

基于速度概率分布的空投场空域容量理论模型研究

余付平¹, 孙樊荣², 沈堤¹, 张仁猛¹

(1. 空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051; 2. 南京航空航天大学民航学院, 南京, 210016)

摘要 空投作为重要的资源补给手段, 相对于传统陆水运输, 可以高效安全地实现物资保障, 其空域容量对空投计划的制定有着不可或缺的影响。目前对于空投场场景的空域容量理论研究较浅, 首先研究分析空投场运行特点, 结合空投场场景的运行、结构特征, 提出了空投场空域容量定义; 其次分析空投场运行中可能出现的航空器追赶情况, 建立了空投场空域容量计算模型; 最后, 以某空投场为例, 计算该结构下的空投场理论容量, 通过蒙特卡洛仿真验证理论模型的可靠性。同时探究了航空器运行速度及小于最小安全间隔概率变化下空投场空域容量的变化规律。

关键词 空投场空域容量; 速度概率分布; 最小间隔; 蒙特卡洛仿真

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.04.003

中图分类号 V355.1 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)04-0014-06

A Theoretical Model of Airdrop Airspace Capacity Based on Velocity Probability Distribution

YU Fuping¹, SUN Fanrong², SHEN Di¹, ZHANG Renmeng¹

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

2. Civil Aviation School, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract As resource replenishment, airdrop is an important means. Compared with traditional land and water transportation, the airdrop can guarantee security efficiently for the material, and its capacity has an indispensable impact on the formulation of airdrop plans. At present, the capacity theory understanding of airdrop site scene is fairly superficial. Firstly, the operation characteristics of the airdrop site are studied and analyzed, and the definition of the capacity of the airdrop site is proposed in combination with the operation and structural characteristics of the airdrop site scene. Secondly, the possibility of aircraft chasing situation in the operation on airdrop ground is analyzed, and a capacity calculation model of the airdrop ground is established. Finally, taking a certain airdrop site as an example, the theoretical capacity of the airdrop site under this structure is calculated, and the reliability of the theoretical model is verified by Monte Carlo simulation. At the same time, the variation law of airdrop field capacity under condition of the probability change of aircraft at running speed and less than the minimum safety interval is explored. The research content of the paper can supply formulation of airdrop plan with scientific and reliable theory.

Key words airdrop airspace capacity; velocity probability distribution; minimum interval; Monte Carlo simulation

收稿日期: 2022-12-09

作者简介: 余付平(1983-), 女, 河南商丘人, 副教授, 博士, 研究方向为空域规划与管理。E-mail: junjingj@163.com

引用格式: 余付平, 孙樊荣, 沈堤, 等. 基于速度概率分布的空投场空域容量理论模型研究[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(4): 14-19. YU Fuping, SUN Fanrong, SHEN Di, et al. A Theoretical Model of Airdrop Airspace Capacity Based on Velocity Probability Distribution[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(4): 14-19.

在需要大量且快速的物资补给需求场景中,传统的陆地和水上运输方式容易受到环境因素的影响,局限性较大,较难在复杂环境高效安全地完成运输任务。空投作为依赖空域进行物资运输的方式,可以高效投送人力、设备、物资,同时保障后续物资运输传递,是资源补给的重要保障以及提升现代空中运输能力的重要手段。因此,在空域复杂度不断提高的情况下,如何科学合理地评估空投场空域容量,为制定空投计划提供理论依据,实现空投资源的高效顺畅运输,是目前空域管理中亟待解决的重要问题。

一方面,目前国内外对空投相关理论有了较深的研究。在空投翼伞模型方面,文献[1]考虑地球旋转对空投运动的影响,建立空投翼伞六自由度模型。文献[2]在六自由度模型基础上,分析了空投物伞系统的纵向、侧向运动,对六自由度模型进行了改进。文献[3]根据不同空投航空器运动状态参数不同,提出了适用于不同空投航空器的六自由度模型。文献[4]建立了带伞空投系统的六自由度模型。在空投参数辨识算法方面,文献[5]基于六自由度模型,采用遗传算法进行空投翼伞参数识别。文献[6]通过改进的遗传算法实现空投翼伞的参数识别。文献[7]采用基于CDF的概率论方法构建了空投发现概率模型。文献[8]基于六自由度运动模型对空投伞系统进行仿真研究,文献[9]采用蒙特卡洛仿真,研究空投高速、速度、投放位置等对空投投放的影响。文献[10]基于蒙特卡洛仿真对基于时间控制的降落伞开伞控制系统进行研究。

