

无人机密集编队穿越竞速导引算法

张 旭, 张 涛, 赵汉武

(空军工程大学航空机务士官学校, 河南信阳, 464000)

摘要 针对无人机密集编队穿越门框竞速问题, 提出了一种时间近似最优的导引算法。首先, 对穿越竞速问题进行了阐述; 其次, 在单架无人机穿越门框导引模型推导的基础上, 研究了其穿越门框的导引算法, 该算法具有在期望时间内将无人机导引到目标点的能力; 最后, 针对多架无人机编队穿越竞速问题, 提出了基于飞行时间控制和脱靶量控制的穿越算法, 该算法具有良好的时间近似最优性能; 仿真结果表明, 所设计的导引算法能够使无人机编队在期望时间内完成穿越竞速, 且具有极低的脱靶量和导引时间误差; 可为无人机集群避障与防撞控制提供技术支撑。

关键词 无人机编队; 穿越竞速; 导引算法; 近似最优

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.06.004

中图分类号 V249.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)06-0023-04

A Crossing and Contesting Guidance Algorithm for UAV Intensive Formation

ZHANG Xu, ZHANG Tao, ZHAO Hanwu

(Aviation Maintenance NCO Academy, Air Force Engineering University,
Xinyang 464000, Henan, China)

Abstract: A nearly optimal time guidance algorithm is proposed for UAV intensive formation crossing and contesting the doorframe. Firstly, the crossing and contesting problem is described. Secondly, the guidance algorithm for single UAV crossing the doorframe is studied based on the mathematic model, which is characterized by the ability to guide the UAV onto the target point in the desired time. Finally, a crossing guidance algorithm based on flying time control and miss-distance control is proposed for the crossing and contesting problem of the UAV intensive formation. The simulation results show that the proposed algorithm makes the UAV formation complete successfully the tasks, such as the cross and contest, the minimum miss-distance, and the guidance time errors in the desired time, and affords the UAV formation obstacle avoidance control and collision avoidance control useful technologies.

Key words: UAV formation; cross and contest; guidance algorithm; nearly optimal

2018年6月,首届“无人争锋”智能无人机集群系统挑战赛在空军工程大学举办,其中无人机密集编队穿越竞速要求每支参赛队派出不少于4架全自主无人机参赛,无人机起飞后以密集编队形式按照

规定路线飞行,依次穿越路线上的4个门框(内框尺寸 $7.32\text{ m}\times 2.44\text{ m}$,见图1)并返回起降区域。完成比赛的无人机数量越多、编队越密集、速度越快的参赛队得分越高。

收稿日期: 2019-10-29

作者简介: 张旭(1988—),男,河南邓州人,讲师,博士,主要从事飞行器制导与控制技术研究。E-mail: yaohuiri@163.com

引用格式: 张旭,张涛,赵汉武. 无人机密集编队穿越竞速导引算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(6): 23-26. ZHANG Xu, ZHANG Tao, ZHAO Hanwu. A Crossing and Contesting Guidance Algorithm for UAV Intensive Formation[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(6): 23-26.

该科目重点考核无人机集群密集编队控制、集群在线环境感知和集群避障与防撞等关键问题,经过激烈角逐,非固定翼组和固定翼组都取得了一定成绩,但均未决出冠、亚、季军。究其原因,是无人机编队导引与控制能力难以满足竞赛需求。

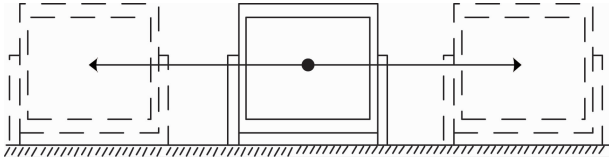


图1 门框位置示意图

因此,本文针对无人机集群密集编队穿越竞速问题,开展其导引算法研究,拟采用基于单架无人机在期望导引时间内飞抵目标点的算法,推导无人机集群穿越竞速的导引算法。目前,基于导弹攻击时间的导引算法,国内外已有广泛研究,取得了不少研究成果^[1-12]。但是这些方法多用于导弹协同攻击导引,极少用于无人机导引。本文在借鉴这些导引算法基础上,推导单架无人机和无人机集群导引算法,在保证无人机集群编队控制精度的前提下,使其能够在近似最优的时间内快速穿越门框,达到穿越竞速的目的。研究结果可为无人机集群密集编队控制和集群避障与防撞控制提供技术支撑。

