

# 海上风电稳桩平台抱桩器液压系统高精度控制研究

郭学龙<sup>1</sup>, 李冬梅<sup>1</sup>, 田凯<sup>1</sup>, 岳琦<sup>1</sup>, 王懿<sup>2</sup>, 田群宏<sup>3</sup>

(1. 中国石油集团海洋工程有限公司工程设计院, 北京 100028; 2. 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院, 北京 102249;

3. 山东科技大学海洋科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:**近年来海上风力发电已成为许多国家发展清洁能源重要途径之一, 稳桩平台抱桩器液压控制系统作为海上风机安装技术重要环节而受到了越来越多关注。为了提高单桩安装精度, 本文在海上风电稳桩平台抱桩器液压系统设计及控制性能要求分析基础上, 构建液压系统数学模型, 提出海上风电稳桩平台抱桩器高精度控制研究策略。运用训练好的  $Q$  学习模型在线动态调整 PID 控制参数, 经过 PID 控制器运算后输出控制信号, 并将其作用于换向阀以控制液压缸活塞杆速度和位移, 通过多缸间协同控制实现单桩高精度扶正。该算法可根据桩柱倾斜程度自适应调整阀门开度, 通过多液压缸协同控制提高桩柱扶正精度。仿真表明, 提出的控制方法可根据偏差和偏差变化率实现自适应参数调整, 能够保障液压控制系统控制精度。

**关键词:**抱桩器; 液压控制;  $Q$  学习; 协同控制; 控制精度; 控制系统

中图分类号: TP273; U656.6; TM614

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)06-0026-05

## Research on high precision control of hydraulic system of pile holder for offshore wind power stabilization platform

Guo Xuelong<sup>1</sup>, Li Dongmei<sup>1</sup>, Tian Kai<sup>1</sup>, Yue Qi<sup>1</sup>, Wang Yi<sup>2</sup>, Tian Qunhong<sup>3</sup>

(1. CNPC Offshore Engineering Company Ltd., Engineering Design Institute, Beijing 100028, China;

2. College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3. College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

**Abstract:** In recent years, offshore wind power generation becomes one of the important ways to develop clean energy in many countries, and the hydraulic control system of pile stabilizer platform attracts more and more attention as an important part of offshore wind turbine installation technology. In order to improve the installation accuracy of a single pile, based on the design and control performance requirements of the hydraulic system of the pile holder for the offshore wind power stable pile platform, the mathematical model of hydraulic system is constructed, and it proposes the high precision control strategy of hydraulic system design of pile holder for offshore wind power pile stabilization platform. The trained  $Q$  learning model is used to dynamically adjust PID control parameters online. After the PID controller performs its operation, a control signal is output and applied to the directional control valve to control the speed and displacement of the hydraulic cylinder piston rod. Through the collaborative control among multiple cylinders, high-precision alignment of a single pile is achieved. The algorithm can adjust the opening of the valve adaptively according to the tilt degree of the pile, and improve the alignment accuracy of the pile through the cooperative control of multiple hydraulic cylinders. The simulation shows that the proposed control method can realize the adaptive parameter adjustment according to the deviation and the deviation change rate, and can guarantee the control accuracy of the hydraulic control system.

**Keywords:** pile holder; hydraulic control;  $Q$ -learning; collaborative control; control accuracy; control system

海上风力发电已成众多国家发展清洁能源的重要途径之一<sup>[1]</sup>, 但与陆地环境相比, 海洋环境十分复杂<sup>[2]</sup>, 风机基础安装面临诸多挑战<sup>[3]</sup>。单桩基础式作为海上风电基础构型之一<sup>[4]</sup>, 结构相对简单, 制造、运输和安装成本较低且便于维护管理、对环境的影响小, 已成为海上风电基础安装最常用构型。工程实际中单桩垂直度对风机安装、运行、发电量等都起着决定性作用, 因此, 如何进行抱桩器液

压控制系统设计以保证桩柱垂直度尤为重要。

为了实现稳桩平台抱桩器液压控制系统设计, 文献[5]选用继电器控制回路实现控制, 但工程实际中采用简单开环控制难以保障控制精度。文献[6]探究了伺服液压系统在非线工况下的稳定性, 基于粒子群优化算法设计了控制器, 提升了液压系统的抗干扰能力, 但该方法难以直接有效应用于海上风电稳桩平台抱桩器液压系统。文