另一方面,国内外对民航空域容量评估有较多研究成果。空域容量是针对某个空域单元而言的,是指某个特定的空域单元,在单位时间内对航空器的最大服务架次。总体看,当前空域容量问题大致可以划分为空域结构限制下的空域容量评估和管制员工作负荷限制下的容量评估。在空域结构限制下的空域容量评估方面,主要采用基于飞行的空间间隔建模分析的方法进行研究^[11-13]。在管制员工作负荷限制下的容量评估方面,主要是通过不同的分类和统计方法,建立工作负荷与航空器架次的关系,基于设定的交通流量分布参数计算管制员平均工作负荷,最终获得空域容量评估结果^[14-16]。

综上所述,关于民航领域容量评估的研究较为完善,关于空投的研究大多是通过模型仿真等方法

研究空投下降阶段的稳定性和精确度以及空投最佳起始投放点,但从运输机角度出发研究空投场容量的相关研究甚少,还存在较大研究创新空间。因此本文以民用航空领域的容量理论为基础,结合空投场的实际运行场景,建立空投场的空域容量评估模型并计算,采用蒙特卡洛仿真对模型进行仿真验证。

1 空投场空域容量分析

1.1 空投场特点分析

空投场相对于传统的陆运或水运,空投能够以更快的速度将物资投送到目标区域,节省了时间和成本,具有高效性。空投可以在任何地点和任何时候进行,不受地形、路线、季节和天气等限制,能够适应不同的任务需求和应急情况,具有灵活性。此外,空投场运行方式具有较多不确定性特点,主要体现在5个方面:①空投执行周期具有不确定性和阶段性;②空投是不同航空器在固定空域持续执行任务,不存在航空器持续接替的情况;③空投场系统涉及航管、领航,需要空战指挥引导的支撑;④空投需在不同时期使用不同种类机型;⑤空投类型包括兵力、设备和物资等,不同空投类型所需的空投间隔不同。

可以看出,空投的不确定因素较多,因此,为了科学准确评估空投场的容量,本文结合空投场空域对于不同的空投任务运行受到的制约因素不同,对空投场空域容量进行分析评估。

1.2 空投场空域容量的概念意义分析

空投运输可近似看成是在一个特定的空投区域,航空器高空运输通道依次排队以目标点和目标高度进入空投区域,在规定时间内完成空投计划后退出空投区域,如图1所示。

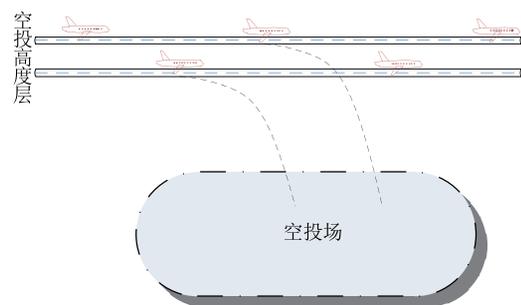


图1 空投场场景示意图

空投场空域容量的意义在于空投通道满足部队作战的需要。空投的限制因素包括:通道的飞行间隔、高度层数量、空投空域的间隔、高度层数量、不同的机型之间的最低间隔要求等,其中飞行通道的间

隔和空投空域的空投间隔不一致会导致2个不同的空域单元(通道和空投空域)的耦合过程中产生飞行冲突或者空域瓶颈,例如:飞行通道的额定流量为2 min间隔,而空投空域的间隔为5 min间隔,间隔要求不一致会导致通道容量和空投空域容量之间的不一致,高度层数量也可能不一样。因此,空投场空域容量概念研究的意义在于找出空投作战样式中运行瓶颈,指导制定空投作战计划。在容量模型上其主要受3个因素影响:①航空器飞行间隔。需要考虑的因素包括不同类型的航空器速度、高度能力和前后机间隔等。②空投类型。空投类型可包括兵力、设备和物资等,对于不同类型的空投目标所需要的空投高度,空投间隔,地面疏散能力等均不同。③空投场限制。包括空投区域大小(主要是空投区域进入点和退出点之间的距离),高度和速度限制等。

