

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.06.002

航路序贯飞行条件下的航空器自主间隔控制

汤新民 郑鹏程

(南京航空航天大学民航学院,南京,211106)

摘要: 针对航路序贯飞行条件前机减速情况下两航空器的间隔保持问题,在考虑航路飞行存在的随机扰动因素的情况下,提出了基于滚动时域控制的航向角调整和真空速调整的混合间隔保持策略。对不考虑随机扰动的静态离线优化、仅使用速度调整的在线优化和混合间隔保持控制律在线优化 3 种间隔保持策略进行了对比,仿真的结果表明,不考虑随机扰动的静态优化在预计机动时间结束后没有回到航路中心线,仅考虑速度调整的间隔保持策略在 254 s 内完成了机动飞行,同时采用速度调整和航向调整的混合间隔保持策略在 97 s 内完成了机动飞行,机动效率提高了 61.8%。结果表明了混合间隔保持策略的有效性、高效性及鲁棒性。

关键词: 空中交通管理;水平间隔保持;自主间隔控制;飞行跟驰模型;滚动时域控制

中图分类号: U8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2019)06-0742-07

Aircraft Autonomous Separation Control Under Sequential Flying Conditions

TANG Xinmin, ZHENG Pengcheng

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: Aiming at the problem of separation assurance between two aircraft under the sequential flying conditions when the leading aircraft decelerating, the hybrid separation assurance strategy combined heading adjustment and true airspeed adjustment based on receding horizon control was proposed considering the random disturbance factors on the route. Three separation assurance strategies, including static offline optimization without counting the random disturbance, dynamic optimization of speed adjustment and hybrid separation assurance control law, were compared. In the simulation, an aircraft that adopted static offline strategy without considering the random disturbance did not return to the route centerline after the end of the predicted maneuver time; an aircraft that adopted speed adjustment separation assurance strategy completed the maneuver in 254 s; and an aircraft that adopted hybrid separation assurance strategy with speed adjustment and heading adjustment completed maneuver in 97 s, a maneuvering efficiency increased by 61.8%. The results show the effectiveness, efficiency and robustness of the hybrid separation assurance strategy.

Key words: air traffic management; horizontal separation assurance; autonomous separation control; flight following model; receding horizon control

基金项目: 国家自然科学基金(61773202)资助项目;四川省科技计划(2018JZ0030)资助项目;空管国家重点实验室开放基金(SKLATM201706)资助项目;民航重点实验室开放基金(CAMICKFJJ-2019-04)资助项目。

收稿日期: 2019-10-31; **修订日期:** 2019-11-18

作者简介: 汤新民,男,教授,博士生导师,入选江苏省“青蓝工程优秀青年骨干教师”、江苏省“六大人才高峰”、民航局科技“拔尖人才”。先后主持国家自然科学基金 4 项,省部级基金项目 3 项,其他各类科研课题 20 余项。出版专著 1 部,发表论文 60 余篇,其中 SCI/Ei 检索 30 余篇,获中国航空运输协会民航科学技术奖二等奖 1 项,江苏省科学技术奖二等奖 1 项,中国电子学会一等奖 1 项。

通信作者: 汤新民, E-mail: tangxinmin@nuaa.edu.cn。

引用格式: 汤新民,郑鹏程. 航路序贯飞行条件下的航空器自主间隔控制[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(6):742-748. TANG Xinmin, ZHENG Pengcheng. Aircraft Autonomous Separation Control Under Sequential Flying Conditions [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(6):742-748.

随着空域内航空器数量的增加、空域密度的增大,航路飞行过程中的航空器呈非自由的序贯飞行状态,前机运动状态的变化会引起前机与跟随航空器之间的间隔发生改变。在传统的地基管制模式下,管制员为航空器配备间隔,如果航空器之间存在潜在的冲突,管制员指示航空器进行机动飞行以保持规定的间隔,这种情况下的间隔保持的效率很大程度上取决于管制员的能力。

美国国家航空航天局认为,未来空中交通系统将由分布式协同空中交通管理系统代替现在使用的地基集中式空中交通管理系统,提出了航空器自主间隔保持系统的概念^[1]。2016年中国民用航空局在下发的《中国民航现代化空中交通管理系统体系架构》中提出我国民航现代化空管系统的体系架构,其中多模式间隔管理是在空域、流量、空地配合适当的条件下,将原来由空中交通管制员承担的冲突探测和间隔保证任务部分或完全授权给机组承担^[2]。在分布式自主间隔的实际运行过程中,当航空器的4维航迹存在随机扰动时,两航空器之间的纵向间隔是随机变化的。因此,有必要研究在4维航迹扰动下的具有一定鲁棒性的航空器自主间隔控制器。

