

文章编号:1674-8190(2019)02-802-08

空战场穿越走廊基本网络规划的混合禁忌搜索算法

刘影¹, 周一叶², 甘旭升³, 杨捷³

(1. 西京学院 信息工程学院, 西安 710123)

(2. 中国人民解放军 95746 部队, 成都 611531)

(3. 空军工程大学 空管领航学院, 西安 710051)

摘要: 不考虑限制空域的穿越走廊基本网络规划的 SUMApHMP 模型在求解时存在一定的难度, 提出一种基于 Floyd 最短路径算法的混合禁忌搜索算法, 用于有效管制战区空域, 确保航空军事运输活动安全、高效、有序进行。根据 SUMApHMP 求解结果, 设计不考虑限制空域的穿越走廊基本网络; 利用空战场中 10 个机场之间的流量矩阵和距离矩阵对混合禁忌搜索算法进行测试, 并将 Lingo 9.0 软件求解模型的优化结果与本文算法求得的结果进行比较。结果表明: 提出的混合禁忌搜索算法求解时间短, 求解结果正确。

关键词: 空战场; 穿越走廊; 混合禁忌搜索算法; Floyd 最短路径算法; 基本网络

中图分类号: V351

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.06.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Hybrid Taboo Search Algorithm of Basic Network Planning for Transit Corridor in Air Battlefield

Liu Ying¹, Zhou Yiye², Gan Xusheng³, Yang Jie³

(1. College of Information Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, China)

(2. Troop No. 95746 of PLA, Chengdu 611531, China)

(3. College of Air Traffic Control and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: The solution of SUMApHMP model has a certain difficulty while not considering the transit corridor (TC) basic network in air battlefield, so a hybrid taboo search algorithm based on Floyd shortest path algorithm is proposed to control the airspace in battlefield effectively, and ensure the safe, efficient and orderly process of military transportation. According to the solution result of SUMApHMP model, the TC basic network without considering the restricted airspace is designed. The flow matrix and distance matrix between 10 airports in the air battlefield are used to test the hybrid taboo search algorithm, and the result obtained by the proposed algorithm is compared with the results optimized by Lingo 9.0 software. The results show that the proposed hybrid taboo search algorithm has short solution time and correct solution results.

Key words: air battlefield; transit corridor; hybrid taboo search algorithm; Floyd shortest path algorithm; basic network

收稿日期:2018-12-21; 修回日期:2019-01-05

通信作者:甘旭升, gxsh15934896556@qq.com

引用格式:刘影, 周一叶, 甘旭升, 等. 空战场穿越走廊基本网络规划的混合禁忌搜索算法[J]. 航空工程进展, 2019, 10(6): 802-809, 825.

Liu Ying, Zhou Yiye, Gan Xusheng, et al. Hybrid taboo search algorithm of basic network planning for transit corridor in air battlefield[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(6): 802-809, 825. (in Chinese)

0 引言

基于枢纽轴辐式网络的穿越走廊基本网络规划,是指将穿越走廊按一定方式连接而形成的枢纽轴辐式网络结构系统,是空战场航空军事运输活动进行与发展的基础。穿越走廊质量或穿越走廊网络结构的质量是航空军事运输支援保障能力的主要指标之一,因此对穿越走廊网络进行科学、合理地布局规划是保障战场空运顺利进行的重要手段。

1996年, J. F. Campbell^[1] 针对枢纽轴辐式网络中的单分配多枢纽中位问题首先提出了线性整数规划模型;1998年, P. J. Lederer 等^[2] 根据起讫点间飞行流量矩阵和距离矩阵对航线网络中的全连通网络(即点对点式网络)、环形网络、枢纽轴辐式网络和子环形网络四种类型进行了定量分析,提出了航向网络设计中需要注意的一些主要参考因素;2000年, E. Pels 等^[3] 将点对点式航向网络与枢纽轴辐式航线网络进行了成本比较分析,指出枢纽轴辐式航线网络在降低成本方面的有效性;同年, 耿淑香^[4] 对点对点式航线网络和枢纽轴辐式航线网络进行了详细分析,指出枢纽轴辐式网络能够更好地利用空域资源以及进行新航线的开辟,具有良好的鲁棒性;2006年, 柏明国^[5] 提出了基于多属性决策法的枢纽集候选方法,对枢纽轴辐式航线网络中的枢纽机场进行选择;2007年, T. Kelly 等^[6] 针对枢纽轴辐式航线网络模型特点,将遗传算法应用于模型求解;2010年, 杨哈熠^[7] 以航空货运成本最小化为目标,建立了基于枢纽轴辐式航线网络的中国民航运输网络设计模型;2011年, 杨年等^[8] 提出了基于混合集合规划的枢纽航线网络设计方法;2012年, 葛伟等^[9] 针对枢纽轴辐式网络中的非必要中转问题,设计了蛛式航线网络模型及相关算法,是国内较早的针对蛛式航线网络的定量研究成果。综上所述表明,枢纽轴辐式航线网络凭借其良好的网络结构,国内外学者将大部分研究都聚焦于该类航线网络的规划设计,但更多关注于理想运行环境中航线网络的经济效益和服务质量,而对空战场条件下的穿越走廊基本网络规划设计问题研究甚少^[10-11]。国内外大多数学者对枢纽轴辐式航线网络进行研究,所构建模型常为混合整数规划的

