

# 积分滑模-主动抗扰的复合轨压控制研究

熊嘉伟, 贾瑞, 宋国梁, 单晓涵, 付文杰

潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

**摘要:**为解决高压共轨系统采用比例积分微分(proportional integral differential, PID)控制时出现的轨压控制不精确问题,分别采用模糊 PID 控制、积分滑模控制(integral sliding mode control, ISMC)、ISMC 与主动抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)复合控制策略,仿真分析高压共轨系统阶跃及自由加速工况下的轨压偏差。结果表明:对比 PID 控制, ISMC-ADRC 复合控制策略、ISMC 策略的超调量均减少 77%, 稳定时间均减少 62%;对比 ISMC, 采用 ISMC-ADRC 复合控制策略系统抖振现象减弱, 稳定时轨压偏差绝对值静态误差减少 80%, 且抗干扰能力明显提高。

**关键词:** 高压共轨; 滑模控制; 主动抗扰; PID

中图分类号: TK422

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2023)01-0059-06

**引用格式:** 熊嘉伟, 贾瑞, 宋国梁, 等. 积分滑模-主动抗扰的复合轨压控制研究[J]. 内燃机与动力装置, 2023, 40(1): 59-64.

XIONG Jiawei, JIA Rui, SONG Guoliang, et al. Research of integrated sliding mode-active disturbance rejection composite rail pressure control [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023, 40(1): 59-64.

## 0 引言

随着人们对环境保护的日益重视,柴油机的排放标准更加严格。高压共轨系统的应用能更好地降低排放污染和燃烧噪声<sup>[1-2]</sup>,高压共轨系统主要包含电控高压油泵、电控喷油器、轨压传感器等,高压油泵控制共轨管进油,喷油器控制共轨管出油,当共轨管进油量与出油量相同时,轨压维持稳定。由于高压油泵泵油与喷油器喷油无法同时完成,而且发动机液力系统导致共轨管泵油、喷油时均有一定的延迟,因此共轨管中的进油量与出油量不同,引起共轨管中压力波动,造成高压共轨系统具有非线性、强耦合的特点。

目前大多数共轨系统采用比例积分微分(proportion integration differentiation, PID)控制, PID 控制方法简单,不需要具体的物理模型,且形成了一整套完整的参数体系,但 PID 控制在非线性系统的应用效果较差。国内外学者深入研究了多种与 PID 相结合的算法,并广泛应用在非线性系统中。BOSCH 公司采用类似模糊控制算法调整 PID 参数,实现了不同的工况下采用不同的 PID 参数,提高了轨压控制的精确度。Augustine<sup>[3]</sup>、Ji 等<sup>[4]</sup>、Ballini 等<sup>[5]</sup>、潘文婵等<sup>[6]</sup>开发了基于神经网络(radial basis function, RBF)的参数自适应 PID 算法,改善传统 PID 动态响应慢的不足。陈林等<sup>[7]</sup>、周哲等<sup>[8]</sup>、Gaeta 等<sup>[9]</sup>采用基于模型的自适应轨压控制算法,与传统 PID 相比,超调量小且动态响应快。任卫军等<sup>[10]</sup>开发了遗传算法与 PID 相结合的算法,实现了 PID 参数的自适应调整。刘琦等<sup>[11]</sup>运用模糊算法整定 PID 参数,实现了 PID 参数的自整定,在超调量与动态响应特性方面均取得较好效果。王佳鹏<sup>[12]</sup>运用主动抗扰技术观测共轨管,并将干扰量补偿到系统中,提高了轨压控制精度,加快了动态响应。杨荣彬等<sup>[13]</sup>、席志远<sup>[14]</sup>采用滑模控制算法控制轨压,增强了系统的抗干扰性。

