

基于 ASimth 预估器的时滞系统复合 非线性修饰鲁棒控制

马道成, 张显库*, 苗泽旭

(大连海事大学 航海学院, 辽宁大连 116026)

摘要: [目的]为有效抑制液化天然气(LNG)船液舱绝缘层压差控制这一不稳定时滞系统超调的问题, [方法]将自适应 Smith(ASimth)预估器引入LNG船液舱绝缘层压差控制系统, 并改进闭环增益成形算法, 以补偿模型中存在的时滞问题。在此基础上, 设计一种复合非线性函数, 结合非线性反馈与非线性修饰技术, 提升系统控制性能。同时, 针对传感器信号反接故障, 设计冗余正反馈鲁棒控制器。[结果]仿真结果表明, 该方法在不稳定时滞系统控制过程中表现出色, 有效抑制了系统超调现象, 显著提高了系统的鲁棒性能。[结论]该控制策略为LNG船液舱绝缘层压差控制这一不稳定时滞系统提供了一种有效且可行的解决方案, 为LNG在水路运输中的安全储运提供了有益参考。

关键词: 时滞系统; ASimth 预估器; 鲁棒控制; 复合非线性修饰

中图分类号: U675.73 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2025.11.12

Robust Control with Composite Nonlinear Modification for Time-Delay Systems Based on ASimth Predictor

MA Daocheng, ZHANG Xianku*, MIAO Zexu

(Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: [Purpose] To address the issue that conventional algorithms cannot effectively suppress the overshoot in the unstable time-delay system for the control of the insulation layer pressure difference in liquefied natural gas (LNG) ship tanks. [Method] An adaptive Smith (ASimth) predictor is introduced into the pressure difference control system of the insulation layer in LNG ship tanks and improves the closed-loop gain shaping algorithm to compensate for the time-delay problem in the model. On this basis, a composite nonlinear function is designed, which integrates nonlinear feedback and nonlinear modification techniques, improve the control performance of the system. Meanwhile, a redundant positive feedback robust controller is designed to handle the scenario of sensor signal reverse connection faults. [Result] Simulation results show that this method performs excellently in controlling unstable time-delay systems, effectively suppressing system overshoot and significantly improving system robustness. [Conclusion] This control strategy provides an effective and feasible solution for the control of the insulation layer pressure difference in LNG ship tanks, addressing the unstable time-delay system, and offers valuable references for the safe storage and transportation of LNG in waterway transport.

Key words: time-delay system; Asmith predictor; robust control; composite nonlinear modification

收稿日期: 2025-03-21; 修回日期: 2025-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679024); 国家自然科学基金资助项目(52571396); 大连市重点领域创新团队支持计划资助项目(2020RT08)。

作者简介: 马道成(1999—), 男, 博士研究生。研究方向: 船舶运动控制。

通信作者: 张显库(1968—), 男, 博士、教授、博士生导师。研究方向: 船舶运动简捷鲁棒控制。

E-mail: zhangxk@dlmu.edu.cn。

0 引言

液化天然气 (Liquefied Natural Gas, LNG) 作为一种高效低碳的清洁能源, 其广泛应用符合当下节能减排、绿色环保的时代主题, 正逐步成为推动我国低碳能源转型的重要力量^[1]。为了满足世界各国日益增长的LNG使用需求, LNG船应运而生。LNG船作为一种关键的能源运输工具, 以其卓越的运输效率和显著的环保特性备受瞩目。但由于LNG的高度易燃、易爆性质与其超低温的运输要求, 因此保障LNG船的运输安全成为各航运大国的重要研究方向。其中, LNG船液货舱主、次绝缘层(见图1)压差的精确控制是保障其安全运输的方式之一, 其核心任务是在LNG船储运与装卸货过程中, 通过调节主、次绝缘层内的氮气压力, 维持液货舱形状完整, 从而避免绝缘层受到过大的应力或变形, 影响绝缘效果和结构安全。然而在恶劣海况下的运输与装卸过程中, 绝缘层会受到温度、压力、船体姿态与传感器、控制器延迟等多重因素的影响, 导致其压差控制系统不稳定, 即绝缘层内外压差过大或过小, 过大的压差可能导致绝缘材料破裂, 而过小的压差则可能减弱绝缘效果, 恰当的压差控制对于维护绝缘层的稳定性至关重要。因此, 对LNG船液货舱绝缘层压差控制技术开展深入研究, 可确保绝缘层内外的压差平衡, 从而保障LNG船的正常工作状态, 降低出现事故的风险, 有效减少气体泄漏、火灾和爆炸等事故的发生概率, 从而保障船员和船舶的安全。由此可见, 在LNG船运输过程中, 实现对液货舱绝缘层压差的有效控制具有重要意义。

