

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407928

适于动态负荷下开关磁阻电机高性能调速控制方法*

张奕璇^{1, 2, 3} 张小平^{1, 2, 3} 李 庆⁴
(1. 湖南科技大学信息与电气工程学院 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学海洋矿产资源探采装备与安全技术国家
地方联合工程实验室 湘潭 411201; 3. 自然资源部海底地质钻探装备工程技术创新中心 湘潭 411201;
4. 湖南湘电动力有限公司 湘潭 411201)

摘 要:针对现有控制方法难以满足开关磁阻电机基于变速变负载工况下的高性能调速控制要求,提出一种基于超螺旋控制算法的开关磁阻电机调速控制方法。建立了开关磁阻电机的数学模型,深入研究了开关磁阻电机基于变速变负载工况下采用超螺旋控制算法的具体设计方法,并以其控制参数为优化对象,通过构建其多目标优化适应度函数,提出采用果蝇算法对其控制参数进行优化并就其具体优化过程展开了深入研究,最后通过仿真和实验对其效果进行了验证,同时与目前常用的渐进稳态信号误差控制算法进行了对比分析,结果表明,开关磁阻电机基于变速变负载工况下采用超螺旋控制算法相对于渐进稳态信号误差控制算法,其稳态控制精度提高了 1.213%,而其动态性能指标如当电机给定转速发生突增或突减时,其过渡过程时间分别下降了 22.3%及 26.6%,而在负载发生突增或突降时,其转速超调量分别下降了 61.09%及 62.28%,而其过渡过程时间则分别下降了 36.36%及 38.88%,可见其稳态和动态性能指标均较渐进稳态信号误差控制算法得到了明显提高,因而具有较好的实际应用价值。

关键词: 开关磁阻电机;动态负荷;调速控制;超螺旋控制算法;参数优化
中图分类号: TM352;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

High-performance speed regulation control method for switched reluctance motor suitable for dynamic load

Zhang Yixuan^{1, 2, 3} Zhang Xiaoping^{1, 2, 3} Li Qing⁴
(1. School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. National-Local Joint Engineering Laboratory for Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology
of Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. Engineering Technology Innovation Center for
Submarine Geological Drilling Equipment, Ministry of Natural Resources, Xiangtan 411201, China;
4. Hunan Xiangdian Power Co., Ltd., Xiangtan 411201, China)

Abstract: Conventional control methods struggle to satisfy the high-performance speed regulation requirements of switched reluctance motors (SRM) under variable-speed and variable-load operating conditions. This paper proposes a super-twisting control algorithm (STCA)-based speed regulation method for SRMs. A mathematical model of SRM was established, followed by an in-depth investigation into the systematic design methodology of STCA implementation under variable operating conditions. To optimize control parameters, a multi-objective optimization fitness function was constructed and addressed through the fruit fly optimization algorithm (FOA), with detailed analysis of its implementation process. Comparative simulations and experiments with conventional gradually steady signal error control (GSSEC) algorithm demonstrate significant improvements: Steady-state control accuracy increased by 1.213%; For abrupt speed changes, transient process durations reduced by 22.3% (sudden increase) and 26.6% (sudden decrease); Under load disturbances, speed overshoots decreased by 61.09% (sudden increase) and 62.28% (sudden decrease), with corresponding transient durations reduced by 36.36% and 38.88%. The proposed method exhibits superior steady-state and dynamic performance metrics compared with

GSSEC, demonstrating substantial practical application value.

Keywords: switched reluctance motors; dynamic loads; speed control; superhelical control algorithm; parameter optimization

0 引言

开关磁阻电机因具有效率高、起动电流小、起动转矩大、结构简单坚固等系列优点^[1-3], 目前已在新能源汽车、航空航天、矿用电机车等众多领域得到了广泛应用^[4]。然而要实现开关磁阻电机的高性能调速控制, 尤其是针对某些高动态负荷如矿井提升机、海洋绞车主动升沉补偿控制系统等, 要实现这种基于变速变负载工况下的高性能调速控制, 对其开展有效的调速控制方法研究是实现上述控制要求的前提。

目前在开关磁阻电机调速控制方面已开展了大量研究并提出了多种控制方法。其中, 文献[5]提出一种基于自适应神经网络的开关磁阻电机调速控制方法, 提高了系统的抗干扰能力; 文献[6]提出一种分数阶 PID^μ 的开关磁阻电机调速控制方法, 提高了系统的动态性能并抑制了其转矩脉动; 文献[7]通过将多优化联络算法与引力搜索算法结合并应用于开关磁阻电机的调速控制, 有效抑制了电机的转矩脉动并提高了其稳态性能; 文献[8]则提出一种采用基于非奇异终端滑膜控制的开关磁阻调速控制方法, 不仅提高了系统的抗干扰能力, 而且还改善了其动态和稳态性能; 文献[9]针对开关磁阻电机转矩脉动造成转速抖震的问题, 提出基于改进趋近率和滑膜观测器的开关磁阻电机调速控制方法, 明显提高了系统的调速控制精度; 文献[10]针对基于滑膜控制的开关磁阻电机调速系统设计了负载观测器, 有效提高了系统的带负载能力和动态性能。文献[11]针对常规滑膜控制器存在的抖振问题, 提出一种改进分数阶终端滑模控制方法, 在加减速、加减速负载工况下获得了良好的动态特性。文献[12]则针对开关磁阻电机变速跟踪的控制要求, 提出采用基于渐进稳态信号误差控制的调速控制方法, 有效提高了其变速跟踪的控制精度及带负载能力等。

