开始速度调控的初始位置。当决策圆边界出现 1 号,在目标合流航路搜索 1 号到达合流点处,前后相邻两战机,如图 3(a)所示,即 2 号与 3 号,计算 1 号分别与前后战机间距,当间距小于纵向间隔要求时,进行速度调整,使得 1 号在 $t+n$ 时刻到达节点时,2 号飞出安全圆,3 号未到达安全圆,安全圆半径为 10 km,由此保证目标合流航道上前后机间距最小 10 km,满足前后机纵向间隔要求。同时 1 号机与 2 号机以及 1 号机与 3 号机斜距应满足两机横向间隔要求。

2.1.1 纵向间隔约束

2.1.1.1 纵向间隔要求

目前根据飞行间隔规定,雷达管制条件下纵向间隔要求为:进近管制范围内不得小于 6 km,区域管制范围内不得小于 10 km。进攻作战返航时距离着陆机场较远,因此,返航通道内运行应依据区域管制要求,取前后机为 10 km。

MRCA 模型中决策圆半径是理论的关键参数,即为 1 号是否能安全加入目标航路的初始判断位置,为方便分析,以节点为原点建立坐标系,最小风险通道 2 为 x 轴,目标合流通道为 y 轴。为保证前后机有足够的距离完成速度调整,顺利在节点处完成合流,取决策圆半径 $R=20$ km。1 号机坐标 $(R,0)$,2 号机

坐标 $(0, y_2)$, 3号机坐标 $(0, y_3)$, 则1号机能够在合流点安全汇入需满足的纵向间隔约束条件为:

$$t_1 = 20\ 000/v_1 \quad (1)$$

$$L_2 = t_1 v_2 > y_2 + 10\ 000 \quad (2)$$

$$L_3 = t_1 v_3 > y_3 - 10\ 000 \quad (3)$$

式中: v_1 为1号机速度; v_2 为2号机速度; v_3 为3号机速度; t_1 为1号机到达节点时间; L_2 为 t_1 时间内2号机的飞行距离; L_3 为 t_1 时间内3号机的飞行距离。

2.1.1.2 基于纵向间隔约束的速度调控分析

根据1号机到达决策圆时,在 y 轴上与2号机与3号机的相对位置,分为以下两种情况:

1) 战机1号距离战机2号较近。

由表2得到速度调控具体为:当两机间距为10 km时,1号、2号机均采用250 m/s的速度,可以在节点处完成合流;当两机间距6~10 km时,1号速度为250 m/s,2号加速为300 m/s,可以保证在1号到达节点时,2号飞出安全圆;当两机间距0~6 km时,1号减速为200 m/s,2号加速为300 m/s,可以保证在1号到达节点时,2号飞出安全圆。

表2 1号战机与2号战机间距分析表

1号坐标/km	1号速度/(m/s)	1号到达节点时间/s	2号坐标/km	2号速度/(m/s)	飞出安全圆距离/km	飞出安全圆时间/s
(20,0) 在 y 轴 搜索坐标 (0,20)	250	80	(0,10)	250	20	80
	250	80	(0,11)	300	21	70
	250	80	(0,12)	300	22	74
	250	80	(0,13)	300	23	77
	250	80	(0,14)	300	24	80
	200	100	(0,15)	300	25	84
	200	100	(0,16)	300	26	87
	200	100	(0,17)	300	27	90
	200	100	(0,18)	300	28	94
	200	100	(0,19)	300	29	97
200	100	(0,20)	300	30	100	

2) 战机1号距离战机3号较近。

由表3得到速度调控具体为:当两机间距为10 km时,1号、3号机均采用250 m/s的速度,可以在节点处完成合流;当两机间距7~10 km时,1号加速为300 m/s,3号速度为250 m/s,可以保证在1号到达节点时,3号到达安全圆边界;当两机间距4~7 km时,1号加速为300 m/s,3号减速为200 m/s,可以保证在1号到达节点时,3号到达安全圆边界。当两机间距 ≤ 4 km,如3号战机坐标为 $(0,23)$ 时,1号到达节点时间为67 s,而3号到达安全圆时间为65 s,也就是说,3号机在1号机到达节点前到达安全圆,当1号

