

基于 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 的永磁同步电机直接转矩控制

易灵芝^{1,2}, 张成董^{1,3}, 冯江¹

(1. 湘潭大学信息工程学院, 湖南 湘潭 411105;

2. 湖南省“风电装备与电能变换”2011 协同创新中心, 湖南 湘潭 411105;

3. 湖南省多能源协同控制技术工程研究中心, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 针对传统自抗扰控制器(ADRC)中扩张状态观测器(ESO)的观测扰动项较大,提出一种基于改进核函数极限学习机(KELM)优化自抗扰控制器的永磁同步电机直接转矩控制方法。采用混沌分子动理论优化算法(CKMTOA)优化 KELM 模型的核参数和惩罚系数,得到 CKMTOA-KELM 最优回归模型;CKMTOA 通过引入混沌搜索防止算法陷入局部最优,采用自适应惯性权重因子提高算法的收敛速度。最后,将该模型嵌入 ADRC 中对其进行优化及分析,以提高系统动态响应速度和抗干扰能力,增强系统鲁棒性。仿真实验结果验证了该方法的有效性和可行性。

关键词: 永磁同步电机;直接转矩控制;ADRC;混沌分子动理论优化算法;KELM

DOI: 10.12067/ATEEE1805042

文章编号: 1003-3076(2019)04-0013-09

中图分类号: TM351

1 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)具有体积小、效率高、转动惯量低、电磁转矩大、控制方便等优点,随着磁性材料、电力电子器件、控制理论的发展,永磁同步电机驱动系统广泛应用于电动和混合动力电动汽车等^[1]。电动汽车运行情况复杂多样,不仅要求电机高效和可靠,且要求电机驱动系统拥有较强的抗干扰能力、较快的动态响应速度和较强的鲁棒性等能力^[2]。永磁同步电机所带的负载转矩、转动惯量和摩擦系数的变化(视为扰动)都会对系统高精度控制造成不良影响^[3]。永磁同步电机直接转矩控制具有控制结构简单和动态响应速度快等优点,控制效果好^[4,5]。

由于转子转速和定子电流的非线性耦合使得系统具有很强的非线性,特别是整个驱动系统存在不确定性时,永磁同步电机调速系统难以达到高精度控制性能^[6]。传统直接转矩控制(Direct Torque Control, DTC)中,速度环采用传统 PI 控制器,这种

线性组合控制很难满足实际工程中非线性系统对高性能控制的要求;当被控系统处于强干扰的环境时,传统 PI 控制器难以达到高精度控制的效果^[7,8]。学者韩京清融合 PI 控制优点并克服其不足提出自抗扰控制器(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)技术^[9],能实时估计出控制系统扰动值,实现自动补偿,相比于传统 PI 控制器可提高控制系统的动态响应速度,增强系统的抗干扰能力和稳定性^[10,11]。但是传统 ADRC 中扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)的观测扰动项较大,导致观测精度较低,进而对系统的跟踪性能较差。

基于分子动理论相关理论,2013 年 C. D. FAN 学者利用物理规律优化算法优点,提出分子动理论优化算法(Kinetic Molecular Theory Optimization Algorithm, KMTOA)的新型全局优化算法,能较好地兼顾收敛性和较强的全局搜索能力^[12]。2012 年, G. B. Huang 等学者利用核映射替代基本极限学习机(Extreme Learning Machine, ELM)中的随机映射,提出核函数极限学习机(Kernel Extreme Learning Ma-

收稿日期: 2018-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(61572416)、湖南省自科基金株洲联合基金资助项目(2016JJ5033)

作者简介: 易灵芝(1966-),女,湖南籍,教授,博士,研究领域为交流调速与电力电子装置;

张成董(1988-),男,山东籍,硕士研究生,研究领域为电力电子与电力传动。

chine, KELM)。通过大量对比实验验证得出, KELM 相比于传统 ELM 和最小二乘支持向量机 (Least Squares Support Vector Machine, LSSVM) 等具有更良好、更稳定的泛化性能^[13-15]。KELM 已在分类和回归、风电功率区间预测、电力系统经济调度和基于视频的图像处理领域应用广泛^[16,17], 但其性能易受惩罚系数和核参数的影响。

综上, 本文改进了 KMTOA 算法, 提出混沌分子动理论优化算法 (Chaotic Kinetic Molecular Theory Optimization Algorithm, CKMTOA), 并进一步提出一种基于 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 的永磁同步电机直接转矩控制方法。利用 CKMTOA 对 KELM 参数进行优化, 得到 CKMTOA-KELM 最优回归模型, 并将该最优回归模型嵌入 ADRC 控制器中对其进行优化, 以提高 ADRC 的估测精度和控制系统的动态响应速度。MATLAB 仿真及实验结果表明, 相比传统 PI 控制器和 ADRC 控制器, 该方法有效地降低了电机参数变化和负载扰动对系统的影响, 提高系统抗干扰能力, 增强系统鲁棒性。