1 无人机穿越门框导引模型

图2为平面内的无人机与门框中心目标点几何关系示意图,其中 p 点表示无人机, D 表示门框中心目标点的位置, R 为无人机与目标点的距离, v_p 为无人机的速度矢量, θ_p 为无人机的速度方向角, q 为无人机与目标点的视线角, η_p 为前置角;在导引过程中,期望无人机以最短的时间,或规定的期望飞行时间,穿越门框的中心点 D 。

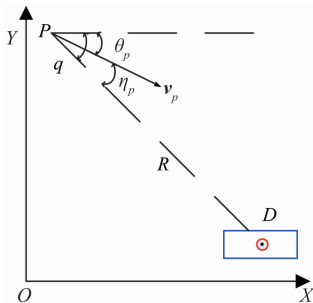


图2 无人机与门框中心目标点平面几何关系

为研究方便,假设无人机速度大小为常量,且在攻击过程中攻角很小,则平面内的无人机运动方程组可表示为^[12]:

$$\dot{R} = -v_p \cos \eta_p \quad (1) \quad R\dot{q} = v_p \sin \eta_p \quad (2)$$

$$\dot{x}_p = v_p \cos \theta_p \quad (3) \quad \dot{y}_p = v_p \sin \theta_p \quad (4)$$

$$\dot{\theta}_p = a_p / v_p \quad (5)$$

式中: $\theta_p = q - \eta_p$; a_p 为无人机的指令加速度。

2 单架无人机穿越导引算法设计

设计无人机指令加速度 a_p 由 2 项组成:

$$a_p = a_1 + a_2 \quad (6)$$

式中: a_1 用来控制无人机与目标点距离,使其在导引结束时, $R \rightarrow 0$; a_2 用来控制无人机导引时间,使无人机在期望导引时间 T_d 时刻达到目标点 D 。

在导引算法中,由于比例导引法是目标不机动时的时间最优方法,因此,这里选取 a_1 为:

$$a_1 = k\dot{q}v_p \quad (7)$$

选取状态变量 $x_1 = y_p$ 、 $x_2 = \theta_p$, 假设 θ_p 很小,则状态方程表达式可表示为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & v_p \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/v_p \end{bmatrix} a_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/v_p \end{bmatrix} a_2 \quad (8)$$

设 t_f 为导引结束时刻,导引算法的目的是令 $t_f = T_d$,且脱靶量为零;在导引过程中,边界条件分别为 $x_p(0) = x_{p0}$ 、 $y_p(0) = y_{p0}$ 、 $x_p(t_f) = x_{pf} = x_D$ 、 $y_p(t_f) = y_{pf} = y_D$,其中, (x_D, y_D) 为 D 点的位置坐标。

根据最优控制理论中的最小值原理^[3],进行推导解算之后,可得单架无人机穿越导引算法为:

$$a_p = a_1 + a_2 = \frac{k\dot{q}v_p}{2} \left(3 - \sqrt{1 + \frac{240v_p^5 e_t}{(k\dot{q}v_p)^2 R_{go}^3}} \right) \quad (9)$$

式中: e_t 为时间误差, $e_t = t_{go} - \hat{t}_{go}$; t_{go} 为无人机期望剩余飞行时间, $t_{go} = T_d - t$; \hat{t}_{go} 为估计剩余飞行时间; R_{go} 为某一时刻,无人机与 D 点的距离。

在 e_t 不大时,可对式(9)右侧根号项进行泰勒公式一阶展开,得到:

$$\sqrt{1 + \frac{240v_p^5 e_t}{(k\dot{q}v_p)^2 R_{go}^3}} \approx 1 + \frac{120v_p^5 e_t}{(k\dot{q}v_p)^2 R_{go}^3} \quad (10)$$

根据式(9)和式(10),将导引算法化简为:

$$a_p = a_1 + a_2 = k\dot{q}v_p \left[1 - \frac{120v_p^5 e_t}{(k\dot{q})^2 R_{go}^3} \right] \quad (11)$$

式中: $a_2 = -\frac{120v_p^5 e_t}{k\dot{q}R_{go}^3}$ 。

式(11)中, R_{go} 和 \hat{t}_{go} 的计算方法分别为:

$$R_{go} = \sqrt{x_{go}^2 + y_{go}^2} =$$

$$\sqrt{(x_p(t) - x_f)^2 + (y_p(t) - y_f)^2} \quad (12)$$

$$\hat{t}_{go} = R_{go} [1 + (\theta_p - q)^2 / 10] / v_p \quad (13)$$

3 无人机编队穿越导引算法设计

假设有 n 架无人机组成编队,编队保持一定的

队形巡航飞行,当接到穿越门框指令时,考虑到门框高度差较小,加之无人机地面站系统的测量误差和无人机控制精度的影响;因而采取编队无人机按顺序依次通过门框的方案进行穿越。

