

# 机电复合调速系统反演自适应 $L_2$ 增益控制\*

谷志锋<sup>1,2</sup>, 朱长青<sup>2</sup>, 呼树杰<sup>3</sup>, 张晨光<sup>2</sup>, 王文婷<sup>2</sup>

(1. 石家庄铁道大学电气与工程学院 石家庄 050043;  
2. 机械工程学院车辆与电气工程系 石家庄 050003; 3. 黄骅职教中心 黄骅 061100)

**摘要:**建立了含多个不确定参数和外部扰动的机电调速系统非线性模型,并提出一种基于附加控制变量和可调参数自修正的反演非线性自适应  $L_2$  增益速度控制方法,通过引入  $K$  类函数和附加控制变量,既提高了机电复合调速系统的稳定控制速度,也克服了在传统反演设计中各子系统虚拟函数设计时都要考虑耗散不等式的不足,与常规调速控制方法进行的仿真结果对比表明,新提出的控制方法能够提高速度控制套等执行部件的响应速度,减小速度控制的超调,有利于提高机电复合调速系统的稳定控制能力。

**关键词:** 机电复合调速;反演自适应  $L_2$  增益控制;鲁棒控制;附加控制变量;可调参数自修正

**中图分类号:** TH702 TP273      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 420.40 470.4017 470.3020

## Back-stepping adaptive $L_2$ -gain control of electromechanical governed system

Gu Zhifeng<sup>1,2</sup>, Zhu Changqing<sup>2</sup>, Hu Shujie<sup>3</sup>, Zhang Chengguang<sup>2</sup>, Wang Wenting<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electrics Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;  
2. Vehicles and Electrical Engineering department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;  
3. Huanghua Vocational Education Center, Huanghua 061100, China)

**Abstract:** A nonlinear model of electromechanical governed system with multiple uncertain parameters and disturbances is established, and a back-stepping nonlinear adaptive  $L_2$ -gain speed control ( $L_2$ -NASC) method with additional control variables and self-modified parameters is proposed. By adopting  $K$ -Class functions and additional control variables, the stable speed of the electromechanical governed system can be improved, and the  $\gamma$ -dissipation inequality can be disregarded in virtual function design. Comparing with the traditional speed control method, the back-stepping  $L_2$ -NASC simulation results show that the response speed of the operating components, i. e., as control sleeve, etc., can be increased, the overshoot of the control output can be decreased and the stability of the speed control system can be enhanced.

**Keywords:** electromechanical governed system; back-stepping  $L_2$ -gain control; robust control; additional control variable; self-modified parameter

## 1 引言

雷达探测、导弹发射、牵引高炮、炮兵群(团)指挥系统等场合,由军用电站、输电线缆、各类型武器装备(雷达、导弹、火炮等)等可构成一类容量有限的独立电力系统<sup>[1]</sup>。机电复合调速系统由于同时保持了机械调速系统的高可靠性和电子调速系统的高精度,因此,在军用电站

装备中得到广泛的应用<sup>[2]</sup>。

目前,武器装备性能的不断提升对独立电力系统的稳定控制能力提出了更高的要求,而军用电站速度控制的优劣是影响和制约独立电力系统稳定运行能力的关键因素之一<sup>[3]</sup>。为此,许多学者在军用电站调速系统的模型建立<sup>[1,4]</sup>、特性分析<sup>[5,6]</sup>、执行器特性<sup>[7]</sup>等方面进行了深入的研究。由于调速系统模型建立过程中存在的近似化处理<sup>[2,4]</sup>,以及诸如摩擦系数等参数通常难以精确测量

和外部干扰的存在<sup>[5-6]</sup>,所以导致所建立的模型具有非常强的参数不确定性和非结构不确定性。

调速控制通常采用  $H_{\infty}$ 、 $H_2/H_{\infty}$ 、精确反馈线性化、神经网络、变结构等控制律设计方法。在  $H_{\infty}$ 、 $H_2/H_{\infty}$  控制方法中,柴油机模型在不同运行区间段用相应的线性方程进行了表示,并将模型自身的非线性和外部干扰统一用外部干扰进行了表示,因此控制存在较大的保守性<sup>[7-8]</sup>;精确反馈线性化与  $H_{\infty}$  相结合的控制方法由于考虑了模型中存在的非线性特性,使得控制效果得到了一定的提升,但对系统存在的不确定参数考虑不足<sup>[9-11]</sup>;神经网络等智能控制由于具有对复杂模型逐步逼近的优势,经过长时间的训练,对于被控对象有较好的匹配性,但是所选择的训练规则等需要反复的研究和试验<sup>[12-14]</sup>;变结构控制要求柴油机模型的不确定性需要满足确定的不等式,所给出的控制律对所有满足给定上界的不确定性均适合,同样具有一定的保守性,但是控制律设计相对较简单<sup>[15-16]</sup>。

由于非线性自适应  $L_2$  增益控制 (nonlinear adaptive  $L_2$ -gain control,  $L_2$ -NAC) 可以适应控制系统的非线性和参数不确定性,并在保证干扰至控制输出增益小于设定值的同时,还可以实现系统的鲁棒稳定,因此,机电调速系统的  $L_2$ -NAC 为提高独立电力系统静态、暂态稳定控制能力,提供了一种直接、有效的方法<sup>[10-11]</sup>。本文详细分析了机电调速系统模型建立过程中所存在的不确定性问题,并针对所建立的含多个不确定参数的非线性机电调速系统模型结构,提出一种基于附加控制变量和可调参数自修正的反演非线性自适应  $L_2$  增益速度控制 (nonlinear adaptive  $L_2$ -gain speed control,  $L_2$ -NASC) 方法。反演  $L_2$ -NASC 通过引入  $K$  类函数提高了机电复合调速系统的稳定收敛速度,同时通过引入附加控制变量,克服了在传统反演设计中各子系统虚拟函数设计时都要考虑  $M_1$ -耗散不等式的不足,与常规调速控制方法仿真对比表明,反演  $L_2$ -NASC 有利于提高机电复合调速系统稳定控制能力。

