

无人机航道全局优化调度数学模型仿真分析

陈 筱¹, 张 琰^{1,2}

(1 武昌工学院 信息工程学院, 湖北 武汉 430065;

2 法国贡比涅技术大学(UTC), 皮卡第大区瓦兹省 贡比涅 60200)

摘 要: 无人机航道全局优化调度模型是一组多元耦合的系统模型, 针对当前的非线性时滞泛函调度模型容易陷入局部收敛的问题, 提出一种基于双曲偏微分方程波动组合优化的无人机航道全局优化调度数学模型. 采用非线性 Levenberg-Marquardt 双曲偏微分方程构建无人机航道的参量输入输出控制模型, 通过三次非线性特征测度分解进行航道调度的全局寻优, 由 Lipschitz 凸条件得到偏微分方程的奇异半正定周期解, 根据解向量作为约束参量进行航道调度的稳定性泛函, 进行航道调度模型的全局波动组合优化. 仿真结果表明, 采用该数学模型进行无人机航道调度的收敛性较好, 调度时滞误差较低, 可靠性和稳健性较优.

关键词: 无人机; 航道; 调度; 全局优化; 数学模型

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)04-0135-05

Simulation Analysis of the Mathematical Model for the Global Optimal Dispatching of Unmanned Aerial Vehicles

CHEN Xiao¹, ZHANG Yan^{1,2}

(1 College of Information Engineering, Wuchang Institute of Technology, Wuhan 430065, China;

2 Université de Technologie de Compiègne, Compiègne 60200, France)

Abstract: The UAV navigation global optimization scheduling model is a set of multivariate coupling system model, aiming at the nonlinear delay functional scheduling model the prematurity problem, put forward a kind of hyperbolic partial differential equations of wave motion optimization of UAV channel scheduling mathematical model based on global optimization. By using Levenberg-Marquardt nonlinear hyperbolic partial differential equations to construct parameter input and output control model of UAV navigation, global three times through the nonlinear characteristics of waterway measure decomposition scheduling optimization, partial differential equations singular semi positive periodic solutions obtained by Lipschitz convex conditions, according to the solution vector as the constraint parameter stability of functional channel scheduling, global optimization the fluctuation of channel scheduling model. The simulation results show that the proposed model has better convergence performance, and the error is less, and the reliability and robustness are better.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); channel; scheduling; global optimization; mathematical model

1 引言

无人机是指无人驾驶、自主推进的小型飞行器, 无人机利用空气动力承载飞行并可回收重复使用, 由于无人机具有机动性好和无人驾驶的特点, 随着无人机发展技术的进步, 其功能也越来越强大, 无人

机在遂行空中侦察、空中打击、危险救援、灾难搜索等领域中展示了较为广阔的应用价值和发展前景^[1]. 在无人机飞行控制中, 完全需要通过地面遥控和塔台控制, 进行无人机飞行的航道规划和调度, 这样才能确保无人机飞行任务的顺利安全完成, 研究无人机航道调度模型, 将在提高无人机生存和打击

能力方面具有重要意义^[2].

无人机航道调度模型是一个多参量输入与输出的非线性耦合模型,对航道调度模型的优化设计和控制分析是建立在无人机飞行稳定性控制与航道偏移参量统计分析的基础上的,由于无人机飞行航道分布与姿态数据采集的实时性要求较高,飞行控制参量受到环境和扰动等因素的影响较大,以此航道调度的全局稳定性和收敛性不好.传统方法中,对无人机的优化调度数学主要采用的是粒子群控制模型、模糊 PID 控制模型以及自适应反演积分调度数学模型等^[3-4],上述方法通过对无人机飞行的特征参量采集和多元线性进行自适应分析处理,结合相应的控制理论实现无人机航道规划,取得了一定的研究成果,其中,文献[5]提出一种并行微观交通动态负载平衡调度模型,将无人机航道作为各节点负载平衡指标,基于成本大致相等的原则将一个域划分成若干个子域,使得无人机航道调度的负载变化比较平缓,从而提高了航道负载的均衡性,但是该方法存在计算开销过大,航道调度的实时性不好的问题.文献[6]提出一种基于云网格集成调度的路径规划算法,构建基于 Small-World 模型的云网格航道网络模型,采用固有模态函数加权平均求得各航道的拥堵系数,结合自适应加权方法实现无人机航道拥堵检测和自适应控制,构建无人机航道的非线性时滞泛函调度模型,该方法在航道调度中容易陷入局部收敛.针对上述问题,本文提出一种基于双曲偏微分方程波动组合优化的无人机航道全局优化调度数学模型.首先采用非线性 Levenberg-Marquardt 双曲偏微分方程构建无人机航道的参量输入输出控制模型,然后通过全局波动组合优化进行模型的稳定解寻优,最后通过仿真实验进行性能测试,得出有效性结论.

