

增程式 APU 混沌退火混合粒子群优化 模糊 PID 动态控制

赵家豪, 魏民祥, 丁玉章, 常 诚
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 针对增程式辅助动力单元(APU)工作点切换过程的控制,提出了一种混沌退火混合粒子群(CAHP SO)算法优化模糊比例积分微分(PID)控制的增程式 APU 动态控制策略。该算法将标准粒子群(PSO)算法与混沌搜索和退火机制融合,强化全局寻优能力,并采用该算法离线优化模糊 PID 控制参数。为验证该控制策略的有效性,本文建立了 APU 仿真模型。仿真结果表明:该控制策略可使 APU 在工作点从热机点逐步切换至高负荷点的过程中稳定时间短,在三个工作点切换控制过程中稳定时间分别为 2.92 s, 2.88 s, 2.79 s;可使 APU 转速超调率小,在小负荷点向中负荷点切换时超调约 0.95%,在其余过程未出现超调;可使 APU 转矩变化平缓,在中负荷点向高负荷点切换时转矩仅超调 0.16 N·m,具有良好的动态控制效果。

关 键 词: 增程式 APU; 动态控制; 模糊 PID; 混沌退火混合粒子群; 工作点切换

中图分类号: V249.4

文献标志码: A

Dynamic control strategy of extended-range APU based on fuzzy PID optimized by CAHP SO

ZHAO Jiahao, WEI Minxiang, DING Yuzhang, CHANG Cheng

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: For the control of the working point switching process of the extended-range auxiliary power unit (APU), a dynamic control strategy for the extended-range APU was proposed by using the chaotic annealing hybrid particle swarm optimization (CAHP SO) algorithm to optimize the fuzzy proportional-integral-derivative (PID) control. This algorithm was used to combine chaos search and annealing mechanisms based on the standard particle swarm optimization (PSO) to enhance the global optimization ability, and optimize the fuzzy PID control parameters offline. In order to verify the effectiveness of the new control strategy, the APU system simulation model was established. The simulation results showed that during the processes of gradually switching from the warming-up point to the high load point, the new control strategy can make the APU shorten the stabilization time, the stabilization time for the three switching control processes of the working points was 2.92 s, 2.88 s, 2.79 s, respectively; the new control strategy can make the APU reduce the speed overshoot rate, only when in the switching from the small load point to the middle load point,

收稿日期:2020-08-17

基金项目:国防预研项目(513250203)

作者简介:赵家豪(1996—),男,硕士生,主要从事增程式动力系统控制研究。E-mail:DC_zjh@outlook.com

通信作者:魏民祥(1963—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事车辆电子控制研究。E-mail:weimx@nuaa.edu.cn

引用格式:赵家豪,魏民祥,丁玉章,等.增程式 APU 混沌退火混合粒子群优化模糊 PID 动态控制[J].航空动力学报,2021,36(6):1213-1221. ZHAO Jiahao, WEI Minxiang, DING Yuzhang, et al. Dynamic control strategy of extended-range APU based on fuzzy PID optimized by CAHP SO[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(6): 1213-1221.

the speed overshoot rate was about 0.95% and there was no overshoot in other switching processes; the new control strategy can make the APU torque change smoothly, and the torque overshoot was only 0.16 N·m when switching from the middle load point to the high load point, which achieved a good dynamic control effect.

Key words: extended-range APU; dynamic control; fuzzy PID; CAHPSO; working point switching

由于小型无人机在军事侦察、通讯中继等方面的明显优势,目前对小型无人机的需求进一步扩大,使用要求进一步提高。增程式 APU(auxiliary power unit)作为无人机动力系统的方案之一,发动机被控制在油耗较低或者效率较高的工作点工作^[1],具有油耗低,续航里程长等优势^[2]。

本文中,增程式 APU 主要由小型二冲程活塞发动机和发电机串联组成。APU 工作点的切换是通过控制节气门和发电机电磁转矩实现的^[3]。切换时,将发电机转矩快速调节至目标值,并调节节气门使转速切换至目标转速。发电机响应快速,而发动机是一个强非线性、时变系统^[4],需制定合适的节气门控制策略。模糊 PID 控制不依赖于被控对象的精确模型,鲁棒性高,可用于节气门的控制,但常规模糊 PID 控制参数的确定依赖经验,控制参数无法达到最优,称为经验模糊 PID,直接在节气门控制中采用经验模糊 PID 易造成 APU 产生较大的转速波动,影响运行稳定性。但可对经验模糊 PID 参数进行优化,提高控制效果。

粒子群优化算法结构简单、可编程性高、参数易调整,因此可采用粒子群优化算法离线优化模糊 PID 控制参数,将优化后的模糊 PID 用于在线控制。Mansourabad 等采用粒子群算法优化模糊控制器的输入、输出系数,并应用于燃气轮机的转速控制,取得了较好的控制效果^[5]。Boukhalfa 等在对双星感应电动机的直接转矩控制中,将粒子群优化模糊 PID 控制与粒子群优化 PID 和遗传优化 PID 控制算法进行比较,发现粒子群优化模糊 PID 算法控制效果最佳^[6]。重庆大学刘爱军等将模拟退火算法与粒子群优化算法融合,通过测试函数验证,可提高算法的搜索能力^[7]。但是以上案例未能对模糊 PID 进一步优化且部分粒子群算法的改进手段对于提升寻优效果不明显。