收稿日期: 2022-07-26

第一作者简介: 熊嘉伟(1995—),男,江苏徐州人,工学硕士,主要研究方向为内燃机控制策略及算法, E-mail: 731764234@qq.com。

针对非线性系统,积分滑模控制(integral sliding mode control, ISMC)具有抗干扰性强、对参数不敏感、控制效果好的优点,但系统干扰过大导致滑模结构在滑模面产生抖振,不利于精准控制。本文中采用 ISMC 控制系统到达滑模面的速度,防止系统超调;结合主动抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)估计模型干扰,补偿至 ISMC,减弱系统在滑模面上的抖振,并进行仿真分析,验证 ISMC-ADRC 复合策略的轨压控制效果。

## 1 高压共轨模型建立

### 1.1 系统结构

高压共轨系统的执行器主要包括油量计量单元、喷油器、限压阀等。油量计量单元通过比例阀控制高压油泵输送至共轨管中的油量,维持共轨管进、出油量平衡,实现轨压控制;电控喷油器可实现最佳喷油提前角、喷油器通电时间等精确控制,保证缸内混合气正常燃烧,减少  $\text{NO}_x$  等污染物排放;限压阀保证共轨管压力在规定范围内;部分高压共轨系统中设置调压阀,结合油量计量单元,根据发动机不同负荷,采用不同方式控制轨压,提高控制轨压精确度。

### 1.2 基于 ISMC 的轨压控制

忽略燃油温度影响,燃油弹性模量<sup>[15]</sup>

$$\beta = (1 + d_1 \times 10^{-9} p) (1 + d_2 \times 10^{-9} p) / d_3 \times 10^{-9},$$

式中: $d_1 = 3.23$ ;  $d_2 = 3.92$ ;  $d_3 = 0.69$ ;  $p$  为共轨管压力, Pa。

高压共轨系统微分方程

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\beta}{V} (q_{v,1} - q_{v,2}), \quad (1)$$

式中: $t$  为时间, s;  $V$  为高压共轨管体积,  $\text{m}^3$ ;  $q_{v,1}$  为高压油泵供油体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $q_{v,2}$  为共轨管出油体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

传统滑模面

$$S = (p_{\text{act}} - p_{\text{ref}}) (1 + C),$$

式中: $p_{\text{act}}$  为实际轨压, Pa;  $p_{\text{ref}}$  为设定轨压, Pa;  $C$  为标定参数。

传统滑模面能保证系统在有限时间内到达滑模面,但没有明确规定到达滑模面的轨迹,使得系统在初始状态时必须经过一定时间才能到达滑模面上,导致系统到达滑模面的时间增加;计算滑模面的趋近律时,传统滑模面求导会变成偏差的一次导数与偏差的二次导数相加,干扰量变相放大,造成控制鲁棒性变差。

相比传统滑模面,积分滑模面采用偏差积分与偏差方法相结合的方式,在系统初始状态时,通过合理设置参数使系统初始状态处在滑模面上,消除了系统的到达阶段,且通过积分对滑模面的导数进行降阶处理,使偏差的求导不超过一次,减弱外部干扰对系统控制的影响。

积分滑模面

$$S = C \int (p_{\text{act}} - p_{\text{ref}}) dt + (p_{\text{act}} - p_{\text{ref}}) \circ \quad (2)$$

滑模控制的趋近律

$$\dot{S} = -\varepsilon \text{sgn}(S) - kS, \quad (3)$$

式中: $\varepsilon$  和  $k$  均为大于 0 的参数,需多次试验得出;  $\text{sgn}(S) = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ -1 & S < 0 \end{cases}$ 。

$\text{sgn}$  函数滑模控制干扰能力强,当系统  $S > 0$  时,  $\text{sgn}(S) = 1$ ,  $\dot{S} = -\varepsilon - kS$ , 由于  $\varepsilon$  和  $k$  均大于 0,  $\dot{S}$  是一个大的负值,  $S$  会以很快的速度趋近 0; 当系统  $S < 0$  时,  $\text{sgn}(S) = -1$ ,  $\dot{S} > 0$ ,  $S$  会以较慢的速度趋近 0。

由式(1)(2)(3)得到

$$q_{v,1} = (-\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - kS - C(p_{\text{act}} - p_{\text{ref}}) + p_{\text{ref}})V/\beta + q_{v,2} \circ$$

