

DOI: 10.11992/tis.202205033

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20220708.1046.002.html>

基于探索群策略鸽群优化的高超声速 飞行器飞/发一体化控制

向宏程, 邓亦敏, 段海滨

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 10008)

摘要: 高超声速飞行器飞/发一体化系统具有气流一体化、结构一体化等强飞/发耦合特性, 为控制系统的设计带来一定的挑战。针对高超声速飞行器控制系统设计问题, 首先在建立高超飞行器飞/发一体化系统模型的基础上, 设计了相应的纵向控制律, 提出了一种新型的探索群策略鸽群优化算法, 并将其应用于高超飞行器飞/发一体化控制参数整定。最后, 通过探索群鸽群优化算法对控制参数进行优化, 并与基本鸽群优化、粒子群优化进行了对比仿真分析, 验证了所提探索群策略鸽群优化算法的可行性和优越性。

关键词: 高超声速飞行器; 飞/发一体化控制; 鸽群优化; 探索群; 高度控制; 速度控制; 参数整定; 时间加权积分绝对误差

中图分类号: TP273 文献标志码: A 文章编号: 1673-4785(2022)04-0849-07

中文引用格式: 向宏程, 邓亦敏, 段海滨. 基于探索群策略鸽群优化的高超声速飞行器飞/发一体化控制[J]. 智能系统学报, 2022, 17(4): 849-855.

英文引用格式: XIANG Hongcheng, DENG Yimin, DUAN Haibin. Integrated control of hypersonic aerial vehicle and engine system based on exploring swarm strategy based pigeon inspired optimization[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2022, 17(4): 849-855.

Integrated control of hypersonic aerial vehicle and engine system based on exploring swarm strategy based pigeon inspired optimization

XIANG Hongcheng, DENG Yimin, DUAN Haibin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: There are strong coupling characteristics between hypersonic aerial vehicle and engine in the integrated system, such as air flow integration and structure integration, which brings too much challenges to the design of control system. Aiming at the challenge of the design of hypersonic aerial vehicle control system, an integrated flight/launch system model of hypersonic vehicle is established and corresponding longitudinal control law is also designed for this system. An exploring swarm strategy based pigeon inspired optimization algorithm is proposed to overcome the difficulties in debugging the parameters integrated control system. Finally, the control parameters are optimized by the exploring swarm strategy based pigeon inspired optimization algorithm, which is compared with the basic pigeon inspired optimization and particle swarm optimization, verifying the feasibility and superiority of the proposed exploring swarm strategy based pigeon inspired optimization algorithm.

Keywords: hypersonic aerial vehicle; integrated control of vehicle and engine; pigeon inspired optimization; exploring swarm; altitude control; velocity control; parameter setting; integral time-weighted absolute error

高超声速飞行器是指速度比声速大 5 倍以上的飞行器, 具有飞行速度快、作战射程远、突防能力强、攻击范围广和打击效能好等优点, 在军事和

民用方面都有一定的应用价值^[1]。2004 年, 美国国家航空航天局研制的 X-43A 试飞成功, 标志着吸气式高超声速飞行器从实验室过渡到工程阶段^[2]。

近些年来, 随着世界各国的高超声速飞行器的相关技术不断发展^[3-4], 越来越多的研究开始指向高超声速发动机系统和高超声速飞/发一体化

收稿日期: 2022-05-20. 网络出版日期: 2022-07-11.
基金项目: 国家自然科学基金项目(U20B2071, U19B2033).
通信作者: 段海滨. E-mail: hbduan@buaa.edu.cn.

控制系统^[5-7]。文献 [8] 通过研究冲压发动机在高超飞行器工作剖面, 对冲压发动机的压气系统配置进行了分析; 文献 [9] 提出了一种高超声速飞行器发动机的供电和冷却系统, 飞/发一体化的工程进展提供了一种新颖的方案; 在飞/发一体化控制系统方面, 文献 [10] 提出了具有不同发动机安全边界的高超声速飞行器飞/发一体化模型, 并通过与通用高超声速飞行器的比较, 验证了其模型的有效性和实用性。

然而, 除了高超声速飞行器本体具有飞行环境复杂、空间环境变化剧烈、内部参数及结构不确定性等特点^[11]外, 气流一体化、结构一体化等耦合作用也使得高超声速飞行器飞/发一体化控制系统设计具有一定挑战^[12]。因此, 提出一种满足强耦合控制系统的参数整定方法具有相当重要的研究价值。