空投场主要是编队飞行的航空器,通过划定的飞行通道,以一定的队形飞往空投场,并以规定的动作完成空投任务。因此,运输机完成整个空投任务需综合考虑现有资源、运输飞行通道、空域环境和指挥引导等因素,进而制定空中运输投送计划,根据空中运输投送计划所确定参与空中运输的航空器的机型、架次、飞行通道数量、速度等。结合空域容量定义可知,空投场空域容量具体可表述为在特定的时间段内,特定的空投场可以完成空投的最大航空器架次/批次。

2 空投场空域容量评估模型

空投场空域容量受到空投场环境因素、航空器特性、空投任务性质等影响。因此本文以上述影响因素为约束条件,建立空投场的容量模型。

2.1 模型假设

在实际执行空投任务中,考虑空投场区域相对飞行通道较小及空投下降过程对空投场的容量影响较小,为了简洁模型,作如下假设:

- 1)航空器空投场内匀速飞行;
- 2)航空器进入空投场后不进行高度调整;
- 3)空投下降过程中互不影响且与航空器之间无影响;
- 4)单一空投高度层进入空投场,为了保持安全间隔,要求不同机型运输机在空投区域内,前后机的间隔均要满足规定;
- 5)不同的作战周期对应的机型选择不同。

2.2 模型构建

空投是不同航空器在固定空域持续执行任务,需要考虑航空器对最小的飞行间隔及空投场占用时间对空投场空域容量的影响。空投场空域容量是在一定条件下的最大值,因此航空器间的时间间隔应取最小飞行间隔和空投场占用时间中的最大值,即:

$$T_{ij} = \max(T_{ij}^{CO}, T_{ij}^i) \quad (1)$$

式中: i, j 分别为需要进入某空投场的不同机型运输机; T_{ij} 为航空器对的间隔时间; T_{ij}^i 表示连续相继到达航空器的时间间隔,不违反最小间隔规定; T_{ij}^{CO} 表示连续到达航空器的空投场占用时间。

考虑到不同类型航空器对间隔以及航空器占用空投场时间的随机属性,假设均服从正态分布。为了确保不以高于 p_v 的概率违反最小间隔的规定,一般需要在间隔规定之外加入额外的缓冲时间。假设航空器的空投场占用时间和航空器对在空投场入口的实际间隔时间相互独立,则:

$$T_i^O \sim N(\overline{T_i^O}, \sigma_R^2), T_{ij}(AA) \sim N(T_{ij}^{CO}, \sigma_0^2) \quad (2)$$

$$(T_{ij}(AA) - T_i^O) \sim N(T_{ij}^{CO} - \overline{T_i^O}, \sigma_0^2 + \sigma_R^2) \quad (3)$$

式中: T_i^O 表示航空器 i 的空投场占用时间; $\overline{T_i^O}$ 为 T_i^O 的期望; σ_R 为 T_i^O 的标准差; $T_{ij}(AA)$ 为相继到达航空器的实际时间间隔; σ_0 为 T_{ij} 的标准差。令:

$$Z = \frac{(T_{ij}(AB) - T_i^O) - (T_{ij}^{CO} - \overline{T_i^O})}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_R^2}} \quad (4)$$

则 $Z \sim N(0, 1)$ 为标准正态分布。

相继到达航空器对 i, j 在空投场入口处的实际间隔时间小于前机 i 的空投场占用时间的概率为 p_v ,则有:

$$p_v = P\left(\frac{(T_{ij} - T_i^O) - (T_{ij}^{CO} - \overline{T_i^O})}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_R^2}} < -\frac{(T_{ij}^{CO} - \overline{T_i^O})}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_R^2}}\right) \quad (5)$$

$$q_v = 1 - p_v = P\left(Z < \frac{(T_{ij}^{CO} - \overline{T_i^O})}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_R^2}}\right) \quad (6)$$

$$T_{ij}^{CO} = \overline{T_i^O} + \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_R^2} \Phi^{-1}(q_v) \quad (7)$$

