

# 基于扩展滑模观测器惯量辨识的 绞车参数自适应控制

梁红<sup>1</sup>, 钱仁军<sup>1</sup>, 程勇军<sup>2</sup>, 胡江玉<sup>1</sup>, 张曼<sup>1</sup>

(1. 中国人民解放军92728部队, 上海 200436;

2. 中国船舶集团有限公司第七二二研究所, 湖北 武汉 430205)

**摘要:**作为一种由电机驱动的绞车, 电动绞车具有更加优异的收放缆控制性能。然而, 在收放缆的过程中, 电动绞车的卷筒惯量会随着缆绳存量的变化而变化。这种未知的惯量变化会导致电机转速控制参数失配, 进而导致电动绞车在收缆或放缆时的控制性能下降。结合系统对高精度和高转速的需求, 需要一种基于惯量辨识的控制算法来满足需求。首先, 根据电机的数学模型和控制系统的传递函数, 分析了转动惯量对控制系统的影响。然后, 提出了一种基于扩展滑模观测器的惯量辨识方法对系统的转动惯量进行实时辨识, 并利用辨识结果对速度环的PI参数进行实时调整。最后, 通过仿真和实验验证了所提方法的可行性和优越性。

**关键词:** 电动绞车; 永磁同步电机; 自适应控制; 惯量辨识

**中图分类号:** TM92      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd26503

## Adaptive Parameter Control of Winch System Based on Inertia Identification Using Extended Sliding Mode Observer

LIANG Hong<sup>1</sup>, QIAN Renjun<sup>1</sup>, CHENG Yongjun<sup>2</sup>, HU Jiangyu<sup>1</sup>, ZHANG Man<sup>1</sup>

(1.No.92728 Troops of PLA, Shanghai 200436, China;

2.Wuhan Maritime Communication Research Institute, Wuhan 430205, Hubei, China)

**Abstract:** As a kind of winch driven by motor, electric winch has more excellent performance of cable control. However, in the process of retracting and releasing the cable, the drum inertia of the electric winch will change with the change of the cable stock. This unknown inertia change will lead to mismatching of motor speed control parameters, which will lead to a decline in the control performance of the electric winch when drawing or releasing cables. A control algorithm based on inertia identification is needed to meet the demand of high precision and high speed. Firstly, according to the mathematical model of the motor and the transfer function of the control system, the influence of moment of inertia on the control system was analyzed. Then, a new inertia identification method based on extended sliding mode observer was proposed to identify the moment of inertia of the system in real time. The PI parameters of the speed ring were adjusted in real time by using the identification results. Finally, the feasibility and superiority of the proposed method were verified by simulation and experiment.

**Key words:** electric winch; permanent magnet synchronous motor (PMSM); adaptive control; inertia identification

绞车作为国防战略中的一种重要装备, 其性能的优劣将直接影响到人员救生、高空作业和物资投放等任务的成败<sup>[1-4]</sup>。绞车主要由机械传动和驱动两部分组成, 机械传动结构主要是齿轮传动和螺纹传动, 决定了绞车系统的排缆方式和精度; 驱动部分为绞车系统提供稳定的动力来源,

驱动的响应速度和稳定性为绞车系统的安全稳定运行提供了保障<sup>[5-8]</sup>。

随着电气化时代的到来以及半导体行业的飞速发展, 传统液压绞车因其液压油泄露严重、拆装不便等缺点已逐步被用户所抛弃, 取而代之的便是电动绞车。永磁同步电机具备结构简单、

体积小、效率高等特点,很适合作为电动绞车的动力来源。随着电力电子开关电源技术的发展,电机控制方式的实现也变得更加灵活,考虑到绞车系统对电机转速稳定性、响应速度和转矩的要求较高,目前主流的方法是采用基于PI控制器的矢量控制方法,并采用根据电机转矩特性而设计的最大转矩电流比等方法作为辅助控制策略<sup>[9-11]</sup>。然而,这种传统的控制方法并没有考虑到绞车系统在运行过程中转动惯量的变化,转动惯量的变化将导致被控对象与控制参数的不匹配,这种不匹配会使控制系统动态性能下降。本文对惯量辨识和参数自适应展开研究,解决了电动绞车系统在运行过程中由于惯量变化带来的控制参数不匹配问题。

## 1 转动惯量对系统的影响

绞车系统的工作主要是缆绳的回收和释放,滚筒缆绳缠绕的示意图如图1所示,无论是回收缆绳还是释放缆绳,都会引起电机转动惯量的变化,缆绳缠绕层数越多,系统惯量越大,随着层数的增多,惯量变化会变得剧烈,且惯量的变化是非线性的,如图2所示。

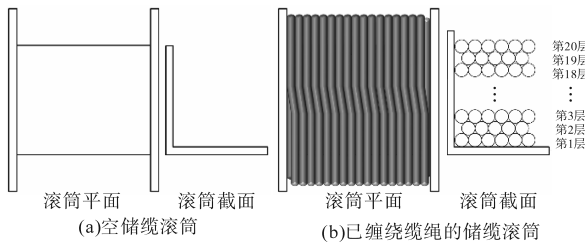


图1 滚筒卷缆示意图

Fig.1 Schematic diagram of drum winding

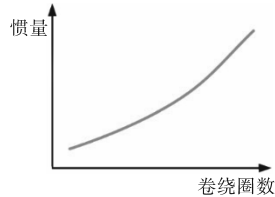


图2 转动惯量变化示意图

Fig.2 Schematic diagram of rotational inertia variation

针对本文的绞车系统而言,当缆绳完全缠绕至滚筒上时,系统的转动惯量会产生10倍以上的变化,转动惯量通过传动机构传递到电机上,电机轴端的转动惯量也会产生10倍以上的变化,这种变化对电机的控制是不利的。为分析转动惯量对电机的影响,需对系统进行数学建模,推导出电机在传统控制方法下的传递函数,再以转动