近年来,航空器数量快速增长,空域容量逐渐达到饱和的现象引起学者的注意。如何解决有限的空域与日益增长的航班量之间的矛盾成为当前航空运输量增长的瓶颈之一。目前国内外关于自主间隔控制的研究主要集中在跟随间隔建模和跟随间隔保持算法两个方面。

在跟随间隔建模方面,张兆宁等将跟驰模型扩展到航空运输领域,并将管制员与飞行员的反应时间耦合到飞行跟驰模型中,用以精确计算航路序贯飞行条件下航空器保持稳定的跟驰飞行所需的纵向安全间隔,该方法将管制员与飞行员的反应时间量化,并分析管制员与飞行员的反应时间对纵向安全间隔的影响^[3];王莉莉等基于跟驰理论对单层航路建立了空中高速路交通流微观跟驰模型,并使用微观跟驰模型分析了后机跟驰反应强度的影响因素,通过对空中交通流量密度关系的分析,扩展出空中交通流的宏观流量模型,并将该模型用于分析航路流量与航空器起始间隔、后机加速度和起始速度之间的关系^[4]。为分析航空器在下降顶点(Top of descent, TOD)点下降的跟驰行为,Vinken等研究了基于恒定距离差的间隔、基于过点时间控制的间隔和基于恒定时间差的间隔3种不同的间隔标准,结果表明基于恒定时间差的间隔在间隔保持时仅需要较少次数、较低幅度的速度调整,因而具有最好的性能^[5]。Xie等^[6]提出了一种基于航路结构约束的3D空域复杂度度量方法,以客观地评估空

中交通复杂度。首先,基于路径引导,建立了“飞机对”对水平和垂直方向的影响模型。然后,根据模型在飞行标准方面的修改,给出了3D空域耦合复杂度模型。

在跟随间隔保持算法方面,Meng等采用庞特里亚金极小值原理以速度调整时间最短为目标,设计了以跟随航空器的速度为控制量的最优冲突解脱控制律,仅考虑速度调整策略的效率较低,并且没有考虑航路飞行中的随机扰动,得到的结果鲁棒性较差^[7];Wang等根据进场阶段的航空器提出一种危险值分布模型,以时间间隔为依据,给出每个航空器周围的危险值分布情况,根据进场路径上每架飞机的危险值重叠情况确定航空器之间的冲突等级,同时提出了一种利用跟随航空器减速的速度调节算法,改进后的飞机速度分布可用于将间隔时间保持在其最小要求值,以提升有限跑道/机场的容量^[8];Slater通过分析序贯飞行航空器队列中前机发生扰动时跟随航空器的频率响应,得出了将前机状态引入反馈控制律可获得更好的跟随间隔控制性能这一结论^[9];Nakamura等针对不同运行环境下的高密度空中走廊中航空器运行提出了多种间隔保持算法^[10-12];牟奇峰等提出了在多扰动环境中飞机速度与位移函数的构建方法,还探讨了实现飞行间隔预测控制的神经网络模型及技术条件,利用神经网络的自学习功能解决这类复杂的控制问题^[13]。对于多扇区移交过程中航空器的间隔保持问题,文献[14-15]以航班时刻为决策变量,建立以管制策略稳定性和延误成本为目标的优化模型,并设计相应进化算法,其结果提升了管制移交间隔的稳定性,提高多机场系统的进出港效率。

本文首先介绍飞行跟驰模型,之后在考虑随机扰动的同时,从现代控制理论和模型预测控制的角度将跟随航空器的加速度和航向作为控制量来设计航空器自主间隔控制器,最后对提出的航空器自主间隔控制器进行了仿真,并进行对比试验。

1 飞行跟驰模型

地面跟驰理论是研究在单向通行且无法超车路面上的车辆排队依次行驶时,后车跟随前车的行驶行为,并使用数学模型进行描述和解释该现象的一种理论。鉴于日益增长的航空运输量需求与受限的空域容量这一主要矛盾,航路飞行的航空器之间的间隔较小,航空器的运行处于非自由状态,前机运动状态的变化会影响跟随航空器的运动状态,这与地面跟驰模型相似,因此可以通过地面跟驰理论来研究序贯飞行条件下的航空器间隔。

