

基于随机进化灰狼优化算法的分数阶自抗扰起动控制^{*}

阮祝鑫, 肖玲斐, 林 聪

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 航空发动机在起动电机起动过程中负载特性会随着转速而变化,同时起动环境的差异以及起动电机自身参数的变化均给起动控制带来了难度。为了解决传统控制策略在处理不确定性问题时的不足,提出了一种基于随机进化灰狼优化算法的分数阶自抗扰控制器(REGWO-FO-ADRC):利用自抗扰控制,增强起动过程中系统的抗扰动能力;结合分数阶控制,抑制由带宽上限引起的观测器估计误差,保证控制品质;设计基于随机进化的灰狼优化算法,对分数阶控制器的控制参数进行在线自整定;用可变的进化速率描述种群更新过程,增加过程中的随机性,提高全局搜索能力和收敛速度。仿真实验表明,设计的控制器能够有效抑制诸多不确定性对系统的影响,改善航空发动机的起动性能。

关键词: 航空发动机起动电机; 随机进化灰狼优化算法; 起动控制; 分数阶控制; 自抗扰控制; 进化速率

中图分类号: TM 35; V 23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)12-0010-07

doi: 10.12177/emca.2020.157

Fractional Order Active Disturbance Rejection Start-Up Control Based on Random Evolution Grey Wolf Optimization^{*}

RUAN Zhuxin, XIAO Lingfei, LIN Cong

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: During the starting process of aero-engine starter motor, the load characteristics change with the speed. At the same time, the difference of starting environment and the change of motor parameters bring difficulties to the start-up control. In order to overcome the shortcomings of traditional control strategies in dealing with these uncertainties, a fractional order active disturbance rejection controller based on random evolution grey wolf optimization (REGWO-FO-ADRC) is proposed. Through the active disturbance rejection control (ADRC), anti-disturbance capability of the system in the starting process is enhanced. The fractional order (FO) control is adopted to suppress the observer estimation error caused by the upper limit of bandwidth and ensure the control quality. The random evolution grey wolf optimization (REGWO) algorithm is designed to realize online self-adaption of the control parameters of the FO controller. The variable evolutionary rate is used to describe the update process of population, which enriches the randomness and improves the global search ability and convergence speed. Simulation results show that the designed controller can effectively suppress the influence of many uncertainties on the system and improve the starting performance of aero-engine.

收稿日期: 2020-07-30; 收到修改稿日期: 2020-10-09

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51876089)

作者简介: 阮祝鑫(1996—),男,硕士研究生,研究方向为航空起动发电系统控制、电机控制。

肖玲斐(1982—),女,博士,副教授,研究方向为航空动力系统建模、控制与优化。

林 聪(1997—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子变换器控制与优化。

Key words: aero-engine starter motor; random evolution grey wolf optimization (REGWO); start-up control; fractional order (FO) control; active disturbance rejection control (ADRC); evolutionary rate

0 引言

多电飞机的快速发展,对以起动/发电机为核心的起动发电系统提出了更高的要求^[1]。起动/发电机在起动阶段需要作为起动电机,提供足够大能够满足航空发动机起动所需要的输出转矩,使其从零低速状态快速完成起动,并作为原动机带动发电机发电。三级式同步电机凭借其高功率密度及高集成度的优点,在航空变频交流电源系统中有广泛的应用,作为发电电机技术十分成熟^[2],而作为起动电机时的起动控制尤其是在低速甚至零速的顺利起动一直是起动/发电机十分重要的研究方向之一^[3-8]。

随着转速的逐渐增加,同时受起动环境的差异及温度、压力等因素的影响,起动电机自身参数的非线性越发突出^[8];航空发动机的电起动方式受到电压的限制,需要由原来的恒转矩起动改为恒功率起动,即航空发动机的阻转矩特性发生了改变^[9]。而传统控制方法在实现起动控制时难以解决这些不确定性问题。

