

三维动态环境下多无人机编队分布式保持控制

邵 壮^a, 祝小平^b, 周 洲^a, 张 波^a, 王彦雄^a

(西北工业大学 a. 无人机特种技术重点实验室, b. 无人机研究所, 西安 710065)

摘 要: 针对无人机编队沿参考轨迹飞行时遭遇突发障碍物而发生碰撞的问题, 提出一种可实时避障及机间避碰的分布式编队保持算法. 基于虚拟结构编队策略, 采用非线性模型预测控制(NMPC)方法设计分布式编队控制器. 为了实现通讯延迟下的机间避碰, 采用基于不同优先级的改进避碰惩罚策略. 仿真结果表明, 所设计的分布式编队控制器能保证编队及时避开环境中的突发障碍物, 且无人机间不发生互碰, 避障后的各编队继续以原队形沿参考轨迹飞行.

关键词: 无人机; 编队飞行; 虚拟结构; 非线性模型预测控制; 避障; 避碰

中图分类号: V249

文献标志码: A

Distributed formation keeping control of UAVs in 3-D dynamic environment

SHAO Zhuang^a, ZHU Xiao-ping^b, ZHOU Zhou^a, ZHANG Bo^a, WANG Yan-xiong^a

(a. National Key Laboratory of Special and Technology on UAV, b. UAV Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China. Correspondent: SHAO Zhuang, E-mail: shaozhuang233@163.com)

Abstract: When UAVs formation flying in 3-D dynamic environment following the reference path, obstacles may popup and collisions may happen. To solve this problem, a distributed formation keeping method with obstacle/collision avoidance is proposed. The virtual structure approach and nonlinear model predictive control(NMPC) method are applied to design the distributed formation controller. To achieve collision avoidance between UAVs with consideration of communication delay, a spatial penalty function with the priority strategy is designed. According to the simulation results, the distributed NMPC formation controllers can make the UAVs steer clear of static/moving obstacles with no collisions between UAVs, and the formation keeps following the reference path after finishing obstacle avoidance.

Keywords: UAV; formation flight; virtual structure; NMPC; obstacle avoidance; collision avoidance

0 引 言

多无人机(UAV)协同编队在拓宽 UAV 使用范围和提高作战效率等方面具有广泛的应用前景, 如何实现多 UAV 自主编队保持控制已成为近年来国内外的研究热点^[1-2].

现有编队策略通常包括: 长机-僚机法^[3-4]、基于行为法^[5]和虚拟结构法^[6-8]等. 长机-僚机法最为常见, 其基本思想是将编队中的某架 UAV 设定为长机, 负责编队的航迹规划和生成等任务, 其他飞机跟踪长机以实现编队队形保持. 该方法的优点是简单易行, 编队航迹完全由长机决定; 缺点是存在跟踪误差扩散, 且对长机故障的鲁棒性较差^[9]. 基于行为法需预先定义一组基本行为: 碰撞避免、障碍物规避、目标搜索、队形保持等, UAV 的控制行为一般为这些基

本行为的加权平均, 其难点在于设计各种基本行为以及有效的行为协调机制(行为仲裁方案). 该方法适用于不确定环境, 但缺乏相应的理论分析基础^[10]. 虚拟结构法采用一个虚拟刚体定义期望的编队构型, 虚拟结构的运动轨迹即为编队参考航迹. 该方法的优点是将整个编队看作一个整体, 简化了任务的描述和分配, 可以容易地指定机群的行为, 且易于分布式控制策略的实现; 缺点是缺乏灵活性. 3 类方法各有优缺点, 本文基于虚拟结构法进行编队保持研究.

当 UAV 编队在动态环境中沿预定的航路飞行时, 可能会遭遇突发障碍物(或威胁)而发生碰撞及机间互碰等危险, 因此要求 UAV 编队在动态环境中飞行时不仅能够保持编队队形, 同时能自主在线规避环境中的突发障碍(或威胁)且不发生 UAV 互碰.

收稿日期: 2015-04-14; 修回日期: 2015-08-27.

基金项目: “十二五”国防预研项目(41101060101).

作者简介: 邵壮(1987—), 男, 博士生, 从事多无人机编队控制的研究; 祝小平(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事无人机总体设计和制导控制与仿真等研究.

王恽等^[11]针对单架无人机在三维动态环境下的轨迹跟踪问题,提出了单 UAV 可实时避障的 NMPC 框架; Chang 等^[6]针对编队机动时的队形误差较大问题,采用柔性虚拟结构定义编队构型,提高了 UAV 编队机动时的队形保持能力,但没有考虑编队避障及避障约束; Seunghoon 等^[7]采用基于几何图形与弹性权重因子相结合的方法设计了导引律,以实现编队保持及避障、避障,该方法很难适用于三维动态环境; Zhou 等^[8]针对二维静态环境下的编队保持及避障避碰问题,提出 NMPC 法并采用代价惩罚与优先级策略分别实现避障和机间避碰,没有考虑移动障碍物的规避问题; Tobias 等^[12]针对直升机编队飞行问题,提出虚拟长机方法,并结合局部势场函数实现机间避碰及静止障碍物规避,将障碍物简化为质点模型过于简单。

为了实现三维动态环境下的 UAV 编队保持、突发障碍物规避及机间避碰,本文采用 NMPC 法为每架 UAV 分别设计一个分布式编队控制器以实现队形保持;对于突发静止和移动障碍物,提出一种改进的双模规避惩罚策略和空间规避惩罚策略。为了实现通讯网络延迟下的 UAV 间避碰,采用基于不同优先级的改进避碰惩罚策略。为简单起见,本文假设不考虑编队 UAV 之间的气动耦合影响及测量噪声和信号噪声等问题。

1 系统模型

1.1 UAV 单机运动模型

假设 UAV 飞行迎角和侧滑角很小,且不考虑风场影响,可得 UAV 的单机运动模型^[13]如下:

$$\begin{cases} \dot{V}_i = (u_{xi} - \sin \gamma_i)g, \\ \dot{\chi}_i = \frac{u_{yi}}{V_i \cos \gamma_i}g, \\ \dot{\gamma}_i = \frac{u_{zi} - \cos \gamma_i}{V_i}g, \\ \dot{x}_i = V_i \cos \gamma_i \cos \chi_i, \\ \dot{y}_i = V_i \cos \gamma_i \sin \chi_i, \\ \dot{z}_i = -V_i \sin \gamma_i. \end{cases} \quad (1)$$