受自然界中鸽子归巢行为启发的鸽群优化算法 (pigeon-inspired optimization, PIO) 在控制参数优化方面具有较高收敛速度^[13]。自 Duan 等^[14]提出以来, 鸽群优化算法及其改进模型已广泛应用于众多领域^[15-17]。文献 [15] 提出了拟仿射变换鸽群优化算法, 这种改进的鸽群机制为无线传感器网络提供了一种有效的解决方案。文献 [16] 提出了一种紧密鸽群优化算法, 并应用于评估水电站短期发电模型的最大值。在针对狭窄区域内多无人机路径规划性能的研究方面, 文献 [17] 提出了一种柯西变异鸽群算法, 比传统方法具有更好的鲁棒性。

针对高超声速飞行器飞/发一体化控制问题, 本文首先建立了高超飞行器飞/发一体化系统模型, 并针对该系统设计了纵向控制律。针对高超飞行器飞/发一体化控制系统难以调试的问题, 本文基于基本鸽群优化算法, 提出了一种新型的探索群策略鸽群优化算法, 该算法基于探索群的辅助搜索, 可有效解决基本鸽群优化算法容易很快陷入局部最优的问题。最后, 针对所设计的飞/发一体化控制系统, 通过探索群鸽群优化算法对其控制参数进行优化, 并与基础 PIO 算法、粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 进行了仿真对比验证, 实验结果验证了本文所提探索群鸽群优化算法在解决飞/发一体化控制参数整定问题方面的可行性和优越性。

1 高超飞行器飞/发一体化系统模型

本文在对高超飞行器本体进行建模时^[18], 将飞行器视为刚体, 忽略弹性耦合及质量变化。其

纵向运动学及动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{v} = \frac{T \cos \alpha - D - mg \sin \gamma}{m} \\ \dot{h} = V \sin \gamma \\ \dot{\gamma} = \frac{L + T \sin \alpha}{mV} + \frac{g}{V} \cos \gamma \\ \dot{\theta} = q \\ \dot{q} = \frac{M}{I_{yy}} \end{cases}$$

式中: $[T, L, D, M]$ 为飞行器的动力输入, 分别为飞行器推力、升力、阻力、俯仰力矩; $[V, h, \gamma, \theta, q]$ 为飞行器的状态量, 分别为飞行速度、飞行高度、航迹角、俯仰角、俯仰角速度; α 为飞行迎角, 以式 $\alpha = \theta - \gamma$ 计算; $[m, I_{yy}]$ 为飞行器的惯性参数, 分别为飞行器质量和转动惯量。

升力、阻力、俯仰力矩的计算公式为

$$\begin{cases} L = \bar{q} S C_L \\ D = \bar{q} S C_D \\ M = \bar{q} \bar{c} S C_M \end{cases}$$

式中: \bar{q} 为动压, 以式 $\bar{q} = \frac{1}{2} \rho V^2$ 计算; $[S, \bar{c}]$ 为飞行器几何参数, 分别为参考机翼面积、平均气动弦长; $[C_L, C_D, C_M]$ 为飞行器气动导数, 计算公式为

$$\begin{cases} C_L = C_L^\alpha \alpha + C_L^{\delta_e} \delta_e + C_L^0 \\ C_D = C_D^{\alpha^2} \alpha^2 + C_D^\alpha \alpha + C_D^{\delta_e^2} \delta_e^2 + C_D^{\delta_e} \delta_e + C_D^0 \\ C_M = C_M^{\alpha^2} \alpha^2 + C_M^\alpha \alpha + C_M^{\delta_e} \delta_e + C_M^0 \end{cases}$$

式中 δ_e 为飞行器控制量, 表示升降舵偏角。

飞行器惯性参数、几何参数、气动参数见文献 [18]。飞行器推力由发动机模型提供, 认为发动机本身的动态响应可以忽略, 在发动机的计算中不考虑时间项, 将发动机模型按照稳态计算。

一维简化冲压发动机模型由进气道、燃烧室、尾喷管 3 个部分组成^[19]。进气道、燃烧室、尾喷管特性的计算公式分别如式 (1)~(3) 所示。

$$\begin{cases} \bar{T}_{02} = \bar{T}_a \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot \text{Ma}^2 \right) \\ P_{02} = P_a \cdot \left(1 + n_a \cdot \left(\frac{\bar{T}_{02}}{\bar{T}_a} - 1 \right)^{\frac{k}{k-1}} \right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_{04} = P_{02} \\ f_{04} = \frac{\bar{T}_{04} - \bar{T}_{02}}{\bar{T}_{02}} \cdot \left(\frac{n_b P_c}{C_p \bar{T}_{02}} - \frac{\bar{T}_{04}}{\bar{T}_{02}} \right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_s = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot n_{hm} R \bar{T}_{04} \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_{04}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} \\ u_d = \text{Ma} \cdot \sqrt{k R \bar{T}_a} \end{cases} \quad (3)$$