韩京清^[10]在经典 PID 的基础上提出了自抗扰控制(ADRC),用“总扰动”来表示内外扰动等不确定性,通过扩张状态观测器(ESO)将总扰动扩张成一个新的状态量,同时对这些扰动的变化趋势利用非线性状态误差反馈率进行补偿。对于原始 ADRC 参数等缺点,Gao 等^[11]通过线性化的方法将其复杂的调参问题转变为对频率的调节,大大提高了面向工程的应用能力,尤其是电机领域^[12-14]。但是 ESO 的估计速度决定了系统控制性能的好坏。扰动估计不及时,状态误差反馈控制律在采用传统的整数阶 PD 时,这种不及时所产生的估计误差对整个系统控制性能带来的影响会变得尤为突出,针对这个问题,考虑引入对误差不敏感的分阶控制。

分数阶 PID (FOCPID)是在传统 PID 控制上引入分数阶微积分^[15]发展而来,通过增加积分和微分阶次 2 个参数,增强了可调范围,控制器的动态性能得到改善,在工程上得到广泛应用^[16-17]。但是参数的增加,也给参数整定带来了难度,为此也有学者对分数阶参数寻优进行了研究,包括人

工蜂群(ABC)^[18]、粒子群(PSO)^[19]等。灰狼优化算法(GWO)^[20-22]通过模仿狼群的社会阶层和捕食行为来实现寻优,算法简单,全局搜索能力好,但是和其他仿生学算法一样收敛精度低,易于陷入局部最优,尤其是在迭代后期,收敛速度变慢,整体寻优速度和精度变差。为了提高 GWO 后期收敛速度和算法精度,本文引入随机进化的概念,将底层灰狼追随支配头狼的快慢用进化速度进行量化,并随机向 3 种头狼进化,增加随机性,避免出现过早陷入全局最优,并在线性 ADRC 的框架内,结合分数阶 PD 反馈率,设计了一种分数阶 PD 自抗扰控制器。结果表明,在收敛速度和算法精度上,基于随机进化的灰狼优化算法(REGWO)明显优于其他算法;设计的起动控制器明显改善起动时系统面对内外扰动时的控制性能,鲁棒性更强。

1 起动控制建模

根据三级式同步电机的起动原理,在起动阶段,起动环境的改变和航空发动机的阻转矩特性会随转速的上升而改变,引起诸多扰动问题。为了便于之后的控制器设计,对于具有强耦合性和强非线性的起动电机,忽略谐波和磁饱和等因素,同步旋转坐标系下电机方程如下:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_{sf} \\ 0 & L_q & 0 \\ 1.5M_{fs} & 0 & L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{2s} & 0 & 0 \\ 0 & R_{2s} & 0 \\ 0 & 0 & R_{2f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p\psi_d \\ p\psi_q \\ p\psi_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e\psi_q \\ \omega_e\psi_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2}p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3)$$

$$T_{em} - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4)$$

式中: ψ_d 、 ψ_q 、 ψ_f 分别为定子 d 、 q 轴磁链和转子励磁磁链; L_d 、 L_q 、 L_f 分别为定子 d 、 q 轴和转子绕组

的电枢反应电感; M_{sf} 和 M_{fs} 为定子绕组与转子励磁绕组之间的互感; i_d 、 i_q 、 i_f 分别为定子 d 、 q 轴电流和转子励磁电流; u_d 、 u_q 、 u_f 分别为定子 d 、 q 轴电压和转子励磁电压; R_{2s} 、 R_{2f} 分别为电枢绕组和励磁绕组的电阻值; ω_e 、 ω_m 分别为转子电角速度和机械角速度; p 为电机极对数; J 为转动惯量。

在矢量控制中, 转速环的控制直接决定着系统的控制性能, 需要具有快速的响应能力、抑制扰动和超调的能力, 以及实现较高的控制精度。将式(4)~式(6)联立得到关于 ω_m 的一阶微分方程:

$$1.5pM_{fs}i_f i_q - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (5)$$

对式(5)求微分, 同时引入电流方程消去 i_q , 得到转速的二阶微分方程:

$$\ddot{\omega}_m = -\frac{R_s}{L_q} \dot{\omega}_m - \frac{1.5(pM_{fs}i_f)^2}{JL_q} \omega_m - \frac{R_s}{JL_q} T_L - \frac{1}{J} T_L + \frac{1.5pM_{fs}i_f}{JL_q} u_q \quad (6)$$