然而上述针对开关磁阻电机调速系统所提出的各种控制方法, 虽然都取得了较好的控制效果, 但均是针对电机所带负载基本稳定下的调速控制; 而当电机处于变速变负载的运行工况下时, 则上述方法均难以满足其控制要求。为此, 本文针对基于变速变负载工况下开关磁阻电机的调速控制要求, 提出一种基于超螺旋控制算法的调速控制方法。介绍了变速变负载工况下采用超螺旋控制算法实现开关磁阻电机调速控制的具体设计方法, 并提出采用果蝇算法对其控制参数进行优化, 深入研究了其控制参数优化的具体实现过程, 最后对其控制效果进

行了仿真与实验验证, 结果证明了上述方法具有良好的动态与稳态性能。

1 开关磁阻电机数学模型

参考文献[13]可得开关磁阻电机电压平衡方程为:

$$u_p = R_p i_p + \frac{d\psi_p(i_p, \theta_p)}{dt} \quad (1)$$

式中: u_p 、 i_p 、 $\psi_p(i_p, \theta_p)$ 和 R_p 分别为电机相绕组的外加电压、电流、磁链和电阻; θ_p 为转子位置角。

开关磁阻电机瞬时转矩可表示为:

$$T_e = \frac{\partial W_p}{\partial \theta_p} \Big|_{i=const} \quad (2)$$

其中, 磁共能 W_p 的表达式为:

$$W_p = \int_0^i \psi_p(i_p, \theta_p) di_p \quad (3)$$

开关磁阻电机的机械运动方程为:

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (4)$$

式中: T_L 为开关磁阻电机的负载转矩; ω 为开关磁阻电机的实际转速; J 和 B 分别为开关磁阻电机的转动惯量和摩擦系数。

2 变速变负载工况下开关磁阻电机调速控制方法研究

根据变速变负载工况下开关磁阻电机的调速控制要求, 提出一种基于超螺旋控制算法的开关磁阻电机调速控制方法, 其基本原理如图 1 所示。该控制系统包含转速控制外环和转矩控制内环, 其基本原理为转速控制外环通过将开关磁阻电机的实际转速与其给定转速比较, 其偏差经超螺旋控制算法处理, 得到转矩控制内环的参考转矩; 转矩控制内环则根据所得参考转矩, 并将其与其实际转矩比较, 所得偏差经直接转矩控制算法处理, 得到其功率变换电路对应的控制信号; 根据所得控制信号对其功率变换电路进行控制, 即可实现开关磁阻电机实际转速对其时变给定转速的准确跟踪, 从而达到变速变负载工况下开关磁阻电机高性能调速的控制目的。

2.1 超螺旋控制器设计方法

超螺旋控制算法属高阶滑膜控制的一种^[14], 该算法通过二阶滑模面与非线性趋近率, 确保系统状态在有限时间内收敛于滑模面, 可有效抑制系统的高频抖振, 且具

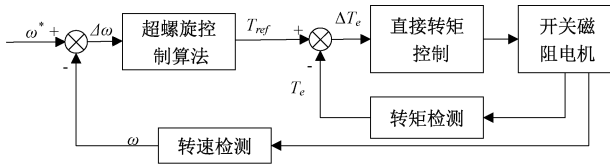


图 1 开关磁阻电机调速系统基本原理框图

Fig. 1 Block diagram of the basic principle of the speed regulation system of a SRM

有系统收敛速度快、控制参数少、鲁棒性强等特点,因而非常适合于开关磁阻电机调速系统的调速控制。其基本表达式为:

$$\begin{cases} \dot{s} = -\alpha |s|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(s) + \mu \\ \mu' = \beta \text{sgn}(s) \end{cases} \quad (5)$$

式中: \$\mu\$ 为中间变量; \$\alpha\$ 为幂次项趋近率增益; \$\beta\$ 为积分项趋近率。

根据超螺旋控制算法的基本原理,构建基于该算法的开关磁阻电机调速控制器。

1) 滑模面设计

参考文献[15]构建超螺旋控制算法的滑模面函数为:

$$s = c\Delta\omega + \Delta\omega' \quad (6)$$

式中: \$\Delta\omega\$ 为开关磁阻电机给定转速与实际转速的偏差; \$\Delta\omega'\$ 为转速偏差的一阶导数; \$c\$ 为滑模面系数,且满足 \$c>0\$。

根据开关磁阻电机的机械运动方程^[16],可得上述转速偏差的一阶导数 \$\Delta\omega'\$ 为:

$$\Delta\omega' = \frac{1}{J} (T_{ref} - T_e - B\Delta\omega) \quad (7)$$

式中: \$T_{ref}\$ 为开关磁阻电机的参考转矩。

将式(7)代入式(6),得滑模面函数的具体表达式为:

$$s = c\Delta\omega + \frac{1}{J} (T_{ref} - T_e - B\Delta\omega) \quad (8)$$

2) 趋近率设计

根据超螺旋控制算法趋近率特征,构建其趋近率为:

$$\dot{s} = -\alpha |s|^{\frac{1}{2}} \cdot \tanh\left(\frac{s}{\delta}\right) - \int \beta \cdot \tanh\left(\frac{s}{\delta}\right) dt \quad (9)$$

式中: \$\alpha\$ 为幂次项趋近率增益; \$\beta\$ 为积分项趋近率; \$\tanh(\cdot)\$ 为双曲正切函数; \$s\$ 为所构建的超螺旋控制算法滑模面函数; \$\delta\$ 为双曲正切函数曲率增益,且 \$\delta>0\$。其中 \$\alpha, \beta\$ 的取值需满足约束条件如下:

$$\begin{cases} \alpha > \frac{B}{J} \\ \beta = \sqrt{2 \cdot \frac{\alpha - B}{1 - B}} \end{cases} \quad (10)$$