运用李雅普诺夫函数的第二方法分析系统的稳定性,引入李雅普诺夫函数

$$V' = S^2/2, \quad (4)$$

根据李雅普诺夫判据可知,当  $\dot{V}' \leq 0$  时,系统是李雅普诺夫下的稳定。

由式(3)(4)得到

$$\dot{V}' = S\dot{S} = S(-\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - kS + d),$$

式中  $d$  为干扰量。若干扰量  $d$  的界为  $L$ ,系统若保持李雅普诺夫下的稳定,则

$$|-\varepsilon - kS| \geq |L|. \quad (5)$$

参数  $\varepsilon$  和  $k$  满足条件(5)时,系统收敛,稳定性好,抗干扰能力强,但  $\varepsilon$  和  $k$  较大容易引起系统抖振。

### 1.3 基于积分滑模-主动抗扰的复合轨压控制

采用主动抗扰的状态观测器观测系统扰动,并将观测的干扰量补偿到滑模控制中,该控制方法便于设置参数  $\varepsilon, k$ ,且减小轨压抖振现象。

传统扩张状态观测器将  $q_{v,2}$  作为系统的内部干扰和外部干扰之和,但扩张观测器的负载能力有限,干扰较大时不能及时响应补偿,将  $q_{v,2}$  细化为:

$$q_{v,2} = q_{v,\text{in}} + q_{v,\text{pe}} + q_{v,\text{f}},$$

式中:  $q_{v,\text{in}}$  为喷油器的喷油体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $q_{v,\text{pe}}$  为泄漏油体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $q_{v,\text{f}}$  为扩张观测器估计的模型干扰体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ,需要观测后计算得出。

高压共轨系统的动态方程

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\beta}{V}(q_{v,1} - q_{v,\text{in}} - q_{v,\text{f}}) \circ$$

构建扩张状态观测器,设  $x_1 = p$ ,  $x_2 = q_{v,\text{f}}$ ,  $h = \dot{x}_2$ ,  $f_0 = q_{v,\text{in}} + q_{v,\text{pe}}$ ,  $u = q_{v,1}$ , 高压共轨系统扩张状态方程

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{D}f_0 + \mathbf{E}h, \\ y &= \mathbf{C}\mathbf{x}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\beta/V \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \beta/V \\ 0 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{C} = [1 \quad 0]$ ,  $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

式(6)中  $\mathbf{x}$  的估计值为  $\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}$ ,  $y$  的估计值为  $\hat{y}$ , 扩张观测器的增益矩阵  $\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$ , 其中  $\beta_1, \beta_2$  为 2

个带宽的系数,高压共轨系统的扩张状态方程:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \beta/V(q_{v,1} - q_{v,\text{in}} - q_{v,\text{pe}} - q_{v,\text{f}}) + \beta_1(y - \hat{x}_1), \\ \dot{\hat{x}}_2 &= \beta_2(y - \hat{x}_1), \\ \hat{\mathbf{x}} &= (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}u + \mathbf{L}y + \mathbf{D}f_0, \\ \hat{y} &= \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}. \end{aligned}$$

根据带宽调制参数方法<sup>[16]</sup>,将  $\mathbf{A}-\mathbf{L}\mathbf{C}$  矩阵的极点设置为带宽  $\omega_0$  处,可简化整定参数,将状态观测器观测的扰动  $f_2$  补偿至滑模控制器中,得到输出控制量

$$u = (-\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - kS - C(p_{\text{act}} - p_{\text{ref}}) + p_{\text{ref}})V/\beta + q_{v,\text{in}} + q_{v,\text{pe}} + q_{v,\text{f}} \circ$$

## 2 试验分析

采用类似模糊 PID 控制、ISMC、ISMC 与 ADRC 复合控制策略(简称为 ISMC-ADRC),结合电子控制

单元(electronic control unit, ECU)仿真平台,模拟发动机阶跃工况及自由加速工况下不同控制策略的轨压偏差(实际轨压与设定轨压之差)绝对值。阶跃工况指轨压从 60 MPa 瞬间升高至 180 MPa,轨压稳定后,再由 180 MPa 降为 60 MPa;自由加速工况指油门开度从 0 升高至 100%,稳定后油门开度再降为 0。