## 2 机电复合调速系统模型的不确定性分析

机电复合调速系统结构如图1所示。外部调速控制器通过控制速度控制摆杆的位置,改变调速弹簧作用于张杆的拉力,并保持该拉力与调速套作用于张杆的推力相平衡。张杆的摆动可以调整控制套与断油孔的相对位置,进而改变喷油量和柴油机的转速。

文献[1]虽然已经对机电复合调速系统模型建立进行了分析,但是由于模型建立过程中所进行的近似处理,以及诸如摩擦系数等参数通常难以精确测量和外部干扰的存在,所以导致所建立的模型具有非常强的参数不确定性和非结构不确定性的特征。

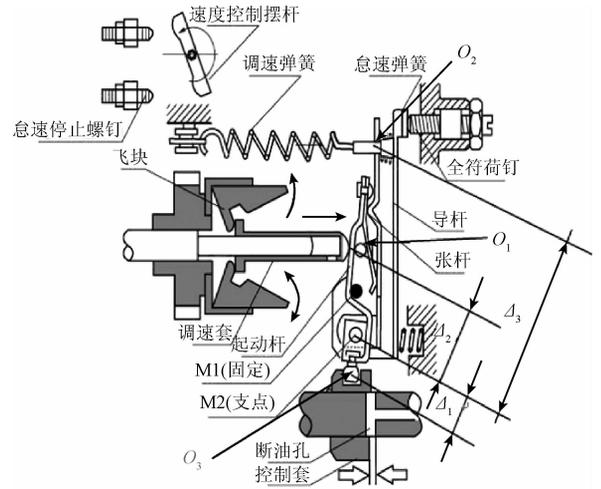


图1 机电复合调速系统工作原理

Fig.1 Principle of the electro-mechanical speed control system

### 2.1 柴油发电机组动力方程的不确定性分析

柴油机输出转矩的实际值  $M_1$  可表示为<sup>[2]</sup>:

$$M_1 = k_1 n + d_1 + ay \quad (1)$$

式中:  $d_1 = b_1 - ay'_0$ ,  $k_1$ 、 $b_1$ 、 $a$  由柴油机的转速特性曲线和转矩特性曲线确定,  $k_1$  表示柴油机转矩转速特性曲线的斜率,  $b_1$  由运行区间决定,  $a$  表示柴油机调整特性曲线的斜率,  $y'_0$  表示执行控制套的空载行程。

当取转矩的基值  $M_B$  为:

$$M_B = \frac{9550S_N}{n} \quad (2)$$

式中:  $S_N$  为视在功率;  $n$  为柴油机转速, 单位 r/min。

基于基值选取式(2), 实际值  $M_1$  和标么值  $M_m$  满足以下关系:

$$M_m = \frac{n}{9550} \frac{k_1 n + d_1 + ay}{S_N} \quad (3)$$

在柴油机额定转速运行区间内, 近似取  $k_1 n + d_1$  为不变量, 则由式(3)可得:

$$M_m = a'_4 + a'_5 y + O_2(M_m) \quad (4)$$

式中:  $a'_4 = \frac{n}{9550} \frac{k_1 n + d_1}{S_N}$ ,  $a'_5 = \frac{n}{9550} \frac{a}{S_N}$ ,  $O_2(M_m)$  为模型近似引起的误差。

柴油发电机组满足以下运动动力学方程:

$$J \frac{d\omega_g}{dt} = M_m - M_D - M_e + \varepsilon'_1 \quad (5)$$

式中:  $M_m$  为机械输入转矩标么值,  $M_e$  为电磁转矩标么值,  $M_D$  为阻尼转矩标么值,  $J$  为机组转动惯量(包括柴油机、发电机及传动装置等转动惯量),  $\varepsilon'_1$  代表力矩干扰输入。

由于机械功率标么值  $P_m$  和转矩标么值  $M_m$  满足  $M_m = P_m / \omega_g$ , 其中,  $\omega_g$  为柴油机转速标么值。速度控制过程中, 柴油机转速波动范围不大, 为分析方便, 近似取柴

油机转速标么值为1,此时  $P_m = M_m$ ,同理,电磁转矩和阻尼转矩的标么值同样可以用功率标么值表示,且由于  $\omega = p\omega_g$ ,则式(5)可表示为:

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_D - P_e + O_3(P) + \varepsilon'_3 \quad (6)$$

式中:  $P_D = D(\omega - 1)$  为阻尼功率标么值,  $D$  为阻尼系数,通常难以精确测量;  $O_3(P)$  代表转矩标么值用功率标么值等效时所引起的模型误差。

将式(4)代入式(6)可得:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{a'_4 + a'_5 y}{M} - \theta_1 \Delta\omega - a_1 P_e + \varepsilon_3 \quad (7)$$

式中:  $M = J/p, \varepsilon_3 = O_4(M_m, P) + \varepsilon'_3$  综合考虑了模型近似和外部干扰所造成的不确定扰动,  $\theta_1 = D/M$  为不确定常数,  $a_1 = 1/M$ 。

### 2.2 调速套动态方程的不确定性分析

依据参考文献[1],依据达郎贝尔原理,调速套满足以下动态特性方程:

$$m_g \frac{d^2 x}{dt^2} + f_g \frac{dx}{dt} = M - c y_1 \Delta_3 / \Delta_2 \quad (8)$$

式中:  $x$  为调速套位移量;  $m_g$  为归算至调速套的当量质量,由于难以精确测量,所以为不确定参数;  $f_g$  为摩擦系数,由于难以精确测量,所以同样为不确定参数;  $M = f_1(\omega_g, x)$  为飞块对调速套向右作用力( $\omega_g$  为柴油机转速标么值,与发电机旋转电角速度标么值  $\omega$  满足  $\omega = p\omega_g, p$  为发电机极对数),受飞块张开角度的影响,该函数通常难以精确给定;  $c$  和  $y_1$  分别为调速弹簧的刚度和变形量。

