

DOI:10.11918/202305034

# 单点磁悬浮系统自抗扰自适应控制

曹泽华<sup>1,2</sup>, 杨杰<sup>1,2</sup>, 胡海林<sup>1,2</sup>

(1. 江西理工大学 电气工程与自动化学院, 江西 赣州 341000;  
2. 江西省磁悬浮技术重点实验室(江西理工大学), 江西 赣州 341000)

**摘要:** 为解决磁悬浮系统中存在的未知干扰导致的控制性能下降问题,提出了一种利用梯度信息自适应观测带宽的自抗扰控制方法(adaptive linear active disturbance rejection control, ALADRC)。首先,建立单点磁悬浮系统的非线性模型,理论推导出单点磁悬浮系统的自抗扰参数稳定域,并由此得出临界带宽概念;其次,根据观测误差最小化推导出自适应线性扩张观测器的迭代公式,增强了系统参数的稳定性,即使当前带宽会使系统发散,ALADRC也可以自动调节到相对最优稳定带宽点,使自整定变得可行,同时当遇到扰动时,带宽也会做出相应调整,增强系统抗扰能力;然后,仿真分析了ALADRC在不同学习率下观测带宽的收敛情况,得出学习率越大观测带宽收敛速度越快,最后收敛的带宽值也相对越大,且根据临界带宽和系统单位尺度可以反向推导出学习率的数量级,简化学习率的调整;最后,在单点悬浮平台上分别对比PID(proportional integral derivative)、LADRC(linear active disturbance rejection control)和ALADRC的控制效果。结果表明,相较于PID和LADRC,ALADRC的综合控制性能最优,可以实现快速无超调起浮,具有良好的自调节和抗扰能力。

**关键词:** 磁悬浮;自适应;LADRC;抗扰;稳定域

中图分类号: U125 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2024)08-0086-08

## Active disturbance rejection and adaptive control of magnetic suspension system

CAO Zehua<sup>1,2</sup>, YANG Jie<sup>1,2</sup>, HU Hailin<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Maglev Technology (Jiangxi University of Science and Technology), Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

**Abstract:** To solve the problem of control performance degradation caused by unknown interference in maglev system, an active disturbance rejection control method (adaptive linear active disturbance rejection control, ALADRC) based on gradient information adaptive observation bandwidth is proposed. Firstly, a nonlinear model of single-point suspension system is established, and the stability region of auto-disturbance rejection parameter is deduced theoretically, and the concept of critical bandwidth is obtained. Secondly, the iterative formula of the adaptive linear extended observer is derived based on the minimization of the observation error, which enhances the stability of the system parameters. Even if the current bandwidth may diverge the system, ALADRC can automatically adjust to the relatively optimal stable bandwidth point, making self-tuning feasible. At the same time, when encountering disturbances, the bandwidth will be adjusted accordingly to enhance the immunity of the system. Then, the convergence of the observed bandwidth of ALADRC under different learning rates is simulated. It is concluded that higher learning rate leads to faster convergence of the observed bandwidth, and the final convergence bandwidth value is relatively larger. In addition, the order of magnitude of the learning rate can be reversely derived according to the critical bandwidth and the system unit scale to simplify the adjustment of the learning rate. Finally, the control performance of PID (proportional integral derivative), LADRC (linear active disturbance rejection control) and ALADRC are compared respectively on a single-point suspension platform. The experimental results show that, compared with PID and LADRC, ALADRC has the best comprehensive control performance, which can realize fast non-overshoot flotation with excellent self-regulation and disturbance immunity.

**Keywords:** magnetic levitation; adaptive; LADRC; anti-interference; stability domain

收稿日期: 2023-05-11; 录用日期: 2023-07-20; 网络首发日期: 2024-05-21

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20240517.1949.004>

基金项目: 国家自然科学基金(62063009); 中国科学院赣江创新研究院项目(E255J001)

作者简介: 曹泽华(1998—),男,硕士研究生; 杨杰(1979—),男,教授,博士生导师

通信作者: 杨杰, yangjie@jxust.edu.cn

磁悬浮技术由于其独特的悬浮机理,可以大大减少摩擦阻力和机械振动,在交通、航天、工业生产中都有广泛应用<sup>[1-4]</sup>。绝大部分磁悬浮系统通过恰当的机械与电气解耦可以转换成单点悬浮系统,所以单点悬浮系统的控制问题是磁悬浮系统的关键问题。对此,学者们提出了基于模型控制<sup>[5-6]</sup>和基于先进算法控制两种思路,但由于模型不准确等因素导致模型控制很难在工程上应用,而先进算法不依赖模型,其适应性更强,如比例积分微分(proportional integral derivative, PID)控制<sup>[7-8]</sup>,滑模控制<sup>[9-10]</sup>,模糊控制<sup>[11]</sup>等。但目前几种主流算法都存在各自的一些问题,如PID控制结构简单,但抗扰性不足;模糊控制容错能力强,但响应速度不足;滑模控制适应能力强,但稳态始终存在抖震。而自抗扰控制ADRC(active disturbance rejection controller, ADRC)<sup>[12]</sup>相较于其他算法而言,具有较强的抗扰能力,更适合在悬浮系统中运用。

