

混动电动轮自卸车电制动非线性变结构励磁控制

夏云清^{1,2}, 唐华平^{1†}, 谭青¹, 朱广辉²

(1. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湘潭电机股份有限公司, 湖南 湘潭 411101)

摘要:针对混动电动轮自卸车(HMDT)电制动励磁控制非线性和负载干扰较大的时变不确定性,对整车稳定性特别是电池寿命的影响,提出一种反馈精确线性化控制与滑模控制相结合的非线性变结构控制(NVSC)励磁控制策略.建立电制动励磁控制 SISO 二阶非线性模型,对模型精确线性化处理;应用滑模变结构控制设计了转速闭环励磁控制器,考虑矿山恶劣工况下为了削弱系统抖振、保证车速和制动电流稳定,设计了 Luenberger 负载干扰状态观测器. MATLAB 仿真与实验结果表明: NVSC 控制器相比 PID 控制除了具有动态性能好、响应快等优点外,在负载干扰波动下,电机转速和制动回馈电流保持稳定,系统鲁棒性好,保证了 HMDT 电池寿命和整车稳定.

关键词:混动电动轮自卸车;励磁控制;非线性变结构控制;状态观测器

中图分类号: TP 13

文献标志码: A

Nonlinear Variable Structure Excitation Control for Electric Brake of Hybrid Motor Dump Truck

XIA Yunqing^{1,2}, TANG Huaping^{1†}, TAN Qing¹, ZHU Guanghui²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Xiangtan Electric Machinery Co Ltd, Xiangtan 411101, China)

Abstract: As the uncertainty of the nonlinearity and load disturbance of the electric brake excitation control of Hybrid Motor Dump Truck (HMDT) impacts on vehicle stability, especially on battery life, a nonlinear variable structure excitation control strategy with feedback precision linearization control and sliding mode control was proposed. This paper established the Simple Input Simple Output (SISO) second-order nonlinear model of electric brake excitation control, and the nonlinear problem was transformed into a linear problem by the precise linearization of the nonlinear model. Then, the speed closed-loop excitation controller was designed with sliding mode variable structure control. At the same time, in order to weaken the system buffeting, ensure system stability under the bad working condition of the mine, and ensure stable speed and braking current, the Luenberger load disturbance state observer was designed. MATLAB simulation results show that, compared with PID controller, NVSC controller

* 收稿日期: 2018-05-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA041805), National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China (2012AA041805); 国家自然科学基金资助项目(51705143), National Natural Science Foundation of China (51705143)

作者简介: 夏云清(1984—), 男, 湖南澧县人, 中南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: huapingt-csu@163.com

has the advantages of dynamic performance and quick response. Under load disturbance fluctuation, the motor speed and braking feedback current are stable and the system is robust, which guarantees the battery life and HMDT stability.

Keywords: Hybrid Motor Dump Truck (HMDT); excitation control; Nonlinear Variable Structure Control (NVSC); state observer

大吨位 ($<100\text{T}$) 混合动力电动轮自卸车 (hybrid motor dump truck, HMDT) 在国内外属于新型车型, 不同于电制动回馈能量由制动电阻消耗的传统电动轮自卸车, HMDT 的电制动回馈电流为车载电池系统充电, 电池系统再适时为车辆提供补充功率, 并以此循环。一般电制动励磁控制是指对制动工况下牵引电动机的励磁进行闭环调节, 并保证车辆有足够的制动力和制动过程平缓, 限制制动电流以保护牵引电动机并实现对车速的理想控制^[1-3]。而 HMDT 的电制动励磁控制系统还需考虑过大的充电电流引起电池过热, 影响电池寿命^[4], 由于电动轮自卸车吨位大, 电制动功率相差 6~7 倍的变化与矿山 3%~18% 坡道的变化等恶劣工况, 都会引起负载干扰较大的时变不确定性, HMDT 电制动励磁控制系统如果不能及时响应和抑制突增干扰, 极易引起制动电流 (充电电流) 过载。

电传动自卸车的电制动一般采用线性 PID 控制。陈华光等^[5]通过试验数据或经验公式来计算励磁电流的期望值, 并采用 PID 励磁电流闭环控制, 这种控制方法没有考虑控制系统数学模型, 只依据实验数据统计规律, 具有一定的局限性, 系统动态性能欠佳。张英杰等^[6]研究了一种用于电动轮自卸车电传动的非线性 PID 控制器, 利用误差非线性函数和 PID 构造非线性控制器, 这种控制器一定程度上克服了不变增益参数不能适应过程特性变化的缺点。谭建豪等^[7]针对某 154T 电动轮自卸车采用经过遗传算法优化后的 PID 励磁控制, 并具有较高精度和较好适应性。但 PID 控制的系统鲁棒性差, 参数整定较复杂, 大多数情况下整定采用经验法, 伺服系统性能极易受参数变化及外部扰动的影响, 系统稳定性及动态品质不好^[8-10], 导致电制动回馈电流不稳定, 造成制动电阻接触器易烧损, 以及轮边减速器齿轮载荷不均。近年来, 滑模变结构控制因具有较强的鲁棒性以及系统参数要求低等优点受到越来越多学者的关注, 并在电机励磁控制中得到广泛应用^[11-13]。崔家瑞等^[14]提出了用于永磁同步电机的变