当  $M = f_1(\omega_g, x)$  采用泰勒级数展开时可得:

$$M = \frac{\partial f_1}{\partial \omega_g} \omega_g + \frac{\partial f_1}{\partial x} x + O_1(M) \quad (9)$$

式中:  $O_1(M)$  为高次项。由图1可得:

$$y = \frac{\Delta_1}{\Delta_3} (L - y_1) \quad (10)$$

式中:  $L$  为速度控制摆杆移动距离,  $y$  为控制套移动距离。

将式(9)、(10)代入式(8)得:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{-f_g}{m_g} \frac{dy}{dt} + \frac{a}{m_g} y - \frac{b}{m_g} p\omega - \frac{C}{m_g} L + \frac{O_1(M)}{m_g} \quad (11)$$

式中:  $a = \partial f_1 / \partial x + c \Delta_3 / \Delta_2, b = (\Delta_1 \partial f_1) / (\Delta_2 \partial \omega_T), C = c \Delta_1 / \Delta_2$ 。

由于摩擦系数  $f_g$  为不确定参数,受飞块张开角度的影响,  $\partial f_1 / \partial \omega_T$  和  $\partial f_1 / \partial x$  的值同样具有不确定性,因此当取  $\frac{dy}{dt} = z$  时,式(11)可以表示为:

$$\frac{dy}{dt} = z \quad (12)$$

$$\frac{dz}{dt} = \theta_2 z + \theta_3 y - \theta_4 \omega - a_3 L + \varepsilon_2 \quad (13)$$

式中:  $a_3 = C/m_g, \varepsilon_2 = O_1(M)/m_g$  为模型近似等综合因素所引起的扰动,  $\theta_2 = -f_g/m_g, \theta_3 = a/m_g, \theta_4 = b/m_g$ 。

### 2.3 速度控制摆杆驱动的不确定性分析

速度控制器通过输出控制电压  $u_1$  驱动执行器工作,并带动速度控制摆杆移动  $L$  距离,当驱动控制的时间常数和增益分别为  $T_1$  和  $K_1$ ,并考虑外部干扰等非结构不确定性,则速度控制摆杆的控制可表示为:

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{L}{K_1} + \frac{K_1}{T_1} u_2 + \varepsilon_3 \quad (14)$$

式中:  $\varepsilon_3$  为外部干扰所引起的不确定扰动。

依据柴油发电机组的工作点定义坐标变换:

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T = [\omega - 1]^T$$

由式(7)、(12)~(14)可得如下柴油发电机组的模型式:

$$\dot{x}_1 = \theta_1 x_1 + a_2 x_2 + a_1 \Delta P_e + \varepsilon_1 \quad (15)$$

$$\dot{x}_2 = x_3 \quad (16)$$

$$\dot{x}_3 = \theta_2 x_1 + \theta_3 x_2 - \theta_4 x_3 - a_3 x_4 + \varepsilon_2 \quad (17)$$

$$\dot{x}_4 = -a_4 x_4 + v_1 + \varepsilon_3 \quad (18)$$

式中:  $a_2 = a'_5/M, a_4 = -L/K_1, v_1 = K_1 u_2/T_1$ 。

## 3 反演自适应 $L_2$ 增益速度控制

针对模型式(15)~(17),本文提出一种基于附加控制变量和可调参数自修正的鲁棒自适应速度控制方法。所引入的可调参数与不确定参数相对应,通过在线修正可调参数保证闭环系统的鲁棒稳定和品质。可调参数的修正过程并不是以不确定参数的准确估计为目的,而是以系统的整体鲁棒稳定为最终目标。基于附加控制变量可调参数自修正的鲁棒速度控制器设计过程采用了 Back-stepping 的思想。鲁棒速度控制的实现方法如下。

取  $e_1 = x_1$ , 由式(15)得:

$$\dot{e}_1 = a_1 \Delta P_e + a_2 x_2 + \theta_1 x_1 + \varepsilon_1 \quad (19)$$

取虚拟控制  $x_2^* = (-m_1 e_1)/a_2$ 、误差变量  $e_2 = x_2 - x_2^*$ , 由式(19)和(16)得:

$$\dot{e}_1 = a_1 \Delta P_e + a_2 e_2 - m_1 e_1 + \theta_1 x_1 + \varepsilon_1 \quad (20)$$

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_2^* =$$

$$x_3 + m_1 (a_1 \Delta P_e + a_2 x_2 + \theta_1 x_1 + \varepsilon_1) / a_2 \quad (21)$$

式中:  $m_1 = f_1(|e_1|) + c_1, f_1(|e_1|)$  为关于  $e_1$  的  $K$  类函数,  $c_1 > 0$ 。

取  $V_2 = \frac{e_1^2 + e_2^2}{2}$ , 由式(20)和(21)得:

$$\dot{V}_2 = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 = e_2 [a_2 e_1 + x_3 + m_1 (a_2 e_2 - m_1 e_1) / a_2] + (m_1 e_2 / a_2 + e_1) (a_1 \Delta P_e + \theta_1 x_1 + \varepsilon_1) - m_1 e_1^2 \quad (22)$$

取虚拟控制  $x_3^*$ 、误差变量  $e_3 = x_3 - x_3^*$ , 得:

$$x_3^* = -a_2 e_1 - m_2 e_2 - m_1 (a_2 e_2 - m_1 e_1) / a_2 \quad (23)$$

式中:  $m_2 = f_2(|e_2|) + c_2, f_2(|e_2|)$  为关于  $e_2$  的  $K$  类函数,  $c_2 > 0$ 。

将式(23)代入式(21)、(22)得:

$$\dot{e}_2 = e_3 - m_2 e_2 - a_2 e_1 + \frac{m_1(a_1 \Delta P_e + \theta_1 x_1 + \varepsilon_1)}{a_2} \quad (24)$$

$$\dot{V}_2 = (m_1 e_2 / a_2 + e_1)(a_1 \Delta P_e + \theta_1 x_1 + \varepsilon_1) + e_2 e_3 - m_1 e_1^2 - m_2 e_2^2 \quad (25)$$