近年来陆续有学者通过引入自抗扰控制算法提高悬浮控制系统的性能。文献[13]将ADRC应用到磁悬浮系统,实现了列车单点的稳定悬浮。文献[14]针对磁悬浮控制敏感陀螺(magnetically suspended control and sensing gyroscope, MSCSG)转子偏转通道强耦合及航天器姿态测量过程中受扰失稳问题,提出了一种磁悬浮转子偏转解耦抗干扰控制方法。文献[15]提出一种角加速度自适应前馈控制与ADRC相结合的复合控制方法,提高了磁悬浮系统的抗干扰能力。文献[16]提出自抗扰广义预测控制理论,解决悬浮系统轨道不平顺带来的问题。上述文献虽然都是基于ADRC提高悬浮系统的控制性能,但是没有考虑在悬浮系统中,自抗扰的参数整定问题。文献[17]从偏差控制的基本原理出发,提出了一种应用各状态变量与其观测值之间的偏差作为各状态变量的调节依据,提高线性扩张状态观测器的观测精度和收敛速度。文献[18]设计了LMS-ADRC控制器,提出了基于最小均方的控制回路增益估计方法,通过迭代的方式找到LMS(least mean square)滤波器的权重向量,使控制回路增益 $b_0$ 更接近真实值。上述文献虽然对自抗扰结构进行改进以简化关键参数的调节,但扩张状态观测器的观测带宽并没有很好的自调节能力。因此为了适应更加复杂的控制环境,让观测器带宽实现自我调节,本文设计了一种基于观测误差最小化的梯度自适应观测器,能更加及时地获取系统状态信息。仿真和实际测试表明,相较于PID和LADRC,改进后

的控制算法具有更强的综合表现和参数适应能力。

## 1 单点悬浮系统模型

单点悬浮控制结构如图1所示。该系统由固定的F轨道、可上下移动的电磁铁、传感器、信号处理电路、控制器和功率放大器组成。其悬浮原理如下:传感器将悬浮间隙和悬浮电流通过信号处理电路传输给控制器,控制器根据算法产生PWM控制信号,再通过功率放大器驱动电磁铁产生电流,进而产生电磁力,以抵抗物体重力,实现稳定悬浮。

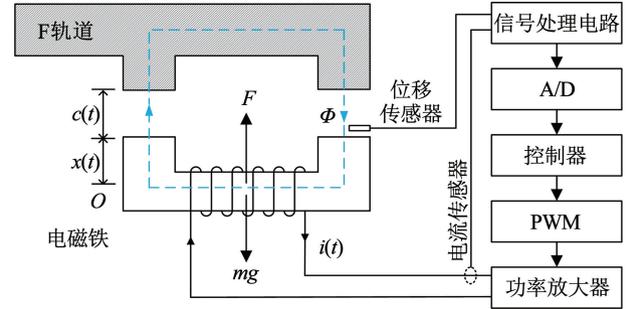


图1 单点悬浮系统控制结构

Fig. 1 Control structure of single-point suspension system

图1中 $c(t)$ 为悬浮间隙、 $x(t)$ 为悬浮高度、 $F$ 和 $mg$ 分别为电磁力和重力、 $\Phi$ 为气隙磁通。为简化建模过程,可进行如下假设<sup>[19]</sup>:

- 1) 忽略漏磁的影响,且磁势均匀落在气隙上。
- 2) 只考虑电磁铁垂直方向的运动。
- 3) 铁磁截面积 $A$ 为常值,且等于气隙面积。

为方便理解选择 $O$ 为参考点,使电磁力增大方向与 $x$ 增大方向一致。根据虚功原理、基尔霍夫定律和牛顿第二定律可以得到单点悬浮系统的运动模型为:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = F(i, x) - mg + f_d \\ F(i, x) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left( \frac{i}{c_{\max} - x} \right)^2 \\ u = Ri + \frac{\mu_0 N^2 A}{2(c_{\max} - x)} \frac{di}{dt} + \frac{\mu_0 N^2 Ai}{2(c_{\max} - x)^2} \frac{dx}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

模型(1)中的第1个方程描述的是单点悬浮系统的运动过程;第2个方程描述的是电磁力与电流、悬浮间隙的关系;第3个方程描述的是电磁铁运动过程中施加在其上的电压会产生多大的电流。

将模型(1)在平衡点处进行线性化,假设系统的平衡点是 $(i_0, x_0)$ ,则系统稳定运行时的电流 $i(t)$ 和高度 $x(t)$ 是由稳态部分 $i_0, x_0$ 和偏离部分 $\Delta i, \Delta x$ 组成,进而可知电磁力满足:

$$F(i, x) = F(i_0, x_0) + \Delta F = mg + \Delta F \quad (2)$$

对式(2)进行泰勒公式展开,保留一次项忽略

高次项可得:

$$\Delta F = k_i \Delta i + k_x \Delta x \quad (3)$$

$$m \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} = k_i \Delta i + k_x \Delta x \quad (4)$$

$$k_i = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2 (c_{\max} - x_0)^2} \quad (5)$$

$$k_x = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2 (c_{\max} - x_0)^3} \quad (6)$$

对等式(4)进行拉氏变换,可得系统的传递函数为

$$\frac{\Delta x(s)}{\Delta i(s)} = \frac{k_i}{ms^2 - k_x} \quad (7)$$

本次实验对象物理参数见表 1。

表 1 单点悬浮系统参数

Tab. 1 Parameters of single point suspension system

符号	含义/单位	数值
$m$	悬浮质量/kg	3.25
$N$	电磁铁线圈匝数/匝	820
$R$	电阻/ $\Omega$	2.55
$A$	磁极面积/ $m^2$	$4 \times 10^{-4}$
$\mu_0$	真空磁导率/( $H \cdot m^{-1}$ )	$4\pi \times 10^{-7}$
$c_{\max}$	最大悬浮间隙/mm	8

## 2 自抗扰控制

ADRC 是韩京清<sup>[12]</sup>提出的一种新型实用且不依赖模型的主动抗扰算法,其是基于“利用误差消除误差”进一步发展出来的,展示了一种全新的抗扰范式。Gao<sup>[20]</sup>通过频率带宽的概念将 ADRC 线性化得到 LADRC。