收稿日期: 2024-11-25; 录用日期: 2024-12-20

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2022M710934); 青岛市博士后应用研究项目

作者简介: 郭学龙(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事海洋工程及海上风电设计研发工作。

引用本文: 郭学龙, 李冬梅, 田凯, 等. 海上风电稳桩平台抱桩器液压系统高精度控制研究[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(6): 26-30. (Guo Xuelong, Li Dongmei, Tian Kai, et al. Research on high precision control of hydraulic system of pile holder for offshore wind power stabilization platform [J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(6): 26-30.)

献[7]使用GPS、行程传感器、激光测距仪等设备定位桩柱,当检测出桩柱垂直度偏差超过设定值后,采用人工操控方式驱动扶桩滚轮实现桩柱调整。该方法对控制操作人员具有较高要求,且人工操作难以保障位置控制准确性。文献[8]将前馈及反馈PID控制应用于运动补偿式抱桩器,但因为运动补偿存在偏差,液压控制系统的控制精度难以保障。因此,需提出新的液压系统控制方案以保证桩柱垂直度。

为了保障海底桩柱垂直度,本文在单桩基础式风机安装平台液压系统性能分析基础上,以实现稳桩平台抱桩器液压系统多缸协同扶正单桩问题为导向,以提高液压系统控制精度为目标,提出海上风电稳桩平台抱桩器液压系统高精度控制设计,采用训练好的Q学习模型实现PID控制参数自适应调整,使得设计的多液压缸协同扶正单桩控制系统具有良好的准确性、稳定性与鲁棒性。

## 2 抱桩器液压控制系统问题描述

本文设计的单桩基础稳桩平台抱桩器液压协同控制扶正系统如图1所示,单桩基础稳桩平台包含2层工作台,每个工作台上包含4个顶推液压缸。液压扶正系统通过2个抱桩器共8个顶推液压缸实现单桩协同扶正,保证单桩垂直度。当稳桩平台液压控制系统检测出桩柱垂直度偏差超过设定值时,启动桩柱扶正功能。单桩稳桩平台抱桩器液压控制扶正控制系统技术路线如图2所示。将安装在液压缸上端的激光测距仪测量信号作为液压系统期望R,根据液压缸行程开关检测出液压杆行进过程中变化的位移值y,将其与期望值R进行比较,得到偏差值e,对e进行求导获得偏差变化率 $\dot{e}$ 。将e和 $\dot{e}$ 作为PID控制器的输入信号。利用训练好的Q学习模型在线动态调整PID控制参数,经过PID控制器运算后输出控制信号,并将其作用于换向阀以控制液压缸活塞杆速度和位移。在单缸控制基础上,运用集中式控制策略通过多缸间协同控制实现单桩高精度扶正。

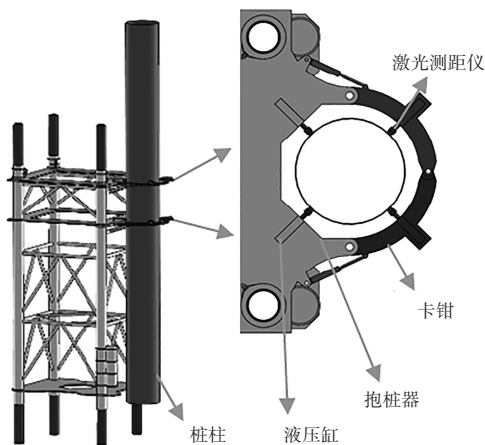


图1 海上风电稳桩平台抱桩器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the pile-clamping device for the offshore wind power foundation stabilization platform

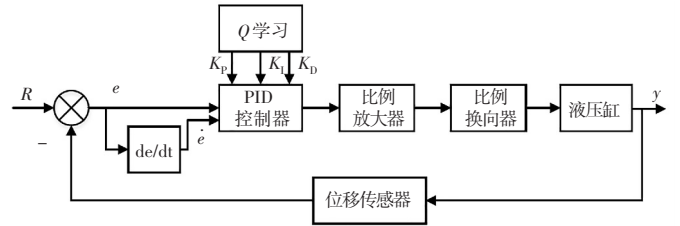


图2 单桩稳桩平台抱桩器液压系统控制技术路线

Fig. 2 Control technical route of the hydraulic system for the pile-carrying device of the single-pile stabilization platform

