DOI: 10.3901/JME.2020.18.197

改进型 BBO 算法抑制电主轴转矩脉动*

吴玉厚^{1,2} 潘振宁^{1,2} 张丽秀²

(1. 大连理工大学机械工程学院 大连 116024;

2. 沈阳建筑大学机械工程学院 沈阳 110168)

摘要: 电主轴输出转矩脉动强弱对其控制性能有重要的影响。当定子电阻的辨识结果有偏差时,定子磁链轨迹就会发生畸变,会使电主轴输出转矩脉动,因此研究如何抑制电主轴转矩脉动是非常有必要的。通过对电主轴转矩脉动分析,提出了直接转矩控制中生物地理学优化算法(Biogeography optimization, BBO)的应用策略。通过优化算法中算子、概率以及初始值改进 BBO 算法,改进型 BBO 算法增强了其开发能力和探索能力。结合非线性约束方程,将改进型 BBO 算法应用于电主轴转矩脉动的抑制。针对定子电阻辨识问题,提出了基于改进型 BBO 算法提高定子电阻在线辨识精度的方法,减小定子磁链轨迹畸变,达到了抑制电主轴转矩脉动的效果。针对调制波形中电压矢量作用时间细分的问题,提出了基于 TRMPWM 模型使用改进型 BBO 算法优化电压矢量作用时间,在不改变定子磁链轨迹的情况下,频率 10 Hz 稳态时电主轴转矩脉动降低了 66%。仿真表明:基于改进型 BBO 算法提高定子电阻在线辨识的精准度和优化 TRMPWM 中电压矢量的作用时间,实现了抑制电主轴转矩脉动的目的。

关键词: 电主轴; 生物地理学优化算法(BBO); 直接转矩控制(DTC); 转矩脉动; 定子电阻

中图分类号: TG5

Improved BBO Algorithm Suppressed Torque Ripple of Motorized Spindle

WU Yuhou^{1,2} PAN Zhenning¹ ZHANG Lixiu²

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168)

Abstract: The output torque ripple of motorized spindle has an important influence on its control performance. When identification result of stator resistance has deviation, the stator flux track will be distorted, which will cause the output torque ripple of motorized spindle. Therefore, it is necessary to study how to suppress the torque ripple of motorized spindle. Based on torque ripple analysis of motorized spindle, the application strategy of biogeography optimization (BBO) algorithm in direct torque control (DTC) is proposed. BBO algorithm is improved by optimizing the operator, probability and initial value. Improved BBO algorithm enhances its development ability and exploration ability. Combined with nonlinear constraint equation, improved BBO algorithm is applied to suppress the torque ripple of motorized spindle. In order to solve the problem of stator resistance identification, a method based on improved BBO algorithm is proposed to improve the accuracy of online stator resistance identification, reduce the stator flux track distortion, so as to achieve the effect of suppressing the torque ripple of motorized spindle. To solve the problem of subdivision of voltage vector action time in the modulation waveform, an improved BBO algorithm based on TRMPWM model is proposed to optimize the voltage vector action time. Without changing the stator flux track, the torque ripple of motorized spindle is reduced by 66% when the frequency is 10 Hz. Simulation shows that improved BBO algorithm can improve the accuracy of stator resistance online identification and optimize the action time of voltage vector of TRMPWM, and achieve the purpose of suppressing torque ripple of motorized spindle.