2 基于 ADRC 控制器的永磁同步电机直接转矩控制

2.1 传统永磁同步电机直接转矩控制

永磁同步电机直接转矩控制基于定子磁场定向, 把电磁转矩和定子磁链作为控制量来实现控制, 具有控制结构简单和动态响应速度快等优点, 其应用前景广泛^[18]。PMSM 传统直接转矩控制系统中, 根据电机转速误差值运用 PI 速度控制器得到转矩给定值 T_e^* , T_e^* 与 PMSM 实际转矩 T_e 比较后经转矩滞环比较器得转矩控制信号 ΔT 。定子磁链给定信号 $|\psi_s^*|$ 和磁链估计值幅值 $|\psi_s|$ 比较后经磁链滞环比较器得到磁链控制信号 $\Delta\psi$ 。 ΔT 、 $\Delta\psi$ 和定子磁链当前位置信号 S_ψ 经过开关电压矢量选择表确定当前开关电压矢量, 进而控制逆变器来驱动 PMSM。图 1 为永磁同步电机传统直接转矩控制系统框图。

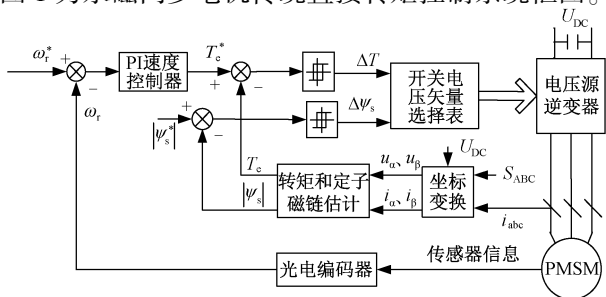


图 1 永磁同步电机传统直接转矩控制系统
Fig. 1 Traditional direct torque control system for PMSM

2.2 基于 ADRC 控制器的永磁同步电机直接转矩控制

ADRC 控制器主要由跟踪微分器 (Tracking Differentiator, TD)、非线性状态误差反馈控制率 (Non-linear State Error Feedback, NLSEF) 和 ESO 三部分组成^[19]。TD 给出合理的控制信号, 可提高系统的动态响应速度和稳定性; ESO 是自抗扰控制器的核心控制部分, 它通过被控对象的输入和输出来实时地估算出系统所受的扰动值, 并将这些扰动值实时地补偿到系统中, 从而达到高精度的控制效果; NLSEF 能使被控对象的误差以指数的形式减小^[20]。

PMSM 电磁转矩 T_e 方程为:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_\alpha i_\beta - \psi_\beta i_\alpha) \quad (1)$$

PMSM 机械运动方程为:

$$T_e - T_L = J \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_r}{n_p} \right) + B \left(\frac{\omega_r}{n_p} \right) \quad (2)$$

式中, ψ_α 、 ψ_β 分别为定子磁链的 α 、 β 轴分量; i_α 、 i_β 分别为定子电流空间矢量的 α 、 β 轴分量; n_p 为电机极对数; T_L 为负载转矩; J 为电机转动惯量; B 为粘滞摩擦系数; ω_r 为电机转速。

由 PMSM 机械运动方程式 (2) 可以得出, T_L 、 J 、 B 参数的变化都能对系统控制精度造成较大影响, 把这种影响称为扰动。基于 ADRC 控制器原理, 永磁同步电机的转速控制系统的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_r = w(t) + bT_e \\ y = \omega_r \end{cases} \quad (3)$$

式中, $w(t) = -(n_p T_L + B \omega_r) / J$ 为系统所受的扰动; bT_e 为系统控制量, b 取为 n_p / J 。因为在 PMSM 直接转矩控制系统中, 速度外环的输出信号是电磁转矩的给定参考值, 因此, 式 (3) 中 T_e 应是电磁转矩给定参考值 T_e^* 。 $w(t)$ 为系统中非线性很难确定的因素, ADRC 无需知道 $w(t)$ 的具体表达式, 就可以估计出 $w(t)$ 随时间变化量 $a(t)$, 并将 $a(t)$ 实时地补偿到控制系统中。

以电机的转速给定参考值 ω_r^* 和实际的转速值 ω_r 为输入信号, 以电磁转矩给定参考值 T_e^* 作为输出信号, 设计出基于 ADRC 速度调节控制器系统, 其系统框图如图 2 所示。

分析式 (3), 基于 ADRC 控制器的永磁同步电机直接转矩控制系统中 TD 数学模型为:

$$\dot{v}_1 = -f_1(v_1 - \omega_r^*, r, T) \quad (4)$$

式中, v_1 为 ω_r^* 的跟踪值; r 为跟踪速度因子; T 为采

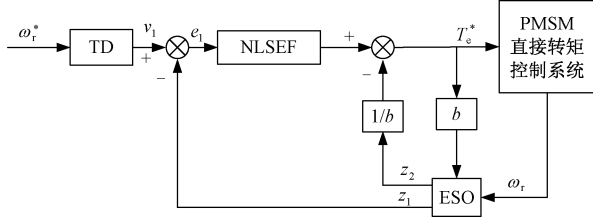


图2 基于 ADRC 控制器的 PMSM 直接转矩控制系统

Fig. 2 Direct torque control system for PMSM based on ADRC

样周期,式(4)中 $f_1(v_1 - \omega_r^*, r, T)$ 定义为:

$$\begin{cases} d = rT \\ d_0 = dT \\ y = v_1 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|} \\ a = \begin{cases} (a_0 - d)/2 & |y| > d_0 \\ y/T & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ f_1 = - \begin{cases} ra/d & |a| \leq d \\ r\text{sgn}(a) & |a| > d \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