## 3 抱桩器液压系统建模

为了推导液压力元件传递函数,需建立电液伺服阀流量方程、液压缸连续性方程以及液压缸与负载之间力平衡方程<sup>[9-10]</sup>。

电液伺服阀流量方程为

$$Q_L = K_Q X_V - K_C P_L \quad (1)$$

式中, $Q_L$ 为负载流量 $m^3/s$ ;  $K_Q$ 为流量放大系数, $m^3/s$ ;  $X_V$ 为液压缸最大容积 $m^3$ ;  $P_L$ 为负载压力 $N/m^2$ ;  $K_C$ 为流量压力系数 $m^2 \cdot N/s$ 。

液压缸连续性方程为

$$Q_L = A_p s X_p + C_p P_L + \frac{V_t}{4\beta_e} s P_L \quad (2)$$

式中, $A_p$ 为液压活塞有效面积 $m^2$ ;  $X_p$ 为活塞位移 $m$ ;  $C_p$ 为总泄漏量系数 $m^2 \cdot N/s$ ;  $V_t$ 为总压缩体积 $m^3$ ;  $\beta_e$ 为有效容积弹性模量 $P_a$ 。

液压缸与负载间力平衡方程为

$$A_p P_L = m_T s^2 X_p + B_p s X_p + K X_p + F_L \quad (3)$$

式中, $m_T$ 为活塞和转换到活塞上负载总质量 $kg$ ,  $B_p$ 为活塞和负载黏性阻尼系数 $N \cdot s/m$ ,  $F_L$ 为作用在活塞上外部载荷力 $N$ 。

在阀芯输入位移 $X_V$ 和外部负载力 $F_L$ 同时作用下,由式(1)~(3)可得液压缸活塞总输出位移为

$$Y(s) = \frac{\frac{K_q}{A_p} X_v - \frac{K_{ce}}{A_p^2} \left(1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s\right) F_L}{\frac{m_t V_t}{4\beta_e A_p^2} s^3 + M_a s^2 + M_b s + \frac{K K_{ce}}{A_p^2}} \quad (4)$$

$$M_a = \frac{m_t K_{ce}}{A_p^2} + \frac{B_p V_t}{4\beta_e A_p^2} \quad (5)$$

$$M_b = 1 + \frac{B_p K_{ce}}{A_p^2} + \frac{K V_t}{4\beta_e A_p^2} \quad (6)$$

式中, $K_{ce}$ 为总流量-压力系数 $m^2 \cdot N/s$ ,  $K_{ce} = K_c + C_p$ 。

液压弹簧和负载质量间相互作用构成液压弹簧-质量系统,其固有频率为

$$\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e A_p^2}{V_t m_t}} \quad (7)$$

液压阻尼比 $\xi_h$ 主要由总流量-压力系数 $K_{ce}$ 和负载黏性阻尼系数 $B_p$ 决定,其计算公式为

$$\xi_h = K_{ce} \sqrt{\frac{m_t \beta_c}{V_t A_p^2}} + \frac{B_p}{4} \sqrt{\frac{V_t}{m_t \beta_c A_p^2}} \quad (8)$$

在不考虑外部干扰力  $F_L$  影响情况下,系统闭环传递函数为

$$\phi(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{K_v}{\left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} s + s + K_v\right)} \quad (9)$$

式中,  $K_v$  为速度常数(开环放大系数),  $K_v = K_j K_q / A_p$ 。

需要指出的是基于建立的液压系统闭环传递函数(9),本文可进行液压系统的稳态误差分析、调节时间分析、最大超调量、上升时间等控制系统性能分析。

### 4 抱桩器高精度控制系统设计

$Q$  学习算法是一种基于值函数估计的无模型强化学习算法,该算法无须完备环境知识,可直接从智能体与环境交互中获得经验更新策略,具有较强通用性。 $Q$  学习算法根据智能体强化学习任务建立状态-动作价值表( $Q$  表), $Q$  表记录在状态  $s$  采取动作  $a$  后状态-动作对  $(s, a)$  的  $Q$  值,智能体采用  $Q$  学习算法学习  $Q$  表中的状态-动作值,并根据公式(10)更新  $Q$  表<sup>[11]</sup>。