Key words: motorized spindle; BBO algorithm; direct torque control(DTC); torque ripple; stator resistant

0 前言

电主轴具有结构紧凑、重量轻、惯性小、振动

小、噪声低、响应快、转速高、功率大等优点而成为高速数控机床的关键功能部件^[1]。对电主轴来说,重要控制目标是转矩,转矩脉动小,转矩的控制就好,输出良好的转速,系统控制就好。但由于电主轴齿槽效应、加工工艺等固有原因及直接转矩控制(Direct torque control, DTC)下逆变器控制器件所

* 国家自然科学基金资助项目(51375317, 51675353)。20191105 收到初稿, 20200215 收到修改稿

产生的转矩脉动不能被消除,所以只能尽可能减弱它^[2]。其中,DTC 多边形磁链控制方式所产生的转矩脉动可以通过智能算法改善某个或某些控制参数对其进行抑制。DTC 具有简单和高效等优点,采用电压积分法估计定子磁链时,唯一用到的电主轴参数就是定子电阻。DTC 自身也存在着很大的缺点,即在估算磁链时会忽略定子电阻的变化,这将使电主轴在稳态运行中存在较大的转矩脉动。电主轴在运行过程中定子电阻是不断变化且难以测量的,要想使用 DTC 对电主轴进行控制,则需要采用行之有效的方法对定子电阻进行辨识。电主轴 DTC 系统中电压矢量会作用于整个控制周期,其结果会不可避免的产生转矩脉动,这需要通过减少定子磁链误差、调节电压矢量作用时间来减弱转矩脉动^[3]。DTC 中对定子电阻在线辨识来准确估算出定子磁链,并以转矩脉动最小(Torque ripple minimum pulse width modulation, TRMPWM)为导向,在一个控制周期内对非零电压矢量的作用时间进行进一步的优化,最终实现抑制转矩脉动的目的。

最近几年,出现了一种新型的基于群体智能优化算法——生物地理学优化算法^[4-5](Biogeography optimization, BBO)。BBO 算法是大量个体行为聚合为群体行为,共享群体的信息来达到寻优的目的。本文基于电主轴 DTC 系统性能分析的基础上提出了使用 BBO 算法对定子电阻进行在线辨识以提高其精准度,并以转矩脉动最小为目标,利用 BBO 算法优化电压矢量实现对电主轴转矩脉动的抑制。

1 DTC 下电主轴转矩脉动分析

采用 DTC 三种模型中的 u-i 模型法估算电主轴的定子磁链,其估算过程中仅与定子电阻相关。

1.1 转矩脉动的产生

磁链方程可表示为

$$d\varphi_s/dt = u_s - R_s i_s \quad (1)$$

式中, φ_s 为定子磁链; u_s 为定子电压; R_s 为定子电阻。

忽略 R_s 压降,式(1)离散化后可得

$$\varphi_{k+1} - \varphi_k \approx u_s t_{sp} \quad (2)$$

式中, t_{sp} 为采样周期; k 为第 k 次采样。

按照一定规律切换非零电压空间矢量和零电压空间矢量,可以控制 φ_s 的转动与停止,从而控制 φ_s 和 φ_r (转子磁链)之间的夹角,达到控制电主轴输出转矩的目的。在 DTC 系统中,一个 t_{sp} 周期输出一个 u_s ,其与上一个采样时刻的转矩误差 E_T 、磁链误差 E_φ 和 φ_s 的位置有关。 E_T 与 E_φ 的计算公式为

$$\begin{cases} E_T = T_e^* - T_e \\ E_\varphi = \varphi_s^* - \varphi_s \end{cases} \quad (3)$$

式中, T_e 为电磁转矩($T_e = n_p \varphi_s i_s$); 上标*为给定参考值或期望值^[6],后同。由式(3)计算出 E_T 与 E_φ 后, u_s 通过查表 1 来确定。

表 1 是电压空间矢量的开关逻辑表。表中, d_φ 为磁链滞环控制器的输出值; d_T 为转矩滞环控制器的输出值。

表 1 电压空间矢量的开关逻辑表

磁链滞环控制器的输出值 d_φ	1			0		
转矩滞环控制器的输出值 d_T	1	0	-1	1	0	-1
开关电压/V	U_{N+1}	U_0, U_7	U_{N-1}	U_{N+2}	U_0, U_7	U_{N-2}