由式(23)得:

$$\dot{x}_3^* = (m_1^2 / a_2 - a_2) \dot{e}_1 - (m_1 + m_2) \dot{e}_2 = (2a_2 m_1 + a_2 m_2 - m_1^3 / a_2) e_1 + (m_1^2 - a_2^2 + m_2^2 + m_1 m_2) e_2 - (m_1 m_2 / a_2 + a_2)(a_1 \Delta P_e + \theta_1 x_1 + \varepsilon_1) - (m_1 + m_2) e_3 \quad (26)$$

由式(17)、(23)得:

$$\dot{e}_3 = \dot{x}_3 - \dot{x}_3^* = \theta_2 x_1 + \theta_3 x_2 - \theta_4 x_3 - a_3 x_4 + \varepsilon_2 - \dot{x}_3^* \quad (27)$$

取  $V_3 = \frac{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2}{2}$ , 由式(25)、(27)得:

$$\dot{V}_3 = (m_1 e_2 / a_2 + e_1)(a_1 \Delta P_e + \theta_1 x_1 + \varepsilon_1) + e_3(\theta_2 x_1 + \theta_3 x_2 - \theta_4 x_3 - a_3 x_4 + \varepsilon_2 - \dot{x}_3^*) + e_2 e_3 - m_1 e_1^2 - m_2 e_2^2 \quad (28)$$

将式(26)代入式(28),取虚拟控制  $x_4^*$  为:

$$x_4^* = \frac{1}{a_3}(1 - m_1^2 - m_2^2 - m_1 m_2 + a_2^2) e_2 + (m_1 + m_2 + m_3) e_3 - (2a_2 m_1 + a_2 m_2 - m_1^3 / a_2) e_1 \quad (29)$$

式中:  $m_3 = f_3(|e_3|) + c_3$ ,  $f_3(|e_3|)$  为关于  $e_3$  的  $K$  类函数,  $c_3 > 0$ 。

将式(29)代入式(27)、(28)得:

$$\dot{e}_3 = \theta_2 x_1 + \theta_3 x_2 - \theta_4 x_3 - a_3 x_4 + \varepsilon_2 + (m_1 m_2 / a_2 + a_2)(a_1 \Delta P_e + \theta_1 x_1 + \varepsilon_1) - m_3 e_3 - a_3 e_4 - e_2 \quad (30)$$

$$\dot{V}_3 = - \sum_{i=1}^3 m_i e_i^2 - a_3 e_3 e_4 - e_2 e_3 + [e_1 + m_1 e_2 / a_2 + (m_1 m_2 / a_2 + a_2) e_3](a_1 \Delta P_e + \theta_1 x_1 + \varepsilon_1) + e_3(\theta_2 x_1 + \theta_3 x_2 - \theta_4 x_3 - a_3 x_4 + \varepsilon_2) \quad (31)$$

由式(18)、(29)得:

$$\dot{e}_4 = \dot{x}_4 - \dot{x}_4^* = -a_4 x_4 + v_1 + \varepsilon_3 - \frac{1}{a_3} \{ (m_1 + m_1 m_2 m_3 + a_2^2 m_3)(a_1 \Delta P_e + \theta_1 x_1 + \varepsilon_1) / a_2 + (m_1 + m_2 + m_3)(\theta_2 x_1 + \theta_3 x_2 - \theta_4 x_3 - a_3 x_4 + \varepsilon_2) - [a_2^2 - a_2^2(m_1 + m_2)^2 + (a_2^2 - m_1^2)] e_1 / a_2 - [(m_1 + m_2)(2a_2^2 - m_1^2 - m_2^2 + 1) + m_2 + m_3] e_2 + [2 + 2a_2^2 - (m_1 + m_2)^2 - (m_3 + m_2)^2 - (m_1 + m_3)^2] \frac{e_3}{2} - a_3(m_1 + m_2 + m_3) e_4 \} \quad (32)$$

取  $V_4 = V_3 + \frac{1}{2} \zeta^2(e_4) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \frac{\tilde{\theta}_i^2}{\rho_i}$ , 由式(31)得:

$$\dot{V}_4 = - \sum_{i=1}^3 m_i e_i^2 - a_3 e_3 e_4 - e_2 e_3 + K_1(a_1 \Delta P_e + \theta_1 x_1 + \varepsilon_1) + b_1 \dot{e}_4 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \frac{\tilde{\theta}_i^2}{\rho_i} \quad (33)$$

式中:  $b_1 = \zeta(e_4) \frac{d\zeta(e_4)}{de_4} \neq 0, K_1 = e_1 + m_1 e_2 / a_2 +$

$(m_1 m_2 / a_2 + a_2) e_3$ 。

取虚拟控制量  $v$  为:

$$v = a_4 x_4 + u_{\rho 1} \frac{1}{a_3} + [(K_2 - \frac{a_3 K_1}{b_1})(a_1 \Delta P_e + \hat{\theta}_1 x_1) + (L_2 - \frac{a_3 e_3}{b_1})(\hat{\theta}_2 x_1 + \hat{\theta}_3 x_2 - \hat{\theta}_4 x_3) + \sigma_1 e_1 + \sigma_2 e_2 + \sigma_3 e_3 + \sigma_4 e_4 + (a_3 e_3 e_4 + e_2 e_3) / b_1] \quad (34)$$