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow (1 - \alpha)Q(s_t, a_t) + \alpha[r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a)] \quad (10)$$

式中,  $\alpha$  表示学习率,  $0 < \alpha \leq 1$ , 较大的  $\alpha$  值意味着新信息

对  $Q$  值更新影响较大,而较小的  $\alpha$  值则意味着更新更依赖于旧的信息;  $r_{t+1}$  表示在  $s_t$  状态采取动作  $a_t$  转移到新状态  $s_{t+1}$  时获得即时奖励;  $\max_a Q(s_{t+1}, a)$  表示在状态  $s_{t+1}$  下,所有可能动作  $a$  对应  $Q$  值中最大值。

PID 是目前工业上应用最广泛的一种控制器设计方法,其数学模型表达式为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

式中,  $u(t)$  为控制器输出信号;  $e(t)$  为偏差信号,其值等于给定量与输出量之差;  $K_p$  为比例系数;  $K_i = 1/T_i$ ,  $T_i$  为积分时间常数;  $T_D$  为微分时间常数。

综合抱桩器实际工况、PID 控制参数及  $Q$  学习设计思路,假设液压杆实时位置与期望值的差值为  $e$ , 偏差变化率为  $\dot{e}$ , 液压杆长度为 2 m。构建液压杆状态表并将其划分为 49 个状态,如表 1 所示。设置 PID 控制参数  $K_p \in [4, 6]$ , 步长 0.2, 则控制参数  $K_p$  包括 11 个可取动作值,同理设置  $K_i \in [0, 0.02]$ ,  $K_D \in [0, 2]$  并且步长均设置为 0.2, 则控制参数  $K_i$  和控制参数  $K_D$  均包括 11 个可取动作值。将控制参数  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_D$  中可取动作值进行组合构建 PID 控制参数动作表,在该 PID 控制参数动作表中,每一个单元中的数值组合都代表一个控制抱桩器液压系统的动作  $a$  (共计  $11 \times 11 \times 11$  个 PID 控制参数动作)。

表 1 液压杆状态表

Tab. 1 Hydraulic rod state table

$\dot{e}$	$e$						
	$(-\infty, -2]$	$(-2, -1]$	$(-1, -0.5]$	$(-0.5, 0.5)$	$[0.5, 1)$	$[1, 2)$	$[2, +\infty)$
$(-\infty, -2]$	$s_1$	$s_8$	$s_{15}$	$s_{22}$	$s_{29}$	$s_{36}$	$s_{43}$
$(-2, -1]$	$s_2$	$s_9$	$s_{16}$	$s_{23}$	$s_{30}$	$s_{37}$	$s_{44}$
$(-1, -0.5]$	$s_3$	$s_{10}$	$s_{17}$	$s_{24}$	$s_{31}$	$s_{38}$	$s_{45}$
$(-0.5, 0.5)$	$s_4$	$s_{11}$	$s_{18}$	$s_{25}$	$s_{32}$	$s_{39}$	$s_{46}$
$[0.5, 1)$	$s_5$	$s_{12}$	$s_{19}$	$s_{26}$	$s_{33}$	$s_{40}$	$s_{47}$
$[1, 2)$	$s_6$	$s_{13}$	$s_{20}$	$s_{27}$	$s_{34}$	$s_{41}$	$s_{48}$
$[2, +\infty)$	$s_7$	$s_{14}$	$s_{21}$	$s_{28}$	$s_{35}$	$s_{42}$	$s_{49}$

$Q$  学习训练流程如图 3 所示。在训练过程中,智能体选择执行的 PID 控制参数(动作),环境会对动作做出反应,即根据奖励函数给予智能体相应奖励。智能体采取动作后会从当前状态转移到下一状态。在下一状态智能体会继续选择执行的 PID 控制参数并获得环境反馈奖励,同样地会转移到新的状态。重复上述过程就形成了智能体与环境的交互学习过程。在训练过程中,  $Q$  表根据公式(10)不断更新,直到  $Q$  表中所有数值收敛,训练结束。最后,根据训练后收敛的  $Q$  表进行 PID 控制参数整定,从而达成对液压杆位置状态控制目的。