其中: V_i 、 χ_i 和 γ_i 分别为 UAV_i 的速度、航向角和爬升角; (x_i, y_i, z_i) 为 UAV_i 在惯性系下位置坐标; 控制输入 u_{xi} 、 u_{yi} 和 u_{zi} 分别为过载沿航迹坐标系的 x 轴、 y 轴和 z 轴的投影, 且分别限定在 $[u_{xi \min}, u_{xi \max}]$ 、 $[u_{yi \min}, u_{yi \max}]$ 、 $[u_{zi \min}, u_{zi \max}]$ 内; 各 UAV 的速度约束为 $0 < V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max}$ 。

1.2 编队空间相对运动模型

本文采用虚拟结构法定义编队构型, 假设存在一个运动的虚拟点 O_f 沿给定的编队参考轨迹飞行, 以该虚拟点为原点定义编队坐标系 $O_f x_f y_f z_f$, 且 x_f 轴沿虚拟点速度在水平面内的投影分量方向, z_f 轴垂直水平面向下, y_f 轴位于水平面内由右手定则确定, 如

图 1 所示。

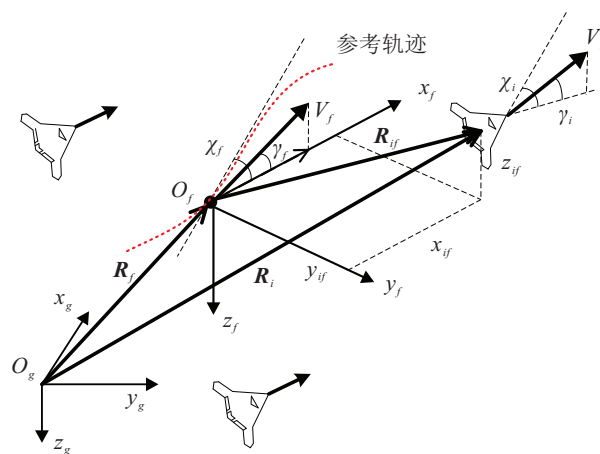


图 1 UAV 编队相对运动分析

相较于传统虚拟结构法采用虚拟点航迹系作为编队参考系, 这里定义的编队坐标系能够更直观地定义编队构型, 且基于该坐标系的编队相对运动方程具有更为简单的形式, 易于控制实现。图 1 中: $O_g x_g y_g z_g$ 为惯性系, V_f 、 χ_f 和 γ_f 分别为虚拟点速度、航向角和爬升角, (x_{if}, y_{if}, z_{if}) 为 UAV_i 在编队系下的相对位置坐标, 则期望编队构型可由编队系下的一组相对位置坐标 $\{(x_{dif}, y_{dif}, z_{dif}), i = 1, 2, \dots, m\}$ 定义, m 为编队 UAV 总数。

假设虚拟点参考轨迹(即编队参考轨迹)由如下基于时间参数的微分方程给出:

$$\begin{cases} \dot{x}_f = V_f \cos \gamma_f \cos \chi_f, \\ \dot{y}_f = V_f \cos \gamma_f \sin \chi_f, \\ \dot{z}_f = -V_f \sin \gamma_f, \\ \dot{\chi}_f = \omega_f. \end{cases} \quad (2)$$

其中: (x_f, y_f, z_f) 为惯性系下虚拟点位置; ω_f 为虚拟点航向角速度, 且 V_f 、 ω_f 、 γ_f 均为时间的分段连续函数, 由编队路径规划系统提前给出。

图 1 中, R_i 、 R_f 和 R_{if} 分别为惯性系下 UAV 的位置矢量、虚拟点位置矢量及它们之间的相对位置矢量, 则它们满足如下三角关系:

$$R_{if} = R_i - R_f. \quad (3)$$

对上式关于时间求导, 并根据坐标系间转换关系投影到编队坐标系下, 可得到如下编队空间相对运动方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_{eif} = V_i \cos \gamma_i \cos \chi_{ei} - V_f \cos \gamma_f + (y_{eif} + y_{dif})\omega_f, \\ \dot{y}_{eif} = V_i \cos \gamma_i \sin \chi_{ei} - (x_{eif} + x_{dif})\omega_f, \\ \dot{z}_{eif} = V_f \sin \gamma_f - V_i \sin \gamma_i. \end{cases} \quad (4)$$

其中: 航向角误差 $\chi_{ei} = \chi_i - \chi_f$; 队形保持误差 $x_{eif} = x_{if} - x_{dif}$, $y_{eif} = y_{if} - y_{dif}$, $z_{eif} = z_{if} - z_{dif}$ 。

综上所述, 结合 UAV 单机运动模型 (1) 和编队空间相对运动模型 (4), 可得 UAV 编队飞行系统模型为

$$\begin{cases} \dot{V}_i = (u_{xi} - \sin \gamma_i)g, \\ \dot{\chi}_i = \frac{u_{yi}}{V_i \cos \gamma_i}g, \\ \dot{\gamma}_i = \frac{u_{zi} - \cos \gamma_i}{V_i}g, \\ \dot{x}_{eif} = V_i \cos \gamma_i \cos \chi_{ei} - V_f \cos \gamma_f + (y_{eif} + y_{dif})\omega_f, \\ \dot{y}_{eif} = V_i \cos \gamma_i \sin \chi_{ei} - (x_{eif} + x_{dif})\omega_f, \\ \dot{z}_{eif} = V_f \sin \gamma_f - V_i \sin \gamma_i, \\ i = 1, 2, \dots, m. \end{cases} \quad (5)$$

其中可将虚拟点运动状态看作已知扰动. 若令 $\mathbf{x}_i = [V_i, \chi_i, \gamma_i, x_{eif}, y_{eif}, z_{eif}]^T$, $\mathbf{u}_i = [u_{xi}, u_{yi}, u_{zi}]^T$, 则式(5)可以简写为如下离散状态空间形式:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(k+1) &= \mathbf{x}_i(k) + f(\mathbf{x}_i(k), \mathbf{u}_i(k))\Delta t, \\ i &= 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (6)$$

其中: Δt 为离散时间步长, $f(*)$ 为式(5)中全部子式等号右侧对应的非线性函数.

2 分布式NMPC控制器设计

模型预测控制是一种基于模型的有限时域开环最优算法^[14-16], 其预测特性对不确定环境具有较强适用性和鲁棒性, 且便于处理 UAV 间存在的通讯延迟问题. 因此, 本文采用 NMPC 法在线滚动优化求解每一采样时刻下的无人机控制输入.