对于连续相继到达航空器的时间间隔 IT_{ij} ,考虑航空器对 i, j 渐进渐远2种情况。

1) $V_i \leq V_j$ 时,两机出现渐近态势,前机 i 到达跑道入口时后机 j 的间距不能小于最小间隔。因此连续进近航空器的间隔违反间隔规定概率可以表示为:

$$p_v = P\left(\frac{\delta_{ij}}{V_j} + B_{ij} + e_0 < \frac{\delta_{ij}}{V_j}\right) = P(B_{ij} < -e_0) \quad (8)$$

$$B_{ij} = \sigma_0 \Phi^{-1}(q_v) \quad (9)$$

则:

$$IT_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{V_j} + \sigma_0 \Phi^{-1}(q_v) \quad (10)$$

式中: δ_{ij} 表示 2 架航空器允许的最小允许间隔; V_i 表示前机的飞行速度; V_j 表示后机的飞行速度; B_{ij} 为缓冲时间; e_0 为航空器对 i, j 相继到达间隔时间的随机项, 且 $e_0 \sim N(0, \sigma_0^2)$ 。

2) 当 $V_i > V_j$ 时, 两机出现渐远态势, 由于当进入空投场时必须满足最小间隔规定, 则前机 i 到达进近航段入口内侧距离为 δ_{ij} 时后机 j 必须在入口以外, 相应的概率为:

$$p_v = P\left(\frac{\delta_{ij}}{V_j} + \left(\frac{\gamma}{V_j} - \frac{\gamma}{V_i}\right) + B_{ij} + e_0 < \frac{\delta_{ij}}{V_j} + \left(\frac{\gamma}{V_j} - \frac{\gamma}{V_i}\right)\right) \quad (11)$$

$$B_{ij} = \sigma_0 \Phi^{-1}(q_v) - \delta_{ij} \left(\frac{1}{V_j} - \frac{1}{V_i}\right) \quad (12)$$

则

$$IT_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{V_j} + \gamma \left(\frac{1}{V_j} - \frac{1}{V_i}\right) + \sigma_0 \Phi^{-1}(q_v) - \delta_{ij} \left(\frac{1}{V_j} - \frac{1}{V_i}\right) \quad (13)$$

式中: γ 表示在空投场航空器对公共运行长度。

综合渐近和渐远 2 种态势, 相继到达航空器的时间间隔为:

$$IT_{ij} = \begin{cases} \frac{\delta_{ij}}{V_j} + \sigma_0 \Phi^{-1}(q_v), & V_i \leq V_j \\ \frac{\delta_{ij}}{V_j} + \gamma \left(\frac{1}{V_j} - \frac{1}{V_i}\right) + \sigma_0 \Phi^{-1}(q_v) - \delta_{ij} \left(\frac{1}{V_j} - \frac{1}{V_i}\right), & V_i > V_j \end{cases} \quad (14)$$

因此, 该空投场空域容量 C 为:

$$C = \frac{T_m}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} T_{ij}} \quad (15)$$

式中: T_m 为某个时间段, 一般取一个小时; T_{ij} 为航空器对的间隔时间; P_{ij} 表示前机为 i 后机为 j 进入空投场的概率。

3 理论容量模型与仿真实证

3.1 参数设置

以某空投区域为例, 设定该空投场为半径 5 km 的圆形区域, 可满足运行时间约束情况下, 同时使用 2 个高度层完成空投任务。空投场的飞行高度设定为 1 km, 可执行空投任务的机型有 2 种, 占比分别为 80% 和 20%, 其中分为载物、载人和物、载人 3 种

空投类型。各类机型在不同运载方式下对应的速度如表 1 所示, 由于空投任务的多样性, 会将 2 种机型 3 种运载方式组合完成各类空投任务。

表 1 部分进入空投场航空器速度 单位: km/h

机型	运载方式		
	载物	载人和物	载人
1	280	240	210
2	310	260	230

为了保证模型结果的真实性和准确性, 将机型与运载方式组合, 模拟实际空投任务需满足的各类需求, 组合方式如表 2 所示。

表 2 机型与运载方式的不同组合

组合编号	运载方式	
	机型 1	机型 2
1	载物	载物
2	载物	载人和物
3	载物	载人
4	载人和物	载物
5	载人和物	载人和物
6	载人和物	载人
7	载人	载物
8	载人	载人和物
9	载人	载人