为了简化控制器设计, 将电机的角速度全部转化为转速, 得到转速 n 关于 q 轴电压 u_q 的二阶微分方程:

$$\ddot{n} = -\frac{R_s}{L_q} \dot{n} - \frac{1.5(pM_{fs}i_f)^2}{JL_q} n - \frac{9.55R_s}{JL_q} T_L - \frac{9.55}{J} T_L + \frac{14.32pM_{fs}i_f}{JL_q} u_q \quad (7)$$

在传统矢量控制中, 电流环主要是对电流进行控制, 抑制由定子内阻等参数引起的过流等情况最终影响到电机的输出。而本文设计的控制器能够很好地实现对包括内部扰动和外部扰动在内

所有扰动的抑制作用, 因此不再使用 q 轴电流环, 转速环直接输出电压作为控制量控制转速。

2 基于 FO-ADRC 的控制器设计

以三级式同步电机作为起动电机, 整个系统的控制包括主励磁机的励磁控制和主发电机的起动控制 2 个部分, 其中主发电机的起动控制目的是为了在起动阶段, 作为起动电机, 能在最大励磁电流的激励下, 输出恒定的最大输出转矩, 并在合理的时间内实现航空发动机顺利起动。对此, 本文将分数阶、基于随机进化的灰狼优化算法、线性自抗扰控制进行有机结合, 设计的起动控制器结构如图 1 所示。通过指令转速与估计值的误差, 在转速环控制器控制下输出 q 轴电压作为控制量, 取消了 q 轴电流环, 为了配合转速环的分数阶控制, d 轴电流环也使用分数阶控制器。考虑到起动电机在实际运行过程中, 存在电机参数变化、系统未建模动态等内部扰动, 以及航空发动机负载特性改变、环境工况改变等外部扰动, 将式(7)二阶系统扩展为

$$\ddot{n} = b_0 u_q + \Delta b u_q + f_0 + f_1 + d = b_0 u_q + f \quad (8)$$

$$b_0 \approx \frac{14.32pM_{fs}i_f}{JL_q} \quad (9)$$

$$f = \Delta b u_q + f_0 + f_1 + d \quad (10)$$

$$f_0 = -\frac{R_s}{L_q} \dot{n} - \frac{1.5(pM_{fs}i_f)^2}{JL_q} n - \frac{9.55R_s}{JL_q} T_L - \frac{9.55}{J} T_L \quad (11)$$

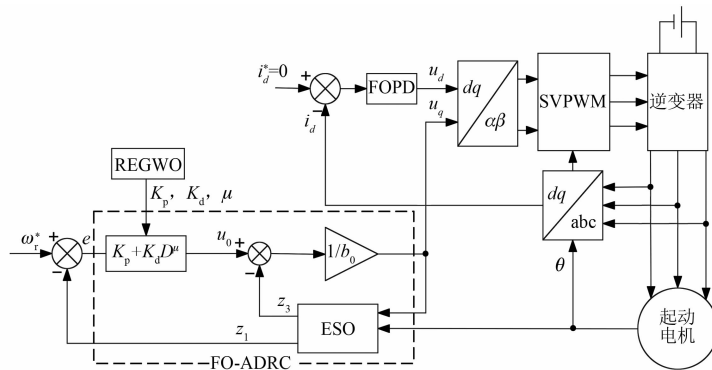


图 1 基于 REGWO-FO-ADRC 控制器的起动控制结构

式中: b_0 为补偿系数; $\Delta b u_q$ 为电机参数改变时, 模型的不确定部分; f_0 为模型已知部分; f_1 为系统未

建模动态; d 为系统所受到的外部扰动(包括温度、压力等因素的改变); f 为系统的总扰动, 即内外扰动之和。

对于二阶系统来说, 将其通过观测器扩张成第 3 个状态量, 设 $x_1 = n, x_2 = \dot{n}, x_3 = f, u = u_q$, 则式(8)可写成状态空间方程的形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0 u \\ \dot{x}_3 = \hat{f} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (12)$$

根据上述状态方程设计线性 ESO, 写成状态空间方程的形式:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1(y - \hat{y}) \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_2(y - \hat{y}) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = \beta_3(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = z_1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: z_1, z_2 分别为状态变量 x_1 和 x_2 的估计值; z_3 为观测器得到的总扰动 x_3 的估计值; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为反馈增益系数。

采用极点配置法对 ESO 进行极点配置, 得到: $\beta_1 = 3\omega_0, \beta_2 = 3\omega_0^2, \beta_3 = \omega_0^3$ 。