式中: \bar{T} 为温度、 P 为大气静压、 Ma 为飞行器飞行马赫数、 k 为空气比热比、 R 为空气气体常数、 n 为部件工作效率、 f 为空燃比、 u 为气流流速。下

标 a 表示环境参数, d 表示进气道后扩散器, 02 表示进气道出口, b 表示燃烧室, hn 表示尾喷管喷嘴, s 表示尾喷管出口。发动机推力计算公式为

$$T = ((1 + f)u_s - u_d) \cdot m_{ar} = T_{mar} \cdot m_{ar} \quad (4)$$

式中: m_{ar} 为简化模型的控制量, 表示等效气体质量流量。

2 飞/发一体化系统纵向控制律设计

本文重点研究高超飞行器爬升过程中的飞/发一体化高度控制, 即自主爬升、降落过程中, 保持飞行速度基本稳定, 通过升降舵及发动机协调工作, 对航迹角进行控制从而达到高度控制的目的。首先设计高超飞行器纵向多回路高度控制, 由高度指令 h_{ref} 经控制律求解出升降舵 δ_e 偏角变化量 $\Delta\delta_e$, 由内至外为俯仰角速度 q 、俯仰角 θ 、高度 h 的控制回路。俯仰角速度控制回路目标为俯仰角速度指令 q_{des} 的跟踪控制, 其控制律计算公式为

$$\Delta\delta_e = -\left(k_p^q + \frac{k_i^q}{s} + k_d^q s\right) \cdot (q_{des} - q) \quad (5)$$

俯仰角速度控制回路的输入指令由俯仰角控制回路得到, 其目标为俯仰角指令 θ_{des} 的跟踪控制, 其控制律计算公式为

$$q_{des} = \left(k_p^\theta + \frac{k_i^\theta}{s} + k_d^\theta s\right) \cdot (\theta_{des} - \theta) \quad (6)$$

俯仰角控制回路的输入指令由高度控制回路得到, 其控制目标为高度输入 h_{ref} 的跟踪控制, 其控制律计算公式为

$$\begin{cases} \gamma_{des} = \frac{(k_p^h + k_d^h s) \cdot (h_{ref} - h)}{V} \\ \theta_{des} = \gamma_{des} + \alpha \end{cases} \quad (7)$$

由式 (5)~(7) 可实现高超飞行器升降舵对高度输入的响应, 为实现高度爬升过程中的速度稳定, 还需设计推力通道的速度及迎角稳定控制回路, 以求解稳定推力 T_s 基础上的推力变化量 ΔT , 由速度及迎角控制分别得到其分量 ΔT_V 及 ΔT_α 。

$$\Delta T = \Delta T_V + \Delta T_\alpha$$

速度控制目标为由初始稳定速度 V_s 的稳定控制求解出推力变化量 ΔT_V , 其控制律计算公式为

$$\Delta T_V = (k_p^V + k_d^V s) \cdot (V_s - V)$$

迎角控制目标为在具有较大高度爬升需求时稳定住迎角以获得较大纵向航迹倾斜角, 从而获得较大爬升速率。由于迎角控制与速度稳定为互斥过程, 因此在高度爬升需求较小时需要去掉对迎角的控制以保证速度的稳定。由初始稳定迎角 α_s 的输入求解出推力变化量 ΔT_α 控制律的计算公式为

$$\Delta T_\alpha = \begin{cases} \left(k_p^\alpha + \frac{k_i^\alpha}{s} + k_d^\alpha s\right) \cdot (\alpha_s - \alpha), & |h_{ref} - h| > 1000 \\ 0, & |h_{ref} - h| \leq 1000 \end{cases}$$

由式 (1)~(4) 可知:

$$\dot{T} = T_{mar} \cdot \dot{m}_{ar} + \dot{T}_{mar} \cdot m_{ar}$$

式中: T_{mar} 随飞行高度和马赫数变化, 可视为慢变量, 本文忽略其变化率, 从而推导出推力控制律公式为

$$\Delta m_{ar} = \frac{k_T (T_{des} - T)}{T_{mar}}$$

高超飞行器飞/发一体化系统整体控制结构如图 1 所示。

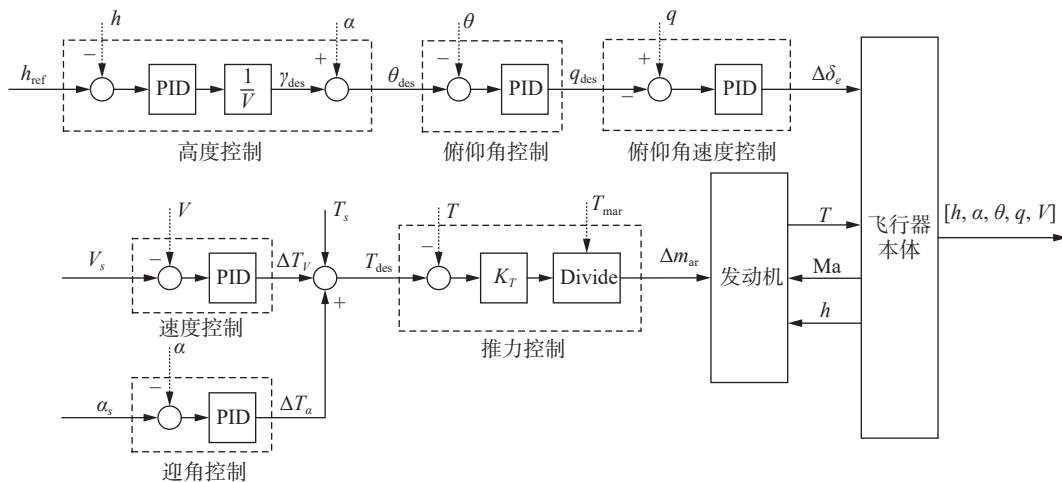


图 1 飞/发一体化控制系统结构

Fig. 1 Diagram of flight engine integrated control system

3 探索群策略鸽群优化算法

3.1 基本鸽群优化算法

基本鸽群优化算法受启发于鸽群归巢机制^[14], 根据鸽群归巢的不同阶段的行为特点, PIO 算法由两部分组成, 分别为地图和指南针算子, 以及地标算子。

在 PIO 算法中, 假定鸽群数量为 N , 每只鸽子有 D 维位置坐标 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$ 及速度坐标 $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$ 。

1) 地图与指南针算子

鸽群归巢行为的第一阶段, 鸽群凭借太阳高度及方向判断方位, 作为 PIO 算法的地图与指南针算子, 其更新公式为

$$\begin{cases} V_i(t) = V_i(t-1)e^{-Rt} + \text{rand} \cdot (X_{\text{gbest}} - X_i(t-1)) \\ X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: R 为地图因子, X_{gbest} 为全局最优位置。

2) 地标算子

鸽群归巢行为的第二阶段, 鸽群凭借地标进行导航, 作为 PIO 算法的地标算子, 其更新策略为

$$\begin{cases} N_N(t) = \frac{N_N(t-1)}{2} \\ X_{\text{center}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_N(t)} X_i(t) \cdot \text{fitness}(X_i)}{N_N(t) \cdot \sum_{i=1}^{N_N(t)} \text{fitness}(X_i)} \\ X_i(t) = X_i(t-1) + \text{rand} \cdot (X_{\text{gbest}} - X_i(t-1)) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $N_N(t)$ 为 t 时刻的鸽群个体数目; $X_{\text{center}}(t)$ 为 t 时刻鸽群中心位置; $\text{fitness}(X_i)$ 为第 i 只鸽子的适应度值。

3.2 探索群策略鸽群优化算法

为提高基本鸽群优化算法在复杂控制系统参数优化过程中的全局搜索能力, 本文提出了探索群策略鸽群优化算法 (exploring swarm pigeon-inspired optimization, ESPIO), 具体介绍如下。

初始化阶段, 将基本鸽群划分为两个子群, 分别记为主群与探索群。搜索阶段, 主群负责进行常规搜索, 其搜索方式与基本鸽群一致; 探索群负责对新区域进行探索, 其搜索方式为

$$\begin{cases} v_{i,j}(t) = v_{i,j}(t-1)e^{-R_e t} + \text{rand} \cdot (X_m - x_{i,j}(t-1)) \\ X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: R_e 为探索群的地图因子, 其值受前一轮迭代的结果影响; X_m 为每轮迭代中最优的两只鸽子的