式中:  $K_2 = \frac{(m_1 + m_1 m_2 m_3 + a_2^2 m_3)}{a_2}, L_2 = m_1 + m_2 + m_3,$

$\sigma_4 = a_3(m_1 + m_2 + m_3), \sigma_3 = [2 + 2a_2^2 - (m_1 + m_2)^2 - (m_3 + m_2)^2 - (m_1 + m_3)^2] / 2, \sigma_2 = (m_1 + m_2)(2a_2^2 - m_1^2 - m_2^2 + 1) + m_2 + m_3, \sigma_1 = [a_2^2 - a_2^2(m_1 + m_2)^2 + (a_2^2 - m_1^2)] / a_2, u_{\rho 1}$  为附加控制变量,  $\hat{\theta}_i$  为不确定参数  $\theta_i$  的估计值( $\hat{\theta}_i$  是本文所引入的自修正可调参数,由上述推导可知  $\hat{\theta}_i$  的修正律并不是以准确估计  $\theta_i$  的值为目的,而是为了保证系统稳定而引入的可调参数)。

将式(34)代入式(33)得:

$$\dot{V}_4 = - \sum_{i=1}^3 m_i e_i^2 + (K_1 - K_2 / a_3)(\tilde{\theta}_1 x_1 + \varepsilon_1) + (e_3 - L_2 / a_3)(\tilde{\theta}_2 x_1 + \tilde{\theta}_3 x_2 - \tilde{\theta}_4 x_3 + \varepsilon_2) + b_1 e_3 + b_1 u_{\rho 1} - \sum_{i=1}^3 \frac{\tilde{\theta}_i \dot{\tilde{\theta}}_i}{\rho_i} \quad (35)$$

式中:  $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \hat{\theta}_i (i = 1, 2, 3)$ 。

取参数自修正律为:

$$\dot{\hat{\theta}}_1 = \rho_1 B_1 x_1 \quad (36)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_2 = \rho_2 B_2 x_1 \quad (37)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_3 = \rho_3 B_2 x_2 \quad (38)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_4 = -\rho_4 B_2 x_3 \quad (39)$$

式中:  $B_1 = K_1 - K_2 / a_3, B_2 = e_3 - L_2 / a_3$ 。

将式(36)~(39)代入式(35)得:

$$\dot{V}_4 = - \sum_{i=1}^3 m_i e_i^2 + B_1 \varepsilon_1 + B_2 \varepsilon_2 + b_1 \varepsilon_3 + b_1 u_{\rho 1} \quad (40)$$

取  $H_1 = \dot{V}_4 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 q_i^2 x_i^2 - \frac{\gamma^2}{2} \sum_{i=1}^3 \varepsilon_i^2$ , 由式(40)得:

$$H_1 = - \sum_{i=1}^3 m_i e_i^2 - \left( \frac{\gamma \varepsilon_1}{\sqrt{2}} - \frac{B_1}{\sqrt{2} \gamma} \right)^2 - \left( \frac{\gamma \varepsilon_2}{\sqrt{2}} - \frac{B_2}{\sqrt{2} \gamma} \right)^2 - \left( \frac{\gamma \varepsilon_3}{\sqrt{2}} - \frac{b_1}{\sqrt{2} \gamma} \right)^2 + \frac{B_1^2}{2\gamma^2} + \frac{B_2^2}{2\gamma^2} + \frac{b_1^2}{2\gamma^2} + b_1 u_{\rho 1} \quad (41)$$

取附加控制变量  $u_{\rho 1}$  值为:

$$u_{\rho 1} = \frac{-(B_1^2 + B_2^2 + b_1^2)}{2\gamma^2 b_1} \quad (42)$$

将式(42)代入式(41)可得:

$$H_1 = \dot{V}_4 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 q_i^2 x_i^2 - \frac{\gamma^2}{2} \sum_{i=1}^3 \varepsilon_i^2 = \dot{V}_4 + \frac{1}{2} |y_1|^2 - \frac{\gamma^2}{2} |\varepsilon|^2 \leq 0 \quad (43)$$

式(43)求积分可知:

$$\int_0^T |y_1|^2 dt \leq \gamma \int_0^T |\varepsilon|^2 dt + 2V_4(0) \quad (44)$$

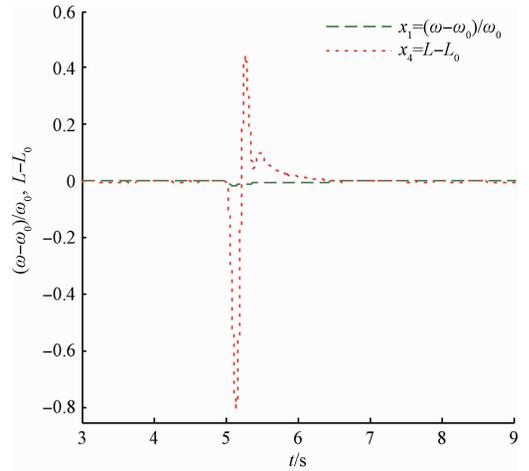
因此,式(34)、(42)和(36)~(39)可保证机电调速系统  $L_2$  增益小于  $\gamma$ 。

### 4 仿真分析与实验验证

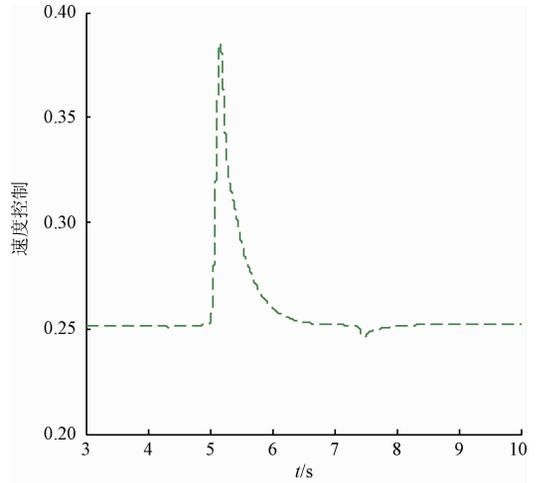
式(15)~(18)是用于表征柴油发电机组特性的一类含多个不确定参数和外部扰动的非线性系统模型。柴油发电机组通常采用比例-积分的常规控制方式。由于该常规控制方式单纯的依靠速度偏差信号实施直接控制,没有充分考虑系统的非线性特征,因此控制效果比较保守。