ADRC 在线性化的过程中, 最终的控制量通过扰动补偿的方式对总扰动进行补偿, 需要经误差反馈控制器产生的误差反馈量 u_0 和扰动估计量 z_3 来进行补偿。采用如下补偿律进行补偿:

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b_0} \quad (14)$$

将式(12)和式(13)代入式(14), 得到在经过该扰动补偿后, 原系统变为一个积分串联型系统:

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= (x_1 - z_1) + (x_2 - z_2) + \\ &(x_3 - z_3) + u_0 \approx u_0 \end{aligned} \quad (15)$$

因此, 对该系统进行误差反馈控制, 控制器控制性能和线性扩张观测器对控制变量和总扰动的估计有很大的关联。对于扰动较大的系统, 为了及时跟踪扰动, 要求 ESO 具有非常高的带宽, 但是过高的观测器带宽会影响系统的稳定性。当估计扰动不及时时, 线性自抗扰中的整数阶 PD 反馈控制器不能满足快速性的要求。为了解决扩张观测器观测不足的问题, 利用分数阶 PD 控制对控制器进行改进, 有:

$$u_0 = K_p e(t) + K_d D^\mu e(t) \quad (16)$$

其中: $e(t) = r - z_1, r$ 为系统参考输入; z_1 作为转速的测量值, 且是 x_1 的观测估计值, 与实际测量值相比, 过滤了部分噪声信号。

在 ADRC 框架内, 包含分数阶 PD 控制的启动控制器需要整定的 5 个参数包括 $K_p, K_d, \mu, \omega_0, b_0$ 。由于 ADRC 本身各部分相互联系又各自独立, 因此将 5 个参数分为分数阶参数(K_p, K_d, μ)和自抗扰参数(ω_0, b_0)2 类, 分别独立完成各自的参数整定。参数整定的顺序为“先自, 后分”。自抗扰部分的参数通过试凑得到补偿因子 b_0 和带宽 ω_0 。下文对分数阶参数进行寻优算法设计。

3 REGWO

3.1 GWO

根据第 2 节, 对于分数阶参数, 利用随机进化的 GWO 算法进行实时在线整定。传统 GWO 整个优化过程包括以下步骤: 包围猎物、围捕、攻击猎物、开发潜在猎物。狼群通过严格的社会支配等级, 搜索猎物并对猎物包围, 包围行为可描述为

$$D = |C \cdot X_p(i) - X(i)| \quad (17)$$

$$X(i+1) = X_p(i) - A \cdot D \quad (18)$$

式中: D 为灰狼到猎物的位置; X_p 代表当前猎物位置; i 代表迭代次数; X 代表灰狼位置。

由最高级别的支配狼 α 领导, 根据适应度最好的 α, β, δ 3 种狼的位置, 即每代种群中的 3 个最优解, 来判断猎物(最优解)的精确位置, 给出围捕式。在开发潜在猎物的过程中, 利用分散模型实现全局搜索, 同时通过 ω 狼追随上述 3 种狼进行种群进化(全局优化), 得到全局最优解:

$$\begin{cases} D_\alpha = |C_1 \cdot X_\alpha - X| \\ D_\beta = |C_2 \cdot X_\beta - X| \\ D_\delta = |C_3 \cdot X_\delta - X| \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha \\ X_2 = X_\beta - A_2 \cdot D_\beta \\ X_3 = X_\delta - A_3 \cdot D_\delta \end{cases} \quad (20)$$

$$\vec{X}(i+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (21)$$

式中: $D_\alpha, D_\beta, D_\delta$ 分别为灰狼到各支配狼的距离; C_1, C_2, C_3 为摆动系数; A_1, A_2, A_3 为收敛系数; $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$ 分别为 3 种支配狼的位置; X_1, X_2, X_3 为灰

