

基于差分进化的幕墙百叶伺服电机自抗扰控制

赵蕾¹, 白甲丽²

(1. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 西安 710055)

摘要: 针对传统 PID、模糊控制算法设计简单, 无法对实际系统进行扰动补偿, 导致外部未知干扰影响伺服电机的控制, 提出一种基于差分进化的伺服电机自抗扰控制技术; 通过对自抗扰控制中参数 k_p 、 k_d 的动态整定, 对比了基于差分进化算法 (DE-ADRC)、自抗扰控制算法 (ADRC)、PID 算法的跟踪误差, 结果显示 DE-ADRC 算法具有明显优势, 较 ADRC 算法、PID 算法的跟踪误差分别降低了 54% 和 49%; 进一步利用蒙特卡罗统计学算法对控制对象进行仿真, 以超调量、调节时间和误差绝对值积分为控制性能评估指标证明所提出的 DE-ADRC 算法比 PID 算法和 ADRC 算法具有更强的鲁棒性和系统抗干扰能力, 为伺服电机在实际工程中抗干扰能力的增强提供了技术支持。

关键词: 伺服电机; 自抗扰控制; 差分进化; 蒙特卡罗方法; 鲁棒性

Auto-disturbance-rejection Control of Curtain wall Shutter Servo Motor Based on Differential Evolution

ZHAO Lei¹, BAI Jiali²

(1. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture Science and Technology,

Xi'an 710055, China; 2. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture

Science and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Aiming at the simple design of traditional PID and fuzzy control algorithms, which can't compensate the actual system disturbance, resulting in external unknown interference affecting the control of the servo motor, a servo motor auto-disturbance rejection control technology based on differential evolution is proposed. Through the dynamic adjustment of the parameters k_p and k_d in the active disturbance rejection control, the tracking errors based on the differential evolution algorithm (DE-ADRC), the active disturbance rejection control algorithm (ADRC), and the PID algorithm are compared. DE-ADRC algorithm has obvious advantages. Compared with ADRC algorithm and PID algorithm, the tracking error is reduced by 54% and 49% respectively. The Monte Carlo statistical algorithm is further used to simulate the control object, and the overshoot, adjustment time, and absolute error integral are used as control performance evaluation indicators to prove that the proposed DE-ADRC algorithm is more robust than the PID algorithm and the ADRC algorithm. The robustness and system anti-interference ability provide technical support for the enhancement of the anti-interference ability of the servo motor in actual engineering.

Keywords: servo motor; active disturbance rejection control; differential evolution; monte carlo method; robustness

0 引言

伺服电机系统广泛应用于工业、农业、建筑业等等, 例如对机械手、数控机床、幕墙百叶窗的调控。伺服电机系统常采用反馈控制系统调节。但是, 气象条件存在不确定性, 且建模时若考虑伺服系统摩擦对被控对象的影响就必须引入一些简化假设而使得模型结果并不能反映真实运行状况, 以致传统的 PID 控制以及模糊控制等算法因计算过程简单而无法实现对扰动的补偿, 难以达到控制精度的要求, 而影响实际控制效果, 如响应速度慢和精度不够等。

为了解决伺服电机控制中的这些问题, 已经进行了大

量研究^[1-4]。韩京清在 1998 年首次提出了自抗扰控制 (ADRC, active disturbance rejection control), ADRC^[5-6], 对输入信号安排了过渡过程, 并跟踪过渡过程的微分信号, 为扩张状态观测器 (ESO, extended state observer) 引入补偿因子, 可提高系统的自抗扰性能。随后, 自抗扰控制技术被应用于武器装备系统、飞行器以及发动机的控制中。

为了保证自抗扰控制系统稳态和动态性能良好, 通过建立优化函数对自抗扰控制中的速度因子、滤波因子等参数进行了整定和优化研究, 比如文献 [7] 提出了一种线性化、带宽化的线性扩张状态观测器, 简化了扩张状态观测

收稿日期: 2021-03-20; 修回日期: 2021-05-10。

作者简介: 赵蕾 (1971-), 女, 陕西西安人, 博士, 教授, 主要从事研究室内环境调控方向的研究。

引用格式: 赵蕾, 白甲丽. 基于差分进化的幕墙百叶伺服电机自抗扰控制[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 88-94.