惯量为自变量分析不同转动惯量下对系统性能的影响。

### 1.1 电机数学模型

永磁同步电机在空间矢量控制中最常用的是  $d$ - $q$  坐标系,  $d$ - $q$  坐标系下的电机数学模型如下:

1)  $d$ - $q$  坐标系下电压方程如下:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\Psi}_f \\ \omega_e \Psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $u_d, u_q$  和  $i_d, i_q$  分别为  $d, q$  轴上定子电压和电流;  $R$  为定子电阻;  $L_d, L_q$  分别为定子直轴、交轴电感;  $\omega_e$  为电角速度;  $\Psi_d, \Psi_q$  分别为  $d, q$  轴磁链;  $\Psi_f$  为转子磁链。

2)  $d$ - $q$  坐标系下电磁转矩方程如下:

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q [(L_d - L_q) i_d + \Psi_f] \quad (2)$$

式中:  $p$  为电机极对数;  $T_e$  为电磁转矩。

3)  $d$ - $q$  坐标系下机械运动方程:

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + T_l + T_f \quad (3)$$

式中:  $\omega_m$  为转子机械角速度;  $T_l$  为负载扰动转矩;  $J$  为转动惯量;  $T_f$  为摩擦力矩。

### 1.2 转动惯量变化对系统影响分析

传统的控制方式主要是 SVPWM 和 PI 相结合,影响系统响应的主要因素是电流环和转速环,控制框图如图3所示。

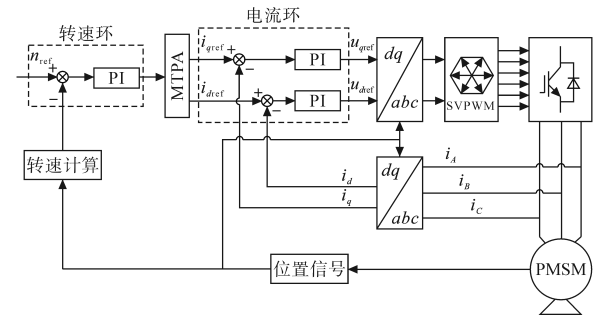


图3 传统控制策略框图

Fig.3 Block diagram of conventional control strategy

#### 1.2.1 电流环

电流环作为系统的内环,对动态响应性能有较高的要求,电流环的控制框图如图4所示。

电流环主要由三个环节组成:第一个环节是电流环PI调节器;第二个环节是电流环的延时环节,主要包括ADC采样延时、CPU计算延时和逆变器产生SVPWM延时,通常可等效成1.5个开关周期;第三个环节是电机的物理模型传递函数。

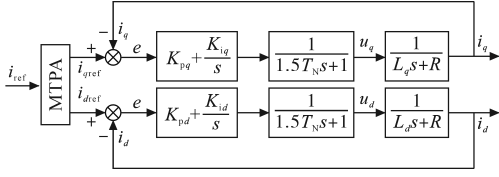


图4 电流环控制框图

Fig.4 Block diagram of current loop control

根据图4所示的电流环控制框图,可得电流环开环传递函数如下式所示:

$$\begin{cases} G_{eqo} = \frac{\frac{K_{iq}}{R} (\frac{K_{pq}}{K_{iq}} s + 1)}{s(1.5T_s s + 1)(\frac{L_q}{R} s + 1)} \\ G_{edo} = \frac{\frac{K_{id}}{R} (\frac{K_{pd}}{K_{id}} s + 1)}{s(1.5T_s s + 1)(\frac{L_d}{R} s + 1)} \end{cases} \quad (4)$$

为保证电流环具有良好的动态响应性能,可通过零极点对消,将式(4)中的大惯性环节抵消。以此,将式(4)配置成I型系统,则可得PI值如下式所示:

$$\begin{cases} K_{pq} = \alpha L_q \\ K_{iq} = \alpha R \\ K_{pd} = \alpha L_d \\ K_{id} = \alpha R \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\alpha$ 为设计参数,决定系统的响应时间,增大 $\alpha$ 将加快响应速度。将式(5)代入式(4)可得电流内闭环传递函数如下:

$$G_{cqc} = G_{cdc} = \frac{\alpha}{1.5T_s s^2 + s + \alpha} \approx \frac{\alpha}{s + \alpha} \quad (6)$$

因电气时间常数远小于机械时间常数,在分析转速环时通常将电流环等效为一阶惯性环节。

### 1.2.2 最大转矩电流比控制(MTPA)

根据图3,该系统采用MTPA控制算法<sup>[12-14]</sup>, $i_q$ 的参考值 $i_{qref}$ 由外环转速环调节, $i_d$ 的参考值 $i_{dref}$ 由MTPA根据 $i_{qref}$ 计算获得, $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$ 关系如下式所示:

$$i_{dref} = \frac{-\Psi_f + \sqrt{\Psi_f^2 + 4(L_d - L_q)^2 i_{qref}^2}}{2(L_d - L_q)} \quad (7)$$