机到达节点时,3号机与其间距小于10 km,因此在该情况下,无法通过调节两机速度,保证安全合流,故此情况下1号机从其他通道加入。由于3号减速将对其与后机间距产生影响,同时为后文时间窗计算取整考虑,这里取最小间隔为5 km。

表3 1号战机与3号战机间距分析表

1号坐标/km	1号速度/(m/s)	1号到达节点时间/s	3号坐标/km	3号速度/(m/s)	到达安全圆距离/km	到达安全圆时间/s
(20,0) 在 y 轴 搜索坐标 (0,20)	250	80	(0,30)	250	20	80
	300	67	(0,29)	250	19	76
	300	67	(0,28)	250	18	72
	300	67	(0,27)	250	17	68
	300	67	(0,26)	200	16	80
	300	67	(0,25)	200	15	75
	300	67	(0,24)	200	14	70
	300	67	(0,23)	200	13	65

2.1.1.3 基于纵向间隔约束的最小风险通道进入间距分析

1) 在1号机减速2号机加速的情况下,减速的1号机在到达节点时刻,3号机位置距离1号机间隔大于等于10 km,即:

$$20\ 000 + G - 6\ 000 - 20\ 000 \times \frac{250}{200} > 10\ 000 \quad (4)$$

$$\text{得到: } G > 21\ 000 \quad (5)$$

2) 在1号机加速3号机减速的情况下,减速的3号机与其后方间隔大于10 km,即:

$$20\ 000 + 4\ 000 + G - 250 \times \frac{20\ 000}{300} > 30\ 000 \quad (6)$$

$$\text{得到: } G > 23\ 000 \quad (7)$$

3) 在1号机加速的情况下,加速的1号机在到达节点时刻,2号机距离1号机间隔大于10 km,即:

$$20\ 000 - (G - 4\ 000) - 250 \times \frac{20\ 000}{300} < -10\ 000 \quad (8)$$

$$\text{得到: } G > 18\ 000 \quad (9)$$

综上所述,根据式(5)、式(7)与式(9),当从最小风险通道进入的两机间距 G 介于20~23 km时,与前后机间距尽量保持等间距进入通道,避免出现速度调控; G 大于23 km时,前后机间距在决策触发时刻,1号机与3号机间距应大于等于5 km。

2.1.2 横向间隔约束

2.1.2.1 横向间隔要求

根据飞行间隔规定,返航通道内战机依据区域管制要求,取横向间隔为10 km。如图4所示,即 $L \geq 10$ km。

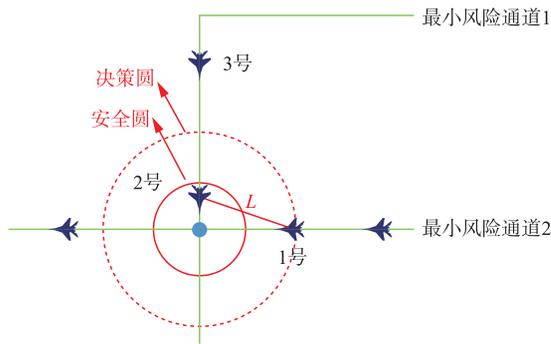


图 4 横向间隔要求

由于 1 号机与 3 号机根据纵向间隔要求,在 1 号机到达节点时,3 号机在安全圆之外,故两机横向间隔始终 ≥ 10 km。因此,仅需考虑 1 号机与 2 号机之间的横向间隔约束。1 号机能够在合流点安全汇入的横向间隔约束条件为:

$$L^2 = (20\,000 - v_1 t)^2 + (G - v_2 t)^2 > 10\,000^2, 0 < t < \frac{G}{v_2} \quad (10)$$

$$L^2 = \left[v_2 \left(t - \frac{G}{v_2} \right) \right]^2 + \left[20\,000 - v_1 \frac{G}{v_2} - v_1 \left(t - \frac{G}{v_2} \right) \right]^2 > 10\,000^2, \frac{G}{v_2} < t < \frac{20\,000}{v_1} \quad (11)$$

