

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.04.002

危险天气下基于多重 Morphin 算法的 终端区三维实时改航方法

张兆宁 魏中慧

(中国民航大学空中交通管理学院,天津,300300)

摘要:基于多重 Morphin 算法,建立了终端区三维实时改航方法。该方法首先根据航空器当前飞行状态按不同的转弯角和爬升/下滑角生成一组弧线,随后在每条弧线的末端按同样方式反复运行,形成若干条由弧线组成的路径,最后对所有路径进行综合评估,找到当前时刻的改航路径。算例分析表明,该方法提供的改航路径可以保证航空器运行的安全与高效,在危险天气出现时更加充分地利用终端区空域资源,同时计算时间短、可行性高。

关键词:实时改航;三维改航;危险天气;终端区;Morphin 算法

中图分类号:V355.1

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2015)04-0467-07

3-D Real-Time Deviation Method for Avoiding Hazardous Weather in Terminal Airspace Based on Morphin Planning Algorithm

Zhang Zhaoning, Wei Zhonghui

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

Abstract: A 3-D real-time deviation method in terminal airspace is presented based on the multiple Morphin planning algorithm. Firstly, a set of arcs is generated with various changes of heading, and angles of climb/descent in accordance with present attitude. Then each end of the arcs is carried out such operation to regenerate candidate deviation routes. Finally, the optimal route is selected with comprehensive assessments. The example proves the reliability and the efficiency of the method in providing safe and efficient deviation, and the improvement of the usage of hazardous-weather-effected terminal airspace.

Key words: real-time deviation; 3-D deviation; hazardous weather; terminal airspace; Morphin planning algorithm

危险天气会直接导致空域容量减小,该影响在终端区内尤为明显。目前常见的应对方法主要包括地面等待措施、空中等待措施和改航措施。前两者在实际运行中相对容易,但燃油和时间成本分别较高;在空域流量尚未达到容量时,实施改航措施更有效。另外,由于危险天气的位置和尺度多随时间变化,仅采用起飞前规划完毕的静态改航已无法满足实际应用,因此有必要进行实时改航。

危险天气下的实时改航问题在近十余年来取得了较大进展。区域管制区改航方面,Nilim 等于

2001 年使用动态规划算法对单架飞机在恶劣天气下的路径规划问题进行求解^[1],并于 2003 年将算法模型拓展到多架飞机的情况^[2]。2004 年,Prete 等基于确定的气象预测条件,在过渡空域内利用相邻网格连接度的路径搜索方法生成临时航线^[3]。2006 年,Nilim 等就危险天气的随机移动,通过马尔科夫过程和动态规划算法得到了实时改航方法^[4]。2009 年,李雄等针对块状、带状、散点状分布的危险天气,分别提出对应的算法进行最佳改航路径搜索^[5]。同年,徐肖豪等在考虑空中交通管制

收稿日期:2015-07-01;修订日期:2015-08-01

作者简介:张兆宁,男,教授,主要研究方向:空中交通规划与管理。

通信作者:张兆宁,E-mail: zzhaoning@263.net。

程序和航空器性能的基础上,提出了基于人工势场算法的改航策略^[6]。2012年,王莉莉等针对初始改航航迹的生成,提出用改进的几何圆切法规划出临时航线^[7]。2014年,王莉莉等基于威胁概率模型,分别从同高度层、改变高度层两角度提出了实时改航模型^[8,9]。

终端区改航方面,Davidson 等于 2004 年在确定的气象预测条件下基于标准进场航线、基于流量和自由飞行 3 种改航策略^[10]。2008 年,顾英豪针对恶劣天气建立了马尔可夫-似然模型,提出了进近区域的改航方案^[11]。

目前,国内外文献多针对区域管制区内的改航,且方法常见为同高度层内的二维改航。终端区空域资源紧张,二维改航具有一定的局限性,危险天气影响范围较大时该局限性更为突出。研究危险天气下的三维实时改航方法对终端区范围的空中交通管理具有很高的指导意义,对进一步保障飞行安全、提高飞行效率均有积极的作用。