结构控制方法, 采用预设负载边界改进滑模控制。Boldea 等^[15]采用滑模控制与 PID 控制相结合的方法用于永磁同步电机励磁控制系统; Ahmed 等^[16]设计了一种用于直流电机滑模变结构控制策略, 但基于线性模型; 曾玲芝等^[17]为削弱永磁同步电机控制抖振, 设计了非线性滑模面与饱和函数相结合的变结构控制策略。上述提出的变结构控制基本应用于负载干扰波动小的工况, 例如电动汽车、电力系统等, 而且没有实时响应负载干扰, 也没有考虑系统本身的非线性。

实际上, 为了避免比一般电动汽车更大负载干扰带来的影响, 以及他励励磁控制系统本身的非线性, HMDT 的电制动励磁控制需有更好的动态稳定性和鲁棒性。本文提出了一种强鲁棒性的非线性变结构 (nonlinear variable structure control, NVSC) 励磁控制器, 并针对负载扰动问题引起的系统抖振及不稳定, 设计了 Luenberger 负载干扰状态观测器, 实时观测负载变化, 这种电制动 NVSC 励磁系统能更好地抑制负载较大时变扰动, 及时响应突增干扰, 避免电池充电电流过载引起的电池温升加大, 从而影响电池寿命。将仿真结果与 PID 控制进行比较, 验证了本文所设计的控制器具有快速性、动态稳定性等优点, 在较大的负载干扰波动下, 电机转速和制动回馈电流表现稳定, 系统鲁棒性好。

1 电制动励磁控制数学模型

某型号混合动力电动轮自卸车电气原理如图 1 所示, 两个直流牵引电动机在电制动工况时由串励改为他励发电机形式, 发出的电能直接回馈给电池系统。通过对牵引电动机励磁电流 I_f 的 PWM 控制, 可以改变其电枢电流 I_a 的大小, I_a 也是电池系统的充电电流, 从而改变电制动力 F_a , 使车辆减速或在下坡道上稳速运行。

不同于一般电机调速控制数学模型考虑励磁磁通不变, 或者自励发电机的励磁电流和电枢电流

具有线性关系,他励发电机的电制动时,励磁电流是独立调节变量,因此该电制动励磁控制系统为非线性系统.忽略电枢回路压降及电机的各种损耗,他励直流电机电制动瞬态的数学模型如下:

$$\begin{cases} L \frac{dI_a}{dt} = c_e k I_f n - I_a R_e \\ J \frac{dw}{dt} = c_m k I_f I_a - Bw - T_L \end{cases} \quad (1)$$

式中: c_m, c_e 是电机常数; L 是电机回路电感; k 是磁通量系数; I_a 是电枢电流; J 是电机转动惯量; I_f 是励磁控制电流; R_e 是制动回路总电阻; w 是电机角速度; B 是电机摩擦因数; T_L 是电机负载力矩.

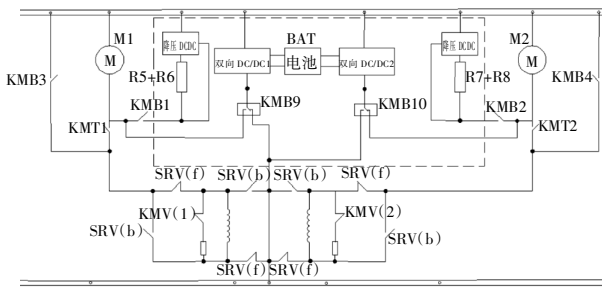


图1 HMDT电制动励磁控制主电路

Fig.1 Main circuit of electric brake excitation control of HMDT

2 NVSC 励磁控制器设计

HMDT在电制动弱磁调速过程中会引起发电机电枢电流频率和电磁转矩时变,同时,矿用车辆恶劣工况引起的负载扰动对系统具有较大的时变不确定性,引起电流突变引起对电池电压过载、车速不稳.这些特性及要求决定了HMDT电制动励磁控制系统需具有高稳定性和强鲁棒性,为满足要求,设计一种结合反馈精确线性化和滑模控制的非线性变结构励磁控制器,并设计了状态观测器实时测量负载干扰.

2.1 SISO 二阶非线性状态方程

电制动励磁控制目标是电机转速,采用电机转速闭环控制,通过传感器获得电机反馈转速信号 w ,与期望转速值 w^* 进行比较得到调节偏差 $e = w^* - w$,NVSC控制输出变量为 I_f . dI_f/dt 是电机励磁电流调节率,矿车通过可变电阻器的阻值变化控制励磁基准电压,从而控制励磁电流的大小,一般HMDT可变电阻器的阻值变化率为定值,即可取励磁电流调节率为 k_f ,则有 $I_f = k_f$.