2 无人机航道调度约束参量分析

2.1 无人机航道调度网格模型与微分方程构建

为了实现多无人机航道调度,首先构建无人机航道调度的网格分布模型,如图 1 所示.

在图 1 所示的无人机航道网格结构模型中,采用一个 5 元组表示一个航道,如下:

$$Edge = \{StartID, EndID, c_a, x_a, t_a\} \quad (1)$$

式中, c_a 表示了无人机在空中飞行航道的有向边; x_a 表示了航道的动态特性; $Edge$ 表示一条有向边, $StartID$ 为网格结构的起点; $EndID$ 表示有向边终点. 假定无人机数目为 n , 分布为 $N_1, \dots, N_n$, 在多通

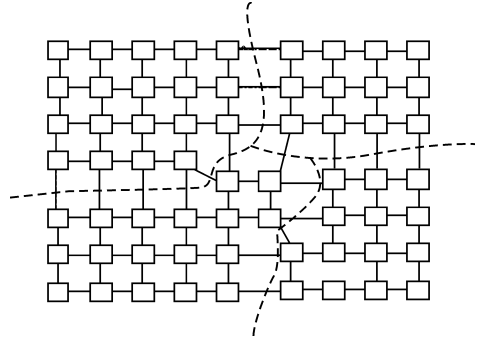


图 1 无人机航道调度网格结构模型

道的网格分布模型中,构建无人机陆基飞行航道场景,网格的横向向量为 $L_1, \dots, L_n$ 和纵向向量为 $P_1^{\min}, \dots, P_n^{\min}$, 飞行路径优化规划执行时间为 t_0 , 负载为 L_0 . 航道的阻抗迁移前后的负载为 t_0 和 t_j , 两者具有约束相关性, 综合飞行密度信息^[7], 得到的负载量为 L_t , 则下式成立:

$$t_0 = \frac{L_0 - L_t}{P_0^{\min}} = \frac{L_j + L_t}{P_t^{\min}} = t_j \quad (2)$$

对 L_t 求解可得:

$$L_t = \frac{L_0 P_j^{\min} - L_j P_0^{\min}}{P_0^{\min} + P_j^{\min}} \quad (3)$$

求解式(3)可得无人机飞行调度的时滞函数 L_t . 采用非线性耦合的 Levenberg-Marquardt 方程表示无人机航道调度的多输入输出(Multiple input / output, MIMO)参量控制模型:

$$\begin{cases} u_n - \Delta u + |u|^4 u = 0, \\ (u, \partial_i u)|_{t=0} = (u_0, u_1) \in \dot{H}_x^s \times \dot{H}_x^{s-1} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $u: I \times \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ 是无人机航道调度的非线性映射函数, $d \geq 4$, $0 \in I \subset \mathbb{R}$ 是紧缩闭区间, 求得非线性特征分布的行列式表达式为

$$\det(V(a_1, \dots, a_m)) = \prod_{1 \leq i < j \leq m} (a_j - a_i) \quad (5)$$

式中, $m \geq 2$, 计算航道调度的网格分布特征参量 $s_c = \frac{d-1}{2}$. 当 $s_c = 1$ 即 $d = 3$ 时, 得到边值周期解表示为

$$E(u(t), u_t(t)) = \int_{\mathbb{R}^d} \frac{1}{2} (|\nabla u(t)|^2 + |u_t(t)|^2) + \frac{1}{6} |u(t)|^6 dx \quad (6)$$

在上述构建了无人机航道调度网格模型, 采用非线性双曲微分方程优化求解方法进行航道调度建模, 进行无人机航道调度的全局优化.

2.2 航道调度的约束参量分析

计算无人机在航道运行的平局速度以及飞行姿

态等约束参量信息,进行航道调度控制约束参量分析,取 $c = 1/n_j$,得到航道中的负载迁移量可表示为

$$L_t^{\text{eff}} = \frac{1}{n_j} \frac{L_0 P_j^{\min} - L_j P_0^{\min}}{P_0^{\min} + P_j^{\min}} \quad (7)$$

综合飞行密度信息和飞行姿态定位信息特征^[8],提取航道冲突的关键信息,得到航道分布的节点集合表示为

$$V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_N\} \quad (8)$$

式中, N 为航道交叉节点的个数,对所有航道内飞行密度取统计平均,得到边的集合为

$$E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_M\} \quad (9)$$

式中, M 为边的个数,对航道冲突进行概率密度分析,得到最佳寻优路径为

$$t_a = t_a^0 \left[1 + J \left(\frac{x_a}{(c_a - x_a)} \right) \right] \quad (10)$$

