

磷虾群算法优化模糊 PID 的海上 加油储罐恒压控制方法

朱国太¹, 陈培², 杨森², 赵世琰²

(1. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335;

2. 上海承飞航空特种设备有限公司, 上海 201613)

摘要: 文章聚焦海上加油储罐恒压控制, 深入分析储罐系统特性, 确立以电动机变频调速实现恒压控制的物理机制, 阐明调节定子电源频率可改变转子转速、控制油泵出油量以达成恒压; 针对恒压控制需求, 设计基于磷虾群算法优化的模糊 PID 控制器; 选取定子电源频率为核心控制量, 利用模糊推理动态调整 PID 增益, 构建离散 PID 算法实时更新参数, 解决传统模糊 PID 参数整定依赖经验、难达全局最优的问题; 通过随机初始化种群、建立适应度函数、模拟群体智能协作与竞争, 迭代逼近最优参数组合, 提升系统鲁棒性、响应速度与稳态精度; 在模糊控制过程中引入磷虾群算法对参数寻优, 利用其独特拉格朗日模型平衡群体协作与随机探索, 适应油流波动与负载扰动; 同时, 对输入值进行模糊化处理, 设计模糊子集与量化函数, 精细化反映海上复杂工况; 制定模糊规则表, 实现增益参数精准调节; 采用加权平均法进行解模糊化处理, 将模糊推理结果转化为实际控制信号, 实现海上加油储罐恒压控制; 实验结果表明, 所提方法在恒压控制中, 在 5 min 可达到设定压力时间, F_1 值为 0.96, 波动范围小, 表明该方法在动态响应、稳态精度及抗干扰能力方面表现优异, 有效提高了海上加油储罐恒压控制效果。

关键词: 加油储罐; 恒压控制; 模糊 PID 控制器; 变频调速控制; 磷虾群算法

Optimized Fuzzy PID Constant Pressure Control Method for Offshore Refueling Tanks Based on Krill Swarm Algorithm

ZHU Guotai¹, CHEN Pei², YANG Sen², ZHAO Shiyan²

(1. Shanghai Branch, CNOOC, Shanghai 200335, China;

2. Shanghai Chengfei Aviation Special Equipment Co., Ltd., Shanghai 201613, China)

Abstract: This paper focuses on the constant pressure control of offshore refueling storage tanks, deeply analyzes the characteristics of the storage tank system, establishes the variable frequency and speed regulation system for motors, realizes the physical mechanism of constant pressure control, and achieves constant pressure by adjusting the stator power frequency to change the rotor speed and control the oil pump's discharge volume. To meet the requirements of constant pressure control, a fuzzy PID controller optimized by the krill swarm algorithm is designed. The stator power frequency is selected as the core control variable, using fuzzy reasoning to dynamically adjust the PID gains and construct a discrete PID algorithm to update parameters in real time, which solves the issues that traditional fuzzy PID parameter tuning relies on experience and is difficult to achieve global optimization. By randomly initializing the population, the algorithm establishes a fitness function, simulates the collaboration and competition of swarm intelligence, and approaches the optimal parameters by iteration, thereby enhancing the system's robustness, response speed, and steady-state accuracy. During the fuzzy control process, the krill herd algorithm is introduced to optimize the parameters, which utilizes its unique Lagrangian model to balance swarm collaboration and random exploration, thus adapting to oil flow fluctuations and load disturbances. Meanwhile, it fuzzifies the input value, and designs fuzzy subsets and quantization functions to precisely reflect complex operating conditions at sea. A fuzzy rule table is formulated to precisely adjust gain parameters. A weighted average method is used to process defuzzification and convert fuzzy reasoning results into actual control signals, thus achieving constant pressure con-

收稿日期:2025-05-08; 修回日期:2025-06-19。

作者简介:朱国太(1985-),男,大学本科,高级工程师。

引用格式:朱国太,陈培,杨森,等.磷虾群算法优化模糊 PID 的海上加油储罐恒压控制方法[J].计算机测量与控制,2025,33(12):137-144.

trol in offshore refueling storage tanks. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves the set pressure within 5 minutes in constant pressure control, with an F_1 score of 0.96 and a small fluctuation range. This indicates that the method exhibits excellent performance in dynamic response, steady-state accuracy, and anti-interference capability, effectively improving constant pressure control effect in offshore refueling storage tanks.

Keywords: refueling tank; constant voltage control; fuzzy PID controller; variable frequency speed control; krill swarm algorithm

0 引言

全球海洋资源的不断开发和利用,海上加油储罐的安全与稳定运行日益成为海洋工业领域关注的焦点。海上加油储罐作为海上能源供应的重要设施,其内部压力的稳定性对于保障加油作业的顺利进行以及船舶在运行过程中的安全性具有重要意义^[1-2]。这些储罐具备庞大的容积,如常见的 5 000 m³ 储罐,能够储存大量的燃油,以满足海上作业平台、远洋船舶等长时间、远距离的航行需求。其设计精妙,不仅考虑到储罐的直径与高度比例,以确保结构稳固与空间利用的最大化,如直径可达 30 m、高度可达 15 m,还充分考量了极端工作环境下的安全性与耐用性,设计压力高达 1 600 kPa,且能在 -50~50 ℃ 的宽温度内稳定运行。海上加油储罐通过先进的油泵系统与变频调速技术,实现了燃油的高效输送与精确控制,其中自动恒压模糊控制方法的应用,更是极大地提升了储罐系统的智能化水平与响应速度,确保了加油过程的平稳、快速与安全,为海上油气资源的开发与利用提供了坚实保障。但风浪、潮汐等环境因素可能导致储罐内部压力产生波动,进而影响加油作业的效率 and 安全性。因此,研究并实现海上加油储罐的自动恒压控制具有重要意义。