### 1.2.3 转速环

转速环是系统的外环,根据图3可得出转速外环传递函数如图5所示。

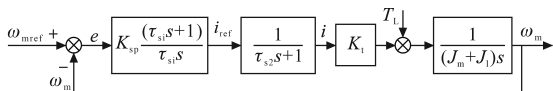


图5 转速环控制框图

Fig.5 Block diagram of speed loop control

转速环主要由四个环节组成:第一个环节为PI调节器;第二个环节为电流内闭环传递函数,此处等效为一阶惯性系统;第三个环节为电流和转矩的转换关系,可近似其为常数 $K_t$ ;第四个环节为电机运动方程传递函数,由式(3)的拉普拉斯变换得到。

根据图5所示的转速环控制框图,可得转速环开环传递函数如下式所示:

$$G_{so} = \frac{K_t(K_{sp} + \frac{K_{si}}{s})}{(T_{s2}s + 1)(J_m + J_l)s} \quad (8)$$

式中: $J_m$ 为电机转动惯量; $J_l$ 为负载转动惯量。

负载变化对于系统的扰动属于外部扰动,该扰动需要由转速环来抑制。在设计PI参数时,尽可能将其校正为II型系统,由闭环幅频特性峰值最小法则,得下式:

$$\begin{cases} \tau_{si} = hT_{s2} \\ K_2 = \frac{h + 1}{2h^2 T_{s2}^2} \end{cases} \quad (9)$$

在典型的II型系统中,定义 $h$ 为中频宽,取5时性能最佳,若取转速环截止频率为 $\omega_s$ ,则 $K_2 = \omega_s / \tau_{si}$ ,由此可设计转速环PI值分别为

$$\begin{cases} K_{sp} = \omega_s \frac{J_m + J_l}{K_t} \\ K_{si} = \omega_s \frac{J_m + J_l}{K_t h T_{s2}} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知,可根据所需开环截止频率设计转速环PI参数值。对于绞车系统而言,随着缆绳在滚筒上的缠绕层数的不同,电机的负载转动惯量 $J_l$ 会发生较大的变化。转动惯量的大范围变化所引起的转速环PI参数不匹配的问题会影响系统的动态响应,特别是在高速重载的工况下。过于严重的系统波动可能会导致乱缆甚至是控制失稳,这对于绞车系统的稳定可靠运行是不利的。下面通过伯德图分析法分析转动惯量变化对响应速度的影响。

根据式(8),在同一PI参数下,分别绘制 $J_m + J_l$ ,  $J_m + 5J_l$ ,  $J_m + 10J_l$ ,  $J_m + 20J_l$ 下伯德图如图6所示。当转动惯量增大时,转速环的截止频率变小,相位裕度减小,若转动惯量变化幅度较大,系统的稳定性和快速性会受到较大影响。

综上,在绞车系统中,若转速环PI参数不变,随着转动惯量的累加,动态性能以及鲁棒性的下降可能会导致系统不稳定。为了观察绞车系统

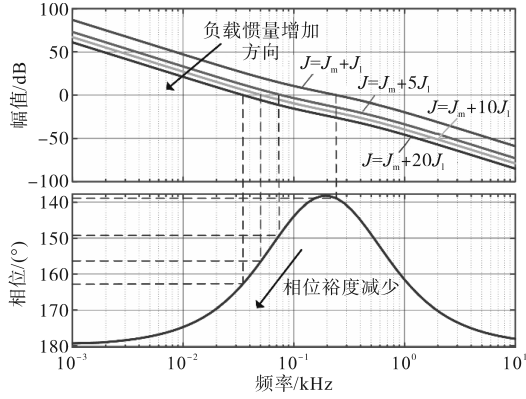


图6 相同PI参数不同惯量下的伯德图

Fig.6 Bode diagrams under different inertias  
with identical PI parameters

转动惯量的变化,本文提出了一种惯量辨识算法来观测电机轴端的转动惯量,并根据观测到的转动惯量对控制参数进行调整。

## 2 惯量辨识及参数自适应

根据式(10)可知,转速环控制参数与负载的转动惯量有关。就绞车系统而言,机械结构和排缆方式又导致等效转动惯量叠加的非线性,对于这种复杂的时变系统,无法通过计算获取真实的转动惯量,故需要对惯量进行辨识。本文提出了一种应用于绞车系统的基于扩展滑模观测器的惯量辨识算法。

### 2.1 基于扩展滑模观测器的惯量辨识算法

由电机数学模型的机械方程式(3)可知,转动惯量主要与电磁转矩 $T_e$ 、负载转矩 $T_l$ 、摩擦力矩 $T_f$ 和机械角速度 $\omega_m$ 相关。其中,电磁转矩 $T_e$ 可由式(2)计算而来,负载转矩 $T_l$ 和机械角速度 $\omega_m$ 可由传感器得到,摩擦力矩 $T_f$ 可以通过空载实验获得,通常可写成下式:

$$T_f = B\omega_m + C \quad (11)$$

式中: $B$ 为黏滞摩擦系数; $C$ 为库伦摩擦系数。

为避免倒数运算产生的量化误差,令 $\gamma = 1/J$ ,式(3)可改写成下式:

$$\dot{\omega}_m = \gamma(T_e - T_l - T_f) \quad (12)$$

根据式(12),可建立扩展滑模观测器模型如下式所示:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}}_m = \hat{\gamma}(\hat{T}_e - \hat{T}_l - \hat{T}_f) + u \\ \dot{\hat{T}}_l = mu \\ \dot{\hat{\gamma}} = nu \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\hat{\omega}_m$ 为观测机械角速度; $\hat{T}_e$ 为观测电磁转矩; $\hat{T}_l$ 为观测负载转矩; $\hat{T}_f$ 为观测摩擦力矩; $\hat{\gamma}$ 为观测