图2为 NMPC 编队控制器的求解框架, 图中 k 为当前时刻, N 为预测时域和控制时域长度, $\{\mathbf{x}_i(k+1|k), \dots, \mathbf{x}_i(k+N|k)\}$ 为 UAV 状态向量预测值, $\{\mathbf{x}_{ir}(k+1|k), \dots, \mathbf{x}_{ir}(k+N|k)\}$ 为 UAV 参考状态向量, $\{\mathbf{u}_i(k|k), \dots, \mathbf{u}_i(k+N-1|k)\}$ 为最优控制输入序列. 由控制器结构可知, 每架 UAV 都独立求解各自的优化问题, 仅在必要时与其他 UAV 进行通讯, 是一种分布式控制器.

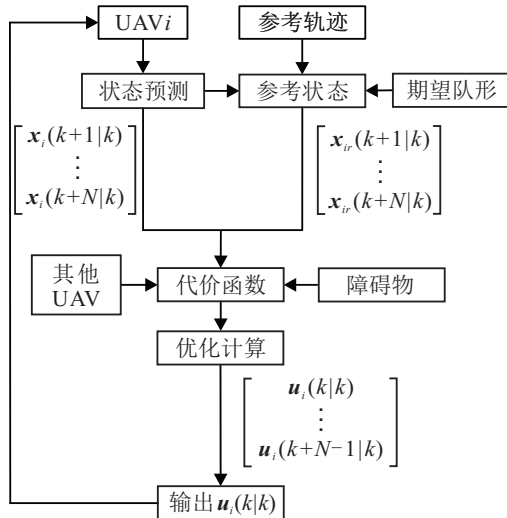


图2 NMPC 求解框图

为了实现动态环境下的编队保持及避障、避碰控制目标, 可以建立如下形式的目标函数:

$$\begin{aligned} J_i(\mathbf{x}_i, k) &= \sum_{s=0}^{N-1} \mathbf{u}_i^T(k+s|k) \mathbf{R} \mathbf{u}_i(k+s|k) + \\ &\quad \sum_{s=1}^{N-1} (\mathbf{x}_i(k+s|k) - \mathbf{x}_{ir}(k+s|k))^T \mathbf{S} (\mathbf{x}_i(k+s|k) - \mathbf{x}_{ir}(k+s|k)) + (\mathbf{x}_i(k+N|k) - \\ &\quad \mathbf{x}_{ir}(k+N|k))^T \mathbf{S}_N (\mathbf{x}_i(k+N|k) - \mathbf{x}_{ir}(k+N|k)) + J_{i\text{obs}} + J_{i\text{avo}}. \end{aligned} \quad (7)$$

其中: 第1项和第2项分别为输入代价和状态代价, 实现编队队形保持; 第3项为终端状态惩罚代价, 用于保证 NMPC 控制器稳定性; 第4项和第5项分别为 UAV 避障和避碰惩罚项; \mathbf{R} 、 \mathbf{S} 、 \mathbf{S}_N 为相应权值矩阵.

2.1 UAV 参考状态向量推导

由上述目标函数可知, UAV 参考状态向量的确定是保证编队队形稳定的关键. 这里基于 Lyapunov 稳定性原理推导 UAV 参考状态.

考虑到编队保持的最终控制目标是设计控制律 \mathbf{u}_i 使得 $(x_{eif}, y_{eif}, z_{eif}) \rightarrow 0$, 因此这里定义如下候选 Lyapunov 函数:

$$V_{Li} = \frac{1}{2}(x_{eif}^2 + y_{eif}^2 + z_{eif}^2). \quad (8)$$

对其求导并将式(4)代入, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{Li} &= (V_i \cos \gamma_i \cos \chi_{ei} - V_f \cos \gamma_f + y_{dif}\omega_f)x_{eif} + \\ &\quad (V_i \cos \gamma_i \sin \chi_{ei} - x_{dif}\omega_f)y_{eif} + \\ &\quad (V_f \sin \gamma_f - V_i \sin \gamma_i)z_{eif}. \end{aligned} \quad (9)$$

仅当 $\dot{V}_{Li} < 0$ 时, 编队保持误差才会渐近趋于零, 因此这里令

$$\begin{cases} V_i \cos \gamma_i \cos \chi_{ei} = V_f \cos \gamma_f - y_{dif}\omega_f - \eta_1 x_{eif}, \\ V_i \cos \gamma_i \sin \chi_{ei} = x_{dif}\omega_f - \eta_2 y_{eif}, \\ V_i \sin \gamma_i = V_f \sin \gamma_f + \eta_3 z_{eif}. \end{cases} \quad (10)$$

其中: $\eta_1 > 0, \eta_2 > 0, \eta_3 > 0$. 则有

$$\dot{V}_{Li} = -(\eta_1 x_{eif}^2 + \eta_2 y_{eif}^2 + \eta_3 z_{eif}^2) < 0. \quad (11)$$

进而由式(10)可解得 UAV 参考速度、航向角和爬升角分别为

$$\begin{cases} V_{ir} = ((V_f \cos \gamma_f - y_{dif}\omega_f - \eta_1 x_{eif})^2 + (x_{dif}\omega_f - \eta_2 y_{eif})^2 + (V_f \sin \gamma_f + \eta_3 z_{eif})^2)^{\frac{1}{2}}, \\ \chi_{ir} = \chi_f + \arctan \frac{x_{dif}\omega_f - \eta_2 y_{eif}}{V_f \cos \gamma_f - y_{dif}\omega_f - \eta_1 x_{eif}}, \\ \gamma_{ir} = \arcsin \frac{V_f \sin \gamma_f + \eta_3 z_{eif}}{V_{ir}}. \end{cases} \quad (12)$$

则 UAV_i 参考状态向量为 $\mathbf{x}_{ir} = [V_{ir}, \chi_{ir}, \gamma_{ir}, 0, 0, 0]^T$.

考虑 Lyapunov 函数(8), 其导数为式(9). 若 UAV_i 的状态向量收敛到参考状态, 则将式(12)代入(9), 化简后可得到式(11)成立. 因此, 由 Lyapunov 稳定性原理可知, 跟踪误差 $(x_{eif}, y_{eif}, z_{eif})$ 渐近收敛于零. 需要注意的是, 为保证参考速度 V_{ir} 满足 UAV 的速度约束, η_1, η_2, η_3 应取为较小的正常数.