类似模糊 PID 控制可使参数自适应调整为不同值,采用类似模糊 PID 控制策略,仿真阶跃工况、自由加速工况下轨压偏差绝对值曲线如图 1 所示。

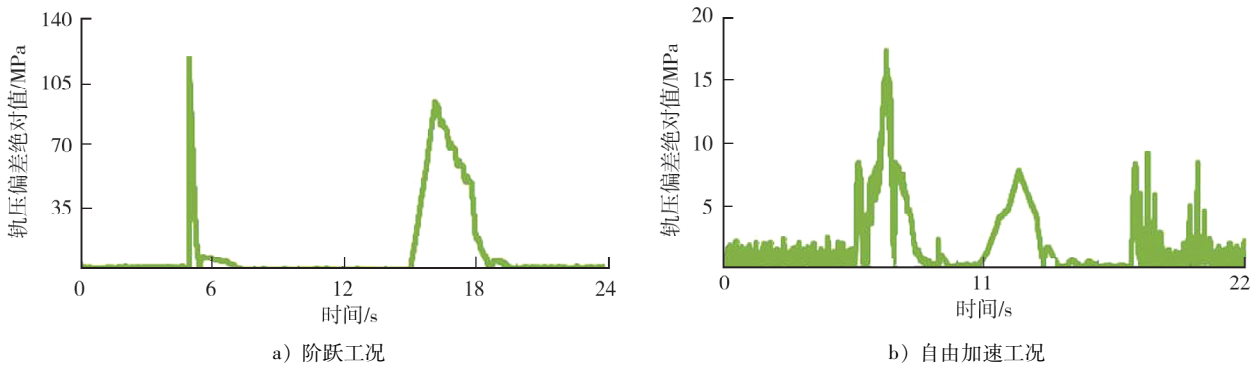


图 1 2 种工况下模糊 PID 控制轨压偏差绝对值曲线

由图 1a)可知;PID 控制在经过 5.5~7.5 s 有明显的超调量,此时最高轨压偏差绝对值为 9 MPa;轨压由 180 MPa 降为 60 MPa 时,系统稳定所需时间约为 2.0 s,用时较长;PID 控制系统稳定时的轨压偏差绝对值静态误差约为 0.8 MPa,满足稳定工况时轨压偏差绝对值静态误差不得大于 2.5 MPa 的要求。由图 1b)可知,油门开度为 100%时轨压偏差绝对值较大,可能导致轨压超出共轨管承受界限,PID 控制的超调量有冲阀的风险,应迅速打开限压阀泄压。

ISMC 策略在阶跃工况、自由加速工况下轨压偏差绝对值曲线如图 2 所示。由图 2a)可知,ISMC 控制在阶跃工况的超调量明显减少,约为 2 MPa,且系统稳定所需时间缩短,约为 0.79 s;对比 PID 控制,超调量减少了 77%,系统稳定所需时间减少了 62%,但 ISMC 控制在经过 5~16 s 时有抖振现象,此时轨压偏差绝对值静态误差为 3.5 MPa 左右,超出了稳态工况时轨压偏差绝对值静态误差的限值要求;由图 2b)可知,自由加速工况下轨压抖振现象更明显。