转动惯量的倒数; $m, n$ 分别为转矩观测系数和惯量观测系数; $u$ 为扰动项, $u = k \operatorname{sgn}(s)$ , $k$ 为鲁棒性增益。开关函数 $\operatorname{sgn}()$ 如下式所示:

$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & s < 0 \\ 0 & s = 0 \\ -1 & s > 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$s = \hat{\omega}_m - \omega_m \quad (15)$$

式中: $s$ 为所选滑模面。

为消除式(14)所带来的振颤问题,通常将 $\operatorname{sgn}()$ 函数用 $\operatorname{sat}()$ 函数代替, $\operatorname{sat}(s)$ 函数如下:

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} 1 & s > \Delta s \\ \frac{s}{\Delta s} & -\Delta s \leq s \leq \Delta s \\ -1 & s < -\Delta s \end{cases} \quad (16)$$

参数辨识通常可在2~3个开关周期内完成,故可认为负载转矩 $T_l$ 和转动惯量 $J$ 为常数,在该条件下,可令 $e_1 = \hat{\omega}_m - \omega_m, e_2 = \hat{T}_l - T_l, e_3 = \hat{\gamma} - \gamma$ ,并结合式(12)和式(13)得到误差方程如下:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \hat{\gamma}(\hat{T}_e - \hat{T}_l - \hat{T}_f) - \gamma(T_e - T_l - T_f) + u \\ \dot{e}_2 = mu \\ \dot{e}_3 = nu \end{cases} \quad (17)$$

为证明观测转速 $\hat{\omega}_m$ 收敛于实际转速 $\omega_m$ ,根据李雅普诺夫函数 $V = s^2/2$ ,只需证明 $\dot{V} < 0$ 即可,由式(16)可得:

$$\dot{V} = s\dot{s} = s[\alpha + k \cdot \operatorname{sat}(s)] \quad (18)$$

其中  $\alpha = \hat{\gamma}(\hat{T}_e - \hat{T}_l - \hat{T}_f) - \gamma(T_e - T_l - T_f)$

由此可得鲁棒性增益 $k$ 需满足: $k < |\alpha|$ 。

由式(17)可知,负载转矩的误差方程 $e_2$ 和转动惯量的误差方程 $e_3$ 均与扰动项 $u$ 相关,可将式(17)的方程改写成如下形式:

$$\begin{aligned} u &= \gamma(T_e - T_l - T_f) - \hat{\gamma}(\hat{T}_e - \hat{T}_l - \hat{T}_f) + \hat{e}_1 \\ &= \gamma e_2 - e_3(\hat{T}_e - \hat{T}_l - \hat{T}_f) + D \end{aligned} \quad (19)$$

其中

$$D = \gamma(T_e - \hat{T}_e) + \dot{e}_1$$

由式(17)和式(19),将误差方程变为一阶微分方程,如下式所示:

$$\frac{dy_i}{dt} + P_i(t)y_i = Q_i(t) \quad (20)$$

$$\begin{cases} \frac{de_2}{dt} - m\gamma e_2 = -m(\hat{T}_e - \hat{T}_l - \hat{T}_f)e_3 + mD \\ \frac{de_3}{dt} + n(\hat{T}_e - \hat{T}_l - \hat{T}_f)e_3 = n\gamma e_2 + nD \end{cases} \quad (21)$$



据此,可得:

$$\begin{cases} P_2(t) = -m\gamma \\ Q_2(t) = -m(\hat{T}_e - \hat{T}_l - \hat{T}_f)e_3 + mD \\ P_3(t) = n(\hat{T}_e - \hat{T}_l - \hat{T}_f) \\ Q_3(t) = n\gamma e_2 + nD \end{cases} \quad (22)$$

根据一阶微分方程解的一般形式:

$$y_i = e^{-\int P_i(t)dt} \left[ \int Q_i(t) e^{\int P_i(t)dt} dt + C_i \right] \quad (23)$$

其中,  $C_i$  为常数, 根据式(22)和式(23)可得:

$$\begin{cases} y_2 = C_2 e^{m\gamma t} + \frac{(\hat{T}_e - \hat{T}_l - \hat{T}_f)e_3 - D}{\gamma} \\ y_3 = C_3 e^{-n(\hat{T}_e - \hat{T}_l - \hat{T}_f)} + \frac{\gamma e_2 + D}{\hat{T}_e - \hat{T}_l - \hat{T}_f} \end{cases} \quad (24)$$

若要  $e_2$  和  $e_3$  收敛, 需满足  $P_i(t) > 0$ 。可设计扩展滑模观测器中的扩展项参数如下:  $m < 0, n = l \text{sat}(\hat{T}_e - \hat{T}_l - \hat{T}_f), l > 0$ 。据此, 指数项可收敛至 0, 从式(24)也可以发现,  $e_2$  和  $e_3$  相互耦合, 若其中一项出现振荡, 会导致另一项也出现振荡, 并相互激励, 为了抑制耦合项对  $\hat{\gamma}$  的影响, 需将  $l$  按下式设计:

$$l = l_0 \max(|\Delta\omega| - \sigma, 0) \quad (25)$$

其中

$$\Delta\omega = \omega_d - \omega$$

式中:  $\omega_d$  为给定转速;  $\sigma$  为激活阈值;  $l_0$  为控制率系数。

至此, 已证明了所设计的基于扩展滑模观测器的参数辨识方法的稳定性, 根据数字系统的要求, 可以将式(17)进行离散化处理得到方程组如下:

$$\begin{cases} \hat{\omega}_m(k+1) = \hat{\omega}_m(k) + \hat{\gamma}(k) [\hat{T}_e(k) - \hat{T}_l(k) - \hat{T}_f(k)] + u(k) \\ \hat{T}_l(k+1) = \hat{T}_l(k) + m \cdot u(k) \\ \hat{\gamma}(k+1) = \hat{\gamma}(k) + n \cdot u(k) \end{cases} \quad (26)$$

