

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2024.09.006

# 基于反步法的电磁气量调节执行机构自适应积分滑模控制\*

张睿<sup>1</sup>, 张旭龙<sup>2</sup>, 王瑶<sup>1\*</sup>, 张进杰<sup>1</sup>, 赵得赓<sup>1</sup>

(1. 北京化工大学 高端压缩机及系统技术全国重点实验室, 北京 100029;

2. 中国船舶集团有限公司 系统工程研究院, 北京 100094)

**摘要:** 往复压缩机电磁气量调节执行机构是一种利用电磁驱动力控制进气阀启闭的装置。传统的脉冲电压控制方法存在高频快速响应与低落座速度的矛盾, 以及抗扰动性能差等问题, 为此, 提出了一种基于反步法的自适应积分滑模控制。首先, 针对电磁气量调节执行机构建立了考虑扰动的非线性模型; 其次, 利用反步法设计思想将高阶的电磁气量调节执行机构系统分解成了两个互相串联的低阶子系统, 并在此基础上, 结合滑模控制、自适应控制和积分控制的特点设计了一种复合型控制方法; 最后, 采用 AMESim-Simulink 联合仿真平台, 对该控制方法与传统 PID 控制、滑模控制进行了不同角度的仿真分析对比。研究结果表明: 在该控制方法下, 电磁气量调节执行机构在的顶出和撤回过程中的最大跟踪误差平均值分别为 9.6% 和 10.8%, 平均落座速度分别为 0.32 mm/s 和 0.98 mm/s, 扰动造成的最大位移偏移量为 1.3%。该控制方法能够保证跟踪误差快速收敛, 提高位移跟踪精度, 降低电磁气量调节执行机构的落座冲击, 并对外部扰动具有强鲁棒性。

**关键词:** 往复压缩机; 电磁气量调节执行机构; 无级气量调节; 反步控制; 自适应控制; 积分滑模控制; 平均跟踪误差; 落座冲击

中图分类号: TH457

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2024)09-1575-09

## Adaptive integral backstepping sliding mode control of the electromagnetic volume control actuator

ZHANG Rui<sup>1</sup>, ZHANG Xulong<sup>2</sup>, WANG Yao<sup>1</sup>, ZHANG Jinjie<sup>1</sup>, ZHAO Degeng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of High-end Compressor and System Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. CSSC Systems Engineering Research Institute, China State Shipbuilding Co., Ltd., Beijing 100094, China)

**Abstract:** The electromagnetic gas volume control actuator of reciprocating compressor is a device that using electromagnetic driving force to control the opening and closing of the inlet valve. In order to solve the problems of ordinary pulse voltage control method, such as the contradiction between high frequency fast response and low seating speed, poor anti-disturbance performance and so on, an adaptive integral sliding mode control based on backstepping method was proposed. Firstly, a nonlinear model that considering disturbance was established for the electromagnetic gas volume control actuator. Secondly, the high-order system of electromagnetic gas volume control actuator was decomposed into two serial low-order subsystems by using the backstepping design idea. On this basis, a composite control method was designed, which combined the characteristics of sliding mode control, adaptive control and integral control. Finally, through the AMESim-Simulink joint simulation platform, the control method was analyzed and compared from different aspects with the traditional PID control method and the sliding mode control method. The experimental results show that the average tracking errors of the electromagnetic gas volume control actuator in the ejection and withdrawal processes are respectively 9.6% and 10.8%, the average seating speeds are respectively 0.32 mm/s and 0.98 mm/s. The maximum displacement offset caused by the external disturbance is 1.3%. It shows that the adaptive integral backstepping sliding mode control method can ensure the fast convergence of the tracking error, improve the displacement tracking accuracy, effectively reduce the seating impact of the electromagnetic gas volume control actuator, and have strong robustness to external disturbances.

**Key words:** reciprocating compressor; electromagnetic volume control actuator; stepless capacity control; backstepping control; adaptive control; integral sliding mode control; average tracking errors; seating impact

收稿日期: 2023-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52101343); 中央高校基本科研业务费专项(ZY2455)

作者简介: 张睿(2000-), 男, 北京人, 硕士研究生, 主要从事往复压缩机电磁气量调节研究方面的工作。E-mail: 2022200696@buct.edu.cn

通信联系人: 王瑶, 男, 博士, 硕士生导师。E-mail: wy@mail.buct.edu.cn

# 0 引 言

往复压缩机在石油化工、煤化工、油气开采、冶金、制冷、储气、天然气输送等领域中都有着广泛的应用。它不仅是能源工业的核心装备,同时也是耗能巨大的动力装备<sup>[1]</sup>。

电磁气量调节系统是一种电磁驱动的往复压缩机无级气量调节系统。它具有结构简单、调节灵敏、响应快、环境友好等优点,可有效解决往复压缩机普遍存在的能耗高,实际运行效率低、运行工况与装置系统不匹配,且不能自适应调节等问题。

电磁气量调节执行机构是往复压缩机电磁气量调节系统的核心部件。它由电磁气量调节执行机构控制进气阀群组启闭,使往复式压缩机气缸中的多余气体在压缩行程的开始阶段返回进气腔,对实际需要的气体进行压缩,实现压缩机气量 0 ~ 100% 自适应调控<sup>[2-5]</sup>。

针对电磁气量调节执行机构设计的控制器应具有如下特性<sup>[6-10]</sup>：

- 1) 位移跟踪精度高,跟踪误差收敛快;
- 2) 落座速度低,尤其是顶出落座速度低,以降低电磁铁对阀片的冲击;
- 3) 对外界扰动具有强鲁棒性。

比例-积分-微分控制 (proportional-integral-derivative control, PID) 是一种在工业过程控制中广泛应用的自动控制方法。根据被控对象的实时数据与给定值之间的误差,计算出一个控制量,以调整系统的输出,使得输出尽可能接近设定值。