Morphin 算法^[12]的核心思想是基于当前运动状态在一定空间范围内按不同的偏转角生成一组树状的搜索路径,通过对所有搜索路径进行综合评估,得到最优路径。该方法最早应用于月球车避障,计算效率高,能处理环境建模的不确定性,同时能与全局规划算法较好地结合^[13]。危险天气下的终端区三维实时改航要求决断迅速,适应随时变化的危险天气区域,保证安全的前提下兼顾效率,与 Morphin 算法的特点相吻合,适合用以解决。

本文在 Morphin 算法的基础上改进形成多重 Morphin 算法,并建立对应的安全性函数、高效性函数和综合评价函数,为雷达管制条件下管制员引导航空器实施三维实时改航提供更为丰富的理论基础。

1 多重 Morphin 算法

Morphin 算法由运动模型和评价函数两部分组成。运动模型的基本思想是在前进方向按相同的时间跨度、不同的偏转角度生成一组路径。利用评价函数对每条路径进行评估,得到一条最优路径,即下一时刻的执行路径(图 1)。

Morphin 算法在每个时间跨度内,一条搜索路径仅对应一个偏转角度,且求得的最优路径为局部最优解。因此,环境复杂时必须扩大搜索范围,否则难以得到与实际最优路径一致的结果。针对该问题,文献^[14]证明可通过多重 Morphin 算法加

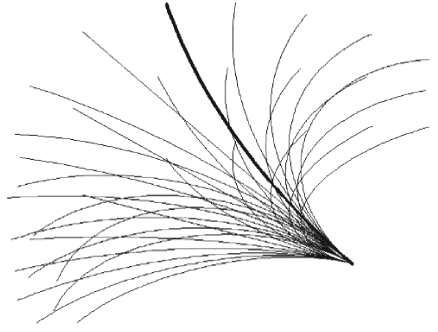


图 1 Morphin 算法

Fig. 1 Morphin algorithm

以解决,即在 Morphin 算法每条搜索路径的末端再次构造 Morphin 搜索路径,生成一个树状的搜索路径簇,将每个时间跨度内的一重决策变为多重决策。图 2 为三重 Morphin 算法的示意图。

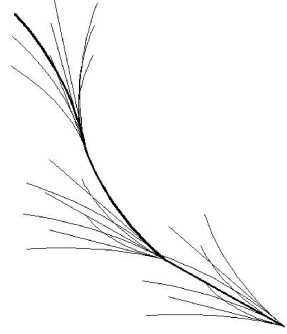


图 2 三重 Morphin 算法

Fig. 2 Multiple Morphin algorithm

为了表述方便,可将组成一条完整搜索路径的所有子搜索路径均称为搜索弧。

运动模型的建立实则建立搜索路径组和搜索弧组。搜索路径组指的是由当前时刻运动信息得到的任意时间段后所有可能的位置向量。搜索路径组由多组搜索弧组成。一组搜索弧指的是自某一时间起点至一个时间步长后所有可能的位置向量。

已知物体当前的位置、速度、俯仰角及方向角,即 $[x(t), y(t), h(t), v(t), \varphi(t), \theta(t)]$ 。以该物体正向下方运动为例,可以推算出搜索路径组

$$\begin{bmatrix} x(t+\tau) \\ y(t+\tau) \\ h(t+\tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ h(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v(t)\tau\cos\varphi_s(t)\sin\theta_s(t) \\ v(t)\tau\sin\varphi_s(t)\sin\theta_s(t) \\ v(t)\tau\cos\theta_s(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} -\varphi_{\max} \leq \varphi_s(t) \leq \varphi_{\max} \\ 0 \leq \theta_s(t) \leq \theta_{\max} \end{cases}$$