SUMApHMP 模型^[12],在问题规模较小时可利用精确算法求得最优解,但是对于解决战场空域内机场数目多,且飞行流量大的穿越走廊基本网络规划问题,还存在一定难度。

基于此,针对不考虑限制空域影响的穿越走廊基本网络规划问题特点,本文将禁忌搜索算法与 Floyd 算法有机结合,提出一种组合的 SUMApHMP 模型求解算法,并验证算法有效性。

1 基本网络规划模型描述

通过枢纽机场的中转集散,枢纽轴辐式航线网络内的运输机装载效率明显提高,从而达到减少飞行批次,节约运力成本的目的,提高了航空军事运输的战场保障能力。然而,枢纽轴辐式航线网络自身也存在一定的缺陷:所有非枢纽机场起飞的运输机,不论是否满载,不论起讫机场距离远近,都必须经过枢纽机场中转;大批装备物资装卸和分拣需要在枢纽机场进行,需要占用大量的人力物力来确保规定空运投送任务时间内的保障水平。因此,本文在基本枢纽轴辐式航线网络中采取多重分派的方式,即个别流量较大的非枢纽机场可以同时连接多个枢纽机场,对物资运输进行摊派,减少对单个枢纽机场保障水平的影响,构建多重分派航线网络(非枢纽机场能与多个枢纽机场直接相连)如图 1 所示。

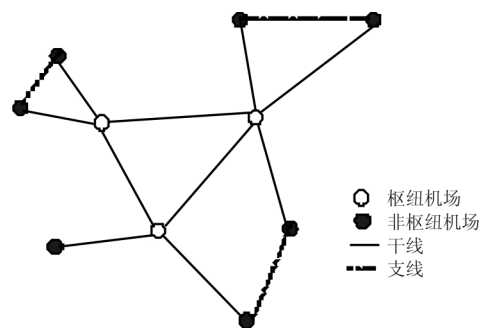


图 1 多重分派航线网络

Fig. 1 Multi-assignment aviation network

无容量限制的严格型多重分派枢纽轴辐式航线网络实际运作情况较为复杂,为方便研究,符合实际情形,将假设条件和已知条件陈述如下:某战区中有 n 个机场,预置枢纽机场 p 个;枢纽机场之间的穿越走廊为点对点式全连通型,非枢纽机场之

间的连接需要经过枢纽机场进行中转;枢纽机场和航线上不存在运输容量的限制,能够为大批量运输机的起降、物资装卸、飞行情报服务提供保障;运输机从起始机场起飞到达目的机场,只能沿路径最短的穿越走廊飞行;一个非枢纽机场可以和多个枢纽机场直接连接(多重分派);枢纽机场之间的空运成本存在一个折扣系数 $\rho(0 < \rho < 1)$;由于航空军事运输活动对时效性的要求,最多只允许两次经过枢纽机场进行中转。

根据 ρ -HM-MA 模型^[8],可针对不考虑限制空域(火力打击区、禁飞区、杀伤盒、危险区等)影响的穿越走廊基本网络规划建立 SUMApHMP 模型。

目标函数:

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} \omega_{ij} (c_{ik} + \rho c_{kl} + c_{ij}) x_{iklj} \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{k \in N} H_k = p \quad (2)$$

$$\sum_{k \in N} \sum_{l \in N} x_{iklj} = 1 \quad (\forall i, j \in N) \quad (3)$$

$$\sum_{l \in N} x_{iklj} \leq H_k \quad (\forall i, j, k \in N) \quad (4)$$

$$\sum_{k \in N} x_{iklj} \leq H_l \quad (\forall i, j, l \in N) \quad (5)$$

$$H_k \in \{0, 1\} \quad (\forall k \in N) \quad (6)$$

$$x_{iklj} \geq 0 \quad (\forall i, k, l, j \in N) \quad (7)$$

式中: ω_{ij} 为机场 i 到机场 j 的 O-D 流; x_{iklj} 为从机场 i 流经枢纽机场 k 到终点机场 j 的交通流量占 ω_{ij} 的比例; c_{ij} 为机场 i 到机场 j 的直达单位运输成本代价; H_k 为枢纽机场选择变量,当机场 k 为枢纽机场时, $H_k = 1$, 当机场 k 不是枢纽机场时, $H_k = 0$ 。

