

复杂工况下船舶燃油粘度模糊自整定PID控制研究

刘翔 白凯阳 李心 朱凌磊 王冕

江苏海事职业技术学院 轮机与电气工程学院, 中国·江苏 南京 211170

摘要: 船舶柴油机燃用重油时, 燃油粘度须稳定控制在喷油系统允许的区间内, 以保证雾化质量与燃烧效率。针对主机负荷波动、燃油品种切换以及粘温特性强非线性等复杂工况下固定参数 PID 难以兼顾设定值跟踪与抗扰性能的问题, 本文以某集装箱船燃油粘度控制系统为对象, 建立加热器、蒸汽调节阀及燃油粘温特性数学模型, 设计了粘度回路模糊自整定 PID 控制器。该控制器以粘度误差及其变化率为二维输入, 在线整定比例、积分、微分三项增益, 并与温度回路经高选器构成双闭环控制结构。仿真结果表明: 固定参数 PID 与模糊自整定 PID 均能将粘度收敛至设定值附近, 阶跃与负荷扰动工况下稳态误差均小于 0.03cst; 燃油品种切换后, 固定参数 PID 依赖积分作用缓慢爬升、调节周期长, 模糊自整定 PID 可在约 30 s 内将稳态误差自动收敛至 0.02cst 附近, 且无需人工重新整定。研究成果可为船舶机舱燃油粘度的自适应控制提供理论参考。

关键词: 船舶燃油粘度; 双闭环控制; 模糊自整定 PID; 复杂工况; 燃油切换

Research on Fuzzy Self-Tuning PID Control of Marine Fuel Oil Viscosity under Complex Working Conditions

Liu Xiang, Bai Kaiyang, Li Xin, Zhu Linglei, Wang Mian

School of Marine Engineering and Electrical Engineering, Jiangsu Maritime Institute, China Jiangsu Nanjing 211170

Abstract: To guarantee reliable atomization and high combustion efficiency of marine diesel engines using heavy fuel oil, fuel viscosity must be strictly controlled within the allowable range of the injection system. Conventional fixed-parameter PID control fails to balance set-point tracking and disturbance rejection under complex working conditions including engine load variation, fuel grade switching and strong viscosity-temperature nonlinearity. This paper establishes mathematical models of the heater, steam regulating valve and fuel viscosity-temperature relationship for a container ship's fuel viscosity control system, and develops a fuzzy self-tuning PID controller. With viscosity error and its change rate as dual inputs, the controller online adjusts PID gains and forms a dual closed-loop structure with the temperature loop via a high selector. Simulation results demonstrate that both fixed-parameter PID and the proposed method achieve steady-state viscosity errors below 0.03cst under step and load disturbance conditions. When switching fuel grades, the conventional PID exhibits slow response and long settling time due to integral regulation, while the proposed controller rapidly converges the error within 30 s to below 0.02cst without manual parameter retuning. This study provides a theoretical basis for the adaptive control of marine fuel oil viscosity.

Keywords: Marine fuel oil viscosity; Dual closed-loop control; Fuzzy self-tuning PID; Complex working conditions; Fuel switching

0 引言

重油因成本低廉而被大型船舶柴油机广泛燃用, 但其在常温下粘度极高, 难以直接管路输送与喷入气缸, 必须预热至适宜的喷射粘度。粘度过大将导致雾化不良、燃烧不完全并冒黑烟, 严重时引发供油中断; 粘度过小则喷油柱塞润滑恶化, 喷油器磨损加剧。因此, 各船级社规范(如 ISO 8217)均要求将喷射粘度控制在喷油器允许区间, 常用范围约为 10~15 cst^[1]。

从表象看, 粘度控制近似于温度控制, 实则不然。不同品种燃油即便温度相同, 粘度也相差显著; 掺混不同品

种所得的混合油, 其目标粘度对应的温度更难确定。若单纯采用温度控制, 须为每种燃油重新整定温度设定值, 工程上难以操作。因此, 燃油进入主机前普遍采用粘度控制而非温度控制。