航空器在航路飞行阶段常常受到高空风的影响,风矢量的不确定性使得航空器使用的空速矢量

与地面管制使用的地速矢量存在差异,根据空速矢量和风速矢量可以求解航空器实时的地速矢量^[16],如图1所示。图1中,TAS为真空速,MH表示磁航向,DA为偏流角,WA为风角,WS为风速,GS为地速, N_M 为磁北。

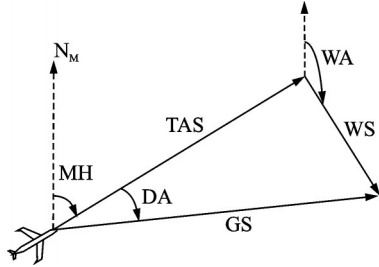


图1 飞行速度三角形

Fig. 1 Aircraft speed triangle

由飞行速度三角形可知

$$GS = TAS + WS \quad (1)$$

设航空器的真空速为 v_1 , 地速为 v_2 , 航向角为 φ , 航迹角为 θ , 则航空器的运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = v_1 \times \cos\varphi + w_1 = v_2 \times \cos\theta \\ \dot{y} = v_1 \times \sin\varphi + w_2 = v_2 \times \sin\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: x, y 分别为航空器的横向位置和纵向位置, w_1, w_2 分别为风速的横向分量和纵向分量。

2 满足最小间隔的最优控制模型

模型假设:两架航空器在同一条固定航路上进行序贯飞行,航线角为 H_0 , 航路宽度为 W 。两航空器飞行高度相同,航空器的性能相近,航空器之间不可违反的最小安全间隔为 d_{\min} , 管制员设置的或自主间隔运行所规定的两航空器间隔为 D , 将航空器作为质点看待。

初始状态,航路上的两架航空器呈序贯飞行状态,两航空器间的间隔为 D , 前后两航空器均以速度 v_0 进行平飞。初始时刻,前机突然受到扰动进行减速并将减速的信息通报管制员,前机的目标速度为 v_∞ , 本文将前机减速过程忽略,认为前机减速完成、后机采取机动飞行时两机间的间隔为 d_0 。

忽略垂直方向上的机动,模型采取的惯性坐标系为二维坐标系,坐标原点为跟随航空器开始采取机动飞行策略时的位置,前机沿航路中心线的飞行方向为 x 坐标轴正方向,垂直于航路中心线且指向飞机左侧翼尖为 y 坐标轴正方向。建立的二维坐标如图2所示。

在本模型中选取的状态向量为航空器的纵向位置、横向位置和真空速。因此前机的状态向量为 $s_i = (x_i, y_i, v_i)^T$, 后机的状态向量为 $s_j = (x_j, y_j, v_j)^T$ 。初始时刻,有

$$x_i(0) = d_0, x_j(0) = 0, y_i(0) = y_j(0) = 0 \quad (3)$$

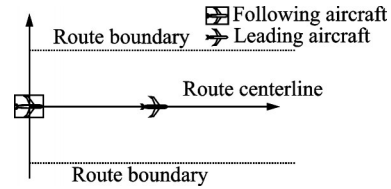


图2 惯性坐标系

Fig. 2 Inertial coordinate system

对于跟随航空器,选取状态变量

$$x_1(k) = x_f(k), x_2(k) = y_f(k), x_3(k) = v_f(k) \quad (4)$$

建立的离散系统状态方程如下

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + (x_3(k) + \frac{1}{2} \times a(k) \times \Delta t) \times \cos(\Delta H_f(k)) \times \Delta t + w_{s1}(k) \times \Delta t \\ x_2(k+1) = x_2(k) + (x_3(k) + \frac{1}{2} \times a(k) \times \Delta t) \times \sin(\Delta H_f(k)) \times \Delta t + w_{s2}(k) \times \Delta t \\ x_3(k+1) = x_3(k) + a(k) \times \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