平均位置。 R_e 更新方式为

$$R_e = \begin{cases} R + (R_{\min} - R) \cdot \frac{p_{\max} - p_i}{p_{\max}}, & \zeta = 1 \\ R_{\max} + (R - R_{\min}) \cdot \frac{p_{\max} - p_i}{p_{\max}}, & \zeta = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: R_{\min} 、 R_{\max} 分别为地图因子设定的最小值、最大值, 本文中分别取 0.01、0.03; p_i 表示第 i 只鸽子的适应值, p_{\max} 为适应值的最大值; 定义 ζ 为迭代进度指数, 当全局最优有更新时将其值设置为 1, 此时 R_e 小于主群地图因子 R , 探索群鸽子更偏向于保持当前搜索速度值; 反之, 全局最优没有更新时, 将 ζ 设置为 0, 此时 R_e 大于主群地图因子 R , 探索群鸽子更偏向于更新当前搜索速度值; 此外, 无论 ζ 为何值, 适应值越小的鸽子其位置越优, R_e 越小, 更趋近于保持原本速度。

X_m 计算方式为

$$X_m = \frac{1}{2} (X_{\text{pbest}}(\lambda_1) + X_{\text{pbest}}(\lambda_2)) \quad (12)$$

式中: 以 λ_1 和 λ_2 分别记录适应度最优的两只鸽子, 则 $X_{\text{pbest}}(\lambda_1)$ 和 $X_{\text{pbest}}(\lambda_2)$ 分别表示适应度最优的两只鸽子的历史最优位置, 因此保证 X_m 是接近问题的优化方向的; 同时由于两只鸽子可能出现在不同的局部最优点, 因此其平均值具有一定随机性, 体现出一定的探索能力, 可降低主群陷入局部最优的概率。

3.3 飞/发一体化系统优化策略

高超飞行器速度、高度跨越较大, 以常规的时间加权积分绝对误差 (integral time-weighted absolute error, ITAE) 准则作为控制系统参数优化的适应度函数时^[20], 由于高度指令 h_{ref} 跳转时与初始值的偏差过大, 导致其掩盖动态过程中及稳态时的性能。因此在 ITAE 的基础上, 将时间加权改为时间的平方项, 更能侧重控制的稳态性能, 即

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)|t^2 dt \quad (13)$$

本文所提 ESPIO 算法, 以基本鸽群算法为基础, 为解决其容易陷入局部最优的问题, 设置探索群为主群提供额外搜索信息。以探索群策略鸽群优化算法进行飞/发一体化控制参数整定的具体实现流程如图 2 所示。

算法具体步骤为:

- 1) 选择飞/发一体化系统配平状态, 包括飞行器平衡状态及对应发动机的控制量 m_{ar} ;
- 2) 初始化系统控制参数, 包括发动机推力控制律 k_T 、飞行器高度控制律 k_p^h 与 k_d^h , 飞行器迎角控制律 k_p^α 、 k_r^α 与 k_d^α , 飞行器速度控制律 k_p^v 与 k_d^v ;
- 3) 随机分配 1/4 鸽子为盘旋群;

4) 运行飞/发一体化控制仿真系统, 并计算该组控制参数适应值;

5) 对于主群的鸽子, 以式 (8) 更新其速度与位置; 对于盘旋群鸽子, 首先以式 (11) 更新探索群地图因子, 再以式 (12) 计算两只最优鸽子的平均

位置, 最后以式 (10) 更新速度与位置;

6) 满足地图及指南针算子迭代次数后, 以式 (9) 更新鸽子数量及位置。否则, 返回 4);