式中: τ 为搜索路径对应的时间段长度, 必须大于与障碍物保持最小安全距离所需的运动时间; $\varphi_s(t)$ 和 φ_{\max} 表示搜索转弯角和最大转弯角, $\varphi_s(t) = 0$ 时横向运动方向不变; $\theta_s(t)$ 和 θ_{\max} 表示搜索俯仰角和最大俯仰角, $\theta_s(t) = 0$ 时纵向运动方向不变。

搜索弧组建立方法为

$$\begin{bmatrix} x(t+i\lambda) \\ y(t+i\lambda) \\ h(t+i\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t+(i-1)\lambda) \\ y(t+(i-1)\lambda) \\ h(t+(i-1)\lambda) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v(t)\lambda\cos\varphi_s(t)\sin\theta_s(t) \\ v(t)\lambda\sin\varphi_s(t)\sin\theta_s(t) \\ v(t)\lambda\cos\theta_s(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

式中: λ 为时间步长; i 为时间步长的计数, 也表示搜索弧组的计数; n 为时间步长的总数, 即多重Morphin算法的重数, 当 $n = 1$ 时该算法退化为Morphin算法。 n 表征搜索范围的大小: λ 相等的情况下, n 越大搜索准确性越高, 同时计算量也越大。 n 和 λ 的组合可由计算机仿真得到最优值, 也可以根据实际运行情况人为设定。

类似地, 可以得到向上方运动的搜索路径组。

多重Morphin算法包含至少一个评价函数, 从而能够对生成的搜索路径进行优选。该算法并未具体规定评价函数的形式, 但通常应考虑安全和高效两方因素。

2 危险天气下的终端区三维实时改航

危险天气下的终端区三维实时改航基于飞行管理计算机和飞机通信、寻址与报告系统提供的飞行数据生成搜索路径组, 从安全、效率两个角度设置评价函数, 得到合理的实时改航路径。

2.1 三维实时改航运动模型

多重Morphin算法的运动模型在危险天气下的终端区三维实时改航完全适用。已知航空器当前运动信息 $[x(t), y(t), h(t), v(t), \varphi(t), \theta(t)]$, 即位置、速度、航向角、爬升/下滑角。以下降阶段为例, 建立搜索弧组(式(3))。所有首尾相连的搜索弧组成一条完整的搜索路径, 所有搜索路径的集合为搜索路径组

$$\begin{bmatrix} x(t+i\lambda) \\ y(t+i\lambda) \\ h(t+i\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t+(i-1)\lambda) \\ y(t+(i-1)\lambda) \\ h(t+(i-1)\lambda) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} v(t)\lambda\cos(\varphi_s(t) - \varphi(t))\sin(\theta_s(t) - \theta(t)) \\ v(t)\lambda\sin(\varphi_s(t) - \varphi(t))\sin(\theta_s(t) - \theta(t)) \\ v(t)\lambda\cos(\theta_s(t) - \theta(t)) \end{bmatrix}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} -\varphi_{\max} \leq (\varphi_s(t) - \varphi(t)) \leq \varphi_{\max} \\ 0 \leq (\theta_s(t) - \theta(t)) \leq \theta_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

式中: λ 为时间步长; i 为时间步长的计数, 也表示搜索弧组的计数; n 为时间步长的总数, 即多重Morphin算法的重数, 当 $n = 1$ 时该算法退化为Morphin算法; $n\lambda$ 必须大于危险接近距离^[15]对应的飞行时间; $\varphi_s(t)$ 和 φ_{\max} 表示搜索航向角和最大航向变化角, $\varphi_s(t) = \varphi(t)$ 时航向不变; $\theta_s(t)$ 和 θ_{\max} 表示搜索爬升角和最大爬升变化角, $\theta_s(t) = \theta(t)$ 时爬升角不变。

