航路交叉点动态规划研究

武丁杰[1]，许凌宇[2]，朱 莉[2]，周鼎凯[2]

（1. 中国民用航空飞行学院 教务处，四川 广汉 618307；2. 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院，四川 广汉 618307）

摘要：TBO运行是未来民航管制运行的主流方向，为缓解当前航路交叉点流量，减少拥堵的情况下，结合TBO运行背景，利用降维法搭建井字形构型，建立了航路交叉点模型，对单个航路交叉点和井字形构型交叉点的容量公式进行研究。结合民航某航路交叉点在高峰时间段进行仿真，结果表明井字形构型容量相较于单航路交叉点容量提高了35.4%。进而设置模型的目标函数，运用遗传算法对模型进行求解，得出井字形构型交叉点相比单个航路交叉点在航班延误成本方面降低了49%，在旅客平均延误时间上减少了52.7%。结果表明，对于大流量航路交叉点，通过变换井字形构型可以有效地疏导拥堵，对航路资源进行协同分配。

关键词：航路交叉点；遗传算法；交叉点容量；井字型交叉点构型

中图分类号：V355 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－1807(2023)14－0209－06

航路是空中交通网络的重要载体，我国的航路网络错综复杂，其中航路交叉点是造成空域拥堵、航班延误、飞行事故的高发区域。如何对航路交叉点进行扩容，缓解拥堵，从而提高相应航路的运行效率，最大限度地发挥空域扇区的利用率，具有相当的研究价值。

目前国内外对航路交叉点问题进行了相应的研究。研究主要聚焦在航路交叉点构型研究、航路交叉点容量研究及疏导航路拥堵方面。在国外方面，Wang和Gong等[1]基于危险区和禁区限制上对航路构型进行了优化；Tran等[2]基于人工智能系统的基础学习管制员的管制偏好提出了交叉点拥堵疏导的解决方法；Zhi等[3]为了实现交叉点的扩容，使航班流安全高效地通过某固定交叉点，提出了一种紧凑的航班流构型。国内方面，张晨等[4]介绍了基于管型空域配置的交通复杂度管理；辛正伟[5]分析了航路交叉点布局问题的一般模型；戴福青等[6]建立了航路交叉点拥挤风险评估模型；申晨等[7]介绍了一种基于交通流邻近度的邻近映射生成复杂性估计值的空域容量评估方法；马玲等[8]提出了一种考虑交叉点复杂度的通行能力优化方法；刘豪等[9]提出了基于粗糙集基于属性约简的离群点检测方法（an outlier detection algorithm based on attribute reduction，AROD）算法的航路交叉点预测模型。

上述成果主要对航路交叉点的承载能力，航路网络的通行能力及容量预测等方面入手进行研究，较少聚焦于在未来基于航迹的运行（trajectory based operation，TBO）运行背景下，对航路构型进行变换从而实现扩容调配等策略手段进行研究。综上所述，本文基于上述的研究成果以及未来TBO环境下航路的运行特点，阐述了降维法的设计思路，并在此基础上引入协同决策的概念，使空管方充分考虑到航司与机场的诉求，建立改进型“井”字形模型。最后基于东部地区某空域航路进行实例分析，验证了变换构型的有效性和可行性，从而实现对航路交叉点资源的充分利用，提高交叉点的使用效率与通行能力，缓解因为航路交叉点拥挤而造成的航班延误和空域拥挤现象。

1 航路交叉点容量模型

1.1 问题描述与基本假设

降维法是指降低维度，但本文的航路维度并非传统意义上的空间维度，这里的维度指的是通过同一个交叉点的航路的条数。例如，两条航路经过一个交叉点为二维航路，三条航路经过一个交叉点即为三维航路。通过降低航路维度从而降低航路交叉点的复杂程度，起到减少飞行冲突的目的。降维法就是将三四维航路降维成类似于井字形构型的二维航路，使得交叉航路的复杂度降