2.2 突发障碍物规避

假设编队飞行中遇到的突发障碍物的位置、大小、移动速度等信息可由机载传感器(如机载雷达、光电或红外等设备)探测,并通过某种形式的估计器(通常是卡尔曼滤波器^[17])估计得到或者是经由情报系统上传得到。

三维空间内,静止障碍物用圆柱体近似,如图3所示。图中: O_{op} 为静止障碍物 p 的平面中心,设其坐标为 (x_{op}, y_{op}) ,障碍物大小由半径 R_{op} 和高度 H_{op} 表示,定义如图3所示的圆柱形碰撞区(用 L_{mp} 和 ΔH_{op} 描述)和威胁区(用 L_{Mp} 和 ΔH_{op} 描述), L_{mp} 为最小允许接近距离, ΔH_{op} 为最小允许接近高度差,即当 UAV 进入碰撞区时则认为 UAV 与障碍物发生碰撞; L_{Mp} 为障碍物威胁距离,当 UAV 进入威胁区时则存在与障碍物发生碰撞的危险。

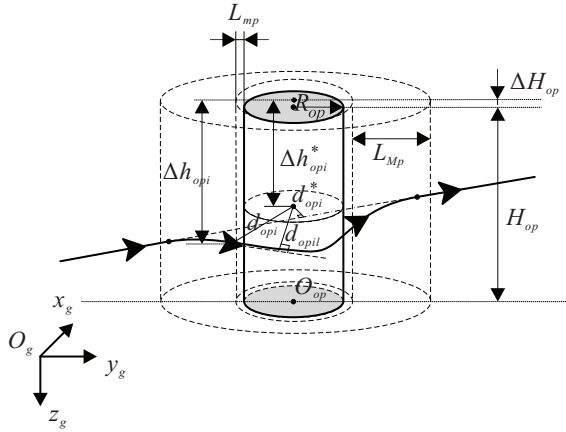


图3 静止障碍物规避

移动障碍物用球体近似,设 O_{moq} 为障碍物 q 的中心, R_{moq} 为障碍物半径, R_{moqC} 为碰撞区半径, R_{moqD} 为威胁区半径,且假设其运动模型如下^[11]:

$$\begin{cases} \dot{\chi}_{moq} = u_{moq1}, \\ \dot{\gamma}_{moq} = u_{moq2}, \\ \dot{x}_{moq} = V_{moq} \cos \gamma_{moq} \cos \chi_{moq}, \\ \dot{y}_{moq} = V_{moq} \cos \gamma_{moq} \sin \chi_{moq}, \\ \dot{z}_{moq} = -V_{moq} \sin \gamma_{moq}. \end{cases} \quad (13)$$

其中:假设障碍物移动速度 V_{moq} 为常数, χ_{moq} 、 γ_{moq} 分别为航向角和爬升角, u_{moq1} 为航向角控制输入, u_{moq2} 为爬升角控制输入, $(x_{moq}, y_{moq}, z_{moq})$ 为移动障碍物中心在惯性系下位置。

文献[11]提出一种适用于三维环境的避障惩罚策略,它基于的惩罚思想为:当 UAV 位于障碍物威胁区域内时,对 UAV 的目标函数进行代价惩罚,且 UAV 距离障碍物越近其罚值越大。这种策略存在一个缺点,即当 UAV 在威胁区域内但逐渐远离障碍物时,该策略依然会进行代价惩罚,增加了 UAV 的轨迹代价。为了克服该缺点,这里提出一种改进的惩罚策略,即当 UAV 进入障碍物威胁区域时,若 UAV 以逐渐靠近障

碍的方向飞行则进行代价惩罚,若逐渐远离障碍物则不进行代价惩罚。

对于突发三维静止障碍物,提出一种双模式避障惩罚策略:高度避障和平面避障,以减少 UAV 避障轨迹代价。当 UAV_i 进入障碍物威胁区时执行如下判断:若 $\Delta h_{opi}^* < R_{op} + L_{mp} - d_{opi}^*$,则执行高度爬升进行避障,否则执行平面内机动避障策略。 d_{opi}^* 表示 UAV_i 原始参考轨迹到障碍物中心线的最短距离, Δh_{opi}^* 表示此时对应的 UAV_i 参考位置到障碍物威胁区顶端的距离, d_{opi} 表示当前时刻 UAV_i 到障碍物中心线的距离, d_{opil} 表示障碍物中心线到 UAV_i 航向延长线的距离, Δh_{opi} 表示当前时刻 UAV_i 到障碍物威胁区顶端的距离。根据上述避障惩罚思想, UAV_i 对静止障碍物的惩罚函数如下:

$$J_{iobs1} = \sum_{s=0}^N \sum_{p=1}^{N_{so}} F(*),$$

$$F(*) = \begin{cases} k_{hp} \left(\frac{\Delta h_{opi}(k+s)}{\Delta H_{op}} + 1 \right), & d_{opi}(k) < R_{op} + L_{Mp}, \Delta h_{opi}(k) > 0, \\ & \Delta h_{opi}^* < R_{op} + L_{mp} - d_{opi}^*, \\ & \Delta h_{opi}(k+s) > 0; \\ k_{lp} \exp \left(1 - 2 \frac{d_{opi}(k+s)d_{opil}(k+s)}{(R_{op} + L_{mp})^2} \right), & d_{opi}(k) < R_{op} + L_{Mp}, \Delta h_{opi}(k) > 0, \\ & \Delta h_{opi}^* \geq R_{op} + L_{mp} - d_{opi}^*, \\ & R_{op} + L_{mp} < d_{opi}(k+s), \\ & d_{opi}(k+s) < d_{opi}(k+s-1); \\ k_{lp} \exp \left(2 - \frac{d_{opi}^2(k+s)}{(R_{op} + L_{mp})^2} \right), & d_{opi}(k) < R_{op} + L_{Mp}, \Delta h_{opi}(k) > 0, \\ & \Delta h_{opi}^* \geq R_{op} + L_{mp} - d_{opi}^*, \\ & R_{op} + L_{mp} \geq d_{opi}(k+s); \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (14)$$