基于模型的高度层间隔约束, 设定同高度空投航空器之间的水平安全间隔为 10 km。由于航空器在执行空投任务过程中速度并非一直保持不变, 基于高斯分布的逆累积分布函数(ICDF)随机生成作战速度, 通过累积速度分布概率可以较为准确地进行模型迭代计算。其函数表达式为:

$$\text{ICDF} = F^{-1}(p | \mu, \sigma) = \{x : F(x | \mu, \sigma) = p\} \quad (16)$$

$$p = F(x | \mu, \sigma) = \{x : F(x | \mu, \sigma) = p\} \quad (17)$$

$$p = F(x | \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (18)$$

选取速度标准差为 5, 即 $\sigma = 5$, 机型 1 与机型 2 的航空器速度 ICDF 分布图相似, 区别为速度分布的区间范围。选取机型 1 的航空器速度的 ICDF 分布图为例, 如图 2 所示, 横轴为机型 1 的航空器速度分布范围, 纵轴为航空器以该速度进入空投场的概率。基于 2 种机型比例和速度方差, 通过 ICDF 生成两种机型刚要进入空投场时刻速度, 部分数据如表 3 所示。

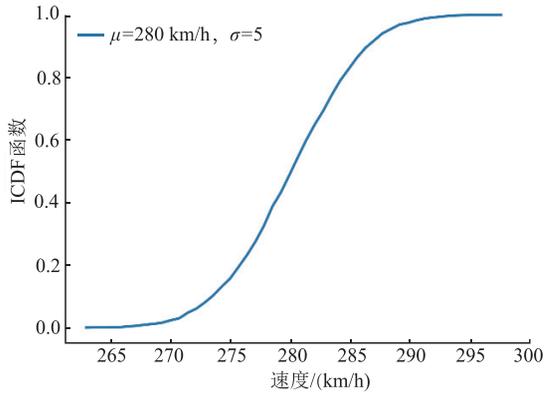


图2 ICDF 函数分布示意图

表3 部分进入空投场航空器速度 单位:km/h

航空器编号	机型 1	机型 2
1	276.72	312.73
2	281.04	301.51
3	274.95	313.74
4	286.34	306.59

根据建立的空投场空域容量模型,基于上述空投场运行参数进行空投场空域容量计算,设定 $\sigma_0 = 10 \text{ s}$, $p_v = 0.01$ 。因此空投场内 有 1% 的概率出现前后机间隔小于最小间隔的情况,此时后机达到了速度分布范围内的最大速度。对于组合 1,前机速度均值为 280 km/h,查正态分布概率表得到后机可达的最大速度为 303.3 km/h,此时计算得到空投场空域容量为 85.78 架次。

$$C_{\text{组合}1} = \frac{T_m}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} T_{ij}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 P_{ij} B_{ij}} = 85.78 \text{ 架次} \quad (19)$$

3.2 蒙特卡洛仿真分析

蒙特卡洛仿真主要思想是利用事件发生的频率作为事件发生的概率的近似值,基于事件构造随机概率的过程,从已知的概率分布中进行随机抽样,通过多次抽样求解估计量。空投需求发生具有不确定性,空投场位置具有随机性,同时进入空投场的运输机类型也具有随机性,利用蒙特卡洛仿真能够直接解决具有统计性质的问题。对于连续性问题能够直接处理而不需要进行离散化,其采样次数越多,就越接近最优解。因此,本文以进入空投场的运输机执行空投任务为随机事件,选用蒙特卡洛仿真验证建立的空投场空域容量评估模型的有效性,得到某空投场的最大容量,其算法流程如图 3 所示。