收稿日期：2023-04-05

基金项目：四川省高等教育人才培养质量和改革项目（JG2021-522）。

作者简介：武丁杰（1978—），男，内蒙古呼和浩特人，中国民用航空飞行学院教务处，副教授，硕士，研究方向为空域流量管理；许凌宇（1999—），男，福建莆田人，中国民用航空飞行学院，硕士研究生，研究方向为空域流量管理。

低，航班交叉汇聚的碰撞风险降低，同时分流扩容，使得使用降维法变换构型之后交叉航路点的容量大幅提高。

当空中交通流量增加时，此刻航路交叉点造成拥堵，为了缓解拥堵，在 TBO 运行的前提下，通过降维法变换为井字形构型，如图 1 所示。

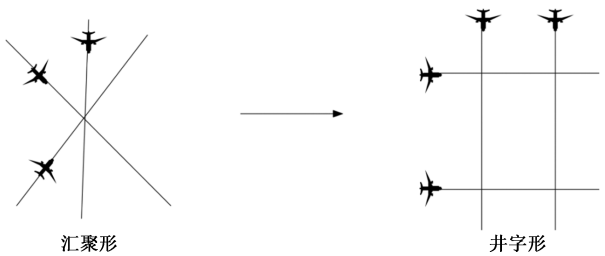

图 1　降维法示意图

通过建立分流航线，来缓解交叉点处的拥堵情况。为简化实际问题，做出如下假设。

假设 1：航路最小间隔一经设定便不再更改。

假设 2：航空器在交叉点处不发生碰撞。

假设 3：航空器为单向运行，后机不允许超越前机。

假设 4：空管采用 TBO 运行技术，能够准确计算出航空器经过各交叉点的时间。

1.2　交叉点容量

1.2.1　基本理论公式

$$C = \frac{N}{T} \tag{1}$$

式中：C 为航路容量；N 为服务航空的最大架次；T 为服务的总时间。

航路容量分为动态容量c_a和静态容量c_b。

$$C_a = \frac{X}{D + \Delta D} \tag{2}$$

$$C_b = \frac{VT}{D + \Delta D} \tag{3}$$

式中：X 为航路长度；V 为航空器的平均速度；D 为管制间隔；ΔD 为管制裕度。

1.2.2　单个交叉点情况下的航路交叉点容量（第一段航段）

根据何琛[10]可知，交叉航路交角与容量之间呈负相关，即随着航路交角的增大，航路容量逐渐减少。先假设航路交角 $\alpha = 90°$，即两条航路为垂直状态时，推算单个交叉点容量，再加入三角函数得出不同角度下单个交叉点情况下的交叉点容量（图 2）。

如图 2 所示，图中：h_{j1} 为计划航路 1 的航班流；h_{j2} 为计划航路 2 的航班流；h_{j1}^1 为过交叉点后继续沿

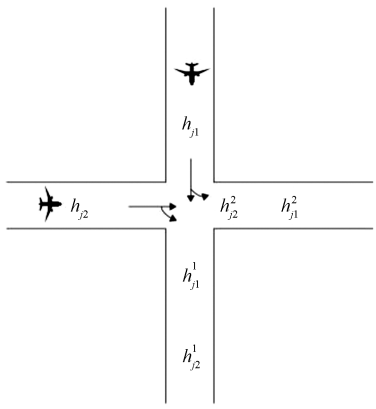

图 2　单个交叉点航路构型（垂直）

计划航路 1 飞行的航班；h_{j1}^2 为过交叉点后按计划沿航路 2 飞行的航班流；h_{j2}^1 为过交叉点后沿计划航路 1 飞行的航班流；h_{j2}^2 为过交叉点后继续沿计划航路飞行的航班流。

设 h_{j1} 的架次数为 n_{j1}，同理可得 n_{j2}、n_{j1}^1、n_{j1}^2、n_{j2}^1、n_{j2}^2。

根据许杨等[11]可知，当h_{j2}^1和h_{j2}^2之间的航班流差距过大时，且h_{j1}^1的流量增加，计划航路 2 的动态容量就越大。为防止航空器对头飞行产生碰撞危险，因此为简化模型，假设航空器过交叉点的间隔是错开的。