2.1.2.2 基于横向间隔约束的速度调控与进入间距分析

通过上文分析,横向间隔仅需考虑 1 号机与 2 号机。基于表 2 速度调控,进一步分析横向间隔对速度调控以及最小风险通道进入间距的要求。

由图 5 可以看出,当两机速度不发生调控时,两机间距 G 大于 15 km,可满足横向间隔要求,即 $L^2 > 10\,000^2$ 。

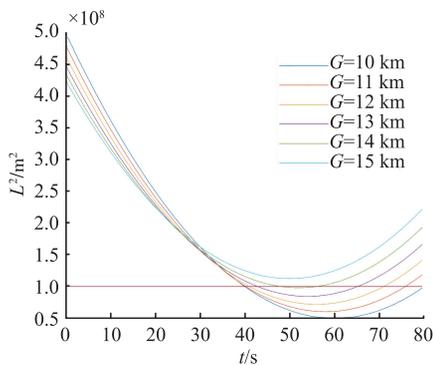


图 5 $10\text{ km} \leq G \leq 15\text{ km}$, 1 号机与 2 号机速度均为 250 km/h

由图 6 可以看出,当两机间距小于 10 km 时,尽管通过速度调控可以使两机在节点满足纵向间距 10 km 要求,但在 2 号机飞过节点后,与 1 号机横向间距不能满足横向 10 km 要求,在图 6 中即纵坐标满足 $L^2 > 10\,000^2$ 。

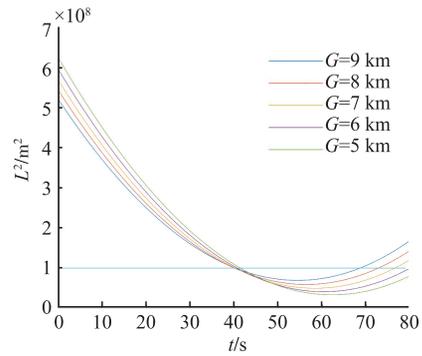


图 6 $G < 10\text{ km}$, 1 号机速度为 250 km/h, 2 号机速度为 300 km/h

2.1.3 节点合流调控元胞自动机模型(MRCA)速度与间隔要求

通过对纵向间距及横向间距综合分析,确定返航通道速度调控与间距要求如下:

- 1) 同一最小风险通道战机进入间距 ≥ 20 km;
- 2) 在决策圆处, 1 号机与 2 号机在目标合流通道上间距应大于等于 15 km, 与后机间距大于等于 5 km;
- 3) 发生速度调控情况有以下两种:
 - ① 1 号机与 3 号机间距 7~10 km, 1 号机加速;
 - ② 1 号机与 3 号机间距 5~7 km, 1 号机加速, 3 号机减速。

2.2 节点合流调控元胞自动机模型(MRCA)参数

对于合流节点模型参数具体如下:

- 1) 模型更新采用开放边界, 在模型入口生成航空器, 模型出口航空器加入下一航段, 离开本模型;
- 2) 元胞尺寸: 长 50 m;
- 3) 模型长度: 120 km;
- 4) 模型宽度: 3 cell;
- 5) 时间步长: 1 s;
- 6) 不同机型速度: 对不同机型巡航速度与最大速度统计分析, 为实现可仿真性, 规定返航战斗机与轰炸机速度如下: 在合流处, 为避免前后机因不同机型速度不同, 存在合流干扰, 导致流量减小, 综合考虑战斗机与轰炸机可达到的最大巡航速度, 规定战斗机与轰炸机巡航速度均为 250 m/s (900 km/h), 元胞速度为 5 cell/s, 加速速度达到 300 m/s (1 080 km/h), 元胞速度为 6 cell/s, 减速速度达到 200 m/s (720 km/h), 元胞速度为 4 cell/s。