7) 满足地标算子迭代次数后, 输出优化结果。

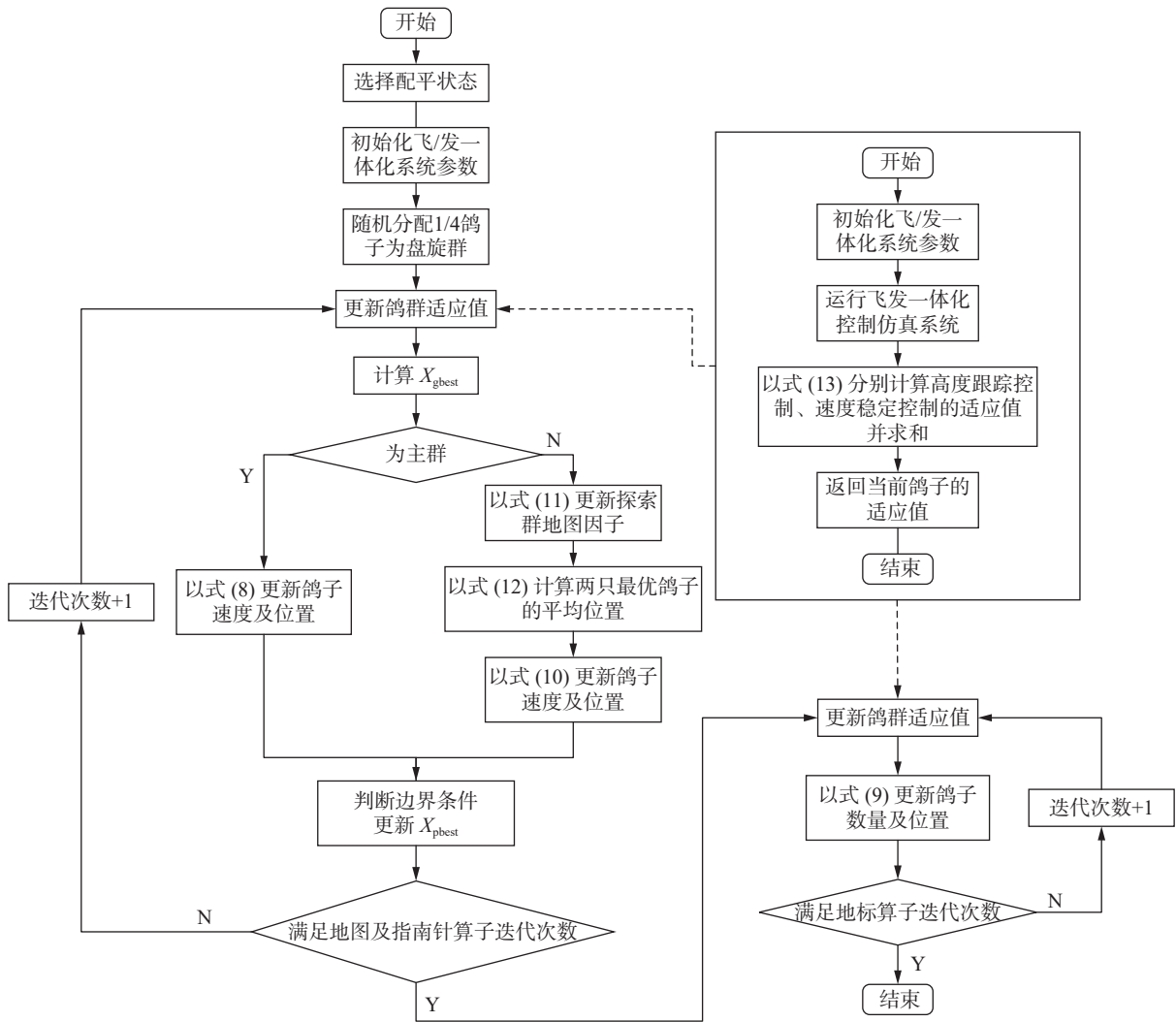


图 2 探索群策略鸽群优化算法流程

Fig. 2 Flow of exploring swarm pigeon-inspired optimization

4 飞/发一体化优化控制仿真及分析

采用 MATLAB/Simulink 作为仿真软件, 搭建高超飞行器飞/发一体化模型及控制系统, 将 ESPIO 算法用于控制系统参数优化, 并与基本 PIO 算法、PSO 算法的优化结果进行对比。优化参数包括推力控制系数 k_T , 高度控制回路参数 k_p^h 、 k_d^h , 迎角控制回路参数 k_p^α 、 k_i^α 、 k_d^α , 速度控制回路参数 k_p^v 、 k_d^v 。

3 种智优化算法的迭代曲线如图 3 所示, 最终适应度函数值如表 1 所示, 由探索群鸽群优化算法优化后的变量如表 2 所示。

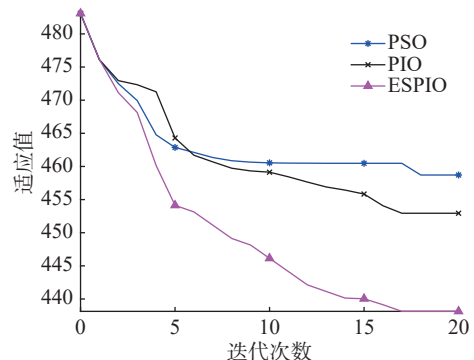


图 3 参数优化迭代曲线

Fig. 3 Parameter optimization iteration curve

表 1 迭代结果最终值
Table 1 Results of the iteration

优化算法	最终适应值
PSO	458.7
PIO	452.9
ESPIO	438.1

表 2 优化后变量
Table 2 Optimized parameters

变量	数值大小
k_T	1.48
k_p^h	0.20
k_d^h	0.08
k_p^α	172.83
k_i^α	155.91
k_d^α	150.21
k_p^V	34911
k_d^V	923.9