式中:取航向角左偏为正; $x_1(k)$ 为 k 时刻跟随航空器的纵向位置; $x_2(k)$ 为 k 时刻跟随航空器的横向位置; $x_3(k)$ 为 k 时刻跟随航空器的真空速; $w_{s1}(k)$ 为 k 时刻跟随航空器所处位置风的纵向分量; $w_{s2}(k)$ 为 k 时刻跟随航空器所处位置风的横向分量; Δt 为相邻两个时刻之间的时长; $u(a(k), \Delta H_f(k))$ 为 k 时刻求解得到并在作用于下一时刻系统的控制律; $a(k)$ 为 k 时刻跟随航空器的真空速加速度; $\Delta H_f(k)$ 为 k 时刻跟随航空器相对于航路中心线的航向变化量。

系统的输出方程为下一时刻两机间的距离

$$d(a(k), \Delta H_f(k)) = \sqrt{(x_1(k+1) - x_2(k+1))^2 + (x_2(k+1))^2} \quad (6)$$

系统的初始状态选取为跟随航空器采取间隔保持策略进行机动飞行的瞬间,此时跟随航空器的状态为

$$\begin{cases} x_1(0) = 0 \\ x_2(0) = 0 \\ x_3(0) = v_0 \end{cases} \quad (7)$$

系统要求的最终状态是:后机回到航路中心线上与前机继续保持序贯飞行,前后机的速度相同且均为 v_∞ , 并且前后机的间隔恢复为规定安全间隔,用公式描述如下

$$\begin{cases} x_1(t_f) \leq x_i(t_f) - D \\ x_2(t_f) = 0 \\ x_3(t_f) = v_\infty \end{cases} \quad (8)$$

式中, t_f 是跟随航空器结束机动飞行回到航路中心线的时刻。

3 随机风场模型

考虑到高空风的随机性对跟随航空器的航迹和地速影响较大,且在所有的气象因素中,风矢量的不确定性是最常见且影响最大的因素,因此本文将高空风作为系统中的随机扰动。

根据建立的坐标系,可以将风矢量分解成平行于飞机纵轴方向和垂直于飞机纵轴方向的两个分量。风的组成可以分为两部分,预报的风矢量和实际系统中存在的预报误差^[17-18]。预报风就是由气象部门通过气象雷达、航空器报告等途径测定的该区域的风场信息;本文认为风误差服从某一高斯分布;某一时刻,航空器所在平面的风场信息如图3所示。

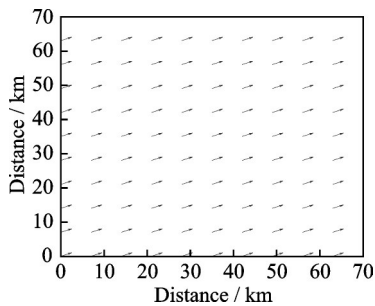


图3 航空器所在高度的瞬时风场信息

Fig.3 Instantaneous wind field information at the altitude of the aircraft

4 基于滚动时域控制的跟随航空器控制律求解

滚动时域控制 (Receding horizon control, RHC)是一类特殊的控制^[19]。它的当前控制动作是在每一个采样瞬间通过求解一个有限时域开环最优控制问题而获得。过程的当前状态作为最优控制问题的初始状态,只使用求解得到的最优控制序列中的第一个控制组合来对系统实施控制作用;待到下一采样时刻,再使用下一采样时刻计算出的最优控制序列的第一个控制组合来操作系统;如此循环往复,在控制的过程中对控制律进行不断的调整,最终能够得到鲁棒性较强的控制律。

将间隔保持过程的时间分为多个时域进行滚动优化,每个滚动时域的周期设为 Δt ,每个时域的优化目标设定为剩余的机动飞行耗时最短,即

$$J(k) = \min\{(n+k) \times \Delta t - k \times \Delta t\} \quad (9)$$

式中: $k \times \Delta t$ 为第 k 个滚动时域开始时刻机动飞行已耗费的时间; $(n+k) \times \Delta t$ 为机动飞行耗费的总时间。

间隔保持过程中的约束设置为:

(1)间隔保持过程中,两航空器间的间隔不得小于最小安全间隔;

(2)间隔保持过程中,跟随航空器不得超出航

路边界线范围;

(3)跟随航空器的加速度大小应在飞机的性能范围内;