### 2.1 线性扩张状态观测器

线性扩张观测器可以有效估计系统状态和未知扰动,对于二阶观测器其形式如下:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - 3\omega_0 e \\ \dot{z}_2 = z_3 + b_0 u - 3\omega_0^2 e \\ \dot{z}_3 = -\omega_0^3 e \end{cases} \quad (8)$$

式中: $z_1, z_2$  分别为系统状态量的估计量, $y$  为系统输出量, $u$  为系统的控制量, $\omega_0$  为 LESO (linear extended state observe) 的观测带宽, $b_0$  为补偿因子。线性扩张观测器在观测系统状态变量的同时还观测总扰动  $z_3$ , 并且该观测器对系统所需信息已降至最低。

### 2.2 反馈控制律

通过 LESO 估计出系统状态变量,同时还包括扩张状态变量  $z_3 \approx f$ , 其中  $f$  为系统扰动。

控制器的反馈控制量  $u_0$  为

$$u_0 = \omega_c^2 (r - z_1) - 2\omega_c z_2 \quad (9)$$

式中  $\omega_c$  为控制器带宽。

补偿扰动后的控制量  $u$  为

$$u = u_0 - \frac{z_3}{b_0} \quad (10)$$

将等式(10)带入原系统, $z_3$  与  $f$  相消,使整个系统近似为简单的积分串联型系统(11),大大简化了控制难度,尤其是对非线性控制对象。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = b_0 u_0 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (11)$$

### 2.3 稳定域

对于 LADRC, 可以表述为如图 2 所示频域结构,图中  $G_c(s)$  为直接环路传递函数, $G_f(s)$  为反馈传递函数, $G(s)$  为被控对象传递函数。

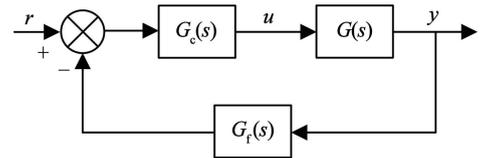


图 2 LADRC 的频域结构

Fig. 2 Frequency domain structure of LADRC

将式(8)~(10)拉普拉斯变换可得:

$$\begin{cases} sZ_1 = Z_2 + 3\omega_0(Y - Z_1) \\ sZ_2 = Z_3 + b_0 U + 3\omega_0^2(Y - Z_1) \\ sZ_3 = \omega_0^3(Y - Z_1) \end{cases} \quad (12)$$

$$U = \omega_c^2 R - \omega_c^2 Z_1 - 2\omega_c Z_2 - Z_3/b_0 \quad (13)$$

式中, $Z_i$  为  $U$  和  $Y$  的函数,可以由  $U$  和  $Y$  唯一表征:

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{b_0 s}{s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3} U + \frac{\beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3}{s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3} Y \\ Z_2 = \frac{b_0 (s^2 + \beta_1 s)}{s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3} U + \frac{\beta_2 s^2 + \beta_3 s}{s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3} Y \\ Z_3 = \frac{-b_0 \beta_3}{s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3} U + \frac{\beta_3 s^2}{s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3} Y \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)带入式(13)可以得出  $U$  与  $R$ 、 $Y$  的关系:

$$U = R\omega_c^2(s^3 + 3\omega_0s^2 + 3\omega_0^2s + \omega_0^3)/ (s^3 + (3\omega_0 + 2\omega_c b_0)s^2 + (2\omega_c b_0 3\omega_0 + 3\omega_0^2 + \omega_c^2 b_0)s) - Y((\omega_c^2 3\omega_0 + 2\omega_c 3\omega_0^2 + \omega_0^3/b_0)s^2 + (\omega_c^2 3\omega_0^2 + 2\omega_c \omega_0^3)s + \omega_c^2 \omega_0^3)/(s^3 + (3\omega_0 + 2\omega_c b_0)s^2 + (k_2 b_0 3\omega_0 + 3\omega_0^2 + \omega_c^2 b_0)s) \quad (15)$$

将  $U$  改写成图 2 的形式:

$$U = G_c(s)R - G_c(s)G_f(s)Y \quad (16)$$

可知  $G_c(s)$  直接环路传递函数和  $G_f(s)$  反馈传递函数的表达式为:

$$G_c = \omega_c^2(s^3 + 3\omega_0s^2 + 3\omega_0^2s + \omega_0^3)/ (s^3 + (3\omega_0 + 2\omega_c b_0)s^2 + (2\omega_c b_0 3\omega_0 + 3\omega_0^2 + \omega_c^2 b_0)s) \quad (17)$$

$$G_f = ((\omega_c^2 3\omega_0 + 2\omega_c 3\omega_0^2 + \omega_0^3/b_0)s^2 + (\omega_c^2 3\omega_0^2 + 2\omega_c \omega_0^3)s + \omega_c^2 \omega_0^3)/ \omega_c^2(s^3 + 3\omega_0s^2 + 3\omega_0^2s + \omega_0^3) \quad (18)$$

从式(17)、(18)可以看出,只要  $b_0$ 、 $\omega_0$  和  $\omega_c$  确定,则 LADRC 的性能就会被唯一确定。

根据式(7)可知,开环系统在右半平面存在一个极点,为二阶不稳定系统,加入二阶 LADRC 控制环节,并按图 2 整理得闭环系统的特征方程为

$$D(s) = k_i((3\omega_0\omega_c^2 + 6\omega_0^2\omega_c + \omega_0^3/b_0)s^2 + (2\omega_0^3\omega_c + 3\omega_0^2\omega_c^2)s + \omega_0^3\omega_c^2) + (ms^2 - k_x)(s^3 + (3\omega_0 + 2\omega_c b_0)s^2 + (6\omega_0\omega_c b_0 + 3\omega_0^2 + \omega_c^2 b_0)s) \quad (19)$$