本文将粒子群算法与混沌搜索、模拟退火机制结合,提出 CAHPSO(chaos and annealing hybrid particle swarm optimization)算法,该算法有较强的全局搜索能力与精度。采用该算法,对模

糊 PID 控制参数进行全面优化,能使模糊 PID 在 APU 动态控制过程中取得良好的控制效果。

1 APU 系统模型

如图 1 所示,该增程式 APU 搭载一台 2 kW 级单缸二冲程发动机,为对系统动态特性进行研究并制定控制策略,须建立 APU 系统仿真模型。



图 1 二冲程增程式 APU
Fig.1 Extended-range APU with a two-stroke engine

发动机模型通过采集稳态试验数据并采用多元逐步回归辨识方法建立^[8]。通过发动机台架试验得到相关数据并对数据进行归一化后得到

$$\begin{aligned} \bar{T} = & -0.4144 - 0.8263\bar{\alpha}\bar{n}^2 + 1.8189\bar{\alpha}^3 + \\ & 0.2324\bar{n}^2 + 1.6725\bar{\alpha}\bar{n} - 5.2524\bar{\alpha}^2 - \\ & 0.8219\bar{n} + 4.477\bar{\alpha} \end{aligned} \tag{1}$$

式中 $\bar{n}$ 、 $\bar{T}$ 、 $\bar{\alpha}$ 分别为归一化的发动机转速、转矩与节气门开度,反归一化后可得发动机稳态转矩函数 f_e ,用一个惯性延迟环节表征发动机动态特性^[9],节气门动态模型采用一个惯性环节表示^[10]

$$\tau \cdot T' + T = f_e(n, \alpha) \tag{2}$$

$$\tau_\alpha \cdot \alpha' + \alpha = \alpha_{cmd} \tag{3}$$

式中 n 、 T 、 α 为发动机转速、转矩和节气门开度, α_{cmd} 为期望节气门开度, τ 、 τ_α 分别表示发动机和节气门的惯性时间常数,由阶跃响应辨识得到。 τ_e 表示发动机喷油到输出转矩之间的延迟,大致表示为

$$\tau_e = 60(1 + 1/n_{cyl})/n \tag{4}$$

式中 n_{cyl} 为发动机气缸数。

本文采用表面磁极式永磁同步发电机(PMSG),发电机在 d - q 坐标系下的原理方程为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}u_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_r i_q - \frac{R}{L_d}i_d \\ \frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}u_q - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}p\omega_r i_d - \frac{\psi_f p\omega_r}{L_q} \\ T_e = \frac{3}{2}p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \end{cases} \quad (5)$$

式中 i_d 、 i_q 、 L_d 、 L_q 、 u_d 、 u_q 分别为定子电流、电感和电压的 d - q 轴分量; R 为定子电阻; ψ_f 为永磁体磁链; p 为磁极对数; ω_r 为转子角速度; T_e 为电磁转矩。

发电机刚性连接于发动机输出轴,运行时两者转速保持相等。对于发动机而言,发电机的电磁转矩即可视作其负载,由转矩平衡方程^[11]得

$$\begin{cases} J \cdot \dot{n} = (30/\pi)T + (30/\pi)T_e \\ n = \int_{t_0}^{t_1} \dot{n} dt \end{cases} \quad (6)$$

式中 J 为发动机和发电机整体转动惯量。

APU 系统模型主要应用于文本仿真研究工作。本文发动机转矩函数通过发动机台架试验获得,发动机转矩输出的时间延迟参数可根据转速动态调整。如图 2 所示,发动机转动惯量通过