设管制预留间隔为L_1，则

$$L_1 = n_{j2} - n_{j2}^2 + n_{j1}^1 \tag{4}$$

由式(2)和式(3)可得，在考虑预留间隔的情况下，动态容量和静态容量分别为

$$C_a' = \frac{X - L_1}{D + \Delta D} \tag{5}$$

$$C_b' = \frac{VT - L_1}{D + \Delta D} \tag{6}$$

垂直状态时单个航路交叉点容量为

$$C_{单} = C_a' + C_b' = \frac{X - L_1}{D + \Delta D} + \frac{VT - L_1}{D + \Delta D} = \frac{X - (n_{j2} - n_{j2}^2 + n_{j1}^1)}{D + \Delta D} + \frac{VT - (n_{j2} - n_{j2}^2 + n_{j1}^1)}{D + \Delta D} \tag{7}$$

如图 3 所示，由三角函数可知航路交角为 α 的航路 1 与航路交角为 90°的航路 2 之间为正弦函数。因此，在这两航段内的航空器架次的数量关系可近似看作正弦函数关系。一般地，单个航路交叉点容量为

$$C_{单} = (C_a' + C_b')/\sin\alpha = \left[\frac{X - L_1}{D + \Delta D} + \frac{VT - L_1}{D + \Delta D}/\sin\alpha\right] = \left[\frac{X - (n_{j2} - n_{j2}^2 + n_{j1}^1)}{D + \Delta D} + \frac{VT - (n_{j2} - n_{j2}^2 + n_{j1}^1)}{D + \Delta D}\right]/\sin\alpha \tag{8}$$

1.2.3 井字形构型的航路交叉点容量

假设交叉航路航班流为h_{j1}、h_{j2}时,航班架次数越多,交叉口会发生拥堵,且计划航路1和2上的航班会造成等待,产生延误成本。因此,构建井字形航路,建立该交叉点临时航路1和临时航路2(图4)。

为简化模型,假设计划航路1和临时航路1为平行,计划航路2和临时航路2为平行。此时管制员可调配计划航路上的航班流,将其安排在临时航路上,以减轻原有交叉航路的运行压力。当只考虑计划航路1和计划航路2以及临时航路1时,管制员对不同预计时间进入交叉口的航班使用"先到先服务"(FCFS),根据式(8),可以得出两个航路交叉点容量为

$$C_{双}=C'_a+C'_b=\frac{X-2L_1}{D+\Delta D}+\frac{VT-2L_1}{D+\Delta D}=\frac{X-2(n_{j2}-n_{j2}^2+n_{j1}^1)}{D+\Delta D}+\frac{VT-2(n_{j2}-n_{j2}^2+n_{j1}^1)}{D+\Delta D} \tag{9}$$

综上所述,当使用井字形构型时,可以近似看作由两个双航段所构成的构型,因此垂直状态下井字形构型的容量为

$$C_{井}=2\,C_{双}=2(C'_a+C'_b)=2\left(\frac{X-2L_1}{D+\Delta D}+\frac{VT-2L_1}{D+\Delta D}\right)=2\,\frac{X-2(n_{j2}-n_{j2}^2+n_{j1}^1)}{D+\Delta D}+2\,\frac{VT-2(n_{j2}-n_{j2}^2+n_{j1}^1)}{D+\Delta D} \tag{10}$$