风机基础安装平台抱桩器液压扶正控制,其程序流程如图 4 所示,具体步骤如下。

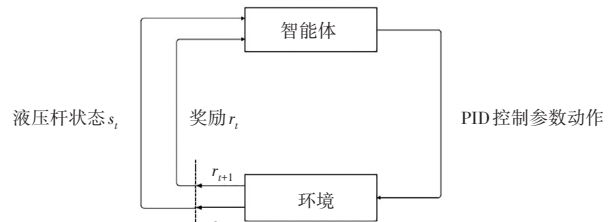


图 3  $Q$  学习训练流程

Fig. 3 Training process of  $Q$ -learning

**Step 1** 通过液压缸配置的激光测距仪和平台上姿态传感器检测值计算桩柱倾斜度。

**Step 2** 若桩柱倾斜度  $Q > 3\%$ , 则执行下一步; 否则, 执行 Step 10。

**Step 3** 振动锤停止打桩,启动液压系统抱桩器扶正控制。

**Step 4** 依据倾斜度计算扶正桩柱各液压缸需推进距离  $R = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ r_4 \ r_5 \ r_6 \ r_7 \ r_8]$ 。

**Step 5** 提取当前时刻行程传感器数据  $Y = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5 \ y_6 \ y_7 \ y_8]$ ;

**Step 6** 令  $E = R - Y$  得  $E = [e_1 \ e_2 \ e_3 \ e_4 \ e_5 \ e_6 \ e_7 \ e_8]$ ,如果  $E \neq 0$ ,则执行下一步;如果  $E = 0$ ,则执行 Step 10。

**Step 7** 将偏差  $e$  和  $\dot{e}$  作为控制器的输入信号,确定液压缸状态  $s$ 。

**Step 8** 采用训练好的 Q 学习模型,对 PID 参数进行整定。

**Step 9** 控制器输出信号放大后输入比例换向阀,进而控制顶推液压缸运动;返回 Step 4。

**Step 10** 若当前桩柱深度  $H_a$  小于预定深度  $H_g$  ( $H_a < H_g$ ),则振动锤重新开始打桩作业,转 Step 1;若达到指定深度,则程序结束。

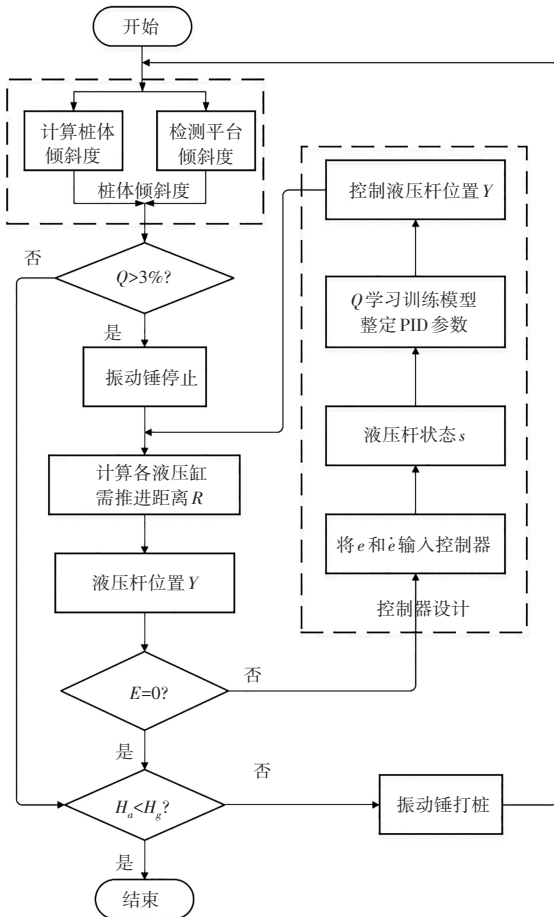


图4 抱桩器液压系统高精度控制流程图  
Fig. 4 High-precision control flowchart of the hydraulic system of the pile-holding device