根据线性系统稳定理论,  $D(s) = 0$  的所有根实部小于 0 时,系统稳定。同时该条件还决定了  $\omega_0$ 、 $\omega_c$ 、 $b_0$  满足的约束关系,该约束关系可以看成空间曲面  $f(\omega_c, \omega_0, b_0)$  围成的区域。

$$f(\omega_c, \omega_0, b_0) = -((2m\omega_c b_0^2 + 3m\omega_0 b_0)(6k_x b_0^2 \omega_0 \omega_c + k_x b_0^2 \omega_c^2 - 2k_i b_0 \omega_0^3 \omega_c - 3k_i b_0 \omega_0^2 \omega_c^2 + 3k_x b_0 \omega_0^2) + b_0^2 k_i m \omega_0^3 \omega_c^2) \times (2m\omega_c b_0^2 + 3m\omega_0 b_0) - ((2m\omega_c b_0^2 + 3m\omega_0 b_0) \times (6k_x b_0^2 \omega_0 \omega_c + k_x b_0^2 \omega_c^2 - 2k_i b_0 \omega_0^3 \omega_c - 3k_i b_0 \omega_0^2 \omega_c^2 + 3k_x b_0 \omega_0^2) + b_0^2 k_i m \omega_0^3 \omega_c^2) \times ((2m\omega_c b_0^2 + 3m\omega_0 b_0) \times (6mb_0^2 \omega_0 \omega_c + mb_0^2 \omega_c^2 + 3mb_0 \omega_0^2 - k_x b_0) - b_0 m(-2k_x b_0^2 \omega_c + 6k_i b_0 \omega_0^2 \omega_c + 3k_i b_0 \omega_0 \omega_c^2 - 3k_x b_0 \omega_0 + k_i \omega_0^3)) \times (-2k_x b_0^2 \omega_c + 6k_i b_0 \omega_0^2 \omega_c + 3k_i b_0 \omega_0 \omega_c^2 - 3k_x b_0 \omega_0 + k_i \omega_0^3) - b_0 k_i \omega_0^3 \omega_c^2 ((2m\omega_c b_0^2 + 3m\omega_0 b_0) \times (6mb_0^2 \omega_0 \omega_c + mb_0^2 \omega_c^2 + 3mb_0 \omega_0^2 - k_x b_0) - b_0 m(-2k_x b_0^2 \omega_c + 6k_i b_0 \omega_0^2 \omega_c + 3k_i b_0 \omega_0 \omega_c^2 - 3k_x b_0 \omega_0 + k_i \omega_0^3))^2 \quad (20)$$

由于该函数难以求其解析解,故采用图 3 所示的数值方法求得如图 4 阴影曲面围成的稳定域。

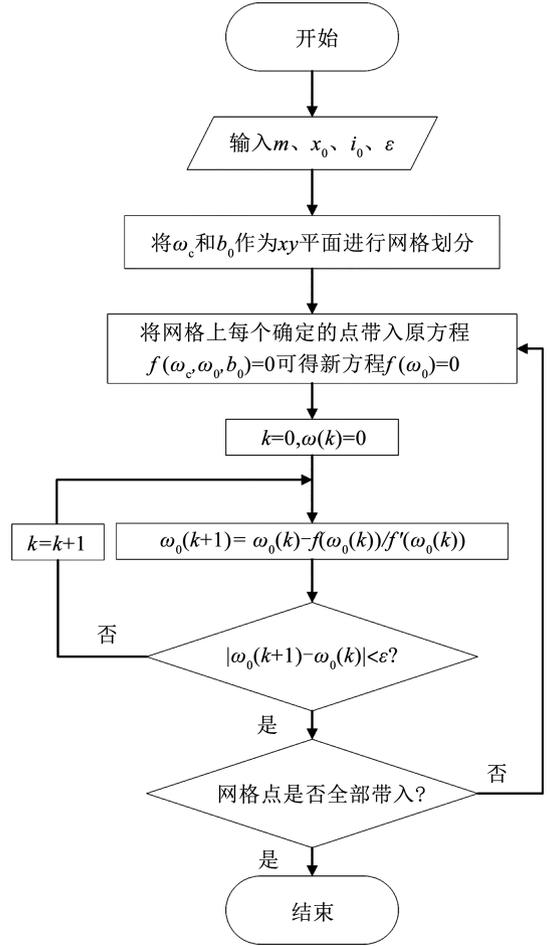
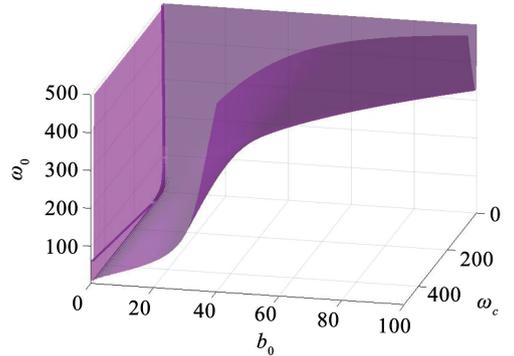
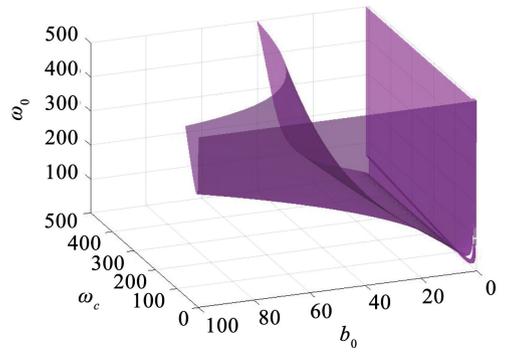