由图表可得,对于高超飞行器飞/发一体化控制系统,其各个控制通道、各个控制回路之间耦合较强,在参数整定时极易陷入局部最优,本文所提出的 ESPIO 算法在全局最优的探索方面表现突出,最终得到的适应值最好。

以优化结果作为控制参数,在 20 000 m 初始高度、885 m/s 的初始速度(马赫数 3)的平飞状态下进行高超飞行器的高度控制仿真,给定 2 000 m 高度阶跃指令,高超飞行器高度跟踪曲线如图 4 所示,速度保持曲线如图 5 所示。

由图 4 可知,在高超飞行器高度控制的仿真结果中,3 种算法得到的结果均无超调量;以 ESPIO 算法参数得到的结果调节时间最短,而以 PSO 算法参数得到的结果调节时间最长。由图 5 可知,在高度控制的同时进行速度保持控制,3 种算法得到的结果均能使速度误差不超过 0.045%,其中 ESPIO 算法参数得到的误差最小,其值为 0.037%。而在 34 s 处,ESPIO 得到的结果具有最高的误差,因为此时对应的高度控制具有最快的收敛速度,由于高超飞行器飞/发一体化系统各个通道的强耦合特性,其速度波动会更剧烈,但速度波动的最大值不超过当前稳定速度的 0.01%。因此,以 ESPIO 优化得到的控制参数,在高超飞行器飞/发一体化控制器参数整定方面有最好的优化效果。

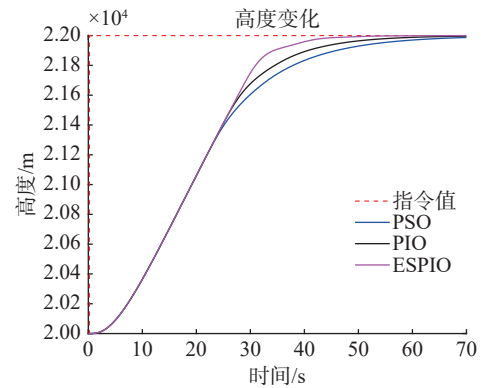


图 4 高度控制曲线
Fig. 4 Altitude control curve

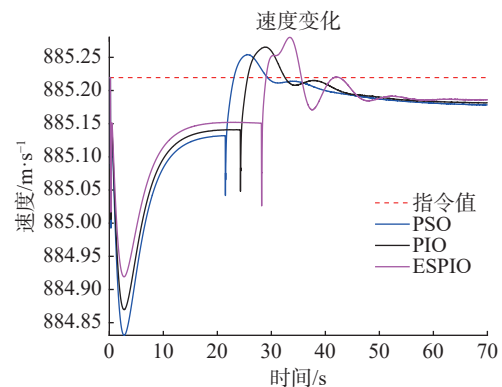


图 5 速度控制曲线
Fig. 5 Velocity control curve

5 结束语

1) 本文针对高超飞行器飞/发一体化系统设计了纵向控制器,包括升降舵通道的各个回路及推力通道的速度回路及迎角回路,另外还包括发动机的推力控制。最后对高度跟踪控制进行了仿真,其结果表明所设计的控制器能够满足一定的控制精度与稳定性。

2) 本文所提出的 ESPIO 算法与基本 PIO、PSO 相比具有更好的收敛性,通过对高超飞行器飞/发一体化控制器参数整定并进行控制仿真,得到仿真结果对比,其结果表明,本文所提出 ESPIO 算法在高超飞行器飞/发一体化控制器参数整定方面有最好的优化效果,即在保持速度基本稳定的同时,具有最好的高度控制性能。

参考文献:

- [1] DING Yibo, WANG Xiaogang, BAI Yuliang, et al. An improved continuous sliding mode controller for flexible air-breathing hypersonic vehicle[J]. International journal of robust and nonlinear control, 2020, 30(14): 5751–5772.
- [2] WANG Le, QI Ruiyun, JIANG Bin. Adaptive actuator fault-tolerant control for non-minimum phase air-breath-