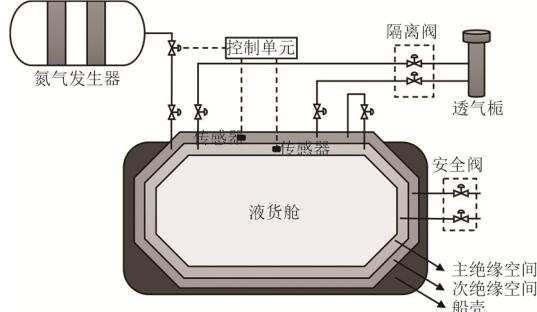


图1 液舱绝缘层结构示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the Insulation Layer
Structure of Liquid Tank

近年来, 较多专家针对LNG船液货舱绝缘层压差的稳定控制开展了深入研究。陈海键^[2]结合镜像映射原理基于4阶闭环增益成形算法设计鲁棒控制器, 获得了良好的控制效果。杨光平^[3]同样采用镜像映射技术处理绝缘层压差模型中的不稳定极点, 并采用1阶闭环增益成形算法求解控制器从而简化控制器设计, 同样取得较好控制效果。曹晶华^[4]则首次引入了非线性反馈技术, 用以处理绝缘层压差

系统中的干扰问题。以上3位学者对于时滞的处理, 均采用Pade近似处理, 但该处理方法会提高被控系统的阶数, 同时可能引入逼近误差。SU等^[5]则采用了Smith预估器对模型中的时滞项进行补偿, 从而解决时滞带来的系统不稳定问题, 但在实际生产中, 模型的延迟时间通常是未知的或时变的, 对于绝缘层压差控制系统而言, 10^{-1} 量级的延迟时间变化就有可能导致系统的发散。因此, 本文引入ASmith预估器, 采用自适应律对Smith补偿中时滞环节的延迟时间进行估计, 实现时滞的自适应补偿。朱其新等^[6]提出了一种基于全参数ASmith预估补偿的永磁同步电机滑模前馈控制方法, 通过自适应估计延迟时间和模型参数, 结合位置输出超前预测和扰动抑制, 提升了控制系统的鲁棒性和抗干扰能力。寇发荣等^[7]提出了一种ASmith反馈时滞控制策略, 用于电动静液压主动悬架系统, 通过遗传算法优化时滞反馈系数, 实现时滞补偿, 显著改善了悬架的动态特性和抗时滞能力。郑仰东^[8]提出了一种基于李雅普诺夫稳定性理论的自适应控制方法, 用于改善Smith预估器参数失配时的控制性能, 解决了传统Smith预估器模型不匹配导致的控制特性劣化问题, 显著提高了时滞系统的稳定性和控制效果。BAI等^[9]提出了一种基于ASmith预估器的自调节比例-积分 (Proportional-Integral, PI) 控制方法, 并将其应用于房间空调系统的测试。该方法通过将递归最小二乘算法与Z域拟合方法结合, 在线估计了空调过程的参数, 包括时滞, 进而利用Smith预估器减小时滞带来的不利影响。自调节PI控制器采用时间乘绝对误差积分 (Integrated Time and Absolute Error, ITAE) 调节规则, 计算控制信号。试验结果表明, 该方法在设定点变化、参数变化或负载扰动等情况下, 较传统自适应PI控制器具有更好的性能、鲁棒性和有效性。FELIU-BATLLE等^[10]提出了一种ASmith预估器控制方法, 用于控制受负载扰动和时变时滞同时影响的工业液压过程。为了提高Smith预估器的性能, 提出在控制结构中引入自适应块, 以估计和更新时变时滞的当前值, 并加入扰动补偿器以抑制负载扰动的影响。仿真结果表明, 所提控制方法在抑制负载扰动和保持闭环稳定性方面优于传统Smith预估器。HONG等^[11]提出了一种综合加工过程模型, 并基于该模型开发了ASmith控制器, 用于调节切削力或扭矩, 优化进给速率。该控制器结合在线参数估计和Smith预估器, 有效应对不同切削深度下的动态变化和控制信号的通信时滞问题。试验验证表明, 与传统的PI控制器或Smith预估器相比, ASmith控制器能够在减少振荡的同时调整进给速率, 缩短加工时间10.5%。