当 $d_\varphi=1, d_T=-1$ 时,要选择的 u_s 须使 φ_s 向转矩角减小的方向运动,从而使转矩减小;当 $d_\varphi=1, d_T=1$ 时,要选择的 u_s 须使 φ_s 向转矩角增大的方向运动,从而使转矩增加。一个周期内 φ_s 、 i_s 和 T_e 保持同方向变化。由于冗余的考虑,在小于 t_{sp} 的较短时间内, T_e 就达到期望值;在余下的时间里, u_s 使电主轴产生成了转矩脉动。

DTC 系统的控制性能受定子电阻的影响很大。定子电阻的误差必然会影响到定子磁链,进而影响电主轴的转矩脉动^[7]。

1.2 转矩脉动与定子电阻的关系

假定电主轴的电压空间矢量表示为

$$u_s^* = u_{ds}^* + j u_{qs}^* \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)中,并离散化后可得

$$\varphi_{s,k+1} = \varphi_{s,k} + (u_{s,k} - i_{s,k} R_s) t_{sp} \quad (5)$$

电磁转矩方程离散化,在第 $k+1$ 次采样时间 t_{sp} 内,电主轴输出转矩

$$T_{e,k+1} = T_{e,k} + \Delta T_{e,k1} + \Delta T_{e,k2} \quad (6)$$

由式(6)分析可知: $\Delta T_{e,k1}$ 和 $U_{N,k}$ 仅与 $T_{e,k}$ 有关。故,在一个 t_{sp} 周期内, $\Delta T_{e,k1}$ 和 $U_{N,k}$ 可认为是常量,并起到拟合转矩的作用。

在实际工作中 R_s 会随着工况环境等的变化而发生变化,使 φ_s 轨迹发生畸变,电主轴输出的转矩中存在脉动。设定 ΔR_s 为 R_s 的变化量、 Δi_s 为 i_s 的变化量,则 $\Delta \varphi_s$ 可表示为

$$\Delta \varphi_s(t) = \int_0^t [\Delta R_s (i_s + \Delta i_s)] dt \quad (7)$$

1.3 转矩脉动的计算公式

DTC 中,电主轴转矩的计算公式可表示为

$$T_e = \frac{2}{3} n_p |\varphi_s \times i_s| \quad (8)$$

式中, n_p 为电主轴的极对数。考虑电主轴的温升后, 其实际值转矩的计算公式为

$$T_e' = \frac{2}{3} n_p |\varphi_s' \times (i_s + \Delta i_s)| \quad (9)$$

此时, 转矩观测值的计算公式为

$$T_e^* = \frac{2}{3} n_p |\varphi_s^* \times (i_s + \Delta i_s)| \quad (10)$$

由式(9)和式(10)得

$$\Delta T_e = \frac{2}{3} n_p |\varphi_s' - \varphi_s^*| \times (i_s + \Delta i_s) \quad (11)$$

在 DTC 中, φ_r 相对于 φ_s 始终处于运动状态, 此时的 φ_s 不再是稳定的旋转磁场^[8], 其受到的是不断变化的外加电压控制。电压矢量在小于一个周期的时间内就达到了期望值, 剩余时间电压矢量将继续对电主轴施加作用, 形成转矩脉动。

2 针对转矩脉动的 BBO 算法改进

DTC 系统中定子电阻在线辨识和 TRMPWM 中非零电压矢量作用时间优化都属于非线性时变及大工作量复杂计算问题。BBO 算法主要特点是通过个体间竞争协作去求解相对复杂的优化组合问题, 相比其他智能算法, 它能更准更快获得全局最优解。因此, 对定子电阻在线辨识和优化 TRMPWM 中电压矢量作用时间能充分利用 BBO 算法的优点。