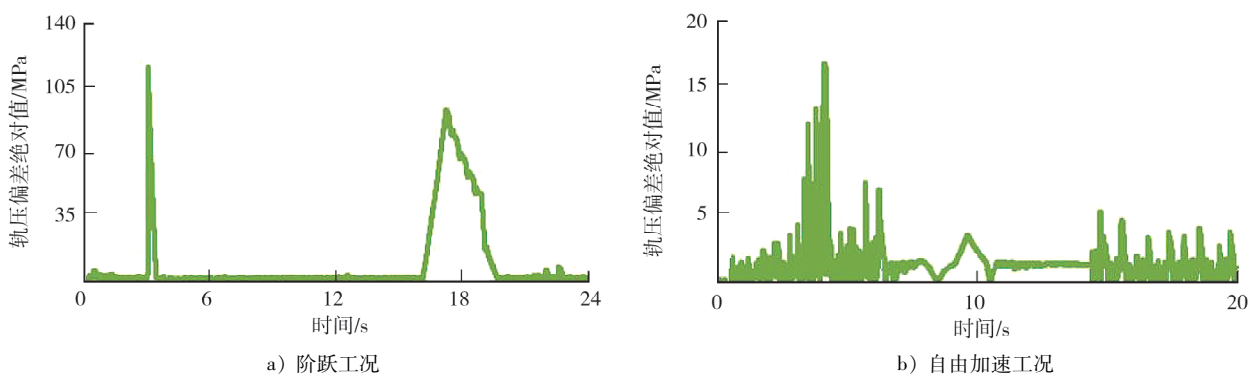


图 2 2 种工况下 ISMC 轨压偏差绝对值曲线

ISMC-ADRC 在阶跃工况、自由加速工况下轨压偏差绝对值曲线如图 3 所示。由图 3a)可知:对比 PID 控制,ISMC-ADRC 在阶跃工况的超调量约为 2 MPa,减少了 77%,系统稳定所需时间约 0.78 s,减少了 62%,系统稳定时轨压偏差绝对值静态误差约为 0.72 MPa,减少了 10%;对比 ISMC 控制,系统稳定时轨压偏差绝对值静态误差约为 0.72 MPa,减少了 80%。图 3b)可知:ISMC-ADRC 在自由加速工况下最大轨压偏差绝对值为 14 MPa,对比 PID 最大轨压偏差绝对值,超调量减少了 22%;对比 ISMC 最大轨压偏差绝对值,超调量减少了 48%左右。ISMC-ADRC 2 种工况下抖振现象均明显减弱。

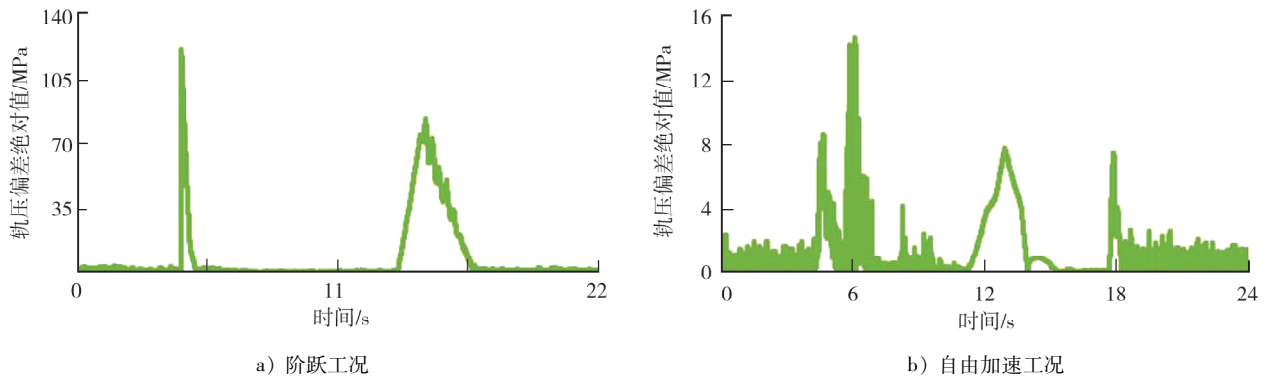


图 3 2 种工况下 ISMC-ADRC 的轨压偏差绝对值曲线

针对 ISMC 及 ISMC-ADRC,由于 $q_{v,1}$ 、 $q_{v,2}$ 不可修改,将参数  $V$  扩大 2 倍后,进行仿真对比试验,验证 2 种控制策略的抗干扰性。修改系统参数后,ISMC 阶跃工况的轨压偏差绝对值曲线和滑模面  $S$  曲线如图 4 所示,ISMC-ADRC 在阶跃工况、自由加速工况下的轨压偏差绝对值曲线如图 5 所示。