文献 [3] 分析了液压流体作用原理,根据分析结果建立液压缸模型与阀流量模型,考虑负载力的影响,建立负载力与液压缸之间的平衡方程,以此设计反馈线性滑模控制器,实现恒压控制,该方法在建模分析过程中没有考虑液压系统的非线性特性、时滞效应、摩擦和泄漏等因素,难以完全捕捉所有实际系统中的细微差异,这可能导致控制器在实际应用中的性能与预期有所偏差。文献 [4] 建立了系统状态方程,结合遗传算法与线性二次最优控制理论设计控制策略对系统压力展开控制,线性二次最优控制基于系统模型,而实际系统存在非线性特性和不确定性。这可能导致模型与实际系统之间存在偏差,从而影响控制器的效果。文献 [5] 考虑了液压系统控制过程中存在的外部干扰与非线性因素,在干扰观测器的基础上建立终端滑模控制器,同时设计了非线性补偿策略,以此实现液压系统的级联控制,实现压力恒定,级联控制系统需要确保各级之间的稳定性和协调性。如果某一级出现问题,系统会产生级联反应,各级之间的相互作用和耦合关系可能较为复

杂,增加了级联控制的难度。文献 [6] 结合滑模控制与观测器设计虚拟容错控制策略,其次对控制律展开分配,最后将驱动力作为期望目标,根据气缸控制规律利用执行器执行控制律,实现控制。控制律的分配需要根据系统的实际情况和控制目标进行合理设计。如果分配策略不合理,可能导致某些执行器过载或冗余,而其他执行器则可能处于闲置状态,从而影响系统的整体性能和效率。

上述方法在处理复杂液压系统时,都面临着系统复杂性和控制难度的挑战。如级联控制系统(文献 [5])需要确保各级之间的稳定性和协调性,而虚拟容错控制策略(文献 [6])则需要合理设计控制律分配策略,这些复杂性都增加了控制实现的难度和不确定性。为了解决上述方法中存在的问题,提出海上加油储罐自动恒压模糊控制方法。在控制策略设计上,提出基于磷虾群算法优化的模糊 PID 控制器,突破传统模糊 PID 参数整定依赖经验、易陷入局部最优的局限,利用磷虾群算法的群体智能协作与竞争机制,实现全局参数寻优,显著提升系统鲁棒性、响应速度与稳态精度。在输入值处理环节,设计电源频率误差和累积误差的模糊子集与量化函数,依据海上复杂工况动态特性,对论域中心与边缘区域采用不同分辨率隶属度函数,增强对微小波动捕捉与噪声干扰抵抗能力。在模糊规则制定方面,围绕海上工况动态特性与恒压需求,精细设计比例、积分、微分增益调节规则,实现“大误差快响应、小误差细调节”等策略。解模糊化处理采用加权平均法,实时整合模糊规则与工况信息,确保控制器灵活应对不同工况,精准稳定实现恒压控制。

1 储罐系统特性分析

通过深入解析海上加油储罐系统的供油特性及其恒压控制本质,为后续控制策略设计奠定理论与模型基础。海上加油储罐恒压控制对于保障加油过程安全、稳定、高效运行至关重要。在海上加油场景中,用油需求会因多种因素(如加油对象、加油速度等)发生波动,若不能实现恒压控制,储罐内压力不稳定可能导致油泵输出流量不稳定,进而引发加油速度不均、加油量不准确等问题,甚至可能引发安全隐患。通过恒压控制,可实时调节供油流量,补偿用油需求波动,确保储罐内压力稳定,保证加油过程平稳、可靠进行,满足海上加油

作业对精度和安全性的严格要求。

在本节中通过分析电动机变频调速原理, 阐明调节定子电源频率可改变转子转速, 进而控制油泵出油量以实现恒压控制, 确立海上加油储罐恒压控制的物理机制——即通过电动机变频调速实时调节供油流量, 补偿用油需求波动。储罐系统采用离心泵作为油泵, 其供油特性曲线如图 1 所示。