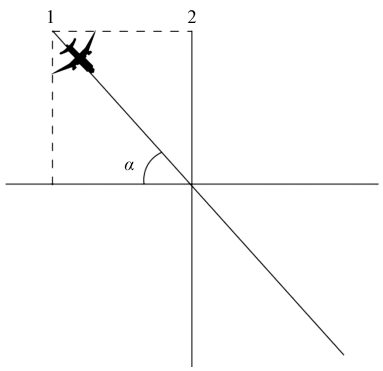

图3 航路交角α示意图

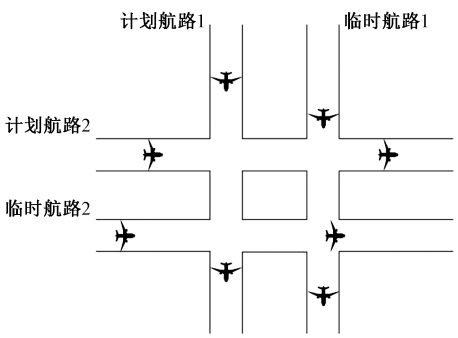

图4 井字型航路示意图

根据式(8)和式(9),同理可得井字形构型容量为

$$C_{井}=2\,C_{双}=2(C'_a+C'_b)/\sin\alpha=2\left(\frac{X-2L_1}{D+\Delta D}+\frac{VT-2L_1}{D+\Delta D}\right)/\sin\alpha=\left[2\,\frac{X-2(n_{j2}-n_{j2}^2+n_{j1}^1)}{D+\Delta D}+2\,\frac{VT-2(n_{j2}-n_{j2}^2+n_{j1}^1)}{D+\Delta D}\right]/\sin\alpha \tag{11}$$

1.3 目标函数

当交叉航路发生拥堵时,变换为井字形构型后,对容量和航空公司延误成本会发生改变。因此,从航班总延误成本这个方面来建立目标函数。

模型符号定义:j_1为计划航路1;j_2为计划航路2;l_1为临时航路1;l_2为临时航路2;f_{j1}为航空器使用计划航路1所造成的延误成本;f_{j2}为航空器使用计划航路2所造成的延误成本;f_{l1}为航空器使用临时航路1所造成的延误成本;f_{l2}为航空器使用临时航路2所造成的延误成本;S为时隙总数;s为任意时隙($s\in S$);t_s为任一时隙的起始时刻;P为航班总数;p为任一航班($p\in P$);n_p为航班p的载客数;a_p为航班p的计划到达时间。

决策变量为

$$x_{ps}^{j1}=\begin{cases}1, & \text{航班 } p \text{ 分到时隙 } s \text{ 且选择计划航路 } 1\\ 0, & \text{反之}\end{cases},$$

$$x_{ps}^{j2}=\begin{cases}1, & \text{航班 } p \text{ 分到时隙 } s \text{ 且选择计划航路 } 2\\ 0, & \text{反之}\end{cases},$$

$$y_{ps}^{l1}=\begin{cases}1, & \text{航班 } p \text{ 分到时隙 } s \text{ 且选择临时航路 } 1\\ 0, & \text{反之}\end{cases},$$

$$y_{ps}^{l2}=\begin{cases}1, & \text{航班 } p \text{ 分到时隙 } s \text{ 且选择临时航路 } 2\\ 0, & \text{反之}\end{cases}。$$

设全部航班总延误成本最低C_1,则目标函数为

$$\min C_1=\sum_{p=1}^{P}\sum_{s=1}^{S}(f_{j1}\,x_{ps}^{j1}+f_{j2}\,x_{ps}^{j2}+f_{l1}\,y_{ps}^{l1}+f_{l2}\,y_{ps}^{l2})(t_s-a_p) \tag{12}$$

设旅客平均延误时间最小为C_2,则目标函数为

$$\min C_2=\frac{\sum_{p=1}^{P}\sum_{s=1}^{S}n_p(t_s-a_p)(x_{ps}^{j1}+x_{ps}^{j2}+y_{ps}^{l1}+y_{ps}^{l2})}{\sum_{p=1}^{P}n_p} \tag{13}$$

1.4 约束条件

1)航空器唯一性约束。

$$\sum_{s=1}^{S}(x_{ps}^{j1}+y_{ps}^{l1})=1,\quad 1\leqslant s\leqslant S \tag{14}$$

$$\sum_{s=1}^{S}(x_{ps}^{j2}+y_{ps}^{l2})=1,\quad 1\leqslant s\leqslant S \tag{15}$$