式中, J 为航道的实际负载能力, t_a^0 为冲突系数, c_a 为相对地理位置信息特征参量。

假设无人机航道调度约束空间内的规范化正交基为 $g_i(\cdot)$, $\alpha, \beta \in R$,在进行大规模和多无人机航道调度中,求得双曲微分方程的边值稳定解 $u: I \times \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$, 令 $x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n)$ 是一个边值向量,对每个紧区间 $K \subset I$,通过自适应寻优,得到航道调度的控制约束参量特征输入为 $(u, u_t) \in C_t(K, \dot{H}_x^s \times \dot{H}_x^{s-1})$, $u \in L_{t,x}^{d+1}(K \times \mathbb{R}^d)$,当满足边值收敛条件下,采用如下 Filpov 公式进行全局稳定泛函:

$$u(t) = w(t)(u_0, u_1) + \int_0^t \frac{\sin((t-t')|\nabla|)}{|\nabla|} F(u(t')) dt' \quad (11)$$

式中, $F(u) = |u|^4 u$,由此得到无人机航道调度的波动算子:

$$w(t)(u_0, u_1) = \cos(t|\nabla|)u_0 + \frac{\sin(t|\nabla|)}{|\nabla|}u_1 \quad (12)$$

通过随机测度分解得到航道调度微分方程的不可微点集合,在初值条件为 (u_0, u_1) 时求得方程的稳定解,进行调度数学模型优化设计。

3 航道调度数学模型构建实现

3.1 特征测度分解

在上述进行了无人机航道调度约束参量分析和控制目标函数构建的基础上,进行航道调度数学模型优化设计,本文提出一种基于双曲偏微分方程波动组合优化的无人机航道全局优化调度数学模型。

对非线性 Levenberg-Marquardt 双曲偏微分方程进行三次非线性特征测度分解^[9],进行航道调度的全局寻优,给出航道调度的数学问题表达如下:

$$\min(f) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \quad (13)$$

$$s. \begin{cases} \sum_{j=1}^n X_{ij} = a_i, i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=1}^m X_{ij} = b_j, j = 1, 2, \dots, n \\ X_{ij} \geq 0, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (14)$$

对上述调度目标行数进行全局寻优,求得稳定解向量,假设非线性 Levenberg-Marquardt 双曲偏微分方程的极值泛函为 $d = 4, s_c = \frac{3}{2}$ 时,对所有的 $A > 0$, 航道调度的稳定调度满足 $\eta_0 = \eta_0(d, A)$, 当 $0 < \eta \leq \eta_0$, 在紧闭区域 I 内进行线性回归变换,当初值 $(u_0, u_1) \in \dot{H}_x^s \times \dot{H}_x^{s-1}$ 满足:

$$\begin{aligned} ||(u_0, u_1)||_{\dot{H}_x^s \times \dot{H}_x^{s-1}} &\leq A \\ ||w(t)(u_0, u_1)||_{L_{t,x}^{10}(\mathbb{R}^4)} &\leq \eta \end{aligned} \quad (15)$$

那么在迭代步长为连续数的条件下航道调度目标函数在 $I \times \mathbb{R}^4$ 上存在唯一的解满足:

$$\begin{aligned} ||u||_{L_{t,x}^{10}(\mathbb{R}^4)} &\leq 2\eta \\ |||\nabla|^{\frac{5}{4}}u||_{S_{\frac{1}{4}}} + |||\nabla|^{\frac{1}{4}}u_t||_{S_{\frac{1}{4}}} &< \infty \end{aligned} \quad (16)$$

由 Lipschitz 凸条件进行航道调度数学模型的特征测度分解,得到偏微分方程的奇异半正定周期解为

$$\zeta_1(t, s) = \begin{bmatrix} x^T(t) & x^T(t-\tau) & \dot{x}^T(t) \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

$$\zeta_2(t, s) = \begin{bmatrix} y^T(t) & y^T(t-\sigma) & \dot{y}^T(t) \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

根据解向量作为约束参量进行航道调度的稳定性泛函,进行无人机航道调度数学模型优化设计。

3.2 航道调度模型的全局波动组合优化分析

引理 1 假定 $\frac{1}{p} = \frac{1}{q} + \frac{s}{d}, 1 < p < q < \infty, s > 0$, 给出无人机航道调度连续时滞系统的非线性 Levenberg-Marquardt 双曲偏微分方程稳定解满足约束条件:

$$||f||_{L^q(\mathbb{R}^d)} \leq C |||\nabla|^s f||_{L^p(\mathbb{R}^d)} \quad (19)$$