发电机组额定功率为 150 kW,初始负载为 50 kW,并在 5 s 时突然增加 25% 的额定负载,并在 5.1 s 时将增加的负载去除,由于负载突变对机电复合调速系统造成扰动,为了使柴油机转速尽快恢复稳定,结合所建立的发电机组非线性模型,分别采用常规控制方式和非线性鲁棒自适应方式进行了仿真分析。仿真中,发电机组的参数为  $J = 3.2, p = 2, a'_4 = 0.15, a'_5 = 100, a_3 = a_4 = 1, \theta_1 = 0.6 \sim 1.4, \theta_2 = 1.7 \sim 2.3, \theta_3 = 26 \sim 34$ 。

当采用常规控制方式时,仿真结果如图 2 所示。当采用本文所提的基于附加控制变量和可调参数自修正的非线性鲁棒自适应控制方法时,所选择的控制参数分别为  $f_1(|e_1|) = e_1^2, f_2(|e_2|) = 2e_2^2, f_3(e_3) = 2|e_3| + \cos e_3, \zeta(e_4) = 3 + 2|e_4| + \sin e_4, c_1 = 5, c_2 = 2, c_3 = 9, \rho_1 = \rho_2 = 2, \rho_3 = 3, \rho_4 = 5, q_1 = 12, q_2 = 9, q_3 = 5, q_4 = 10, \gamma = 0.5, \varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$  均为白噪声(噪声功率分别为 0.2, 0.3 和 0.2)。反演  $L_2$ -NASC 的仿真结果如图 3 所示。



(b) 转速和摆杆移动距离变化曲线  
(b) Curves of rotation speed and pendulum rod position



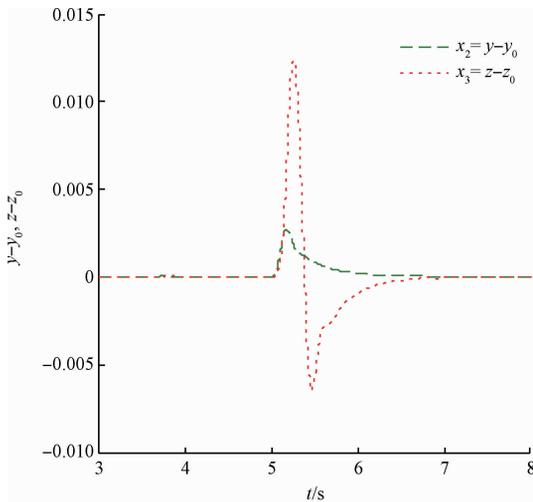
(c) 速度控制变化曲线  
(c) Curves of control input

图 2 常规控制时的状态及控制变化曲线

Fig. 2 Curves of state parameters and control input by traditional control method

比较图 2 和 3 可知,相对于常规速度控制,反演  $L_2$ -NASC 可以使柴油机调速系统的稳定时间由原来的 1.8 s 减小至 1.0 s,控制套、摆杆移动距离等机构的动作超调明显减小,调速控制的速度明显缩小。反演  $L_2$ -NASC 之所以具有更好的控制效果,一方面是由于反演  $L_2$ -NASC 在进行速度控制设计过程中充分利用了调速系统的非线性特征,另一方面是由于在虚拟控制变量中引入了  $K$  类函数,且不确定参数自校正方法能够有效的保证调速系统的稳定。

为了验证所提控制方法的有效性,构建了调速控制实验环境,如图 4 所示,实验结果如图 5 所示。实验环境由发电机组、数字控制板、程序调试笔记本和仿真实验设备构成。



(a) 控制套移动距离和变化速度曲线  
(a) Curves of control sleeve shift distance and speed

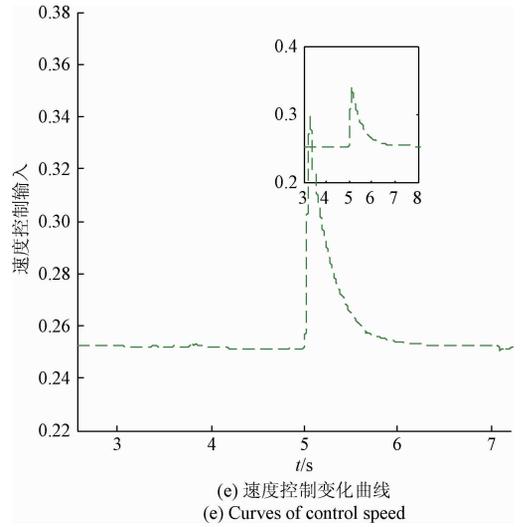
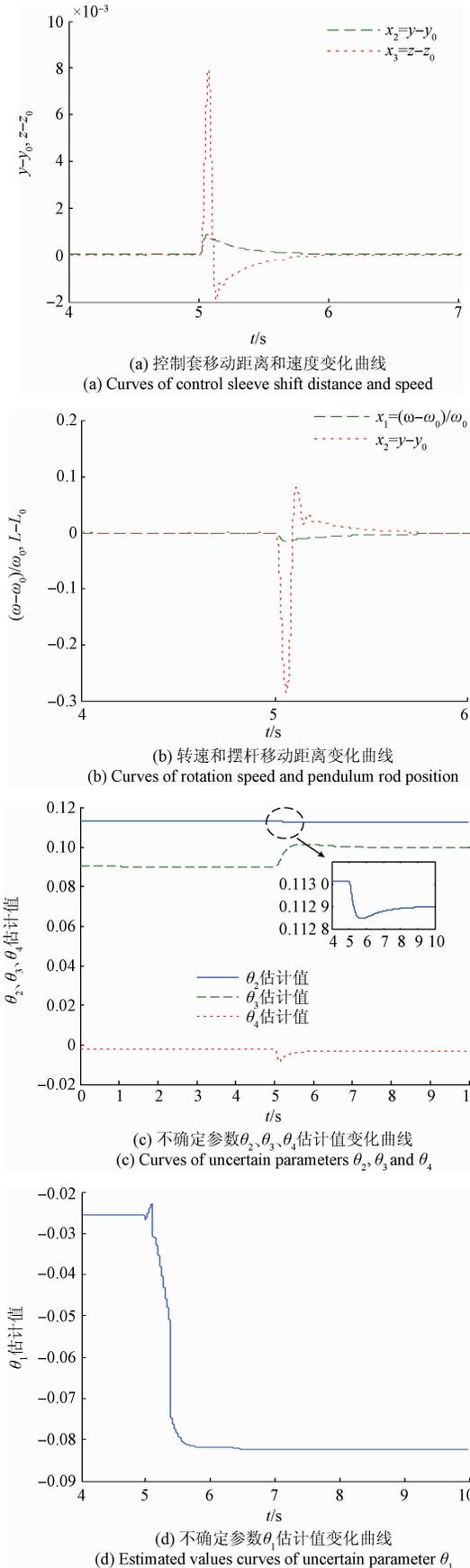