基于 ADRC 控制器的 PMSM 直接转矩控制系统中 ESO 的数学模型为:

$$\begin{cases} e = z_1 - \omega_r \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 f_2(e, \alpha_1, \delta_1) + bu \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 f_2(e, \alpha_1/2, \delta_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中, z_1 为 ω_r 的跟踪值; z_2 为系统扰动估计值; α_1 为非线性因子; δ_1 为滤波因子; β_1, β_2 为系数; $f_2(e, \alpha, \delta)$ 为非线性函数,表达式为:

$$f_2(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sgn}(e) & |e| > \delta \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}} & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (7)$$

基于 ADRC 控制器的 PMSM 直接转矩控制系统中 NLSEF 数学模型为:

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ u_0 = \beta_3 f_2(e_1, \alpha_2, \delta_2) \end{cases} \quad (8)$$

式中, δ_2 为滤波因子; α_2 为非线性因子。

根据给定转速 ω_r^* 的跟踪值 v_1 和实际的转速值 ω_r 的跟踪值 z_1 ,得到状态误差值 $v_1 - z_1$,由式(8)设计 NLSEF,并通过 ESO 实时估计出的系统扰动值 z_2 按式(9)进行前馈补偿,得到电磁转矩给定参考值 T_e^* 。

$$T_e^* = u_0 - z_2/b \quad (9)$$

3 基于 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器设计

3.1 核函数极限学习机原理

KELM 是根据 ELM 理论衍生出的一类新型单隐层前向型学习算法,与基本 ELM 算法相比,KELM 能更好地解决回归预测问题,而相对于其他神经网络和支持向量机具有更好的回归预测精度,训练速度更快^[21]。KELM 回归模型的输出如式(10)所示:

$$f(x) = h(x)H^T(I/C + HH^T)^{-1}T = \begin{bmatrix} K(x, x_1) \\ \vdots \\ K(x, x_N) \end{bmatrix} (I/C + \Omega_{\text{ELM}})^{-1}T \quad (10)$$

式中, I 为对角矩阵; C 为惩罚系数;运用核矩阵 Ω_{ELM} 取代 ELM 中的随机矩阵 HH^T ,隐含层中将样本数据从低维空间映射到高维特征空间; $h(x)$ 为隐含层节点输出函数, $\Omega_{i,j} = h(x_i)h(x_j) = K(x_i, x_j)$ 为核函数取代 $h(x)$ 。

核函数 $K(u, v)$ 选取 RBF 核函数:

$$K(u, v) = \exp\left(-\frac{u-v^2}{\delta}\right) \quad (11)$$

由式(10)得 KELM 回归模型输出权值如下所示:

$$\beta = (I/C + \Omega_{\text{ELM}})^{-1}T \quad (12)$$

通过核函数和惩罚系数,增强了 KELM 的稳定性和泛化能力,但是由于核函数中参数 δ 和惩罚系数 C 影响回归预测的性能,因此选择混沌分子动理论优化算法对这两个参数进行寻优。

3.2 混沌分子动理论优化算法(CKMTOA)

KMTOA 是将问题中的每个解作为一个分子对待,根据各分子与最优分子的距离,判断各分子受到最优分子的引力还是斥力,进而各分子在作用力下运动并完成搜索过程;然而对于不受力的分子,则模拟分子热运动,对其进行随机扰动^[22]。种群中的每个个体都会按概率受到最优个体的引力、斥力或不受力:

$$\text{分子受力} = \begin{cases} \text{引力} & \text{rand} \leq pm1 \\ \text{斥力} & pm1 < \text{rand} \leq pm2 \\ \text{不受力} & pm2 < \text{rand} < 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $pm1$ 和 $pm2$ 分别为分子受力的引力因子和斥力因子。

分子个体受力的大小,见式(14)。

$$F_i = \begin{cases} GM_i M_{\text{Best}}(X_{\text{Best}} - X_i) & \text{引力} \\ -GM_i M_{\text{Best}}(X_{\text{Best}} - X_i) & \text{斥力} \\ AM_i(X_{\max_j} - X_{\min_j})N(0,1) & \text{不受力} \end{cases} \quad (14)$$

式中, F_i 为个体 X_i 所受的力; G 为引力常量; M_i 、 M_{Best} 分别为个体 X_i 和最优个体 X_{Best} 的质量; X_{\max_j} 、 X_{\min_j} 分别表示当前解空间的第 j 维的上、下界; A 为振动幅度, $A = 1 - 0.9t/T$, 其中, t 为当前迭代次数, T 为算法的总迭代次数; $N(0,1)$ 表示服从标准正态分布的随机变量。