- ing hypersonic vehicle model[J]. ISA transactions, 2022, 126: 47–64.
- [3] 王曉鶴. 高超声速武器改变世界军事力量格局 [J]. 航空动力, 2022(2): 17–20.
- [4] 王冠, 尹童, 曹颖. 国外高超声速武器攻防发展态势研究 [J]. 现代防御技术, 2022, 50(2): 26–32.
WANG Guan, YIN Tong, CAO Ying. Research on the development of foreign hypersonic offensive and defensive weapons[J]. Modern defence technology, 2022, 50(2): 26–32.
- [5] 李宏新, 谢业平. 从航空发动机视角看飞/发一体化问题 [J]. 航空发动机, 2019, 45(6): 1–8.
LI Hongxin, XIE Yeping. Fundamental issues of aircraft/engine integration from the perspective of aeroengine[J]. Aeroengine, 2019, 45(6): 1–8.
- [6] 季春生. 飞发一体化控制先进技术发展分析 [J]. 航空动力, 2019(4): 32–38.
JI Chunsheng. Analysis to the development of advanced technology for integrated flight-propulsion control[J]. Aerospace power, 2019(4): 32–38.
- [7] 李俊, 杨水锋, 但聃. 未来飞机对飞发一体化技术的需求 [J]. 航空动力, 2018(2): 63–66.
LI Jun, YANG Shuifeng, DAN Dan. Integrated aircraft/engine technology required by future aircraft[J]. Aerospace power, 2018(2): 63–66.
- [8] VEERAN S, PESYRIDIS A, GANIPPA L. Ramjet compression system for a hypersonic air transportation vehicle combined cycle engine[J]. Energies, 2018, 11(10): 2558.
- [9] CHENG Kunlin, QIN Jiang, SUN Hongchuang, et al. Performance assessment of a closed-recuperative-Brayton-cycle based integrated system for power generation and engine cooling of hypersonic vehicle[J]. Aerospace science and technology, 2019, 87: 278–288.
- [10] YAO Zhiheng, BAO Wen, CHANG Juntao, et al. Modelling for couplings of an airframe—propulsion integrated hypersonic vehicle with engine safety boundaries[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part G: journal of aerospace engineering, 2010, 224(1): 43–55.
- [11] 冯云山, 杨照华. 模糊自适应的高超飞行器控制与干扰 [J]. 智能系统学报, 2012, 7(2): 129–134.
FENG Yunshan, YANG Zhaohua. Control and disturbance analysis of hypersonic vehicles based on fuzzy adaptive[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2012, 7(2): 129–134.
- [12] 林鹏, 左林玄, 王霄, 等. 未来作战飞机飞发一体化技术的思考 [J]. 航空动力, 2018(2): 52–57.
LIN Peng, ZUO Linxuan, WANG Xiao, et al. Discussion on aircraft/engine integration technology of future combat aircraft[J]. Aerospace power, 2018(2): 52–57.
- [13] DUAN Haibin, QIU Huaxin. Advancements in pigeon-inspired optimization and its variants[J]. Science China information sciences, 2019, 62(7): 1–10.
- [14] DUAN Haibin, QIAO Peixin. Pigeon-inspired optimization: a new swarm intelligence optimizer for air robot path planning[J]. International journal of intelligent computing and cybernetics, 2014, 7(1): 24–37.
- [15] SUN Xiaoxue, PAN J S, CHU Shuchuan, et al. A novel pigeon-inspired optimization with QUasi-Affine TRansformation evolutionary algorithm for DV-Hop in wireless sensor networks[J]. International journal of distributed sensor networks, 2020, 16(6): 1–15.
- [16] TIAN Aiqing, CHU Shuchuan, PAN J S, et al. A compact pigeon-inspired optimization for maximum short-term generation mode in cascade hydroelectric power station[J]. Sustainability, 2020, 12(3): 767.
- [17] WANG Bohang, WANG Daobo, ALI Z A. A Cauchy mutant pigeon-inspired optimization-based multi-unmanned aerial vehicle path planning method[J]. Measurement and control, 2020, 53(1/2): 83–92.
- [18] YE Linqi, ZONG Qun, ZHANG Xiuyun. Adaptive control for a non-minimum phase hypersonic vehicle model[C]//2015 34th Chinese Control Conference. Hangzhou: IEEE, 2015: 991–996.
- [19] LUCASBPRO Lucas Braga, Aircraft engine modeling[EB/OL]. (2020–07–16)[2022–05–20]. <https://github.com/lucasbpro/aircraft-engine-modeling>.
- [20] RAO C S, SANTOSH S, V D R. Tuning optimal PID controllers for open loop unstable first order plus time delay systems by minimizing ITAE criterion[J]. IFAC-papers online, 2020, 53(1): 123–128.

作者简介:



向宏程, 硕士研究生, 主要研究方向为群体智能、高超声速飞行器智能自主飞行控制。



邓亦敏, 副研究员, 主要研究方向为仿生智能感知、无人系统仿生自主飞行控制。



段海滨, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无人机自主控制、计算机仿生视觉与智能感知、仿生智能计算理论及应用, 曾获吴文俊人工智能科技创新一等奖等, 主持国家自然科学基金重大项目、重点项目等7项。发表学术论文80余篇, 出版专著4部。