其中: N_{so} 为当前时刻机载传感器所探测到的突发静止障碍物个数,常数 $k_{hp} > 0$, $k_{lp} > 0$, $\Delta h_{opi}(k)$ 、 $\Delta h_{opi}(k+s)$ 、 $d_{opi}(k)$ 、 $d_{opi}(k+s)$ 和 $d_{opil}(k+s)$ 的表达式分别为

$$\begin{cases} \Delta h_{opi}(k) = H_{op} + \Delta H_{op} - |z_i(k|k)|, \\ \Delta h_{opi}(k+s) = H_{op} + \Delta H_{op} - |z_i(k+s|k)|, \\ d_{opi}(k) = ((x_i(k|k) - x_{op})^2 + (y_i(k|k) - y_{op})^2)^{\frac{1}{2}}, \\ d_{opi}(k+s) = ((x_i(k+s|k) - x_{op})^2 + (y_i(k+s|k) - y_{op})^2)^{\frac{1}{2}}, \\ d_{opil}(k+s) = |(x_i(k+s|k) - x_{op}) \sin \chi_i(k+s|k) - (y_i(k+s|k) - y_{op}) \cos \chi_i(k+s|k)|. \end{cases} \quad (15)$$

对于三维球形移动障碍物,由于其几何对称性而

无需区分高度避障和平面避障, 这里仅定义一种避障策略, 即空间机动规避. 因此, UAV_i 对移动障碍物的惩罚函数如下:

$$J_{iobs2} = \sum_{s=0}^N \sum_{q=1}^{N_{mo}} F(*),$$

$$F(*) = \begin{cases} k_q \exp\left(\frac{(R_{moqD} - d_{moqi}(k+s))^2}{(R_{moqD} - R_{moqC})^2}\right), \\ d_{moqi}(k) < R_{moqD}, d_{moqi}(k+s) > R_{moqC}, \\ d_{moqi}(k+s) < d_{moqi}(k+s-1); \\ k_q \exp\left(\frac{(2R_{moqC})^2}{(R_{moqC} + d_{moqi}(k+s))^2}\right), \\ d_{moqi}(k) < R_{moqD}, d_{moqi}(k+s) \leq R_{moqC}; \\ 0, \text{ else.} \end{cases} \quad (16)$$

其中: N_{mo} 为当前时刻机载传感器所探测到的突发移动障碍物个数, 常数 $k_q > 0$, $d_{moqi}(k)$ 和 $d_{moqi}(k+s)$ 的表达式分别为

$$\begin{cases} d_{moqi}(k) = ((x_i(k|k) - x_{moq}(k|k))^2 + (y_i(k|k) - y_{moq}(k|k))^2 + (z_i(k|k) - z_{moq}(k|k))^2)^{\frac{1}{2}}, \\ d_{moqi}(k+s) = ((x_i(k+s|k) - x_{moq}(k+s|k))^2 + (y_i(k+s|k) - y_{moq}(k+s|k))^2 + (z_i(k+s|k) - z_{moq}(k+s|k))^2)^{\frac{1}{2}}. \end{cases} \quad (17)$$

因此, $J_{iobs} = J_{iobs1} + J_{iobs2}$.

2.3 UAV 间互碰规避

类似于障碍物规避, UAV 之间互碰规避也是研究 UAV 编队飞行时必须面对的一个重要问题. 传统基于 MPC 方法的编队飞行控制研究中, 一般是将其他 UAV 视为移动障碍物进行规避或者对优化问题增加不等式约束条件实现 UAV 间避碰, 如 Jongho 等^[18]和 Zhao 等^[19]通过增加不等式约束实现避碰, 增加了优化问题的求解难度, 且由于缺乏相关协调策略, 多个 UAV 可能同时机动避碰而引起链式效应. 为了避免这种情况, Wang 等^[20]提出一种优先级避碰协调策略, 即编队所有 UAV 根据当前任务状态均标记有相应的优先级别, 在可能发生避碰时, 优先级低 UAV 将优先级高的 UAV 当作移动障碍物进行规避, 而优先级高的 UAV 则不采取避碰机动, 从而避免多架 UAV 同时避碰带来的链式效应. 该避碰协调策略简单实用, 这里将其直接用于三维空间的编队避碰实现, 并采用上述改进的规避惩罚思想.

一般地, 编队各 UAV 的优先级取决于其当前任务和所处的编队位置等. 这里给出确定各 UAV 优先级的两条简单原则: 当前执行避障等紧急任务的 UAV 优先级高; 距离虚拟点较近的 UAV 优先级高.

假设 UAV_i 优先级低于 UAV_j, d_{ij} 为两 UAV 之间距离. 根据上述避碰思想, UAV_i 将 UAV_j 视为移

动障碍物进行规避, 且假设 UAV_i 通过通讯网络获得 UAV_j 的运动信息. 与移动障碍物模型相似, 假设 UAV_j 可看作一个质点, 且被半径为 R_C 和 R_D 的碰撞球和安全球包围. 当 UAV_i 进入 UAV_j 的碰撞球内时, 认为两机发生碰撞; 当 UAV_i 进入 UAV_j 安全球且向靠近 UAV_j 的方向飞行时, 认为有碰撞危险, UAV_i 需执行规避机动, 否则无需规避.

假设通讯网络延迟时间为 Δt_k ($\Delta t_k \leq \Delta t_{k\max} < N$), 由预测方法原理可知, 当前时刻下 UAV_i 只能接收到 UAV_j 从时刻 $k - \Delta t_k$ 起未来 N 步的预测位置信息, 即 $(x_j(k - \Delta t_k + s|k - \Delta t_k), y_j(k - \Delta t_k + s|k - \Delta t_k), z_j(k - \Delta t_k + s|k - \Delta t_k))$, $s = 0, 1, \dots, N$. 因此, UAV_i 避碰惩罚函数如下:

$$J_{iavo} = \sum_{j=1, j \neq i}^m \sum_{s=0}^{N-\Delta t_k} F(*),$$

$$F(*) = \begin{cases} k_{ij} \exp\left(\frac{(R_D - d_{ij}(k+s))^2}{(R_D - R_C)^2}\right), \\ d_{ij}(k) < R_D, p_i(k) < p_j(k), \\ d_{ij}(k+s) > R_C, \\ d_{ij}(k+s) < d_{ij}(k+s-1); \\ k_{ij} \exp\left(\frac{(2R_C)^2}{(R_C + d_{ij}(k+s))^2}\right), \\ d_{ij}(k) < R_D, p_i(k) < p_j(k), \\ d_{ij}(k+s) \leq R_C; \\ 0, \text{ else.} \end{cases} \quad (18)$$

其中: $k_{ij} > 0$, $p_i(k)$ 和 $p_j(k)$ 分别为对应 UAV 的优先级, $d_{ij}(k)$ 和 $d_{ij}(k+s)$ 的表达式分别为

$$\begin{cases} d_{ij}(k) = ((x_i(k|k) - x_j(k|k - \Delta t_k))^2 + (y_i(k|k) - y_j(k|k - \Delta t_k))^2 + (z_i(k|k) - z_j(k|k - \Delta t_k))^2)^{\frac{1}{2}}, \\ d_{ij}(k+s) = ((x_i(k+s|k) - x_j(k+s|k - \Delta t_k))^2 + (y_i(k+s|k) - y_j(k+s|k - \Delta t_k))^2 + (z_i(k+s|k) - z_j(k+s|k - \Delta t_k))^2)^{\frac{1}{2}}. \end{cases} \quad (19)$$

2.4 分布式 NMPC 编队控制算法描述

综上所述, 为实现动态环境下的 UAV 编队保持, 各 UAV 需在每一采样时刻分别按如下步骤计算得到各 UAV 的控制输入.