(4)间隔保持过程中,跟随航空器每次机动的偏航角应在某一范围内。

用方程表示为

$$x_1(k+1) = x_1(k) + \left(x_3(k) + \frac{1}{2} \times a(k) \times \Delta t \right) \times \cos(\Delta H_f(k)) \times \Delta t + \omega s_1(k) \times \Delta t \quad (10)$$

$$x_2(k+1) = x_2(k) + \left(x_3(k) + \frac{1}{2} \times a(k) \times \Delta t \right) \times \sin(\Delta H_f(k)) \times \Delta t + \omega s_2(k) \times \Delta t \quad (11)$$

$$x_3(k+1) = x_3(k) + a(k) \times \Delta t \quad (12)$$

$$d(k+1) - d_{\min} \geq 0 \quad (13)$$

$$|x_2(k+1)| - W \leq 0 \quad (14)$$

$$v_{\min} \leq x_3(k+1) \leq v_{\max} \quad (15)$$

$$a_{\min} \leq a \leq a_{\max} \quad (16)$$

$$|\Delta H_f(k)| - \Delta H_{\max} \leq 0 \quad (17)$$

式(10—12)是系统运动学约束,式(13)是航空器对间隔的约束,式(14)是航路宽度约束,式(15)是速度约束,式(16)是加速度约束,式(17)是偏航角约束。

对于含有不等式约束的非线性最优化问题的求解,常常采用的方法通过内点罚函数法将多约束非线性优化问题转化成无约束非线性优化问题来进一步求解。使用内点罚函数法对该问题的构造的增广目标函数为

$$G = J + k_1 \times B_1 + k_2 \times B_2 + k_3 \times B_3 + k_4 \times B_4 + k_5 \times B_5 + k_6 \times B_6 + k_7 \times B_7 \quad (18)$$

系统约束对应的惩罚项为

$$B_1 = (d(k+1) - D_{\min})^{-1} \quad (19)$$

$$B_2 = (W - |x_2(k+1)|)^{-1} \quad (20)$$

$$B_3 = (x_3(k+1) - v_{\min})^{-1} \quad (21)$$

$$B_4 = (v_{\max} - x_3(k+1))^{-1} \quad (22)$$

$$B_5 = (a - a_{\min})^{-1} \quad (23)$$

$$B_6 = (a_{\max} - a)^{-1} \quad (24)$$

$$B_7 = ((\Delta H_{\max})^2 - (\Delta H_f(k))^2)^{-1} \quad (25)$$

式中: $k_i (i=1\sim 7)$ 为罚因子,是大于零的常数; $B_i (i=1\sim 7)$ 为惩罚项,分别对应于航空器间隔约束、航路边界约束、航空器速度约束、航空器加速度约束和机动飞行偏航角大小约束。

增广目标函数 G 关于 $a(k)$ 和 $\Delta H_f(k)$ 的下降梯度 ∇G 为

$$\nabla G = \begin{cases} \frac{\partial J}{\partial a(k)} + \sum_{k=1}^7 k_i \times \frac{\partial B_i}{\partial a(k)} \\ \frac{\partial J}{\partial \Delta H_f(k)} + \sum_{k=1}^7 k_i \times \frac{\partial B_i}{\partial \Delta H_f(k)} \end{cases} \quad (26)$$

使用最速下降法,即可求得第 k 个滚动时域内的混合最优间隔保持策略。

5 间隔保持策略的验证

本文以波音737-800机型为例。假设初始状态为:跟随航空器的初始坐标为(0 km, 0 km),真空速为850 km/h,沿航路中心线飞行;前机的初始坐标为(13 km, 0 km),减速完成后真空速为800 km/h,沿航路中心线飞行。如果不采取措施,两航空器的间隔会继续减小甚至违反最小间隔。

根据空中交通管理规则^[20]和实际运行的情况,对本模型设置的约束为:

- (1)最小安全间隔为10 km;
- (2)航路宽度为20 km,航路中心线两侧各10 km;
- (3)机动飞行的偏航角允许的范围为 $[-30^\circ, +30^\circ]$,航空器加速度范围为 $[-0.5 \text{ m/s}^2, +0.5 \text{ m/s}^2]$;
- (4)跟随航空器在 $(850 \pm 90) \text{ km/h}$ 速度范围内进行调速。

(4)跟随航空器在 $(850 \pm 90) \text{ km/h}$ 速度范围内进行调速。

随机扰动的设置:设置沿惯性坐标系 x 轴正方向和 y 轴正方向两个方向的风矢量,两个风矢量的风速大小均服从高斯分布,其中,纵向风速服从高斯分布 $N(50, 9)$,横向风速服从高斯分布 $N(20, 9)$ 。