对式(1)进行坐标变换.

令状态变量 $x_1 = e, x_2 = \dot{x}_1$,由式(1)可得:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= -\ddot{w} = -\frac{C_m k}{J} I_a I_f - \frac{C_m k}{J} \dot{I}_a I_f + \frac{B \dot{w}}{J} = \\ &= \frac{C_m C_e k^2}{2\pi L J} (x_1 - w^*) I_f^2 - \frac{RB}{LJ} x_1 - \frac{RJ + BL}{LJ} x_2 + \\ &= I_f^{-1} [Bk_f(x_1 - w^*) + Jk_f x_2 - T_L k_f] + \frac{RBw^* + BT_L}{LJ} \end{aligned} \quad (2)$$

则电制动励磁系统的SISO二阶非线性状态方程如下:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{RB}{LJ} & -\frac{RJ + BL}{LJ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{RBw^* + BT_L}{LJ} \end{bmatrix} + \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{C_m C_e k^2}{2\pi L J} (x_1 - w^*) & Bk_f(x_1 - w^*) + Jk_f x_2 - T_L k_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f^2 \\ I_f^{-1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

令 $u = I_f$,系统的输入变量为 $f(u) = [u^2 \ u^{-1}]^T$,输出变量为 $h(x) = x_1$.

2.2 非线性模型精确线性化

非线性模型反馈精确线性化理论中,非线性系统线性化前提是其控制变量必须是线性的,而该二阶非线性系统的控制变量是 $f(u)$,属于非线性函数,为满足精确化要求,需通过对输出变量函数 $f(u)$ 降阶线性化处理.

对非线性控制变量函数 $y = f(u)$,可在选定工作点 (u_0, u_0^2) 和 (u_0, u_0^{-1}) 处Taylor级数展开,并忽略其二次以上的高阶项得到线性控制变量函数:

$$y = f(u_0) + \left(\frac{df(u)}{du} \right)_{u=u_0} (u - u_0) \quad (4)$$

$$\text{则 } f(u) = [2uu_0 - u_0^2 \ \frac{2-u}{u_0}]^T.$$

把经线性处理后的 $f(u)$ 代入式(3),再将系统写成标准仿射非线性系统形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (5)$$

为简化计算,令

$$k_1 = -u_0^2 - \frac{RB}{LJ} + \frac{2Bk_f}{u_0}, k_2 = \frac{RJ + BL}{LJ} + \frac{2Jk_f}{u_0},$$

$$k_3 = -\frac{C_m C_e u_0 k^2}{2\pi L J} - \frac{Bk_f}{u_0}, k_4 = \frac{Jk_f}{u_0}, k_5 = \frac{T_L k_f}{u_0},$$

$$k_L = \frac{RBw^* + BT_L}{LJ} - u_0^2 w^* - \frac{2T_L k_f}{u_0}, \text{则有}$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_L \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ k_3(x_1 - w^*) + k_4x_2 + k_5 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$h(x) = x_1 \quad (8)$$

求李括号 $ad_f^{-1}g$ 来检验系统是否满足精确线性化条件,因该系统为二阶系统,需求李括号 $ad_f g$.

函数 $g(x)$ 的雅可比矩阵:

$$\frac{\partial g(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1(x)}{\partial x_2} \\ \frac{\partial g_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2(x)}{\partial x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

函数 $f(x)$ 的雅可比矩阵:

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ k_1 & k_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

可得到李括号 $ad_f g$:

$$ad_f g = \frac{\partial g(x)}{\partial x} f(x) - \frac{\partial f(x)}{\partial x} g(x) = \begin{bmatrix} k_3(w^* - x_1) - k_4x_2 - k_5 \\ (k_1k_4 - k_2k_3)x_1 + k_3x_2 + k_2k_3w^* + k_4k_1 - k_2k_5 \end{bmatrix} \quad (11)$$

有矩阵 D 为:

$$D = [g, ad_f g] \quad (12)$$

矩阵 D 的行列式:

$$\det D = [k_3(x_1 - w^*) + k_4x_2 - k_5]^2 \quad (13)$$

上式中 k_3, k_4 和 k_5 均不等于 0, 又因系统定义域 Ω 内电机角速度 $w \neq 0$, 即 $x_1 - w^* \neq 0$, $\det D \neq 0$, 可知矩阵 D 在定义域 Ω 上的秩 $n = 2$, 且其秩 n 等于系统阶数, 则向量场 $\{g(x), ad_f g(x)\}$ 满足对合性要求, 因此系统满足所有精确线性化条件.