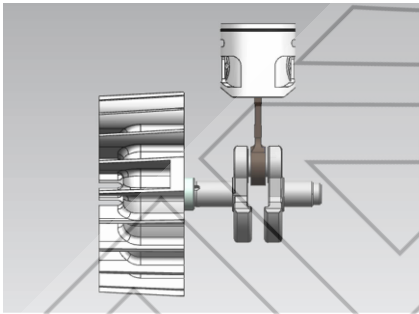


图 2 发动机旋转件 UG 模型

Fig. 2 UG model of engine rotating parts

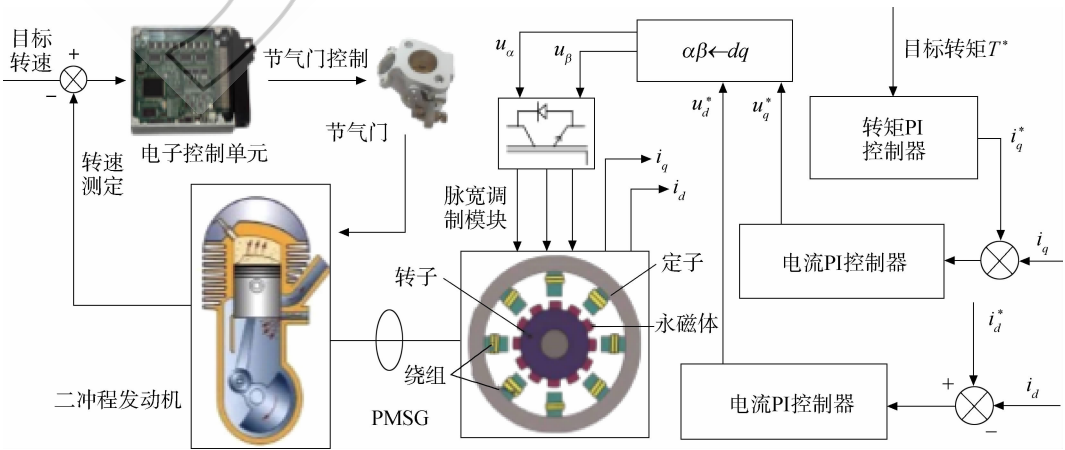


图 3 控制系统示意图

Fig. 3 Control system diagram

UG(unigraphics)建模计算得出,具有较高的准确度,发电机选定机型后由厂家给出各项参数。因此,本文建立的仿真模型具有较高的准确性。

2 APU 控制方法

APU 只运行在几个固定的工作点,工作点差别主要为转速、转矩的不同。APU 控制系统结构如图 3 所示。本文中,发电机通过电流环以转矩为目标进行控制,发动机以转速为目标控制节气门,发电机和发动机两者同轴连接保持转速相等。在 APU 工作点切换过程中,控制发电机转矩变化时,会造成 APU 转速波动,同时也使发动机输出转矩发生变化,此时控制节气门快速响应,调节发动机输出转矩,避免 APU 转速波动,并将 APU 转速调节至目标值。

发动机的被控部分为节气门。采用模糊 PID 策略对节气门进行控制,将转速偏差、偏差变化作为控制器输入,通过量化因子 k_e 、 k_{ec} 模糊化,经模糊规则得出模糊控制量,最后由比例因子 k_{dk_p} 、 k_{dk_i} 、 k_{dk_d} 反模糊化得到 PID 调整值^[12]。这 5 个因子分别都有 7 个隶属函数,因此该模糊控制器共有 35 个隶属函数,147 条模糊规则。通常将模糊规则,量化、比例因子的确定依赖于工程人员经验的方法称为经验模糊 PID。

式(5)中当 $i_d=0$ 时,定子电流全部用来产生电磁转矩,即可模拟直流电动机的控制方法对永磁同步电动机进行控制,这种方法称为矢量控制法,采用该方法对 PMSG(permanent magnetic synchronous generator)进行控制时,有

$$T_e = \frac{3}{2}p\psi_f i_q \quad (7)$$

其控制方法包括两个控制环:转矩 PI(proportional-integral)控制环、电流 PI 控制环。由 PI 控制器计算目标 d - q 轴电流 i_d^* 、 i_q^* ,再计算出矢量控制目标电压 u_d^* 、 u_q^* ,通过逆派克变换得到 u_α 、 u_β ,将其送入空间矢量脉宽调制模块(SVPWM)中产生控制脉冲,进而得到控制定子绕组的实际电流^[13]。

本文对节气门采用的控制方法为模糊 PID 控制,其优势在于具有一定的自适应能力,不依赖于被控对象的精确模型,因此当模型具有一定不确定性时,该控制方法仍能较好地适应被控对象,取得较好的控制效果。

由式(1)~式(4)可知,发动机是一个强非线性、时变系统,其动态特性参数会随发动机工况的变化产生较大变化。仅凭经验制定的模糊 PID 控制参数无法达到最优,影响系统的控制性能,因此需要对模糊 PID 控制参数进行优化。

3 混合粒子群优化算法

标准粒子群算法是一种群体协作优化算法^[14],但这种算法易收敛于局部极值,而混沌搜索拥有遍历的特性,可加强算法全局搜索能力^[15],模拟退火机制允许系统以一定概率接受稍差的粒子^[16],避免算法陷入局部最优。为尽可能地得到全局最优点,将标准粒子群、混沌搜索和模拟退火机制融合得到 CAHPSO 算法。仅凭经验制定的模糊 PID 难以对增程式 APU 取得良好的控制效果,因此采用 CAHPSO 算法对应用于节气门控制的模糊 PID 参数进行离线优化,并将优化后的模糊 PID 控制器应用于增程式 APU 的在线控制。

3.1 CAHPSO 混合粒子群优化模糊 PID

如图 4,采用 CAHPSO 算法,对经验模糊 PID 的量化因子 k_e 、 k_{ec} ,比例因子 k_{dk_p} 、 k_{dk_i} 、 k_{dk_d} ^[17]及隶属函数底宽 $\sigma=[\sigma_1,\sigma_2,\cdots,\sigma_{35}]$ 和模糊规则 $r=[r_1,r_2,\cdots,r_{147}]$ 同时进行寻优搜索。

对隶属函数底宽 σ 的优化不改变其形状与

中心值,仅优化底宽,这可以保持隶属函数的基本对称特性、简化算法。为实现模糊规则 r 的寻优,对其编码形成数组,规定 1~7 对应模糊规则的 NB(negative big)到 PB(positive big)。某粒子模糊规则编码如图 5 所示。