### 5 案例分析验证

在桩体吊放入稳桩平台后,若倾斜度不满足工程需求,则打桩前需要 8 个液压缸对桩柱协同扶正。采用基于

Q 学习的抱桩器液压缸协同控制算法对桩柱进行扶正,以 1 组液压缸(两层工作台上下对应 2 个顶推液压缸)为例,分析其协同控制性能。假设各液压缸初始位置为 0 m,上层液压缸当前位置为 0.239 m,下层液压缸当前位置为 0.250 m。依据激光测距仪数据计算出需将液压缸推进至 0.3 m 处可使桩柱达到垂直位置。桩柱倾斜方向下液压缸协同控制结果如图 5 所示,图中“短推上”表示桩柱倾斜方向上层工作台顶推液压缸位移变化,“短推下”表示下层工作台顶推液压缸位移变化。仿真结果表明,稳桩平台液压扶正系统超调量为 0。随着调节时间增加,桩柱倾斜度越来越小,稳态误差最终趋向于 0。如调节时间为 274 s 时,其误差为  $9 \times 10^{-4}$  m,此时,桩体倾斜度为 0.016‰,需要指出的是,工程中倾斜度小于 3‰,即满足桩体安装合格标准。因此,此时的倾斜度远小于工程安装合格临界值 3‰,满足桩体安装合格要求。同理,调节时间为 350 s 时,其误差为  $3 \times 10^{-4}$  m,此时,桩体倾斜度为 0.006‰,远远小于工程安装合格临界值 3‰。从中可以看出控制系统稳定性高无振荡,动态性能良好,调节时间短,且系统可根据偏差和偏差变化率大小自适应整定 PID 控制器参数,偏差较大时,曲线斜率较大,即动态响应速度快。从中可以看出,采用基于 Q 学习的抱桩器液压缸协同控制,能够有效实现桩柱扶正。

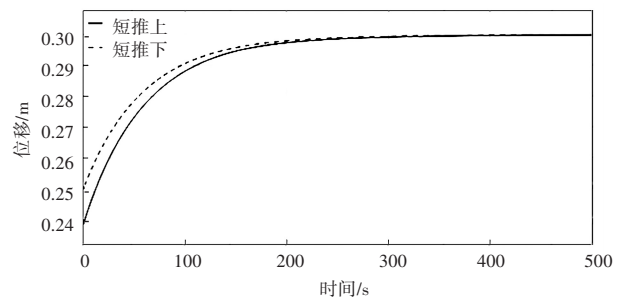


图5 液压缸协同扶正桩柱控制过程

Fig. 5 The process of hydraulic cylinder collaborative alignment of pile columns for control

在打桩过程中,若桩柱垂直度偏差超过设定值,8 个液压缸再次进行协同扶正。假设各液压缸初始位置为 0 m,上层液压缸当前位置为 0.177 m,下层液压缸当前位置为 0.200 m,同样,需将桩柱倾斜方向液压缸推进至 0.3 m 处使得桩柱至垂直位置。桩柱倾斜方向下液压缸协同控制结果如图 6 所示,扶正过程中,稳桩平台液压扶正系统超调量为 0。随着调节时间增加,桩柱倾斜度越来越小,稳态误差最终趋向于 0。如当调节时间为 292 s 时,其误差为  $1.5 \times 10^{-3}$  m,此时,桩体倾斜度为 0.027‰,远小于工程安装合格临界值 3‰。调节时间为 400 s 时,稳态误差为  $5 \times 10^{-4}$  m,此时,桩体倾斜度为 0.009‰,远小于工程安装合格临界值 3‰。从中可以看出,控制系统稳定性高无振荡,动态响应快。

为进一步验证本文提出控制算法的有效性,以 1 组液压缸(两层工作台上下对应 2 个液压缸)为例。假设各液压缸初始位置为 0 m,上层液压缸当前位置为 0.239 m,下

层液压缸当前位置为 0.250 m。需将桩柱倾斜方向液压缸推进至 0.3 m 处使得桩柱至垂直位置。桩柱倾斜方向下液压缸协同控制结果如图 7 所示。设本文提出的控制器和传统 PID 控制器初始参数均为  $K_{p0} = 5, K_{i0} = 0.01, K_{d0} = 1$ ，由于本文提出的控制器设计使用了  $Q$  学习算法，这使得系统更能够适应不确定性和变化。根据位移偏差和偏差变化率，基于  $Q$  学习算法在一定范围内自适应调整参数，系统动态性能良好，稳定性高无振荡，稳态误差为  $1 \times 10^{-4}$  m 远小于传统 PID 控制器。