受到管制技术的限制, 航空器目前无法实现连续下降进近, 必须由管制员不断下达调速指令, 令航空器每匀速飞行一段时间后减速一次, 从而顺利下降, 安全着陆。式(3)表示的即为各匀速飞行阶段。如果没有管制员人为干预, 航空器应如式(4)所示定期减速

$$v(t+n\lambda) = v(t) - \Delta v(t) \quad (4)$$

式中: $\Delta v(t) = \frac{\alpha v(t)}{\beta D(t)}$; $v(t+n\lambda)$ 为下一时间跨度的速度; $v(t)$ 为当前时刻的速度; $\Delta v(t)$ 为速度变化量; $D(t)$ 为当前时刻至目标机场的距离; α 为速度参数, β 为距离参数, 两参数满足 $0 < \alpha \leq 1$, $\beta \geq 1$, 具体值可通过计算机仿真或根据实际人为设定得到。

同时, 由于航空器低速状态下无法完成爬升, 应为每一飞行高度设置临界速度, 为下一时刻是否可以选择爬升改航提供决策支持。临界速度与飞行高度的具体对应关系可参见航空器性能手册。

类似地, 可以得到爬升阶段的搜索路径组。

2.2 评价函数

空中交通管理的目标是保证飞行的安全和高效, 因此评价函数应综合考虑这两方面的影响。安全性可用安全性函数来衡量, 即搜索路径和危险天气区域的距离与最小安全距离之比; 高效性由高效性函数来表征, 即执行的搜索路径与目的地点的趋向水平; 通过两函数的线性叠加得到综合性函数, 作为对搜索路径的综合评价。

多重Morphin算法下每条搜索路径均由若干搜索弧组成, 现设每组搜索弧内包含 m 条搜索弧,

第 i 组搜索弧组中第 j 条搜索弧上的点为 s_{ijk} , $j = 1, 2, \dots, m$, $k = 0, 1, \dots, \infty$ 。特别地, s_{ij0} 表示第 i 组搜索弧组中第 j 条搜索的起点, $s_{ij\infty}$ 表示该弧的终点, 因此该弧也可表示为 $s_{ij0}s_{ij\infty}$ 。

2.2.1 安全性函数

安全性函数表征的是航空器沿某条搜索路径飞行时的安全水平, 涉及两个参量: 搜索路径与危险天气区域的距离、航空器与危险天气区域应保持的最小安全间隔。

实际危险天气区域 (Real hazardous zone, RHZ) 的识别可借助多普勒雷达的平面位置显示器和垂直高度显示器实现。为保证飞行安全, 将 RHZ 按照一定的安全裕度外推得到飞行受限区 (Restricted zone, RZ), 该裕度范围内的区域则称为危险天气保护区域 (Protection zone, PZ)。根据民航规章规定, 与 RHZ 的侧向距离至少为 5 km, 与云顶垂直距离至少为 1.5 km, 与云底垂直距离至少为 0.4 km。RHZ、RZ 和 PZ 的关系如图 3 所示。

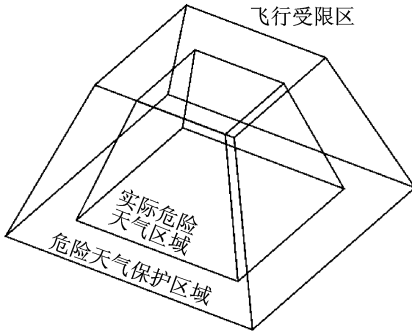


图3 实际危险天气区域、危险天气保护区域及飞行受限区关系示意

Fig. 3 Connection between RHZ, PZ and RZ

基于 RHZ 及 PZ, 定义搜索弧上的点与 RHZ 的距离

$$d(s_{ijk}, \text{RHZ}) = \min_{r=1}^q \{ |s_{ijk}, p_{\text{RHZ}, r}| \} \quad (5)$$