基于以上分析, 本文采用ASmith预估器与镜像

映射原理，对LNG船液舱绝缘层压差模型中的不稳定项进行处理，通过改进的2阶闭环增益成形算法设计控制器，并采用复合非线性反馈和复合非线性修饰算法，对误差和控制器输出进行修饰，从而获得更好的控制效果。本文创新点主要有2点：1) 首次将ASmith预估器引入LNG船液舱绝缘层压差控制中，用以解决模型中的时滞问题；2) 针对时滞系统控制，本文融合ASmith预估器与闭环增益成形算法，通过时滞项嵌入补偿算法，并设计复合非线性函数协同调控误差与输出，实现算法与时滞特性深度适配，有效提升系统动态与稳态性能。

1 模型准备

1.1 液舱绝缘层压差模型

LNG船液舱绝缘层压力差对流量率的传递函数模型^[12]为

$$G_0(s) = \frac{P_e(s)}{u(s)} = \frac{K_0}{s(s-T_0)} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中： P_e 为主、次绝缘层压力差； u 为控制阀流量率； K_0 为模型比例系数； T_0 为模型时间常数； τ 为延迟时间； s 为拉普拉斯算子。

由式(1)可见，该模型不稳定的主要原因是其包含一个不稳定极点 $s=T_0$ 与时滞环节 $e^{-\tau s}$ 。

针对模型中位于右半平面的不稳定极点 $s=T_0$ ，采用镜像映射技术，找到该不稳定极点关于虚轴的对称点并进行置换。由于不稳定系统与其镜像映射过程具有相同的幅频特性曲线，因此设计适当的控制器参数即可实现原不稳定系统的有效镇定，并具有相同的鲁棒稳定性。定义模型中时滞环节外的部分为 G_m ，其镜像映射过程 G_{mp} 为

$$G_{mp} = \frac{K_0}{s(s+T_0)} \quad (2)$$

可得系统闭环传递函数为

$$H(s) = \frac{CG_{mp} e^{-\tau s}}{1 + CG_{mp} e^{-\tau s}} \quad (3)$$

式中： C 为假设的控制器，将在下文中进行设计。

由式(3)可知，闭环传递函数分母中含有时滞项，导致其含有无穷多个极点，从而造成系统整体不稳定，并为控制器的设计工作带来挑战。

1.2 基于Smith预估器的模型时滞补偿

为了解决时滞问题引起的不稳定项，引入Smith预估器对模型进行时滞项补偿，在理想状态下预估器同实际模型延迟时间相等即 $\hat{\tau}^*=\tau$ 。Smith预估器补偿后系统闭环传递函数为

$$\begin{aligned} H_0(s) &= \frac{CG_{mp} e^{-\tau s}}{1 + CG_{mp} e^{-\tau s} + CG_{mp} (1 - e^{-\tau^* s})} \\ &= \frac{CG_{mp}}{1 + CG_{mp}} e^{-\tau s} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可见，式(3)分母中的时滞项被补偿抵消，原来的传递函数变为一个闭环传递函数与时滞项的串联。实际生产中滞后时间通常是未知的，对常规控制算法的鲁棒性产生极大考验。为解决这一问题，采用参数自适应应用以估计Smith预估器中延迟时间 $\hat{\tau}^*$ 。ASmith预估器示意图见图2。