3) 超螺旋调速控制器设计

根据上述所构建的滑模面函数和趋近率,可得到开关磁阻电机的参考转矩。

根据式(8)可得:

$$s' = \left(c + \frac{B}{J}\right) \cdot \Delta\omega' + J^{-1} \cdot T_{ref}' - J^{-1} \cdot T_e' \quad (11)$$

同时,根据滑膜函数可达性条件^[17],令 \$s' = v\$, 即:

$$\left(c + \frac{B}{J}\right) \cdot \Delta\omega' + J^{-1} \cdot T_{ref}' - J^{-1} \cdot T_e' = -\alpha |s|^{\frac{1}{2}} c\Delta\omega +$$

$$\frac{1}{J} (T_{ref} - T_e - B\Delta\omega) |^{\frac{1}{2}} \cdot \tanh\left(\frac{c\Delta\omega + \frac{1}{J} (T_{ref} - T_e - B\Delta\omega)}{\delta}\right) - \int \beta \cdot \tanh\left(\frac{c\Delta\omega + \frac{1}{J} (T_{ref} - T_e - B\Delta\omega)}{\delta}\right) dt \quad (12)$$

根据式(12)得开关磁阻电机的参考转矩 \$T_{ref}\$ 为:

$$T_{ref} = \int J \cdot \left[-\alpha |c \cdot \Delta\omega - \Delta\omega'|^{\frac{1}{2}} \cdot \tanh\left(\frac{c \cdot \Delta\omega - \Delta\omega'}{\delta}\right) - \int \beta \cdot \tanh\left(\frac{c \cdot \Delta\omega - \Delta\omega'}{\delta}\right) + \omega + \frac{B}{J} \omega' - \left(c + \frac{B}{J}\right) \Delta\omega' \right] \quad (13)$$

2.2 超螺旋控制算法控制参数优化方法

超螺旋控制算法应用于开关磁阻电机调速系统的控制效果,与其控制参数密切相关。为此,提出采用果蝇算法(fruit fly optimization algorithm, FOA)对其控制参数进行优化。该算法通过模拟果蝇的嗅觉搜索和视觉定位行为^[18],可实现全局与局部搜索的平衡,具有搜索效率高、算法简单等优势,为此本文提出采用 FOA 算法实现对超螺旋控制算法的控制参数进行优化。同时为了说明该优化算法的效果,将其与目前较常用的蚁群算法通过采用对 Schaffer 函数求解来进行对比分析^[19]。设两种算法的种群个数与最大迭代次数均为 100,其结果如表 1 所示。

表 1 两种算法的性能对比

Table 1 A comparison of the performance of the two algorithms

算法	计算精度/%	迭代完成时间/s
蚁群算法	99.82	0.58
果蝇算法	99.99	0.22

由表 1 可见,FOA 算法相对于蚁群算法,具有计算精度高、运算时间短等优势,因此本文提出采用该算法实现对超螺旋控制算法的控制参数进行优化,可望获得满意的优化效果。

以超螺旋控制算法中滑膜系数 \$c\$、幂次趋近率增益 \$\alpha\$、双曲正切函数曲率增益 \$\delta\$ 为优化对象,以开关磁阻电

机运行效率 η 、转矩脉动系数 ε 及开关磁阻电机实际转速与其给定转速间偏差 $\Delta\omega$ 为优化目标,构建优化对象与优化目标间的数学模型。

开关磁阻电机运行效率 η 、转矩脉动系数 ε 及开关磁阻电机实际转速与其给定转速间偏差 $\Delta\omega$ 的表达式分别为^[20-21]:

$$\begin{cases} \eta = \frac{T_{\text{ref}}\omega}{m \frac{\omega}{T_r} \int_0^{T_r/\omega} U_p i_p dt} \\ \varepsilon = \frac{T_e^*}{T_{\text{ref}}} \\ \Delta\omega = \omega_b - \omega \end{cases} \quad (14)$$

式中: U_p 、 i_p 、 ω_b 、 ω 分别表示开关磁阻电机的相电压、相电流、给定转速与实际转速; m 和 T_r 分别表示开关磁阻电机的相数与转子极距; T_e^* 表示开关磁阻电机转矩波动幅度。

根据上述所得优化对象与优化目标间的数学模型,构建其多目标优化适应度函数 F 为:

$$F = a_1(1 - \eta) + a_2\varepsilon + a_3\Delta\omega \quad (15)$$

式中: a_1 、 a_2 和 a_3 为权重系数,且满足 $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ 。

根据式(15)所示,提出采用 FOA 对超螺旋控制算法的相关控制参数进行优化,其优化流程如图 2 所示。

步骤 1) 参数设置,包括最大迭代次数 M 、种群规模 G 、优化目标范围 L 、果蝇飞行半径 R 、随机给定初代果蝇个体位置 (X, Y) 。其中,初代果蝇第 i 个个个体坐标为:

$$\begin{cases} x_{c,i,0} = L_c \cdot \text{random}() \\ y_{c,i,0} = L_c \cdot \text{random}() \\ x_{\alpha,i,0} = L_\alpha \cdot \text{random}() \\ y_{\alpha,i,0} = L_\alpha \cdot \text{random}() \\ x_{\delta,i,0} = L_\delta \cdot \text{random}() \\ y_{\delta,i,0} = L_\delta \cdot \text{random}() \end{cases} \quad (16)$$