式(14)和式(15)表示每个航班只进入一条航路以及只有一个时隙。

2)时隙唯一性约束。

$$\sum_{p=1}^{P}(x_{ps}^{j1}+y_{ps}^{l1})=1,\ 1\leqslant p\leqslant P \tag{16}$$

$$\sum_{p=1}^{P}(x_{ps}^{j2}+y_{ps}^{l2})=1,\ 1\leqslant p\leqslant P \tag{17}$$

式(16)和式(17)表示每个时隙只能给一个航班使用。

3)容量的有限性。

$$\sum_{p=1}^{P}\sum_{s=1}^{S}(x_{ps}^{j1}+x_{ps}^{j2})\leqslant C_{单} \tag{18}$$

$$\sum_{p=1}^{P}\sum_{s=1}^{S}(x_{ps}^{j1}+x_{ps}^{j2}+y_{ps}^{l1}+y_{ps}^{l2})\leqslant C_{井} \tag{19}$$

式(18)表示单交叉点时,航路容量不大于航路计划容量;式(19)表示井字形构型时,航路容量不大于航路计划容量。

2　算例仿真

2.1　航路交叉点容量分析

图 5 为从民航局发布的 AIP 中截取的华东管制区域的部分航路,选取该图中的 W45 和 A581 两段交叉航路作为仿真空域。图 6 为简化后的航路示意图,两条航路之间的交角取 $\alpha=60°$。

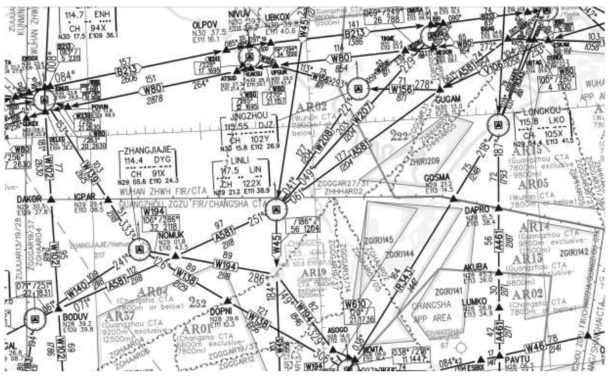

图 5　仿真空域

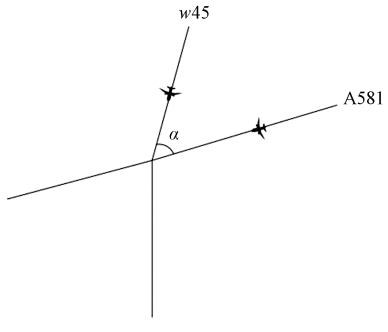

图 6　航路实例简化图

设在 8:00—10:00 早高峰之间有 52 个航班飞越。使用计划航路 1 飞越的航班数为 28 个,使用计划航路 2 飞越交叉点的航班为 24 个(表 1 和表 2)。

由表 1 和表 2 可知,过交叉点后继续沿计划航路 1 飞行的航空器架次为 20 架次,沿计划航路 2 飞行的航空器架次为 8 架次;同理可得,n_{j2}^{1} 为 7 架次,n_{j2}^{2} 为 17 架次。在单交叉点情况下,依据相关管制规则和规定以及航路在实际运行中的情况,航空器的飞行速度 $V=800$ km/h,且为匀速飞行,标准管制间隔 $D=30$ km。航路长度 $X=200$ km,综合考虑管制员工作负荷、恶劣天气等因素,增加一个管制间隔 $\Delta D=5$ km。

根据式(8),代入数据可以得出 $C_{单}=57.6$ 架次,则单航路交叉点每小时的容量为 $C_{单}=28.8$ 架次/h。

当航路变换为井字形构型时,此时标准管制间隔 D=50 km[12]。根据式(11),代入数据可以得出 $C_{井}=78.15$ 架次,则井字形航路交叉点每小时的容量为 $C_{井}=39$ 架次/h。由以上结果可以得出,在同一时间段、同一飞行流量前提条件下,使用井字形构型交叉点相比于单个航路交叉点的容量提升了 35.4%。因此,在 TBO 环境下使用降流法变换为井字形构型可以显著提高航路交叉点的容量,可以有效缓解交叉点拥堵情况,提高航空器的通过效率。