蔡炯炯等人<sup>[11]</sup>提出了一种提前跟踪 PID 动态电磁力控制方法,可以较好地跟踪目标曲线;但该控制方法对于未知扰动的鲁棒性不足。WANG Li-mei 等

人<sup>[12]</sup>提出了一种滑模控制器,该控制具有较快的收敛速度;但其将原本三阶的磁悬浮系统简化成了二阶,并改用电流控制,其模型过于简化,并不适用于高精度的电磁执行机构。FETENE Y 等人<sup>[13]</sup>提出了一种基于反馈线性化的分数阶滑模控制器,该控制器具有超调量小、鲁棒性强等优点;但其反馈线性化可能造成内部动态无法观测或不稳定等问题。张宇等人<sup>[14]</sup>针对电磁执行器设计了一种补偿控制,该控制可有效解决永磁体温升带来的扰动影响;但需要提前拟合出扰动的具体值,对于无法拟合或无法计算的扰动缺乏补偿措施。MERCORELLI P 等人<sup>[15-16]</sup>使用了两个比例导数控制器对执行机构进行了控制,并利用滑模观测器实现了无传感器控制,该控制器具有较强的鲁棒性;但其对电磁执行器软着陆的控制效果不佳。EYABI P 等人<sup>[17]</sup>设计了一种高阶滑模控制器,该控制模型综合考虑了磁滞、线圈互感以及碰撞能量损耗,能够同时实现高频响应和软着陆目的;但其控制结构复杂,需要调节的参数较多,不利于实际工程应用。

笔者针对非线性气量调节执行机构进行建模,利用反步法设计思想,将原本的高阶系统拆分成两个串联的低阶系统;结合滑模控制、自适应控制和积分控制的特点,设计一种基于反步法的自适应积分滑模控制器;最后采用仿真实验,以验证该控制方法的有效性。

## 1 电磁气量调节执行机构

### 1.1 结构与原理

电磁气量调节执行机构是一种利用磁场耦合作用将电能转化为机械能,从而提供驱动力的装置。

电磁气量调节执行机构结构及工作原理示意图如图 1 所示。

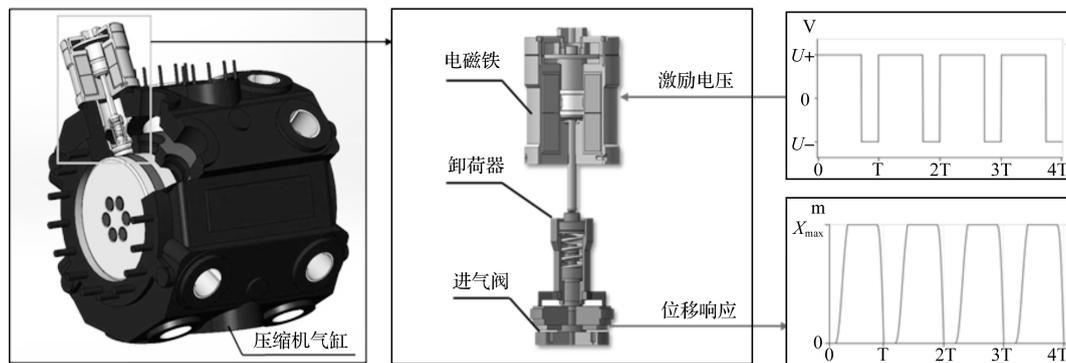


图 1 电磁气量调节执行机构结构及工作原理示意图

Fig. 1 Structure and working principle diagram of electromagnetic gas volume control actuator

图 1 中,电磁气量调节执行机构被安装在往复压缩机气缸上,主动控制进气阀启闭,以实现气量调节目的;

其结构主要由一个直流式电磁铁和一个卸荷器组成。给电磁铁施加正向激励电压时,电磁铁充电产生

电磁力,卸荷器在电磁力的驱动下向下运动,将进气阀阀片顶开,使压缩机多余气体回流。当工作腔内剩余气体达到生产所要求的气量时,需给电磁铁施加反向激励电压,电磁力快速消失,卸荷器中的弹簧推动卸荷器和电磁铁复位撤回,进气阀关闭,压缩机继续压缩剩余气体。

### 1.2 数学模型分析

若忽略非工作气隙磁阻对磁路产生的影响,根据磁路欧姆定律可得电流与磁阻关系为:

$$iN = \varphi R_m \quad (1)$$

式中: $i$ 为通过线圈的电流; $\varphi$ 为磁通量; $R_m$ 为总磁阻; $N$ 为线圈匝数。

其中, $R_m$ 可进一步表示为:

$$R_m = \frac{(l-x)}{\mu_0 S} \quad (2)$$

式中: $l$ 为工作气隙原始长度; $x$ 为衔铁位移; $\mu_0$ 为真空磁导率; $S$ 为工作气隙面积。

结合式(1)和式(2),可得电磁力  $F_{mag}$  的表达式<sup>[18]</sup>如下:

$$F_{mag} = \frac{1}{2} \frac{\varphi^2}{\mu_0 S} = \frac{1}{2} \frac{N^2 i^2 \mu_0 S}{(l-x)^2} \quad (3)$$

电磁气量调节执行机构是一个强耦合系统。

在电磁气量调节执行机构的工作过程中,电源提供的电能通过磁场转化为执行机构的机械能,因此其满足基尔霍夫电压定律和运动平衡方程,即:

$$\begin{cases} U = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \\ ma = mg \mp F_f - F_p - F_g + F_{mag} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $U$ 为通电线圈两端电压; $R$ 为线圈电阻; $L$ 为线圈电感; $m$ 为衔铁、顶杆、卸荷器等运动部件的质量总和; $a$ 为运动部件的加速度; $F_f$ 为摩擦阻力; $F_p$ 为卸荷器弹簧反力; $F_g$ 为气阀内外表面压差产生的气体力。

式(4)中的电感  $L$  可进一步表示为:

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{\mu_0 S N^2}{(l-x)} \quad (5)$$