图 3 稳定域数值解法流程

Fig. 3 Flow chart of numerical solution of stability region



(a) 正视图



(b) 后视图

图 4 磁悬浮稳定区域

Fig. 4 Maglev stability region

### 3 自适应扩张观测器

扩张观测器的带宽  $\omega_0$  越大,对系统的状态量和未知扰动量估计就越准确,但是大带宽也意味着对系统噪声和动态不确定性也更敏感,而合适的带宽需要花大量时间不断调整,所以有必要让带宽自行整定,以找到当前合适稳定的观测带宽。

定义如下误差:

$$e = \dot{x}_1 - \dot{z}_1 = x_2 - z_2 + 3\omega_0(z_1 - y) \quad (21)$$

定义如下目标函数<sup>[17]</sup>:

$$J = e^2 = [x_2 - z_2 + 3\omega_0(z_1 - y)]^2 \quad (22)$$

目标函数对  $\omega_0$  求偏导数:

$$\eta = \frac{\partial J}{\partial \omega_0} = 2e \cdot 3(z_1 - y) = 6e(z_1 - y) \quad (23)$$

为了使带宽朝误差减少的方向调整,即  $J$  的值越小越好,取负梯度并离散可得  $\omega_0$  的更新规律为

$$\omega_0(t+1) = \omega_0(t) - \alpha\eta = \omega_0(t) - \alpha e(z_1 - y) \quad (24)$$

式中  $\alpha$  为学习率。根据稳定域可知,平衡点处的稳定域由  $f(\omega_c, \omega_0, b_0)$  决定,当  $\omega_c, b_0$  确定时,  $f(\omega_c, \omega_0, b_0) = 0$  的求解问题就变成  $f(\omega_c) = 0$  的求根问

题,根据图 3 的数值方法可求得  $f(\omega_c) = 0$  的根  $\omega_0^*$ ,也即临界稳定带宽,再根据所求  $\omega_0^*$  可得临界学习率  $\alpha$  的约束公式:

$$\omega_0 - \alpha \sum_{t=0}^{\infty} \eta > \omega_0^* \quad (25)$$

进而可得  $\alpha$  的取值范围为

$$\alpha > \frac{\omega_0 - \omega_0^*}{\sum_{t=0}^{\infty} \eta} \quad (26)$$

ALADRC 算法总结如下:在确定  $\omega_c, b_0$  的情况下,求得临界带宽  $\omega_0^*$ ,初始化 LESO 带宽  $\omega_0$  和学习率  $\alpha$ ,并满足式(26),然后根据式(21)计算误差,式(24)更新带宽  $\omega_0$ 。实际上为了更快整定  $\alpha$ ,可以通过临界带宽和系统单位尺度反向推算出  $\alpha$  的数量级,加快整定过程。根据表 1 的物理参数,  $\omega_c = 20, b_0 = 10$  可以算出理想临界带宽  $\omega_0^* = 90.45$ ,又因为该悬浮系统的悬浮高度数量级为  $10^{-3}$ ,根据式(23)可知  $\eta$  的数量级大致为  $10^{-4}$ ,为了使带宽能在有限时间内收敛,则  $\alpha$  的数量级应该在  $10^6$ 。整个单点悬浮系统自适应线性自抗扰控制框图如图 5 所示。

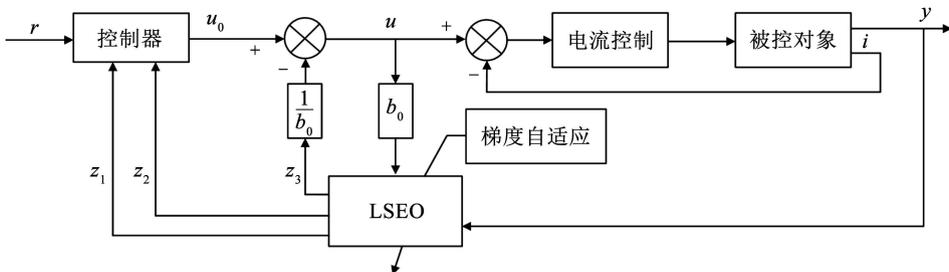


图 5 ALADRC 控制器结构

Fig. 5 ALADRC controller structure

### 4 仿真分析

进行磁悬浮系统仿真,验证 ALADRC 的有效性,并与 LADRC 和 PID 算法作对比。悬浮系统的物理参数见表 1,各算法控制参数见表 2,表 2 中  $h$  为离散控制周期,  $P_i, I_i$  为 PI 电流内环参数,  $K_p, K_i$  和  $K_d$  为 PID 位置外环参数。

表 2 仿真控制器参数

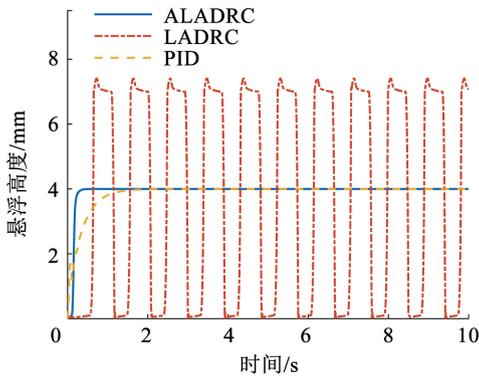
Tab. 2 Simulation controller parameter

参数	数值	参数	数值
$\omega_0 / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	90	$K_p$	1 300
$\omega_c / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	20	$K_i$	1
$b_0$	10	$K_d$	15 000
$\alpha$	$200 \times 10^6$	$P_i$	1 000
$h/s$	0.000 5	$I_i$	10