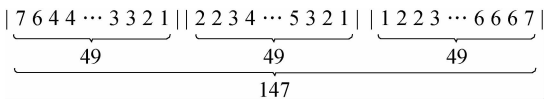


图 5 模糊规则编码形式
Fig. 5 Coding form of fuzzy rules

3.2 CAHPSO 混合粒子群算法

3.2.1 标准粒子群算法

一群粒子在搜索空间中运动时,通过目标函数判断粒子适应度值。 M 个粒子在 189 维空间中运动时,第 i 个粒子在 t 时刻的位置为: $\mathbf{X}_i^t=[x_{i1}^t,x_{i2}^t,\cdots,x_{i189}^t]^T$,本文中,将模糊 PID 待优化参数组合作为粒子位置向量内的元素即 $\mathbf{X}_i^t=[k_e^i,k_{ec}^i,k_{dk_p}^i,k_{dk_i}^i,k_{dk_d}^i,\sigma_1^i,\cdots,\sigma_{35}^i,r_1^i,\cdots,r_{149}^i]^T$,粒子的速度为: $\mathbf{V}_i^t=[v_{i1}^t,v_{i2}^t,\cdots,v_{i189}^t]^T$,其方位将追随两个极值所在位置,一是粒子个体最优位置 $\mathbf{q}_{best}^i$,二是种群最优位置 $\mathbf{g}_{best}$, $t+1$ 次迭代时粒子的速度与位置更新公式为

$$\begin{cases} \mathbf{V}_i^{t+1} = \omega \mathbf{V}_i^t + R_1 C_1 (\mathbf{q}_{best}^i - \mathbf{X}_i^t) + \\ R_2 C_2 (\mathbf{g}_{best} - \mathbf{X}_i^t) \\ \mathbf{X}_i^{t+1} = \mathbf{V}_i^{t+1} + \mathbf{X}_i^t \end{cases} \quad (8)$$

式中 R_1 、 R_2 为随机数, C_1 、 C_2 为学习因子。在迭代过程中,比较当前粒子 $\mathbf{X}_i^t$ 与 $\mathbf{q}_{best}^i$ 或 $\mathbf{g}_{best}$ 的适应度函数值,按照判断条件更新个体和种群最优位置。在搜索过程中采用线性递减的惯性权重 ω ,能加强算法初期全局搜索能力、后期搜索精度^[18],其变化公式为

$$\omega = \omega_{\max} - t(\omega_{\max} - \omega_{\min})/t_{\max} \quad (9)$$

式中 $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 分别表示 ω 的最大和最小值,通常取最大值为 0.9,最小值为 0.4^[7]。

3.2.2 适应度函数

粒子群算法通过目标函数适应度值来评价寻优效果。寻优搜索过程中,将粒子位置包含的变量信息即待优化的模糊 PID 控制参数组合 $\mathbf{X}_i^t=[k_e^i,k_{ec}^i,k_{dk_p}^i,k_{dk_i}^i,k_{dk_d}^i,\sigma_1^i,\cdots,\sigma_{35}^i,r_1^i,\cdots,r_{149}^i]^T$ 代入仿真模型运行,并计算适应度函数。ITAE(integrated time and absolute error)函数能综合体现响应速度和稳定性,IAE(integral absolute er-

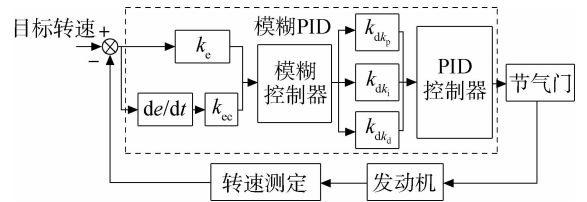


图 4 基于 CAHPSO 优化的模糊 PID 控制器

Fig. 4 Fuzzy PID controller based on CAHPSO

ror)函数更体现超调量的影响,因此制定了综合考虑转速、转矩两者因素的目标函数:

$$f_{\text{fit}} = k_1 \frac{\int_0^t |e_n(t)| dt}{\int_0^t |e_{\text{nPID}}(t)| dt} + k_2 \frac{\int_0^t |e_{\text{tq}}(t)| dt}{\int_0^t |e_{\text{tqPID}}(t)| dt} \quad (10)$$

式中分子为待优化的发动机转速、转矩的 ITAE 和 IAE 函数,分母为被控对象在 PID 控制时的 ITAE 和 IAE 函数。 k_1 、 k_2 为加权系数。

当寻优搜索迭代次数达到最大迭代步数时,输出全局最优粒子的位置信息作为搜索结果。

3.2.3 混沌搜索

混沌序列采用 Logistic 映射,其基本公式为

$$\lambda_{i+1} = \mu \lambda_i (1 - \lambda_i) \quad \lambda_i \in [0, 1] \quad (11)$$

式中 $i=1, 2, \dots, M$, μ 为控制参数。本文在 3 方面将粒子群算法与混沌搜索融合^[19-20]

1) 混沌序列初始化粒子群位置,使初始粒子

$$\mathbf{X}_i^0 = [x_{i1}^0, x_{i2}^0, \dots, x_{i189}^0]^T \text{ 均匀分布}$$

$$\begin{cases} \lambda_{i+1} = \mu \lambda_i (1 - \lambda_i) \mid \lambda_i \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, M \\ x_{ij}^0 = x_{ij\min}^0 + (x_{ij\max}^0 - x_{ij\min}^0) \lambda_i, j = 1, 2, \dots, 189 \end{cases} \quad (12)$$