2.1 BBO 算法

BBO 算法具有较强的开发能力, 在迭代过程中, BBO 采用迁移算子充分共享优良个体的特征, 提高整体性能。而且 BBO 算法可以根据个体的适应度指数 (Habitat suitability index, HSI) 去调整变异概率, 自适应地引导个体去变异, 为种群提供更多的特征, 这有利于发现优良个体。在实际优化过程中, BBO 算法是基于概率选择的随机搜索策略^[9], 因此 BBO 具有很好地鲁棒性与推广性。BBO 算法的流程步骤见表 2。

表 2 生物地理学优化算法

BBO 算法流程
随机产生初始种群 ps;
计算种群中解(HSI);
While 不满足终止条件
{
将所有的解, 按照 HSI 由小到大进行排列;
得到种群中每个解的 s ;
计算每个解的 λ_s 和 μ_s ;
利用迁移算子调整种群;
利用变异算子对种群的解进行变异操作;
利用清除算子清除相同解。
}

(1) 迁移算子: 用解替换共享栖息地信息^[10], 改善 HSI。

(2) 变异算子: 用变异方法获得新的解替代原始解。

(3) 清除算子: 在 BBO 算法的迭代中, 当出现相同解时, 需要一个随机解取代其中的一个相同解, 这样可以保证种群中解的更新是有效的。

2.2 改进型 BBO 算法

电主轴定子电阻辨识误差和电压矢量作用时间偏差将会导致转矩脉动。针对此问题, 对 BBO 算法进行改进以适用于电主轴控制系统。定子电阻和非零电压矢量作用时间的初始值, 影响到 BBO 算法的探索能力和收敛速度, 使用 BP 神经网络模型对其进行优化。BBO 算法还通过 BP 神经网络模型对算法中的概率值进行优化, 能获得更好的收敛速度。

图 1 为改进型 BBO 算法, 迁移模块中使用余弦曲线替代比例曲线、引入了差分进化算法的变异策略来改进迁移算子, 变异模块中采用 Cauchy 变异算子作为改进的变异算子, 扰动模型中对前半种群进行扰动, 提高算法的全局搜索能力。

图 1 改进型 BBO 算法

改进后的 BBO 算法的特点如下。

(1) 迁移算子: 引入差分进化算法变异策略, 使 BBO 算法既保持了原有开发能力, 又提高了 BBO

算法的探索能力^[11]。

(2) 变异算子: 增加 Cauchy 变异算子, 提高 BBO 算法收敛速度和解的精度以增强其开发能力。

(3) 扰动算子: 在优良解附近进行扰动^[12], 防止出现解的同质化。

3 改进型 BBO 下转矩脉动抑制策略

基于改进型 BBO 算法提高定子磁链的辨识精度, 可减少因定子电阻辨识误差而产生的转矩脉动; 以电主轴转矩脉动极小为目标, 通过合理分配非零电压矢量作用时间和零电压矢量作用时间^[13], 在不增加系统复杂性且不改变定子磁链控制性能的情况下, 实现抑制电主轴转矩脉动的目的。

图2为改进型 BBO 算法抑制转矩脉动策略, 该策略使用已有数据计算出定子电阻和电压矢量作用时间的初值, 基于改进 BBO 算法优化 TRMPWM 模型的输入值使电主轴输出转矩脉动最小。

图2 改进型 BBO 算法抑制转矩脉动策略

3.1 电压矢量作用时间的计算

图3所示为电主轴处于稳态运行状态。在一个控制周期 t_{sp} 内, $0 \sim t_s$ 为非零电压矢量 $U_{N,k}$ 的作用时段。

$U_{N,k}$ 使电主轴输出转矩增加, 由于一个控制周期很小, 磁链、转速可近似为定值, 因此认为上升

图3 转矩的稳态波形图

斜率 f_1 和下降斜率 f_2 都是常量。

定义 T_{e_ripple} 的物理意义是^[14]: 在 kt_{sp} 时刻的转矩为 T_0 , 经过 t_{sp} 时间内的上升和下降, 在 $(k+1)t_{sp}$ 时转矩仍然为 T_0 。