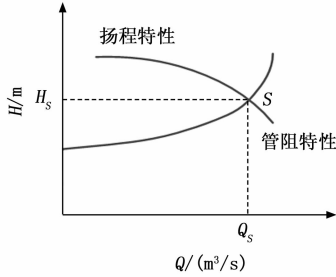


图 1 供油特性曲线

图 1 中, Q 为流量, H 为扬程, 图中的管阻特性曲线与扬程特性曲线均是在供油管路中阀门开度不变的情况下绘制的, 分析图中数据可知, 扬程 H 与流量 Q 之间呈反比关系。在阀门开度与油泵转速已知且固定不变的条件下, 用油情况直接决定了流量, 由此可知扬程特性描述的是用油流量 Q_o 与扬程 H 之间存在的相互关系。管阻特性是指在水泵转速和阀门开度已知且固定的条件下, Q 、 H 之间存在的相关关系。管阻特性用于衡量供油流量 Q_o 与扬程 H 之间存在的相关关系。 S 点为供油系统的工作点, 该点处供油流量与用油流量之间处于平衡状态。

海上加油储罐系统的供油由油泵实现, 因此调节电动机转速即可实时改变油泵出油量, 以此实现恒压控制, 因此, 海上加油储罐恒压控制的实质是电动机变频调速控制^[7-8]。设 s 代表的是电动机在储罐系统中的实际转差率, 可通过下式计算得到:

$$\begin{cases} s = 1 - \frac{n}{n_1} \\ n = \frac{60g(1-s)}{a} \\ n_1 = \frac{60g}{a} \end{cases} \quad (1)$$

式中, n 、 g 分别为电动机转子对应的转速与定子电源频率; n_1 为空载状态下的电动机对应的理想转速; a 为极对数。公式 (1) 即为变频调速原理, 对上式展开分析: 当极对数 a 已知且固定的情况下, 随着转子转速 n 的增大定子电源频率 g 逐渐增大, 由此可知, 调节定子电源频率 g 即可改变电机转子转速 n , 控制变油泵出油流量, 实现恒压控制。

在海上加油储罐系统中, 储罐内部压力与油泵出油

量紧密相关。当油泵出油量增加时, 若用油需求未同步提升, 储罐内油量增多, 压力随之上升; 反之, 出油量减少或用油需求增大时, 压力下降。而油泵出油量由电动机转速决定, 电动机转速又通过变频调速控制, 即调节定子电源频率来改变。

2 恒压模糊控制

海上加油储罐系统在运行过程中, 面临着油流波动频繁且幅度较大、负载扰动等复杂海况问题, 这些因素会严重影响供油压力的稳定性。而恒压控制是保障海上加油作业顺利进行的关键, 稳定的供油压力能够确保加油过程的准确性和安全性, 避免因压力波动引发的安全事故和设备损坏。本研究通过设计模糊 PID 控制器并引入磷虾群算法优化其参数, 实现对海上加油储罐系统的恒压控制, 能够有效应对复杂海况下的各种干扰, 提高系统的鲁棒性、响应速度与稳态精度, 从而保证供油压力稳定在设定值范围内。

2.1 基于磷虾群算法优化的模糊 PID 控制器

传统方法在复杂非线性系统中容易陷入局部最优, 无法全面探索参数空间, 使比例、积分、微分增益不能自适应匹配系统动态特性, 影响恒压控制的响应速度与稳态精度。针对海上加油储罐恒压控制需求, 设计模糊 PID 控制器并引入磷虾群算法优化其参数。磷虾群算法通过模拟磷虾群体的智能行为, 包括诱导运动、觅食运动和随机扩散运动, 实现全局参数寻优。相较于传统模糊 PID 参数整定依赖经验、难达全局最优的问题, KHA 随机初始化种群生成多维搜索空间, 结合适应度函数动态评估个体质量, 有效避免了局部最优陷阱。其独特的拉格朗日模型将磷虾运动分解为不同形式, 既利用群体协作快速收敛至潜在最优区域, 又通过随机扩散保持探索能力, 这种平衡机制在复杂非线性系统中尤为重要, 能够使比例、积分、微分增益参数 (k_p 、 k_i 、 k_d) 自适应匹配系统动态特性, 提高恒压控制的响应速度与稳态精度。

选取定子电源频率为核心控制量, 利用模糊推理动态调整比例、积分、微分增益, 构建离散 PID 算法实时更新参数。为解决传统模糊 PID 参数整定依赖经验、难达全局最优的问题, KHA 通过随机初始化种群、建立适应度函数、模拟群体智能协作与竞争, 迭代逼近最优参数组合, 提升系统鲁棒性、响应速度与稳态精度, 确保供油压力稳定。

根据海上加油储罐系统特性分析结果, 选取定子电源频率 g 作为控制量设计模糊 PID 控制器^[9-10]实现恒压控制。设 e 为定子电源频率误差, e_c 为定子电源频率的累积误差。通过模糊推理的方法在线调节模糊 PID 控制器的微分增益变化 Δk_d 、积分增益变化 Δk_i 以及比例

增益变化 Δk_p [11-12], 以此满足海上加油储罐系统的运行需求, 提高系统的静态与动态性能。海上加油储罐自动恒压模糊控制方法设计的模糊 PID 控制器如图 2 所示。