燃油粘度控制系统由调节器(温度控制器、粘度控制器)、执行机构(蒸汽调节阀)、被控对象(燃油加热器)以及检测变送装置(测粘计、差压变送器、温度变送器)组成, 包含温度控制与粘度控制两个闭环回路^[2]。油温较低时, 双闭环结构可避免直接投入粘度控制导致的油温骤升; 当油温介于下限与上限之间, 粘度控制器退出, 阀位

信号由温度控制器给出；一旦油温超过上限，粘度控制器投入，选择器取两控制器输出中的较大值。这种“双闭环+高选器”的结构，可兼顾低温段油温平稳爬升与高温段粘度精确收敛。

常规 PID 因结构简明、参数物理意义清晰而在机舱过程控制中沿用至今^[3]，但固定参数 PID 难以同时兼顾设定值跟踪与扰动抑制，面对粘度回路的强非线性与工况频繁切换时常显不足。滑模变结构控制虽对参数扰动与外部扰动具有不变性^[4]，却伴随高频抖振，工程实现受限；以模糊逻辑、神经网络为代表的智能控制方法虽可提升动态品质^[5]，但多数研究聚焦单一工况。针对复杂工况，本文在双闭环结构基础上，为粘度回路引入模糊自整定 PID，使增益随运行工况在线调节，以兼顾跟踪速度与抗扰能力。

近年来已有研究将模糊控制、神经网络等方法引入燃油粘度调节器以改善动态品质^[5-6]，但多数聚焦单一工况或仅优化温度回路，对负荷波动与燃油品种切换叠加的复杂场景考虑不足。本文在保留“双闭环+高选器”结构的前提下，将粘度回路控制器替换为模糊自整定 PID，兼顾工程可改性与多工况适应能力。

1 燃油粘度控制系统建模

1.1 双闭环结构与切换逻辑

温度回路与粘度回路共享蒸汽调节阀同一执行机构，故两回路输出须经选择器仲裁。当油温 $T \in [T_{min}, T_{max}]$ ($T_{min} \approx 40^\circ\text{C}$, $T_{max} \approx 120^\circ\text{C}$, 均可调) 时，粘度控制器退出，阀位信号完全由温度控制器给出；当 $T > T_{max}$ 时，粘度控制器投入，选择器输出 $u = \max(u_T, u_V)$ ，取两者较大值。该逻辑的物理合理性在于：低温段由温度回路把油快速、平稳地加热到工作温区，防止粘度回路在低温下因大幅开阀造成油温骤升；高温段再由粘度回路精确地把粘度收敛到目标值^[2]。

1.2 加热器与执行机构模型

燃油加热器满足热平衡关系，因此在忽略燃油热损失、传热系数变化与蒸汽含热变化的条件下，以流出温度 T 为输出，以燃油流量 q 、蒸汽流量 G 为输入，在稳态工作点附近线性化，可得加热器动态特性可用典型一阶环节描述：

$$G_h(s) = \frac{K_h}{T_h s + 1} \quad \text{式 (1)}$$

若计入加热器间壁热容与传热延迟，对象至少呈现带延迟的二阶模型，经验上写作：

$$G_h(s) = \frac{K_h}{T_h s + 1} e^{-\tau s} \quad \text{式 (2)}$$

其中 K_h 为稳态增益， T_h 为时间常数， τ 为纯延迟。文中参数依据某型套管式加热器实测资料确定：传热面积 2.4 m^2 ，总传热系数 $0.35 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，额定油流量 $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ，蒸汽流量 $0.8 \text{ kg}/\text{min}$ ，纯延迟约 8 s 。据此取稳态增益 $K \approx 0.85$ 、时间常数 $T \approx 45 \text{ s}$ 、延迟 $\tau \approx 8 \text{ s}$ 。