Step 1: 设当前采样时刻为 k , UAV_i 将前一时刻 $k-1$ 时存储的最优控制输入序列 $\{\mathbf{u}_i(k|k-1), \dots, \mathbf{u}_i(k+N-2|k-1), \mathbf{u}_i(k+N-2|k-1)\}$ 作为初始猜测值, 根据式 (6) 预测未来 N 步的 UAV 状态向量 $\mathbf{x}_i(k+s|k)$, $s = 1, 2, \dots, N$;

Step 2: 由预测的 UAV 状态向量以及已知的虚拟点运动指令和期望队形, 根据式 (12) 计算 UAV 参考状态向量 $\mathbf{x}_{ir}(k+s|k)$, $s = 1, 2, \dots, N$;

Step 3: 根据机载探测信息和网络通讯获得的

信息,由式(14)~(19)分别计算得到避障和避碰罚值 J_{iobs} 和 J_{iavo} ;

Step 4: 最小化目标函数(7),得到当前时刻的最优控制输入序列 $\{\mathbf{u}_i(k|k), \dots, \mathbf{u}_i(k+N-1|k)\}$;

Step 5: 将 $\mathbf{u}_i(k|k)$ 作用于 UAV_i,其他分量以 $\{\mathbf{u}_i(k+1|k), \dots, \mathbf{u}_i(k+N-1|k), \mathbf{u}_i(k+N-1|k)\}$ 形式存储,作为下一采样时刻控制输入的初始预测值;

Step 6: 令 $k = k + 1$, 返回 Step 1.

3 仿真结果与分析

为了验证本文方法的有效性,下面以五机 V 型编队飞行为例,在 Matlab Simulink 环境下进行仿真实验.其中: Step 4 中采用 Matlab 自带的优化指令 fmincon 最小化目标函数,优化算法选用内点法.

3.1 仿真参数

离散时间步长 $\Delta t = 0.5$ s, 预测长度 $N = 5$, 仿真时间 200 s. UAV 编队期望队形及初始状态分别见表 1 和表 2.

表 1 UAV 编队期望队形

UAV _s	$(x_{dif}, y_{dif}, z_{dif})$	m
UAV ₁	(230.8, 0, 0)	
UAV ₂	(57.6, -100, 0)	
UAV ₃	(57.6, 100, 0)	
UAV ₄	(-115.4, -200, 0)	
UAV ₅	(-115.4, 200, 0)	

表 2 UAV 编队初始状态

UAV _s	$V_i/(m/s)$	χ_i/rad	γ_i/rad	$(x_{eif}, y_{eif}, z_{eif})/m$
UAV ₁	50	$\pi/4$	0	(150, 0, 0)
UAV ₂	50	$\pi/4$	0.1	(0, 200, 0)
UAV ₃	50	$\pi/4$	-0.1	(0, -200, 0)
UAV ₄	50	$\pi/3$	0	(-100, 0, 50)
UAV ₅	50	$\pi/5$	0	(0, 0, -150)

各 UAV 控制输入约束及速度包线分别为 $u_{xi} \in [-1, 1]$ 、 $u_{yi} \in [-0.5, 0.5]$ 、 $u_{zi} \in [-1, 3]$ 、 $V_i \in [30, 80]$, $i = 1, 2, \dots, 5$; UAV 碰撞半径和安全半径分别为 $R_C = 30$ m, $R_D = 120$ m; 对应初始优先级分别为 $p_1 = 5, p_2 = 4, p_3 = 3, p_4 = 2, p_5 = 1$, 机间通讯延迟一个步长. 虚拟点初始位置及参考轨迹指令为

$$(x_{f0}, y_{f0}, z_{f0}) = (0 \text{ m}, 0 \text{ m}, -1 \text{ 000 m}), \chi_{f0} = 0;$$

$$V_f(t) = 50 \text{ m/s}, t \in [0, 200] \text{ s};$$

$$\omega_f(t) = \begin{cases} 0 \text{ rad/s}, & t \in [0, 40] \text{ s}; \\ 0.02 \text{ rad/s}, & t \in (40, 100] \text{ s}; \\ 0 \text{ rad/s}, & t \in (100, 200] \text{ s}; \end{cases}$$

$$\gamma_f(t) = 0 \text{ rad}, t \in [0, 200] \text{ s}.$$

飞行环境中随机布置若干事先未知的静止障碍物和一个移动障碍物. 其中: 移动障碍物半径、碰撞区半径和威胁半径分别为 100 m、150 m 和 500 m, 并以 40 m/s 速度在 1 000 m 高空作平面盘旋飞行, 且式(13)中的 $u_{moq1} \equiv 0.02$, $u_{moq2} \equiv 0$. 机间避碰惩罚增益 $k_{ij} = 60 \text{ 000}$, 移动障碍物避撞惩罚增益 $k_q = 11 \text{ 000}$;

UAV 对各静止障碍物的高度避障惩罚增益和平面避障惩罚增益分别为 $k_{hp} = [48 \text{ 000}, 60 \text{ 000}, 55 \text{ 000}]$, $k_{lp} = [30 \text{ 000}, 40 \text{ 000}, 45 \text{ 000}]$. 其他控制参数如下:

$$\begin{cases} \eta_1 = 0.01, \eta_2 = 0.01, \eta_3 = 0.01, \\ \mathbf{R} = \text{diag}(2, 3, 3), \\ \mathbf{S} = 0.05 \text{diag}(1, 57.3, 57.3, 1, 1, 5), \\ \mathbf{S}_N = \text{diag}(1, 57.3, 57.3, 1, 1, 5). \end{cases}$$

3.2 结果分析

仿真结果如图 4~图 10 所示. 其中: 图 4~图 9 为编队各 UAV 的队形误差曲线及 UAV₃ 的控制指令变化曲线; 图 10(a) 为 UAV 编队在动态环境下的飞行轨迹三维视图, 图中球体为移动障碍物.