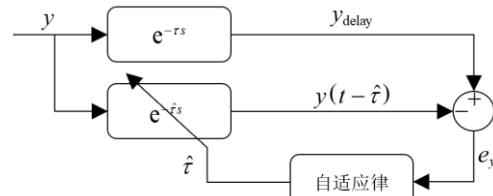


图2 ASmith预估器示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of the Adaptive Smith Predictor

$$\text{定义实际输出 } y_{\text{delay}} \text{ 与观测输出 } y(t - \hat{\tau}) \text{ 误差为} \\ e_y = y_{\text{delay}} - y(t - \hat{\tau}) \quad (5)$$

其导数为

$$\dot{e}_y = \dot{y}_{\text{delay}} - \frac{d y(t - \hat{\tau})}{dt} = \dot{y}_{\text{delay}} - \frac{d y(t - \hat{\tau})}{d(t - \hat{\tau})} (1 - \dot{\hat{\tau}}) \quad (6)$$

取Lyapunov函数 V 及其导数为

$$\begin{cases} V = \frac{1}{2} e_y^2 \geq 0 \\ \dot{V} = e_y \dot{e}_y = -k_y e_y^2 \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中： k_y 为ASmith预估器自适应律参数。

由式(6)与式(7)可估计延迟时间自适应律：

$$\dot{\hat{\tau}} = \frac{d(t - \hat{\tau})}{d y(t - \hat{\tau})} \left[\frac{d y(t - \hat{\tau})}{d(t - \hat{\tau})} - \dot{y}_{\text{delay}} - k_y e_y \right] \quad (8)$$

2 控制器设计

2.1 改进闭环增益成形

闭环增益成形算法是通过构造期望的补灵敏度函数 T (闭环传递函数)，反推灵敏度函数 S 从而得到控制器。在常规的闭环增益成形算法中，一般是取系统闭环传递函数频谱关门斜率为-20 dB/dec、-40 dB/dec与-60 dB/dec时的带宽频率，近似的设补灵敏度函数 T 为1阶、2阶和3阶惯性环节^[13-14]。但对于类似式(4)的输出时滞系统，若仅将其设为惯性系统，将显增加控制器的求解难度，因此可将Smith预估器补偿后的期望补灵敏度函数 T 设为惯性环节加时滞的形式。

$$T = \frac{1}{(T_1 s + 1)^i} e^{-\tau s}, i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

式中: T_1 为时间常数; i 的取值对应系统闭环传递函数频谱的关门斜率。

为获得更好的控制效果, 采用2阶闭环增益成形算法, 即取关门斜率为-40 dB/dec, $i=2$ 时的补灵敏度函数, 令式(4)与式(9)相等可消去时滞环节对求解控制器的影响, 并解得控制输出与误差的传递函数即控制器 C 。

$$C = \frac{1}{G_{mp} T_1 s (T_1 s + 1)} \quad (10)$$

2.2 复合非线性反馈与复合非线性修饰

为了获得更好的输出性能, 通过引入误差驱动的复合非线性函数对误差进行修饰。非线性反馈函数修饰后的误差为

$$e_F = \tan\left(\frac{\alpha e_0}{\beta e^{\gamma|e_0|} + \varepsilon}\right) \quad (11)$$

式中: e_0 为初始误差; α 、 β 、 γ 和 ε 均为非线性修饰参数。

控制器输出可表示为

$$u_F = \tan\left(\frac{\alpha e_0}{\beta e^{\gamma|e_0|} + \varepsilon}\right) \frac{1}{G_{mp} T_1 s (T_1 s + 1)} \quad (12)$$

而非线性修饰后的控制器输出为

$$u_M = \tan\left(\frac{\alpha u_0}{\beta e^{\gamma|u_0|} + \varepsilon}\right) = \tan\left[\frac{\frac{\alpha e_M}{G_{mp} T_1 s (T_1 s + 1)}}{\beta e^{\gamma\left|\frac{e_M}{G_{mp} T_1 s (T_1 s + 1)}\right|} + \varepsilon}\right] \quad (13)$$