- 7) 纵向间隔要求: 10 km
- 8) 横向间隔要求: 10 km

2.3 节点合流调控元胞自动机模型(MRCA)更新规则

基于理论分析, 建立 MRCA 在节点处的调控技

术,具体节点处更新规则如图7所示。

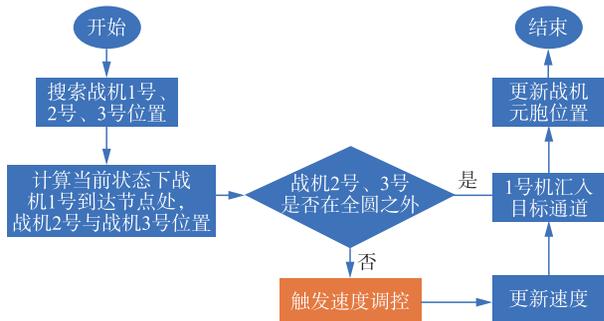


图7 MRCA模型更新流程图

图7中,当2号机、3号机在1号机到达节点处时,不能满足位于安全圆之外时,触发速度调控具体如图8所示。

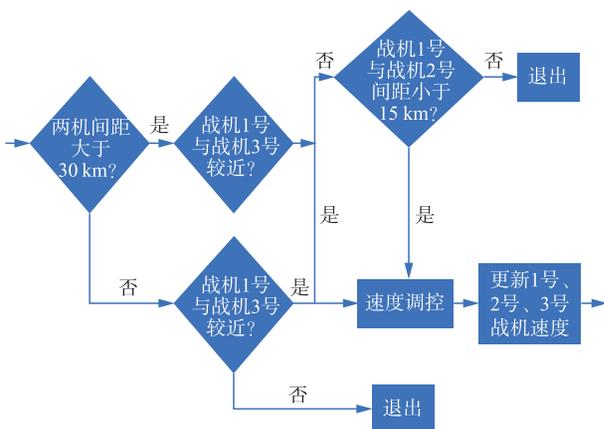


图8 速度调控流程图

图8中,基于上文对1号机到达决策圆时,在y轴上与2号机与3号机的两种相对位置,速度调控为:①1号机与3号机间距7~10 km,1号机加速;②1号机与3号机间距5~7 km,1号机加速,3号机减速。

2.4 最小风险通道进入时间窗

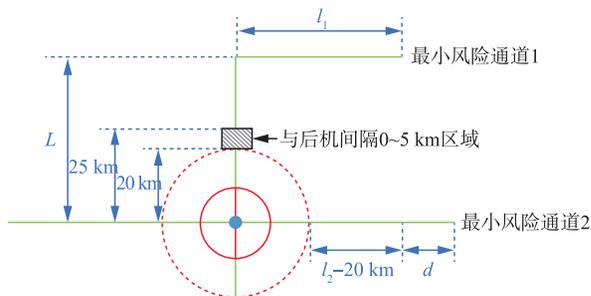


图9 时间窗模型

1) 最小风险通道1

记第一架战机从最小风险通道1进入时刻为 K ,随后战机进入最小风险通道1时间 T_1 为:

$$T_1 = \frac{K + Gi}{v}, \forall i = 0, 1, \dots, n \quad (12)$$

2) 最小风险通道2

① 最佳进入时间 T_2

$$T_2 = \frac{t_{a1} + Gi}{v}, \forall i = 0, 1, \dots, n \quad (13)$$

$$t_{a1} = K +$$

$$\frac{(L + l_1 - G/2 - l_1 \bmod G) \bmod G - d}{v} \quad (14)$$

② 允许进入时间窗 T_3

$$T_3 = \frac{t_{a2} + Gi}{v}, \forall i = 0, 1, \dots, n \quad (15)$$

$$t_{a2} =$$

$$\left[K - \frac{d}{v}; K + \frac{(L + l_1 - 5000 - l_1 \bmod G) \bmod G - d}{v} \right] \cup \left[K + \frac{(L + l_1 + 15000 - l_1 \bmod G) \bmod G - d}{v}; K + \frac{G - d}{v} \right] \quad (16)$$

③ 禁止进入时间窗 T_4

$$T_4 = \frac{t_f + G \times i}{v}, \forall i = 0, 1, \dots, n \quad (17)$$

$$t_f =$$

$$\left[\left(K + \frac{(L + l_1 - 5000 - l_1 \bmod G) \bmod G - d}{v} + 1 \right); \left(K + \frac{(L + l_1 + 15000 - l_1 \bmod G) \bmod G - d}{v} - 1 \right) \right] \quad (18)$$

式中: G 为进入最小风险通道前后机间距, v 为巡航速度, L 为向节点合流的两相邻最小风险通道之间,低空穿越通道长度; l_1 为最小风险通道长度; d 为最小风险通道2长度减去最小风险通道1的长度; t_{a1} 为战机最佳进入最小风险通道2的时间; t_{a2} 为战机允许进入最小风险通道2的时间范围; t_f 为战机禁止进入最小风险通道2的时间范围。