假设各架无人机穿越时间间隔为 T_i ,第一架无人机的期望飞行时间为 T_d ,则第 n 架无人机的期望飞行时间为:

$$T_{dn} = T_d + (n - 1)T_i \quad (14)$$

设无人机用比例导引法进行导引的时间为 T_0 ,由于比例导引法是目标不机动情况下的时间最优导引方法,因此 T_d 选取应满足:

$$T_d \geq T_0 \quad (15)$$

而 T_i 的选取,应当根据无人机系统导引精度进行确定,同时应当考虑到外界环境的影响,如风速等。

在选定了 T_{dn} 和 T_0 之后,可得单架无人机导引算法中的期望剩余飞行时间 t_{go} 的表达式为:

$$t_{go_n} = T_{dn} - t \quad (16)$$

无人机编队穿越竞速的导引算法可描述为:

$$a_{pn} = k\dot{q}v_p \left[1 - \frac{120v_p^3 e_t}{(kq)^2 R_{go_n}^3} \right] \Big|_{t_{go_n}=T_d+(n-1)T_i-t} \quad (17)$$

此时,无人机编队穿越门框的总时间为从接受到指令开始,到第 n 架无人机穿越门框的时间为:

$$T_z = T_d + (n - 1)T_i \quad (18)$$

由于 T_0 是单架无人机飞行的最短时间,因此, T_z 便是无人机编队能穿越门框的近似最优飞行时间。

根据上述导引算法的设计,该算法若要应用于硬件,需要无人机编队中的长机综合决策并向僚机发送协调指令,同时每架无人机需要获取以下信息: $q, \dot{q}, v_p, \theta_p, R_{go}$ 或 $[(x_p, y_p), (x_D, y_D)]$ 。其中, q 和 \dot{q} 可由导引头模块获得; v_p 和 θ_p 由速度传感器/惯性测量传感器模块等获得;至于无人机与目标点的距离 R_{go} ,需要获得目标点的坐标,可由外部导引站通过数据链提前输入或实时传输,也可在无人机上安装测距模块测得。

4 无人机编队穿越竞速仿真分析

无人机编队穿越竞速仿真验证的初始条件设置如下:门框初始坐标为(500 m, 10 m),单架无人机飞行速度 $v_p = 20$ m/s,其最大飞行过载为 5g;无人机编队由 4 架飞机组成, $n=4$,第一架无人机的坐标为(0 m, 20 m),其他 3 架无人机飞行的 y 坐标依次增加 3 m,以密集编队飞行,其速度方向角均为 0° ,即编队保持水平巡航飞行;当接到穿越门框指令时,根据上述初始条件,计算得到 $T_0 = 25.01$ s,因此,

适情选取 $T_d = 25.2$ s, $T_i = 0.8$ s;本文采用 MATLAB 软件进行仿真,使用四阶龙格库塔法求解,仿真步长为 0.01 s。仿真结果见图 3~6 和表 1。

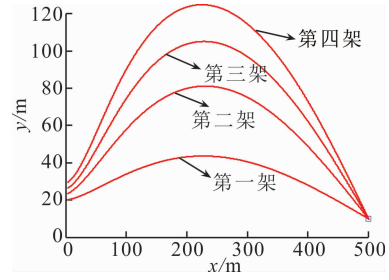


图 3 无人机编队穿越竞速飞行轨迹

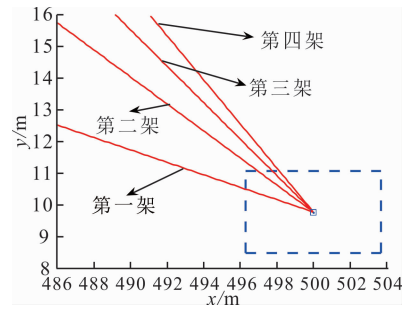


图 4 无人机编队穿越门框轨迹放大图

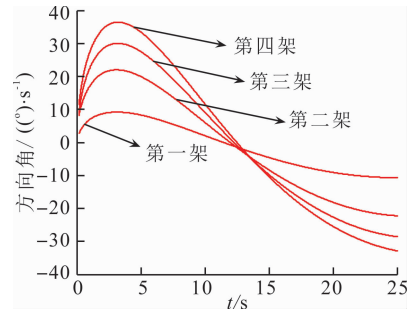


图 5 各无人机飞行速度方向角变化曲线

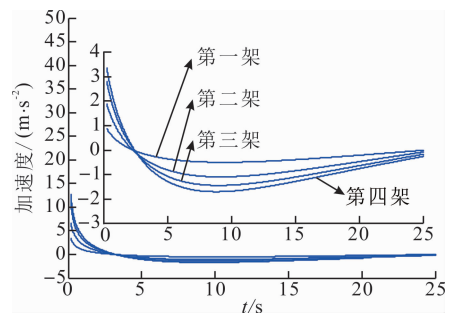


图 6 各无人机飞行指令加速度变化曲线

表 1 无人机编队穿越导引精度比较

无人机序号	脱靶量/m	导引时间/s	导引时间误差/s
第一架	0.000 0	25.21	0.01
第二架	0.000 0	26.01	0.01
第三架	0.000 2	26.81	0.01
第四架	0.000 0	27.61	0.01