器算法。文献 [8] 以大时滞滤水浊度控制系统为对象, 研究了参数整定后系统的控制性能。文献 [9] 引入中间变量提取参数估计误差来决定自适应控制率, 使电机伺服系统对某惯性负载在有限时间内快速得到控制。文献 [10] 将改进的 Smith 预估器 (MSP, modified smith predictor) 与自抗扰控制结合, 提出了 MSP-ADRC 算法, 显著提高了一阶时滞系统的抗干扰性和鲁棒性能。文献 [11] 深入分析了自抗扰控制和免疫双态微粒算法, 提出了一种具有创新性的免疫双态微粒群算法 (BIPSO), 并与 BP-PID、PSO 算法优化的 ADRC、Fuzzy-RBF-PID 这 3 种算法进行对比, 通过仿真证明了 BIPSO 算法的先进性、可靠性, 应用于混沌系统自抗扰控制器的参数整定。但这种新算法运算过程繁琐、复杂, 所以不易推广与应用。扩张状态观测器存在状态估计误差的问题, 为此基于自由度的内模控制被提出, 且有效性得到了实验验证^[12]。

自抗扰控制过程中的参数 k_p 、 k_d 对控制精度起着关键作用, 而通常这两个参数取值由经验得到, 大部分情况下需要手动调试得到尽可能满意的效果, 但无法验证这样得到的参数是否达到最佳。文献 [13] 在 1997 年首次提出差分进化算法 (DE, differential evolution)。随后学者们将差分进化算法与其 PID、神经网络等算法相结合进行参数优化, 使差分进化算法得到进一步发展。文献 [14] 利用差分进化的思想改进智能人工蜂群进化算法, 加快了寻优收敛速度, 同时提高了寻优精度。在处理不同的优化问题时, 差分进化参数通常也不同, 因此文献 [15] 对差分进化算法进行自适应动态调节, 在伺服电机驱动光盘负载的控制中效果显著。

针对百叶对室内照度、温度以及建筑能耗的影响, 大部分研究仅关注于百叶参数、百叶位置的设计^[16-19], 对某一个时间段内百叶在外部干扰下的自动控制研究较少。本文采用自抗扰控制技术实现对带动百叶窗的伺服电机进行动态控制。为了使百叶角度随时间连续变化, 对输入信号安排了过渡过程, 引入扩张状态观测器来观测扰动并加以补偿, 以提高系统的自抗扰性能。

在自抗扰控制的基础上引入差分进化思想进行参数寻优。对自抗扰控制的非线性跟踪部分的 PD 控制参数 k_p 、 k_d 进行动态优化, 提出基于差分进化的自抗扰控制算法 (DE-ADRC), 并将该算法应用于百叶窗伺服电机的自动控制中, 与系统在 PID、ADRC 算法下的控制效果进行对比。

百叶伺服电机在 DE-ADRC 算法控制下实现扰动补偿的同时, 可以相对准确地跟踪输入信号的过渡过程。进一步, 为了验证所设计的 DE-ADRC 算法下系统的鲁棒性, 本文利用蒙特卡罗分析法 (Monte Carlo method) 设计了系统性能指标, 建立伺服系统概率模型。

1 伺服电机模型

伺服系统的电机和动力学方程如下所示。

$$\text{电机: } iR + Li = u_a - Ce\bar{\theta}_m - K_i i \quad (1)$$

$$T_m = iK_m \quad (2)$$

$$J_m \bar{\theta}_m = T_m - b_m \bar{\theta}_m - K_L (\theta_m - \theta_L) \quad (3)$$

$$\text{负载: } J_L \bar{\theta}_L = T_{mL} - b_L \bar{\theta}_L \quad (4)$$

$$K_L (\theta_m - \theta_L) - T_{mL} = 0 \quad (5)$$

式中, i 和 R 分别为电枢的电流和电阻, θ_m 和 θ_L 分别为电机和负载的转角; $\bar{\theta}_m$ 和 $\bar{\theta}_m$ 分别为伺服电机转角的角速度和加速度; J_m 和 J_L 分别为电机和负载的转动惯量; b_m 和 b_L 分别为电机和负载的粘性阻尼系数; K_L 为电机和负载之间的耦合刚度系数; T_{mL} 为负载端输出力矩。

伺服系统运行进程中的摩擦过程较复杂, 通常选用式 (6) 描述的 LuGre 摩擦模型:

$$g(\bar{\theta}_m) = F_c + (F_s - F_c) e^{-(v_s/V_s)^2} + \alpha \bar{\theta}_m \quad (6)$$

式中, F_c 为库伦摩擦, F_s 为静摩擦, V_s 为电机切换速度, α 为黏性系数。

2 非线性自抗扰控制

典型非线性自抗扰控制器一般由微分跟踪器 (N-LTD)、非线性误差补偿控制率 (N-LPD) 以及扩张状态观测器 (N-LESO) 三部分组成。自抗扰控制系统结构如图 1 所示。

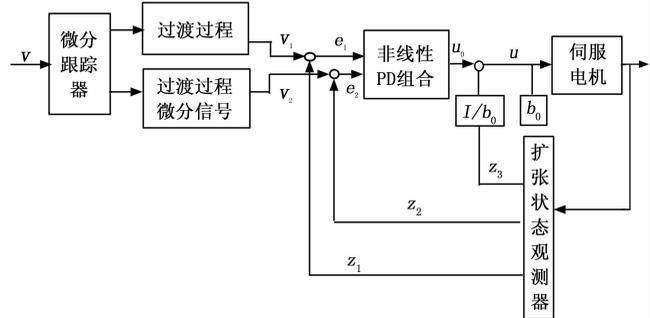


图 1 非线性自抗扰控制系统框图

2.1 非线性微分跟踪器 (N-LTD)