目标函数如式(1)所示,为了使网络运行总成本最小化,由 $c_{ik} + \rho c_{kl} + c_{ij}$ 可以看出,总成本分为三项:第一项非枢纽机场至枢纽机场运输成本,第二项为枢纽机场之间中转运输成本,第三项为枢纽机场至非枢纽机场运输成本。枢纽机场数目约束如式(2)所示,即枢纽机场个数预置为 p ;运输方式限制如式(3)所示,任意非枢纽机场之间的运输任务需要通过枢纽机场中转完成;非枢纽机场约束如式(4)~式(5)所示,即当某个机场不是枢纽机场时,运输机不能经该机场中转。

本文在研究中没有考虑限制空域(火力打击区、禁飞区、杀伤盒、危险区等)的影响,仅考虑了机

场布局、交通流量、各机场对距离等的影响,对战场航空军事运输网络进行初步规划。

2 混合禁忌搜索算法设计

本文研究的不考虑限制空域的穿越走廊基本网络模型属于 NP-hard 问题,且求解规模较大,因此,在利用禁忌搜索算法^[13]选取枢纽机场节点的同时,不能随机生成初始解,需要对初始解进行构造,这样可使算法具有较快的收敛速度,并且确保算法不会陷入局部最优。采用 Floyd 最短路径算法^[14]对机场节点之间的穿越走廊路径进行安排,并以求得的所有机场节点间的穿越走廊最短路径作为禁忌搜索算法的初始解。

(1) 编码及初始解构造

模型采用自然数编码,集合 $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 表示 n 个机场节点形成的枢纽轴辐式网络,每个自然数对应一个机场接点。由于网络中的飞行流量和机场间距离矩阵等因素对枢纽机场的选取过程会产生直接的影响,因此在选取初始解的枢纽机场时需要选取合理的办法对待规划空域内的所有机场节点进行排序。本文采用的指标评价各机场节点^[7]如式(8)所示:

$$Z_i = \alpha \frac{\sum_{j \in N} \omega_{ij}}{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \omega_{ij}} - \beta \frac{\sum_{j \in N} c_{ij}}{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij}} \quad (8)$$

式中: α, β 为加权系数,且有 $\alpha + \beta = 1$ 。

可以看出,某机场飞行流量越大,且到其它各机场距离之和越小,则该机场节点权值越大,即成为枢纽机场的概率越高。

选择权值最大的前 p 个机场节点作为枢纽,并利用 Floyd 最短路径算法对机场节点之间的穿越走廊路径进行安排,以求得的所有机场节点间的穿越走廊最短路径,作为禁忌搜索算法的初始解。由模型可知,共有 p 个枢纽机场节点在穿越走廊网络中起中转作用,因此,当实际应用于求解该模型时, Floyd 最短路径算法运算过程只需要迭代 p 次。

经过 p 次迭代后,获得所有机场对间的最短穿越走廊距离矩阵 $\mathbf{D}^p = (d_{ij}^k)_{n \times n}$,以及穿越走廊网络内最短路径连接方式的连接矩阵 $\mathbf{R}^p = (r_{ij}^k)_{n \times n}$ 。

由此可知,非空域限制条件下给定枢纽机场的穿越走廊网络运行最小总代价可表示为 $\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_{ij} d_{ij}^p$; 各机场对间的具体最佳穿越走廊路径可通过正向追踪法由连接矩阵 $\mathbf{R}^p = (r_{ij}^k)_{n \times n}$ 获得^[15]。

(2) 适配值函数设计

在利用禁忌准则或特赦准则更新当前解时,需要设计合理的适配值函数对解进行评价。模型的目标是求解在单位时间内完成规定运输任务,并使穿越走廊网络总成本代价最低,而求解适配值函数最小值需要考虑穿越走廊最短路径的安排问题,属于特定 Floyd 最短路径算法求解阶段,因此可以直接调用 Floyd 算法设计的目标函数 $\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_{ij} d_{ij}^p$ 作为混合禁忌搜索算法的适配值函数。根据模型目标函数要求可知,最优解为对应适配值最小的解^[7]。

(3) 邻域结构及其候选解

本文的邻域结构依靠单点交换方式,即移动当前解中的枢纽机场节点。假设 S 为初始解, S 中有 p 个元素,即 p 个枢纽机场节点,则还有 $n-p$ 个机场节点等待替换 S 内的枢纽机场节点。当初始解 S 以外的 $n-p$ 个机场节点替换初始解 S 中的某个节点后就产生了 S 的一个邻域解 S^* ,显然初始解 S 的邻域解集合 $N(S)$ 中总共有 $p(n-p)$ 个邻域解。例如 $S = \{1, 2\}$, $N = \{1, 2, 3, 4\}$, 则 $S^* = \{1, 3\}, \{1, 4\}, \{2, 3\}, \{2, 4\}$ 。如此得到的四个邻域解将作为候选解以产生下一步解。