设置每个滚动时域周期为5 s,使用滚动时域优化算法,得到的仿真结果为:跟随航空器通过调航向、调速度的混合间隔保持策略,在97 s内完成了机动飞行的过程,前后两机最终达到了相同的速度,并且两机间的间隔恢复到规定间隔。该过程两航空器的间隔随时间变化的规律如图4所示。

混合解脱策略间隔保持过程前后两机的位置随时间变化的关系如图5所示。混合间隔保持策略过程中后机的真空速随时间变化的关系如图6所示。混合间隔保持策略过程的航向偏航角/航迹偏航角随时间变化的关系如图7所示。

为了证明本文提出的间隔控制算法的鲁棒性和有效性,本文在相同仿真条件下进行了两个对比

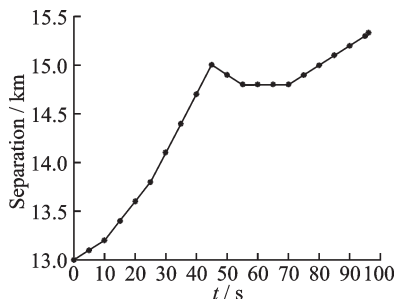


图4 混合间隔保持策略的间隔-时间图

Fig. 4 Separation-time diagram of hybrid separation assurance strategy

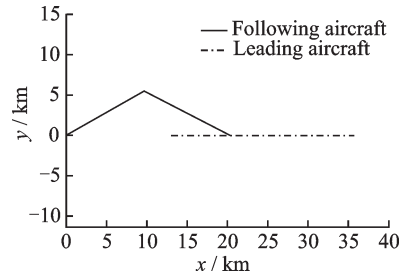


图5 混合间隔保持策略的两机的位置-时间图

Fig. 5 Position-time diagram of two aircraft of hybrid separation assurance strategy

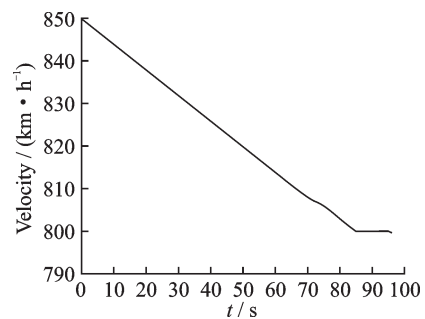


图6 混合间隔保持策略过程的速度-时间图

Fig. 6 Velocity-time diagram of hybrid separation assurance strategy

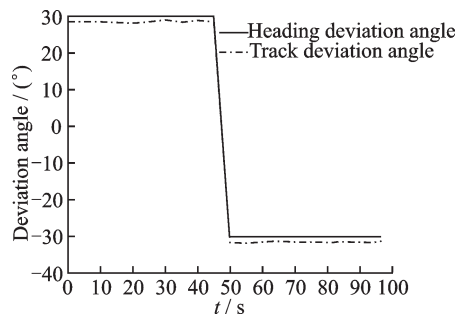


图7 混合间隔保持策略过程的偏航角-时间图

Fig. 7 Deviation angle-time diagram of hybrid separation assurance strategy

实验。

对比实验1:在相同的仿真条件下,在起始时刻,根据当时系统的状态以及此时外界的风场信息,进行全局最优计算,求解跟随航空器的最优控制律并将其作用于跟随航空器,得到的跟随航空器位置随时间变化的规律如图8所示。

对比实验1的结果表明,由于随机风场的存在,跟随航空器按照最优控制律进行飞行,最终在预计的时间内没有回到航路上。

对比实验2:本文在相同的仿真条件下同时进行了不考虑航向调整而仅使用速度调整间隔保持策略的仿真。仿真的结果表明,单纯的速度调整策略所需的机动飞行时间为254 s,该过程两航空器的间隔随时间变化的规律如图9所示。