2.3 传感器信号反接故障情况下控制器分析

在实际生产过程中, 传感器故障导致测量信号反接, 或调试设备参数使系统出现副作用等情况均可能发生。在对于控制器系统中, 当传感器的测量信号由正变负和系统出现副作用时, 可以在原理上等效为系统的模型变负。为补偿这种变化, 维持系统的可控性, 需相应地将控制器变负, 即设计具有冗余架构的正反馈控制器。当测量信号突然由正变负, 初始时刻的实际输出值 y 不会产生变化, 但是反馈回路中的信号变负, 系统闭环传递函数变为

$$H_{0-}(s) = \frac{CG_{mp}}{1 - CG_{mp}} e^{-\tau s} \quad (14)$$

为了补偿系统的变化, 抵消量测信号变负的影响, 需设计冗余正反馈鲁棒控制器, 即将原有控制器由正作用切换至负作用, 可得新的系统闭环传递函数为

$$H_-(s) = \frac{(-C)G_{mp}}{1 - (-C)G_{mp}} e^{-\tau s} \quad (15)$$

此时系统与原系统(3)相比整体上相差一个负号, 为使两式等价则应对应调节期望输出即 y_d , 因为 $H_0(s) = H_-(s) = -y/y_d$, 要想仍然保持系统在0.2 kPa 处稳定, 就应在信号变负之后对应调节期望输出 $y_d = -2$ kPa。

3 稳定性分析

对于复合非线性反馈对系统稳定性的影响进行分析:

$$\begin{aligned} y(\infty) &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\tan\left(\frac{\alpha e_0}{\beta e^{\gamma|e_0|} + \varepsilon}\right) CG_{mp}}{1 + \tan\left(\frac{\alpha e_0}{\beta e^{\gamma|e_0|} + \varepsilon}\right) CG_{mp}} e^{-\tau s} y_d \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\alpha}{(\beta + \varepsilon) T_1 s (T_1 s + 1) + \alpha} e^{-\tau s} y_d = y_d \end{aligned} \quad (16)$$

由式(16)可知, 系统最终收敛至设定压差, 稳态误差为0, 所设计的复合非线性反馈算法对系统的稳态不产生附加影响。

4 仿真实验

为验证本文算法的有效性, 通过MATLAB开展仿真实验, 试验中模型与控制器各项参数见表1。

表 1 模型与控制器参数表

Tab. 1 Model and Controller Parameters

参数符号	参数值	参数符号	参数值
K_0	3.25	α	0.20
T_0	0.78	β	0.08
k_y	500.00	γ	0.80
T_1	0.16	ε	0

在实际生产活动中, 当LNG船在大风浪中摇晃剧烈时, 可能导致补充的氮气向船头聚集, 使得排气控制阀因超过设定压力而开启, 但绝缘层内的氮气未得到补充。进排气控制阀设定压力的差异可能导致进气控制阀也开启, 导致大量氮气直接从排气控制阀排出, 最终导致LNG船液货舱绝缘层压差突然增大或减小。

为模拟并解决上述问题, 试验在 $t=20$ s时, 给定 $d=-0.05$ kPa 的负载突变, 假定延迟时间为 $\tau=0.15$ s, 并在另一试验中加入白噪声干扰来模拟风浪中的压差波动。在 $t=0$ s时, 给定阶跃参考信号 $y_d(t)=2$ kPa。由图3可知, 在未经ASmith预估器补偿的情况下, 系统在初始时间的超调量较大, 调节时间较长。经过ASmith预估器补偿后, 系统超调量显著减小, 调节时间也相应缩短。同时, 在复合非线性反馈和ASmith预估器补偿的共同作用下, 系统超调量显著降低, 调节时间也大幅缩短, 在负载干扰的情况下也能尽快回归期望值。在复合非线性修饰和ASmith

预估器补偿的作用下,系统虽然无超调,且面对负载干扰情况下调节效果最好,但调节时间相对复合非线性反馈较长。由图4~图6可知,估计延迟时间可与实际系统的延迟时间保持良好同步,在系统延迟时间未知的情况下能较好地发挥ASmith预估器对时滞项的补偿效果。为模拟2.3节中传感器信号反接故障的情况,试验在 $t=50$ s时,将反馈回路中信号由正变负,在表现形式上与向系统加入 $d=-0.4$ kPa的负载突变类似。由图7可知,在面对信号反接故障的情况下,复合非线性反馈与ASmith预估器的组合仍能有效抑制超调且调节时间较其他组合更短。各算法组合量化指标结果见表2。