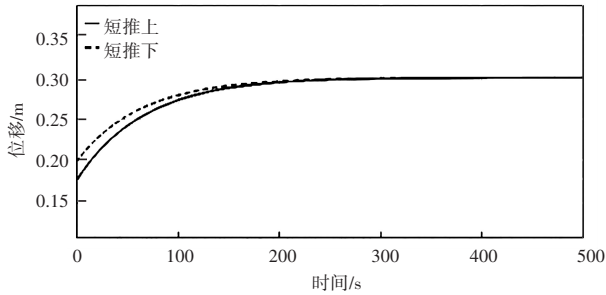


图 6 桩体再扶正协同控制过程

Fig. 6 Process of collaborative control for re-centering of the pile body

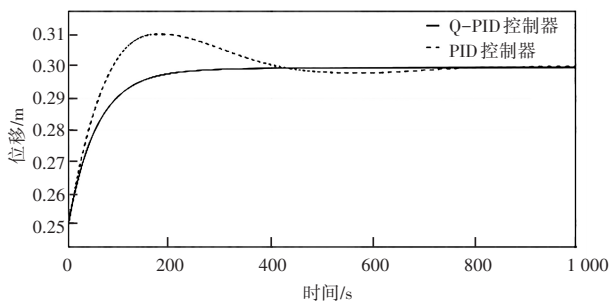


图 7 单桩扶正液压控制算法对比

Fig. 7 Comparison of hydraulic control algorithms for stump straightening

## 6 结论

本文针对海上风机安装稳桩平台抱桩器液压控制系

统进行研究，提出海上风电稳桩平台抱桩器高精度控制算法，以解决稳桩平台对单桩高精度扶正需求。对单桩抱桩器液压系统进行建模，通过训练好的  $Q$  学习模型，动态调整 PID 控制参数。仿真结果表明， $Q$  学习根据偏差和偏差变化率实现对比例、积分、微分环节参数的自适应调整，能够保障液压控制系统的稳定性、快速性和准确性。相较于传统 PID 控制，基于  $Q$  学习的抱桩器液压控制算法有自适应、自整定特性，可以大幅减小液压控制系统静差，更适用于稳桩平台抱桩器液压控制系统设计。由于海上作业环境复杂多变，提出的基于  $Q$  学习的抱桩器液压控制优势将会得到进一步发展。

## 参考文献

- [1] 杨强, 仲卫, 谢善益, 等. 基于粒子群算法优化 PID 的海上风电柔直并网系统调频控制[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(8): 144-148.
- [2] Ren B, Jia Y, Li Q, et al. Robust wind power ramp control strategy considering wind power uncertainty[J]. Electronics, 2024, 13(1): 211.
- [3] 李高, 丘翊仙, 郭仁宏. 基于动态模式分解的海上风电 35 kV 集电线路交叉故障定位方法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(11): 92-96.
- [4] 孙远韬, 张敏, 张氢, 等. 海上风电安装用抱桩器发展综述[J]. 航海工程, 2023, 52(6): 132-136.
- [5] 翟东俊, 秦慧慧. 133 m 打桩船桩架抱桩器系统改造设计[J]. 机电设备, 2023(40): 46-51.
- [6] Coskun M Y, Itik M. Intelligent PID control of an industrial electro-hydraulic system[J]. ISA Transactions, 2023, 139: 484-498.
- [7] 张北平. 桩顶搁置式自移动打桩平台电控系统设计与应用[J]. 广东造船, 2022, 41(6): 56-59.
- [8] 王昕宇. 海上风电运动补偿式抱桩器设计与控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [9] 徐贤, 朱丹丹, 徐晓春, 等. 海上风电集群 AVC 子站无功电压灵敏度协同控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(4): 53-64.
- [10] 程江洲, 张博文, 李欣, 等. 考虑蓝绿氢与柔性负荷的综合能源系统协调优化调度策略[J/OL]. 电测与仪表, 1-13 [2026-05-27]. <https://link.cnki.net/urlid/23.1202.th.20250811.1148.002>.
- [11] Yang Y, Gao Y, Ding Z, et al. Advancements in Q-learning meta-heuristic optimization algorithms: a survey[J]. WIREs Data Mining and Knowledge Discovery, 2024, 14(6): 1-37.