由图 3 和表 1 可知,4 架无人机以不同的飞行轨迹,在规定的时间内准确地到达了门框中心

目标点 D ; 图 4 为无人机编队穿越门框的放大图, 由于 4 架无人机间隔 0.8 s 到达目标点, 因此, 4 架无人机在飞行过程中不会有间距过小或碰撞的情况。

由图 3~6 可知, 无人机飞行时间越长, 则飞行的路程越远, 飞行的轨迹也越弯曲, 同时速度方向角变化范围越大, 带来无人机的指令加速度也相应地小幅度增大。

由图 6 可知, 4 架无人机的飞行加速度在初始时刻达到饱和, 随后迅速减小到 5 m/s^2 以内, 在无人机接近目标点时, 都能够收敛到零, 具有良好的导引性能。

由表 1 可知, 4 架无人机导引的脱靶量接近于零, 导引时间误差与 T_{dn} 仅相差 0.01 s , 具有很高的导引精度。4 架无人机从接到命令开始, 到完成门框穿越, 总共耗时 27.61 s , 达到了编队近似最优的时间导引要求。

5 结语

本文针对无人机密集编队穿越门框竞速问题, 基于各无人机以规定时间间隔逐一通过门框中心目标点的方法, 提出了一种近似最优的编队飞行导引算法, 该导引算法最终表达式清晰明了、易于计算, 且可调导引参数较少, 在选择无人机最优导引时间 T_0 之后, 根据无人机编队实际情况选取合适的 T_d 和 T_z , 这样 T_z 便为无人机编队能穿越门框的近似最优飞行时间。通过仿真, 验证了所设计编队导引算法具有很高的导引精度和优越的导引性能, 能够满足导引时间近似最优的要求。该研究可为无人机集群密集编队控制和集群避障与防撞控制提供技术支持。

参考文献(References):

[1] 张友安, 马国欣. 多导弹时间协同制导: 一种领弹-被领弹策略[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1109-1118.
ZHANG Y A, MA G X. Time-Cooperative Guidance for Multi-Missiles: A Leader-Follower Strategy [J]. Acta Aeronautica & Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1109-1118. (in Chinese)

[2] 杨超. 攻击时间可控的制导律设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
YANG C. The Design of Impact Timecontrol Guidance Law[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

[3] JEON I, LEE J, TAHK M. Impact-Time-Control Guidance Law for Anti-Ship Missiles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(2): 260-266.

[4] JEON I, LEE J, TAHK M. Homing Guidance Law for Cooperative Attack of Multiple Missiles[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(1): 275-280.

[5] 陈永恒, 相升海, 姜登维, 等. 带有攻击时间控制的修改比例导引法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(5): 88-92.
CHEN Y H, XIANG S H, JIANG D W, et al. Study of Modified Proportional Navigation Guidance with Impact Time Control[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(5): 88-92. (in Chinese)

[6] 王斌, 雷虎民, 李炯, 等. 大前置角拦截攻击时间控制导引律[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(3): 605-613.
WANG B, LEI H M, LI J, et al. Impact Time Control Guidance Law for Large Heading Errors[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(3): 605-613. (in Chinese)

[7] KUMAR S R, GHOSE D. Sliding Mode Control Based Guidance Law with Impact Time Constraints [C]//2013 American Control Conference. Washington, DC, USA: IEEE, 2013.

[8] HARL N, BALAKRISHNAN S N. Impact Time and Angle Guidance with Sliding Mode Control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(6): 1436-1449.

[9] KIM M G, JUNG B, HAN B, et al. Lyapunov-Based Impact Time Control Guidance Laws Against Stationary Targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(2): 1111-1122.

[10] GUTMAN S. Impact-Time Vector Guidance [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2017, 40(8): 2110-2114.

[11] CHO D, KIM H J, TAHK M. Nonsingular Sliding Mode Guidance for Impact Time Control[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2016, 39(1): 61-68.

[12] 雷虎民, 李炯. 导弹制导与控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 91-93.
LEI H M, LI J. Theory of Guidance and Control for Missile [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 91-93. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)