(4) 禁忌对象选择

当一个非枢纽机场 Spoke 和一个枢纽机场 Hub 进行单点交换后,便将机场 Hub 放入禁忌表中,此时禁忌对象就是机场 Hub,处于被禁忌状态。当未达到预置迭代次数,即禁忌长度不为零,机场 Hub 不会被释放到搜索空间中(满足特赦准则的情况除外),避免了迂回搜索的情况发生。本文以先进先出(First in First Out)作为禁忌表的状态更新原则。由此可知,禁忌解的邻域结构是通过机场节点的换入换出产生的,因此对解的变化进行禁忌可以通过对 S 中的换出节点进行禁忌来实现。仍以 $S = \{1, 2\}$ 为例,表示机场 1、2 为模型中的枢纽机场,当变换 $S = \{1, 4\}$ 时,表示机场 4 成为

了枢纽机场,机场 2 变成了非枢纽机场,这时选择机场 2 作为禁忌对象,它作为曾经的枢纽机场节点,在未来的一定迭代次数内会避免其再次成为枢纽机场节点,从而可以使算法轻易跳出局部最优解。

(5) 禁忌长度确定

给定被禁忌对象 S ,要求 S 在 s 次迭代内被禁忌,在禁忌表中记作 $Tabu(S) = s$,每迭代一次则做运算 $Tabu(S) = s - 1$,当 $Tabu(S) = 0$ 时解禁。根据文献[16],本文取 $Tabu(S) = s - randi([\sqrt{n}, 2\sqrt{n}])$,其中 n 为机场节点数目。

(6) 特赦准则

本文将特赦准则分三种情形进行分析:①在禁忌表中的候选解优于当前最优解时,则将该解从禁忌表中释放,作为当前最优解继续参与搜索;②在当前最优解优于禁忌表中的候选解以及搜索空间中的候选解时,则将搜索空间中的最优解作为当前解,以便跳出局部最优;③在所有候选解均被禁忌时,释放禁忌表中的最优解作为当前解,使得搜索能够继续。

(7) 停止准则

当达到算法预定的最大迭代次数或者目标函数的最优值在设定迭代次数内无法改进时,算法停止。

3 算例分析

为了验证模型和算法的有效性,本文选取 10 个机场节点作为研究对象,采用 MATLAB 2014a 作为程序开发平台,编写程序实现禁忌搜索算法和 Floyd 最短路径算法求解基于枢纽轴辐式理论的穿越走廊基本网络规划模型,输出最佳枢纽机场布局 and 穿越走廊路径分配。各机场节点的 (x, y) 坐标值以及机场对之间飞行流量如表 1 和表 2 所示(表中数据根据文献[17]整理获得),为简化运算,机场之间的物资流量对称一致。机场节点空间分布如图 2 所示。下面利用所提出方法对 10 个机场节点的穿越走廊基本网络进行构建。

根据机场节点坐标值,由公式 $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ 计算出机场节点之间的距离矩阵,如表 3 所示。

表 1 机场节点坐标

Table 1 Coordinate of each airport node

| 机场编号 | x/km | y/km |
|-------|---------------|---------------|
| 机场 1 | 1 215 | 2 201 |
| 机场 2 | 1 772 | 2 546 |
| 机场 3 | 1 133 | 375 |
| 机场 4 | 555 | 1 568 |
| 机场 5 | 193 | 1 109 |
| 机场 6 | 20 | 554 |
| 机场 7 | 839 | 20 |
| 机场 8 | 1 718 | 778 |
| 机场 9 | 1 520 | 1 444 |
| 机场 10 | 1 018 | 1 606 |

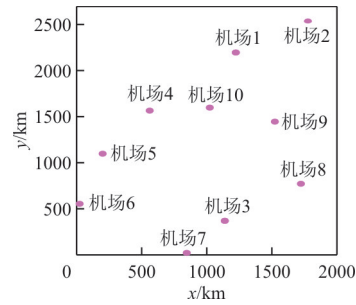


图 2 机场节点空间分布

Fig. 2 Space distribution of airport nodes

表 2 机场节点间的飞行流量

Table 2 Flight flow between airport nodes

| 机场编号 | 数值/(架次·周 ⁻¹) | | | | | | | | | |
|-------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 机场 1 | 机场 2 | 机场 3 | 机场 4 | 机场 5 | 机场 6 | 机场 7 | 机场 8 | 机场 9 | 机场 10 |
| 机场 1 | 0 | 71 | 152 | 69 | 111 | 79 | 61 | 44 | 69 | 29 |
| 机场 2 | 71 | 0 | 8 | 5 | 5 | 5 | 4 | 8 | 4 | 10 |
| 机场 3 | 152 | 8 | 0 | 36 | 72 | 52 | 101 | 35 | 45 | 22 |
| 机场 4 | 69 | 5 | 36 | 0 | 32 | 22 | 16 | 4 | 9 | 2 |
| 机场 5 | 111 | 5 | 72 | 32 | 0 | 65 | 17 | 5 | 18 | 13 |
| 机场 6 | 79 | 5 | 52 | 22 | 65 | 0 | 19 | 10 | 5 | 20 |
| 机场 7 | 61 | 4 | 101 | 16 | 17 | 19 | 0 | 16 | 13 | 12 |
| 机场 8 | 44 | 8 | 35 | 4 | 5 | 10 | 16 | 0 | 18 | 7 |
| 机场 9 | 69 | 4 | 45 | 9 | 18 | 5 | 13 | 18 | 0 | 4 |
| 机场 10 | 29 | 10 | 22 | 2 | 13 | 20 | 12 | 7 | 4 | 0 |