式中: $(x_{c,i,0}, y_{c,i,0})$ 、 $(x_{\alpha,i,0}, y_{\alpha,i,0})$ 、 $(x_{\delta,i,0}, y_{\delta,i,0})$ 分别为果蝇个体的坐标; L_c 、 L_α 、 L_δ 分别为各优化目标的范围; $\text{random}()$ 表示 $[0, 1]$ 间的随机数, $i = 1, 2, 3, \dots, G$ 。

步骤 2) 根据式(15)计算初代果蝇各个体对应的适应度值,保留其最小值及对应的个体坐标,并将该个体坐标记为最优果蝇个体坐标 (X_c, Y_c) 、 (X_α, Y_α) 和 (X_δ, Y_δ) 。

步骤 3) 以所得最优果蝇个体坐标为圆心,以 R 为半径,更新下一代果蝇个体坐标。其中第 i 个果蝇个体坐标为:

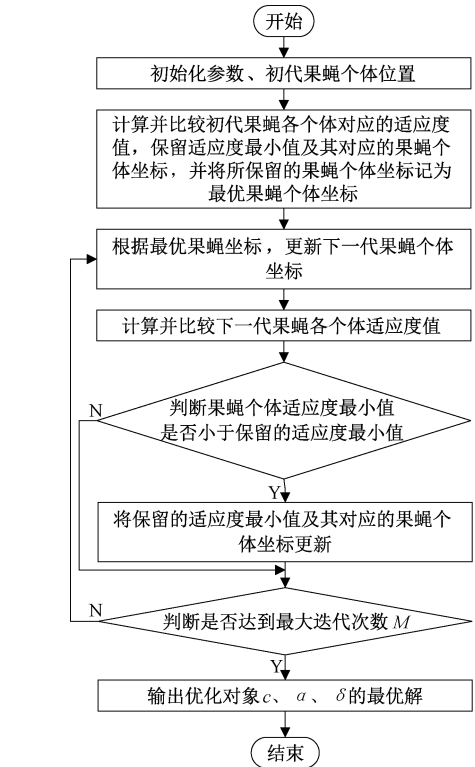


图 2 超螺旋调速控制参数优化设计流程

Fig. 2 Flow chart of the optimization design of supercoiled speed control parameters

$$\begin{cases} x_{c,i} = X_c + R \cdot (2 \cdot \text{random}() - 1) \\ y_{c,i} = Y_c + R \cdot (2 \cdot \text{random}() - 1) \\ x_{\alpha,i} = X_\alpha + R \cdot (2 \cdot \text{random}() - 1) \\ y_{\alpha,i} = Y_\alpha + R \cdot (2 \cdot \text{random}() - 1) \\ x_{\delta,i} = X_\delta + R \cdot (2 \cdot \text{random}() - 1) \\ y_{\delta,i} = Y_\delta + R \cdot (2 \cdot \text{random}() - 1) \end{cases} \quad (17)$$

步骤 4) 根据步骤 3) 所得下一代果蝇各个体坐标,采用式(15)计算并比较各个体对应的适应度值。

步骤 5) 比较步骤 4) 所得果蝇个体适应度最小值是否小于保留的适应度最小值,若是,则将保留的适应度最小值及其对应的果蝇个体坐标更新;否则,执行步骤 6)。

步骤 6) 判断迭代次数是否达到最大迭代次数 M ,若未达到,则迭代次数加 1 后,返回步骤 3); 否则,输出最优果蝇个体坐标,并计算优化对象 c 、 α 、 δ 的最优值,具体如下:

$$\begin{cases} c = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2} \\ \alpha = \sqrt{X_\alpha^2 + Y_\alpha^2} \\ \delta = \sqrt{X_\delta^2 + Y_\delta^2} \end{cases} \quad (18)$$

式中: X_c 和 Y_c 分别表示优化对象 c 的横、纵坐标; X_α 和

Y_{α} 分别表示优化对象 α 的横、纵坐标; X_{δ} 和 Y_{δ} 分别表示优化对象 δ 的横、纵坐标。

3 仿真分析

为了说明基于超螺旋控制算法的开关磁阻电机调速系统的控制效果,采用 MATLAB 对其进行仿真验证^[22],同时与目前应用较广泛的基于渐进稳态信号误差控制算法的调速控制方法进行对比仿真分析。开关磁阻电机采用 12/8 结构,其主要参数如表 2 所示,超螺旋控制算法及渐进稳态信号误差控制算法的相关控制参数分别如表 3 和 4 所示。

表 2 开关磁阻电机主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of SRM	
技术指标	参数
额定电压	270 V
额定功率	2.2 kW
转动惯量	0.001 3 kg·m ²
摩擦系数	0.002 N·m·s

表3 超螺旋控制算法相关控制参数

Table 3 Control parameters related to supercoil control algorithms	
参数名称	值
C	20
α	3 500
β	83.749 77

表 4 渐进稳态信号误差控制算法相关控制参数

Table 4 GSSEC algorithm related control parameters			
参数名称	值	参数名称	值
KT	6.592 37	K21	3.174 56
K11	1.294 39	K22	3.822 70
K12	2.436 40	K23	10.091 11
K13	5.786 34	K24	7.148 87
K14	4.011 25		