3 仿真结果与分析

节点容量与指挥员接受间隔以及各通道加入飞机时刻有关。根据2.4节中最小风险通道进入时间窗规定,在飞机允许进入时间窗范围内,利用MRCA模型对不同进入间隔进行仿真,同时要求当由最小风险通道加入的战机到达决策圆处时,间隔满足2.1.3节中模型规定,进而分析节点合流后通道的容量。

3.1 节点容量仿真分析

3.1.1 节点容量

由上文分析可知,目标合流通道战机的最小间距为:1号机与前机2号机在决策圆处最小间距为15 km,与后机3号机最小间距为5 km。在该情况下,通过MRCA模型调控,可使得1号机到达节点处时,与前机2号机纵向间隔为10 km,与后机3号

机纵向间隔为 10 km,即目标合流通道在合流点后间距最小为 10 km。同时,考虑战时高效返航,前后机间隔控制不应过大。本文设定指挥员接受间隔为 10~100 km,则从最小返航通道加入的战机前后间距应为 20~200 km,此时,两最小返航通道战机在合流点处汇合后,间距可达到 10~100 km。利用 MRCA 模型进行仿真,得到不同间隔下节点最大流量,如表 4 所示。

表 4 节点合流后航段最大流量

合流后通道 交通流密度/(架/km)	合流后通道 平均间距/km	合流后前通道 流量/(架/h)
0.010	100	9
0.015	67	16
0.020	50	18
0.025	40	23
0.030	33	26
0.034	29	33
0.040	25	36
0.043	23	41
0.050	20	45
0.056	18	49
0.059	17	52
0.067	15	56
0.071	14	64
0.077	13	74
0.083	12	82
0.091	11	94
0.100	10	102

由表 4 可以看出,随着间距的减小,节点的流量增大,但对最小风险通道加入战机在决策圆处的前后机间隔有要求,即需满足 2.1.3 模型规定间距要求。表 4 中的最大流量则为节点容量。

3.1.2 MRCA 模型下节点容量的不变性

节点流量除考虑间距,还需考虑战机加入返航

通道的时间,时间不同,战机到达节点的时刻情况不同,产生冲突情况就不同,调节情况随之发生变化。但只要进入最小风险通道的战机在决策圆处满足 2.1.3 节中模型规定,通过 MRCA 模型的速度调控,可使战机在节点处顺利合流,保证不降低节点的流量。

以前后机间隔 30 km 进入最小风险通道为例,说明通过 MRCA 模型的速度调控保证不降低节点流量。以 30 km 进入间距为例,是由于 30 km 进入间距在进入间距安排合理的情况下会出现 MRCA 模型的两种调控方案。当进入间距过小或过大时,MRCA 调控情况可能仅出现一种,无法通过对比说明 MRCA 模型的速度调控能够保证不降低节点流量。如当间距为 20 km 时,根据 2.1.3 节间距规定,MRCA 模型的速度调控,在图 8 中仅为情况 2;当间距过大时,进入间距安排合理情况下,则可能在图 8 中仅为情况 1,或者无需调控。故在此以 30 km 进入间距为例说明通过 MRCA 模型的速度调控保证不降低节点流量。

1)与后机间隔为 7~10 km(图 8 中情况 1)

基于 2.4 节最小风险通道进入时间窗规定,制定飞行计划如下:

最小风险通道 1:于 00:00:00 开始,以 120 s 间隔,于入口处加入;

最小风险通道 2:于 00:00:08 开始,以 120 s 间隔,于入口处加入;