选取位移  $x$ , 速度  $v$ , 电流  $i$  为电磁气量调节执行机构的状态变量,  $U$  为电磁气量调节执行机构的输入;令  $(x_1, x_2, x_3) = (x, v, i)$ , 则可根据式(4)和式(5)得到电磁气量调节执行机构系统的状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g \mp \frac{F_f}{m} - \frac{k(x_1 + \Delta x) + F_g}{m} + \frac{K_f x_3^2}{m(l-x_1)^2} \\ \dot{x}_3 = -\frac{x_2 x_3}{(l-x_1)} - \frac{(l-x_1)x_3 R}{2K_f} + \frac{(l-x_1)U}{2K_f} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta x$ 为弹簧的预压缩量。

$$\text{其中: } K_f = \frac{\mu_0 S N^2}{2}.$$

电磁气量调节执行机构受力分布如图2所示。

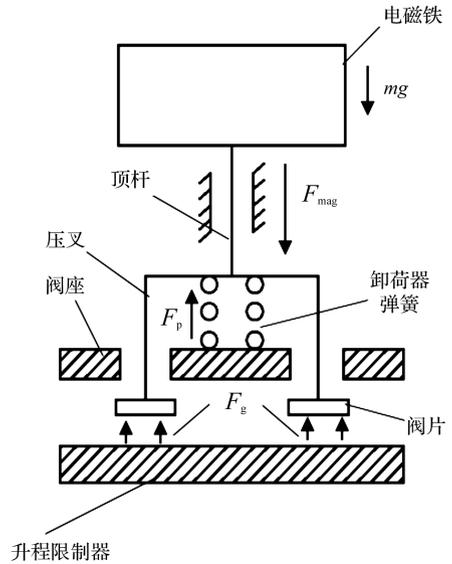


图2 电磁气量调节执行机构受力分布图  
Fig.2 Force distribution of electromagnetic gas volume control actuator

## 2 控制器设计

### 2.1 考虑外部扰动的控制系统

在电磁气量调节执行机构的实际控制过程中,往往存在着各种扰动。其中,最主要的两种扰动分别是:1)气体力波动扰动;2)负载电阻扰动。在电磁执行机构的实际应用中,这两种扰动的大小往往是未知的。因此,在传统滑模控制的基础上,可结合自适应控制,以减小扰动对系统控制产生的影响。

考虑到上述扰动是非匹配扰动,笔者采用一种基于反步法的自适应积分滑模控制器,利用反步控制思想,将式(6)所示的三阶系统分解成一个二阶系统(位移环)和一个一阶系统(电流环),二者通过中间控制量电流进行串联。

为了避免中间控制量  $x_3$  以平方的形式出现,笔者将电磁力拆分成线性部分与非线性部分,即:

$$F_{mag} = \frac{K_f x_3^2}{(l-x_1)^2} = \frac{K_f x_3}{(l-x_1)^2} + \frac{K_f x_3}{(l-x_1)^2} (x_3 - 1) \quad (7)$$

笔者将电磁力的非线性部分产生的加速度与负载力扰动合并为位移环的总不确定项。

考虑上述系统的不确定性后,新的电磁气量调节执行机构状态方程演变为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = K_s - \frac{kx_1}{m} + \frac{K_f x_3}{m(l-x_1)^2} + f_{d1} \\ \dot{x}_3 = -\frac{x_2 x_3}{(l-x_1)} - \frac{(l-x_1) \times (x_3 R + U)}{2K_f} + f_{d2} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $f_{d1}$  为电磁力非线性部分产生的加速度与负载力扰动的总和, 且  $|f_{d1}| \leq D$ ,  $D$  为位移环总不确定性的上界;  $f_{d2}$  为电阻变化产生的扰动。

$$\text{其中: } K_s = g \mp \frac{F_f}{m} - \frac{k\Delta x + F_g}{m}.$$

## 2.2 基于反步法的自适应积分滑模控制

第一步: 进行位移环控制器设计。

首先, 定义目标位移为  $x_{1d}$ , 位移跟踪误差为  $e_1$ , 则有:

$$e_1 = x_1 - x_{1d} \quad (9)$$

设虚拟控制量为:

$$x_{2v} = \dot{x}_{1d} - \beta e_1 - c_0 \int_0^t e_1 \quad (10)$$

式中:  $c_0, \beta$  为大于零的常数。

定义误差为:

$$e_2 = x_2 - x_{2v} = \dot{e}_1 + \beta e_1 + c_0 \int_0^t e_1 \quad (11)$$

设 Lyapunov 函数为:

$$V_1 = \frac{1}{2} c_0 \left( \int_0^t e_1 \right)^2 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (12)$$

对式(12)求导可得:

$$\dot{V}_1 = e_1 e_2 - \beta e_1^2 \quad (13)$$

为保证  $\dot{V}_1 \leq 0$ , 需确保  $e_2$  能够收敛到 0。

设计位移环切换函数为:

$$s_1 = e_2 + c_1 e_1 \quad (14)$$

式中:  $c_1$  为位移环滑模面系数, 且  $c_1 > 0$ 。

为保证系统能在任意状态下到达滑模面, 采用指数趋近律:

$$\dot{s}_1 = -\varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s_1) - k_1 s_1 \quad (15)$$

式中:  $\varepsilon_1, k_1$  为控制器系数且均为正数。

设 Lyapunov 函数为:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} s_1^2 \quad (16)$$

对式(16)求导, 可得 Lyapunov 函数的导数为:

$$\dot{V}_2 = e_1 e_2 - \beta e_1^2 + s_1 \left[ (c_1 + \beta) \dot{e}_1 - \frac{k}{m} x + K_s + \frac{K_f x_3}{m(l-x_1)^2} + f_{d1} - \ddot{x}_{1d} + c_0 e_1 \right] \quad (17)$$