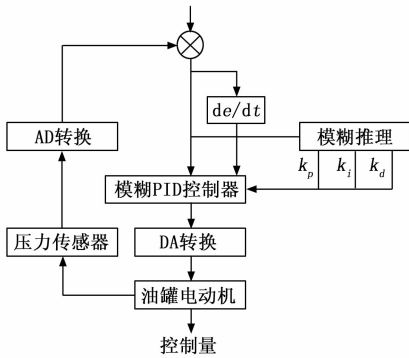


图 2 模糊 PID 控制器

模糊 PID 控制器输出的是数字信号, 需通过 D/A (数模) 转换将其变为模拟信号, 以此驱动电机。D/A 转换器将模糊 PID 控制器输出的离散数字量转换为连续的模拟电压或电流信号, 该信号与电机转速相关, 进而控制油泵出油量实现恒压。

整个架构图中, 优化算法体现在模糊 PID 控制器的参数整定环节。基于磷虾群算法对模糊 PID 的 PID 增益进行优化, 通过随机初始化种群、建立适应度函数等操作, 迭代逼近最优参数组合, 解决传统模糊 PID 参数整定依赖经验、难达全局最优的问题, 提升系统性能。

在每个采样时刻通过离散 PID 控制算法对控制参数展开更新, 以此实现压力实时调节:

$$l(t) = k_p e(t) + s k_i T \sum_{i=0}^t e(t) + \frac{k_d [e(t) - e(t-1)]}{T} \quad (2)$$

式中, $l(t)$ 为模糊 PID 控制器的输出; k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例增益、积分增益与微分增益; $e(t)$ 为 t 时刻海上加油储罐系统定子电源频率误差; T 为采样周期。分析上式可知, k_p 、 k_i 、 k_d 直接影响了恒压控制效果, 为了提高控制精度, 海上加油储罐自动恒压模糊控制方法在模糊控制过程中引入磷虾群算法对上述参数展开寻优。具体过程如下:

1) 随机在增益参数的搜索空间内生成磷虾初始种群;

2) 根据模糊 PID 控制器的控制误差 $e(t)$, 建立磷虾群算法的适应度函数, 确定增益参数搜索空间内, 磷虾个体的适应度值 $F(t)$:

$$F(t) = l(t) \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (3)$$

3) 采用拉格朗日模型描述磷虾个体在参数寻优过程中的位置变化速率:

$$\frac{dX_i}{dt} = F(t)N_i + G_i + D_i \quad (4)$$

式中, $X_i = \{X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,NV}\}$ 为磷虾个体所处的位置, 其中第 j 维变量 $X_{i,j}$ 的搜索上下限分别为 UB_j 、 LB_j ; N_i 为在其他磷虾诱导下磷虾个体 i 产生的运动; G_i 为磷虾个体 i 产生的觅食运动; D_i 为磷虾个体 i 产生的随机扩散运动。

4) 对磷虾个体的位置展开更新:

(1) 在其他磷虾诱导下磷虾个体 i 发起的运动 N_i^n 可描述为:

$$N_i^n = N_i^{\max} \beta_i + \xi_n N_i^{\text{old}} X_i \quad (5)$$

式中, N_i^{\max} 为诱导速度的最大值; ξ_n 为惯性权重; N_i^{old} 为磷虾个体 i 原始的诱导运动; β_i 为诱导方向, 其计算公式如下:

$$\beta_i = \beta_i^{\text{local}} + \beta_i^{\text{argst}} \quad (6)$$

式中, β_i^{local} 、 β_i^{argst} 分别为磷虾个体 i 在其邻居个体与全局最优个体诱导下的运动方向。

(2) 磷虾个体 i 产生的觅食运动 G_i 可描述为:

$$G_i = B_f \chi_i + \xi_f G_i^{\text{old}} \quad (7)$$

式中, B_f 为觅食速度的最大值, ξ_f 为权重系数, G_i^{old} 为磷虾个体 i 原始的觅食运动, χ_i 为觅食方向, 可通过下式计算得到:

$$\chi_i = \chi_i^{\text{food}} + \chi_i^{\text{best}} \quad (8)$$

式中, χ_i^{food} 、 χ_i^{best} 分别为磷虾个体 i 在“食物”与自身历史最优个体的影响下的觅食方向。

(3) 通过下式描述磷虾个体 i 的随机扩散运动 D_i :

$$D_i = D_i^{\max} (1 - \frac{t}{t_{\max}}) \epsilon \quad (9)$$

式中, D_i^{\max} 为随机扩散速度的最大值; t 为当前寻优数; t_{\max} 为磷虾群算法的最大迭代次数。

5) 判断当前寻优次数是否达到磷虾群算法的最大迭代次数 t_{\max} , 如果达到, 输出此时适应度值最大的个体位置, 该位置即为最优增益参数; 否则返回步骤 (2) 中。

2.2 输入值模糊化

海上加油储罐在运行过程中, 受复杂海况影响, 油流波动频繁且幅度大, 导致供油压力出现动态变化。而恒压控制要求系统能够实时、准确地感知这些压力变化, 并做出相应的控制调整。输入值的模糊化处理作为连接物理测量信号与智能控制算法的桥梁, 其处理效果直接影响控制器对系统状态的判断准确性。精准的模糊化处理能使控制器充分理解海上复杂工况下的压力动态特性, 从而为后续的模糊推理和控制决策提供准确的输入信息, 确保系统能够及时、有效地调整控制参数, 维持供油压力的稳定, 保障海上加油作业的安全高效进行。设电源频率误差 e 的模糊子集均为 $\{NB(\text{负大}),$