狼对支配狼进化更新的位置。

3.2 基于随机进化的 GWO

在灰狼种群进化后期,灰狼均已到达猎物附近并均在朝着猎物的方向逼近,灰狼种群向猎物逐渐逼近的过程就是最底层灰狼向支配头狼进化的过程,每代种群中的 3 种支配头狼(每代最优解)作为最靠近猎物的个体,意味着它们掌握着绝大多数的猎物信息,而下一代种群的进化就是根据上代头狼们的遗留信息,得到种群的进化趋势,因此本文引入种群的可变的进化速率来描述这种进化趋势,假设上代遗留信息在种群内部完全共享, ω 狼向 3 种头狼随机进化,且进化速度各不相同,第 $(i+1)$ 代灰狼的进化速度 $v(i+1)$:

$$v(i+1) = \omega_v \cdot v(i) + c_1 \cdot \text{rand} \cdot [\vec{X}_1 - \vec{X}(i)] + c_2 \cdot \text{rand} \cdot [\vec{X}_2 - \vec{X}(i)] + c_3 \cdot \text{rand} \cdot [\vec{X}_3 - \vec{X}(i)] \quad (22)$$

式中: c_1, c_2, c_3 为遗传因子,分别表示继承上代 3 种支配狼遗留信息的程度。

考虑灰狼的个体差异性,用随机数 rand 表示灰狼个体随机进化为某种头狼的概率比重。当代种群进化速度包括上代的进化速度,以及向每种头狼进化的速度。

同时,根据速度惯性,上代的进化速度用惯性因子 ω_v 加以约束,一般情况下取 $\omega_v = 1$,当种群规模较大时,为了提高收敛速度,避免出现反向进化趋势,本文使惯性因子随迭代次数增加而减小,设关系式:

$$\omega_v(i+1) = \omega_v(i) - i_i \cdot 0.7 \cdot \omega_v(i) / n \quad (23)$$

在完成当代种群进化后,得到历史优化值,即当前最优值。因此,第 $(i+1)$ 代灰狼位置更新为

$$\vec{X}(i+1) = \vec{X}(i) + v(i+1) \cdot dt \quad (24)$$

通过得到 REGWO 实现对分数阶控制参数的在线自整定。

4 仿真试验验证

为了验证设计控制器的正确性和有效性,在分析并建立起动电机数学模型的基础上,基于 MATLAB/Simulink 平台上进行仿真试验,并对仿真结果进行分析。主发电机主要参数如表 1 所示。

表 1 主发电机主要参数

参数名称	参数值
d 轴电感/mH	0.320
q 轴电感/mH	0.151
定子绕组电阻/m Ω	0.988 8
励磁和电枢互感/mH	2.44
转动惯量/(kg · m ²)	0.1
极对数	3
额定励磁电流/A	8.314

在仿真中,主发电机的转速指令用斜坡函数表示,转速范围为 0~2 000 r/min。对于控制器的可调参数,由于分数阶与 ESO 之间相互独立又相互关联,因此参数整定采用“先自后分”,通过试凑得到 $b_0 = 10\,000, \omega_0 = 2\,000$;分数阶控制的 3 个参数通过 REGWO 寻优后的取值为, $K_p = 2.093\,8, K_d = 981.48, \mu = 0.820\,2$ 。

对于起动控制器转速环中的分数阶控制参数的优化,本文选择 ITAE 作为误差性能指标,定义为

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (25)$$

将 ITAE 作为目标函数,种群数量为 30,迭代次数为 50 次,GWO、PSO、REGWO 3 种算法的对比结果如图 2 所示。

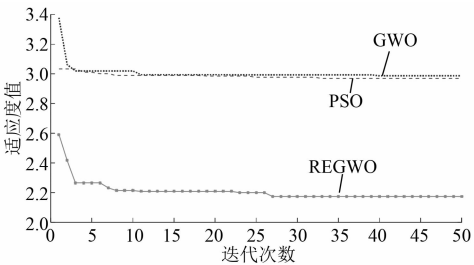


图 2 目标函数寻优结果

REGWO 在迭代第 25 次左右便达到最优值,后期收敛速度明显提高;其次在精度上,REGWO 最终适应度为 2.173 3,而 GWO 与 PSO 的适应度值均大于 2.9,减少了近 26%,因此 REGWO 比 GWO、PSO 在目标函数上,无论是收敛速度还是寻优精度上均取得了很好的效果。