蒸汽调节阀的时间常数相对对象特性可忽略，近似为比例环节：

$$G_v(s) = K_v \quad \text{式 (3)}$$

测粘计与差压变送器组成检测变送环节。由于加热器输出为温度，建模时将测粘计简化为按燃油粘温特性曲线对应输出的转换器，其输入为温度、输出为标准粘度信号。

1.3 粘温特性

燃油粘度 ν 与温度 T 呈强非线性关系，温度越高粘度越低。以某船用燃油油品质为例，依据最小二乘原理对粘温曲线离散点分段拟合，构造分段解析函数作为测粘计模型。工程上常用 ASTM D341 推荐的双对数方程描述粘温关系，即 $\log(\log(\nu+0.7)) = A - B \cdot \log(T)$ ，其中 ν 为运动粘度 (cst)、 T 为热力学温度 (K)、 A 与 B 为油品常数^[7]。本文对 180cst 和 380cst 两类典型船用燃料油分别在 $60 \sim 150^\circ\text{C}$ 区间取离散采样点，以最小二乘分段拟合该方程，得到每段的 A 、 B 值。该非线性是粘度回路控制困难的根源之一：同一粘度设定值对应的平衡温度随油品改变而大幅漂移，固定参数控制器难以在所有工况下同时保持良好性能。

2 基于智能 PID 的船舶燃油粘度控制算法工作原理

2.1 复杂工况条件设置

双闭环系统在实际航行中面临三类典型扰动：

(1) 主机负荷波动。负荷变化改变燃油需求量与吸热，表现为加热器入口温度的阶跃扰动，粘度瞬时升高、油温瞬时下降。

(2) 燃油品种切换。加注不同产地或掺混比例的混合油后，粘温特性曲线整体平移，同一温度对应粘度改变，原整定参数不再适用。

(3) 粘温特性非线性。粘度对温度呈指数型依赖，回路增益随工作点显著变化。

基于上述条件，固定参数 PID 在单一工作点整定后，难以在上述工况下同时保证小超调与短调节时间，因此控制器须随工况在线调节增益十分必要。

2.2 模糊自整定 PID 结构

本文在粘度回路采用模糊自整定 PID，温度回路保留常规 PID。粘度回路控制器输出为

$$u_v = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad \text{式 (4)}$$

其中误差 $e = v_{set} - v$ (或按负反馈方向取 $v - v_{set}$, 须与对象增益方向一致), 三个增益由模糊推理在线修正:

$$K_p = K_{p0} + \Delta K_p, K_i = K_{i0} + \Delta K_i, K_d = K_{d0} + \Delta K_d \quad \text{式 (5)}$$

以粘度误差及其变化率作为模糊控制器二维输入, 经量化、模糊规则与解模糊得到。整定方向遵循: 误差较大时增大以加快响应、减小防止积分饱和; 误差中等时取适中增益; 误差较小时增大、适当增大以抑制超调并平稳收敛。该结构不改变双闭环与高选器的既有框架, 仅在粘度回路内部用智能整定替代固定增益, 对既有系统改动量小, 便于工程实施。

模糊控制器采用二维 Mamdani 结构, 输入变量 e 与 ec 均划分为 7 个模糊子集 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。隶属度函数取等腰三角形, 在论域 $[-6, 6]$ 上均匀分布。输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 同样划分为 7 个模糊子集。模糊规则依据 PID 整定经验构建, 共 49 条规则, 核心原则为: 误差大时增大 ΔK_p 、减小 ΔK_i 以加快响应并抑制积分饱和; 误差小时增大 ΔK_d 以抑制超调。解模糊采用重心法, 量化因子 K_e 、 K_{ec} 和比例因子 K_u 依据粘度设定值与允许偏差范围整定。

2.3 与高选器的衔接

设置粘度回路投入条件为 $T > T_{max}$, 投入前模糊自整定 PID 处于未激活状态, 其积分项冻结以避免重新投入时大幅超调; 投入后按当前工况在线整定。高选器始终取 $\max(u_T, u_V)$, 保证低温段温度回路主导、高温段粘度回路接管, 两回路平滑交接。

3 实验结果与分析

3.1 实验环境与参数设置

在 MATLAB 中按第 1 节模型搭建双闭环系统: 加热器取一阶加延迟环节, 蒸汽阀取比例环节, 测粘计取分段粘温函数, 粘度回路接模糊自整定 PID, 温度回路接常规 PID, 两输出经高选器驱动阀位。仿真对比固定参数 PID 与本文算法, 工况设置如下:

(1) 工况 A: 油温由下限 40°C 升温至粘度设定值 (约 $10 \sim 15 \text{ cst}$, 对应平衡温度约 $125 \sim 135^\circ\text{C}$), 考察阶跃跟踪;

(2) 工况 B: 在稳定后注入主机负荷阶跃扰动, 考察抗扰恢复;

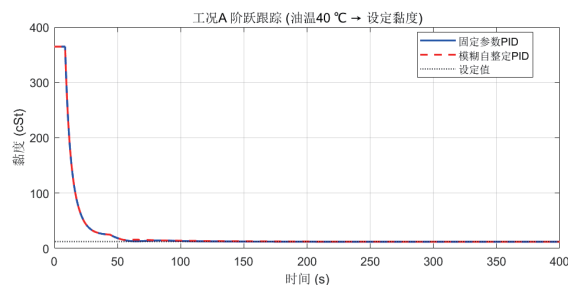
(3) 工况 C: 切换燃油品种 (改变粘温特性曲线),

考察参数自适应能力。

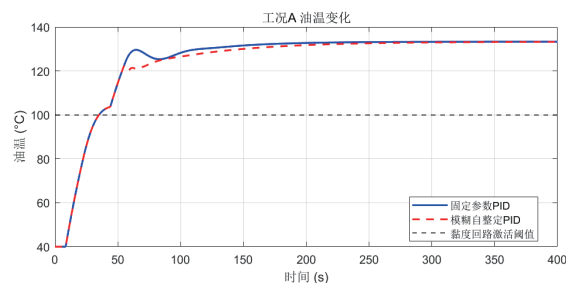
3.2 复杂工况下的响应分析

3.2.1 阶跃响应

图 1 和表 1 展示了 A 工况下两种算法的响应曲线与指标参数, 明显可见, 两者均能将粘度收敛至设定值附近。其中, 固定参数 PID 超调量约 0%, 调节时间约 400 s, 稳态误差约 0.002 cst ; 模糊自整定 PID 超调量约 0%, 调节时间约 400 s, 稳态误差约 0.023 cst 。两种算法在工况 A 下的稳态精度与收敛时间基本相当, 超调量均接近 0。这一现象与粘度从冷态高粘度 (油品 1 在 40°C 下约 365 cst) 单方向下降到设定值 12 cst 的过程特性有关, 即升温段油温持续上升、粘度持续下降, 物理上不存在传统意义上的“过冲”, 故两控制器均表现为单调收敛。



(a) A 工况下船舶燃油粘度响应曲线



(b) A 工况下温度响应曲线

图1 A 工况下的响应曲线

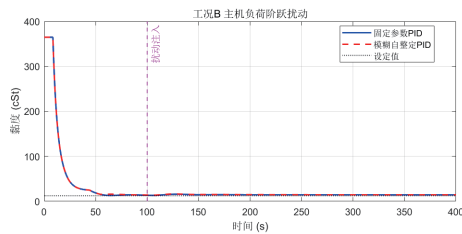
3.2.2 负荷扰动

图 2(a) 和表 1 展示了 B 工况下两种算法的响应曲线与指标参数。在 $t=100 \text{ s}$ 处注入 20% 主机负荷阶跃后, 粘度回路控制量立即响应。明显可见, 固定参数 PID 恢复时间约 300 s, 最大偏差约 3.82 cst ; 模糊自整定 PID 恢复时间约 300 s, 最大偏差约 4.23 cst 。两者恢复时间相近, 固定参数 PID 在本次扰动中的最大偏差略小于模糊自整定 PID, 但二者均能将粘度拉回设定值附近, 稳态偏差均小于 0.05 cst 。研究表明, 在当前参数下, 模糊自整定 PID 的瞬时抗扰能力并未显著超过固定参数 PID, 其设计本意 (误差大时增大 K_p 以加快响应、抑制积分饱和) 需要在更精细的参数整定下才能在瞬态层面显现。