定义 1 对 $s \geq 0$, 如果 $\frac{1}{q} + \frac{d}{r} = \frac{d}{2} - s$, 那么多线性增长约束条件下,称 (q, r) 是全局波动组合稳定解。

根据上述引理,得到控制目标函数的双周期性孤波解矩阵为

$$\mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{11} & 0 & \mathbf{r}_{13} & 0 & 0 & P_1 W \\ * & \mathbf{r}_{22} & P_2 D & \mathbf{r}_{24} & \mathbf{r}_{25} & 0 \\ * & * & \mathbf{r}_{33} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & \mathbf{r}_{44} & 0 & \mathbf{r}_{46} \\ * & * & * & * & \mathbf{r}_{55} & 0 \\ * & * & * & * & * & \mathbf{r}_{66} \end{bmatrix} \quad (20)$$

在矩阵中各参量为

$$\mathbf{r}_2^T = [-A^T \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad W^T \quad 0 \quad 0]^T \quad (21)$$

$$\mathbf{r}_3^T = [0 \quad -C^T \quad D^T \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (22)$$

$$\xi(t) = [x^T(t) \quad y^T(t) \quad x^T(t - \tau) \quad y^T(t - \sigma) \quad f^T(y(t)) \quad f^T(y(t - \sigma))]^T \quad (23)$$

当 $p > 2$ 时,进行 $\dot{H}_x^s$ 全局强稳定泛函,得到无人机航道调取的全局稳定性控制方程为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bx(t - d_1(t) - d_2(t)) \quad (24)$$

$$x(t) = \varphi(t) \quad t \in [-h, 0]$$

式中, $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_l(t)]^T$ 是调度控制目标函数以时间参量 t 为自变量的二维微分方程,用近似线性方法进行全局优化调度的稳定解分析^[10],表示为

$$\Psi_1(d_1(t)) = \Psi + d_1(t)K(Z_1 + Z_2 + Z_3)^{-1}K^T + (h_1 - d_1(t))[WZ_1^{-1}W^T + L(Z_2 + Z_3)^{-1}L^T] \quad (25)$$

$$\Psi_2(d_2(t)) = \Psi + (h_2 - d_2(t))L(Z_2 + Z_3)^{-1}L^T + d_2(t)M^T(Z_2 + Z_3)^{-1}M^T \quad (26)$$

采用边界条件稳定性评估方法进行无人机航道的冲突检测与统计平均分析,得到期望输出为

$$\begin{cases} f(x_1, x_2) = r_1 x_1 (1 - \frac{x_1}{N_1} - \sigma_1 \frac{x_2}{N_2}) = 0 \\ g(x_1, x_2) = r_2 x_2 (1 - \sigma_2 \frac{x_1}{N_1} - \frac{x_2}{N_2}) = 0 \end{cases} \quad (27)$$

通过上述数学模型构建,根据解向量作为约束参量进行航道调度的稳定性泛函,进行航道调度模型的全局波动组合优化设计,提高航道调度的可靠性。

4 仿真测试分析

为了测试本文设计的数学模型在实现无人机航道全局优化调度中的性能,进行仿真实验和性能

测试分析。实验的硬件环境: IntelCore 2.4 GHz CPU 和 1 GB 内存的计算机,采用 Netlogo 软件建立无人机航道分布的网格场景,采用 Matlab 编程软件进行数学模型的编程设计。无人机航道的初始节点个数设定为 10 和 20,单航道无人机飞行的测试时间为 45 min,航道分布网格中的交叉口数目分别为 120, 150, 200, 240,自适应参数 $\epsilon_1 = 0.1$,航道调度数学模型全局寻优的迭代步长设定为 12,根据上述仿真环境和参数设定,进行航道调度仿真分析,首先进行无人机飞行与航道调度的统计特征参量提取,提取无人机飞行的位姿参量、航道偏移系数以及时滞响应特征量,得到提取结果如图 2 所示。

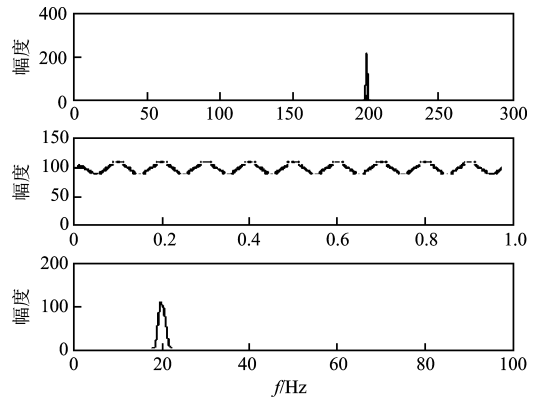


图 2 无人机飞行与航道调度的统计特征参量提取

以图 2 给出的统计特征参量为模型输入参量,进行无人机航道调度,为了对比调度性能,采用本文方法和传统方法,以调度收敛曲线和时滞误差为测试指标,得到对比结果如图 3 和图 4 所示。