2.2　遗传算法求解

遗传算法的主要灵感来自达尔文的进化论模型和遗传学方面的知识。通过借鉴“适者生存,物竞天择”的思想,将需要解决的问题转化成进化模型,通过选择、交叉、变异等操作来选择精英解并进行保留,最终得到结果的最优解(图 7)。

以民航某交叉航路为例,根据该航路交叉点 8:00—10:00 航班数据进行仿真分析。在该时间段内,共有 52 个航班通过该交叉点,其中使用计划航路 1 的航班数量为 28 架次,使用计划航路 2 的航班

表 1　各航路航班数量

可用航路	容量/(架次·h^{-1})	航班延误成本/(元·min^{-1})
计划航路 1	10	2100
计划航路 2	12	2400
临时航路 1	8	2600
临时航路 2	9	2900

表 2　航路信息

航班流	架次	航班流	架次
n_{j1}	28	n_{j2}	24
n_{j1}^{1}	20	n_{j2}^{1}	7
n_{j1}^{2}	8	n_{j2}^{2}	17

数量为24架。根据管制部门发布的航路可用时隙表以及航班信息表(表3～表6),为航班进行排序以及选择航路。从而对比单个航路交叉点和井字形航路构型在延误成本和旅客平均延误时间方面的区别。

通过上述所提供的数据,使用MATLAB R2018b运行遗传算法,算法参数中设置种群大小为40,最大进化代数为200,交叉概率为0.9,变异概率为0.1。使用单个交叉点情况时,通过遗传算法,将使用计划航路1的28个航班和使用计划航路2的24个航班分配至两个航路的时隙表中。当使用井字形构型进行航班飞越时,此时多了两条临时航路1、2,管制员可通过临时航路的时隙将原本只能通过计划航路的航班进行分流到临时航路上。运行程序,得到遗传算法迭代曲线如图8所示。

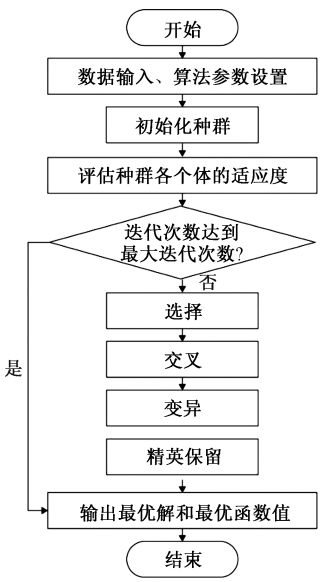

图7　遗传算法流程

表3　航路可用时隙1

编号	计划航路1	临时航路1	计划航路2	临时航路2
1	8:01:00	8:03:00	8:00:00	8:02:00
2	8:07:00	8:06:00	8:05:00	8:13:00
3	8:12:00	8:10:00	8:08:00	8:20:00
4	8:15:00	8:17:00	8:14:00	8:27:00
5	8:21:00	8:23:00	8:19:00	8:43:00
6	8:26:00	8:28:00	8:25:00	8:49:00
7	8:30:00	8:31:00	8:34:00	8:59:00
8	8:33:00	8:36:00	8:38:00	9:05:00
9	8:37:00	8:44:00	8:40:00	9:09:00
10	8:41:00	8:55:00	8:47:00	9:11:00
11	8:46:00	9:00:00	8:52:00	9:14:00
12	8:50:00	9:03:00	8:58:00	9:18:00
13	8:53:00	9:06:00	9:00:00	9:24:00
14	8:57:00	9:10:00	9:08:00	9:28:00
15	9:02:00	9:16:00	9:12:00	9:30:00

基于遗传算法求解所得到的结果表明,当使用单个交叉点构型时,航班总延误成本为300 300元,旅客平均延误时间为2.41 min;当使用井字型航路构型时,航班总延误成本为153 141.67元,旅客平均延误