为保证  $\dot{V}_2 \leq 0$ , 设计虚拟控制量为:

$$\begin{aligned} x_{3v} &= \frac{m(l-x_1)^2}{K_f} (-\varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s_1) - k_1 s_1 - K_s + \\ &\frac{k}{m} x_1 - D + \ddot{x}_{1d} - c_0 e_1 - (c_1 + \beta) \dot{e}_1) \end{aligned} \quad (18)$$

在实际应用中, 由于位移环不确定性的上界  $D$  很难直接确定, 因此, 需引入自适应控制对  $D$  进行实时估计。

假设  $D$  变化缓慢, 即  $\dot{D} = 0$ , 用  $D$  的估计值  $\hat{D}$  代替式(18)中的  $D$ , 可得改进后的最终虚拟控制量为:

$$\begin{aligned} x_{3v} &= \frac{m(l-x_1)^2}{K_f} (-\varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s_1) - k_1 s_1 - K_s + \\ &\frac{k}{m} x_1 - \hat{D} + \ddot{x}_{1d} - c_0 e_1 - (c_1 + \beta) \dot{e}_1) \end{aligned} \quad (19)$$

将自适应率设计为:

$$\dot{\hat{D}} = \gamma_1 |s_1| \quad (20)$$

式中:  $\gamma_1$  为自适应系数, 且  $\gamma_1 > 0$ 。

设 Lyapunov 函数为:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{D}^2 \quad (21)$$

其中:  $\tilde{D} = D - \hat{D}$ , 为  $D$  的估计误差。

对式(21)求导, 并将式(19)和式(20)代入, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= e_1 e_2 - \beta e_1^2 - k_1 s_1^2 - \varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s_1) s_1 + \\ &|s_1| (f_{d1} - D) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\text{设矩阵 } \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \beta + \varepsilon_1 c_1^2 & \varepsilon_1 c_1 - \frac{1}{2} \\ \varepsilon_1 c_1 - \frac{1}{2} & \varepsilon_1 \end{bmatrix}, \text{ 矩阵 } \mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix},$$

则式(22)可改写为:

$$\dot{V}_3 = -\mathbf{E}^T \mathbf{Q} \mathbf{E} - \varepsilon_1 |s_1| - |s_1| (D - f_{d1}) \quad (23)$$

因此, 只要合理设计  $\beta, \varepsilon_1, c_1$ , 保证矩阵  $\mathbf{Q}$  为正定矩阵, 即可确保  $\dot{V}_3 \leq 0$ , 从而确保整个位移环的稳定性。

保证  $\mathbf{Q}$  为正定矩阵的条件为:

$$\varepsilon_1 (\beta + c_1) - \frac{1}{4} > 0 \quad (24)$$

第二步: 进行电流环设计。

将位移环输出的中间虚拟控制量  $x_{3v}$  作为跟踪目标, 设电流跟踪误差为:

$$e_i = x_3 - x_{3v} \quad (25)$$

设计电流环切换函数为:

$$s_2 = c_2 e_i + c'_0 \int e_i \quad (26)$$

式中:  $c'_0, c_2$  为位移环滑模面系数, 且  $c'_0 > 0, c_2 > 0$ 。

为保证系统能在任意状态下到达滑模面, 采用指数趋近律:

$$\dot{s}_2 = -\varepsilon_2 \operatorname{sgn}(s_2) - k_2 s_2 \quad (27)$$

式中:  $\varepsilon_2, k_2$  为控制器系数且均为正数。

设 Lyapunov 函数为:

$$V_4 = \frac{1}{2}s_2^2 + \frac{1}{2\gamma_2}\tilde{f}_{d2}^2 \quad (28)$$

式中:  $\gamma_2$  为自适应系数,且  $\gamma_2 > 0$ ;  $\hat{f}_{d2}$  为  $f_{d2}$  的估计值,  $\tilde{f}_{d2} = f_{d2} - \hat{f}_{d2}$ 。

对式(28)进行求导,可得 Lyapunov 函数的导数为:

$$\dot{V}_4 = s_2 \left( -\frac{c_2 x_2 x_3}{(l-x_1)} - \frac{c_2(l-x_1)x_3 R}{2K_f} + \frac{c_2(l-x_1)}{2K_f} U + c_2 f_{d2} + c'_0 e_i \right) - c_2 \dot{x}_{3v} - \frac{1}{\gamma_2} \tilde{f}_{d2} \dot{\hat{f}}_{d2} \quad (29)$$

为保证  $\dot{V}_4 < 0$ ,需设计控制量为:

$$U = \frac{2K_f}{c_2(l-x_1)} \left( -\varepsilon_2 \text{sgn}(s_2) - k_2 s_2 + c_2 \dot{x}_{3v} + \frac{c_2 x_2 x_3}{(l-x_1)} + \frac{c_2(l-x_1)x_3 R}{2K_f} - c_2 \hat{f}_{d2} - c'_0 e_i \right) \quad (30)$$

并将自适应率设计为  $\dot{\hat{f}}_{d2} = \gamma_2 s_2$ 。

第三步:针对整个系统进行稳定性分析。

设 Lyapunov 函数为:

$$V_{\text{ABSMC}} = V_3 + V_4 \quad (31)$$

对式(31)求导可得:

$$\dot{V}_{\text{ABSMC}} = \dot{V}_3 + \dot{V}_4 = -\mathbf{E}^T \mathbf{Q} \mathbf{E} - \varepsilon_1 |s_1| - |s_1|(D-f_{d1}) - k_2 s_2^2 - \varepsilon_2 |s_2| \quad (32)$$

当且仅当  $s_1$  和  $s_2$  同时为 0 时,  $\dot{V}_{\text{ABSMC}} = 0$ ,其余情况下,  $\dot{V}_{\text{ABSMC}} < 0$ 。由此可知,该系统是渐近稳定的。