受力的分子会产生一个加速度,该加速度对分子的速度进行修改,进一步修正分子在空间中的位置,定义其速度和位置更新见式(15)和式(16)。

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + \frac{F_i}{M_i} \quad (15)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (16)$$

但是算法迭代过程中,如种群中的所有分子个体均满足 $|\max(x_j) - \min(x_j)| \leq \varepsilon$ 时则算法易陷入局部早熟,缺乏局部寻优机制,影响算法全局搜索能力和收敛速度。为了提高 KMTOA 的整体搜索能力,避免算法陷入局部最优,本文对 KMTOA 进行以下改进:

(1)为加快搜索速度,平衡算法的全局和局部的搜索能力,引入自适应惯性权重法来更新权值系数,则自适应惯性权重系数 ω 的表达式如下:

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})(f - f_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}} & f < f_{\text{avg}} \\ \omega_{\max} & f \geq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (17)$$

式中, ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别为 ω 的最大值和最小值; f 为分子个体当前的适应度函数值; f_{avg} 和 f_{\min} 分别为当前所有分子个体当前平均适应度函数值和最小适应度函数值。

(2)为了避免算法陷入局部最优值,引入混沌局部搜索增强 KMTOA 的局部搜索能力,进而跳出局部最优,提高解的精度。采用混沌局部搜索对每次迭代中的精英种群进行混沌扰动,引导算法跳出局部最优,增强 KMTOA 的全局搜索能力以及解得精度。把种群部分最佳分子个体进行保留操作,作为每次迭代的精英种群 JS ,并选择 Logistic 映射作为混沌映射对算法每次迭代中精英种群进行混沌局部搜索,混沌映射序列:

$$z_{j,k+1} = \mu z_{j,k}(1 - z_{j,k}) \quad k = 0, 1, 2, \dots, 0 \leq z_{j,0} \leq 1 \quad (18)$$

产生的混沌序列根据式(19)返回到新的精英种群中:

$$x_{j+k} = x_j^* + z_{j,k} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (19)$$

式中, $z_{j,k}$ 为扩充的混沌变量序列; k 根据所取精英种群的数量来取值(即 $k = 1/B$, B 是所取精英种群数量占整个种群数量的百分比),从而保证种群的总数量不变,不因每次迭代而减少; μ 为控制变量,当 $\mu = 4$ 时, $z_0 \notin \{0, 0.25, 0.5, 0.75\}$; x_j^* 为当前精英种群中的分子个体。然后计算经混沌局部搜索后精英种群的适应度函数值,并执行精英保留操作,保存种群的最优个体。

(3)由于 CKMTOA 优化时适应度函数值越小所获得的预测效果越好,因此选用均方根误差(RMSE)作为获得 KELM 最优参数的适应度函数, J_{RMSE} 表达式为:

$$J_{\text{RMSE}}(y, y_d) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [y(j) - y_d(j)]^2} \quad (20)$$

式中, $y(j)$ 为模型的回归输出值; $y_d(j)$ 为期望输出值。

3.3 基于 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器

由图 2 中基于 ADRC 控制器的 PMSM 直接转矩控制可知系统的扰动 $w(t)$ 是完全未知的,而是通过 ADRC 控制器中的 ESO 实时的估计所得。假设系统的总扰动为 $w(t) = w_1 + w_2$,若可以知道系统扰动的部分扰动值 w_1 ,而 w_2 是未知的扰动部分,那么 ESO 所需要估计的扰动部分将会减少,这样能够减轻 ESO 的负担,提高其观测的精度。因此,选择 CKMTOA-KELM 回归预测模型实时估计出系统所受部分扰动值 $f_{\text{CKMTOA-KELM}}$,把 $f_{\text{CKMTOA-KELM}}$ 和 ESO 实时估计出的其余部分扰动 z_2' 之和作为系统的总扰动,在后续的控制中对系统进行前馈补偿,以提高控制系统的动态响应速度和抗干扰能力。

由图 2 可知,分别对系统中 ADRC 控制器的 ESO 输出变量 z_1 和 z_2 进行实时采样;把 z_1 作为 CKMTOA-KELM 回归模型的输入变量,而 z_2 作为其输出变量,对 CKMTOA-KELM 回归模型进行离散训练,于是得到其最优的回归模型;最后把训练好的最优 CKMTOA-KELM 回归模型嵌入 ADRC 控制器中,就得到基于 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 速度控制器系统。基于 ADRC 速度调节控制器系统,其系统框图如图 3 所示。

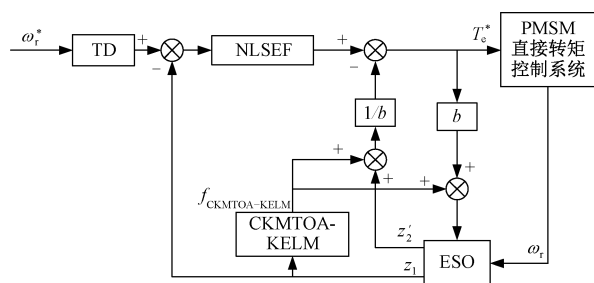


Fig. 3 Direct torque control system for PMSM based on ADRC optimized by CKMTOA-KELM