由图8和图9可知,在未经ASmith预估器补偿的情况下,非线性反馈技术能提高系统容忍时滞的能力,将系统能抵抗的延迟时间由0.24 s提升至0.36 s。虽然系统仍然稳定,但对于LNG船液舱绝缘层而言,压差为负意味着次绝缘层压力大于主绝缘层压力,将会对绝缘层产生显著影响。且过大的压差可能导致绝缘材料破裂,过小的压差则可能减弱绝缘效果。在ASmith预估器的补偿作用下,时滞对系统稳定性造成的影响得到有效控制。

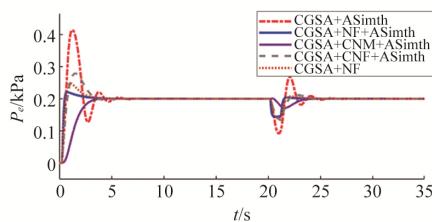


图3 0.15 s 延迟下的系统输出曲线

Fig. 3 System Output Curve with a Delay Time of 0.15 s

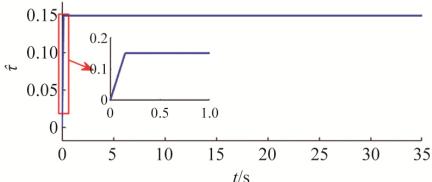


图4 0.15 s 延迟下的延迟时间估计变化曲线

Fig. 4 Delay Time Estimation Variation Curve with a Delay Time of 0.15 s

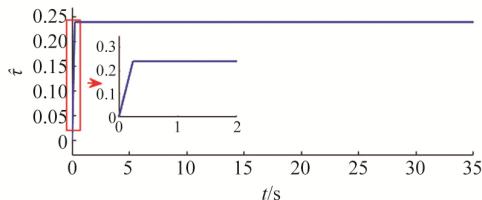


图5 0.24 s 延迟下的延迟时间估计变化曲线

Fig. 5 Delay Time Estimation Variation Curve with a Delay Time of 0.24 s

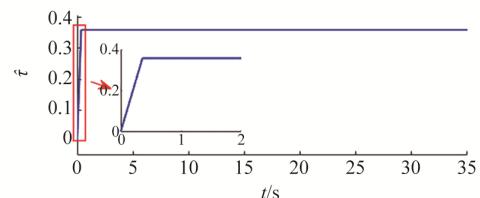


图6 0.36 s 延迟下的延迟时间估计变化曲线

Fig. 6 Delay Time Estimation Variation Curve with a Delay Time of 0.36 s

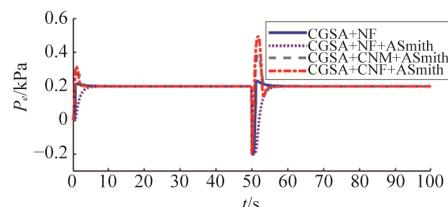


图7 传感器信号反接故障情况下系统输出曲线

Fig. 7 System Output Curve Under Sensor Signal Reversal Fault

表2 算法量化指标表

Tab. 2 Quantitative Metrics of Algorithm

算法组合	超调量 $M_p/\%$	调节时间 t_s/s	综合评价 指标 J
CGSA+ ASmith	24	2.559	4.959
CGSA+NF+A Smith	39	3.025	6.925
CGSA+CNM+ ASmith	0	3.695	3.695
CGSA+CNF+ ASmith	12	1.615	2.775
CGSA+NF	80	1.983	9.933

注: CGSA 为闭环增益成型算法, NF 为非线性反馈算法, CNM 为复合非线性修饰算法; CNF 为复合非线性反馈算法。综合评价指标 $J = \sigma_1 M_p + \sigma_2 t_s$, 其中 $\sigma_1 = 10$, $\sigma_2 = 1$ 。