在决策圆处,1 号机与前 2 号机间隔 22 km,与后 3 号机间隔 8 km。

通过仿真得到 1 小时内低空穿越通道流量为 56 架/h。时空图与速度图如图 10 所示。

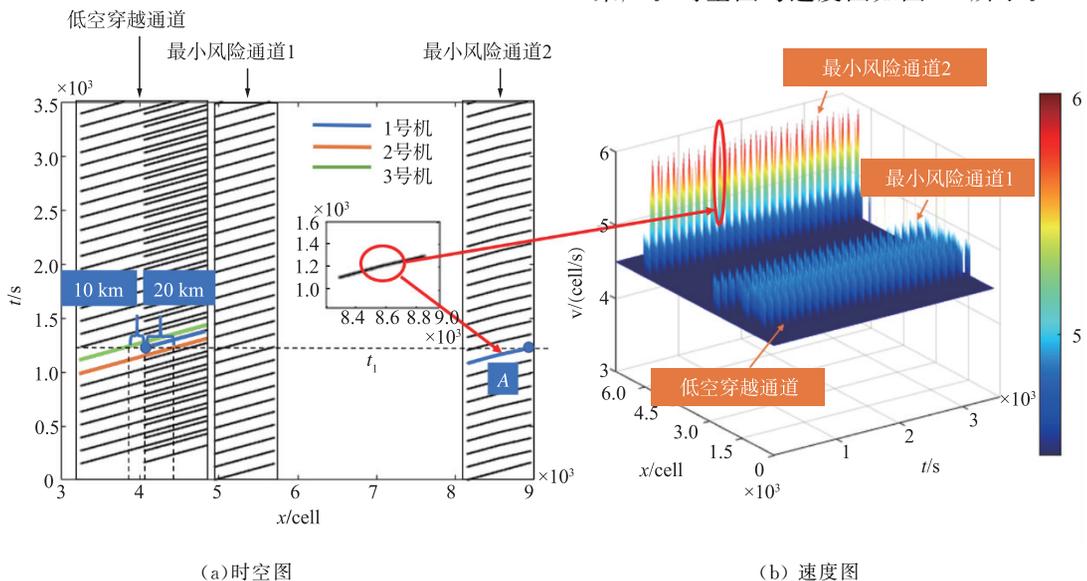


图 10 前后机间隔 7~10km,战机 1、2、3 在 t_1 时刻的位置与速度关系

由图 10(a)中可以看到,1号机的时空轨迹在 A 点处,斜率变小,即速度变大,同样由图 10(b)可以看出,1号机运行速度由 5 cell/s(250 m/s)加速为 6 cell/s(300 m/s),说明在该飞行计划中,1号机到达决策圆(坐标(20 000,0)),处时,对应于图 8 中情况 1 与后方 3号机间隔为 7~10 km 的情况。通过 MRCA 速度调控,在 t_1 时刻,1号机到达节点汇入低空穿越通道时,1号机与前方 2号机相距 20 km,与后方 3号机相距 10 km,满足纵向间隔要求。

2)与后机间隔为 5~7 km(图 8 中情况 2)