NM(负中),NS(负小),ZO(零),PS(正小),PM(正中)》，确保论域范围既能覆盖正常波动，又能包含异常扰动。建立量化函数，定义 e 的论域 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ ，量化函数 $f(e)$ 的表达式如下：

$$f(e) = \frac{6e}{R_{\max} - R_{\min}}$$

(10)

式中， R_{\max} 、 R_{\min} 分别为量化值的最大值与最小值。通过上式可获得 e 在模糊子集上对应的隶属度^[13-14]，将其作为依据确定模糊子集，完成控制器输入的模糊化处理。对于频率误差，在论域中心区域采用高分辨率隶属度函数，以敏锐捕捉微小压力波动；而在边缘区域则采用低分辨率函数，避免噪声干扰导致的误动作。累积误差的隶属度设计则侧重于反映长期趋势，通过引入非对称隶属度分布，增强对持续压力偏差的修正能力。这种精细化设计使模糊化后的输入值能够准确传递海上加油储罐的实时状态信息，为后续模糊推理提供可靠依据，从而有效提升恒压控制在复杂海况下的适应性与稳定性。

2.3 制定模糊规则

海上加油储罐在运行过程中，受复杂海况影响，油流波动频繁且幅度大，导致供油压力出现动态变化，维持恒压对于保障加油作业的安全高效进行至关重要。模糊规则表作为海上加油储罐自动恒压模糊控制系统的核心决策逻辑，通过对比例增益、积分增益及微分增益的精准调节，能够快速响应压力偏差、消除稳态误差、增强系统动态性能，从而有效应对油流波动带来的压力变化，确保供油压力稳定在设定范围内，保障海上加油作业的正常开展。在制定海上加油储罐模糊规则表时，主要依据系统压力误差和累积误差与比例增益、积分增益、微分增益间的关系。海上加油时油流波动大，当误差或累积误差大，表明压力偏离设定值较多，需快速响应，故增大比例增益以加快调节速度；误差小时，为避免振荡，减小比例增益。对于积分增益，误差持续存在时增大其值，加速消除稳态误差；误差趋近零时减小，防止积分饱和。微分增益则根据误差变化率调整，变化率大时增大其值，预判趋势抑制超调；变化平稳时减小，避免过度敏感，以此确保系统稳定。由此，制定增益参数 k_p 、 k_i 、 k_d 的模糊控制规则，生成模糊规则表。

表 1 为海上加油储罐自动恒压模糊控制系统的核心决策逻辑，其设计紧密围绕海上复杂工况下的动态特性与恒压需求。针对比例增益、积分增益及微分增益的调节，规则表通过误差与累积误差的模糊化输入，实现了对系统响应速度与稳定性的精准权衡。

在海上加油场景中，油流波动频繁且幅度较大，因此 k_p 的调节规则尤为关键。当误差或累积误差较大（如时，规则表倾向于分配较大的 k_p 值，以快速响应压

表 1 模糊规则表

e	k_p						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB
e	k_i						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
e	k_d						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

力偏差，抑制油流突变导致的压力波动；而当误差较小时， k_p 则逐渐减小，避免过度调节引发系统振荡。这种“大误差快响应、小误差细调节”的策略，有效提升了恒压控制在复杂海况下的鲁棒性。

积分增益 k_i 的调节则侧重于消除稳态误差。在误差持续存在时， k_i 被赋予较大值，以加速累积误差的修正；而当误差趋近于零时， k_i 适当减小，防止积分饱和导致的超调。这种设计确保了海上加油储罐在长期运行中的压力稳定性，即使面对持续的小幅波动也能保持精准控制。

微分增益 k_d 的引入则进一步增强了系统的动态性能。在误差变化率较大时， k_d 被赋予较大值，以提前预判压力趋势，抑制超调；而在误差变化平稳时， k_d 减小，避免对正常波动的过度敏感。这种“预判—抑制”机制在海上加油过程中尤为重要，能够有效应对油流突变引发的压力冲击，确保供油压力的平稳过渡。

综上所述，表 1 的模糊规则表通过精细化的增益调节策略，充分适应了海上加油储罐恒压控制的复杂需求，实现了快速响应、稳态精度与动态稳定性的有机统一。

2.4 解模糊化处理

在海上加油储罐自动恒压控制系统中,解模糊化处理是将模糊推理结果转化为实际控制信号的关键步骤。海上加油储罐在运行过程中,受复杂海况影响,油流具有非线性和时变性,导致供油压力波动频繁且幅度大。解模糊化处理作为将模糊推理结果转化为实际控制信号的关键步骤,其处理效果直接影响控制器对压力波动的响应速度和调节精度。精准的解模糊化处理能够使控制器根据实时压力情况,快速、准确地生成合适的控制信号,驱动执行机构调整系统参数,及时消除压力偏差,确保供油压力稳定在设定范围内,保障海上加油作业的安全高效进行。