通过微分几何反馈精确线性化设计方法, 利用李导数构造一个微分同胚 $z = \phi(x)$ 和反馈变换 $v = L_f^n h(x) + L_g d_f^{n-1} h(x) u$, 使非线性系统(5)化为完全线性可控的布鲁诺夫斯基标准型.

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = v \end{cases} \quad (14)$$

经过李导数计算:

$$L_f^2 h(x) = k_1x_1 + k_2x_2 + k_L \quad (15)$$

$$L_g L_f h(x) = k_3(x_1 - w^*) + k_4x_2 + k_5 \quad (16)$$

由式(13)可知, $L_g L_f h(x) \neq 0$, 则原系统控制量

$$u = \frac{v - L_f^2 h(x)}{L_g L_f h(x)} = \frac{v - (k_1x_1 + k_2x_2 + k_L)}{k_3(x_1 - w^*) + k_4x_2 + k_5} \quad (17)$$

通过反馈精确线性化处理, 原系统(5)的控制量可以通过反馈变换得到的线性系统(14)的新控制

量表示, 可通过对线性系统(14)进行滑模变结构控制设计, 最终求取原系统的控制律.

2.3 滑模变结构控制器设计

滑模变结构控制对系统外界干扰和参数摄动具有强鲁棒性, 但滑模控制缺点是系统在切换面附近的振荡运动会引起抖振^[8]. 本文通过设计干扰观测器来准确测量负载干扰, 保证系统稳定, 实现鲁棒控制; 同时减小系统切换增益, 相当于低通滤波器来消除系统抖振.

2.3.1 控制律设计

对于线性可控型系统(14), 取线性切换函数:

$$u = c_1z_1 + c_2z_2 \quad (18)$$

取有效减小抖振现象的指数趋近律:

$$\dot{s} = -Qsgns - ks \quad (19)$$

式中: $Q > 0; k > 0$.

所选的指数趋近律都满足 $ss' < 0$, 若选取 Lyapunov 函数为 $V = \frac{1}{2}s^T s$, 也满足 $\dot{V} < 0$, 则该滑模变结构控制系统存在且稳定.

结合式(18)、式(19)得反馈线性化后的控制律

$$v = \frac{c_1\dot{w} - Qsgns - ks}{c_2} \quad (20)$$

将上述代入式(17)可知原电制动励磁控制非线性滑模变结构系统的控制律:

$$u = \frac{Qsgns + ks + (k_2c_2 - c_1)\dot{w} + c_2k_1w + c_2k_L}{c_2k_3w} \quad (21)$$

因此, 通过调节控制增益 Q, k 可以保证变结构控制的快速性及有效削弱系统抖振.

2.3.2 负载干扰状态观测器设计

由式(21)知, 电制动励磁控制滑模变结构系统控制律中包含无法测量的负载干扰 T_L , 再加上矿山恶劣工况, 负载干扰 T_L 变化更无规律, 严重影响控制系统的稳定, 需设计负载干扰状态观测器来实时测量 T_L 大小.

电机的转速和转矩可通过传感器测量, 即可设计 Luenberger 全状态观测器间接重构负载干扰 T_L .

车辆在矿山运行速度较慢, 大部分为低频负载, 可认为负载干扰 T_L 变化较慢, 即

$$\frac{dT_L}{dt} = 0 \quad (22)$$

同时, 也要考虑负载变化较快的工况. 根据统计, 负载干扰 T_L 可按线性或周期性变化, 有 $dT_L/dt =$ 常数或 $\omega_L \sin \omega_L t$, ω_L 是负载变化的角频率, 可实际测量, 然后可按负载干扰 T_L 变化较慢一样处理.

根据公式(1),又有:

$$J \frac{dw}{dt} = T_M - Bw - T_L \quad (23)$$

综合式(22)和(23),有如下线性定常系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (24)$$

系统的状态变量 $X = [w \ T_L]^T$, 输入变量 $u = T_M$,

输出变量 $y = w$, 其中 $A = \begin{bmatrix} -B & -J^{-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = [J^{-1} \ 0]^T$, $C = [1 \ 0]^T$.

由于 (C, AC) 的秩等于 2, 即系统的 (A, C) 完全能观, 则设计的全状态干扰观测器存在, 且可以任意观测器极点配置^[19].

可建立干扰状态观测器模型:

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + K_e(y - C\tilde{x}) \quad (25)$$

误差动态特性:

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\tilde{x}} = (A - K_e C)e \quad (26)$$

式中: \tilde{x} 为状态 x 的重构; K_e 为观测器的增益矩阵; e 是观测器系统误差. 选取观测器的极点 (λ_1, λ_1) , 可求出合适的矩阵 K_e . 使误差向量 $e(t)$ 能以足够快的速度趋近于原点, 从而实现状态 x 到 \tilde{x} 的重构.