为了说明上述两种控制方法的效果,分别从稳态和动态两方面进行对比分析。

3.1 稳态分析

稳态分析在于验证开关磁阻电机在变速变负载工况下对时变给定转速的跟踪情况。

设电机时变给定转速取 $1\,200\sin(t)$ r/min,同时其负载转矩取 $8+3\sin(t)$ N·m,则两种控制方法所对应的电机实际转速波形如图 3 所示,相关结果则如表 5 所示。其中稳态控制精度用于表示开关磁阻电机实际转速对其时变给定转速的跟踪精度,其计算公式为:

$$\rho = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{\Delta\omega_i^2}}{\omega_b}$$

(19)

式中: ω_b 为开关磁阻电机时变给定转速幅值; $\Delta\omega_i$ 为第 i 次采集的开关磁阻电机实际转速与其给定转速间的偏差。

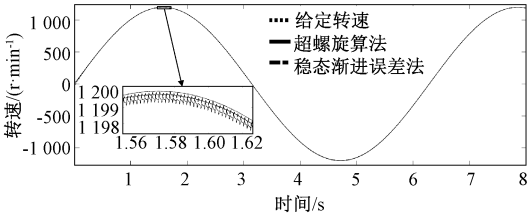


图 3 变速变负载工况下电机的转速波形

Fig. 3 The speed waveform of the motor under variable speed and variable load conditions

表 5 两种控制方法对应的稳态控制精度

Table 5 The steady-state control accuracy corresponding to the two control methods	
控制方法	稳态控制精度/%
超螺旋控制算法	98.522
渐进稳态信号误差控制算法	97.341

根据表 5 可知,超螺旋控制算法对应的稳态控制精度较渐进稳态信号误差控制算法提高了 1.213%,由此可见,开关磁阻电机在变速变负载工况下采用超螺旋控制算法,比渐进稳态信号误差控制算法具有更好的稳态控制精度。

3.2 动态分析

动态分析在于验证该调速系统的动态性能,并分别以给定转速突变与负载突变来检验其动态性能。

1) 给定转速突变

设电机初始给定转速为 1 000 r/min,在运行至 2 s 时给定转速突增至 1 500 r/min,在运行至 6 s 时又突降至 1 000 r/min,设负载转矩为 8 N·m,则两种控制方法所对应的转速波形如图 4 所示,其相应的过渡过程时间则如表 6 所示。

表 6 转速突变时两种方法对应的过渡过程时间

Table 6 The time of the transition process corresponding to the two methods when the rotational speed is abrupt (s)		
控制方法	转速突增	转速突减
超螺旋控制算法	0.41	0.35
渐进稳态信号误差控制算法	0.52	0.47

由图 4 与表 5 可见,在给定转速发生突增或突降时,超螺旋控制算法的过渡过程时间较渐进稳态信号误差控

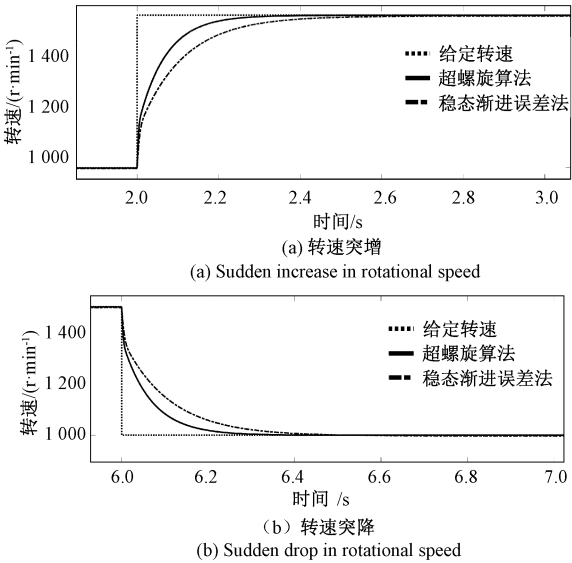


图 4 给定转速突变时电机的转速波形

Fig. 4 The rotational speed waveform of the motor at a given abrupt change in speed

制算法分别下降了 22.3% 及 26.6%, 由此可见超螺旋控制算法比渐进稳态信号误差控制算法具有更好的动态性能。

2) 负载突变

设电机以恒定转速运行, 并设其转速为 1 000 r/min, 电机负载转矩初值取 8 N·m, 在运行至 2 s 时突加负载至 13 N·m, 在运行至 6 s 时又突降至 8 N·m, 则两种控制方法所对应的转速波形如图 5 所示, 其对应的转速超调值及过渡过程时间则如表 7 所示。

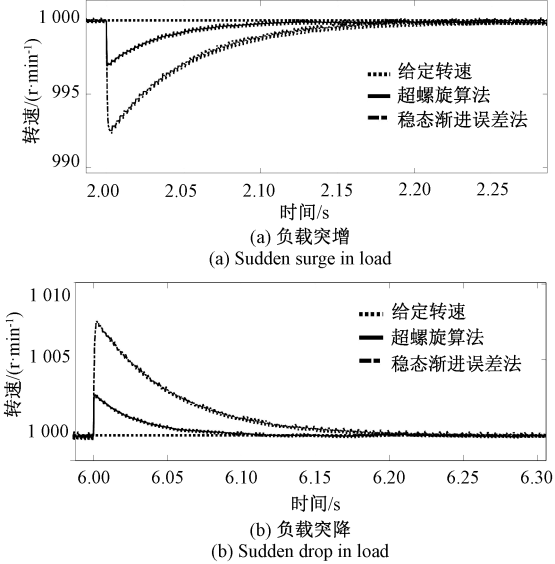


图 5 负载突变时电机的转速波形

Fig. 5 The rotational speed waveform of the motor when the load changes abruptly

表 7 负载突变时两种控制方法对应的性能指标

Table 7 Performance indicators corresponding to the two control methods when the load is abrupt