式中: $p_{\text{RHZ}, r}$ 表示 RHZ 的第 r 个表面, q 为危险天气区域表面的总数。

由此得到第 i 组搜索弧上的任一点 s_{ijk} 的安全性函数 $f_{sa}(s_{ijk})$

$$f_{sa}(s_{ijk}) = \begin{cases} 0 & s \in \text{RHZ} \\ \frac{d(s_{ijk}, \text{RHZ})}{D} & s \in \text{PZ} \\ 1 & s \notin \text{RZ} \end{cases}$$

$$D = \begin{cases} 1.5 & h(t+i\lambda) \geq h_{\text{RHZmax}} \\ 0.4 & h(t+i\lambda) \leq h_{\text{RHZmin}} \\ 5.0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: D 表示危险天气保护区域在不同方向的厚度; h_{RHZmax} 和 h_{RHZmin} 分别表示危险天气区域最高点和最低点的高度值。

飞行速度和时间步长确定的前提下, 搜索弧 $s_{ij0}s_{ij\infty}$ 的长度 $l(s_{ij0}s_{ij\infty})$ 是定值, 因此可以计算出整段搜索弧 $s_{ij0}s_{ij\infty}$ 的安全值

$$f_{sa}(s_{ij0}s_{ij\infty}) = \frac{\int_{s_{ij0}s_{ij\infty}} f_{sa}(s_{ijk}) ds}{l(s_{ij0}s_{ij\infty})} \quad (7)$$

该函数的值为 $[0, 1]$, 取值越大安全水平越高。

2.2.2 高效性函数

高效性函数表征的是航空器改航过程中对目的地点的保持和趋向程度, 涉及到的参量为偏航角。

偏航角指的是航空器航迹线与计划航线的夹角, 取值范围为 $(-180^\circ, 180^\circ]$, 其中负值表示航迹线偏在航线左侧, 正值表示航迹线偏在航线右侧^[16]。该数据可以从航空器的主飞行显示器和飞行管理计算机中得到。

由此定义高效性函数

$$f_{\alpha}(s_{ij0}s_{ij\infty}) = \frac{|\text{TKE}(s_{ij0}s_{ij\infty})|}{180} \quad (8)$$

该函数的值为 $[0, 1]$, 取值越小目标趋向水平越高。

2.2.3 综合评价函数

对搜索路径进行评估时应综合考虑安全性和高效性。由于搜索路径由搜索弧组成, 因此首先建立搜索弧综合评价函数

$$f(s_{ij0}s_{ij\infty}) = c_1 \times f_{sa}(s_{ij0}s_{ij\infty}) - c_2 \times f_{\alpha}(s_{ij0}s_{ij\infty}) \quad (9)$$

式中: c_1 和 c_2 为权系数, 取值范围均为 $[0, 1]$, 且满足 $c_1 + c_2 = 1$ 。增大 c_1 , 航空器将选择更安全的路径; 增大 c_2 , 航空器将在更短的时间内飞至目的地。该函数值越大, 该搜索弧的综合水平越高。

由于需要考虑远端障碍物对路径选择的影响, 因此应首先就极远端搜索弧进行综合水平评估, 再逐渐向近端推进。建立搜索路径综合评价函数

$$F(s_{ij0}s_{ij\infty}, f^*(s_{ij0}s_{ij\infty})) = \max(f(s_{ij0}s_{ij\infty}) + F^*(s_{(i+1)j_0}s_{(i+1)j_{\infty}}, f^*(s_{(i+1)j_0}s_{(i+1)j_{\infty}}))) \quad (10)$$

式中: $f^*(s_{ij0}s_{ij\infty}) = \max f(s_{ij0}s_{ij\infty})$; $f^*(s_{(n+1)j_0}s_{(n+1)j_{\infty}}) = 0, i = n$ 。其中, 当 $i = 1$ 时, 该