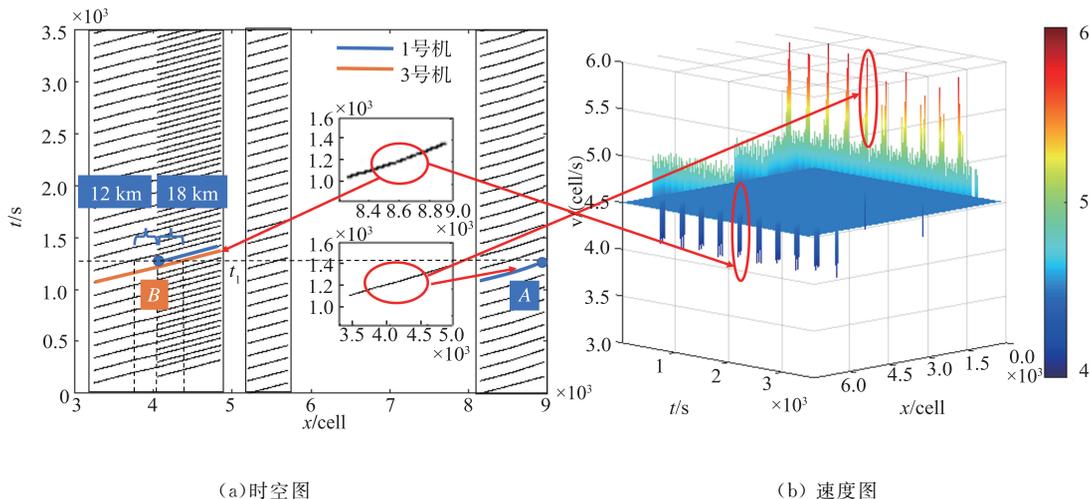


图 11 前后机间隔 5~7km,战机 1、2、3 在 t_1 时刻的位置与速度关系

由图 11(a)中可以看到,1号机的时空轨迹在 A 点处,斜率变小,即速度变大,同样由图 11(b)可以看出,1号机运行速度由 5 cell/s(250 m/s)加速为 6 cell/s(300 m/s);同一时刻,由 3号机在低空穿越通道的时空轨迹可以看出,3号机在 B 点处时空轨迹斜率变大,说明 3号机减速,具体可由图 11(b)看出,在 B 点处,运行速度由 5 cell/s(250 m/s)减速为最低速度 4 cell/s(200 m/s)。

说明在该飞行计划中,1号机到达决策圆(坐标(20 000,0))处时,对应于图 8 中情况 2 与后方 3号机间隔 5~7 km 的情况。在 t_1 时刻,1号机到达节点汇入低空穿越通道时,1号机与前方 2号机相距 18 km,与后方 3号机相距 12 km,满足纵向间隔要求。

综上,尽管低空穿越通道进入时刻不同,通过 MRCA 模型调控,使得在节点处以纵向间距满足最小 10 km 要求顺利合流,合流后低空穿越通道流量均为 56 架/h,说明了 MRCA 模型的速度调控保证不降低节点流量。

3.2 结果讨论

基于最小风险通道进入时间窗规定,制定飞行计划,通过 MRCA 模型对节点合流特性进行仿真分析。结果表明,在安全间隔范围内,节点合流后通道容量随间隔减小而增大,最大达到 102 架/h;节点合

基于 2.4 节最小风险通道进入时间窗规定,制定飞行计划如下:

最小风险通道 1:于 00:00:00 开始,以 120 s 间隔,于入口处加入;

最小风险通道 2:于 00:00:20 开始,以 120 s 间隔,于入口处加入;

在决策圆处,1号机与前 2号机间隔 24 km,与后 3号机间隔 6 km。

通过仿真得到 1h 内低空穿越通道流量为 56 架/h。时空图与速度图如图 10 所示。

流后空中通道的容量具体如表 4 所示。由于本文设定返航方式在空中通道处无交叉(图 2),当存在交叉时,根据合流后通道容量表 4 以及合流前各通道连接战场前沿战术计划,合理分配返航战机流量。

4 结语

本文针对战时特有的空中进攻作战安全返航通道设置构型,提出最小风险通道最佳进入时间、允许进入时间窗以及禁止进入时间窗。建立节点合流调控元胞自动机模型,并基于模型对不同可接受间隔条件下节点后通道容量进行评估,通过 MRCA 模型保证在可进入时间窗范围内实现流量最大。

研究得到的通道容量可用于确定不同通道开通条件下,最小返航通道返航战机数量;最小风险通道进入时间窗可用于返航计划制定的合理性评价。未来将在此基础上进一步展开战机编队返航时,空中进攻作战安全返航通道的容量评估。

参考文献

- [1] LI W, DIB M, ALVES D P, et al. Intelligent Computing Methods in Air Traffic Flow Management [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 18(5): 781-93.