式中 $x_{ij\max}^0$ 、 $x_{ij\min}^0$ 为初始粒子各元素上下边界。

2) 混沌序列产生参数 R_1 、 R_2 ,选取最优参数

$$\begin{cases} R_i(t+1) = \mu R_i(t) [1 - R_i(t)], t = 1, 2, \dots, M \\ R_i(t) \in (0, 1), i = 1, 2 \end{cases} \quad (13)$$

3) 粒子群每完成一次搜索,就对当前个体最优粒子 $\mathbf{q}_{\text{best}}^i = [q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{i189}]$ 进行混沌迭代,先将个体最优粒子位置元素 q_{ij} 映射到 Logistic 定义域中

$$y_j^1 = \frac{q_{ij} - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}}, j = 1, 2, \dots, 189 \quad (14)$$

式中 $q_{\max}$ 、 $q_{\min}$ 分别为个体最优粒子位置元素中的最大和最小值,对 y_j^1 进行混沌迭代,并将混沌序列逆映射到原解空间并寻找更优解

$$\begin{cases} y_j^{k+1} = \mu y_j^k (1 - y_j^k), k = 1, 2, \dots, M \\ q_{ij}^k = (q_{\max} - q_{\min}) y_j^k + q_{\min} \end{cases} \quad (15)$$

式中 q_{ij}^k 为 q_{ij} 混沌迭代后产生的第 k 个混沌值。

3.2.4 模拟退火机制

在粒子群迭代过程中根据模拟退火机制 Metropolis 准则对应的概率 c_t 来判断是否更新个体

最优位置,其计算方式如下:

$$c_t = \exp[f_{\text{fit}}(\mathbf{X}_i^t) - f_{\text{fit}}(\mathbf{q}_{\text{best}}^i)/T_t] \quad (16)$$

当 $f_{\text{fit}}(\mathbf{X}_i^t) < f_{\text{fit}}(\mathbf{q}_{\text{best}}^i)$ 或 $c_t > \text{rand}(0, 1)$ 时,接受当前粒子位置为个体最优解。退火更新过程为

$$T_t = \lambda \cdot T_{t+1} \quad (17)$$

式中 T_t 为当前模拟退火算法温度, $\lambda < 1$ 。

3.3 CAHPSO 混合粒子群优化算法有效性验证

以 APU 从 0.47 kW 热机点切换至 0.8 kW 小负荷点过程的模糊 PID 控制参数寻优为例,对比适应度变化比较标准 PSO 算法和 CAHPSO 混合粒子群算法寻优效果。由图 6 所示,CAHPSO 混合粒子群算法能在更少的迭代次数内,得到更优解,说明 CAHPSO 混合粒子群具有更好的寻优能力。

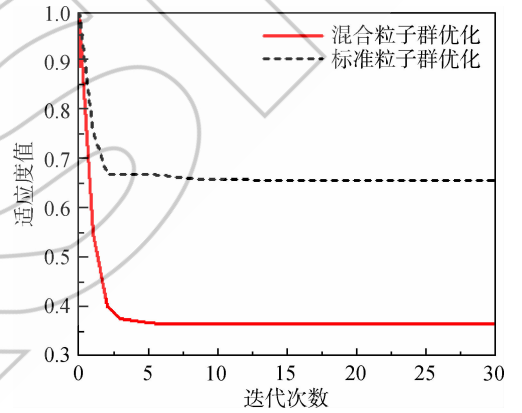


图 6 适应度函数收敛曲线

Fig. 6 Convergence curves of fitness function

4 仿真实验

增程式动力系统整体结构如图 7 所示,APU 的控制服从整机能量管理策略^[21],本文仅研究 APU 在工作点切换时的动态控制问题。

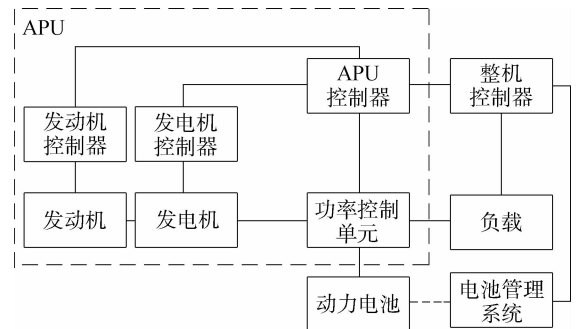


图 7 增程式动力系统整体结构

Fig. 7 Structure of the extended-range power system

4.1 仿真参数与条件确定

本文采用 1 台表面磁极式 PMSG,其交轴电感和直轴电感相等,发电机主要参数如表 1 所示。

表 1 发电机主要参数
Table 1 Main generator parameters

参数名称	参数值
定子电阻/ Ω	0.4
电枢电感/H	5×10^{-4}
永磁体磁链/Wb	0.1827
磁极对数	4

在满足功率需求情况下,选取发动机低油耗率点作为 APU 的工作点,根据发动机试验数据,选取表 2 中的工况作为 APU 工作点。0.47 kW 为热机点,待缸头温度上升后,切换至 0.8 kW 小负荷点工作,随后控制器可根据外界需求功率变