综上,得到 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器数学模型如下所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{v} = -f_1(v_1 - \omega_r^*, r, T) \\ e = z_1 - \omega_r \\ \dot{z}_1 = z_2' - \beta_{01} f_2(e, \alpha, \delta) + bu + f_{\text{CKMTOA-KELM}} \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02} f_2(e, \alpha/2, \delta) \\ e_1 = v_1 - z_1 \\ u_0 = \beta_{03} f_2(e, \alpha_1, \delta_1) \\ T_e^* = u_0 - \frac{z_2' + f_{\text{CMTOA-KELM}}}{b} \end{array} \right. \quad (21)$$

基于 CKMTOA-KELM 回归模型优化 ADRC 控制器的流程如下所示:

(1) 选取 z_1 、 z_2 数据进行采样,并对数据进行预处理,划分训练数据集和测试数据集,分别选取 z_1 、 z_2 奇数组作为训练数据,偶数组作为测试数据,并把训练数据和测试数据进行归一化处理。

(2) 利用混沌分子动力学优化算法优化 KELM 的回归模型核参数 δ 和惩罚系数 C : 输入训练样本数据, 初始化 CKMTOA 算法和 KELM 参数, 根据核参数 δ 和惩罚系数 C 的取值区间范围随机初始化每个分子个体位置 $X_i(t) = [C_i(t), \delta_i(t)]^T$, 并随机生成初始化速度, 选取 RBF 核作为 KELM 模型的核函数。

(3) 进行 CKMTOA 算法寻优, 根据适应度函数式(20)计算每次迭代中每个分子个体的适应度值, 通过不断迭代优化得到最优的核参数 δ 和惩罚系数 C 。

(4) 将 CKMTOA-KELM 最优回归模型嵌入 AD-RC 控制器中, 如图 3 所示, 根据输入数据 z_1 , 运用该

最优回归模型对输入数据 z_1 进行实时回归,输出系统的部分扰动值 $f_{\text{CKMTOA-KELM}}$ 。

4 系统仿真与实验结果分析

4.1 仿真参数设置

为了验证所提方法的可行性和有效性,建立基于 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器的永磁同步电机直接转矩控制仿真模型,如图 4 所示。与传统 PI 控制器和 ADRC 控制器进行对比,验证设计控制器的控制效果的优越性。运用 Matlab/Simulink 搭建仿真模型进行实验分析,其中 CKMTOA-KELM 回归模型训练采用 m 文件程序进行实现。PMSM 具体参数如表 1 所示,CKMTOA-KELM 回归模型参数设置如表 2 所示。

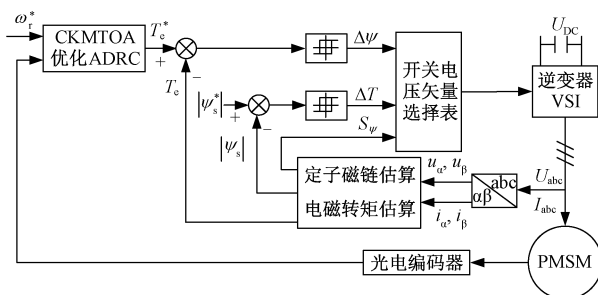


图 4 基于 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器的
永磁同步电机直接转矩控制仿真模型

Fig. 4 Simulation model of direct torque control for PMSM
based on ADRC optimized by CKMTOA-KELM

表 1 永磁同步电机参数

Tab. 1 Parameters of PMSM

主要参数	数值
额定功率 P_N/kW	1.5
额定电压 U_N/V	220
定子电阻 R_s/Ω	1.3
d 轴电感 L_d/H	0.00215
q 轴电感 L_q/H	0.00215
转子永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.175
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.0013
粘滞摩擦系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.000134
电机极对数 n_p	4

4.2 仿真结果及分析

为了方便进行系统抗负载变化和跟踪给定转速性能的对比,仿真时 PMSM 给定参考转速为 1500r/min,负载转矩在 0.3s 时从 1N·m 突变到 4N·m 的情况下,分别对 z_1 、 z_2 进行数据采样,其中取 600 组奇数组数据作为训练数据和 600 组偶数组数据作为测

表 2 CKMTOA-KELM 回归模型参数

Tab.2 Parameters of CKMTOA-KELM regression model	
主要参数	数值
惩罚参数 C	$[0.1, 1000]$
核参数 δ	$[0.01, 100]$
迭代次数 T	200
种群规模 N	100
吸引力概率 $P_{attraction}$	0.3
排斥力概率 $P_{repulsion}$	0.64
不受力概率 P_{wave}	0.06
引力常数 G	$[0, 1)$
最优分子个体质量 M_{Best}	2
精英种群数量百分比 $B(\%)$	20

试数据,对 KELM 模型进行训练得到其最优回归模型。图 5 和图 6 分别为基于传统 PI 控制器、ADRC 控制器和 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器的永磁同步电机直接转矩控制的仿真对比结果。