且有:

$$\begin{cases} n(k) = l(k) \cdot \text{sat}[\hat{T}_e(k) - \hat{T}_l(k) - \hat{T}_f(k)] \\ l = l_0 \cdot \max(|\Delta\omega(k)| - \sigma, 0) \end{cases} \quad (27)$$

负载转矩也可通过传感器测量, 这样就无需对负载转矩进行辨识, 不仅加快了惯量辨识的速度, 还消除了交叉耦合项的影响。根据上述方案可绘制惯量辨识流程图如图7所示。

## 2.2 转动惯量辨识仿真

根据2.1节所提辨识算法搭建数学模型, 并结合绞车系统运行的不同工况, 分别针对定惯量、变惯量和负载扰动三种情况进行仿真分析。

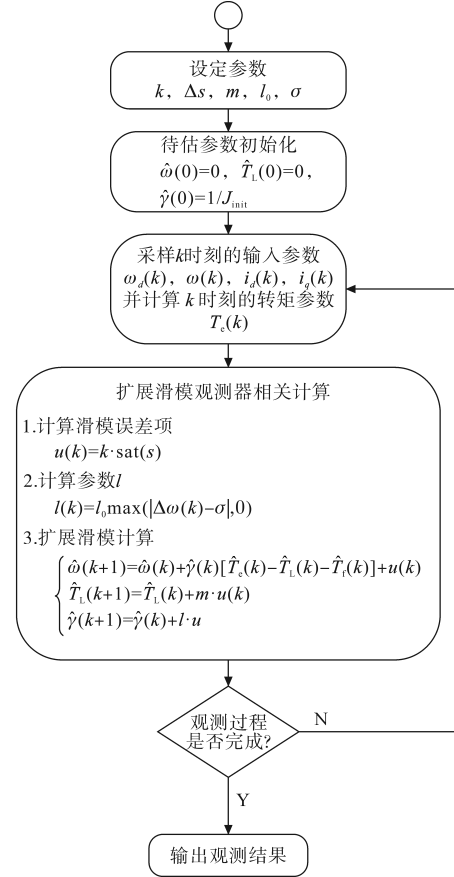


图7 基于扩展滑模观测器的惯量辨识流程图

Fig.7 Flowchart of inertia identification based on extended sliding mode observer

就给定转速而言, 选取一个固定转速上叠加低频正弦波的形式以减小系统运行过程中缆绳张力波动对惯量辨识带来的影响。上述三种工况下, 机械角速度  $\omega_d$  均按下式给定:

$$\omega_d = 10\pi + \frac{2}{3}\pi \sin(10\pi t) \varepsilon(t-3) \quad (28)$$

式(28)中, 在  $t=3$  s 时引入正弦波, 惯量辨识开始时间也选在  $t=3$  s 时刻。在定惯量辨识仿真中, 取转动惯量  $J=0.03 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $T_l=5 \text{ N}\cdot\text{m}$  得到仿真结果如图8所示, 此时辨识误差约为 1%。

在变惯量辨识仿真中, 按下式给定惯量值:

$$J = \begin{cases} 0.03 & t < 5 \text{ s} \\ 0.005t + 0.005 & 5 \leq t < 10 \text{ s} \\ 0.08 & t \geq 10 \text{ s} \end{cases} \quad (29)$$

取负载转矩  $T_l=5 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 得到仿真结果如图9所示, 观测器跟踪效果良好。

在负载扰动下的惯量辨识仿真中, 按式(29)给定惯量。在  $t=10$  s 时, 引入阶跃信号充当扰动, 得仿真结果如图10所示, 辨识结果会有一个较小的波动, 随后立刻收敛到实际值。