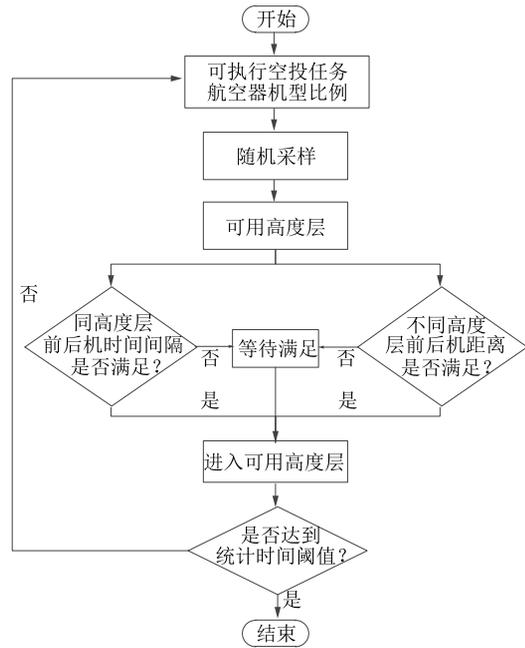


图3 蒙特卡洛仿真流程图

结合空投场空域容量模型,蒙特卡洛仿真通过随机采样选取航空器进入可用高度层,当满足相应的约束条件时即表示该航空器可以进入空投场执行空投任务,当上述约束中的任一或者均不满足时则航空器需进行等待至满足所有约束条件后才被允许进入空投场执行空投任务。根据目标函数 C ,在特定的 T_m 时间内通过反复采样执行相同步骤来统计单位时间内空投场最大架次数,即该空投场的容量值。

根据模型计算中设置的空投场运行参数,基于蒙特卡洛仿真对模型进行仿真分析。图 4 为在 $p_v = 1\%$ 的情况下对组合 1 进行的仿真结果,可以看出每一次的仿真结果均在一个较小的区间范围内波动,红色横线为 1 000 次蒙特卡洛仿真结果的均值,其均值与模型计算出的该组合下空投场理论最大容量相近,说明建立的模型可以较为准确真实地衡量空投场空域容量值。对所有组合进行蒙特卡洛仿真,其结果如表 4 所示。1 000 次中有 8 次出现两机时间间隔小于最小安全间隔,满足 $p_v = 1\%$ 要求。

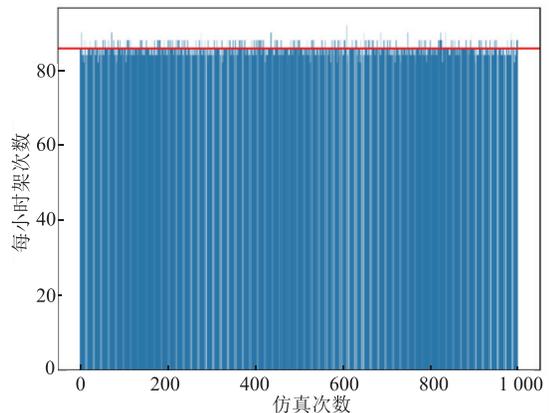


图4 蒙特卡洛仿真结果

表4 不同组合下的空投场空域容量

组合 编号	\bar{v}_1 (km/h)	\bar{v}_2 (km/h)	$ \bar{v}_1 - \bar{v}_2 $ (km/h)	$\bar{v}_1 + \bar{v}_2$ (km/h)	$C_{仿真}$ / 架次/h	$C_{计算}$ / 架次/h
1	280	310	30	590	85.67	85.78
2	280	260	20	540	80.52	80.65
3	280	230	50	510	73.29	73.36
4	240	310	70	550	75.76	75.80
5	240	260	20	500	76.31	76.45
6	240	230	10	470	74.46	74.49
7	210	310	100	520	69.27	69.31
8	210	260	50	470	70.82	70.86
9	210	230	20	440	68.93	68.96

3.3 结果讨论

从表4数据可以发现,机型速度和与差会对空投场空域容量值产生影响,总结出如下规律:

1)当速度和相似时,速度差越小,空投场空域容量越大,速度差越大,空投场空域容量越小,如组合6、组合8;

2)当速度差相似时,速度和越大,空投场空域容量越大,速度和越小,空投场空域容量越小,如组合2、组合5和组合9。

同时,为了满足约束条件,部分航空器需要等待后才能进入空投场,具体取决于航空器的速度和速度差。

根据建立的空投场空域容量模型, p_v 的取值会对空投场空域容量产生影响,因此对组合1在不同 p_v 取值下对应的空投场空域容量进行分析,如表5所示。

表5 组合1在不同概率下的空投场空域容量

概率 p_v / %	空域容量 / (架次/h)
1	85.78
1.5	89.21
2	89.68

由表5可以看出,当设定的 p_v 越大时,空投场空域容量越大,但随着 p_v 的增大,空投场空域容量增加到一定程度后不会继续增长。同时,当 p_v 持续增长时,航空器会因小于间隔而做出机动飞行或退出空投任务,实际通过空投场的航空器数量会小于计算容量。因此, p_v 的增长可能造成实际通过空投场的架次小于理论容量,对实际意义不大。