函数表示的是从当前时刻至 n 个时间步长后的最佳路径所对应的综合评价值。通过不断更新当前时刻,即可完成实时改航路径规划。

3 算例分析

本算例基于三重 Morphin 算法,选取任意时刻作为时间起点,计算 3 个时间步长后所有搜索路径对应的安全性函数值、高效性函数值和综合评价函数之,选出综合评价最优者作为当前时刻的最优飞行路径。随着时间推移,可以不断计算实时最优飞行路径。

3.1 背景描述与假设条件

本算例以北京终端区,即北京区域管制区北京本部的空域结构(图 4)为背景,结合该区域 2010 年 6 月 11 日北京时间 17:00:00~19:48:00 之间的气象信息,以及 B757-200 的典型飞行剖面。受到数据来源的限制,假设飞行受限区均为底高 1 500 m,顶高 12 000 m 的直棱柱,不考虑风的影响。

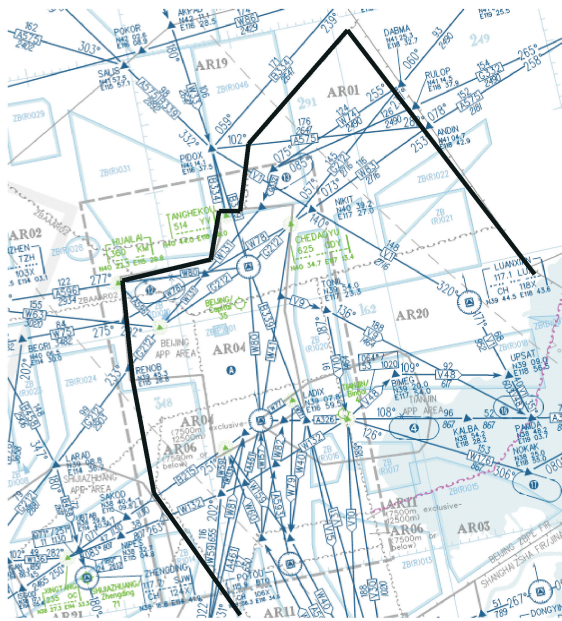


图 4 北京终端区航图

Fig. 4 Aeronautical chart of Beijing terminal

Morphin 算法的重数取 3 重。搜索航向角的范围为 $[\varphi(t) - 180, \varphi(t) + 180]$,最小单位为 5° ;搜索爬升/下降角的范围为 $[\theta(t) - 5, \theta(t) + 5]$,最小单位分别为 0.5° 。搜索弧的编号规则为俯视顺时针依次记作 $1, 2, \dots, 73$,侧视顺时针依次记作 $1, 2, \dots, 21$ 。以第一组搜索弧的中心搜索弧为例,该弧记作 $S_{1,(37,11),0} S_{1,(37,11),\infty}$ 。综合评价时令权系数 $c_1 =$

$0.6, c_2 = 0.4$,此时搜索弧综合评价函数 $f(S_{ij0} S_{ij\infty})$ 值域为 $[-0.4, 0.6]$,三重搜索路径综合评价函数 $F(S_{1j0} S_{1j\infty}, f^*(S_{1j0} S_{1j\infty}))$ 的值域为 $[-1.2, 1.8]$ 。

3.2 计算算例

根据 17:00:00 时的气象信息识别出危险天气区域和飞行受限区。此时航空器位于 ANGHEK-OU 导航台上空,目的地天津滨海国际机场,高度 7 500 m,地速 600 km/h,下降率 18 km/h(即下降梯度 7.2% ,下滑角 4°),航向角 135° ;取时间步长 45 s。此时无法从云上绕飞,侧向绕飞和云下绕飞限制下的最小时间步长分别为 30 s 和 2.4 s,均小于当前时间步长。

经过计算最优路径为 $S_{1,(37,11),0} S_{1,(37,11),\infty} - S_{2,(37,11),0} S_{2,(37,11),\infty} - S_{3,(37,11),0} S_{3,(37,11),\infty}$,即搜索航向角 135° ,搜索下滑角 1.5° 。第三组至第一组搜索弧的综合评价值分别为 0.6、0.6 和 0.6,搜索路径综合评价值为 1.8,路径示意图见图 5。