### 3 仿真分析

为了分析验证基于反步法的自适应积分滑模控制器(ABISMC)的性能,即式(30),笔者利用 AEMSim-Simulink 联合仿真平台对控制器进行了仿真测试。

与此同时,为了便于比较控制性能,笔者在联合仿真平台上搭建了 PID 控制器,与传统滑模控制器(SMC)进行对比。

经过多次反复调试,笔者给定 PID 控制器的参数为  $K_p = 5\,500, K_i = 22\,000, K_d = 330$ ;传统滑模控制器采用指数趋近律,其产生的控制电压为:

$$U = \frac{m(l-x_1)}{x_3} (\varepsilon \text{sgn}(s) + ks + \dot{x}_{1d} + \frac{kx_2}{m} + c_1 \ddot{e} + c_2 \dot{e}) + x_{3R} \quad (33)$$

滑模面系数为  $c_1 = 150, c_2 = 600$ ,控制器参数为

$\varepsilon = 50, k = 300, e$  为位移跟踪误差,  $s$  为切换函数。

电磁气量调节执行机构的系统参数如表 1 所示。

表 1 电磁气量调节执行机构系统参数  
Table 1 Electromagnetic gas volume control actuator system parameters

参数/单位	数值
最大升程 $l/\text{mm}$	3
线圈电阻 $R/\Omega$	40
线圈安匝数	4 100
运动部件质量 $m/\text{kg}$	7.5
弹簧劲度系数 $(\text{N/m})$	70 000
摩擦力 $F/\text{N}$	100
进气压力 $P/\text{MPa}$	1
工作周期 $t/\text{s}$	0.2

笔者采用文献[19]所述的方法设计目标曲线。

基于反步法的自适应积分滑模控制器(ABISMC)设计参数如表 2 所示。

表 2 ABISMC 控制器设计参数  
Table 2 ABISMC controller design parameters

参数	数值
$c_0$	600
$c'_0$	2 000
$c_1$	100
$c_2$	10
$\beta$	50
$\varepsilon_1$	20
$k_1$	400
$\varepsilon_2$	5
$k_2$	800
$\gamma_1$	1 250
$\gamma_2$	10

#### 3.1 跟踪误差收敛情况分析

电磁气量调节执行机构运行一个周期的位移曲线响应对比图,如图 3 所示。

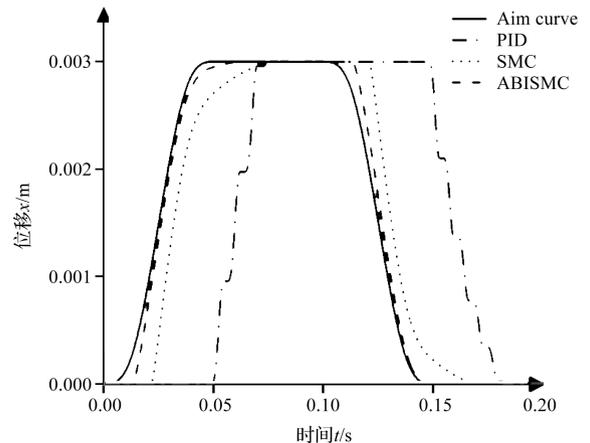


图 3 目标响应曲线与三种控制器下位移响应曲线对比  
Fig. 3 The target response curve is compared with the response curve under three controllers

由图3可以看出:在一个周期内,三种控制器下的电磁气量调节执行机构均可跟随目标曲线完成顶出动作和撤回动作;但在 ABISM C 和 SMC 控制器下,比在 PID 控制器下能更快完成顶出撤回动作,且位移曲线更加平滑。

单周期位移跟踪误差  $e$  的曲线图如图4所示。

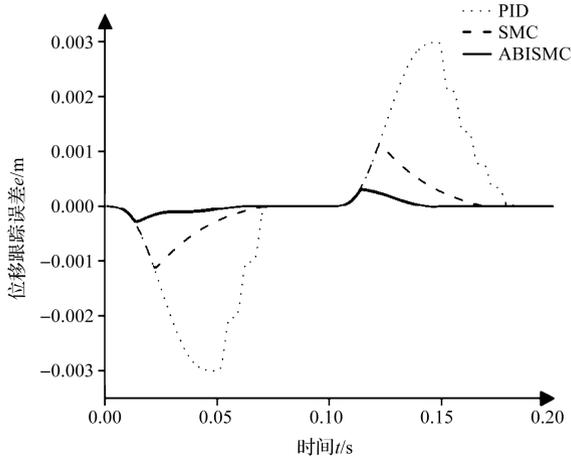


图4 位移跟踪误差对比

Fig. 4 Displacement tracking error comparison

由于不同周期下位移跟踪误差的大小具有一定随机性,因此需选取 10 个连续工作周期进行测量分析。

记  $\bar{e}_{omax}$  为顶出过程最大相对误差的平均值,  $\bar{e}_{bmax}$  为撤回过程最大相对误差的平均值,则不同控制器下的最大相对误差平均值如表3所示。

表3 不同控制器下的最大跟踪误差平均值  
Table 3 The average of the maximum tracking error under different controllers (%)

最大误差平均值	PID	SMC	ABISM C
$\bar{e}_{omax}$	97.6	37.3	9.6
$\bar{e}_{bmax}$	99.6	37.6	10.8

结合图4和表3可以看出:在无扰动状态下,三个控制器均无稳态误差;但相较于PID和SMC控制器,ABISM C 控制器过渡阶段的最大位移跟踪误差较小,且能在误差产生初期迅速抑制误差增长,保证位移跟踪精度。

另一方面,ABISM C 和 SMC 的收敛速度都要快于PID控制器。

### 3.2 落座速度分析

三种控制器下的电磁气量调节执行机构落座速度对比,如图5所示。

笔者对三种控制器下的电磁气量调节执行机构的10个连续工作周期进行测量分析,记  $\bar{v}_{out}$  为顶出落座速度平均值,  $\bar{v}_{back}$  为撤回落座速度平均值。