非线性微分跟踪器可根据被控对象的状态和能力以离散形式给输入信号安排一个较为合理的过渡过程 x_1 , 并给出该过渡过程的微分信号 x_2 , 如式 (7) 所示, 以使控制过程处于稳定调节状态。

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + h \cdot x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h \cdot f_{st}(x_1(k) - v(k), x_2(k), \delta, h_0) \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$f_{st}(x_1 - v, x_2, \delta, h_0) = \begin{cases} -r \cdot a, & |a| \leq d; \\ -r \cdot \{\text{sign}(a)\}, & |a| > d. \end{cases} \quad (8)$$

$$a = \begin{cases} x_2 + \frac{c}{h_0}, & |c| < d_0; \\ x_2 + \frac{\text{sign}(c)(a_0 - d)}{2}, & |c| > d_0. \end{cases} \quad (9)$$

式中, h 为采样周期; $v(k)$ 为第 k 时刻的输入信号; r 为决定跟踪快慢的参数, x_1 为 $v(k)$ 的跟踪信号, x_2 为 x_1 的导数, 即 x_1 的微分信号, h_0 为噪声滤波效应, 为了使系统获得满意的性能, 可以对 δ 和 h_0 进行调整。

2.2 非线性扩张状态观测器 (N-LESO)

扩张观测器是自抗扰控制的核心部分, 用于观测外部干扰以使控制器提前进行扰动补偿。

对于如下控制对象:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ x_2 = f(x_1, w(t), t) + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (10)$$

该被控对象模型中, $w(t)$ 表示未知的干扰量, bu 为已知部分。扩张状态观测器为:

$$\begin{cases} \dot{e} = z_1 - y \\ z_1 = z_2 - \beta_1 e \\ z_2 = z_3 - \beta_2 \cdot fal(e, \alpha_1, \delta) + bu \\ z_3 = -\beta_3 \cdot fal(e, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (11)$$

一般情况下, α_1, α_2 为固定值, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 均大于零, 设 $\alpha_1 = 0.5; \alpha_2 = 0.2$ 。为了抑制信号抖动需引入饱和函数 $fal(e, \alpha_2, \delta)$, 可表示为式 (12)。

$$fal(e, \alpha_2, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{1-\alpha_2}}, & |e| \leq \delta \\ |e|^{\alpha_2} \cdot \text{sign}(e), & |e| > \delta \end{cases} \quad (12)$$

2.3 非线性误差补偿控制率 (N-LPD)

非线性误差补偿控制率功能: 将微分跟踪器得到的跟踪信号以及信号的微分与扩张观测器输出进行比较, 进而对控制系统进行扰动补偿。数学表达式如下:

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - z_2 \\ u_0 = \beta_1 \cdot fal(e_1, \alpha_1, \delta) + \beta_2 \cdot fal(e_2, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $0 < \alpha_1 < 1 < \alpha_2; \beta_1 = k_p, \beta_2 = k_d, e_1$ 为系统输入信号与系统实际输出之差; e_2 为输入信号的微分与被控系统实际输出的微分之差。

3 基于差分进化算法的自抗扰参数整定

在实际应用过程中, 当确定选用 PD 控制时, 不同的系统由于应用环境不同, 其参数 k_p 和 k_d 也存在差异, 要么为某一固定值, 要么不断地人为手动改进, 但却无法判断是否达到了最佳控制效果。所以需要参数 k_p, k_d 寻优。由于参数 k_p, k_d 的变化对系统的整体响应性能之间存在着耦合关系, 调节 k_p 是为了加快系统的响应速度, 而当 k_d 过大时, 超调增大, 系统响应较慢, 所以需要整定参数 k_p, k_d , 在保证响应速度快且同时需超调量小。

由于伺服电机具有非线性和强耦合性, 而且控制百叶窗的伺服电机的控制受外部未知干扰因素较多, 包括室外气象参数、建筑外围护结构热工性能、室内建筑设备运行状态等等。因此, 为了获得较为满意的跟踪效果和动态特

性, 将误差的绝对值和时间积分性能作为最小代价函数。在代价函数中引入控制输入的平方项来避免发生控制过度, 同时积分项引入权值参数 w_1, w_2 , 如式 (15) 所示。

$$J = \int_0^{\infty} (w_1 |e(t)|) + w_2 u^2(t) dt \quad (14)$$

式 (14) 中, $e(t)$ 为动态系统误差; $u(t)$ 为控制输出。为了提高其工作效率, 避免或尽量减少电机控制过程中的超调量, 本文引入惩罚机制, 将超调量的平方项作为指标项。对代价函数加以修改, 如式 (15) 所示:

$$J = \begin{cases} \int_0^{\infty} (w_1 |e(t)|) + w_2 u^2(t) dt & \text{if } e(t) \geq 0 \\ \int_0^{\infty} (w_1 |e(t)|) + w_2 u^2(t) dt + w_3 e^2(t) dt & \text{if } e(t) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

利用差分进化算法对参数 k_p, k_d 寻优步骤如下:

- 1) 首先确定参数 k_p, k_d 的大致范围并随机选取 M 个个体;
 - 2) 将随机产生的 M 个个体作为初始化种群 $h(0)$;
 - 3) 对 $h(0)$ 中的个体进行解码, 初始化差分进化参数, 求代价函数 J ;
 - 4) 对种群个体进行编译、交叉、选择操作。若满足终止条件, 则进行步骤 5), 若不满足, 继续执行步骤 4)。
 - 5) 代价函数优化完毕, 寻得最优解, 进化结束。
- 基于差分进化算法的自抗扰控制原理如图 2 所示。

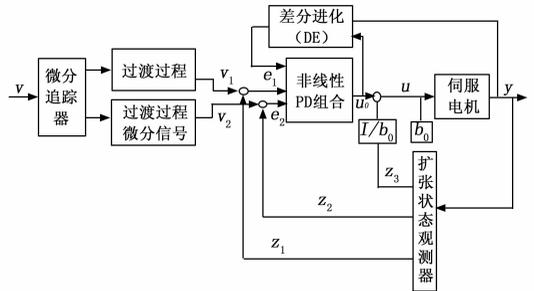


图 2 基于差分进化的自抗扰控制原理的框图

参数 k_p, k_d 的整定由伺服电机的输出值和非线性控制率决定, 能够在系统运行中实现动态优化, 结合扩张状态观测器对扰动进行观测可以有效改善系统的控制性能。

工程中要根据实际情况来确定输入指令函数, 而不是简单地采用常规的阶跃信号或正弦函数信号。本文研究的伺服电机用于百叶窗角度控制工程中, 将对百叶窗角度的控制转化成对电机的角度控制。假设在西安典型夏季气象条件下, 得到早上 8:00 到下午 18:00 角度指令信号, 如图 3, 经过 6 次多项式曲线拟合得到几乎近似于输入指令的多项式函数如式 (16)。

$$y_d = -0.0002t^6 + 0.0136t^5 - 0.178t^4 - 0.0354t^3 + 10.411t^2 - 35.089t + 90.422 \quad (16)$$

将式 (16) 作为实际指令信号输入控制系统。利用设

计的 DE-ADRC 算法对电机角度实现随时间变化的连续控制。

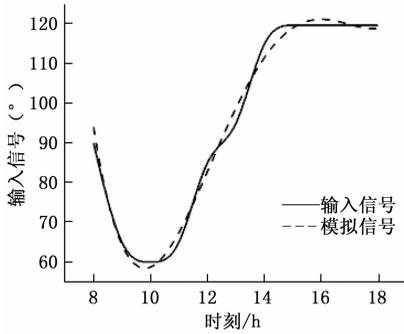


图 3 输入信号及其拟合信号

4 仿真实验与结果分析

根据选用伺服电机的规格, 它的参数设置如下: $R=6.27\Omega$, $K_m=6\text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$, $C_e=1.3\text{ V}(\text{rad}/\text{s})$, $J=0.6\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。式 (6) 中的摩擦力的相关参数设置如下: $\alpha=0.03$, $F_c=0.31$, $F_s=0.36$, $V_s=0.01^{[20]}$ 。差分进化算法参数取值如下: 变异因子 $F=0.5$, 交叉因子 $CR=0.9$, 种群规模取 30, 最大迭代次数取 50。参数 k_p 的取值范围是 $[0, 20]$, k_d 的取值范围是 $[0, 1]$, 取 $\omega_1=0.999, \omega_2=0.9, \omega_3=0.001$ 。为了避免差分进化过程参数范围偏差过大, 本文先根据经验, 取 $k_p=9.09, k_d=0.08$, 假设在时刻 12:00 时天气骤变, 有大风出现, 相当于系统存在一定的扰动, 参数整定前后系统的响应曲线如图 4 所示。

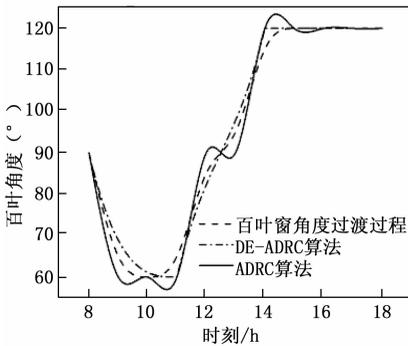


图 4 参数整定前后系统响应曲线

图 4 表明当系统存在扰动时, 经过差分进化对参数 k_p 、 k_d 整定后, 其控制性能明显有所改善, 跟踪误差显著降低, 在 DE-ADRC 算法控制下, 系统能较好地跟踪百叶角度的过渡过程, 系统稳定性更加优异。经过 50 次迭代进化, 最终整定结果为: $k_p=5.4323, k_d=0.0896$, 代价函数整定结果为 $J=33.0727$, 代价函数结果表示了 50 次迭代中实际值与设定值的误差和, k_p, k_d, J 的整定过程如图 5、图 6 所示。