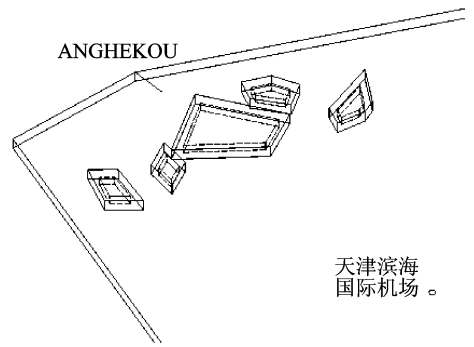


图 5 17:00:00 时的最优路径

Fig. 5 The optimum route at 17:00:00

17:03:45 时航空器位于 ANGHEK-OU I35037,高度 6 150 m,受到管制影响人为将地速减为 560 km/h,下降率减为 16 km/h(下滑角不变),航向角保持 135° 。经过计算,得到最优路径 $S_{1,(37,11),0} S_{1,(37,11),\infty} - S_{2,(36,11),0} S_{2,(36,11),\infty} - S_{3,(36,11),0} S_{3,(36,11),\infty}$,即以 135° 航向角和 1.5° 下滑角飞行 90 s,随后保持下滑角不变左转航向 5° 。第三组至第一组搜索弧的综合评价值分别为 0.589, 0.6 和 0.6,搜索路径综合评价值为 1.789,路径如图 6 所示。

3.3 结果分析

本算例通过 Python 语言编程,自终端区一边界点至目的机场实时完整地提出了改航方案,平均用时 1 s/次(CPU 1.7 GHz×2,RAM 1 G)。常见的基于遗传算法在同等条件下求解改航路径,运算

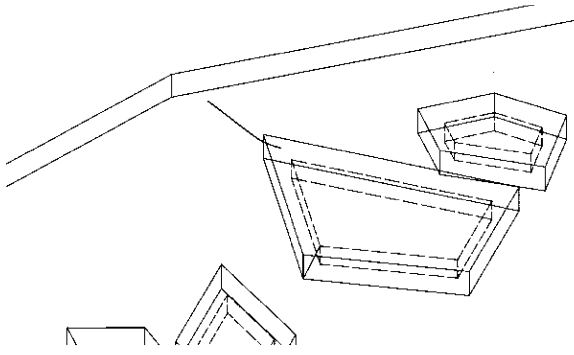


图6 17:03:45时的最优路径

Fig.6 The optimum route at 17:03:45

时间约为5 s/次^[5], 相较之下本算法显著地提高了运算速度。

另外, 本算例得到的改航方案全程无危险接近。偏航角最大值为 30° , 标准差为11.18。无危险天气影响时总飞行时间应为36 min, 本算例得到的总飞行时间为42 min, 延误6 min。可以认为, 本方法在保证安全的前提下兼顾了高效。

4 结束语

本文在Morphin算法的基础上改进形成多重Morphin算法, 建立危险天气影响下的三维实时改航运动模型, 并提出对应的安全性函数、高效性函数和综合评价函数。本方法计算迅速, 稳定性高, 可以在危险天气出现时充分利用终端区的空域资源, 保证航空器正常的爬升和下降, 有效实现三维实时改航, 为雷达管制条件下管制员引导航空器实施三维实时改航提供更为丰富的理论基础。

需要说明的是, 本文暂未考虑限制区和禁区对改航路径的影响, 但本质上两区域与飞行受限区一致, 即特定空域在部分时间内或永久不可使用, 因此可以通过同一方法求解。

另外, 本文提出的模型没有考虑危险天气移动的随机性, 仅通过雷达识别被动划设飞行受限区, 该问题在未来的研究中可进行进一步探讨。

参考文献:

[1] Nilim A, Ghaoui L E, Duong V, et al. Trajectory-based air traffic management under weather uncertainty[C]// Proceedings of the 4th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar. Santa Fe: [s. n.], 2001:1-11.