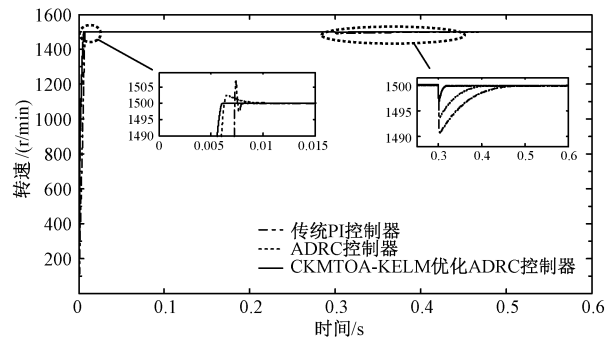


图 5 基于传统 PI、ADRC 和 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器的转速对比仿真结果

Fig. 5 Speed comparison simulation results of traditional PI、ADRC and ADRC controller optimized by CKMTOA-KELM

由图 5 可知,负载在 0.3s 突变的时候,在基于传统 PI 控制器的 PMSM 直接转矩控制系统下,转速瞬间从 1500r/min 下降到 1490r/min,且经过 0.18s 以后才能恢复到原来稳定状态;基于 ADRC 控制器的 PMSM 直接转矩控制系统下,转速瞬间下降到 1493r/min,且经过 0.09s 以后才能恢复到原来稳定状态;而采用本文的基于 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器的 PMSM 直接转矩控制系统,转速瞬间下降到 1497r/min,且只经过 0.018s 就能恢复到原来稳定状态。

从图 6 可知,采用本文的 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器能有效的减小转矩脉动,且在负载突变情况下能有效降低转矩脉动和超调量,具有较好

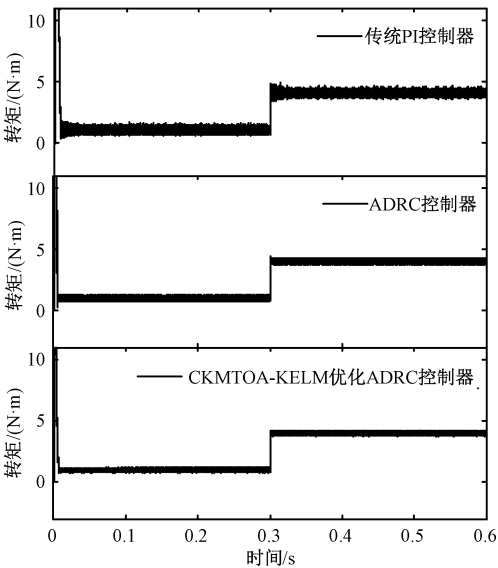


图 6 基于传统 PI、ADRC 和 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器的转矩对比仿真结果

Fig. 6 Torque comparison simulation results of traditional PI、ADRC and ADRC controller optimized by CKMTOA-KELM

的转矩控制性能。

通过以上的仿真实验结果分析,可以得出:采用本文的基于 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器的永磁同步电机直接转矩控制,系统的动态响应速度明显加快,抗干扰能力增强,同时提高了系统的观测精度,降低了稳态误差;由于优化后的 ADRC 中的 CKMTOA-KELM 回归模型能够有效地增强自抗扰控制器中 ESO 对系统扰动的估计能力,从而提升 ESO 的观测精度,改善调速系统动态性能。

4.3 实验结果及分析

以基于 TMS320F28035 DSP 数字信号处理器芯片搭建了永磁同步电机控制系统实验平台如图 7 所示。

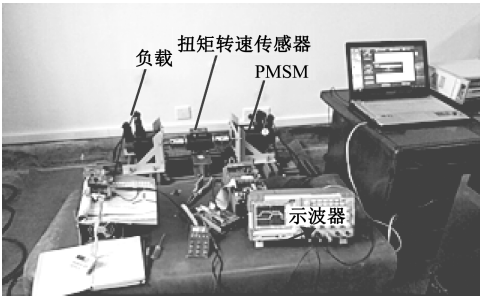


图 7 永磁同步电机实验平台

Fig. 7 Experiment platform of PMSM

该实验平台主要由断路器、接触器、各个控制电路板、电脑、示波器、两台英威腾 PMSM 等组成。其中一台英威腾 PMSM 是被控对象作为驱动电机,而另外一台作为负载电机,两台电机同轴相连接,且安装扭矩和转速传感器。所使用的两台 PMSM 的参数相同。

由于实验条件受限,难以获得外部的动态干扰,因此本实验中采用突变负载作为外部干扰。本文所提出的控制算法和软件程序在 CCS 软件中编程实现,并通过仿真器下载到 F28335 DSP 芯片中。本文实验是在永磁同步电机空载的情况下启动进行实验,首先给定 2000r/min 的转速,在跟踪转速时间为 0.3s 时突加负载 $T_e=8\text{N}\cdot\text{m}$ 。