对起动控制进行仿真分析。图 3 为主发电机的转速跟踪曲线。从图 3 左边的局部放大图可见,REGWO-FO-ADRC 能够在 0.01 s 内跟踪上指

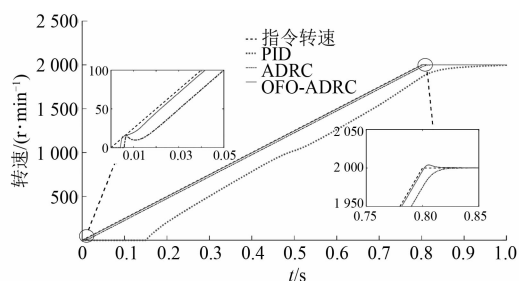
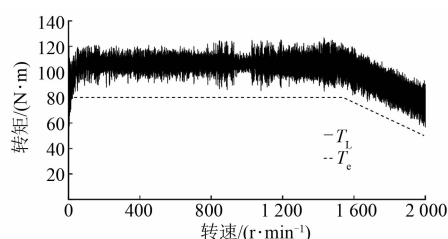


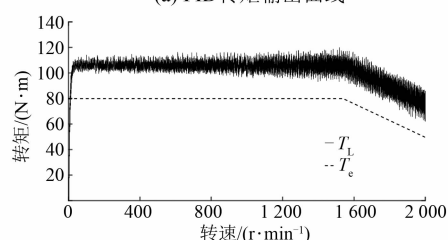
图3 主发电机转速曲线

令转速,并且与其他方法相比,更接近指令转速。从图3右边的局部放大图可见,在达到额定转速2000 r/min时,REGWO-FO-ADRC的响应更快,上下波动较小,动态和稳态性能更好。

输出转矩和负载转矩的对比曲线如图4所示。图4中, T_L 为航空发动机的负载特性曲线。对比2个仿真结果可知,控制器能够输出起动过程需要的转矩,满足发动机负载特性,还在一定程度上对转矩脉动起到了抑制作用。



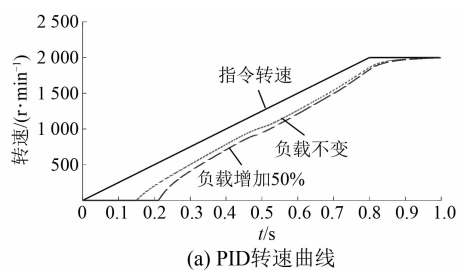
(a) PID转矩输出曲线



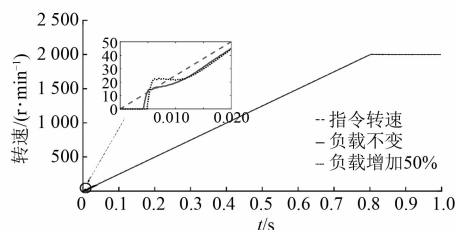
(b) REGWO-FO-ADRC转矩输出曲线

图4 主发电机输出转矩曲线对比

由于在起动过程中,起动/发电机会受到包括航空发动机随转速升高而改变的负载特性、温度等外部扰动以及电机参数改变等内部扰动,为了分析设计控制器对起动性能的优越性,对于外部扰动,选择将负载转矩 T_L 曲线增大50%作为扰动之一。对于内部扰动而言,选择将主发电机中定子绕组电阻这一参数变为原来的2倍作为内部扰动。其他参数均不变,仿真结果如图5、图6所示。

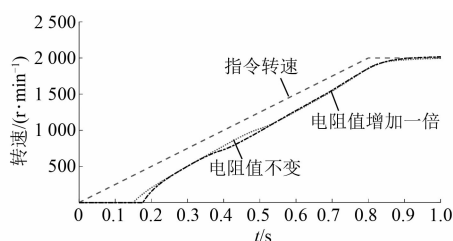


(a) PID转速曲线

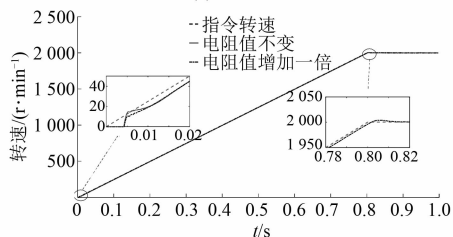


(b) REGWO-FO-ADRC转速曲线

图5 负载增加50%时的转速曲线对比



(a) PID转速曲线



(b) REGWO-FO-ADRC转速曲线

图6 定子绕组电阻值增加一倍时的转速曲线对比

对比图5(a)和图5(b)的仿真结果,当负载转矩增大50%时,PID控制下的转速跟踪上指令转速需要花费更多的时间,对外部扰动的变化反应比较敏感。相比之下,本文设计的控制器对这一类外部扰动不敏感,即抗扰能力得到了很大的增强。