图3 采用反演 $L_2$ -NASC时的状态及控制变化曲线  
Fig.3 Curves of state parameters and control input by back-stepping  $L_2$ -NASC control



(a) 发电机、调试板与上位机  
(a) Photos of generator, test board and computer



(b) 调试板与上位机  
(b) Photos of test board and computer

图4 柴油发电机组控制实验环境

Fig.4 Experimental environment of the diesel generator set control

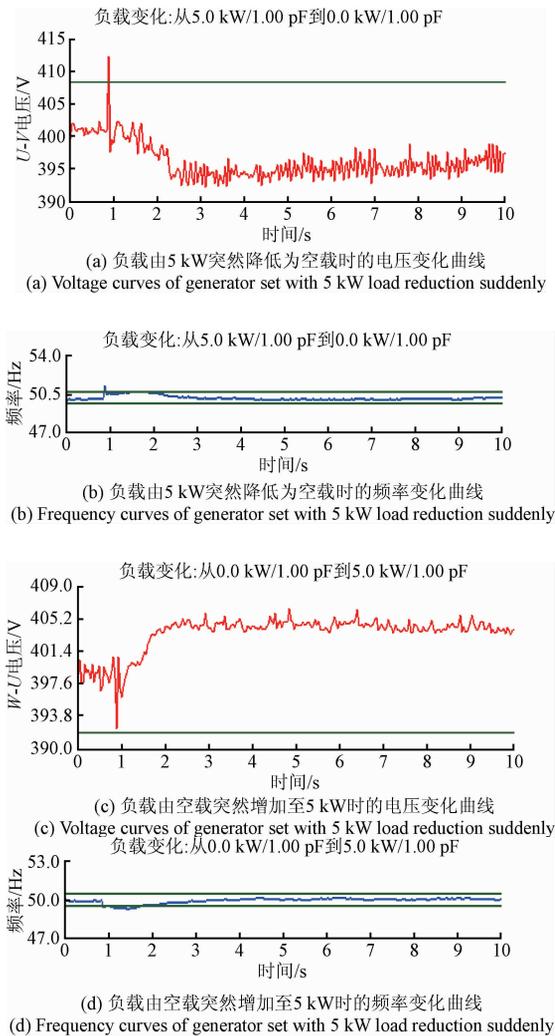


图5 负载突变时的实验结果

Fig. 5 Experimental results when load changes suddenly

从实验结果图4和5可知,当负载由5 kW突然减小为空载时,频率超调至50.7 Hz,并在1.5 s左右恢复稳定,受负载电流突然减小以及转速波动影响,端电压由400 V超调至420 V左右,并在1.5 s后恢复稳定,由于励磁系统具有线缆补偿功能,所以最终在空载时端电压稳定在395 V左右;当负载由空载突然增加至5 kW时,频率降低至49 Hz,并在1 s左右恢复稳定,受负载电流突然减小以及转速波动影响,端电压由400 V超调至408 V左右,并在1 s后恢复稳定,由于励磁系统具有线缆补偿功能,所以最终端电压稳定在407 V左右。由于频率能够较快稳定,所以充分证明所提控制方法的有效性。

## 5 结 论

本文详细分析了一类机电复合调速系统的不确定性特征,构建了含多个不确定参数和外部干扰的调速系统

非线性模型,表征了机电复合调速系统特有的不确定性和非线性。针对调速系统的非线性不确定模型,提出了一种基于附加控制变量和可调参数自修正的反演 $L_2$ -NASC方法,由于新提出的控制方法在进行速度控制律和可调参数自修正律设计时充分利用了模型的非线性特征,且在控制律中引入了 $K$ 类函数,使得调速系统的稳定收敛速度得到明显提高,且由于引入附加控制变量,克服了常规反演设计时各子系统虚拟函数设计时都要考虑 $\gamma$ -耗散不等式的不足,而所引入的可调参数自修正律不是以不确定参数准确估计为目标,而是以调速系统的鲁棒稳定为目标,因此,有效的提高了反演 $L_2$ -NASC的鲁棒控制效果。通过与常规速度控制方法进行仿真对比以及开展测试实验,证明了该方法的有效性和优点,并为提高机电复合调速系统的稳定控制能力提供了一种新的方法。