为了得到 t_s 的极小值方程, 将 $T_{e_ripple}^2$ 对 t_s 进行一阶偏导^[15], 即

$$\frac{\partial T_{e_ripple}^2}{\partial t} = 0$$

综上, 可得到 t_s 的计算公式

$$t_s = \frac{2(T_e^* - T_{0,e}) - f_2 t_{sp}}{2f_1 - f_2} \quad (12)$$

3.2 TRMPWM 调制

(1) 根据当前转矩和磁链误差及定子磁链所处位置, 由表1选择合适的电压矢量^[16]。

(2) 计算 f_1 和 f_2 , 并根据式(12)计算 t_s 。

(3) 根据 t_s 定电压矢量的作用时间。若 $t_s < 0$, 采样周期内选取零电压矢量; 若 $0 < t_s < t_{sp}$, 在 $0 \sim t_s$ 内选择非零电压矢量, $t_s < t_{sp}$ 内选择零电压矢量; 若 $t_s > t_{sp}$, 采样周期内选择非零电压矢量。

(4) 在下个控制周期回到步骤(1)。

3.3 TRMPWM-DTC 系统

将上述方法引入到 DTC 系统中, 可获得基于电压矢量细分的 DTC 系统结构图, 如图4所示。根据电压空间矢量分析, 将实时获得的定子电压进行 Park 变换, 利用磁链观测器、磁链运算器, 最终形

图4 基于 TRMPWM 的 DTC 系统

成圆形或正六边形定子磁链轨迹^[17]。同时, 经转矩观测器得到实际电磁转矩, 与给定电磁转矩进行调节, 实现转矩自控制。磁链及转矩的偏差越细化, 预期的电压空间矢量的作用越精确, 不仅能改善 DTC 系统的静态和动态性能, 也能减小电磁磁链和电磁转矩的脉动。

3.4 基于 BBO 算法计算 R_s 和 t_s

基于 BBO 算法计算定子电阻 R_s 和 TRMPWM 中电压矢量作用时间 t_s 的过程如下^[18-19]。

(1) 迁移算子

将算法中适应度 HSI 看作所求参数 $X(R_s$ 或 $t_s)$, 其相应迁移算子方程为

$$X_i = X_{\text{best}} + k(X_{n1} - X_{n2}) + k(X_{n3} - X_{n4}) \quad (13)$$

式中, X_{best} 为最优解; k 为缩放因子; X_{n1} , X_{n2} , X_{n3} , X_{n4} 为随机选择的四个不相同的解。由式(13)可知, 其新解 X_i 的信息来源于最优解和两个差分向量, 如此可以获取更多的信息, k 能平衡探索能力和开发能力, 本文取 $k=0.5$ 。

(2) 变异算子

根据式(14)计算新解 X_i

$$X_i = X_i + \frac{1}{\pi(1 + \bar{X} \times \bar{X})} B_{\text{rand}} < P_i \quad (14)$$

式中, $\pi=3.1415927$; $\bar{X}$ 为每次迭代 ps 个 X_i 的平均值。

(3) 扰动算子

利用式(15)计算出一组新解 X_i

$$X_i = X_i + \alpha(X_k - X_i) \quad L_{\text{rand}} < P_i \quad (15)$$

式中, X_k 为随机选择的解; $P_i=0.2$ 为扰动频率; $\alpha=1-P_i=0.8$ 为扰动幅度^[20]。

(4) 清算算子

如第 2.1 节中所述, 清除相同的解。

4 电主轴转矩脉动仿真

通过仿真分析基于改进型 BBO 算法抑制电主轴转矩脉动。图 5 为电主轴控制系统示意图。启动

图 5 电主轴控制系统示意图

编译好的程序, 实时获取检测到的电主轴电流反馈作为输入参数, 通过串口指令对 DSP 模块进行操作, 生成相应的控制信号后输出。控制信号增强后, 通过 IGBT 驱动板对 IGBT 开关模块精确操作, 将直流电源逆变成交流电源为电主轴供电。