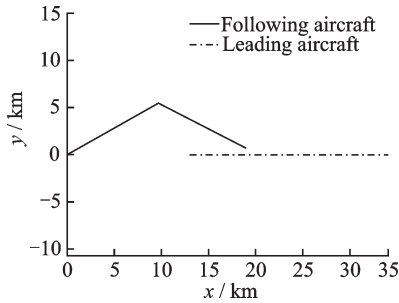


图 8 全局最优控制律下的位置-时间图

Fig. 8 Position-time diagram of global optimal control law

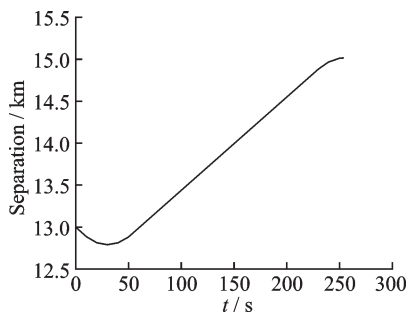


图 9 速度调整策略的间隔-时间图

Fig. 9 Separation-time diagram of speed adjustment strategy

速度调整策略间隔保持过程的前后机真空速随时间变化的关系如图 10 所示。

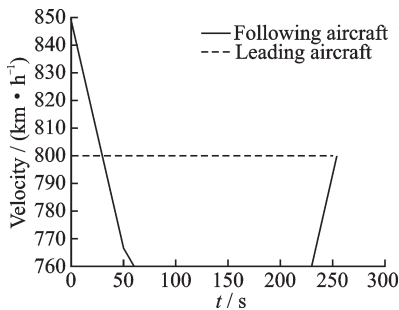


图 10 速度调整策略的真空速度-时间图

Fig. 10 True airspeed-time diagram of speed adjustment strategy

仿真结果显示,使用混合间隔保持策略,跟随航空器可以在 97 s 内完成机动飞行并回到航路上继续与前机的跟驰飞行;而选择单纯的速度调整间隔保持策略,跟随航空器可以在 254 s 内完成机动飞行并继续与前机的跟驰飞行。因此,相对于速度调整间隔保持策略,本文提出的混合间隔保持模型能够在保证规定间隔的前提下显著提高效率。

为了探究使用基于滚动时域控制的混合机动飞行策略时,不同起始间隔条件对跟随航空器机动飞行时间以及机动飞行过程中前后机间隔的影响,本文在不同的起始间隔条件下重复进行仿真实验,

结果如图 11 所示。

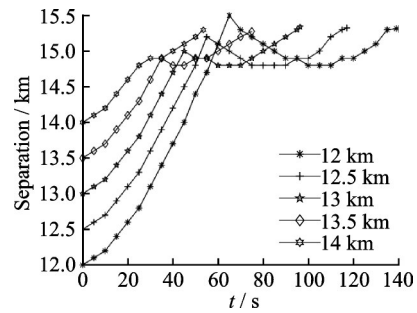


图 11 多间隔条件下的间隔-时间图

Fig. 11 Separation-time diagram at multiple separations

仿真的结果表明,其他条件相同时,起始间隔越大,跟随航空器能够更早的结束偏离航路中心线的状态,在更短的时间内完成间隔保持所需的机动飞行;同时,起始间隔越小,跟随航空器在机动飞行过程中,前后机间隔的振幅越大;由于混合机动飞行策略使得跟随航空器在机动飞行初始时刻偏离航路中心线飞行,前后机间隔依然能够保持在安全水平。

6 结 论

(1)基于航路飞行阶段进行跟驰飞行的两航空器的间隔保持问题,在考虑航路飞行的随机扰动的前提下,采用了基于滚动时域控制的调速调航向混合机动飞行策略,求解得到后机的最优控制律。

(2)对比实验部分进行了不考虑随机扰动的静态优化和仅使用速度调整策略优化两种情况,结果表明,基于滚动时域控制的混合机动飞行策略能够保证与前机保持规定间隔的基础上提高机动飞行的效率。

(3)对不同起始间隔对跟随航空器机动飞行时间以及机动飞行过程中前后机间隔的影响进行了初步的探讨,仿真结果表明在起始间隔较小的情况下,基于滚动时域控制的混合机动飞行策略仍然能够保证前后机间隔维持在最小安全间隔以上。

未来的工作将继续研究航路上多机交叉与汇聚飞行条件下的间隔保持问题。

参考文献:

[1] BALLIN M G, WING D J, HUGHES M F, et al. Airborne separation assurance and traffic management: Research of concepts and technology [J]. Vaccine, 1999, 26(7): 988-997.
 [2] 中国民用航空局空中交通管理局. 中国民航现代化空中交通管理系统体系架构: IB-TM-2016-003[S]. 北京: [s.n.], 2016.
 Air Traffic Management Bureau of CAAC. China civil aviation modern air traffic management system archi-