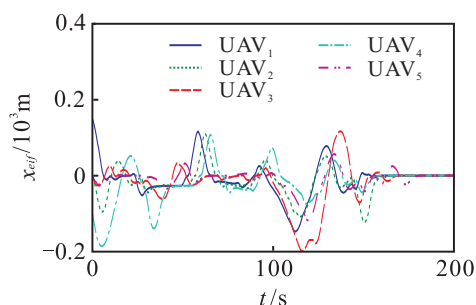


图 4 纵向队形误差

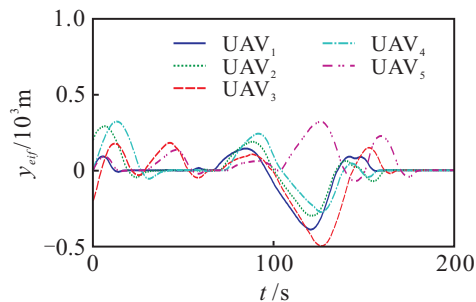


图 5 横向队形误差

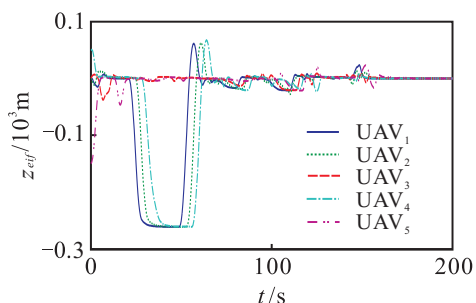


图 6 高度方向队形误差

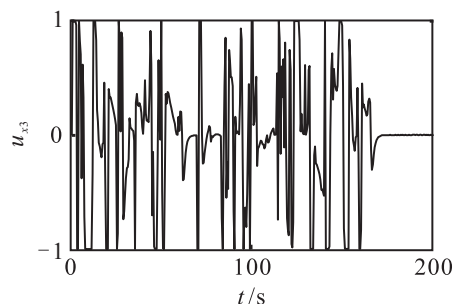


图 7 UAV₃ 的 x 方向控制输入

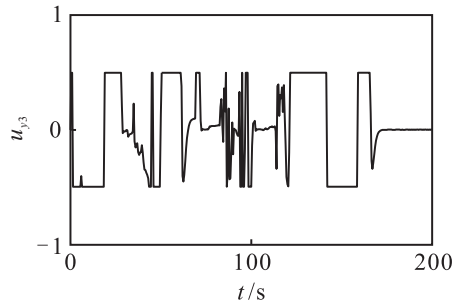


图 8 UAV₃的y方向控制输入

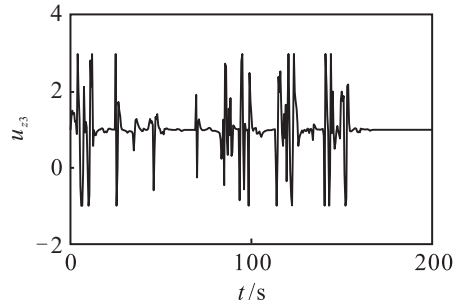
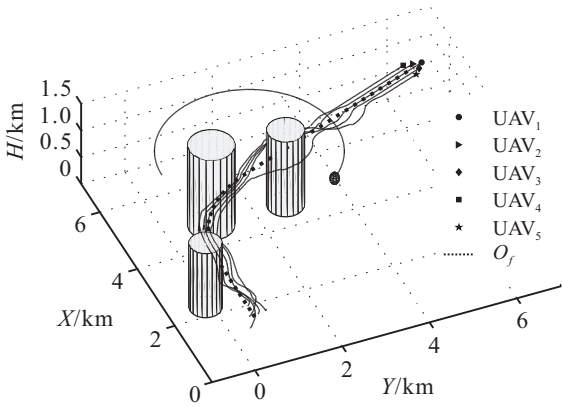
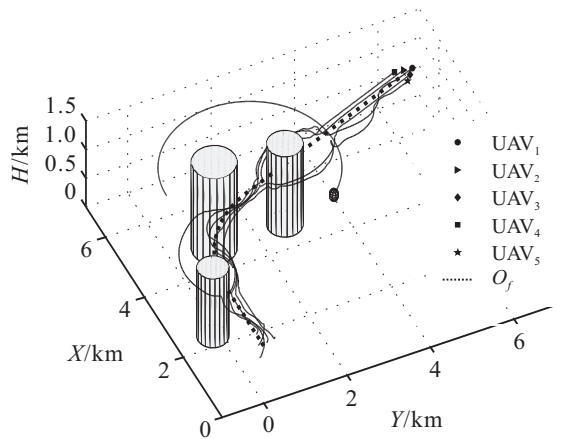


图 9 UAV₃的z方向控制输入



(a) 三维视图(本文方法)



(b) 三维视图(传统方法)

图 10 编队飞行轨迹

由编队保持误差和飞行轨迹图可以看出,对于编队初始状态偏差,各UAV能够很快地回到期望编队构型并沿参考轨迹飞行;由编队避障轨迹可以看出,对于首先遭遇的障碍物,由于其高度相对较低,

UAV₁、UAV₂和UAV₄选择了爬升高度规避,UAV₃和UAV₅则选择平面机动规避,而对于后面高度较高的两个静止障碍物,所有UAV均选择了平面机动规避;对于移动障碍物,表3给出了编队整个飞行过程中各UAV到移动障碍物中心的最短距离,分析可知编队各UAV均能成功规避移动障碍物;表4为编队飞行过程中各UAV两两之间的最短距离,可以看出,在存在通讯网络延迟条件下,编队各UAV之间依然不会发生互碰。

表 3 各 UAV 到移动障碍物最短距离 m					
UAV _s	UAV ₁	UAV ₂	UAV ₃	UAV ₄	UAV ₅
最短距离	179.42	169.17	211.19	304.55	195.48

表 4 各 UAV 之间最短距离 m					
UAV _s	UAV ₁	UAV ₂	UAV ₃	UAV ₄	UAV ₅
UAV ₁	0	115.98	104.44	231.35	328.77
UAV ₂	115.98	0	96.77	101.91	141.71
UAV ₃	104.44	96.77	0	87.01	126.21
UAV ₄	231.35	101.91	87.01	0	89.07
UAV ₅	328.77	141.71	126.21	89.07	0