电主轴仿真参数如下: 额定功率为 9 kW, 额定电压为 380 V, 额定频率为 1 000 Hz, 转子电阻为 2.831 Ω , 定子电感为 0.01 H, 转子电感为 0.01 H, 定转子互感为 0.026 H, 摩擦因数 0.009 5, 转动惯量为 0.002 58 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 极对数为 2。

根据电主轴仿真参数与图 4 中系统结构图, 使用 Simulink 建立仿真模型。通过对比 TRMPWM 和 BBO-TRMPWM 两种调制方法下仿真结果, 验证 BBO 算法是否能抑制电主轴转矩脉动。

4.1 定子磁链仿真

定子电阻对 DTC 的性能影响主要体现在对定子磁链的预估上, 通过仿真来分析定子磁链的变化。图 6 为定子磁链轨迹的正六边形和圆形的仿真结果, 理论上定子磁链幅值在运行中要保持恒定不变, 为标准正六边形轨迹和圆形轨迹。但是从磁链轨迹仿真图中可以明显发现, 定子磁链的轨迹并不标准, 除电主轴固有因素外, 定子电阻辨识误差会导致 DTC 下电主轴转矩脉动, 从而影响到定子磁链的幅值, 磁链轨迹发生畸变。

图 6 定子磁链轨迹仿真图

4.2 定子电阻辨识

表 3 为定子电阻最终处理的试验数据。

图 7 为训练误差性能曲线。由图可知, 训练 3 步后测试数据的均方差已经达到允许误差(0.01 Ω) 范围内。这也说明了基于 BBO 算法辨识定子电阻, 辨识精度高且速度快。

表 3 定子电阻实验数据

序号	频率/Hz	电流/A	温度/℃	定子电阻/ Ω
1	10	5.392	23.18	1.181 71
2	15	5.023	23.21	1.182 15
...	...	...	...	...
100	505	4.919	26.12	1.192 26
101	10	5.174	23.53	1.181 79
102	15	4.641	23.57	1.182 35
...	...	...	...	...
200	505	5.035	26.36	1.193 21
201	10	5.275	23.67	1.182 11
...	...	...	...	...
300	505	5.171	26.13	1.191 02
...	...	...	...	...
900	505	5.251	26.29	1.192 28

图 7 训练曲线

图 8 为测试样本的电阻值与基于 BBO 算法辨识电阻值的拟合曲线，明显可以看到两条曲线有很高的拟合度，这也再次证实了 BBO 算法具有高精度的辨识能力。

图 8 样本电阻值与辨识电阻值拟合曲线

4.3 电压矢量作用时间对转矩脉动的影响

本小节通过仿真来分析 DTC 系统中电压矢量作用时间对转矩脉动的影响。在仿真过程中，分别使用 Classical-DTC 和 TRMPWM-DTC 对电主轴定子磁链幅值和转矩进行仿真。对比图 9 和图 10 可以看出，电压矢量作用时间的变化，必然引起电主轴输出转矩也都随之发生了变化，但不会影响定子磁链的轨迹。

4.4 定子电阻变化对转矩脉动的影响

图 11 为定子电阻变化对电主轴输出转矩的影响。

图 9 定子磁链幅值仿真

图 10 电主轴输出转矩

响。从图中可知：BBO-TRMPWM 调制方式下电主轴产生的转矩脉动变小。

图 11 电主轴输出转矩

4.5 基于 BBO 抑制电主轴转矩脉动仿真

分别使用 TRMPWM 和 BBO-TRMPWM 两种调制方式对转速和转矩进行对比仿真分析，验证 BBO 算法是否能更有效地减少转矩的脉动。

从图 12 和表 4 可以看出，电主轴存在一定的转速脉动。以 6 次谐波为例，采用 TRMPWM 调制，其谐波幅值为 1.35；采用 BBO-TRMPWM 调制，其谐波幅值最小，为 0.56。