[2] Nilim A, Ghaoui L E, Duong V. Multi-aircraft routing and traffic flow management under uncertainty

[C]//5th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. Budapest: [s. n.], 2003: 23-27.

[3] Prete J, Mitchell J S B. Safe routing of multiple aircraft flows in the presence of time-varying weather data[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Monterey: [s. n.], 2004: 462-482.

[4] Alexandre A, Sohier D, Nilim A, et al. Optimal path planning for air traffic flow management under stochastic weather and capacity constraints[C]// Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Research, Innovation and Vision for the Future. Ho Chi Minh City: [s. n.], 2006:1-6.

[5] 李雄. 飞行危险天气下的航班改航路径规划研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.

Li Xiong. Flight rerouting path planning in severe weather[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.

[6] 徐肖豪, 李成功, 赵巍飞, 等. 基于人工势场算法的改航路径规划[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(6): 64-68.

Xu Xiaohao, Li Chenggong, Zhao Yifei, et al. Rerouting path planning based on artificial potential field algorithm[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(6): 64-68.

[7] 王莉莉, 杨惠东. 飞行冲突条件下基于几何算法的改航策略研究[J]. 飞行力学, 2012(5): 466-469.

Wang Lili, Yang Huidong. Rerouting strategy research based on geometry algorithm in flight conflict[J]. Flight Dynamics, 2012(5): 466-469.

[8] 王莉莉, 周娟. 动态突发天气下同高度层改航模型和算法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(5): 86-90.

Wang Lili, Zhou Juan. Research on model and algorithm of divert on same flightlevel under dynamic abrupt weather[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(5): 86-90.

[9] 王莉莉, 周娟. 突发天气条件下航空器改变高度的改航模型和算法研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(7): 106-110.

Wang Lili, Zhou Juan. Research on aircraft diversion model and algorithm for changing altitude under breaking weather condition[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(7): 106-110.

[10] Goli Davidson, Jimmy Krozel, Green S M, et al. Strategic traffic flow management concept of opera-

- tions[C]//Collection of Technical Papers--AIAA 4th Aviation Technology, Integration, and Operations Forum. [S.l.]:AIAA,2004:798-807.
- [11] 顾英豪. 恶劣天气下终端区进场航空器的改航研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
Gu Yinghao. Aircraft arrivals dynamic rerouting in terminal area under weather uncertainty[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2008.
- [12] Simmons R, Henriksen L, Chrisman L, et al. Obstacle avoidance and safeguarding for a lunar rover[C] //Proceedings of AIAA Forum on Advanced Developments in Space Robotics. Madison:[s. n.],1996.
- [13] 万晓凤,胡伟,郑博嘉,等. 基于改进蚁群算法与Morphin算法的机器人路径规划方法[J]. 科技导报,2015,33(3):84-89.
Wan Xiaofeng, Hu Wei, Zheng Bojia, et al. Robot path planning method based algorithm and Morphin algorithm on improved ant colony[J]. Science & Technology Review,2015, 33(3):84-89.
- [14] 诸葛程晨,唐振民,石朝侠. 基于多层Morphin搜索树的UGV局部路径规划算法[J]. 机器人,2014,36(4):491-497.
Zhuge Chengchen, Tang Zhenmin, Shi Zhaoxia. A local path planning algorithm for UGV based on multilayer Morphin search tree[J]. Robot,2014,36(4):491-497.
- [15] 中国民用航空总局. 中国民用航空空中交通管理规则CCAR-93TM-R4[S]. 北京:中国民用航空总局,1993.
- [16] 张焕. 空中领航学[M]. 成都:西南交通大学出版社,2003.
Zhang Huan. Aeronautical navigation[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003.