- [2] CHEN J, CHEN L, SUN D. Air Traffic Flow Management under Uncertainty Using Chance-Constrained Optimization [J]. *Transportation Research Part B Methodological*, 2017, 102(4): 124-41.
- [3] RADANOVIC M, PIERA EROLES M A, KOCA T, et al. Surrounding Traffic Complexity Analysis for Efficient and Stable Conflict Resolution [J]. *Transportation Research*, 2018, 95(5): 105-24.
- [4] 杜怡曼, 贾宇涵, 吴建平, 等. 基于交通环境容量的区域交通动态调控模型 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(2): 36-41.
- [5] 王莉莉, 谢昊松. 考虑进出交通影响的扇区运行通行能力研究 [J]. *飞行力学*, 2022, 40(1): 84-89.
- [6] CHEN D, HU M, ZHANG H, et al. A Network Based Dynamic Air Traffic Flow Model for En Route Airspace System Traffic Flow Optimization [J]. *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review*, 2017, 106(5): 1-19.
- [7] 王莉莉, 王航臣. 多机场协同下航路网络通行能力优化 [J]. *飞行力学*, 2019, 37(1): 45-49.
- [8] 杨磊, 张洪海, 胡明华. 广义空中交通流建模综述 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(2): 432-444.
- [9] 王莉莉, 王航臣. 突发事件下大规模空中交通流量管理的组合优化模型 [J]. *航空学报*, 2019, 40(8): 228-240.
- [10] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A Cellular Automation Model for Freeway Traffic [J]. *Journal de Physique I: Tous Les Numéros*, 1992, 2(12): 2221-9.
- [11] BIHAM O, MIDDLETON A A, LEVINE D. Self Organization and a Dynamical Transition in Traffic Flow Models [J]. *Physical Review A*, 1992, 46(10): 6124-6127.
- [12] CREMER M, LUDWIG J. A Fast Simulation Model for Traffic Flow on the Basis of Boolean Operations [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1998, 28(4): 297-303.
- [13] BARHYDT R, EISCHEID T M, PALMER M T, et al. Regaining Lost Separation in a Piloted Simulation of Autonomous Aircraft Operations [C]//*Europe Air Traffic Management R and D Seminar*. USA: NTRS, 2002: 1-11.
- [14] BENAMOR S, DAC H T, BUI M, et al. Simulating Dynamic ATM Network Effects Using Cellular Automata [C]//*European Conference on Complex Systems*. Berlin: Springer, 2007: 149.
- [15] ENAYATOLLAHI F, ATASHGAH M, MALAEK M B, et al. PBN-Based Time-Optimal Terminal Air Traffic Control Using Cellular Automata [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(3): 1513-1523.
- [16] HAN Y X, HUANG X Q. Modeling of Air Traffic Flow [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(4): 2623-2631.
- [17] SEKINE K, TATSUKAWA T, ITOH E, et al. Multi-Objective Take off Time Optimization Using Cellular Automaton-Based Simulator [J]. *IEEE Access*, 2021 (9): 79461-79476.
- [18] KAWAGOE Y, CHINO R, TSUZUKI S, et al. Analyzing Stochastic Features in Airport Surface Traffic Flow Using Cellular Automaton: Tokyo International Airport [J]. *IEEE Access*, 2022 (10): 95344-95355.

(编辑:陈斐)

(上接第 62 页)

- [14] LEWIS T, NOTESTINE K. Recent Advances in Air Film Damping for Gas Turbine Applications [C]//*Proceedings of 8th National Turbine Engine High Cycle Fatigue (HCF) Conference*. Canada: Monterey, 2003: 14-16.
- [15] SRINIVASIN A V. Flutter and Resonant Vibration Characteristics of Engine Blades [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1997, 119(4): 742-775.
- [16] MATHISON R M, DUNN M G. Measurement of Air Film Damping Effectiveness [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2005, 127(3): 557-563.
- [17] CHOW L C, PINNINGTON R J. Practical Industrial Method of Increasing Structural Damping in Machinery, I: Squeeze-Film Damping with Air [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1987, 118(1): 123-139.
- [18] KOLOMOETS A, DOTSENKO V. Experimental Investigation of Dry Gas-Dynamic Seals Used for Gas-Compressor Unit [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 39(7): 379-386.
- [19] VAGIA M, TZES A. Design of a Robust Controller and Modeling Aspects of a Micro Cantilever Beam with Fringing and Squeezed Gas Film Damping Effects [J]. *Mechatronics*, 2013, 23(1): 67-79.
- [20] CHEN D J, DONG L H, FAN J W. Experimental Analysis of the Gas Film Damping Effect in an Aero-static Guideway under Microscale [J]. *Tribology Transactions*, 2017, 60(3): 399-407.
- [21] ZHANG H, CUI D Z, JIAO Y J, et al. Analysis on Vibration Characteristics of Air Film Damping with Open Boundaries [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 4(5): 1-10.
- [22] 徐芝纶. 弹性力学简明教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [23] 《中国航空材料手册》编委会. 中国航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [24] 潘锦珊, 单鹏, 刘火星, 等. 气体动力学基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.

(编辑:陈斐)