表 3 机场节点间的距离矩阵

Table 3 Distance matrix between airport nodes

| 机场编号 | 距离/km | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 机场 1 | 机场 2 | 机场 3 | 机场 4 | 机场 5 | 机场 6 | 机场 7 | 机场 8 | 机场 9 | 机场 10 |
| 机场 1 | 0 | 655 | 1 828 | 914 | 1 496 | 2 035 | 2 213 | 1 509 | 816 | 627 |
| 机场 2 | 655 | 0 | 2 263 | 1 561 | 2 135 | 2 653 | 2 693 | 1 769 | 1 130 | 1 205 |
| 机场 3 | 1 828 | 2 263 | 0 | 1 326 | 1 193 | 1 127 | 461 | 710 | 1 137 | 1 236 |
| 机场 4 | 914 | 1 561 | 1 326 | 0 | 586 | 1 146 | 1 574 | 1 406 | 973 | 465 |
| 机场 5 | 1 496 | 2 133 | 1 193 | 586 | 0 | 581 | 1 266 | 1 561 | 1 369 | 963 |
| 机场 6 | 2 035 | 2 653 | 1 127 | 1 146 | 581 | 0 | 978 | 1 713 | 1 744 | 1 450 |
| 机场 7 | 2 213 | 2 693 | 461 | 1 574 | 1 266 | 978 | 0 | 1 161 | 1 578 | 1 596 |
| 机场 8 | 1 509 | 1 769 | 710 | 1 406 | 1 561 | 1 713 | 1 161 | 0 | 695 | 1 084 |
| 机场 9 | 816 | 1 130 | 1 137 | 973 | 1 369 | 1 744 | 1 578 | 695 | 0 | 527 |
| 机场 10 | 627 | 1 205 | 1 236 | 465 | 963 | 1 450 | 1 596 | 1 084 | 527 | 0 |

根据 10 个机场节点的流量矩阵和距离矩阵,对混合禁忌搜索算法的求解效果进行验证分析,其中枢纽机场数目分别取 $p = \{2, 3, 4\}$,折扣系数分别取值 $\rho = \{0.4, 0.6, 0.8\}$ 。该验证基于 MATLAB 2014a 编程实现,且混合禁忌搜索算法的运算终止条件为最大迭代次数超过 $\max_int = 30$ 或连续 4 次得到相同解。为验证算法准确性,本文利用 Lingo 9.0 对模型求解的最优解和混合禁忌搜索算法的计算结果进行比较分析,对比结果如表 4 所示,可以看出:利用混合禁忌搜索算法和 Lingo 9.0 软件都能得到模型的最优解;在求解速度上,利用混合禁忌搜索算法的求解时间远远少于利用 Lingo 9.0 的求解时间。另外,当折扣系数 ρ 确定后,随着枢纽机场数目 p 增大,穿越走廊网络的运行总代价会变小。然而,枢纽机场通常会被敌方列入高价值目标清单进行打击,实战时的穿越走廊网络设计并不是枢纽机场越多越好,较多的枢纽机场增加了机场的防御难度,而且在现实中枢纽机场的设置与维护需要大量财力、物力和人力的投入。

表 4 混合禁忌搜索算法和 Lingo 9.0 求解模型结果的对比
Table 4 Comparison of model solution results obtained by hybrid taboo search algorithm and Lingo 9.0

| $r-p-\rho$ | 枢纽机场 | Lingo 9.0 | | 混合禁忌搜索算法 | |
|------------|----------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
| | | 最优解 ($\times 10^4$) | 耗时/s | 最优解 ($\times 10^4$) | 耗时/s |
| 10-2-0.4 | 1,3 | 367.02 | 15.26 | 367.02 | 0.381 |
| 10-2-0.6 | 1,3 | 387.14 | 16.02 | 387.14 | 0.388 |
| 10-2-0.8 | 1,3 | 403.59 | 16.19 | 403.59 | 0.399 |
| 10-3-0.4 | 1,4,3 | 292.54 | 17.34 | 292.54 | 0.498 |
| 10-3-0.6 | 1,4,3 | 325.94 | 16.27 | 325.94 | 0.497 |
| 10-3-0.8 | 1,6,3 | 354.19 | 16.75 | 354.19 | 0.519 |
| 10-4-0.4 | 1,10,3,5 | 241.70 | 16.67 | 241.70 | 0.701 |
| 10-4-0.6 | 1,9,3,5 | 281.01 | 15.18 | 281.01 | 0.687 |
| 10-4-0.8 | 1,9,3,5 | 321.15 | 18.49 | 321.15 | 0.705 |