根据 e 的隶属度,结合表 1 所示的模糊规则与输入值模糊化结果^[15-16],采用加权平均法获得模糊变量的变化值,即模糊 PID 控制器的最终输出控制量 Q_0 :

$$Q_0 = (\sum_{a=1}^m E_a N_a) / \sum_{a=1}^m E_a \quad (11)$$

式中, m 为模糊规则的数量; E_a 、 N_a 分别为第 a 条模糊规则对应的加权系数与模糊量化值。具体而言,加权平均法的应用使得每条模糊规则的贡献度与其对应的隶属度成正比,从而确保高置信度的规则在最终输出中占主导地位。例如,当海上加油储罐因油流突变导致压力误差较大时,模糊规则表中对应的大比例增益 k_p 规则会被赋予更高权重,其量化值通过加权平均法显著影响最终输出,促使控制器快速响应压力偏差。反之,当误差较小时,低增益规则的权重增加,避免过度调节引发系统振荡。

在海上环境中,油流的非线性和时变性要求解模糊化过程具备高度的动态适应性。加权平均法通过实时调整各规则的权重系数,使得控制器能够灵活应对不同工况下的压力波动。例如,在风浪较大的海况下,油流扰动可能导致误差持续累积,此时积分增益 k_i 的解模糊化结果会逐步增大,以加速消除稳态误差;而在油流平稳时, k_i 的输出则自动减小,防止积分饱和。

此外,微分增益 k_d 的解模糊化处理进一步增强了系统的鲁棒性。通过捕捉误差变化率的模糊信息, k_d 的输出能够提前预判压力趋势,抑制超调现象。例如,当油流突然增大时,误差变化率的模糊化结果会触发 k_d 的快速响应,通过加权平均法调整输出,使控制器在压力上升初期即采取抑制措施,确保供油压力稳定在设定值范围内。

由此,加权平均解模糊化方法通过动态整合模糊规则与实时工况信息,实现了海上加油储罐恒压控制的精准性与稳定性,有效应对了复杂海况下的油流波动与负载扰动,为海上加油作业的安全高效运行提供了可靠保障。

3 实验与分析

为了验证海上加油储罐自动恒压模糊控制方法的整体有效性,需要对其展开测试。

3.1 实验步骤

具体的实验步骤如下:

- 1) 分析储罐系统特性,获取电动机在储罐系统中的实际转差率 s ;
- 2) 通过离散 PID 控制算法对控制参数展开更新,获取控制器的输出结果 $l(t)$;
- 3) 采用磷虾群算法优化控制器参数,计算适应度值 $F(t)$;
- 4) 基于拉格朗日模型计算磷虾个体在参数寻优过程中的位置变化速率 $\frac{dX_i}{dt}$;
- 5) 更新磷虾位置,当达到磷虾群算法的最大迭代次数 t_{\max} 即停止寻优,输出最优增益参数;
- 6) 对输入值进行模糊化处理,量化函数 $f(e)$;
- 7) 建立模糊规则表,制定增益参数 k_p 、 k_i 、 k_d 的模糊控制规则;
- 8) 采用加权平均法获得模糊变量的变化值,获取最终输出控制量 Q_0 。

3.2 实验方法设计

为验证基于磷虾群算法优化的模糊 PID 控制器在海上加油储罐恒压控制中的有效性,对比传统控制方法(滑模跟踪控制、干扰观测器控制)的性能差异,评估系统在动态响应、稳态精度及抗干扰能力方面的表现。

3.2.1 实验平台搭建

储罐参数:容积 5 000 m³,直径 30 m,高度 15 m,设计压力 1 600 kPa,设计温度 -50~50 ℃。

模拟系统:通过离心泵、变频电机、管路阀门及压力传感器构建液压回路,模拟海上加油过程中的流量波动与负载变化。

传感器配置:安装压力传感器(量程 2 000 kPa,固有频率 60 kHz)实时监测储罐压力,配置流量传感器监测油泵输出流量。

3.2.2 控制器实现

模糊 PID 控制器:以定子电源频率误差和累积误差为输入,通过模糊规则表动态调整比例(k_p)、积分(k_i)、微分(k_d)增益。

磷虾群算法优化:在增益参数搜索空间内初始化种群,通过适应度函数评估个体性能,迭代更新最优增益参数。

对比方法:实现滑模跟踪控制与干扰观测器控制,保持控制参数一致。

3.2.3 关键指标记录

响应时间:达到设定压力 90%所需时间。

超调量: 压力峰值与设定值的最大偏差百分比。
稳态误差: 稳态阶段压力波动范围。

3.3 频率控制效果分析

海上加油储罐自动恒压模糊控制方法通过调节定子电源频率, 改变电机转子转速控制变油泵出油流量, 实现恒压控制, 在控制过程中, 为了提高控制精度, 该方法引入磷虾群算法展开了增益参数优化, 对比优化前后, 模糊 PID 控制器的定子电源频率控制结果如图 3 所示。