因为系统的阶数较低, 可采用直接代入法来求解矩阵 K_e ^[20], 将矩阵直接代入期望的特征多项式, 见

式(27), 通过对式中 λ 的同次幂系数的比较, 可求解矩阵 K_e .

$$|\lambda I - (A - K_e C)| = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) \quad (27)$$

通过矩阵 K_e 可得到负载干扰 T_L 的重构 \tilde{T}_L , 再

把实时测量的不确定负载干扰 \tilde{T}_L 代入系统控制律式(21)中, 系统可及时响应干扰. 这种带干扰状态观测器的非线性滑模变结构系统避免了负载干扰对系统的影响, 可减小趋近律控制增益幅值, 进一步削弱系统抖振, 保证系统具有良好的控制效果和很强的鲁棒性.

3 仿真与实验

为了验证本文所设计的电制动 NVSC 励磁控制系统正确性, 以某型号矿用自卸车为研究对象, 先在 MATLAB/Simulink 中进行 HMDT 电制动励磁控制仿真, 再依托某矿车整车厂搭建了实物实验平台, 实验平台采用的是 TMS320F28335 主控芯片, 采用电机对拖的方式来模拟电制动的负载, 采用钛酸锂电池作为储能装置. 电机及系统仿真参数如表 1 所示. 搭建的系统仿真模型如图 2 所示, 搭建的实验平台如图 3 所示, 其控制系统如图 4 所示.

表 1 电机及系统仿真参数

Tab.1 Parameters of motor and system

| 参数 | P_e/kW | U_e/VDC | $(C_m \cdot V_{min}^{-1})/(r \cdot Wb)^{-1}$ | $(C_e \cdot V_{min}^{-1})/(r \cdot Wb)^{-1}$ | L/mH | $k/(Wb \cdot A^{-1})$ | $J/(kgm^2)$ | R_e/Ω | $B/(Nms \cdot rad^{-1})$ |
|----|----------|-----------|--|--|--------|-----------------------|-------------|--------------|--------------------------|
| 数值 | 500 | 580 | 5.13 | 48.99 | 1.52 | 0.55 | 357.7 | 1.08 | 1.77 |