控制方法	转速超调量/(r·min ⁻¹)		过渡过程时间/s	
	负载	负载	负载	负载
	突增	突减	突增	突减
超螺旋控制算法	-3.05	2.61	0.14	0.11
渐进稳态信号误差控制算法	-7.84	6.92	0.22	0.18

由图 5 与表 7 可见, 在负载发生突增及突降时, 超螺旋控制算法的转速超调量较渐进稳态信号误差控制算法分别下降了 61.09% 及 62.28%, 其过渡过程时间则分别下降了 36.36% 及 38.88%。由此可见, 超螺旋控制算法比渐进稳态信号误差控制算法具有更好的带负载能力。

4 实验验证

为进一步验证变速变负载工况下开关磁阻电机调速系统采用超螺旋控制算法的效果, 研制了一套开关磁阻电机调速系统的实验装置, 如图 6 所示。包括 DSP 控制板、扭矩传感器、扭矩控制器、开关磁阻电机、制动器、扭矩功率仪、PC 等。

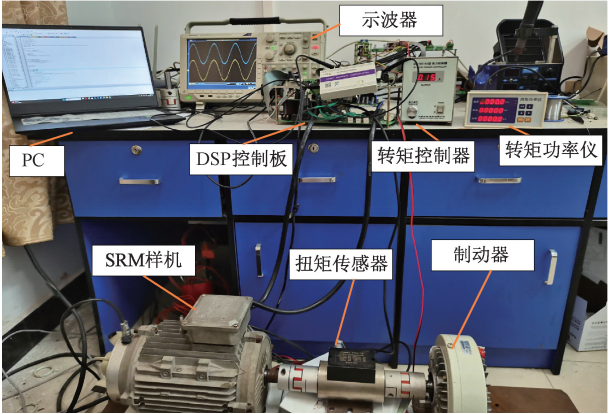


图 6 控制系统实验平台

Fig. 6 Control system experimental platform

为便于与仿真结果进行对比分析, 实验中相关参数设置与仿真时一致, 实验过程也按稳态性能实验和动态性能实验两种情况进行, 同时与渐进稳态信号误差控制算法进行对比分析。

4.1 稳态性能实验

如上文所述, 稳态性能实验相关参数设置与仿真时一致, 则所得电机实际转速波形与实验结果分别如图 7 和表 8 所示。

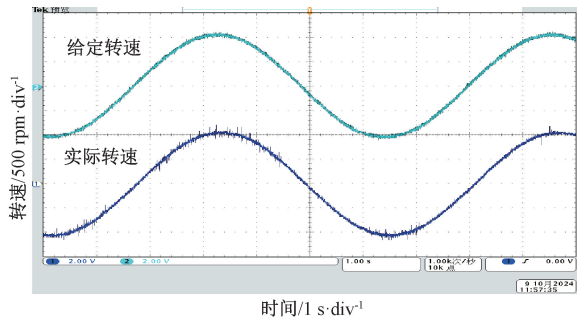


图 7 变速变负载工况下电机的转速波形

Fig. 7 The speed waveform of the motor under variable speed and variable load conditions

表 8 变速变负载工况下电机的稳态控制精度

Table 8 Steady-state control accuracy of the motor under variable speed and variable load conditions

控制方法	稳态控制精度/%
超螺旋控制算法	97.221

4.2 动态性能实验

同样,动态性能实验也分别按给定转速突变与负载突变两种情况进行。

1) 给定转速突变

相关参数设置与仿真分析时一致,则所得电机转速波形与实验结果分别如图 8 和表 9 所示。

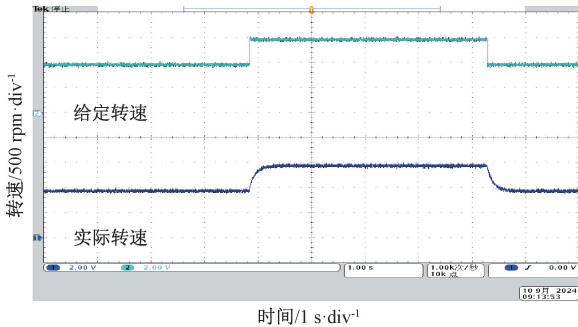


图 8 给定转速突变时电机的转速波形

Fig. 8 The rotational speed waveform of the motor at a given abrupt change in speed

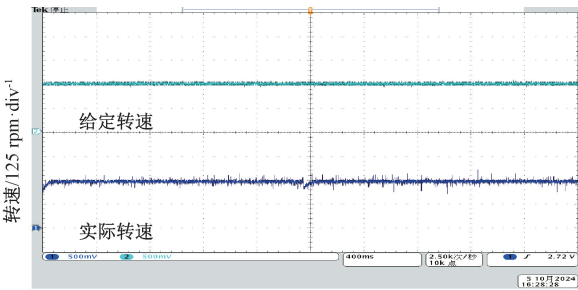
表 9 给定转速突变时的过渡过程时间

Table 9 The time of the transition process at a given sudden change in rotational speed (s)