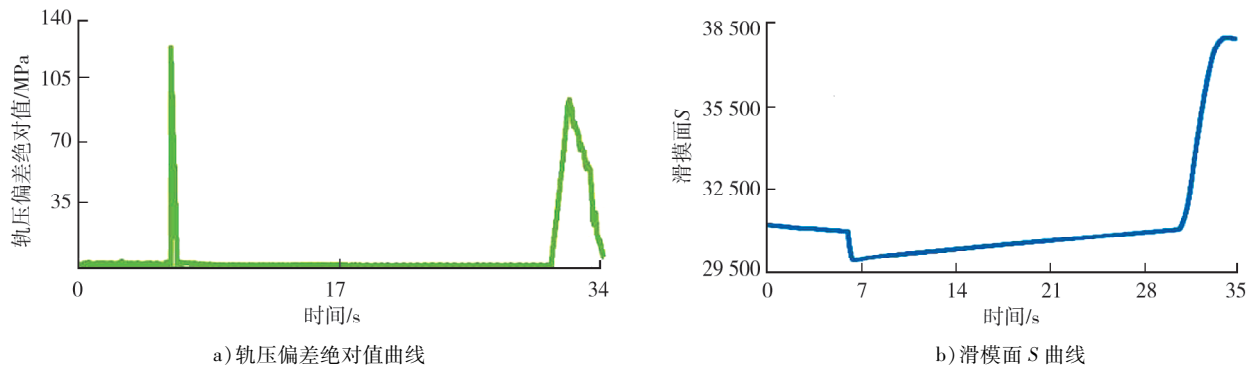


图 4 参数  $V$  扩大 2 倍后 ISMC 阶跃工况的轨压偏差绝对值曲线和滑模面  $S$  曲线

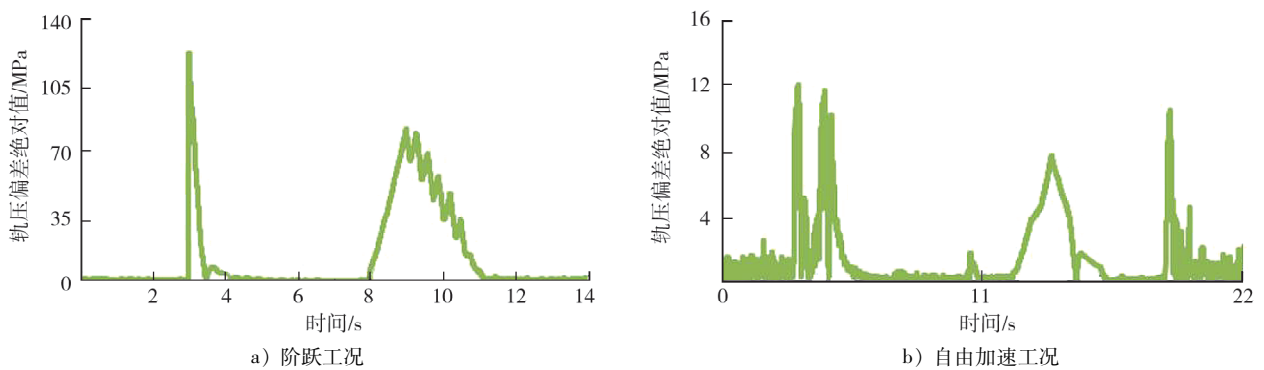


图 5 参数  $V$  扩大 2 倍后 ISMC-ADRC 2 种工况下的轨压偏差绝对值曲线

由图 4 可知:参数  $V$  扩大 2 倍后,ISMC 在阶跃工况轨压偏差绝对值存在静态误差;滑模面  $S$  在系统稳定时未趋近 0,而且呈上升趋势;修改参数  $V$  后,系统不收敛,ISMC 抗干扰能力差。

由图 5 可知:参数  $V$  扩大 2 倍后,ISMC-ADRC 在阶跃工况下经过 3.5~4.0 s 有超调现象,对比 PID 控制,超调量减小,且系统稳定所用时间缩短;ISMC-ADRC 在阶跃工况与自由加速工况下系统均收敛。