代价函数 J 、比例调节系数 k_p 、微分调节系数 k_d 的具体优化过程如表 1。图 5、图 6 表明在整个优化过程中, 参数 k_p, k_d 和代价函数 J 的波动范围较小, 迭代次数到 15 代时,

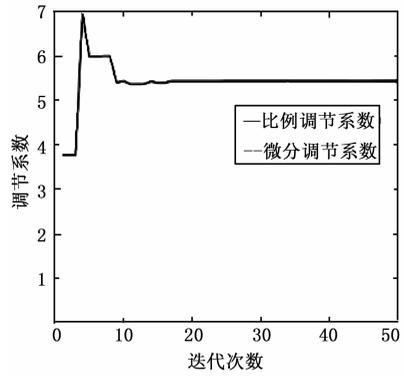


图 5 比例调节系数和微分调节系数的优化过程

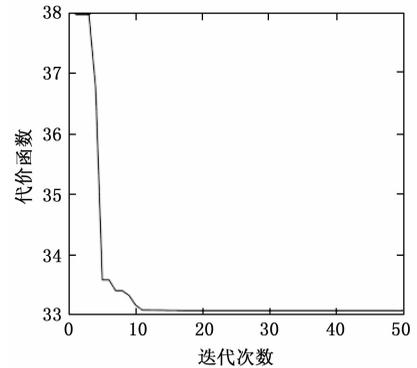


图 6 代价函数 J 的优化过程

优化基本结束。根据表 1 中的具体数据, 当迭代次数达到 48 次时, 代价函数 J 和微分调节系数 k_d 不再发生变化, 趋于稳定, 当迭代到 49 次时, 参数 k_p 不再发生变化。

为了探究控制算法的控制性能, 分析后得到了 PID 算法、ADRC 算法、DE-ADRC 算法在 1 s 内的跟踪误差, 对比如图 7。从误差变化趋势可以看出, 在响应时间达到 0.5 s 时, 3 种算法均能使系统误差得到有效控制, 逐步趋于稳定。3 种算法的平均误差分别为 0.39° 、 0.27° 和 0.18° , 均方根误差分别为 0.84° 、 0.60° 和 0.38° 。经过差分进化对参数进行整定后, 系统响应幅度变小, 能够更快地趋于零。DE-ADRC 算法较 PID 算法、ADRC 算法跟踪误差平均值分别降低了 54% 和 49%。跟踪误差降低明显, 证明了 DE-ADRC 算法对 ADRC 算法的参数整定效果起到了积极作用, 提升了算法的控制性能, 验证了所设计算法的可行性。

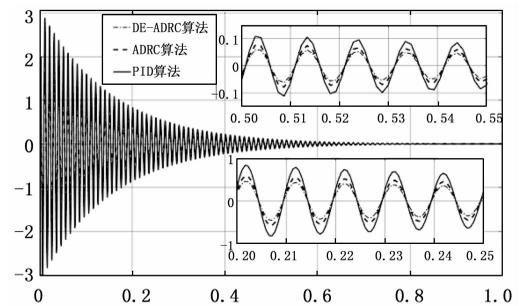


图 7 PID、ADRC 以及 DE-ADRC 算法的跟踪误差

表 1 优化代价函数 J 、比例和微分调节系数 k_p 、
微分调节系数 k_d 的具体变化过程

迭代次数	代价函数 J	比例调节系数 k_p	微分调节系数 k_d
1	37.973 9	3.766 1	0.065 2
2	36.762 1	6.950 1	0.129 8
3	36.572 7	7.974 1	0.094 2
4	33.392 7	5.985 1	0.100 8
5	35.313 2	5.390 6	0.083 8
6	35.150 4	5.428 1	0.092 4
7	33.071 4	5.356 4	0.087 7
8	33.070 9	5.357 1	0.087 8
9	33.066 9	5.418 1	0.090 1
10	33.066 3	5.384 1	0.088 4

48	33.062 7	5.431 7	0.089 5
49	33.062 7	5.432 3	0.089 5
50	33.062 7	5.432 3	0.089 5

5 系统鲁棒性的蒙特卡罗分析

控制系统设计的最基本要求就是鲁棒性应较强。鲁棒性反映了被控对象在外界环境干扰下保持自身稳定性和可靠性的能力，鲁棒性越强，系统就越稳定，它决定着该控制系统的实际应用效果^[21-22]。蒙特卡罗分析方法是以前大数定律作为基础，通过对研究对象的随机采样进行统计学模拟的方法，可准确模拟存在不确定因素的实际系统的指标状态，算法简单，计算速度快，可用于系统鲁棒性分析，被广泛应用在金融学、系统工程学、信息科学领域^[23-24]。本文将建立伺服电机系统的蒙特卡罗模型，通过求解来分析指标状态分布，揭示系统鲁棒性。