本文以 $p=3, \rho=0.4$ 为例,不考虑限制空域的穿越走廊基本网络进行规划,由混合禁忌搜索算法求解得到最优枢纽机场为:机场 1、3 和 4,对应的连接矩阵 R^p 如表 5 所示。

表 5 连接矩阵 $R^p (p=3, \rho=0.4)$

Table 5 Connection matrix $R^p (p=3, \rho=0.4)$

| 机场编号 | 矩 阵 值 | | | | | | | | | |
|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 机场 1 | 机场 2 | 机场 3 | 机场 4 | 机场 5 | 机场 6 | 机场 7 | 机场 8 | 机场 9 | 机场 10 |
| 机场 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 9 | 10 |
| 机场 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 机场 3 | 1 | 1 | 3 | 4 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 4 |
| 机场 4 | 1 | 1 | 3 | 4 | 5 | 6 | 3 | 3 | 9 | 10 |
| 机场 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 机场 6 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 6 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 机场 7 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 7 | 3 | 3 | 3 |
| 机场 8 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 8 | 3 | 3 |
| 机场 9 | 1 | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 9 | 4 |
| 机场 10 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 10 |

根据连接矩阵 $R^p = (r_{ij}^k)_{n \times n}$ 定义,结合表 4 所示结果,采用正向跟踪法求得穿越走廊网络的具体

路径安排如表 6 所示。

表 6 穿越走廊基本网络路径安排结果($\rho=3, \rho=0.4$)Table 6 Results of TC basic network path arrangement($\rho=3, \rho=0.4$)

| 机场编号 | 路 径 安 排 | | | | | | | | | |
|-------|---------|-----------|----------|---------|-----------|-----------|------------|------------|----------|------------|
| | 机场 1 | 机场 2 | 机场 3 | 机场 4 | 机场 5 | 机场 6 | 机场 7 | 机场 8 | 机场 9 | 机场 10 |
| 机场 1 | [1,1] | [1,2] | [1,3] | [1,4] | [1,4,5] | [1,4,6] | [1,3,7] | [1,3,8] | [1,9] | [1,10] |
| 机场 2 | [2,1] | [2,2] | [2,1,3] | [2,1,4] | [2,1,4,5] | [2,1,4,6] | [2,1,3,7] | [2,1,3,8] | [2,1,9] | [2,1,10] |
| 机场 3 | [3,1] | [3,1,2] | [3,3] | [3,4] | [3,4,5] | [3,6] | [3,7] | [3,8] | [3,9] | [3,4,10] |
| 机场 4 | [4,1] | [4,1,2] | [4,3] | [4,4] | [4,5] | [4,6] | [4,3,7] | [4,3,8] | [4,9] | [4,10] |
| 机场 5 | [5,4,1] | [5,4,1,2] | [5,4,3] | [5,4] | [5,5] | [5,4,6] | [5,4,3,7] | [5,4,3,8] | [5,4,9] | [5,4,10] |
| 机场 6 | [6,4,1] | [6,4,1,2] | [6,3] | [6,4] | [6,4,5] | [6,6] | [6,3,7] | [6,3,8] | [6,4,9] | [6,4,10] |
| 机场 7 | [7,3,1] | [7,3,1,2] | [7,3] | [7,3,4] | [7,3,4,5] | [7,3,6] | [7,7] | [7,3,8] | [7,3,9] | [7,3,4,10] |
| 机场 8 | [8,3,1] | [8,3,1,2] | [8,3] | [8,3,4] | [8,3,4,5] | [8,3,6] | [8,3,7] | [8,8] | [8,3,9] | [8,3,4,10] |
| 机场 9 | [9,1] | [9,1,2] | [9,3] | [9,4] | [9,4,5] | [9,4,6] | [9,3,7] | [9,3,8] | [9,9] | [9,4,10] |
| 机场 10 | [10,1] | [10,1,2] | [10,4,3] | [10,4] | [10,4,5] | [10,4,6] | [10,4,3,7] | [10,4,3,8] | [10,4,9] | [10,10] |