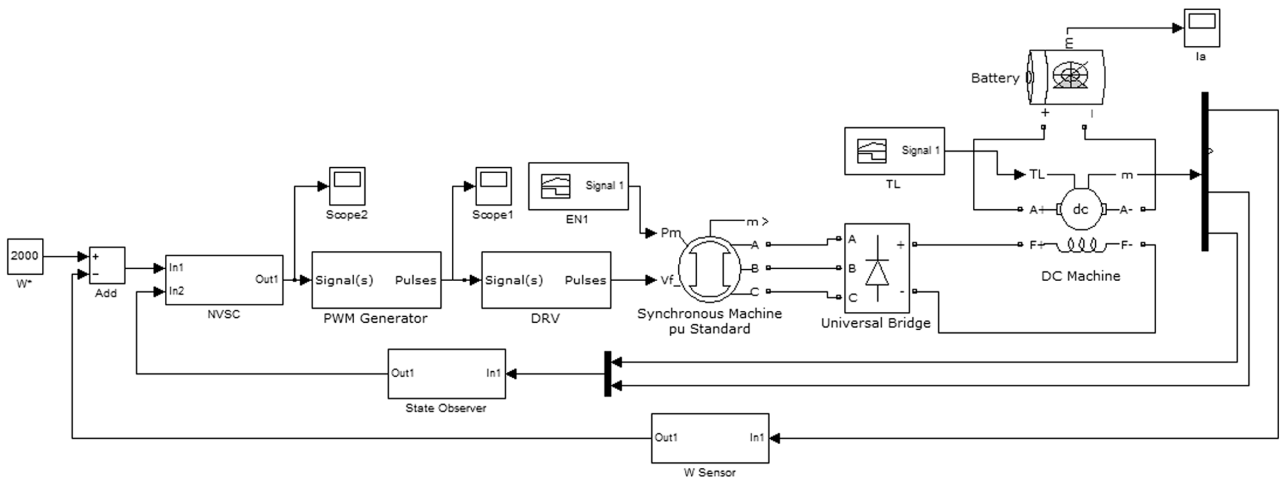


图 2 电制动 NVSC 励磁控制系统仿真模型

Fig.2 Simulation model of electric brake NVSC excitation control system

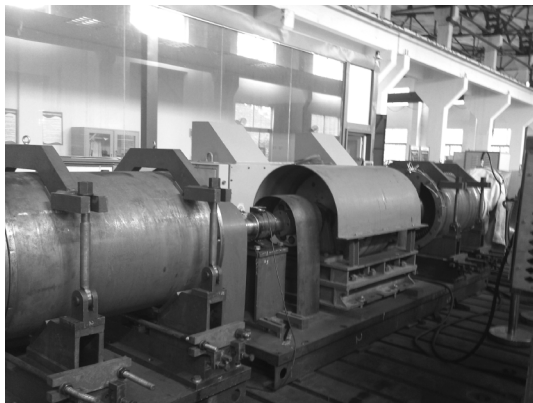


图 3 电制动实验平台

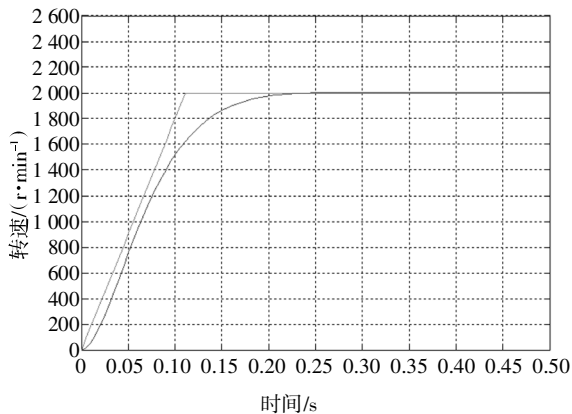
Fig.3 Electric brake experiment platform



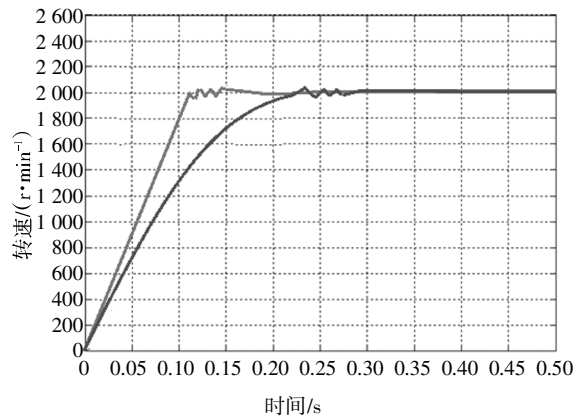
图 4 实验平台控制系统

Fig.4 Control system of experiment platform

模拟 HMDI 车辆恒速下坡电制动工况, 给定电机期望转速为 2 000 r/min, 图 5 是在 PID 和 NVSC 两个控制方式下电制动励磁控制过程中车辆速度变化响应对比图. 根据图 5 中电机转速波形可看出, 仿真和实验结果都显示本文所设计的 NVSC 控制相比原 PID 控制, 电机转速到达期望值的时间为 0.12 s, 而 PID 控制为 0.22 s, 上升时间和调节时间都提升近 1 倍, 而且转速响应的稳定性好, 体现了系统响应快、对滑模变结构控制的抖振抑制效果好.



(a) 仿真结果



(b) 实验结果

图 5 电机转速响应

Fig.5 Motor speed response

为了验证设计的负载干扰状态观测器效果, 系统稳态运行后, 通过对拖电机的控制使测试电机的负载突变, 图 6 为观测器负载干扰变化, 在 0.3 s 时将负载干扰增加到 4 倍, 在 0.5 s 时负载干扰降低到正常值, 图 7 和图 8 分别是电机转速和电枢电流在负载干扰下的变化波形. 从图 7 的仿真与实验结果可看出, 当系统的负载干扰突增时, PID 控制器下电机转速发生幅度为 4% 的扰动, 且需要 50 ms 恢复到稳定; 从图 8 的仿真与实验结果可看出, PID 控制器下电机电枢电流都发生幅度为 25% 的扰动, 且需要 100 ms 恢复到稳定; 而本文设计的 NVSC 控制器下电机转速和电流扰动十分微小, 而且电机电枢电流受负载干扰影响相比转速更大. 由此可看出, NVSC 控制器具有动态稳定性好, 系统响应快, 抗干扰能力强, 鲁棒性好, 在矿山恶劣工况下, 能保证车辆行驶稳定, 特别是更能保证充电电压不过载.