4 结论

为了给空投场空域容量评估提供科学可靠的理论支撑,本文首先结合民用航空交通领域的交通容量定义,提出了空投场交通容量概念,紧接着分析了

空投场的实际运行场景,建立了空投场空域容量模型,最后以某空投场为例,采用蒙特卡洛仿真验证模型有效性,主要内容如下:

1)本文基于民用航空交通容量概念,并结合空投场的实际情况,空投场空域容量可以用空投场中各种输送样式和空域结构下的容量叠加结果进行表征,其具体表述为在特定的时间段内,特定的空投场可以完成空投的最大航空器架次/批次。

2)本文针对空投场场景,分析了对其容量产生影响的因素条件,剖析了空投场的运行过程并定义了空投场空域容量,为建立空投场空域容量模型打下了坚实基础。

3)本文建立了空投场空域容量评估模型,结合某空投场采用蒙特卡洛仿真,总结了航空器对的运行速度及小于最小间隔的概率对空投场空域容量值的影响,为空投场空域容量评估提供了科学可靠的理论支撑,同时为空中管理决策者提供了可靠的参考依据。

本文虽然建立了空投场空域容量模型,但是对于空投下降过程中对运输机的影响并未考虑。忽略了空投下降运动过程所产生的气流等对运输机的影响,在未来的工作中,可以考虑将空投下降带来的影响因素纳入对容量分析的范围中。

参考文献

- [1] MOOIJ E, WIJNANDS Q G. 9 Dof Parafoil/Payload Simulator Development and Validation[C]// AIAA Simulation and Modelling Technologies Conference, USA:Texas,2003:5459.
- [2] OCHI Y, WATANABE M. Modelling and Simulation of the Dynamics of a Powered Paraglider[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G-Journal of Aerospace Engineering, 2011, 225(4):373-386.
- [3] SANDARUWAN G, GKA D, DAMITHA S, et al. A Real-time 6dof Computational Model to Simulate Ram-Air Parachute Dynamics[J]. Information Technology and Computer Science, 2017(3):19-27.
- [4] 温志文, 杨智栋, 王力竞. 空投鱼雷系统建模与空中弹道仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39(5):63-66.
- [5] 王海涛. 大型降落伞抽打现象及运动稳定性研究[D]. 长沙:国防科技大学,2011.
- [6] 王雅平, 齐晓慧, 张昊, 等. 基于改进遗传算法的动力伞气动参数辨识研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(6):31-34.

(下转第101页)

(上接第 19 页)

- [7] 郑强, 杨日杰, 陈佳琪, 等. 空投鱼雷发现概率的解析模型研究[J]. 电光与控制, 2017, 24(3): 16-19.
- [8] 郭聚, 韩建立, 李新成, 等. 基于六自由度的空投鱼雷雷伞系统建模仿真研究[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(3): 124-128.
- [9] 郭聚, 韩建立, 李新成, 等. 基于蒙特卡洛法的空投鱼雷搜捕概率分析[J]. 兵工自动化, 2022, 41(6): 58-62.
- [10] 黎光宇, 刘海焯, 乔茂永, 等. 降落伞空投试验多模式开伞控制系统设计与实现[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(4): 46-56.
- [11] 蒋兵, 胡明华, 田勇, 等. 终端区空中交通容量评估的仿真方法[J]. 交通运输工程学报, 2003(1): 97-100.
- [12] SCALA P, MOTA M M, WU C L, et al. An Optimization-Simulation Closed-Loop Feedback Framework for Modeling the Airport Capacity Management Problem Under Uncertainty[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2021(3): 102937.
- [13] DESART B, GILLINGWATER D, JANIC M. Capacity Dynamics and the Formulation of the Airport Capacity/Stability Paradox: A European Perspective [J]. Journal of Air Transport Management, 2010, 16(2): 81-85.
- [14] MAJUMDAR A, POLAK J. Estimating Capacity of Europe's Airspace Using a Simulation Model of Air Traffic Controller Workload [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001(1): 30-43.
- [15] 陈亚青, 孙宏. 进近管制员工作进程分类及工作负荷研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(2): 65-68.
- [16] 孙樊荣. 空域容量流量协同管理关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

(编辑: 陈斐)