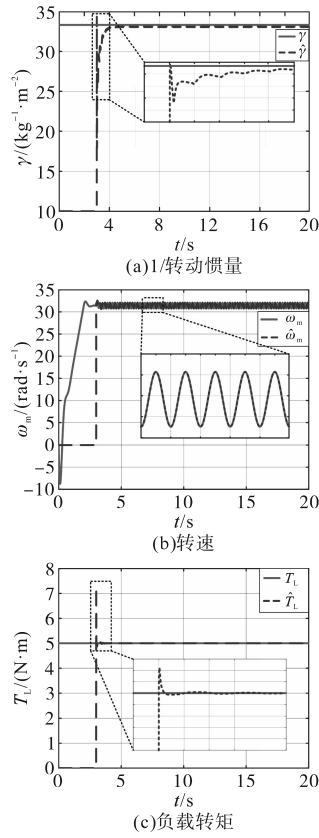


图8 定惯量辨识仿真结果

Fig.8 Simulation results of constant inertia identification

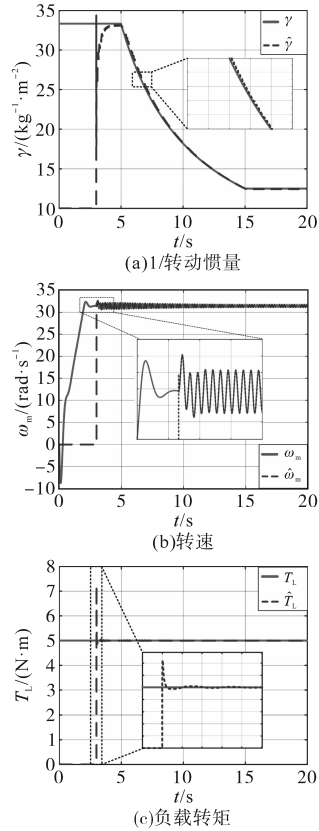


图9 变惯量辨识仿真结果

Fig.9 Simulation results of time-varying inertia identification

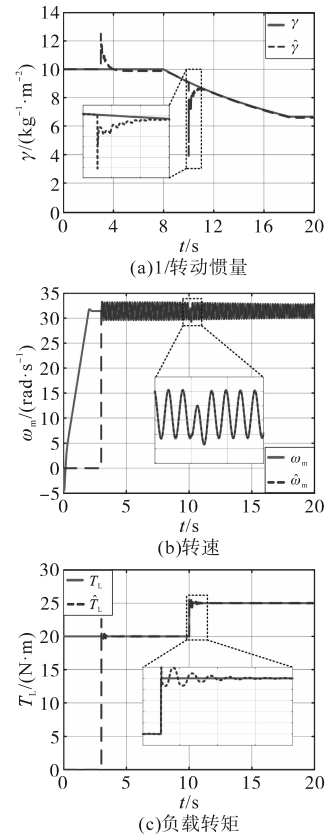


图10 变惯量-阶跃扰动辨识仿真结果

Fig.10 Simulation results of time-varying inertia identification under step disturbance

由上述仿真结果可得以下结论:1)不同情况下,该方法均可收敛至实际惯量值附近,证明本方法所辨识出的惯量是有效的;2)该方法在存在外部扰动时,能够迅速收敛到期望值附近,证明本方法具有一定的抗干扰能力;3)针对实际系统而言,惯量的变化速度并不快,故本方法可以满足实际应用的需求。

### 2.3 转速环参数自适应控制策略

由于本文所采取的惯量辨识方法的转速给定值存在正弦波动,为在绞车系统正常运行过程中不引入该波动,故采用离线辨识方法。

考虑到转动惯量是一个物理特性系数,与绞车系统所加负载大小与转速高低均无关,且每层缆绳不同圈数之间的惯量变化不大,可将同一层下不同圈数的缆绳进行分段处理进行辨识,再根据辨识结果绘制转动惯量与缆绳缠绕圈数的关系曲线。

结合第1节转速环PI参数设计方法与本节所辨识出的转动惯量结果,可得到基于惯量辨识的转速环自适应参数如下:

$$\begin{cases} K_{spi} = K_{sp} \frac{J_i}{J} \\ K_{sii} = K_{si} \frac{J_i}{J} \end{cases} \quad (30)$$

式中: $J$ 为初始状态转动惯量; $K_{sp}$ , $K_{si}$ 为初始状态转速环PI值; $J_i$ 为不同缆绳缠绕圈数下的转动惯量辨识值; $K_{spi}$ , $K_{sii}$ 为根据转动惯量整定出来的转速环PI参数。

综上,转速环PI参数自适应控制策略主要是以下两点:1)采用离线辨识方法获得绞车系统不同圈数下的惯量值;2)采用式(30)所示的转速环自适应参数替代传统的PI参数。

### 3 惯量辨识实验及高速收放缆实验

#### 3.1 惯量辨识实验验证

对电机进行惯量辨识来验证实际应用中的可行性。根据需求,分别对以下四种工况下的转动惯量进行辨识:工况a:空载运行;工况b:电机轴端增加惯量为 $0.003\ 698\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ 的惯量盘运行;工况c:带惯量盘并加 $0.5\ \text{N}\cdot\text{m}$ 的负载;工况d:加惯量盘并加 $1\ \text{N}\cdot\text{m}$ 的负载。

在工况a下,电机处于空载条件并运行在变转速指令幅值和变转速指令频率下进行参数辨识。在不同的转速指令幅值和频率下,辨识值均能快速收敛到实际值附近且误差小于1%,辨识结果如图11所示。

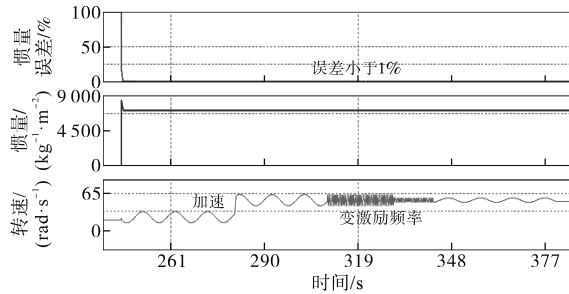


图11 空载辨识结果

Fig.11 Identification results under no-load condition

在工况b下,电机轴端增加惯量盘,分别在变转速指令幅值和变转速指令频率下进行参数辨识。在不同的转速指令幅值和频率下,辨识值均能快速收敛到实际值附近,所辨识出的惯量与转速指令值存在耦合关系,但均在实际值附近。由于采用离线辨识方法,在实际应用中可根据实际效果对偏差进行修正,辨识结果如图12所示。

在工况c和工况d下,电机轴端加惯量盘并分别施加 $0.5\ \text{N}\cdot\text{m}$ 和 $1\ \text{N}\cdot\text{m}$ 负载转矩,分别在变