5.1 伺服电机的蒙特卡罗概率模型及求解

设置伺服电机系统的调节时间 T 、超调量 E 以及误差属性指标 IAE 等 3 个估计量。 IAE 定义如式 (17)：

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (17)$$

仿真时，对这 3 个指标变量进行随机抽样，当样本数 N 趋近于 ∞ 时，得到估计量的数学期望值，分别如式 (18) ~ (20)：

$$\overline{E(T)} = \sum_i^N (\frac{1}{N}Ti) \quad (18)$$

$$\overline{E(E)} = \sum_i^N (\frac{1}{N}Ei) \quad (19)$$

$$\overline{E(IAE)} = \sum_i^N (\frac{1}{N}(IAE)i) \quad (20)$$

2) 随后对得到的 3 个期望值进行收敛，由于外部干扰的存在，收敛过程中可能出现偏差 ϵ ，由误差系数 η 和方差 σ 求得，如下所示：

$$\epsilon = E(T)\eta \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (21)$$

以调节时间 T 为例，求解得到调节时间的状态分布如下：

$$p = (TK | Z1;K) \quad (22)$$

当样本数据 T 足够大时，状态分布无限接近实际样本分布。同理，超调量、误差性能指标的状态分布为：

$$p = (EK | Z1;K) \quad (23)$$

$$p = (IAEK | Z1;K) \quad (24)$$

5.2 不确定因素分析

为了验证本文提出的 DE-ADRC 算法的鲁棒性与稳定性，并与 PID、ADRC 两种算法进行对比，首先需要明确影响伺服电机系统运行的不确定干扰因素，才能更加真实地模拟出系统的概率模型。

本文以式 (10) 为研究对象，将控制百叶窗的伺服电机系统的不确定因素总结为以下几点：

1) 室外天气状况的实时变化，尤其是当天气骤变时，若仍然采取先前确定的控制律则显然就达不到预期的控制效果；

2) 伺服电机老化会逐渐加剧，而反映真实的情况的摩擦模型却难以建立；

3) 室内人员的流动率以及设备的使用情况均会不同程度地影响室内温度，为改善室内热环境需要根据实际情况随时调整电机的控制律来调节百叶角度。

4) 电源电压的不稳定性会影响伺服电机与负载的正常运行。

5) 无法获悉因电机内部材料不同而在其运行时发热所对自身产生的不利影响。

5.3 蒙特卡罗系统鲁棒性仿真

这些不确定因素将被考虑到蒙特卡罗模拟中。经过 400 次蒙特卡罗算法进行仿真后，其结果如图 8 (a) ~ (c) 所示。一般，若调节时间、超调量、误差属性指标的数值越小，则系统的控制效果越优秀，图中点越密集，说明控制算法鲁棒性和抗干扰能力越强，控制效果就更好。

由图 8 (a) ~ (c) 可见，DE-ADRC 算法结果的聚集性最强，超调量、调节时间和 IAE 三个指标数值最小，ADRC 算法次之，PID 算法的聚集性最差、指标值最大。这说明伺服系统在 DE-ADRC 算法控制下受干扰影响最小，系统的稳定性最强。也就是说，本文提出的 DE-ADRC 算法在鲁棒性和系统动态响应方面有着明显的优势，能更好的控制百叶窗。

6 结束语

本文针对玻璃幕墙百叶角度控制中伺服电机的准确模型并不完全已知，且可能存在气象条件变化等不确定外部干扰影响，提出一种基于差分进化算法的伺服电机自抗扰控制系统，研究对象为二质量伺服电机系统，通过引入摩擦模型，对自抗扰控制器的 PD 控制部分进行参数的动态优化，相比较于 PID 算法、ADRC 算法，参数整定后系统的

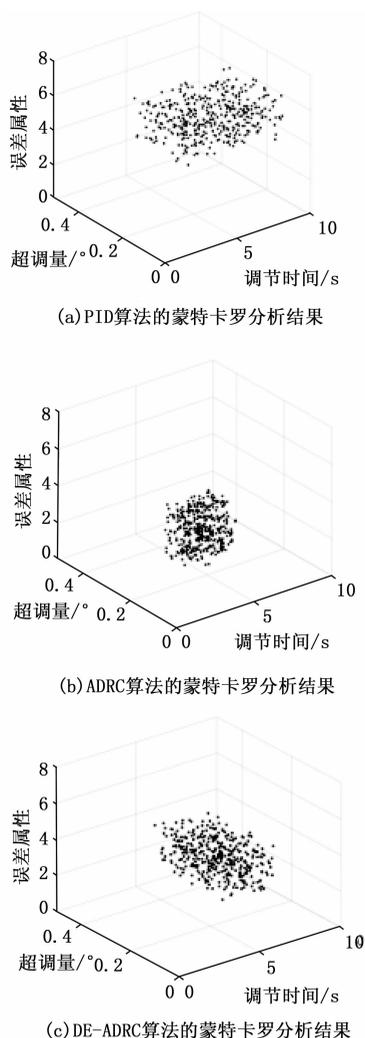


图 8 蒙特卡罗分析结果

信号跟踪误差降低了 54% 和 49%，证明了 DE-ADRC 算法的可靠性。

为了验证优化后系统的控制性能，对伺服系统设置了 3 个性能指标，采用蒙特卡罗算法对伺服控制系统进行鲁棒性仿真，总结了不确定干扰因素，并将其考虑到仿真模型中，分析得到本文提出的 DE-ADRC 算法的 3 个蒙特卡罗指标整体低于，PID 算法、ADRC 算法，鲁棒性和系统抗干扰能力更强。