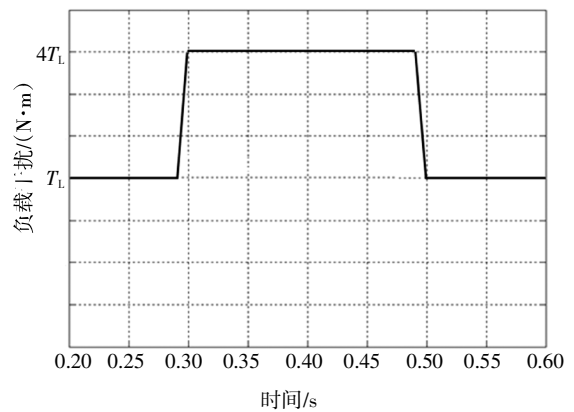
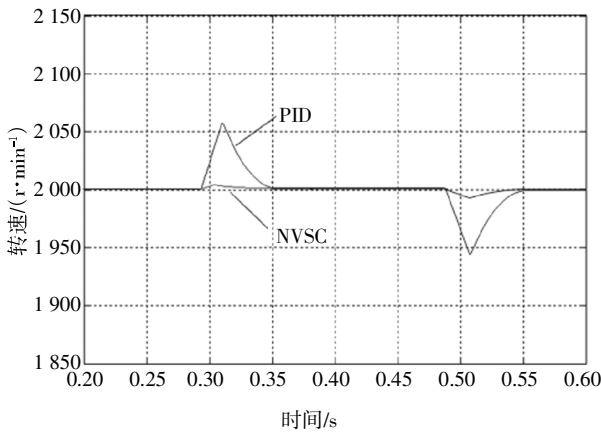
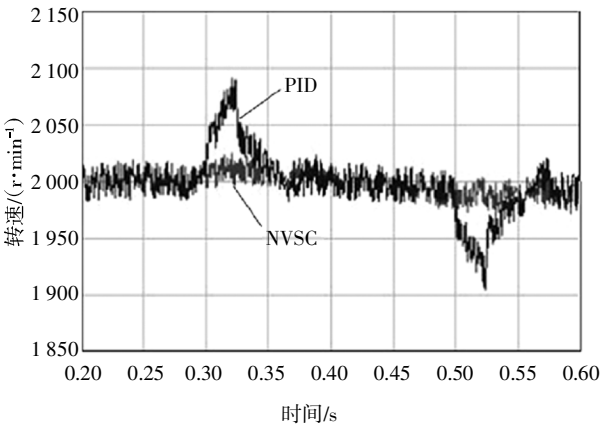


图 6 负载干扰波动

Fig.6 Load disturbance fluctuation

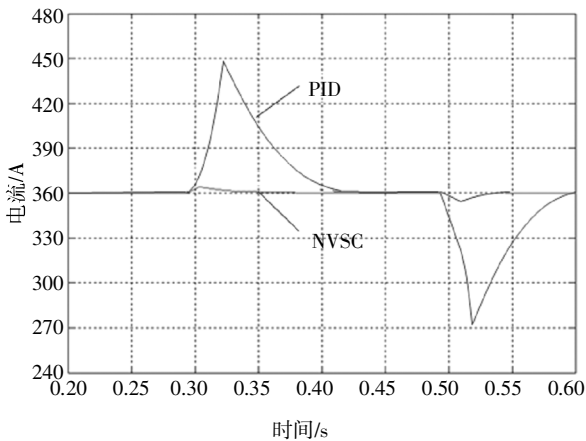


(a)仿真结果

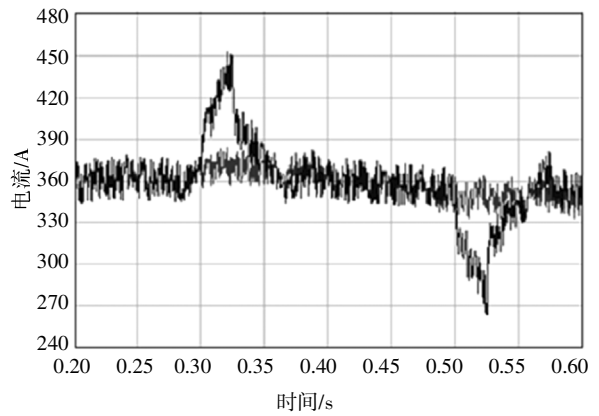


(b)实验结果

图7 负载干扰波动下电机转速响应
Fig.7 Motor speed response under load disturbance fluctuation



(a)仿真结果



(b)实验结果

图8 负载干扰波动下电机电枢电流响应
Fig.8 Motor armature current response under load disturbance fluctuation

4 结论

1)针对非线性励磁控制系统,提出了 NVSC 励磁控制策略,并设计了 Luenberger 全状态观测器可实时测量负载干扰波动,系统可及时响应干扰,削弱滑模变结构系统抖振。

2)与 PID 仿真结果及实验结果对比,NVSC 励磁控制转速调节时间减小一半,系统动态响应快、稳定性好。

3)与 PID 仿真结果及实验结果对比,在矿山恶劣工况干扰下,NVSC 励磁控制的电机转速特别是制动电流扰动十分微小,恢复稳定时间极短,不到 10 ms,体现了本文设计控制策略的强鲁棒性,从而保证了电池充电电流稳定,提高了电池寿命,同时保证了车辆安全,提高了大吨位混合动力矿用车辆的可靠性。

参考文献

[1] 李浩. 架线式电动轮自卸车再生制动储能系统研究[D]. 成都: 西南交通大学电气学院, 2014: 5—6.
LI H. Research on the regenerative braking energy storage system of line-supplied electrical wheels autonomous dump truck [D]. Chengdu: School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 2014: 5—6. (In Chinese)

[2] 王文慧. SF33901 型矿用自卸车制动性能的仿真分析与优化研究[D]. 长沙: 湖南大学机械与运载工程学院, 2013: 10—11.
WANG W H. The analysis and optimization on the braking performance of the SF33901 type mining dump truck [D].