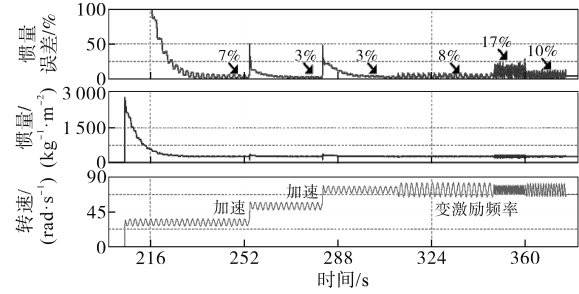


图12 加惯量盘辨识结果

Fig.12 Identification results with inertia disk added

转速指令幅值和变转速指令频率下进行参数辨识。在不同的转速指令幅值和频率下,辨识值均能快速收敛到实际值附近,辨识结果如图13和图14所示。

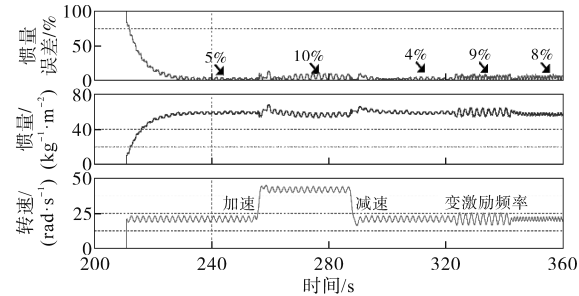


图13  $0.5\ \text{N}\cdot\text{m}$ 负载转矩下辨识结果

Fig.13 Identification results under  $0.5\ \text{N}\cdot\text{m}$  load torque

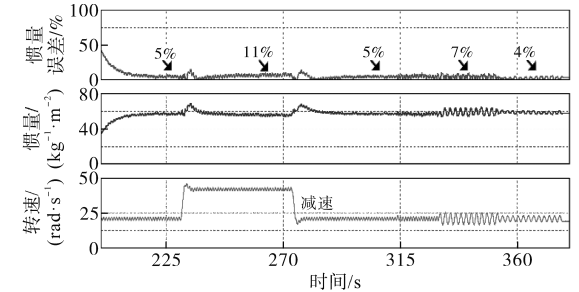


图14  $1\ \text{N}\cdot\text{m}$ 负载转矩下辨识结果

Fig.14 Identification results under  $1\ \text{N}\cdot\text{m}$  load torque

对比工况b、工况c和工况d下的辨识结果,可以发现,负载转矩的变化不会影响到转动惯量的辨识结果,同时也说明了该辨识方法的可靠性。但在实际应用中,仍需根据工程需求选取合适的激励信号,主要是为激励信号选取合适的频率与幅值。至此,已经验证了基于扩展滑模观测器的转动惯量辨识方法的可行性,可以通过离线辨识的方法获得转动惯量并结合第2节的参数自整定方法,来消除绞车系统运行过程中因转动惯量变化而带来的负面影响。

#### 3.2 高速收放缆实验

根据绞车系统所要求的工况进行实验样机平台搭建,如图15所示,实验平台主要由加载台、

控制器、制动电阻和电动绞车样机组成。实验所需收放缆绳长度达5 000 m,总排缆层数为17层。



图15 绞车系统实验平台

Fig.15 Experimental platform of the winch system

首先,进行400 kg负载、4 m/s的收缆实验验证,实验中上位机波形如图16所示。收缆过程中储缆电机和排缆电机运行效果良好,且换层、换相过程中未出现明显波动,缆绳排布位置几乎无误差。