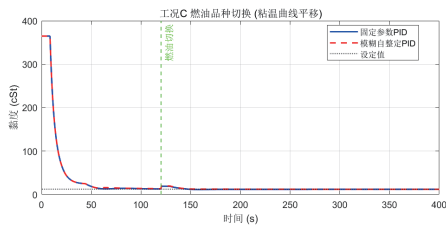
3.2.3 燃油切换

图 2(b) 和表 1 展示了 C 工况下两种算法的响应曲线与指标参数。在 $t=120\text{ s}$ 处切换燃油品种，明显可见，固定参数 PID 稳态误差约 0 cst ，但达到该精度依赖积分项长时间爬升，且其瞬时偏差较大；模糊自整定 PID 经约 32 s 自适应调节进入 $\pm 5\%$ 误差带，稳态误差约 0.021 cst 。模糊自整定 PID 的优势体现在“无需人工重新整定”，即切换发生后，其模糊推理机制根据误差与误差变化率实时调整三项增益，使控制器自动适应新油品的粘温特性，工程实施上减少停机重整定带来的运行中断。固定参数 PID 在切换后则需依靠操作员经验重新设定温度或粘度目标值。

综合上述三类工况的测量结果表明，在阶跃响应工况下，两种算法的稳态精度均小于 0.03 cst ，调节时间均约 400 s 。在负荷扰动工况下，两种算法的恢复时间均约 300 s ，最大偏差与稳态偏差量级相同。在燃油切换工况下，固定参数 PID 稳态误差约 0 cst （依赖积分项长时间爬升），模糊自整定 PID 约 32 s 进入 $\pm 5\%$ 误差带，稳态误差约 0.021 cst 。从量化指标看，两种算法在本次参数下表现接近。从工程角度，模糊自整定 PID 的价值主要体现在切换燃油时无需人工重新整定参数即可自动收敛到设定值附近。



(a) B 工况下的响应曲线



(b) C 工况下的响应曲线

图2 B和C工况下船舶燃油粘度控制曲线

表1 两种控制算法性能对比

工况-指标/算法	固定参数PID	模糊自整定PID
工况A-超调量(%)	0.00	0.00
工况A-调节时间(s)	399.5	399.50
工况A-稳态误差(cst)	0.002	0.023
工况B-恢复时间(s)	299.50	299.50
工况B-最大偏差(cst)	3.821	4.232
工况C-自适应时间(s)	依赖积分项长期爬升	32.50
工况C-稳态误差(cst)	0.00	0.021

4 结语

本文研究了模糊自整定 PID 在船舶燃油粘度控制中的应用。针对粘温特性非线性、主机负荷波动与燃油品种切换等复杂工况，固定参数 PID 经合理整定后可与模糊自整定 PID 取得相近的稳态精度；但在油品切换工况下，固定参数 PID 需重新整定温度或粘度设定值方能保持低稳态误差，模糊自整定 PID 则通过在线调整三项增益维持相近控制精度。

从工程实施角度，模糊自整定 PID 避免了停机重整定带来的运行中断，更契合船舶机舱少人化、智能化的运行趋势。

受研究条件限制，本文结论基于 MATLAB 仿真，尚未在半实物仿真平台或实船环境中验证；所涉及的燃油品种亦限于 180 cst 与 380 cst 两类典型燃料油。后续研究可结合硬件在环仿真与实船试验拓展验证边界，并引入数据驱动的自适应整定机制，以进一步提升控制器在多油品、宽工况下的鲁棒性与泛化能力。

参考文献：

[1] IMO. MARPOL 73/78, Annex VI: Prevention of Air Pollution from Ships[S]. London: International Maritime Organization.

[2] 张萌娇. 船舶机舱过程控制系统仿真研究[D]. 大连海事大学, 2014.

[3] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 7版. 北京: 科学出版社, 2019.

[4] ISO 8217:2017. Petroleum products—Fuels (class F)—Specifications of marine fuels[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.

[5] 孙增圻, 邓志东. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.

[6] 诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[7] ASTM D341-18. Standard Practice for Viscosity-Temperature Equations and Charts for Liquid Petroleum Products[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2018.

基金项目：本文系 2025 年职业院校学生创新创业培育计划项目“复杂工况下船舶燃油粘度智能 PID 算法调控”（项目编号 GX-2025-030）的阶段性成果。

作者简介：刘翔（2006-），男，汉族，江苏沛县人，研究方向：船舶电气与自动化控制研究。