图 8 是负载突变时基于 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器与 ADRC 控制器所对应的永磁同步电机跟踪转速实验波形图,从图 8 中可以得出,在 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器下的电机转速稳定性明显优于 ADRC 控制器,在负载突变时采用 ADRC 控制器的转速下降到 1985r/min,而采用 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器下的转速仅下降到 1996r/min,降低了超调量,加快了转速响应速度;图 9 为负载突变时永磁同步电机的转矩实验波形图,从图 9 中可得出永磁同步电机在突变负载时,采用 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器能够有效地降低转矩脉动和超调量,同时也提高了转矩的动态响应速度;图 10 为突变负载时三相电流实验波形图,从图 10 中可以得出在突变负载情况下,电流的幅值随转矩的变形基本保持一致,可知本文所提出控制方法,能减少系统运行稳态误差,提高系统的动态响应速度,同时增强系统的抗干扰能力和鲁棒性。

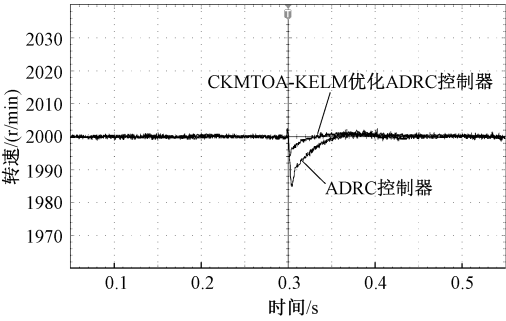


图 8 突变负载时转速响应

Fig. 8 Speed response under sudden load

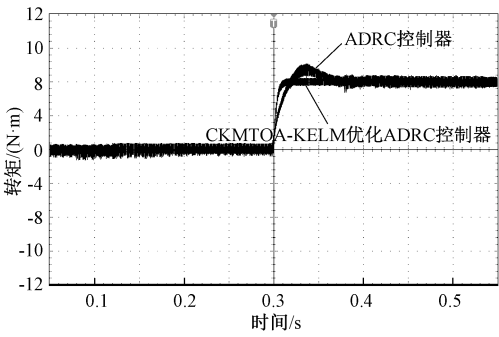


图 9 负载转矩响应

Fig. 9 Load torque response

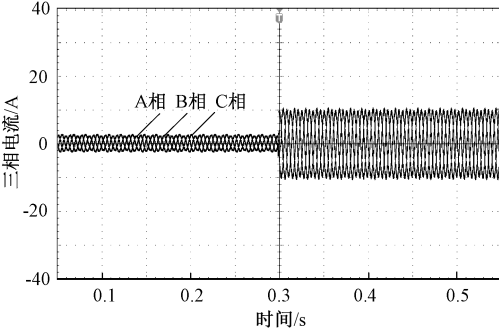


图 10 突加负载时的三相电流

Fig. 10 Three phase current under a sudden load change

5 结论

为了提高永磁同步电机直接转矩控制系统的动态响应速度和抗干扰能力,提出基于 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 的永磁同步电机直接转矩控制方法,该方法是用 CKMTOA-KELM 离散训练得到的最优回归模型,将此最优回归模型和 ADRC 相结合,得到基于 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 控制器系统。通过与传统 PI 控制器和 ADRC 控制器的永磁同步电机直接转矩控制相比较,系统仿真实验结果表明:本文采用的方法能够减小系统运行稳态误差,系统的动态响应速度更快,提高了 ADRC 控制器的估测精度,改善了系统的抗干扰能力,鲁棒性更好。

参考文献 (References):

[1] Guo Qingbo, Zhang Chengming, Li Liyi, et al. Maximum efficiency control of permanent-magnet synchronous machines for electric vehicles [J]. Energy Procedia, 2017, 105: 2267-2272.

[2] Liu P, Liu H P. Permanent-magnet synchronous motor drive system for electric vehicles using bidirectional z-source inverter [J]. IET Electrical Systems in Transporta-