### 3 结论

1) ISMC 与 ISMC-ADRC 在阶跃工况及自由加速工况中的瞬态控制效果均优于 PID。

2) ISMC 系统稳定时产生的抖振不利于轨压控制, 结合 ADRC 中的状态观测器对干扰进行观测并补偿到 ISMC 中, 抖振现象减弱, 鲁棒性增强, 抗干扰能力提高。

### 参考文献:

- [1] 王尚勇. 现代柴油机电控喷油技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [2] 许锋. 内燃机原理教程[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2015.
- [3] AUGUSTINE D W. A method for self-tuning a PID controller for control of small to medium sized diesel engines [C]// Proceedings of International Conference on Systems Engine. Dayton, USA: IEEE, 1991: 85-88.
- [4] JI Z M, XUAN X, SUN Z Q, et al. Rail pressure control of common rail diesel engine based on RBF neural network adaptive PID controller [C]// Proceedings of International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. Harbin, China: IEEE, 2011: 1122-1125.
- [5] BALLINI R, ZUBEN F J V. Application of neural networks to adaptive control of nonlinear systems [J]. Automatica, 2000, 36 (12): 1931-1933.
- [6] 潘文婵, 刘尚东. BP 神经网络的优化研究与应用 [J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(5): 74-76.
- [7] 陈林, 杨福源, 杨学青, 等. 基于模型的高压共轨柴油机轨压控制 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(7): 1077-1081.
- [8] 周哲, 张振东, 尹丛勃, 等. 基于转矩模型的高压共轨柴油机控制策略 [J]. 汽车工程, 2017, 39(11): 1245-1251.
- [9] GAETA A D, FIENGO G, PALLADINO A, et al. Design and experimental validation of a model-based injection pressure controller in a common rail system for GDI engine [C]// Proceedings of 2011 American Control Conference. San Francisco, USA: IEEE International. 2011: 5273-5278.
- [10] 任卫军, 祁琳娜. 基于遗传算法非线性 PID 的柴油机共轨压力控制 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(5): 1422-1425.
- [11] 刘琦, 刘云生, 宋汉江, 等. 模糊算法对柴油机电控共轨燃油系统轨压控制的影响 [J]. 内燃机与配件, 2021(3): 14-17.
- [12] 王佳鹏. 单缸柴油机高压共轨系统建模和轨压控制策略研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [13] 杨荣彬, 王会, 胡云峰, 等. 缸内直喷汽油机共轨压力滑模控制器设计 [J]. 控制工程, 2016, 23(11): 1768-1773.
- [14] 席志远. 缸内直喷汽油机轨压控制算法研究 [D]. 长春: 长春大学, 2021.
- [15] 胡建功. 基于瞬态轨压下喷孔流量变化的控制策略 [J]. 内燃机与动力装置, 2017, 34(5): 53-59.
- [16] 高志强. 主动抗扰控制思想探究 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498-1510.

## Research of integrated sliding mode-active disturbance rejection composite rail pressure control

XIONG Jiawei, JIA Rui, SONG Guoliang, SHAN Xiaohan, FU Wenjie

Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

**Abstract:** Aiming at the problem of inaccurate rail pressure control when the high-pressure common rail system adopts proportional integral differential (PID) control, fuzzy PID control, integral sliding mode control (ISMC), ISMC and active disturbance rejection control (ADRC) composite control are adopted respectively. The rail pressure deviations of the high-pressure common rail system under step and free acceleration conditions are simulated and analyzed. The results show that compared with PID control, the overshoot of ISMC-ADRC composite control strategy and ISMC strategy are reduced by 77% and the stabilization time are reduced by 62%; Compared with ISMC, the chattering phenomenon of the system using ISMC-ADRC composite control strategy is weakened, the static error of the absolute value of the rail pressure deviation is reduced by 80% when it is stable, and the anti-interference ability is significantly improved.

**Keywords:** high pressure common rail; sliding mode control; active disturbance rejection control; PID

(责任编辑: 臧发业)