## 参考文献

- [1] 谷志锋,朱长青,邵天章. 分布式多输入系统的自律鲁棒自适应分散控制[J]. 控制与决策, 2014, 29(9): 1545-1552.  
GU ZH F, ZHU CH Q, SHAO T ZH. Autonomous robust adaptive decentralized control for the distributed multi-input system[J]. Control and Decision, 2014, 29(9): 1545-1552.
- [2] 谷志锋,朱长青,赵文杰,等. 谐波励磁机电复合调速型移动电站特性研究[J]. 内燃机工程, 2013, 34(5): 87-92.  
GU ZH F, ZHU CH Q, ZHAO W J, et al. Research characteristics of harmonic excited and electromechanical governed mobile power station[J]. Chinese Internal Combustion Engineering, 2013, 34(5): 87-92.
- [3] 黄曼磊,王常虹. 船舶电站柴油机非线性 $H_\infty$ 调速器[J]. 电工技术学报, 2006, 21(10): 56-61.  
HUANG M L, WANG CH H. Nonlinear  $H_\infty$  governor for diesel engine of ship power station[J]. Transactions of Electrotechnical Society, 2006, 21(10): 56-61.
- [4] 黄曼磊,王常虹. 船舶电站柴油发电机组的非线性数学模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(1): 15-20.  
HUANG M L, WANG CH H. Nonlinear mathematical model of diesel generator set on ship[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(1): 15-20.
- [5] MERTEN J G, KEITH G, URS C. Comparison of uncertainty parameterisations for  $H_\infty$  robust control of turbocharged diesel engines[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(10): 15-25.
- [6] 杨泽斌,樊荣,孙晓东,等. 基于EKF的无轴承异步电机无速度传感器控制[J]. 仪器仪表学报, 2015,

- 36(5):1023-1030.
- YANG Z B, FAN R, SUN X D, et al. Speed-sensorless control system of bearingless induction motor based on the extended Kalman filter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5):1023-1030.
- [7] 宋恩哲,姚崇,孙军,等.有限转角直流力矩电机作为柴油机调速执行机构的控制策略研究[J].内燃机工程, 2009, 30(1):45-50.
- SONG EN ZH, YAO CH, SUN J, et al. Design and research of LABLTM's controlling strategy for diesel engine speed actuator[J]. Chinese Internal Combustion Engineering, 2009, 30(1):45-50.
- [8] 黄曼磊,宋克明,魏志达.柴油发电机组非线性  $H_2/H_\infty$  调速器的研究[J].控制理论与应用, 2009, 26(8):873-878.
- HUANG M L, SONG K M, WEI ZH D. Nonlinear robust excitation and speed control based on the double strong tracking filter[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(8):873-878.
- [9] 邵金菊,魏民祥,温卫东.基于LMI活塞式发动机恒转速  $H_\infty$  动态输出反馈控制[J].航空动力学报, 2007, 22(7):1195-1199.
- SHAO J J, WEI M X, WEN W D. Piston engine speed  $H_\infty$  dynamic output feedback regulation based on LMI[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(7):1195-1199.
- [10] 谷志锋,朱长青,张晨光,等.双重强跟踪滤波励磁及调速非线性鲁棒控制[J].控制理论与应用, 2014, 31(1):85-92.
- GU ZH F, ZHU CH Q, ZHAN CH G, et al. Nonlinear robust excitation and speed control based on the double strong tracking filter[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(1):85-92.
- [11] 万钧力,曾曲洋,沈艳军.基于递归反演方法的电子节气门非线性控制[J].电子测量与仪器学报, 2014, 28(4):395-401.
- WAN J L, ZENG Q Y, SHEN Y J. Nonlinear control of electronic throttle based on recursion back-stepping method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(4):395-401.
- [12] 石勇,齐自达,张连瑜,等.基于CMAC神经网络前馈控制的柴油发电机组转速控制研究[J].内燃机工程, 2014, 35(2):98-102.
- SHI Y, QI Z D, ZHANG L Y, et al. Research on speed control of diesel generator[J]. Chinese Internal Combustion Engineering, 2014, 35(2):98-102.
- [13] 孙宇,张健.神经滑模理论在柴油机调速系统中的应用研究[J].辽宁工业大学学报:自然科学版, 2011, 31(2):99-102.
- SUN Y, ZHANG J. Application of neural mode theory to speed control of diesel engine[J]. Journal of Liaoning University of Technology: Natural Science Edition, 2011, 31(2):99-102.
- [14] 鲍雪,王大为,胡明.基于自适应模糊的旋转弹反演滑模控制律设计[J].仪器仪表学报, 2016, 37(6):1333-1339.
- PAO X, WANG D ZH, HU M. Backstepping sliding mode control design for spinning ammunition based on adaptive fuzzy method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6):1333-1339.
- [15] RABIN O, RAFIC Y, JEAN C. Optimal control of a variable geometry turbocharged diesel engine using neural networks: applications on the ETC test cycle[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(2):380-393.
- [16] 牛瑞燕,许午啸,刘金琨.欠驱动机械臂滑模控制与实验研究[J].仪器仪表学报, 2016, 37(6):348-354.
- NIU R Y, XU W X, LIU J K. Sliding mode control and experiment study for underactuated manipulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6):348-354.

## 作者简介



谷志锋(通讯作者),分别在2002年和2005年于河北工业大学获得学士学位和硕士学位,2012年于军械工程学院获得博士学位,现为石家庄铁道大学副教授,主要研究方向为独立电力系统非线性鲁棒控制。  
E-mail:gzfgohappy@163.com

**Gu Zhifeng** (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hebei University of Technology in 2002 and 2005, respectively, and received his Ph. D. degree in 2012 from Ordnance Engineering College. Now he is an associate professor in Shijiazhuang fiedao University. His main research interests include isolated power system stability control, nonlinear control and nonlinear robust control.



朱长青,1983年于空军工程学院获得学士学位,1987年于太原机械学院获得硕士学位,2005年于军械工程学院获得博士学位,现为军械工程学院教授,主要研究方向为野战电力支持技术。  
E-mail:zhuneil@163.com

**Zhu Changqing** received his B. Sc. degree in 1983 from Air Force Engineering University, and received his M. Sc. degree in 1987 from Taiyuan Mechanical Institute, and received his Ph. D. degree in 2005 from Ordnance Engineering College. Now he is professor in Ordnance Engineering College. His main research interest is field power support technology.