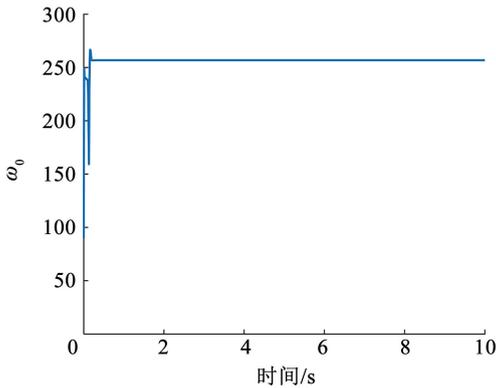
#### 4.1 起浮实验

该悬浮系统最高悬浮高度为 8 mm,设定悬浮目标值为 4 mm,ALADRC 的初始观测带宽和 LADRC 的带宽都是 90.00 rad/s,区别在于 ALADRC 会根据式(24)进行调节,以找到合适的稳定带宽,其他参数不变,仿真结果如图 6 所示。

从图 6(a)中可以看出,当  $\omega_0$  为 90.00 rad/s 时,小于临界带宽,此时 LADRC 系统发散,在来回撞击轨道,而 ALADRC 在初始带宽同样是 90.00 rad/s 的情况下,可以很好的自我调节到一个稳定带宽如图 6(b)所示,可以保证在参数不理想情况下的系统稳定性,最后在收敛的带宽下系统也表现出了良好控制性能,没有超调,响应速度快,调节时间比 PID 控制减少 76.08%。



(a) 悬浮高度响应



(b) ALADRC带宽变化情况

图 6 4 mm 悬浮实验

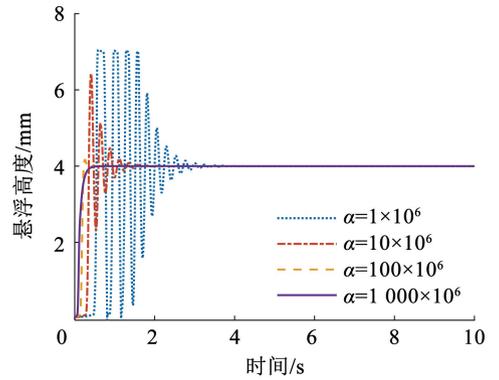
Fig. 6 4 mm suspension test

接下来进一步分析不同  $\alpha$  对系统影响,根据对自适应扩张观测器的分析可知  $\alpha$  的数量级为  $10^6$ ,所以进行如下仿真,分别取  $\alpha = 1 \times 10^6$ 、 $10 \times 10^6$ 、 $100 \times 10^6$  和  $1\ 000 \times 10^6$ ,比较不同数量级的学习率对系统带宽收敛和动态性能的影响情况,仿真结果如图 7 所示。

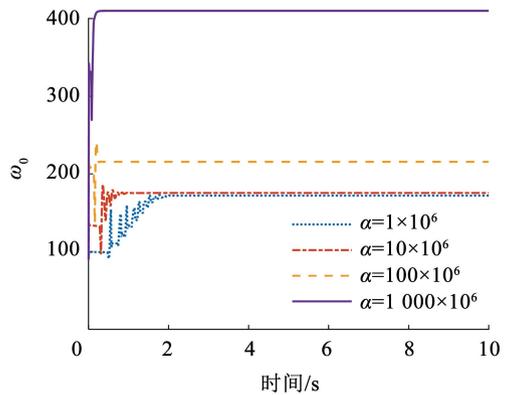
从图 7(a)可以看出,在不稳定初始带宽  $90.00\text{ rad/s}$  的状态下,所有  $\alpha$  都能使系统最终达到稳定状态,且随着  $\alpha$  不断增大,系统带宽收敛速度加快,动态响应也变得更好,带宽最终收敛值也变得越大,文献 [21] 也表明通过分析目标函数  $J$  的导数可知,当  $z_1 - y$  收敛至 0 时,目标函数  $J$  有无限多个相对局部最小值,因此不同的学习率会导致  $\omega_0$  最终收敛到不同值,仿真结果表明这些次优解可以使控制器正常工作,因此可以认为 ALADRC 参数自整定算法是有效的。同时从上述仿真结果也可以看出,  $\alpha$  的调节范围非常之广,具有很好调节特性。

#### 4.2 抗扰实验

设定悬浮目标值为 4 mm,并在 5 s 时,突加重物 1.4 kg,对比 PID、LADRC 和 ALADRC 的抗扰效果。PID 和 ALADRC 沿用表 2 中的控制参数,而 LADRC 的带宽选择图 6(b)中 ALADRC 最终收敛值  $256.85\text{ rad/s}$ ,仿真结果如图 8 所示。