- Changsha: School of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, 2013: 10—11. (In Chinese)
- [3] ZHANG R, LI K, YU F, *et al.* Novel electronic braking system design for EVS based on constrained nonlinear hierarchical control [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2017, 18 (4): 707—718.
- [4] HANAN M A, AZIDIN F A, MOHAMED A. Hybrid electric vehicles and their challenges: A review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29(1): 135—150.
- [5] 陈华光, 曾红, 王迎旭. 基于 DSP 的电动轮自卸车电制动控制系统的设计[J]. *矿山机械*, 2010, 38(9): 40—43.
- CHEN H G, ZENG H, WANG Y X. Design of electric braking control system for electric-wheel dump truck based on DSP [J]. *Mining Machinery*, 2010, 38(9): 40—43. (In Chinese)
- [6] 张英杰, 章兢, 陈晓可, 等. SF32601 型自卸车电传动非线性 PI 控制系统[J]. *汽车工程*, 2006, 28(2): 143—149.
- ZHANG Y J, ZHANG J, CHEN X K, *et al.* A nonlinear PI control system for the electric drive of SF32601 dump truck [J]. *Automotive Engineering*, 2006, 28(2): 143—149. (In Chinese)
- [7] 谭建豪, 章兢. 基于遗传算法的 154T 电动车牵引励磁 PID 控制器的设计 [J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2007, 34(1): 33—37.
- TAN J H, ZHANG J. Design of towing excitation PID controllers for 154T motor dump trucks based on genetic algorithms [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2007, 34 (1): 33—37. (In Chinese)
- [8] ABLAY G. Variable structure controllers for unstable processes [J]. *Journal of Process Control*, 2015, 32: 10—15.
- [9] CUI M, LIU W, LIU H, *et al.* Extended state observer-based adaptive sliding mode control of differential-driving mobile robot with uncertainties [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 83(1/2): 667—683.
- [10] 王镇道, 张乐, 彭子舜. 基于 PSO 优化算法的模糊 PID 励磁控制器设计[J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2017, 44(8): 106—109.
- WANG Z D, ZHANG L, PENG Z S. Design of fuzzy PID excitation control based on PSO optimization algorithm [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44 (8): 106—109. (In Chinese)
- [11] SAADAoui O, KHLAIEF A, ABASSI M, *et al.* A sliding-mode observer for high-performance sensorless control of PMSM with initial rotor position detection [J]. *International Journal of Control*, 2017, 90 (2): 377—392.
- [12] ABEYWARDANA D B W, HREDZAK B, AGELIDIS V G. A fixed-frequency sliding mode controller for a boost-inverter-based battery-supercapacitor hybrid energy storage system [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 32(1): 668—680.
- [13] 许叙遥, 林辉. 基于动态滑模控制的永磁同步电机位置速度一体化设计[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(5): 77—84.
- XU X Y, LIN H. Integrated design for permanent magnet synchronous motor servo systems based on dynamic sliding mode control [J]. *Journal of Electrotechnics*, 2014, 29 (5): 77—84. (In Chinese)
- [14] 崔家瑞, 高江峰, 张波, 等. 永磁同步电机滑模变结构鲁棒控制 [J]. *电机与控制学报*, 2016, 20(5): 84—90.
- CUI J R, GAO J F, ZHANG B, *et al.* Robust control of synchronous motor based on sliding mode variable structure [J]. *Electric Machines and Control*, 2016, 20(5): 84—90. (In Chinese)
- [15] BOLDEA I, TUTELEA L, SERBAN I. Variable speed electric generators and their control: an emerging technology [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2002, 1 (3): 20—28.
- [16] AHMED A A, AHMAD R B, YAHYA A, *et al.* Variable structure system with sliding mode controller [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 53 (7): 441—452.
- [17] 曹玲芝, 谢晓磊, 任菊萍. 基于非线性滑模面的永磁同步电机变结构控制[J]. *微电机*, 2015, 48(3): 48—53.
- CAO L Z, XIE X L, REN J P. Sliding mode variable structure control of permanent magnet synchronous machine based on nonlinear sliding surface [J]. *Micromotor*, 2015, 48(3): 48—53. (In Chinese)
- [18] OLIVIER H, VINCENT A, BERNARD B. Lyapunov stability and performance analysis of the implicit discrete sliding mode control [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 61 (10): 3016—3030.
- [19] 李政, 胡广大, 崔家瑞, 等. 永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(3): 431—438.
- LI Z, HU G D, CUI J R, *et al.* Sliding-mode variable structure control with integral action for permanent magnet synchronous motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34 (3): 431—438. (In Chinese)
- [20] 程鹏, 王艳东. 现代控制理论基础 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 59—76.
- CHENG P, WANG Y D. *Foundation of modern control theory* [M]. Beijing: Beihang University Press, 2010: 59—76. (In Chinese)