综上，控制器的设计对系统性能影响较大，应根据系统所在的实际运行环境，尽可能全面地考虑一些不确定因素来设计符合情况的控制器，本文提出的 DE-ADRC 算法对自抗扰控制技术在幕墙百叶控制工程中具有实际意义。

参考文献:

[1] CHEN P C, LUO Y. Optimal fractional-order active disturbance rejection controller design for PMSM Speed Servo system [J]. Entropy 2021, (23): 262-281.

[2] 孙雪云, 李兵强, 刘冬利, 等. 一种用于舰载无人机通信的天

线伺服系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (12): 127-129.

- [3] 扈宏杰, 侯 腾, 林大鹏. 基于 DSP+FPGA 的 PMSM 控制系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (11): 3654-3656.
- [4] CHO Byung-Geuk, HONG Chanook, LEE Jeongjoon. Non-cascaded position controllers for servo motor drives [J]. Journal of Power Electronics, 2021 (3): 1-11.
- [5] HAN J Q. Auto-disturbances-rejection controller and its applications [J]. Control and Decision, 1998, 13 (1): 19-23.
- [6] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection Control. IEEE Transactions on Industrial Electronics [J]. 2009, 56 (3): 900-906.
- [7] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [A]. Proceedings of American Control Conference. Denver, CO, USA; IEEE [C]. 2003: 4989-4996.
- [8] TANG Decui, GAO Zhiqiang, ZHANG Xuhong. Design of predictive active disturbance rejection controller for turbidity [J]. Control Theory & Applications, 2017, 34 (1): 101-108.
- [9] 方靖荃, 邓文翔, 姚建勇, 等. 电机伺服系统快速自适应抗扰控制 [J]. 西安交通大学学报, 2021 (6): 1-9.
- [10] 赵天烽, 程 赟, 华 亮, 等. 基于定量反馈理论的时滞系统自抗扰控制参数整定 [J]. 控制理论与应用, 2021 (5): 578-586.
- [11] 刘朝华, 张英杰, 章 兢, 等. 基于免疫双态微粒群的混沌系统自抗扰控制 [J]. 物理学报, 2011, 60 (1): 789-797.
- [12] HOU H, YU X, XU L, et al. Finite-time continuous terminal sliding mode control of servo motor systems [J]. Transactions on Industrial Electronics [J]. 2020 (7): 5647-5656.
- [13] STORN R, PRICE K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11 (4): 341-359.
- [14] 封 硕, 刘 琨. 融合差分进化思想的自适应人工蜂群算法 [J]. 郑州大学学报 (理学版), 2021 (3): 72-78.
- [15] 郝 旺, 王占学, 张晓博, 等. 基于自适应差分进化算法的变循环发动机模型求解方法研究 [J]. 推进技术, 2021, 42 (9): 2011-2021.
- [16] GROBMAN Y J, CAPELUTO I G, AUSTERN G. External shading in buildings: comparative analysis of daylighting performance in static and kinetic operation scenarios [J]. Architectural Science Review, 2016, 60 (2): 126-136.
- [17] FERNANDES L L, LEE E S, THANACHAREONKIT A, et al. Potential annual daylighting performance of a high-efficiency daylight redirecting slat system [J]. Building Simulation, 2021 (14): 495-510.
- [18] DONGSU Kim, SAM J. Cox, Heejin Cho and Jongho Yoon. Comparative investigation on building energy performance of double skin façade (DSF) with interior or exterior slat blinds [J]. Journal of Building Engineering, 2018 (20): 411-423.

- [19] STAZI F, et al. Indoor air quality and thermal comfort optimization in classrooms developing an automatic system for windows opening and closing [J]. Energy and Buildings, 2017 (7): 732-746.
- [20] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 (第四版) [M]. 北京: 北京工业出版社, 2016.
- [21] 陈前, 廖继红, 赵文祥, 等. 低成本辅助凸极式辐向永磁电机的鲁棒性优化设计 [J]. 中国科学: 技术科学, 2021 (6): 659-672.

- [22] LI P, ZHU G, ZHANG M. Linear Active Disturbance Rejection Control for Servo Motor Systems With Input Delay via Internal Model Control Rules [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021 (68): 1077-1086.
- [23] 刘鹏, 刘凯, 周愉. 基于 Wi-Fi 和自适应蒙特卡洛的机器人定位方法的研究 [J]. 计算机应用与软件, 2021, 38 (4): 75-81.
- [24] RASHKI M. The Soft Monte Carlo Method [J]. Applied Mathematical Modelling, 2021 (94): 558-575.