根据路径安排结果,可设计出 10 个机场节点在不考虑限制空域情况下穿越走廊网络图,如图 3 所示。

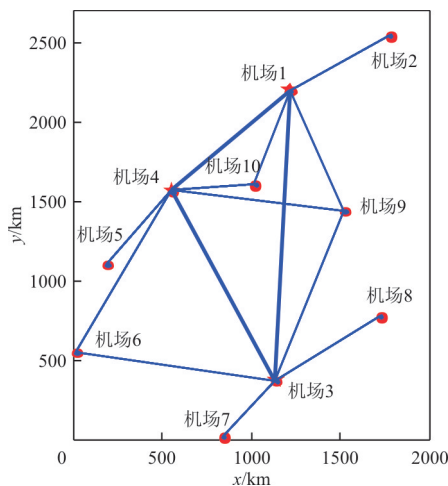


图 3 不考虑限制空域的穿越走廊基本网络规划结果
Fig. 3 Planning result of TC basic network without considering the restricted airspace

从图 3 可以看出:三个枢纽机场通过穿越走廊相互连接,构成穿越走廊干线网络;非枢纽机场中,机场 9 与三个枢纽机场直接连接,机场 6 和 10 与两个枢纽直接链接,而机场 2、5、7 和 8 只与一个枢纽机场直接连接,这些构成了穿越走廊网络支线网络。

至此,不考虑限制空域影响的穿越走廊基本网

络初步规划已完成。下一步,需要对加入限制空域的穿越走廊基本网络进行重规划,模拟空战场实际,考虑穿越走廊网络与空中限制区、禁飞区和对空火力打击区等限制空域之间的结构关系,避免出现空域冲突,造成己方火力误击误伤的严重后果。在加入限制空域后,穿越走廊网络的空域运行情况如图 4 所示。

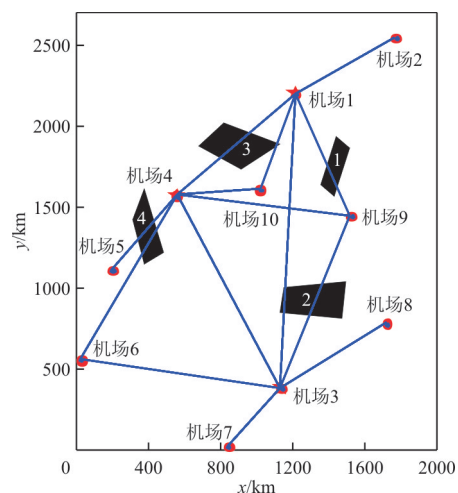


图 4 加入限制空域后的穿越走廊基本网络运行情况
Fig. 4 Operation of TC basic network after the restricted airspace is added

从图 4 可以看出:加入限制空域后,各机场之间共有 7 条穿越走廊与限制空域交汇,存在明显的冲突隐患。记 $path(i, j)$ 表示连通机场 i 和机场

j 之间的穿越走廊, $obstacle_paths$ 表示战场空域环境中存在空域冲突的穿越走廊的集合, 则根据图中信息可知, $obstacle_paths = \{path(1, 3), path(1, 4), path(1, 9), path(1, 10), path(3, 9), path(4, 5), path(4, 6)\}$ 。

4 结 论

(1) 对不考虑限制空域的穿越走廊基本网络规划的 SUMAPHMP 数学模型, 提出了一种混合禁忌搜索求解算法。算例分析表明, 所提出算法和 Lingo 9.0 软件都能求得最优解, 但前者在求解时间上要远远少于后者。

(2) 根据混合禁忌搜索算法优化结果, 设计出忽略限制空域情况下的穿越走廊网络图, 验证了模型求解结果的正确性, 也为考虑限制空域的穿越走廊可行网络规划搭建了基本框架。

(3) 出于说明模型和算法的需要, 在研究空战场条件下的穿越走廊基本网络规划问题没有考虑限制空域情况, 仅仅初步规划了空战场航空军事运输网络, 而加入限制空域后, 穿越走廊基本网络规划问题将更为复杂, 也是下一步需要深入研究的问题。