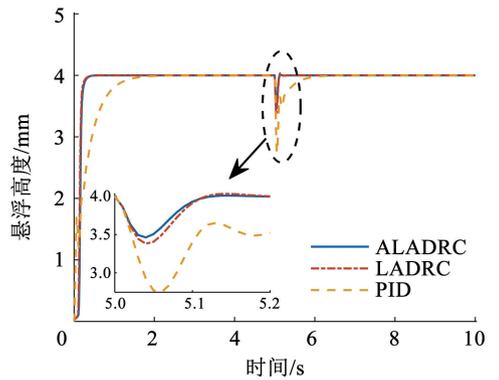
(a) 悬浮高度响应



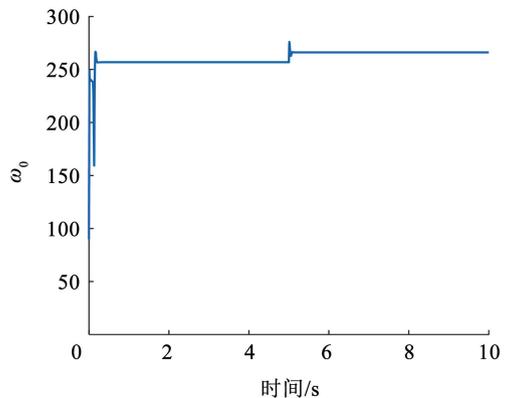
(b) ALADRC带宽变化情况

图 7 不同  $\alpha$  下 ALADRC 的对比情况

Fig. 7 Comparison of ALADRC with different  $\alpha$



(a) 悬浮高度响应



(b) ALADRC带宽变化情况

图 8 抗扰实验

Fig. 8 Immunity experiment

从图 8(a) 可以看出, ALADRC 和 LADRC 的整体表现都要优于 PID, 且因为 LADRC 的带宽选择为图 6(b) 中 ALADRC 最终收敛值 256.85 rad/s, 所以 ALADRC 和 LADRC 的初始上升曲线几乎一致, 但过过程 ALADRC 仍优于 LADRC, 同时在 5 s 突加重物时, ALDRC 带宽会略微增加, 如图 8(b) 所示, 更大的观测带宽有利于扰动的跟踪, 能更加及时补偿掉扰动的影响, 所以, ALADRC 的抗扰性比 LADRC 有所增强, 综合表现最好。

### 5 实验分析

为了验证仿真结果, 搭建了如图 9 所示的单元悬浮实验平台。

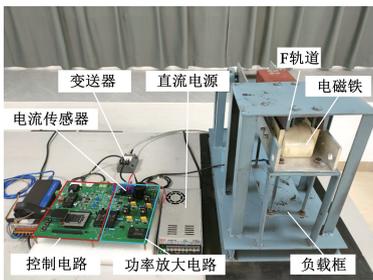


图 9 单元悬浮系统实验平台

Fig. 9 Single point suspension system experiment platform

由于实际系统与仿真模型不完全重合, 且存在复杂的扰动与噪声干扰, 导致实验过程中控制器参数与仿真略有不同, 根据实际情况做出了适当调整, 新参数见表 3, 并在新参数下, 分别进行如下两个实验, 4 mm 稳定悬浮实验和施加 1.0 kg 扰动实验, 其中扰动实验中 LADRC 的观测带宽为第 1 个实验中最后 ALADRC 的收敛带宽值, 实验结果如图 10、11 所示。

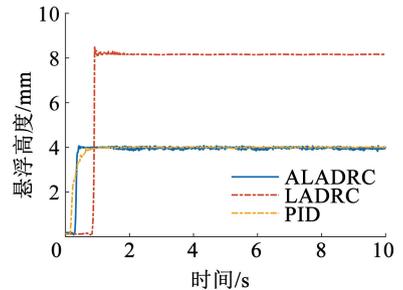
表 3 实际控制器参数

Tab. 3 Actual controller parameter

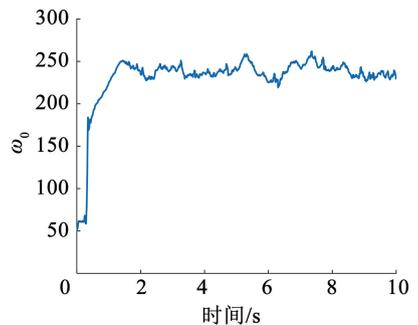
参数	数值	参数	数值
$\omega_0 / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	50	$K_p$	800
$\omega_c / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	20	$K_i$	1
$b_0$	10	$K_d$	20 000
$\alpha$	$15 \times 10^6$	$P_i$	1 300
$h/s$	0.000 5	$I_i$	5

实验结果从图 10 中可以看出, 系统在 50.00 rad/s 的观测带宽下, LADRC 直接吸死在轨道上, 而 ALADRC 可以通过调整带宽将不稳定系统变成稳定系统, 带宽值也从 50.00 rad/s 收敛到平均 239.45 rad/s, 增强了系统的参数稳定性, 使得自抗扰观测带宽的参数自整定变得可行。实验结果从图 11 中还可以看出, ALADRC 在遇到扰动时也会自动调整带宽, 从平均 242.76 rad/s 的观测带宽变为平均 277.86 rad/s,

大带宽有利于更快的扰动跟踪, 更及时的扰动补偿, ALADRC 的扰动超调量比 LADRC 降低 29.33%, 比 PID 降低 61.91%。实验结果从图 10、11 中可以得到: ALADRC 可以将不稳定带宽点自动调节到稳定带宽点, 实现快速无超调起浮, 使带宽自调节变得可行, 而且也进一步增强了系统的抗扰能力。



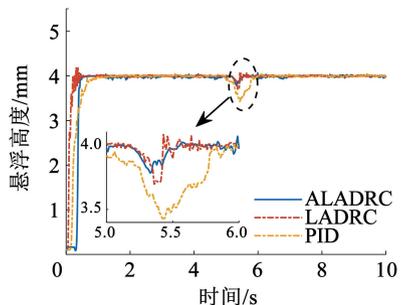
(a) 悬浮高度响应



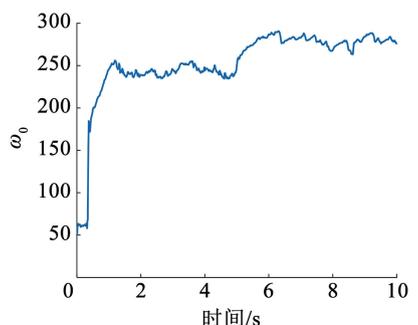
(b) ALADRC 的  $\omega_0$  变化情况

图 10 悬浮实验

Fig. 10 Suspension experiment



(a) 悬浮高度响应



(b) ALADRC 的  $\omega_0$  变化情况

图 11 扰动实验

Fig. 11 Disturbance experiment

## 6 结 论

1)通过对 LADRC 的频域分析,理论推导出单点悬浮系统的自抗扰稳定范围。该方法对其他控制对象的稳定域求解也具有一定参考意义,在后续研究中,还可以考虑更加准确的数学模型和噪声,以确定更加精确的临界带宽。