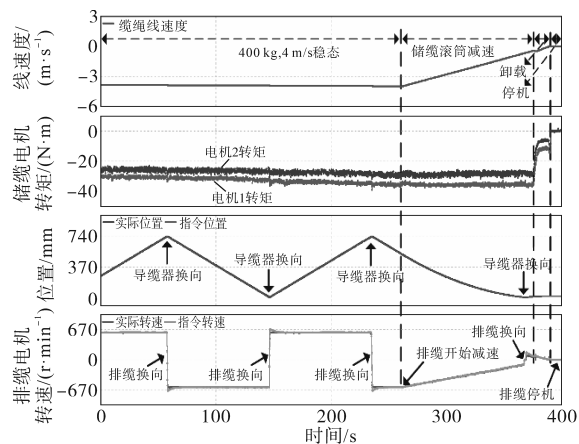


图16 400 kg负载、3 m/s的收缆数据

Fig.16 400 kg load, 3 m/s winding data

缆绳排布效果如图17所示,缆绳逐层均匀缠绕在滚筒上,未出现乱缆、嵌缆等情况。

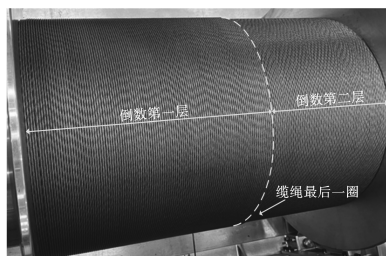


图17 缆绳排布效果

Fig.17 Cable arrangement status

随后,进行了200 kg负载、8 m/s的放缆实验验证,实验中上位机波形如图18所示。放缆过程中储缆电机和排缆电机运行效果良好,且换层、

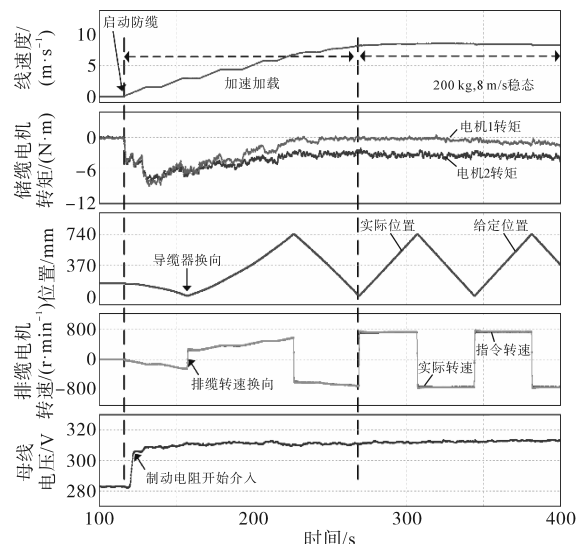


图18 200 kg负载、8 m/s放缆数据

Fig.18 200 kg load, 8 m/s unwinding data

换相过程中未出现明显波动,缆绳排布位置几乎无误差。

综上,无论是收缆还是放缆的实验结果均达到所要求,且实验过程中电机转速平稳无异常波动,缆绳排布整齐未出现乱缆、嵌缆问题。

## 4 结论

本文针对绞车系统运行过程中电机轴端转动惯量变化导致转速控制性能下降的问题,提出了一种基于惯量辨识的参数自整定方法。首先,对系统传递函数进行了分析,并推导出转动惯量与电机转速环之间的强耦合关系;然后,提出了一种基于扩展滑模观测器的惯量辨识方法,并给出了一种转速环参数自整定方法,该方法可以有效地消除由于转动惯量变化给系统带来的转速控制参数失配,从而保证电动绞车的控制性能;最后,仿真和实验验证了所提方法的可行性和优越性。但是,本文仅对绞车系统正常运行工况下的转动惯量进行了离线辨识,接下来将结合在线辨识方法和绞车运行过程中的一些突发工况进行深入研究。

## 参考文献

- [1] 熊瑛,夏薇,王林. 2023年国外导弹防御发展综述[J]. 战术导弹技术,2024(1):1-6,19.  
XIONG Ying, XIA Wei, WANG Lin. Overview of foreign missile defense development in 2023[J]. Tactical Missile Technology, 2024 (1): 1-6, 19.
- [2] 亦林. 从历代战斗机核心性能特征看国外六代机发展方向(上)[J]. 国防科技工业, 2023(3): 57-59.



- YI Lin. The development direction of foreign sixth generation fighter jets from the core performance characteristics based on the past jets[J]. Defence Science and Technology Industry, 2023 (3):57-59.
- [3] 丁力军,丁海生,尹立军. 现代航空拖靶系统的发展与应用[J]. 航空科学技术, 2006 (4):18-22.
- DING Lijun, DING Haisheng, YIN Lijun. Development and application of modern tow target system[J]. Aeronautical Science and Technology, 2006 (4):18-22.
- [4] 张宏,余雄庆. 高速航空拖靶的总体方案和气动外形优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(4):456-459.
- ZHANG Hong, YU Xiongqing. Conceptual design and aerodynamic optimization of tow target[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 40(4):456-459.
- [5] GRUBER W, STALLINGER W. Design and implementation of a 12.5 kW PMSM as paraglider towing winch[C]//2021 IEEE International Electric Machines & Drives conference, Hartford, CT, USA: IEEE, 2021:1-6.
- [6] 韩玉琪,郑小梅. 2022军用航空动力进展[J]. 航空动力, 2023 (1):10-14.
- HAN Yuqi, ZHENG Xiaomei. Progress of military aero engine in 2022[J]. Aerospace Power, 2023 (1):10-14.
- [7] 张明亮. 直升机绞车的发展概述[J]. 黑龙江科技信息, 2013 (19):74-74.
- ZHANG Mingliang. Overview of the development of helicopter winches[J]. Scientific and Technological Innovation Information, 2013(19):74-74.
- [8] PENG Y, ZHANG Z, ZHU X, et al. Research on electrical safety of live-line work of ground wire for UHV/EHV transmission line based on helicopter winch method[C]//2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference, Hefei, China: IEEE, 2023:2177-2182.
- [9] 李瑞,赵裔海,王俭朴. 基于永磁同步电机的矢量控制和直接转矩控制策略研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62 (5):109-112.
- LI Rui, ZHAO Yihai, WANG Jianpu. Comparative study on vector control and direct torque control based on permanent magnet synchronous motor[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2024, 62(5):109-112.
- [10] REN W, WU Y, DU R. A vector control system of PMSM with the assistance of fuzzy PID controller[C]//2020 39th Chinese Control Conference (CCC), Shenyang, China: IEEE, 2020:2205-2210.
- [11] ZHAO K, GAO H, ESMAELI A, et al. Study on a novel control system of PMSM[C]//2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China: IEEE, 2006:8231-8235.
- [12] 胡冰,崔晓光,位俊雷,等. 电动汽车用感应电机最大转矩电流比策略研究[J]. 电力电子技术, 2022, 56(9):97-100.
- HU Bing, CUI Xiaoguang, WEI Junlei, et al. Research on maximum torque per ampere strategy of induction motor for electric vehicle[J]. Power Electronics, 2022, 56(9):97-100.
- [13] 徐丽. 永磁同步电机最大转矩电流比求解方法研究[J]. 中国仪器仪表, 2020(12):79-83.
- XU Li. Research on solving method of maximum torque current ratio of permanent magnet synchronous motor[J]. China Instrumentation, 2020(12):79-83.
- [14] 崔涛,赵彦凯. 永磁同步电机线性分段最大转矩电流比近似控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(11):30-36.
- CUI Tao, ZHAO Yankai. Piece-wise linear maximum torque per ampere approximate control for permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control Application, 2019, 46(11):30-36.

收稿日期:2025-03-11

修改稿日期:2025-05-26