表4　航路可用时隙2

编号	计划航路1	临时航路1	计划航路2	临时航路2
16	9:04:00	9:20:00	9:17:00	9:31:00
17	9:07:00	9:23:00	9:21:00	9:35:00
18	9:13:00	9:25:00	9:27:00	9:42:00
19	9:15:00	9:29:00	9:33:00	9:47:00
20	9:19:00	9:34:00	9:39:00	9:52:00
21	9:22:00	9:38:00	9:44:00	10:03:00
22	9:26:00	9:40:00	9:49:00	10:11:00
23	9:32:00	9:43:00	9:54:00	10:16:00
24	9:37:00	9:48:00	9:57:00	10:20:00
25	9:41:00	9:51:00	10:02:00	10:23:00
26	9:46:00	9:55:00	10:07:00	10:27:00
27	9:50:00	9:59:00	10:12:00	10:30:00
28	9:53:00	10:01:00	10:15:00	10:32:00
29	9:58:00	10:06:00	10:17:00	10:35:00
30	10:04:00	10:10:00	10:21:00	10:37:00

表5　使用计划航路1的航班信息

航班编号	机型	载客数	预计到达交叉点时间	航班编号	机型	载客数	预计到达交叉点时间
1	M	130	8:00:32	15	H	280	9:01:09
2	M	135	8:02:11	16	M	130	9:04:55
3	H	270	8:05:08	17	M	125	9:08:53
4	M	120	8:09:34	18	M	140	9:11:17
5	M	140	8:14:43	19	M	120	9:13:12
6	M	150	8:22:07	20	L	55	9:15:33
7	L	50	8:27:09	21	M	145	9:18:46
8	M	110	8:33:26	22	H	310	9:21:25
9	H	300	8:40:53	23	M	115	9:26:23
10	M	140	8:44:17	24	M	120	9:33:36
11	M	145	8:49:23	25	M	130	9:38:44
12	H	290	8:53:53	26	M	135	9:44:06
13	M	125	8:56:17	27	H	270	9:49:23
14	M	130	8:59:36	28	M	140	9:57:57

表6　使用计划航路2的航班信息

航班编号	机型	载客数	预计到达交叉点时间	航班编号	机型	载客数	预计到达交叉点时间
1	H	320	8:01:22	13	M	115	9:00:11
2	M	150	8:07:53	14	M	120	9:06:22
3	M	130	8:11:07	15	H	250	9:12:52
4	L	40	8:13:17	16	M	135	9:17:09
5	M	120	8:15:36	17	M	140	9:23:31
6	H	270	8:19:57	18	M	120	9:29:47
7	M	160	8:26:17	19	L	40	9:34:17
8	M	170	8:35:55	20	M	115	9:36:55
9	L	50	8:42:17	21	M	125	9:42:32
10	M	145	8:46:28	22	H	285	9:47:10
11	H	300	8:55:06	23	M	145	9:54:43
12	M	140	8:58:12	24	M	135	9:59:17

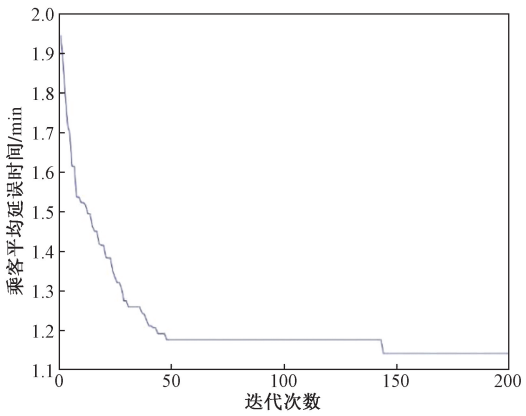

图8 遗传算法迭代曲线

时间为1.14 min。从上述结果对比分析可得出，航班总延误成本降低了49%，旅客平均延误时间减少了52.7%，验证了算法的可行性。同时也表明在航路交叉点流量较大时，通过变换井字形构型，能够较好地疏通拥堵，降低航班的飞行成本及旅客的延误时间。通过该算法所得出的结果也可以为管制部门根据空域的实际情况选择合适的构型选择方案，并提供一些在TBO运行下管制方法的参考。