- ecture: IB-TM-2016-003[S]. Beijing: [s.n.], 2016.
- [3] 张兆宁, 黎新华, 王莉莉. 基于飞行跟驰模型的纵向安全间隔计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(3): 73-76.
ZHANG Zhaoning, LI Xinhua, WANG Lili. Computational method of longitudinal safety separation based on flight following theory[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(3): 73-76.
- [4] 王莉莉, 张新瑜, 张兆宁. 空中高速路交通流的跟驰现象及流量模型[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(1): 158-162.
WANG Lili, ZHANG Xinyu, ZHANG Zhaoning. Following phenomenon and air freeway flow model[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(1): 158-162.
- [5] VINKEN P, HOFFMAN E, ZEGHAL K. Influence of speed and altitude profile on the dynamics of in-trail following aircraft[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Dever, CO, USA: AIAA, 2000.
- [6] XIE Hua, WU Zhe, CHEN Feifei, et al. Modeling of 3-D air traffic complexity based on route structure constraints[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 36(2): 352-360.
- [7] MENG L H, XU X H, GENG Z X. A time-optimal aircraft-following model based on Pontryagin's minimum principle[J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19(4): 268-273.
- [8] WANG T, TSAO C. Time-based separation for aircraft landing using danger value distribution flow model[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012(12): 1-16.
- [9] SLATER G L. Dynamics of self-spacing in a stream of in-trail aircraft[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. California, USA: AIAA, 2002: 1-9.
- [10] NAKAMURA Y, TAKEICHI N, KAGEYAMA K. A self-separation algorithm using relative speed for high density air corridor[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical & Space Sciences, 2013, 57(6): 336-342.
- [11] NAKAMURA Y, TAKEICHI N. A self-separation algorithm for high-density air corridor allocated to optimal flight trajectories[C]//AIAA Modeling & Simulation Technologies Conference. San Diego, USA: AIAA, 2015.
- [12] NAKAMURA Y, TAKEICHI N. A self-separation algorithm for width-limited high density air corridor[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G-Journal of Aerospace Engineering, 2016, 230(9): 1632-1640.
- [13] 牟奇锋, 林灵, 郝光. 神经网络在飞行间隔控制中的应用[J]. 交通运输工程与信息学报, 2005, 3(2): 44-50.
MOU Qifeng, LIN Ling, HAO Guang. Application of neural networks in the flight separation control[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2005, 3(2): 44-50.
- [14] 孙樊荣, 杨昱昕, 韩松臣, 等. 基于扇区负荷约束的管制移交间隔多目标优化模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(3): 434-440.
SUN Fanrong, YANG Yuxin, HAN Songchen, et al. Novel multi-objective optimization model for minute-in-trail strategy based on sector workload restriction[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(3): 434-440.
- [15] SHI Miaotian, ZHANG Junfeng, GE Tengting, et al. A combined arrival and departure scheduling for multi-airport system[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 34(5): 578-585.
- [16] 张焕. 空中领航学[M]. 3版. 成都: 西南交通大学出版社, 2016.
ZHANG Huan. Air navigation[M]. 3rd ed. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2016.
- [17] LYMPEROPOULOS I, LYGEROS J. Sequential Monte Carlo methods for multi-aircraft trajectory prediction in air traffic management[J]. International Journal of Adaptive Control & Signal Processing, 2010, 24(10): 830-849.
- [18] COLE R E, RICHARD C, KIM S, et al. Assessment of the 60 km rapid update cycle(RUC) with near real-time aircraft reports[R]. Lexington Massachusetts: Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [19] 陈伟, 冯高鹏, 邓坤, 等. 基于滚动时域优化的变后掠角飞机修正控制律设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(1): 96-104.
CHEN Wei, FENG Gaopeng, DENG Kun, et al. Design of retrofit control law based on receding horizon optimal technique for variable sweep wing aircraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(1): 96-104.
- [20] 中国民用航空局. CCAR-25-R4, 运输类飞机适航标准[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
China Civil Aviation Administration. CCAR-25-R4, Airworthiness standard for transport aircraft[S]. Beijing: China Civil Aviation Administration, 2011.