笔者记录了不同控制器下的执行机构的平均落座

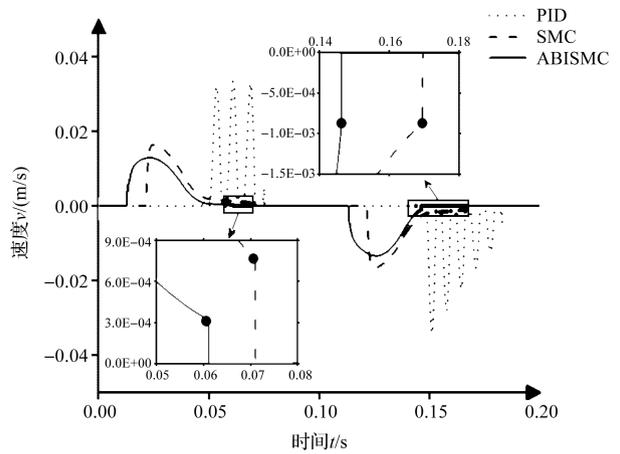


图5 电磁气量调节执行机构落座速度对比  
Fig. 5 Comparison diagram of seating speed of electromagnetic gas regulation actuator

速度,如表4所示。

表4 不同控制器下的多周期平均落座速度

Table 4 The average of seating speed under different controllers

平均落座速度/单位	PID	SMC	ABISM C
$\bar{v}_{out}/(\text{mm/s})$	4.91	0.82	0.32
$\bar{v}_{back}/(\text{mm/s})$	4.39	0.94	0.98

由于阀片的耐冲击性能远小于电磁铁和阀座,因此平均顶出落座速度指标更为重要。

从图5和表4可以看出:在三种控制器下的电磁气量调节执行机构中,ABISM C 控制器下的平均顶出落座速度最小,仅为0.32 mm/s,平均撤回落座速度与SMC接近,且远小于PID控制器。

### 3.3 抗扰动分析

首先,对比验证三种控制器对负载电阻变化的抗扰动能力。在电磁气量调节执行机构第一个周期结束时,将电阻由40 Ω 升至70 Ω。在此扰动下,三种电磁气量调节执行机构的位移响应曲线变化如图6所示。

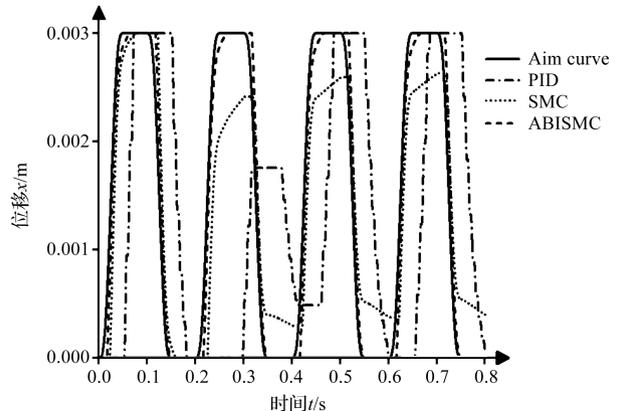


图6 电阻扰动下的电磁气量调节执行机构的位移响应曲线  
Fig. 6 Displacement response curve of electromagnetic gas regulation actuator under resistance disturbance

从图6可以看出:1)当负载电阻变化时,PID控制器下的电磁气量调节执行机构的位移响应曲线与目标曲线会产生较大的跟踪误差,直至第三个周期才重新到达稳态;2)SMC控制器下的电磁气量调节执行机构仍能跟踪目标曲线,但重新稳定后存在稳态误差,即电磁气量调节执行机构无法完全顶出至行程终点,从而无法保证进气阀完全打开;3)而ABISMIC控制器下的电磁气量调节执行机构仍能很好地跟踪目标曲线并完成完整的顶出撤回动作,说明ABISMIC控制器对负载电阻变化产生的扰动有较强的鲁棒性。

其次,笔者对比验证三种控制器对气体力波动造成的负载力变化的抗扰动能力;给电磁气量调节执行机构施加一个扰动力,如图7所示。

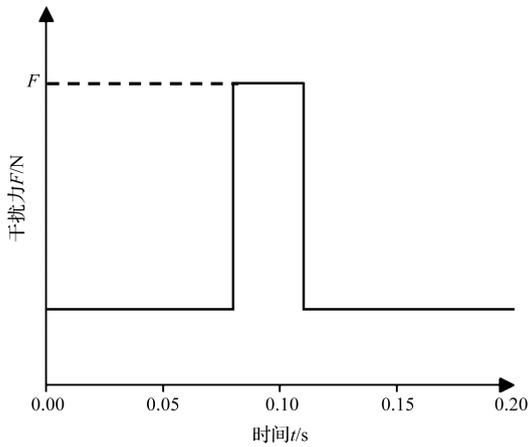


图7 气体力扰动  
Fig.7 Load force disturbance

图7中,力的方向和作用点与弹簧力相同,力的大小 $F$ 分别为245 N、285 N、325 N。

245 N 扰动力下的电磁气量调节执行机构的位移响应曲线如图8所示。

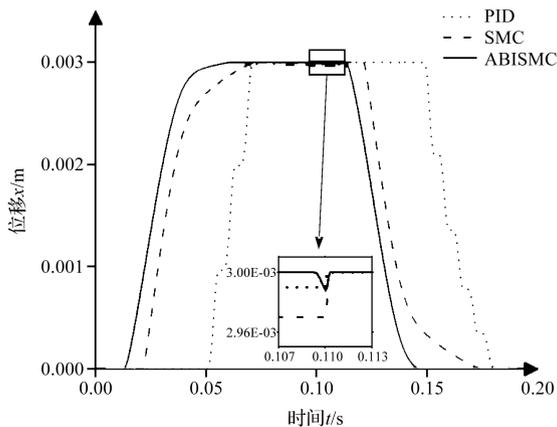


图8 245 N 扰动力下的电磁气量调节执行机构的位移响应曲线

Fig.8 Displacement response curve of electromagnetic gas volume control actuator under 245 N disturbance force