2)提出了一种利用梯度信息调整扩张观测器带宽  $\omega_0$  的自适应控制方法,使得自抗扰观测器带宽的参数自整定变得可行,加强了系统抗扰能力。

3)通过实验对比分析可知,ALADRC 能快速无超调起浮,在参数整定和抗扰性上比 LADRC 具有一定优势。在参数整定上,观测器带宽  $\omega_0$  不需要刻意调节,系统就能快速收敛到稳定带宽工作点;在抗扰性上,ALADRC 在遇到扰动时会自动调节带宽以应对突加的扰动,超调量比 LADRC 降低了 29.33%,比 PID 降低了 61.91%。

## 参 考 文 献

- [1] TURKER E, ARSLAN-YILDIZ A. Recent advances in magnetic levitation: a biological approach from diagnostics to tissue engineering[J]. ACS Biomaterials Science & Engineering, 2018, 4(3): 787. DOI: 10.1021/acsbmaterials.7b00700
- [2] SU Xiaojie, YANG Xiaozhan, SHI Peng, et al. Fuzzy control of nonlinear electromagnetic suspension systems[J]. Mechatronics, 2014, 24(4): 328. DOI:10.1016/j.mechatronics.2013.08.002
- [3] WEI Wei, XUE Wenchao, LI Donghai. On disturbance rejection in magnetic levitation[J]. Control Engineering Practice, 2019, 82: 24. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.09.018
- [4] BOLDEA I, TUTELEA L N, XU Wei, et al. Linear electric machines, drives, and MAGLEVs: an overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 7504. DOI:10.1109/TIE.2017.2733492
- [5] 吕治国, 龙志强. 磁悬浮球系统的非线性自适应控制方法[J]. 控制工程, 2020, 27(1): 127  
LV Zhiguo, LONG Zhiqiang. Method on nonlinear adaptive controller for maglev levitation ball system[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(1): 127. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20180539
- [6] 汤继强, 隗同坤, 宁梦月, 等. 基于反馈线性化的 MSCMG 转子稳定控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(6): 1063  
TANG Jiqiang, WEI Tongkun, NING Mengyue, et al. Stable control of MSCMG rotor based on feedback linearization[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(6): 1063. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0401
- [7] 刘丽丽, 左继红. 磁悬浮球系统模糊 PID 参数自调整控制方法[J]. 控制工程, 2021, 28(2): 354  
LIU Lili, ZUO Jihong. Parameter self-adjusting control method of fuzzy PID for magnetic levitation ball system[J]. Control Engineering of China, 2021, 28(2): 354. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20180583
- [8] 周天豪, 杨智, 祝长生, 等. 电磁轴承高速电机转子系统的内模-PID 控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(16): 3414  
ZHOU Tianhao, YANG Zhi, ZHU Changsheng, et al. Internal model control-PID control of an active magnetic bearing high-speed motor rotor system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(16): 3414. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.190852
- [9] MORAWIEC M, LEWICKI A. Speed observer structure of induction machine based on sliding super-twisting and backstepping techniques[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(2): 1122. DOI:10.1109/TII.2020.2974507
- [10] ZHANG Tianru, XU Zhuang, LI Jing, et al. A third-order super-twisting extended state observer for dynamic performance enhancement of sensorless IPMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5948. DOI: 10.1109/TIE.2019.2959498
- [11] 董达善, 陈琛, 孙友刚, 等. 非线性磁悬浮系统动力学建模与控制研究[J]. 机械设计与制造, 2019(11): 16  
DONG Dashan, CHEN Chen, SUN Yougang, et al. Research on dynamics modeling and control of the nonlinear maglev system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(11): 16. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2019.11.005
- [12] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13  
HAN Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.2002.03.003
- [13] 何凌云. 磁悬浮系统的自抗扰控制[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006  
HE Lingyun. Auto-disturbance-rejection control of maglev system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006
- [14] 尹增愿, 蔡远文, 任元, 等. 磁悬浮转子状态反馈解耦自抗扰控制方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(7): 1210  
YIN Zengyuan, CAI Yuanwen, REN Yuan, et al. Decoupled active disturbance rejection control method for magnetically suspended rotor based on state feedback[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(7): 1210. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0021
- [15] 王舒, 郑世强. 基于复合控制的磁悬浮 CMG 动框架效应抑制[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(12): 2339  
WANG Shu, ZHENG Shiqiang. Composite control method for gimbal excitation effect suppression of magnetically suspended CMGs[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(12): 2339. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0610
- [16] 王金锁, 蒋启龙, 罗雨, 等. 磁悬浮系统自抗扰广义预测控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(9): 141  
WANG Jinsuo, JIANG Qilong, LUO Yu, et al. Active disturbance rejection generalized predictive control for magnetic levitation system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(9): 141. DOI:10.11918/202106088
- [17] 孙佃升, 章跃进. 线性扩张状态观测器的改进及观测精度分析[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(6): 111  
SUN Diansheng, ZHANG Yuejin. Improvement and observation accuracy analysis of linear extended state observer[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(6): 111. DOI:10.11887/j.cn.201706017
- [18] BAI Changrui, ZHANG Zhou. A least mean square based active disturbance rejection control for an inertially stabilized platform[J]. Optik, 2018, 174: 609. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.08.099
- [19] 杨浩. 电磁悬浮系统非线性控制策略的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021  
YANG Hao. Research on nonlinear control strategy of electromagnetic levitation system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021
- [20] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver: IEEE, 2003: 4989. DOI: 10.1109/ACC.2003.1242516
- [21] JING Anyan, WANG Jiarun, GAO Jian, et al. Self-tuning adaptive active disturbance rejection pitch control of a manta-ray-like underwater glider[J]. Ocean Engineering, 2022, 254: 111364. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.111364