- tion, 2012, 2 (4): 178-185.
- [3] 符慧, 左月飞, 刘闯, 等 (Fu Hui, Zuo Yuefei, Liu Chuang, et al.). 永磁同步电机调速系统的一种变给定增益PI控制器 (A variable input gain proportional integral controller for permanent magnetic synchronous motor speed-regulation system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (1): 168-174.
- [4] Shinohara A, Inoue Y, Morimoto S, et al. Maximum torque per ampere control in stator flux linkage synchronous frame for DTC-based PMSM drives without using q-axis inductance [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53 (4): 3663-3671.
- [5] 李界华, 胡佳, 文泽军 (Li Jiehua, Hu Jia, Wen Zhenjun). 考虑磁钢磁化方式的永磁电机空载气隙磁场性能分析 (Analysis of PM motor no-load air-gap magnetic field considering magnet steel magnetization manners) [J]. 湘潭大学自然科学学报 (Natural Science Journal of Xiangtan University), 2015, 37 (3): 35-42.
- [6] 陈炜, 张志伟 (Chen Wei, Zhang Zhiwei). 基于自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制 (A permanent magnet synchronous motor without position sensor control based on adaptive sliding mode observer) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (8): 8-14.
- [7] Rocha-Orsorio C M, Solís-Chaves J S, Casella Ivan R S, et al. GPRS/EGPRS standards applied to DTC of a DFIG using fuzzy-PI controllers [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 93: 365-373.
- [8] 陈才学, 朱建林, 郭有贵, 等 (Chen Caixue, Zhu Jianlin, Guo Yougui, et al.). 矩阵变换器与直接转矩控制融合仿真研究 (Research on direct torque control of induction motor fed by matrix converter) [J]. 湘潭大学自然科学学报 (Natural Science Journal of Xiangtan University), 2006, 28 (4): 96-102.
- [9] 韩京清 (Han Jingqing). 自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术 (Active disturbance rejection control technology-control technique for estimating uncertainty of compensation) [M]. 北京: 国防工业出版社 (Beijing: National Defense Industry Press), 2008.
- [10] Han Jingqing. From PID to active disturbance rejection control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56 (3): 900-906.
- [11] 咎小舒, 陈昊 (Zan Xiaoshu, Chen Hao). 基于自抗扰控制的开关磁阻电机转速闭环性能 (Rotating speed closed loop study of switched reluctance motor based on auto disturbance rejection control) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (7): 17-25.
- [12] Fan C D, Ouyang H L, Zhang Y J, et al. Optimization algorithm based on kinetic-molecular theory [J]. Journal of Central South University, 2013, 20 (12): 3504-3512.
- [13] Huang G B, Zhu Q Y, Siew C K. Extreme learning machine: theory and applications [J]. Neurocomputing, 2006, 70 (1-3): 489-501.
- [14] Huang G B, Zhou H, Ding X, et al. Extreme learning machine for regression and multiclass classification [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2012, 42 (2): 513-529.
- [15] 胡梦月, 胡志坚, 仇梦林, 等 (Hu Mengyue, Hu Zhi-jian, Zhang Menglin, et al.). 基于改进 AdaBoost. RT 和 KELM 的风功率预测方法研究 (Research on wind power forecasting method based on improved AdaBoost. RT and KELM algorithm) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2017, 41 (2): 536-542.
- [16] 李军, 李大超 (Li Jun, Li Dachao). 基于 CEEMDAN-FE-KELM 方法的短期风电功率预测 (Short-term wind power forecasting based on CEEMDAN-FE-KELM method) [J]. 信息与控制 (Information and Control), 2016, 45 (2): 135-141.
- [17] Zhang Yang, Li Ce, Li Lian. Electricity price forecasting by a hybrid model, combining wavelet transform, ARMA and kernel-based extreme learning machine methods [J]. Applied Energy, 2017, 190: 291-305.
- [18] 邱腾飞, 温旭辉, 赵峰 (Qiu Tengfei, Wen Xuhui, Zhao Feng). 永磁同步电机控制参数设计方法 (Design of control parameter method for permanent magnet synchronous motor) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (6): 60-66.
- [19] 刘英培 (Liu Yingpei). 基于自抗扰控制 PMSM 电压空间矢量调制直接转矩控制方法 (The direct torque control method is based on the PMSM voltage space vector modulation) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2011, 31 (11): 78-82.
- [20] 黄庆, 黄守道, 冯焱径, 等 (Huang Qing, Huang Shoudao, Feng Yaojing, et al.). 基于变结构自抗扰的永磁电动机速度控制系统 (Variable structure based active-disturbance rejection controller for speed control system of permanent magnet synchronous motor) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (20): 31-39.
- [21] Tang Qingfeng, Zhang Jianhua, Xie Zhengyong. Short-term micro-grid load forecast method based on EMD-KELM-EKF [A]. 2014 International Conference on Intel-

ligent Green Building and Smart Grid [C]. Taipei, China, 2014. 1-4.

[22] Fan Chaodong, Ren Ke, Zhang Yingjie, et al. Optimal multilevel thresholding based on molecular kinetic theory optimization algorithm and line intercept histogram [J]. Journal of Central South University, 2016, 23 (4): 880-890.

Direct torque control for permanent magnet synchronous motor based on ADRC optimized by CKMTOA-KELM

YI Ling-zhi^{1,2}, ZHANG Cheng-dong^{1,3}, FENG Jiang¹

- (1. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;
2. Hunan Province Cooperative Innovation Center for Wind Power Equipment and Energy Conversion, Xiangtan 411105, China;
3. Hunan Province Engineering Research Center for Multi-Energy Collaborative Control Technology, Xiangtan 411105, China)

Abstract: A direct torque control (DTC) for permanent magnet synchronous motor (PMSM) based on active-disturbance rejection control (ADRC) optimized by improved kernel extreme learning machine (KELM) method is proposed in this paper, which aims to overcome the large disturbance of the extended state observer (ESO) in the traditional ADRC. The CKMTOA-KELM optimal regression model is obtained by using chaotic kinetic molecular theory optimization algorithm (CKMTOA) to optimize the kernel parameters and penalty coefficients of KELM regression model. CKMTOA uses chaos search to prevent the algorithm from falling into local optimum and improves the convergence rate by employing adaptive inertia weighting factor. Finally, the ADRC controller embedded with the CKMTOA-KELM optimal regression model is analyzed and optimized to improve the dynamic response speed and anti-jamming capability of the system and enhance the robustness of the system. The simulation results have verified the feasibility and effectiveness of this method.

Key words: permanent magnet synchronous motor; direct torque control; active-disturbance rejection control; chaotic kinetic molecular theory optimization algorithm; kernel extreme learning machine