285 N 扰动力下,电磁气量调节执行机构的位移响应曲线如图9所示。

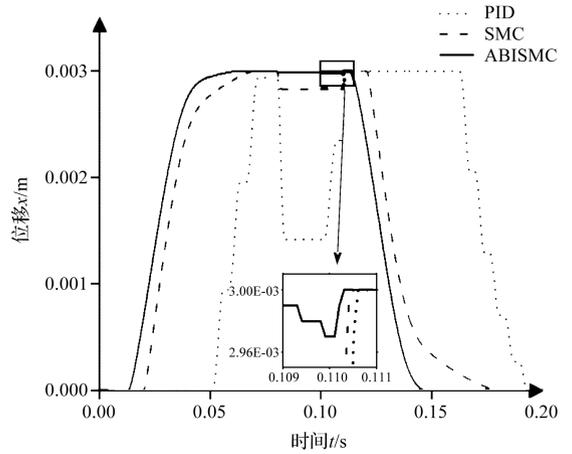


图9 285 N 扰动力下的电磁气量调节执行机构的位移响应曲线

Fig.9 Displacement response curve of electromagnetic gas volume control actuator under 285 N disturbance force

325 N 扰动力下的电磁气量调节执行机构的位移响应曲线如图10所示。

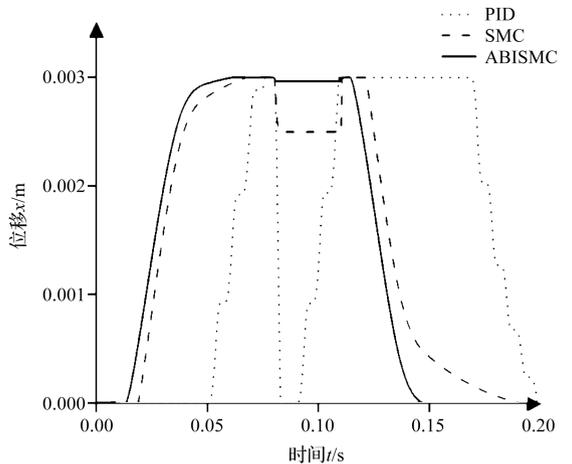


图10 325 N 扰动力下的电磁气量调节执行机构的位移响应曲线

Fig.10 Displacement response curve of electromagnetic gas volume control actuator under 325 N disturbance force

由图8~图10可知:在负载力的扰动下,三种控制器下的位移响应曲线均偏离了目标曲线,但偏离程度有所不同。

笔者选取10个连续工作周期进行测量分析,设 $\bar{\sigma}_1$ 为245 N 扰动力造成的响应曲线偏离量的平均值, $\bar{\sigma}_2$ 为285 N 扰动力造成的响应曲线偏离量的平均值, $\bar{\sigma}_3$ 为325 N 扰动力造成的响应曲线偏离量的平均值,其值如表5所示。

表 5 不同控制器及不同扰动力下的位移偏离量平均值

Table 5 The average value of displacement deviation under different controllers and different disturbance forces (%)

偏离量平均值	PID	SMC	ABISMC
$\sigma_1$	0.8	1.0	0.3
$\sigma_2$	52	7.5	1.0
$\sigma_3$	100	16.6	1.3

结合图 8 ~ 图 10 和表 5 可知:ABISMC 控制器下的位移响应曲线平均偏离量最小,具有较强的鲁棒性;并且随着负载扰动增大,ABISMC 控制器相较于 SMC 和 PID 的抗扰动优势更为明显。

## 4 结束语

笔者阐述了一种用于往复压缩机气量调节的电磁执行机构,并建立了该电磁气量调节执行机构的数学模型;在此基础上,利用反步法设计思想将系统模型拆解成位移环和电流环,并结合滑模控制、自适应控制和积分控制的特点,设计了一种基于反步法的自适应积分滑模控制器,并将该控制器与传统 PID 控制器、传统滑模控制器进行了仿真对比。

研究结果表明:

1) ABISMC 控制器下的系统跟踪误差产生初期便迅速收敛,顶出与撤回过程中的平均最大跟踪误差平均值分别为 9.6% 和 10.8%,且无稳态误差,位移跟踪精度较高;

2) 顶出过程和撤回过程的平均落座速度分别为 0.32 mm/s 和 0.98 mm/s,相较于 PID 和 SMC,能更好地降低电磁铁对阀片的冲击;

3) ABISMC 控制器下的系统对负载电阻扰动和气体力波动扰动都具有很强的鲁棒性,其抗扰动性能要优于 SMC 和 PID。

笔者后续计划将该控制器与电磁气量调节执行机构样机应用到往复压缩机机组中,采用实验的方式,进一步对上述气量调节执行机构的控制方法进行优化。

## 参考文献 (References):

[1] 蔡茂林. 空压机能耗现状及系统节能潜力 [C]//中国纺织工程学会. “科德杯”第五届全国染整机电装备节能减排新技术研讨会论文集. 北京航空航天大学 SMC 节能环保中心, 2010:1-5.

CAI Mao-lin. Energy Consumption Status of Air Compressor and System Energy Saving Potential [C]//China Textile Engineering Society Proceedings of the 5th National Conference on New Technologies for Energy Conservation

and Emission Reduction of Dyeing and Finishing Electromechanical Equipment, “Kede Cup”, SMC Energy Conservation and Environmental Protection Center, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010:1-5.

[2] 李建新,王喜武. 往复压缩机无级气量调节在煤液化的应用[J]. 设备管理与维修,2022,43(24):116-118.

LI Jian-xin, WANG Xi-wu. Application of stepless capacity regulation of reciprocating compressor in coal liquefaction [J]. Plant Maintenance Engineering, 2022, 43 ( 24 ): 116-118.

[3] 孙泽胜,李旭. 无级气量调节系统在空气往复压缩机上的应用[J]. 氮肥与合成气,2020,48(3):14-16,23.