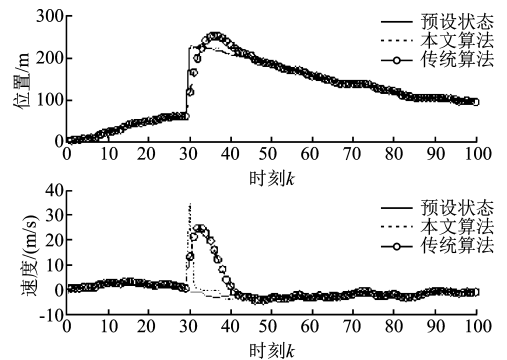


图 3 无人机航道调度的位置和速度参量收敛曲线

分析图 3 和图 4 结果得知,采用本文数学模型进行无人机航道调度,无人机的飞行速度和位置具有较好的匹配跟踪能力,收敛性较好,时滞误差较小,从而保证了航道调度的可靠性和鲁棒性。

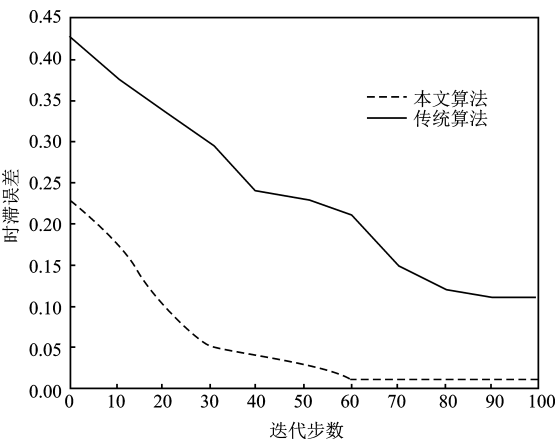


图 4 时滞误差对比

5 结束语

本文研究了无人机航道全局优化调度问题,提出一种基于双曲偏微分方程波动组合优化的无人机航道全局优化调度数学模型.采用非线性 Levenberg-Marquardt 双曲偏微分方程构建无人机航道的参量输入输出控制模型,由 Lipschitz 凸条件得到偏微分方程的奇异半正定周期解,根据解向量作为约束参量进行航道调度的稳定性泛函,进行航道调度模型的全局波动组合优化.研究得知,采用该数学模型进行无人机航道调度的收敛性较好,调度时滞误差较低,具有较好的可靠性和稳健性.

参考文献:

[1] Lee W, Bang H, Leeghim H. Cooperative localization between small UAVs using a combination of heterogeneous sensors[J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 27(1): 105-111.

[2] 王勋, 张代兵, 沈林成. 一种基于虚拟力的无人机路径跟踪控制方法[J]. 机器人, 2016, 38(3): 329-336.

[3] 陆兴华. 姿态融合滤波的无人机抗干扰控制算法[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(7): 116-119.

[4] 黄国顺, 文翰. 基于边界域和知识粒度的粗糙集不确定性度量[J]. 控制与决策, 2016, 31(6): 983-989.

[5] 陈秀锋, 许洪国, 倪安宁. 并行微观交通动态负载平衡预测方法仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(8): 164-168.

[6] 薛明, 许德刚. 基于云网格集成调度的防拥堵车辆路径规划算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(7): 295-299.

[7] 陆兴华, 甄汉健, 段五星. 嵌入式多模控制系统的容错性控制器设计[J]. 机械与电子, 2016, 34(4): 62-65.

[8] EVANGELIO R H, PATZOLD M, KELLER I. Adaptively splitted GMM with feedback improvement for the task of background subtraction[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2014, 9(5): 863-874.

[9] 彭丽英. 改进滑模干扰控制律交通数据反步融合算法[J]. 控制工程, 2014, 21(4): 515-519.

[10] 许晓玲. 基于物联网模糊评估的大型交通车辆调度模型研究[J]. 科技通报, 2013, 29(10): 189-192.

作者简介:

陈 筱 女(土家族), (1985-), 硕士研究生, 讲师. 研究方向为数字图像处理、数学建模. E-mail: 1286196111@qq. com.

张 琰 女, (1981-), 硕士研究生, 讲师. 研究方向为物联网工程、多媒体技术.