控制方法	转速突增	转速突减
超螺旋控制算法	0.6	0.5

2) 负载突变

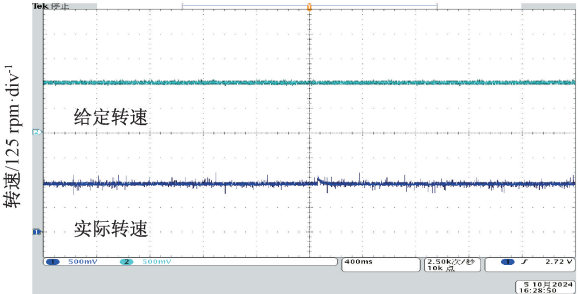
相关参数设置与仿真分析时一致,其电机转速波形与实验结果分别如图 9 和表 10 所示。



时间/400 ms·div⁻¹

(a) 负载突增

(a) Sudden surge in load



时间/400 ms·div⁻¹

(b) 负载突降

(b) Sudden drop in load

图 9 负载突变时电机的转速波形

Fig. 9 The rotational speed waveform of the motor when the load changes abruptly

表 10 负载突变时对应的性能指标

Table 10 Performance metrics in the event of a sudden load change

控制方法	转速超调量/($r \cdot \min^{-1}$)		过渡过程时间/s	
	负载突增	负载突减	负载突增	负载突减
超螺旋控制算法	-10	7	0.2	0.1

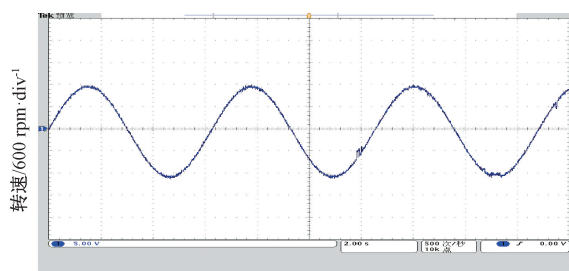
4.3 对比分析

为进一步说明超螺旋控制算法的效果,将其与渐进稳态信号误差控制算法进行对比实验分析^[12]。设定开关磁阻电机的转速为 $1200\sin(t)$ r/min、负载转矩取 $2\text{ N}\cdot\text{m}$,则两种控制算法所对应的电机转速波形如图 10 所示,其稳态控制精度则如表 11 所示。可见,相对于渐进稳态信号误差控制算法,采用超螺旋控制算法所得开关磁阻电机的稳态控制精度提高了 1.16%,由此进一步验证了开关磁阻电机采用超螺旋调速控制算法的有效性。

表 11 两种控制算法对应的稳态控制精度

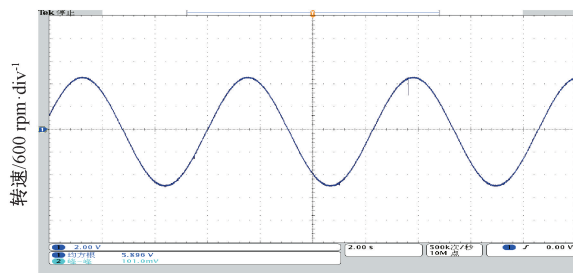
Table 11 The steady-state control accuracy corresponding to the two control algorithms

控制方法	稳态控制精度/%
超螺旋控制算法	98.01
渐进稳态信号误差控制算法	96.89



(a) 渐进稳态信号误差控制算法

(a) Gradual steady state control signal-error control



(b) 超螺旋控制算法

(b) Super helical control algorithm

图10 两种控制算法所对应的电机转速波形

Fig. 10 The motor speed waveform corresponding to the two control algorithms

5 结 论

针对开关磁阻电机基于变速变负载工况下的高性能调速控制要求,提出一种基于超螺旋控制算法的开关磁阻电机调速控制方法。建立了开关磁阻电机的数学模型,深入研究了开关磁阻电机在变速变负载工况下采用超螺旋控制算法的具体设计方法,并提出采用果蝇算法对其控制参数进行优化,最后通过仿真与实验对其效果进行了验证,同时与目前得到广泛应用的渐进稳态误差控制算法进行了对比分析,结果表明,针对变速变负载工况下的开关磁阻电机调速系统采用超螺旋控制算法,相对于渐进稳态信号误差控制算法具有更好的稳态和动态性能,因而具有较好的应用价值。

参考文献

- [1] 徐萌,周玉祥,徐海,等. 基于改进粒子群算法的开关磁阻电机本体优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4): 131-141.
- XU M, ZHOU Y X, XU H, et al. Ontology optimization of switched reluctance motor based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4): 131-141.

- [2] LONG Y, DU J. Adaptive position control strategy of SRM-based ema system for precision position tracking[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(3): 4680-4691.
- [3] 李宗霖,陈昊,戚湧,等. 基于自抗扰滑模控制的开关磁阻电机转矩分配控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(18): 5639-5656.
- LI Z L, CHEN H, QI Y, et al. Torque sharing function control strategy for switched reluctance motor based on active disturbance rejection sliding mode control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(18): 5639-5656.
- [4] 张小平,周艳红,张铸. 矿用电机车开关磁阻电机传动系统控制策略研究[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(11): 2771-2776.
- ZHANG X P, ZHOU Y H, ZHANG ZH. Research on control strategy of switched reluctance motor drive system for mine electric locomotive [J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(11): 2771-2776.
- [5] 李存贺,王国峰,李岩,等. 开关磁阻电机直接自适应神经网络控制[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(1): 29-36.
- LI C H, WANG G F, LI Y, et al. Direct adaptive neural network control of switched reluctance motors [J]. Journal of Electrical Machines and Control, 2018, 22(1): 29-36.
- [6] 刘勇智,李杰,鄢成龙. 开关磁阻电机最优分数阶PID^μ控制器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 105-110.
- LIU Y ZH, LI J, SHAN CH L. Design of optimal fractional-order PID^μ controller for switched reluctance motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1): 105-110.
- [7] SAHA N, DANDA S. Speed control with torque ripple reduction of switched reluctance motor by hybrid many optimizing liaison gravitational search technique [J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2017, 20(3): 909-921.
- [8] SUN X, FEN L, ZHU Z, et al. Optimal design of terminal sliding mode controller for direct torque control of SRMs [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 8(1): 1445-1453.
- [9] SUN X, WU J, LEI G, et al. Torque ripple reduction of SRM drive using improved direct torque control with sliding mode controller and observer [J]. IEEE

- Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(10): 9334-9345.
- [10] 韩国强,陆哲,吴孟霖,等. 基于改进滑模控制策略的开关磁阻电机直接瞬时转矩控制方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(22): 5740-5755.
- HAN G Q, LU ZH, WU M L, et al. Direct instantaneous torque control method for switched reluctance motor based on an improved sliding mode control strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(22): 5740-5755.
- [11] 高洁,王华宇,徐萌. 开关磁阻电机的分数阶终端滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(2): 142-150.
- GAO J, WANG H Y, XU M. Improved terminal sliding mode control strategy of switched reluctance motors based on fractional calculus [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(2): 142-150.
- [12] 严颖,张小平,姜海鹏,等. 基于 GSSEC 的开关磁阻电机驱动的海洋绞车主动升沉补偿控制方法[J]. 工程设计学报, 2021, 28(2): 132-140.
- YAN Y, ZHANG X P, JIANG H P, et al. Active heave compensation control method for offshore winch driven by switched reluctance motor based on GSSEC[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2021, 28(2): 132-140.
- [13] 张磊,刘闯,韩守义. 基于全周期电流包络线开关磁阻电机无位置传感器技术[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(11): 109-117.
- ZHANG L, LIU CH, HAN SH Y. Sensorless of switched reluctance motor drives based on full cycle current envelope [J]. Journal of Electrical Machines and Control, 2019, 23(11): 109-117.
- [14] 陈辉,毕晓文,袁雷,等. 应用于 PMSM 调速系统的改进超螺旋滑模控制[J]. 电力电子技术, 2024, 58(6): 37-39.
- CHEN H, BI X W, YUAN L, et al. Improved super-twisting sliding-mode control applied to PMSM speed control system[J]. Power Electronics, 2024, 58(6): 37-39.
- [15] 赵静,林智昌,姜斌,等. 永磁同步直线电机的分数阶超螺旋滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(7): 1224-1232.
- ZHAO J, LIN ZH CH, JIANG B, et al. Fractional order super-twisting sliding mode control of permanent magnet synchronous linear motor [J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(7): 1224-1232.
- [16] 蔡辉,韩焱杰. 基于分段电感的开关磁阻电机转子位置估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7288-7298.
- CAI H, HAN Y J. Rotor position estimation of switched reluctance motor based on subregional inductance [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7288-7298.
- [17] 李佳玮,刘明,曹喜滨. 基于干扰观测器的航天器非奇异终端二阶滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(11): 1972-1980.
- LI J W, LIU M, CAO X B. Non-singular terminal second-order sliding mode control of spacecraft on disturbance observer [J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(11): 1972-1980.
- [18] 张淑清,要俊波,张立国,等. 基于改进深度稀疏自编码器及 FOA-ELM 的电力负荷预测[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 49-57.
- ZHANG SH Q, YAO J B, ZHANG L G, et al. Power load forecasting based on improved deep sparse auto-encoder and FOA-ELM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 49-57.
- [19] 周鲜成,李鹏飞,李杰,等. 基于宽带相干信号子空间方法的超声导波长骨评价[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 166-176.
- ZHOU X CH, LI P F, LI J, et al. Evaluation of long bone with ultrasound guided waves using wideband coherent signal subspace method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 166-176.
- [20] 李俊乐,张小平,容毅. 基于改进 NSGA-II 算法的开关磁阻电机再生制动优化控制方法[J]. 信息与控制, 2022, 51(5): 533-541.
- LI J L, ZHANG X P, RONG Y. Regenerative braking optimization control method of switched reluctance motor based on improved NSGA-II Algorithm[J]. Information and Control, 2022, 51(5): 533-541.
- [21] 张光辉,张小平,李俊乐,等. 开关磁阻电机再生制动控制方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 187-194.
- ZHANG G H, ZHANG X P, LI J L, et al. Regenerative braking control method for switched reluctance motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 187-194.
- [22] 郭强,何黎鹏,肖蕙蕙,等. 一种实现电流型 PWM 整流器直流侧电压波动抑制的控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 313-324.
- GUO Q, HE L P, XIAO H H, et al. Control method for suppressing DC side voltage fluctuation of current-source

PWM rectifier [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6) :313-324.

作者简介



张奕璇, 2022 年于西京学院获得学士学位, 现为湖南科技大学硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动、智能控制等。

E-mail: 1483383962@qq.com

Zhang Yixuan received his B. Sc. degree in 2022 from Xijing University. He is now a M. Sc. candidate of Hunan University of Science and Technology. His main research interests include power electronics and electrical driver system, intelligent control.



张小平 (通信作者), 1987 年于西安交通大学获得学士学位, 2009 年于中南大学获得博士学位, 现为湖南科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动、智能控制等。

E-mail: zxp836@163.com

Zhang Xiaoping (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 1987, received his Ph. D. Degrees from Central South University in 2009. He is now a professor and Ph. D. supervisor in Hunan University of Science and Technology. His main research interests include power electronics and electrical driver system, intelligent control.