表 2 APU 工作点
Table 2 APU working point

发动机功率/kW	转速/(r/min)	负载转矩/(N·m)	发动机燃油消耗率/(g/(kW·h))
0.47	3000	1.51	644.4
0.8	5000	1.52	571.7
1.18	7000	1.6	530.3
1.78	7500	2.25	468.7

化将 APU 切换至 1.18 kW 和 1.78 kW 的中、高负荷点。

不同工作点下 APU 系统动态参数差别较大,同一套控制参数很难满足区别较大的工况点间的切换。针对从热机点切换至高负荷点的各切换过程采用不同的模糊 PID 控制器,对各控制器分别采用 CAHPSO 算法进行参数寻优。控制过程与控制器编号以及部分参数优化结果如表 3 所示。

表 3 控制过程与部分优化结果
Table 3 Control process and partial optimization results

控制过程	过程编号	控制器	$k_e,\cdots,k_{dk_d}$	$\sigma_1,\cdots,\sigma_{35}$	$r_1,\cdots,r_{147}$
0.47 kW~0.8 kW	D_1	C_1	$0.0013,\cdots,0.87\times 10^{-3}$	$3.6,\cdots,1$	$7,\cdots,7$
0.8 kW~1.18 kW	D_2	C_2	$0.0039,\cdots,9.95\times 10^{-5}$	$3.6,\cdots,2.39$	$5,\cdots,5$
1.18 kW~1.78 kW	D_3	C_3	$0.0001,\cdots,4\times 10^{-3}$	$1,\cdots,1$	$7,\cdots,7$

4.2 仿真验证结果

本文仿真实现的控制过程从热机工作点开始,以一定的时间为间隔,依次切换至小、中、高负荷点。在工作点切换时,不同控制过程匹配不同的控制器以实现最优的控制效果。

4.2.1 发电机控制

发电机控制过程电流变化如图 8 所示。仿真结果表明,发电机控制策略能够较好地将 i_d 控制在 0 A 附近,由于逆变器开关频率有限,发电机电流有小幅波动,但脉动范围较小,满足 $i_d=0$ A 矢量控制目标,此时电磁转矩与 i_q 成正比。发电机电磁转矩变化如图 9 所示,电磁转矩能快速跟随目标转矩,并以目标值为中心,脉动幅值在 0.1 N·m 以内,满足控制精度要求,说明发电机控制策略有效^[22]。

4.2.2 APU 动态控制仿真结果

APU 动态控制效果及对比如表 4 所示。APU 工作点切换过程中的转速变化如图 10 所示,仿真

结果表明,采用 CAHPSO 优化模糊 PID 控制策略能够准确控制 APU 切换至目标转速,仅在小负荷点向中负荷点切换时超调约 0.95%,在其他切换过程中未出现超调,超调抑制效果优于其余两种控制策略。稳定时间在过程 D_3 为 2.79 s,略长于 PID 控制策略,在过程 D_1 和 D_2 中稳定时间都明显短于其余两种控制策略。发动机转矩变化如图 11 所示,转矩和转速两者很难同时取得很好的控制效果,但采用 CAHPSO 算法优化模糊 PID 控制策略,可使转矩变化较为平缓,超调水平整体优于 PID 控制,但略高于模糊 PID 控制。节气门开度变化如图 12 所示,CAHPSO 算法优化模糊 PID 方法在控制过程中节气门的波动更小、变化更平缓,有利于节气门的实际控制。

以控制过程 D_2 为例,15 s 时在负载端施加一个幅值为 0.3 N·m 的脉冲负载扰动,仿真结果由图 13 显示,CAHPSO 混合粒子群优化模糊 PID 控制策略具有更好的抗干扰性能。

以上分析表明,经 CAHPSO 混合粒子群优

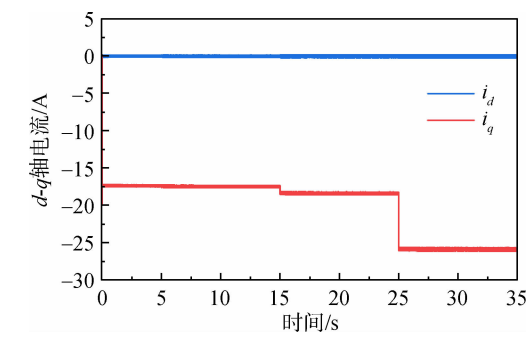


图 8 d - q 轴电流

Fig. 8 Current of d - q axis

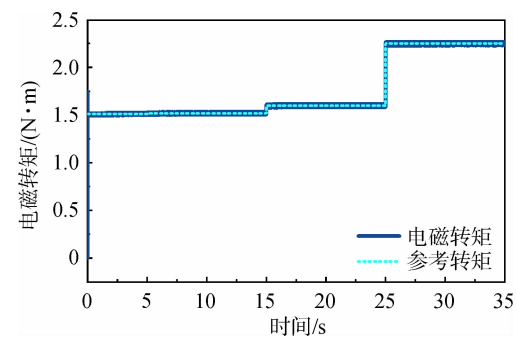


图 9 电磁转矩

Fig. 9 Electromagnetic torque

表 4 控制效果对比

Table 4 Control effect comparison

控制过程	转速超调率/%			转矩超调量/(N·m)			稳定时间/s		
	CAHPSO	模糊 PID	PID	CAHPSO	模糊 PID	PID	CAHPSO	模糊 PID	PID
D_1	0	5.5	3.75	0.25	0.20	0.32	2.92	3.95	3.32
D_2	0.95	3.1	1.15	0.17	0.16	0.16	2.88	4.07	4.79
D_3	0	0.2	1.06	0.16	0.21	0.28	2.79	2.99	2.54