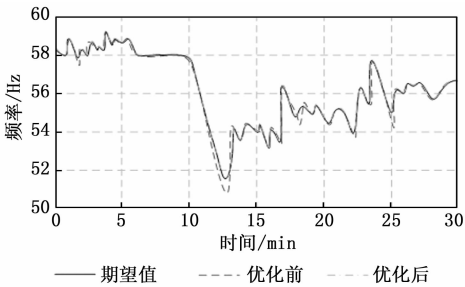


图 3 定子电源频率控制结果

由图 3 可知, 优化前采用模糊 PID 控制器对储罐系统定子电源频率展开控制时, 存在一定误差, 采用磷虾群算法优化后, 模糊 PID 控制器的控制结果与期望曲线相符, 表明优化后, 模糊 PID 控制器的性能得以提升, 可有效提高恒压控制效果。这是因为磷虾群算法的引入, 通过模拟磷虾群体的智能行为, 实现了全局参数寻优。该算法随机初始化种群生成多维搜索空间, 结合适应度函数动态评估个体质量。这种平衡机制使得比例、积分、微分增益参数能够自适应匹配系统动态特性。当系统状态发生变化时, 磷虾群算法能够及时调整参数, 使模糊 PID 控制器能够更准确地调节定子电源频率, 从而实现对电机转子转速的精确控制。

3.4 恒压控制效果分析

在控制过程中, 采用压力传感器测量海上加油储罐内部的压力, 压力传感器的相关参数如下:

- 1) 量程范围: 2 000 kPa;
- 2) 过载能力: $\leq 150\% \text{ F.S.}$;
- 3) 固有频率: 60 kHz;
- 4) 上升时间: $\leq 10 \mu\text{s}$;
- 5) 工作温度: $-25 \sim 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

将海上加油储罐的恒定压力设置为 1 600 kPa, 采用海上加油储罐自动恒压模糊控制方法、滑模跟踪控制方法与基于干扰观测器的控制方法展开压力控制测试, 结果如图 4 所示。

分析图 4 可知, 在恒压控制过程中, 所提方法达到设定压力所需的时间约为 5 min, 低于滑模跟踪控制方法与基于干扰观测器的控制方法, 且后续控制较为稳定, 而滑模跟踪控制方法与基于干扰观测器的控制方法达到

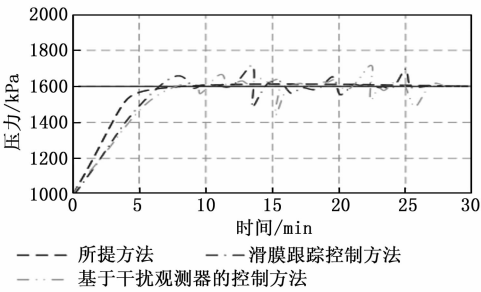


图 4 恒压控制结果

设定压力所需的时间较长, 且后续控制过程中存在较大波动, 控制效果较差。因为所提方法采用基于磷虾群算法优化的模糊 PID 控制器, 通过模糊推理动态调整比例、积分、微分增益, 能够快速响应系统状态的变化。磷虾群算法优化后的增益参数能够更好地匹配系统的动态特性, 使控制器能够更准确地调节定子电源频率, 进而控制油泵出油量, 实现对供油压力的精确控制。

3.5 控制超调量分析

上述方法在控制过程中的超调量变化情况如图 5 所示。

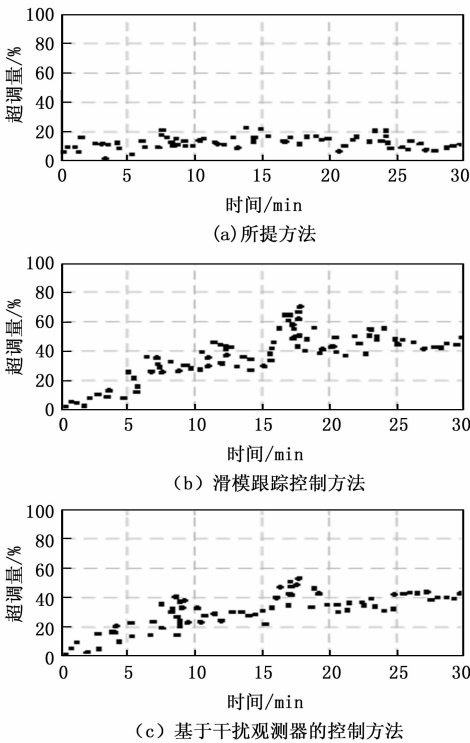


图 5 不同方法的超调量

通过上述测试可知, 所提方法的超调量远低于其他两种方法, 表明所提方法具有较高的控制稳定性, 因为所提方法在控制过程中对模糊 PID 控制器展开了优化, 通过优化控制器的增益参数, 可有效避免控制过程中外界干扰造成的抖动现象。所提方法通过磷虾群算法优化模糊 PID 控制器的增益参数, 使控制器能够更好地适应系统的动态特性。优化后的增益参数能够提高系统的

响应速度和稳定性,使系统在接近设定值时能够平稳过渡,有效降低了超调量。

3.6 控制精度分析

为进一步验证所提方法的控制精度,与对比方法的 F_1 值进行对比测试, F_1 值又称平衡 F 分数,是一种精确率和召回率的调和平均数。通过 $(\text{精确率} \times \text{召回率}) / (\text{精确率} + \text{召回率})$ 获取,数据获取过程如下:

1) 按照 3.2 节实验方法设计中的实验平台搭建要求,构建包含储罐、离心泵、变频电机、管路阀门及压力传感器、流量传感器的模拟系统;

2) 分别采用所提的海上加油储罐自动恒压模糊控制方法、滑模跟踪控制方法与基于干扰观测器的控制方法对海上加油储罐进行恒压控制。在每种控制方法下,进行 10 次实验,每次实验都记录储罐内部压力随时间的变化情况;

3) 在每次实验过程中,记录压力传感器输出的压力数据。根据设定的恒定压力值,计算每次实验中实际压力值与设定压力值的偏差情况。用正确样本除以总样本数获取控制精确率,测试结果如表 2 所示。

表 2 不同方法的控制精度对比

实验次数	所提方法	滑模跟踪控制方法	干扰观测器控制方法
1	0.95	0.92	0.90
2	0.97	0.88	0.82
3	0.98	0.91	0.86
4	0.97	0.86	0.84
5	0.95	0.92	0.87
6	0.96	0.93	0.91
7	0.98	0.84	0.87
8	0.97	0.85	0.82
9	0.93	0.92	0.84
10	0.96	0.95	0.86

从表格中可以看出,在 10 次实验中,所提方法相比于文献方法而言,在 10 次实验中的 F_1 值普遍较高,平均值在 0.96 左右,且波动范围较小,表明其控制精度和稳定性相对较低。较高的控制精度说明所提方法能够较为准确地控制储罐压力接近设定值,并且在多次实验中都能保持较好的一致性,这得益于所提方法通过设计模糊 PID 控制器并引入磷虾群算法优化其参数,实现了对海上加油储罐系统的有效恒压控制,能够应对复杂海况下的各种干扰,提高系统的稳态精度。

4 结束语

自动恒压控制技术作为现代工业自动化的重要组成部分,其在海上加油储罐中的应用,不仅提升了储罐的运行效率,更在保障海上作业安全、减少环境污染等方面发挥了关键作用。针对目前控制方法存在的问题,提出海上加油储罐自动恒压模糊控制方法,该方法根据加

油储罐系统的运行特性,设计模糊 PID 控制器,通过优化控制器增益参数,提高恒压控制精度。

参考文献:

[1] 张 明,周德红,刘 洋. 基于 CFD 的 LNG 储罐瞬态大风环境数值模拟研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20 (1): 121-126.

[2] 卜宪标,陈 昕,李华山,等. 面向海上风电的水下压缩空气储能性能分析及提效技术 [J]. 电力建设, 2024, 45 (8): 106-117.

[3] 魏 琼,周 刚,胡新宇. 电液伺服系统力轨迹反馈线性化滑模跟踪控制研究 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2023, 42 (2): 108-113.

[4] ZHU X, ZHANG B, RAO J. Optimal control strategy of electro-hydraulic position servo system using genetic algorithm [J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2024, 17 (1): 23-35.

[5] 张 兵,饶俊森,汤少东,等. 基于干扰观测器的液压位置伺服系统级联控制 [J]. 液压与气动, 2023, 47 (3): 51-59.

[6] JIA C, YU T, SONG Z J. Robust reinforcement learning with augmented state for leveling control of multi-cylinder hydraulic system [J]. The Journal of Supercomputing, 2025, 81 (1): 1-22.

[7] 李彦红,包广清,谢 平,等. 混合永磁记忆电机全速域分段调速方法 [J]. 兰州理工大学学报, 2023, 49 (3): 75-82.

[8] 张剑涛. 基于频繁项集的三相异步电动机调压节能自寻优控制技术 [J]. 微特电机, 2024, 52 (11): 51-55.

[9] 李建市,潘世举,娄静涛,等. 模糊 PID 变结构自适应算法在无人车转向电机矢量控制中的应用 [J]. 电机与控制学报, 2024, 28 (7): 152-159.

[10] 史琼艳,杨风波,张江华. 双缸液压驱动系统灰色预测模糊 PID 控制研究 [J]. 中国工程机械学报, 2024, 22 (5): 572-576.

[11] 吴文进,吴 晶,郭海婷,等. 基于变论域模糊 PID 算法的锂电池组级联式均衡控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38 (8): 137-144.

[12] 陆 鹏,付 华,卢万杰. 基于深度确定性策略梯度与模糊 PID 的直流微电网 VRB 储能系统就地功率控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51 (18): 94-105.

[13] 王 娜,孟庆辉,魏宏飞. 采摘机器人机械手避障方法研究——基于遗传优化和模糊 PID 控制器 [J]. 农机化研究, 2024, 46 (4): 203-206.

[14] 李腾辉,周德强,何冯光,等. 基于遗传算法优化模糊 PID 的甘蔗收获机切割器控制系统 [J]. 华中农业大学学报, 2023, 42 (2): 243-250.

[15] 吴 杰,张 辉. 遗传算法优化的双线圈磁流变制动器模糊 PID 控制 [J]. 汽车工程, 2024, 46 (3): 526-535.

[16] 张 楠,凌 菁,吴 庭,等. 变论域优化模糊 PID 控制器参数的温度控制 [J]. 计算机仿真, 2024, 41 (7): 376-382.