3 结语

本文建立了航路交叉点容量模型，通过对航路动态容量、静态容量的公式引出了单个航路交叉点及井字形构型的容量公式。同时，设置模型目标函数，比较两种构型在延误成本和延误时间方面的区别。基于对民航航路交叉点的仿真，对比两种构型，研究表明井字形构型可以显著提高航路交叉点容量，减少航班的延误成本和旅客延误时间。在TBO运行下，管制单位高空管制规则提供一些新的策略和思考。另外，本文对于降维之后的井字形航段只考虑了垂直情况，存在着局限性，在今后的研究中还要对井字形航段的不同角度情况进行讨论验证。同时，井字形航路构型有着飞行距离长、空域资源占用大等缺点，在接下来的研究过程中需要对该构型进行更加客观准确的研究。

参考文献

[1] WANG S,GONG Y. Research on air route network nodes optimization with avoiding the three areas[J]. Safety Science,2014,66:9-18.

[2] TRAN N P,PHAM D,GOH S K,et al. An intelligent interactive conflict solver incorporating air traffic controllers' preferences using reinforcement learning[C]//Integrated Communications,Navigation and Surveillance Conference (ICNS). IEEE,Herndon,VA,USA:2019.

[3] ZHI H M,ERIC FERON,KARLBILIMORIA. Stability and performance of intersecting aircraft flows undern decentralized conflict avoidance rules[J]. Transactions on Intelligent Transportation Systems,2001,2(2):101-109.

[4] 张晨，胡明华，张进，基于管型空域配置的交通复杂性管理[J]，系统管理学报，2012，21(3)：327-335.

[5] 辛正伟. 航路网络规划技术研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2013.

[6] 戴福青，庞笔照，任治，等. 面向管型航路运行的交叉点拥挤风险评估[J]. 武汉理工大学学报，2018(2)：42-49.

[7] 申晨，沐瑶，汤凯，等. 基于交通流邻近度的空域容量评估[J]. 民航学报，2022，6(2)：51-56.

[8] 马玲，刘韦廷，王航臣. 基于交叉点复杂度的空域通行能力优化方法[J]. 科学技术与工程，2022，22(24)：10796-10804.

[9] 刘豪，朱代武，马琳辉. 基于粗糙集AROD算法的航路交叉点容量预测[J]. 西安航空学院学报，2021，39(1)：25-28，59.

[10] 何琛. 基于容量的交叉点航路构型研究[D]. 天津：中国民航大学，2017.

[11] 许扬，许俐，赵征. 基于交叉航路影响的航路容量模型研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版)，2016，32(4)：498-502.

[12] 张潇潇. 航路交叉点容量优化和排序模型研究[D]. 天津：中国民航大学，2016.

Research on Dynamic Programming of Airway Intersections

WU Dingjie[1], XU Lingyu[2], ZHU Li[2], ZHOU Dingkai[2]

(1. Academic Affairs Office,Civil Aviation Flight University of China,Guanghan 618307,Sichuan,China;
2. School of Air Traffic Management,Civil Aviation Flight University of China,Guanghan 618307,Sichuan,China)

Abstract: TBO operation is the mainstream direction of the future civil aviation control operation, to alleviate the current air route intersection flow and reduce congestion. In the background of TBO operation, the dimension reduction method to build the font configuration was used. The model of route crossing point was established, and the capacity formula of single route crossing point and shaft configuration crossing point was proposed. Combined with the simulation of a civil aviation route crossing point in peak time, the results showed that the shaft configuration capacity increased by 35.4% compared with that of single route crossing point. Then, the objective function of the model was set, and the genetic algorithm was used to solve the model. It is concluded that compared with the single route crossing point, the cross point of the I-shape configuration reduces the cost of flight delay by 49% and the average delay time of passengers by 52.7%. The results show that, for high-flow route intersections, congestion can be effectively alleviated and route resources can be coordinated by changing the well shape configuration.

Keywords: route intersection; genetic algorithm; crossover capacity; crossbar configuration