SUN Ze-sheng, LI Xu. Application of stepless volume control system in air reciprocating compressor [J]. Nitrogen Fertilizer and Syngas, 2020, 48 ( 3 ): 14-16, 23.

[4] 袁春锋. 一种针对甲醇装置开工不足的往复式压缩机节能技术——电磁驱动的气量无级调节系统 [C]//中国化学学会,全国化肥工业信息总站. 第二十四届全国煤化工、化肥甲醇行业发展技术年会论文集,2015:184-188.

YUAN Chun-feng. An Energy-Saving Technology of Reciprocating Compressor for Insufficient Start-Up of Methanol Plant; Electromagnetic Driven Gas Volume Stepless Regulation System [C]// China Chemical Engineering, National Chemical Fertilizer Industry Information Station. Proceedings of the 24th National Coal Chemical Industry and Chemical Fertilizer Methanol Industry Development Technology Annual Meeting, 2015:184-188.

[5] 张春,江志农,张进杰,等. 往复式压缩机无级气量调节工况的 CFD 仿真研究 [J]. 机电工程, 2020, 37 ( 6 ): 635-640.

ZHANG Chun, JIANG Zhi-nong, ZHANG Jin-jie, et al. CFD simulation study on the stepless capacity regulation condition of reciprocating compressor [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37 ( 6 ): 635-640.

[6] 李雅琦,李伟,陈应鹏,等. 基于 RBF 的主动悬架反演滑模控制策略研究 [J]. 机电工程, 2020, 37 ( 4 ): 425-428.

LI Ya-qi, LIU Wei, CHEN Ying-peng, et al. Research on RBF-based backstepping sliding mode control strategy for active suspension [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37 ( 4 ): 425-428.

[7] 王飞,刘会龙,刘焱,等. 基于自适应反步滑模与死区逆补偿的闭式泵控系统位置输出控制策略 [J]. 机电工程, 2023, 40 ( 9 ): 1379-1386.

WANG Fei, LIU Hui-long, LIU Yan, et al. Position output control strategy of closed pump control system based on adaptive backstepping sliding mode and dead-zone inverse compensation [J]. Journal of Mechanical & Electrical

- Engineering,2023,40(9):1379-1386.
- [8] YASEEN H M S, SIFFAT S A, AHMAD I, et al. Nonlinear adaptive control of magnetic levitation system using terminal sliding mode and integral backstepping sliding mode controllers[J]. ISA. Transactions,2021,126(7):121-133.
- [9] 闫献,傅阳,吴瑞明,等.隔膜泵用磁执行器的软着陆设计与仿真[J].液压与气动,2021,45(4):55-60.  
YAN Xian, FU Yang, WANG Rui-ming, et al. Soft landing design and simulation of electromagnetic actuator for diaphragm pump[J]. Hydraulic and Pneumatic,2021,45(4):55-60.
- [10] WU Shen-li, LIU Ling, LIANG Xiao-ming, et al. Adaptive backstepping sliding mode control of vehicle-mounted parallel stabilized platform[J]. Integrate Ferroelectrics, 2022,229(1):274-294.
- [11] 蔡炯炯,曹阳,程楷一,等.涡旋压缩机轴向平衡电磁力的自适应提前跟踪研究[J].机电工程,2020,37(4):365-370.  
CAI Jiong-jiong, CAO Yang, CHEN Kai-yi, et al. Adaptive advance tracking of axially balanced electromagnetic force of scroll compressor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(4):365-370.
- [12] WANG Li-mei, JIN Fu-ying, LIU Chun-fang, et al. Sliding Mode Control of CNC Electromagnetic Levitation System Based on Feedback Linearization[C]//2009 Chinese Control and Decision Conference,2009:2706-2709.
- [13] FETENE Y, SHIBESHI D. Fractional order sliding mode speed control of feedback linearized induction motor[J]. Power Electronics and Drives,2020,5(1):109-122.
- [14] 张宇,李波,葛文庆,等.电磁执行器工作特性分析及补偿控制[J].山东理工大学学报:自然科学版,2023,37(1):6-11.  
ZHANG Yu, LI Bo, GE Wen-qing, et al. Working characteristics analysis and compensation control of electromagnetic actuator[J]. Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition, 2023, 37(1):6-11.
- [15] MERCORELLI P. A Sensorless Control Using a Sliding-Mode Observer for an Electromagnetic Valve Actuator in Automotive Applications[C]//6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Bristol, UK.: Institute of Electrical and Electronics Engineers,2012:1-6.
- [16] MERCORELLI P. A motion-sensorless control for intake valves in combustion engines[J]. IEEE. Transactions on Industrial Electronics,2017,64(4):3402-3412.
- [17] EYABI P, WASHINGTON G. Modeling and sensorless control of an electromagnetic valve actuator[J]. Mechatronics: The Science of Intelligent Machines,2006,16(3/4):159-175.
- [18] 刘钊,张鹏鹏,陆亮,等.螺纹插装电磁换向阀电磁铁磁路分析与设计研究[J].机电工程,2021,38(7):829-835.  
LIU Zhao, ZHANG Peng-peng, LU Liang, et al. Analysis and design of solenoid magnetic circuit of solenoid directional valve[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2021,38(7):829-835.
- [19] 范爱民,常思勤,陈慧涛.电磁驱动配气机构的反演滑模控制[J].中国机械工程,2020,31(3):274-280,288.  
FAN Ai-min, CHANG Si-qin, CHEN Hui-tao. Backstepping sliding mode control of electromagnetic valve train[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(3):274-280,288.

---

**本文引用格式:**

张睿,张旭龙,王瑶,等.基于反步法的电磁气量调节执行机构自适应积分滑模控制[J].机电工程,2024,41(9):1575-1583.

ZHANG Rui, ZHANG Xulong, WANG Yao, et al. Adaptive integral backstepping sliding mode control of the electromagnetic volume control actuator[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024,41(9):1575-1583.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>