图 12 转速响应及 FFT 仿真

表 4 速度脉动统计结果

控制方式	谐波幅值			
	1 次	2 次	6 次	12 次
TRMPWM	2.86	0.33	1.35	0.24
BBO-TRMPWM	0.61	0.09	0.56	0.11

从图 13 中可以看出, TRMPWM 调制下电主轴转矩脉动为 $\pm 0.15 \text{ N} \cdot \text{m}$, BBO-TRMPWM 转矩脉动为 $\pm 0.06 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。BBO-TRMPWM 相较于 TRMPWM, 转矩脉动降低了 66%, 说明了 BBO-TRMPWM 算法可有效降低转矩脉动。

图 13 稳态转矩

从图 14 和图 15 中可以看出, 当给定转矩由 $1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 突增为 $2.0 \text{ N} \cdot \text{m}$, TRMPWM 调制下转矩响应时间约为 0.35 ms , BBO-TRMPWM 调制下响应时间约为 0.36 ms ; 当给定转矩在 $1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 突减为 $1.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时, 其响应时间都约为 0.19 ms 和 0.20 ms 。可以看出, 两种算法下转矩突增和转矩突降的动态响应时间基本一致。

图 14 转矩动态响应($n=18000 \text{ r/min}$) 图 15 转矩动态响应($n=300 \text{ r/min}$)

5 结论

本文对电主轴转矩脉动进行了仿真分析, 针对 BBO 算法易陷局部最优等缺点进行优化, 基于改进型 BBO 算法提出了抑制电主轴转矩脉动的策略。主要研究工作及创新性成果如下。

(1) 通过 DTC 下电主轴控制系统中转矩脉动的分析, 说明了定子电阻和电压矢量作用时间对转矩脉动的影响。

(2) 针对电主轴定子电阻辨识问题, 利用 BBO 算法实现定子电阻辨识。该方法提高了定子磁链的辨识精度, 可减少因定子电阻辨识误差而产生的转矩脉动。

(3) 提出了基于 BBO 算法优化 TRMPWM 中电压矢量作用时间的方法。该方法以电主轴转矩脉动极小为目标, 通过优化 TRMPWM 中电压矢量作用时间来合理分配非零电压矢量和零电压矢量, 在不增加系统复杂性且不改变定子磁链控制性能的情况下, 实现抑制电主轴转矩脉动的目的。

参 考 文 献

- [1] 张丽秀, 李超群, 李金鹏, 等. 高速高精度电主轴温升预测模型[J]. 机械工程学报, 2017, 53(23): 129-136. ZHANG Lixiu, LI Chaoqun, LI Jinpeng, et al. The temperature prediction mode of high speed and high precision motorized spindle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(23): 129-136.
- [2] LIU Kai, CHEN Yining, XU Jiaqi, et al. Fuzzy torque control of the bionic flexible manipulator actuated by pneumatic muscle actuators[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32: 79. <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0394-y>.