参考文献

- [1] Campbell J F. Hub location and the p-hub median problem [J]. *Operations Research*, 1996, 44(6): 1-13.
- [2] Lederer P J, Nambimadom R S. Airline network design [J]. *Operations Research*, 1998, 46(6): 785-804.
- [3] Pels E, Nijkamp P, Rietveld P. A note on the optimality of airline networks[J]. *Economics Letters*, 2000, 69: 429-434.
- [4] 耿淑香. 航空公司运营管理方略[M]. 北京: 中国民航出版社, 2000.
Geng Shuxiang. Airline operation management strategy [M]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 2000. (in Chinese)
- [5] 柏明国. 航空公司航线网络优化设计问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
Bai Mingguo. Research on optimization design of airline route network[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [6] Kelly T, Makoto A. A genetic algorithm for the hub-and-spoke problem applied to containerized cargo transport[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2009, 14(2): 256-274.
- [7] 杨哈熠. 枢纽确定单连接轴辐网络结构在中国民用航空网络中的应用[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2010, 12(2): 27-30.
Yang Hanyi. The application of hub-and-spoke network in chinese aeronautic transportation[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Science Edition)*, 2010, 12(2): 27-30. (in Chinese)
- [8] 杨年, 朱金福, 吴薇薇. p-枢纽航线网络设计的混合集合规划方法[J]. *武汉理工大学学报*, 2012, 33(8): 69-73.
Yang Nian, Zhu Jinfu, Wu Weiwei. p-hub airline network design problem based on MSP[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2012, 33(8): 69-73. (in Chinese)
- [9] 葛伟, 朱金福, 吴薇薇. 蛛网式航线网络模型设计[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2012, 12(4): 172-176.
Ge Wei, Zhu Jinfu, Wu Weiwei. Design of spider web airline network model[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2012, 12(4): 172-176. (in Chinese)
- [10] 程季程, 程健. 国外空战场管制理论与实践[J]. *中国民航飞行学院学报*, 2013, 24(3): 5-7.
Cheng Jizeng, Cheng Jian. Theory and practice foreign air battle space control[J]. *Journal of Civil Aviation Flight University of China*, 2013, 24(3): 5-7. (in Chinese)
- [11] 朱涛, 丁轶. 基于航路网的批量航线自动规划方法研究[J]. *信息化研究*, 2018, 44(5): 23-26.
Zhu Tao, Ding Yi. Research on automatic planning method of bulk route based on route network[J]. *Informatization Research*, 2018, 44(5): 23-26. (in Chinese)
- [12] Skorin-Kapov D, Skorin-Kapov J, O'Kelly M E. Tight linear programming relaxation of uncapacitated p-hub median problems[J]. *European Journal of Operations Research*, 1996, 94: 582-593.
- [13] Fred Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence[J]. *Computers & Operations Research*, 1986, 39(13): 533-549.
- [14] 毛圆洁. 最短路径问题的 Floyd 算法与 MATLAB 程序实现[J]. *河北北方学院学报(自然科学版)*, 2013, 19(5): 13-15.
Mao Yuanjie. Floyd algorithm and MATLAB program realization of shortest path problem [J]. *Journal of Hebei North University(Natural Science Edition)*, 2013, 19(5): 13-15. (in Chinese)
- [15] 谢政, 李建平. 网络算法与复杂性理论[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995.
Xie Zheng, Li Jianping. Network algorithm and complexity theory [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1995. (in Chinese)
- [16] 季开青. 基于轴辐式网络的应急物资调度问题研究[D]. 沈阳: 辽宁科技大学, 2010.

- cations[J]. Johnson Aeronautics, 1993(4): 1-4.
- [21] 胡偶, 陈平剑. 旋翼桨叶载荷与桨叶结构参数相关性研究[J]. 直升机技术, 2017(1): 8-12.
Hu Ou, Chen Pingjian. Correlation study for blade loads and blade structure properties of rotor[J]. Helicopter Technique, 2017(1): 8-12. (in Chinese)
- [22] 卞文杰, 万力. DYTRAN 基础教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2004: 1-2.
Bian Wenjie, Wan Li. DYTRAN basic course[M]. Beijing: Peking University Press, 2004: 1-2. (in Chinese)
- [23] 丁沛然, 钱纯. DYTAN 理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 81-85.
Ding Peiran, Qian Chun. DYTAN theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2006: 81-85. (in Chinese)
- [24] 杨静宇, 马连生. 复合材料力学[M]. 北京: 国防工业出版

社, 2014: 68-71.

Yang Jingning, Ma Liansheng. Mechanics of composite materials [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 68-71. (in Chinese)

作者简介:

林长亮(1982—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:直升机总体设计,动力学分析。

朱跃法(1965—),男,学士,研究员级高级工程师。主要研究方向:直升机结构强度设计与验证技术。

胡文刚(1986—),男,学士,工程师。主要研究方向:结构强度分析。

(编辑:丛艳娟)

(上接第 809 页)

- Ji Kaiqing. Research on emergency material dispatching problem based on hub-and-spoke network[D]. Shenyang: University of Science and Technology Liaoning, 2010. (in Chinese)
- [17] 国家测绘地理信息局. 2000 国家大地坐标系[EB/OL]. [2018-12-21]. <http://www.sbsm.gov.vn/article/zszygx/chzs/chkp/ddcl/201001/20100100062363.shtml>.
Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation. China geodetic coordinate system 2000[EB/OL]. [2018-12-21]. <http://www.sbsm.gov.vn/article/zszygx/chzs/chkp/ddcl/201001/20100100062363.shtml>. (in Chinese)

作者简介:

刘影(1981—),女,硕士,讲师。主要研究方向:计算机数值模拟。

周一叶(1987—),男,硕士,管制员。主要研究方向:空域管理。

甘旭升(1971—),男,博士,副教授。主要研究方向:非线性系统建模,空域管理。

杨捷(1969—),女,硕士,副教授。主要研究方向:空域管理。

(编辑:丛艳娟)