为了验证本文方法的优越性,在相同仿真环境下采用文献[11]提出的传统避障方法进行仿真实验,图10(b)为对应的编队飞行轨迹三维视图。可以看出,传统避障方法同样能够实现对突发障碍物的规避,但避障轨迹偏移较大。这里定义各UAV的避障路径偏差代价为UAV实际位置与期望位置的距离绝对差值关于时间的积分累加,则两种避障方法下的各UAV路径偏差代价可分别计算得到表5。

表 5 各 UAV 路径偏差代价					
方法	UAV ₁	UAV ₂	UAV ₃	UAV ₄	UAV ₅
本文方法	45 829	48 570	46 758	50 738	30 915
传统方法	78 782	81 706	52 164	87 863	47 970

分析可知,采用本文提出的改进双模避障方法得到的UAV避障路径偏差代价要比传统避障方法平均减少约三分之一。这说明采用本文方法生成的避障轨迹在满足避障前提下能够较少地偏离编队参考轨迹。

4 结 论

本文针对无人机编队在三维动态环境下沿参考轨迹飞行时可能遭遇突发障碍物而发生碰撞的问题,提出了一种可实时避障及无人机间避碰的分布式NMPC编队保持算法。分别针对突发静止障碍物和移动障碍物设计了一种改进的双模避障策略和空间避障策略,并利用NMPC方法的预测特性,采用基于优先级的改进避碰惩罚策略实现通讯延迟下的UAV间互碰避免。最后,通过仿真实验验证了本文设计的编队控制器的有效性,实现了对突发静止和移动障碍物的有效规避以及UAV之间互碰避免。与文献[11]的传统避障方法相比,本文设计的改进避障方法得到的UAV规避路径偏差代价更小。之后可采用模型预测方

法针对突发多类型威胁等复杂动态环境下的编队在线规避及编队重构展开进一步研究.

参考文献(References)

- [1] 樊琼剑, 杨忠, 方挺, 等. 多无人机协同编队飞行控制的研究现状[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 683-691.
(Fan Q J, Yang Z, Fang T, et al. Research status of coordinated formation flight control for multi-UAVs[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 683-691.)
- [2] 万婧. 无人机自主编队飞行控制系统设计方法及应用研究[D]. 上海: 复旦大学力学与工程科学系, 2009.
(Wang J. Research on design and application of autonomous formation flight control system of unmanned aerial vehicles[D]. Shanghai: Department of Mechanics and Engineering Science, Fudan University, 2009.)
- [3] 张磊, 方洋旺, 毛东辉, 等. 导弹协同攻击编队自适应滑模控制器设计[J]. 宇航学报, 2014, 35(6): 700-707.
(Zhang L, Fang Y W, Mao D H, et al. Adaptive sliding-mode controller design for missile cooperative engagement[J]. J of Astronautics, 2014, 35(6): 700-707.)
- [4] 王晓燕, 王新民, 姚从潮. 无人机编队飞行神经网络自适应逆控制器设计[J]. 控制与决策, 2013, 28(6): 838-843.
(Wang X Y, Wang X M, Yao C C. Design of UAVs formation flight controller based on neural network adaptive inversion[J]. Control and Decision, 2013, 28(6): 838-843.)
- [5] Mark R A, Andrew C R. Formation flight as a cooperative game[C]. Proc of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conf. Boston MA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998: 244-251.
- [6] Chang B L, Quee S Ng. A flexible virtual structure formation keeping control for fixed-wing UAVs[C]. IEEE Conf on Control Application. Santiago: IEEE, 2011: 19-21.
- [7] Seunghoon K, Hyunjin C, Youdan K. Formation flight and collision avoidance for multiple UAVs using concept of elastic weighting factor[J]. Int J of Aeronautical and Space Sciences, 2013, 14(1): 75-84.
- [8] Zhou C, Zhou S L, Ming L, et al. UAV Formation flight based on nonlinear model predictive control[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012: 1-15.
- [9] Fabrizio G, Maro I, Marcello, et al. Dynamic and control issues of formation flight[J]. Aerospace Science and Technology, 2005(9): 65-71.
- [10] 柳林. 多机器人系统任务分配及编队控制研究[D]. 长沙: 国防科技大学电气工程与自动化学院, 2006.
(Liu L. Research on multi-robot system task allocation and formation control[D]. Changsha: School of Electrical Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2006.)
- [11] 王恽, 祝小平, 周洲, 等. 3维动态环境下的无人机路径跟踪算法[J]. 机器人, 2014, 36(1): 83-91.
(Wang Y, Zhu X P, Zhou Z, et al. UAV path following in 3-D dynamic environment[J]. Robot, 2014, 36(1): 83-91.)
- [12] Tobias P, Thomas R K, Jan T G. UAV formation flight using 3D potential field[C]. 16th Mediterranean Conf on Control and Automation. Ajaccio: 2008: 25-27.
- [13] 方振平, 陈万春, 张曙光. 航空飞行器飞行动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 93-116.
(Fang Z P, Chen W C, Zhang S G. Flight dynamics of aircraft[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005: 93-116.)
- [14] 何德峰, 丁宝苍, 于树友. 非线性系统模型预测控制若干基本特点与主题回顾[J]. 控制理论与应用, 2013(3): 273-287.
(He D F, Ding B C, Yu S Y. Review of fundamental properties and topics if model predictive control for nonlinear systems[J]. Control Theory & Applications, 2013(3): 273-287.)
- [15] 李国勇. 智能预测控制及其 Matlab 实现[M]. 第2版. 北京: 电子工业出版社, 2010: 255-261.
(Li G Y. Intellective predictive control and implement by Matlab[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2010: 255-261.)
- [16] 赵璐华, 王晋云, 陈翔, 等. 无人飞行器编队队形控制研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(8): 34-39.
(Zhao L H, Wang J Y, Chen X, et al. Study on flight control for formation keeping of wing UAV[J]. Electronic Optics and Control, 2011, 18(8): 34-39.)
- [17] Antonios T, Brian W, Madhavan S. Cooperative path planning of unmanned aerial vehicles[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 70-104.
- [18] Jongho S, H Jin Kim. Nonlinear model predictive formation flight[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans, 2009, 39(5): 1116-1125.
- [19] Zhao W H, Tiauw H G. 3-D formulation of formation flight based on model predictive control with collision avoidance scheme[C]. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: 2010: 4-7.
- [20] Wang Y H, Vivek Y, Balakrishnan S N. Cooperative UAV formation flying with obstacles/collision avoidance[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2007, 15(4): 672-679.

(责任编辑: 齐 霖)