对于内部扰动,从图6(a)和图6(b)的仿真结果来看,在起动过程中,电机参数会随着起动环境的改变而发生变化,当主发电机的定子绕组电阻变为原来的2倍后,PID控制器的抗扰能力明显不如REGWO-FO-ADRC控制器。因此,本文设计的控制器对于内外扰动有着很好的抑制作用。

5 结 语

本文首先针对航空发动机在起动阶段,面对起动环境的差异、负载特性、电机参数改变等内外扰动,提出了一种分数阶自抗扰控制器,通过分数阶自抗扰控制器,将不论是来自内部还是外部的扰动都视作总扰动,对这个总扰动进行补偿,实现了对扰动的抑制,大大缩短了起动时间。另外,设计了基于随机进化的 GWO,利用进化速率增加了优化过程中的随机性,同时可变速率提高后期的收敛速度,避免过早陷入全局最优,提高了收敛精度。仿真试验结果表明,REGWO 后期收敛速度和收敛精度有了明显的增强,对于起动阶段出现的内外扰动,本文设计的 REGWO-FO-ADRC 控制器表现出良好的抗扰能力,使起动性能得到改善。

【参 考 文 献】

- [1] 张卓然,李进才,韩建斌,等. 多电机大功率高压直流起动发电系统研究与实现[J]. 航空学报, 2020, 41(2): 324.
- [2] 程国华. 大型民用飞机电源系统的现状与发展[J]. 民用飞机设计与研究, 2008(4): 1.
- [3] MAALOUF A, IDKHAJINE L, LE BALLOIS S, et al. Field programmable gate array-based sensorless control of a brushless synchronous starter generator for aircraft application [J]. IET Electric Power Applications, 2011, 5(1): 181.
- [4] 张坤. 航空变频交流起动发电系统的起动控制策略研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
- [5] JIAO N, LIU W, PANG J, et al. Integrated model of brushless wound-rotor synchronous starter-generator based on improved parametric average-value model of rotating rectifier [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 96: 106.
- [6] 李亚楠. 三级式同步电机变频交流起动/发电系统的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.
- [7] 马鹏,刘卫国,骆光照,等. 一种三级式航空无刷同步电机起动控制策略[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(11): 29.
- [8] 马鹏,刘卫国,彭纪昌,等. 三级式同步电机的自抗扰起动控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(12): 1684.
- [9] 苏伟生,孙健国,程蓝,等. 基于扭矩特性的航空发动机起动系统数学模型[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 499.
- [10] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19.
- [11] GAO Z, HU S, JIANG F. A novel motion control design approach based on active disturbance rejection [C]//Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, 2001.
- [12] 王斯墨. 永磁同步电机的二阶自抗扰控制仿真[J]. 新技术新工艺, 2020(2): 33.
- [13] 李寅生,陈永军. 变增益策略在 PMSM 自抗扰控制中的应用与研究[J]. 微电机, 2020, 53(4): 77.
- [14] 唐彬彬,徐道明,吴若鹭. 永磁同步电机自抗扰控制调速系统[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 12.
- [15] 薛定宇. 分数阶微积分学与分数阶控制[M]. 北京:科学出版社, 2019.
- [16] 张荣成,陈晨. 基于分数阶 PID 的农用车辆自主导航控制器设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2017, 55(11): 55.
- [17] DING D, LIU H, WENG Y, et al. Dynamics analysis of fractional-order memristive time-delay chaotic system and circuit implementation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2020, 27(2): 65.
- [18] 陈超波,胡海涛,高嵩. 人工蜂群的分数阶 PID 控制器参数自适应研究[J]. 控制工程, 2020, 27(6): 956.
- [19] 王荣林,陆宝春,侯润民,等. 交流伺服系统分数阶 PID 改进型自抗扰控制[J]. 中国机械工程, 2019, 30(16): 1989.
- [20] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46.
- [21] 马骏. 基于灰狼优化算法的改进研究及其应用[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2018.
- [22] 张悦,孙惠香,魏政磊,等. 具有自适应调整策略的混沌灰狼优化算法[J]. 计算机科学, 2017, 44(增刊2): 119.