- [3] WANG Gang, LIU Xiaoping, ZHAO Yunlong, et al. Neural network-based adaptive motion control for a mobile robot with unknown longitudinal slipping[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32: 61. <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0373-3>.
- [4] 吴玉厚, 潘振宁, 张丽秀, 等. 电主轴上改善性直接转矩控制的振动实验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(11): 174-177.
- WU Yuhou, PAN Zhenning, ZHANG Lixiu, et al. Vibration test of improved direct torque control on electrical spindle[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(11): 174-177.
- [5] 鲁宇明, 王彦超, 吴竹溪. 具有二重机制的生物地理优化算法及圆柱度误差评定研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 80-87.
- LU Yuming, WANG Yanchao, WU Zhuxi. Cylindricity error evaluation based on an improved biogeography based optimization algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 80-87.
- [6] GOEL N, RAM N P, CHACKO S. Stator resistance estimation of modified DTC IM drives using fuzzy logic[J]. i-Manager's Journal on Electrical Engineering, 2018, 11(3): 34-44.
- [7] ZHANG Guoqiang, WANG Gaolin, ZHANG Hongpeng, et al. Pseudo-random-frequency sinusoidal injection for position sensorless IPMSM drives considering sample and hold effect[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 9929-9941.
- [8] WANG Hong, CHANG Wenwen, ZHANG Chi. Functional brain network and multichannel analysis for the P300-based brain computer interface system of lying detection[J]. Expert System With Applications, 2016, 53: 117-128.
- [9] FOO G H B, ZHANG X. Robust direct torque control of synchronous reluctance motor drives in the field-weakening region[J]. IEEE Trans. Power Electron., 2017, 32(2): 1289-1298.
- [10] WANG Fengxiang, ZHANG Zhenbin, MEI Xuezhu, et al. Advanced control strategies of induction machine: field oriented control, direct torque control and model predictive control[J]. Energies, 2018, 11(1): 120.
- [11] YE Tao, YANG Ziqiang, FENG Siling. Biogeography-based optimization of the portfolio optimization problem with second order stochastic dominance constraints[J]. Algorithms, 2017, 10(3): 100.
- [12] ZHANG Zhenbin, WANG Fengxiang, WANG Junxiao, et al. Nonlinear direct control for three-level NPC back-to-back converter PMSG wind turbine systems: Experimental assessment with FPGA[J]. IEEE Trans. Ind. Inform., 2017, 13(3): 1172-1183.
- [13] HESARI S, NORUZIAZGHANDI M, SHOJAEI A A, et al. Investigating the intelligent methods of loss minimization in induction motors[J]. Telkomnika, 2018, 16(3): 1034-1053.
- [14] YANG Zebin, CHEN Lin, SUN Xiaodong, et al. A bearingless induction motor direct torque control and suspension force control based on sliding mode variable structure[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 24(9): 179.
- [15] MILUTIN P, NEBOJŠA M, VOJKAN K, et al. An improved scheme for voltage sag override in direct torque controlled induction motor drives[J]. Energies, 2017, 10(5): 663.
- [16] SUDHEER H, KODAD S, SARVESH B. Improved sensorless direct torque control of induction motor using fuzzy logic and neural network based duty ratio controller[J]. IAES International Journal of Artificial Intelligence, 2017, 6(2): 79-90.
- [17] FALKOWSKI P, KULIKOWSKI K, GRODZKI R. Predictive and look-up table control methods of a three-level AC-DC converter under distorted grid voltage[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, 2017, 65(5): 609-618.
- [18] ZHANG Chengming, GUO Qingbo, LI Liyi, et al. System efficiency improvement for electric vehicles adopting a permanent magnet synchronous motor direct drive system[J]. Energies, 2017, 10(12): 2030.
- [19] HONG J, LAFLAMME S, DODSON J, et al. Introduction to state estimation of high-rate system dynamics[J]. Sensors, 2018, 18(1): 217.
- [20] BERMUDEZ M, GONZALEZ-PRIETO I, BARRERO F, et al. Open-phase fault-tolerant direct torque control technique for five-phase induction motor drives[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2017, 64(2): 902-909.

作者简介: 吴玉厚, 男, 1955 年出生, 教授。主要研究方向为数控机床高速主轴系统关键技术、陶瓷零件精密加工制造技术。

E-mail: wuyh@sjzu.edu.cn

潘振宁(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士研究生。主要研究方向为电主轴智能控制技术。

E-mail: panzn_78@163.com

张丽秀, 女, 1970 年出生, 教授。主要研究方向为高性能数控机床主轴技术、精密检测与智能控制技术。

E-mail: sanyoe@sina.com