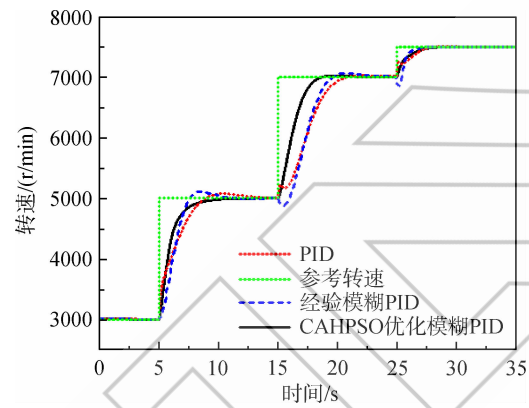


图 10 APU 转速变化

Fig. 10 Change of APU Speed

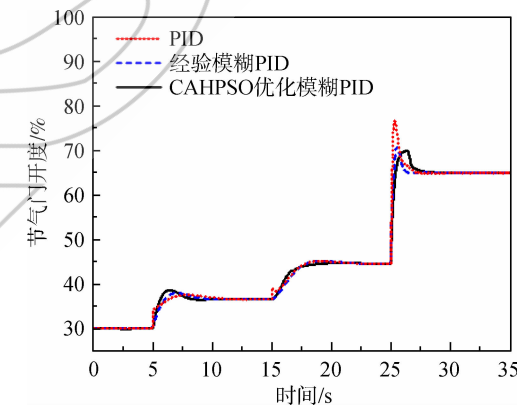


图 12 节气门开度变化

Fig. 12 Change of throttle percentage

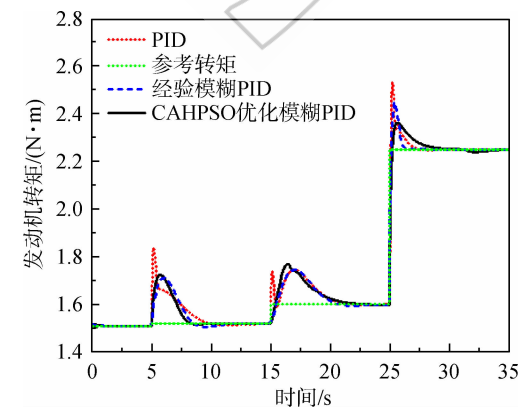


图 11 发动机转矩变化

Fig. 11 Change of engine torque

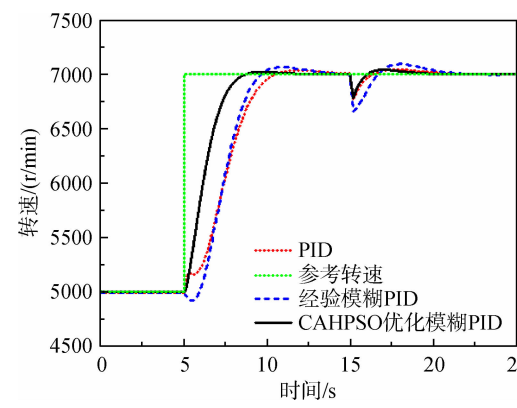


图 13 负载扰动测试

Fig. 13 Load disturbance test

化的模糊 PID 控制策略能够适应发动机的强非线性、时变等特点,在各控制过程都取得了较好的控制效果。

5 结 论

本文针对增程式 APU 工作点的切换过程,对发电机采用 $i_d = 0$ A 矢量控制,对发动机节气门采用模糊 PID 控制,并提出了 CAHPSO 混合粒子群算法对模糊 PID 控制参数进行优化。通过仿真验证,分析后可得到以下结论:

1) 本文在标准粒子群优化算法的基础上,融合了混沌搜索与模拟退火机制,提出了 CAHPSO 混合粒子群算法,该算法可有效避免寻优陷入局部极值,扩大寻优搜索范围,提升寻优精度。

2) 采用 CAHPSO 混合粒子群算法对模糊 PID 控制参数进行优化,仿真结果表明,优化后的控制策略有更好的动态控制效果,主要体现在转速响应快、超调率小,转矩变化平缓,并具有更强的抗干扰能力。这对于工程中增程式 APU 动态控制性能的提升有一定的理论指导意义。

参考文献:

- [1] LI J, ZHOU L, ZHOU W. A control strategy to reduce fuel consumption of APU for range-extended electric vehicle [C]// Proceedings of 2nd International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology. Paris: Atlantis Press, 2012: 2132-2136.
- [2] 谢秀磊. 增程式电动车辅助动力单元动态建模及协调控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
XIE Xiulei. Study on dynamic modeling and coordination control for the auxiliary power unit of extended-range electric vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [3] 刘汉武. 增程式电动汽车增程器的协调控制与性能优化[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
LIU Hanwu. A study on the control strategy and performance optimization for APU of extended-range electric vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [4] WANG H, WANG L, LIAO Y, et al. Research on engine speed control system based on fuzzy adaptive PID controller[J]. Manufacturing Technology, 2019, 19(6): 1080-1087.
- [5] MANSOURABAD A M, BEHESHTI M T H, SIMAB M. A hybrid PSO_fuzzy_PID controller for gas turbine speed control[J]. International Journal of Control and Automation, 2013, 6(1): 13-24.
- [6] BOUKHALFA G, BELKACEM S, CHIKHI A, et al. Genetic algorithm and particle swarm optimization tuned fuzzy PID controller on direct torque control of dual star induction motor[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(7): 1886-1896.
- [7] 刘爱军, 杨育, 李斐, 等. 混沌模拟退火粒子群优化算法研究及应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(10): 1722-1730.
LIU Aijun, YANG Yu, LI Fei, et al. Chaotic simulated annealing particle swarm optimization algorithm research and its application[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(10): 1722-1730. (in Chinese)
- [8] WAHONO B, OGAI H. Construction of response surface model for diesel engine using stepwise method[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and the 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems. Kobe, Japan: IEEE, 2012: 989-994.
- [9] 邵金菊. 汽油发动机转速变增益鲁棒控制的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
SHAO Jinju. Research on gain scheduling robust control for gasoline engine speed regulation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [10] 郭卫, 郑高祥, 张武, 等. 基于发动机转速调节特性 CVT 速比模糊控制仿真研究[J]. 机械强度, 2019, 41(1): 110-116.
GUO Wei, ZHANG Gaoxiang, ZHANG Wu, et al. Research on fuzzy control simulation of CVT ratio based on engine speed regulation characteristics[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(1): 110-116. (in Chinese)
- [11] 王小青, 黄一敏, 杨一栋, 等. 小型无人直升机发动机控制系统设计[J]. 航空动力学报, 2007, 22(12): 2139-2142.
WANG Xiaoqing, HUANG Yimin, YANG Yidong, et al. Control system design for engine of a small-size unmanned helicopter[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(12): 2139-2142. (in Chinese)
- [12] ELTAG K, ASLAMX M S, ULLAH R, et al. Dynamic stability enhancement using fuzzy PID control technology for power system[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2019, 17(1): 234-242.
- [13] GONG C, HU Y, GAO J, et al. An improved delay-suppressed sliding-mode observer for sensorless vector-controlled PMSM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5913-5923.
- [14] 徐利锋, 黄祖胜, 杨中柱, 等. 引入多级扰动的混合型粒子群优化算法[J]. 软件学报, 2019, 30(6): 1835-1852.
XU Lifeng, HUANG Zusheng, YANG Zhongzhu, et al. Mixed particle swarm optimization algorithm with multi-stage disturbances[J]. Journal of Software, 2019, 30(6): 1835-1852. (in Chinese)
- [15] 艾欣, 李一铮, 王坤宇, 等. 基于混沌模拟退火粒子群优化算法的电动汽车充电站选址与定容[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 9-14.
AI Xin, LI Yizheng, WANG Kunyu, et al. Locating and sizing of electric vehicle charging station based on chaotic

simulated annealing particle swarm optimization algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 9-14. (in Chinese)

[16] 李勇,王建君,曹丽华. 火电厂负荷优化分配的模拟退火粒子群算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 40-44.

LI Yong, WANG Jianjun, CAO Lihua. Simulated annealing particle swarm optimization algorithm of optimal load dispatch in power plant[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(3): 40-44. (in Chinese)

[17] WANG Z, WANG Q, HE D, et al. An improved particle swarm optimization algorithm based on fuzzy PID control [C]// Proceedings of 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). Changsha: IEEE, 2017: 835-839.

[18] 白洋,段黎明,柳林,等. 基于改进的混合粒子群算法的变循环发动机模型求解[J]. 推进技术, 2014, 35(12): 1694-1700.

BAI Yang, DUAN Liming, LIU Lin, et al. Solving variable cycle engine model based on improved hybrid particle swarm optimization[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(12): 1694-1700. (in Chinese)

[19] DOS SANTOS C L, HERRERA B M. Fuzzy identification based on a chaotic particle swarm optimization approach applied to a nonlinear yo-yo motion system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3234-3245.

[20] DOS SANTOS C L, MARIANI V C. A novel chaotic particle swarm optimization approach using Hénon map and implicit filtering local search for economic load dispatch[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2009, 39(2): 510-518.

[21] REN G, MA G. A novel scheme design of power unit for extended range electric vehicles[J]. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 2012, 4(4): 314-326.

[22] 刘晓黎. 基于永磁同步电机数学模型的矢量控制理论、仿真、实验及应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.

LIU Xiaoli. Research on vector control theory, simulation, experiment and application based on mathematic model of PMSM[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017. (in Chinese)

(编辑:张 雪)