(上接第 87 页)

实际距离横向相差 0.2 cm, 纵向相差 0.2 cm; C 点与实际距离横向相差 0.2 cm, 纵向相差 0.21 cm; D 点与实际距离横向相差 0.2 cm, 纵向相差 0.6 cm; E 点与实际距离相差 0.6 cm. 使用嵌入式技术与实际距离横向最大相差 0.01 cm, 纵向相差 0.01 cm.

通过上述对比内容可知, 使用嵌入式技术设计风洞模拟测控系统, 系统在静风状态和吹风状态下的控制误差均较小, 控制效果较好. 由于嵌入技术本身的优势, 使得它在风洞测控领域得到了迅速的发展. 嵌入式组件广泛应用于风洞运行状态控制、风洞数据采集等领域, 本系统采用嵌入式控制方式, 有效地解决了强干扰环境下控制效果差的问题.

5 结束语

本文设计了基于嵌入式技术的风洞模拟测控系统, 实验表明, 该系统在静风状态和吹风状态下的控制误差均较小, 在不同的仿真条件下, 该系统均取得了较好的控制效果. 所设计系统可用来模拟飞行器或实体周围气体的流动情况, 量度气流对实体的作用效果, 为飞行器研制工作提供一定的技术支持.

尽管系统的各项指标都达到了设计要求, 但各项指标还无法达到最优, 为此需要进一步进行优化设计. 基于 PID 控制算法实现测控 PID, 再进行优化, 部分控制点采用模糊 PID 控制, 增强 PID 控制环境的适应性, 是一种更有效优化方法.

参考文献:

- [1] 陈彬, 姚裕, 易弢, 等. 基于回流多风扇主动控制引导风洞的风场模拟试验 [J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51 (3): 374-381.
- [2] 李勇, 李国文, 王为铭, 等. 亚音速可调气流温度风洞试验台设计 [J]. 中国机械工程, 2019, 30 (12): 1441-1445.
- [3] 郑朝荣, 张侃, 刘昭, 等. 千米高度偏转风场风洞模拟技术研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51 (12): 77-84.
- [4] 董金刚, 金佳林, 李广良, 等. 旋转导弹风洞动态测力试验技术研究 [J]. 实验流体力学, 2020, 34 (4): 83-88.

- [5] 罗万清, 李海燕, 梁剑寒, 等. 基于 Euler-Lagrange 模型的电弧风洞喷管两相流模拟 [J]. 应用数学和力学, 2020, 41 (1): 16-26.
- [6] 张石玉, 赵俊波, 付增良, 等. 类 F-16 飞行器风洞虚拟飞行试验研究 [J]. 实验流体力学, 2020, 34 (1): 51-56.
- [7] 郁文山, 金志伟, 刘龙兵, 等. 风洞主排气阀电液伺服系统仿真研究与设计 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (16): 135-138.
- [8] 刘骏, 王晓光, 王宇奇, 等. 风洞试验绳牵引并联支撑系统自适应滑模控制 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36 (9): 1477-1485.
- [9] 陈旦, 杨孝松, 李刚, 等. 连续式风洞总压和调节阀相关性研究及其应用 [J]. 西北工业大学学报, 2020, 38 (2): 325-332.
- [10] 张伟, 高荣, 张双喜, 等. 0.3 m 低温风洞液氮供给系统研制 [J]. 航空动力学报, 2020, 35 (5): 118-126.
- [11] 荣祥森, 邓章林, 贾霜, 等. 基于 PROFINET 和 VXI 总线的 1.2 m 风洞测控系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (5): 87-90, 95.
- [12] 于璐. 基于分布式架构及 PAC 技术的风洞测试及控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 15-20.
- [13] 谭兴强. 直升机尾桨风洞实验支撑装置液压系统设计 [J]. 机械设计与制造, 2020, 358 (12): 90-93.
- [14] 李令令, 孟庆林, 张磊. 基于气候风洞的大型太阳辐射模拟系统研究 [J]. 建筑节能, 2020, 48 (3): 81-85.
- [15] 杨阳, 杨超, 吴志刚. 基于舵机动态特性测试的阵风减缓控制系统设计 [J]. 振动与冲击, 2020, 39 (4): 111-117.
- [16] 周猛, 付东翔. 基于回归分析法的汽车散热试件风洞测控系统 [J]. 电子测量技术, 2019, 42 (15): 93-97.
- [17] 罗昌俊, 马永一, 明丽洪. 基于隔离耦合的风洞群集中监测系统设计与实现 [J]. 测控技术, 2019, 38 (11): 29-32.
- [18] 贾青, 陈佳萍, 杨志刚. 基于气动减阻和散热需求的主动格栅优化设计 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (2): 110-121.
- [19] 熊建军, 倪章松, 李显, 等. 防冰总压/静压探针结构及控制系统设计与应用 [J]. 测控技术, 2019, 38 (4): 137-142.
- [20] 张彦军, 段卓毅, 雷武涛, 等. 超临界自然层流机翼设计及基于 TSP 技术的边界层转捩风洞试验 [J]. 航空学报, 2019, 40 (4): 134-148.