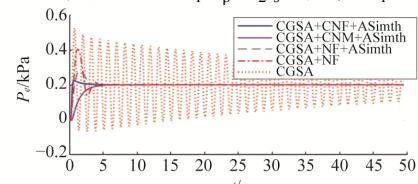


图8 0.24 s 延迟下的系统输出曲线

Fig. 8 System Output Curve with a Delay Time of 0.24 s

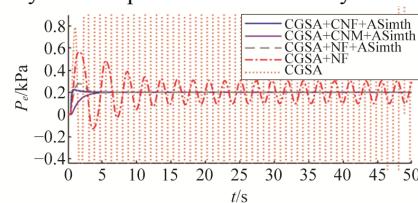


图9 0.36 s 延迟下的系统输出曲线

Fig. 9 System Output Curve with a Delay Time of 0.36 s

5 结论

针对LNG船液舱绝缘层压差控制系统中的时滞不稳定问题, 本文提出了一种基于ASmith预估器与复合非线性修饰的鲁棒控制策略。通过引入ASmith预估器, 实现对时变时滞的自适应补偿, 并结合镜像映射技术处理模型中的不稳定极点, 有效抑制了系统超调。进一步地, 通过改进闭环增益成形算法并设计复合非线性反馈与修饰函数, 增强了系统在传感器信号反接故障及负载扰动等情况下的鲁棒性。仿真结果表明, 本文方法在时滞补偿、超调抑制及动态响应方面表现优异, 调节时间缩短至1.615 s, 超调量降低至12%, 且能适应0.36 s的时滞变化。该策略为LNG船液舱压差控制提供了高可靠性的解决方案, 显著提升了绝缘层在运输过程中的稳定性与安全性, 对降低气体泄漏与事故风险发生率具有重要工程意义。未来研究可进一步优化自适应律参数及非线性函数设计, 以提升复杂海况下的实时控制性能。

参考文献:

- [1] 黎园. 我国天然气化工产业发展现状及前景分析[J]. 低碳化学与化工, 2024, 49(1): 105-112.
LI Y. Analysis of Current Development Status and Prospects of China's Natural Gas Chemical Industry[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2024, 49(1): 105-112.
- [2] 陈海键. 基于镜像映射的 LNG 船液舱压力系统鲁棒控制[D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2021.
CHEN H J. Robust Control of Tank Pressure System of LNG Ship Based on Mirror Image Mapping[D]. Dalian, Liaoning: Dalian Maritime University, 2021.
- [3] 杨光平. 液化天然气船液货装卸模拟器的改进[D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2018.
YANG G P. Improvement of Liquid Cargo Loading and Unloading Simulator for LNG Carrier[D]. Dalian, Liaoning: Dalian Maritime University, 2018.
- [4] 曹晶华. 液化天然气船液货操作模拟器关键技术研究[D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2019.
CAO J H. Research on Key Technologies of Liquid Cargo Operation Simulator for LNG Carrier[D]. Dalian, Liaoning: Dalian Maritime University, 2019.
- [5] SU Z J, ZHANG X K, HAN X. Multitechnique Concise Robust Control for the Insulation Containment Space Pressure Control of LNG Carrier[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020(1): 5759067.
- [6] 朱其新, 王嘉祺, 朱永红. 基于全部参数自适应 Smith 预估补偿的永磁同步电机滑模前馈控制及扰动抑制[J]. 兵工学报, 2024, 45(2): 417-428.
- [7] 寇发荣, 张海亮, 许家楠, 等. 电动静液压主动悬架自适应 Smith 反馈时滞控制[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(5): 864-870.
KOU F R, ZHANG H L, XU J N, et al. Adaptive Smith Feedback Time Delay Control of Active Suspension with Electro Hydrostatic Actuator[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(5): 864-870.
- [8] 郑仰东. 采用 Smith 预估器模型的时滞系统自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(3): 416-424.
ZHENG Y D. Adaptive Control for Time-Delay Systems Adopting Smith Predictor Models[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(3): 416-424.
- [9] BAI J B, WANG S W, ZHANG X S. Development of an Adaptive Smith Predictor-Based Self-Tuning PI Controller for an HVAC System in a Test Room[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(12): 2244-2252.
- [10] FELIU-BATLLE V, SOTOMAYOR-MORIANO J, RIVAS-PEREZ R. Adaptive Smith Predictor Controller Design for Industrial Processes with Time Varying Time Delay[J]. IFAC-PapersOnLine, 2024, 58(27): 37-42.
- [11] HONG M Q, TSAI M S. Development of an Adaptive Smith Controller for Cutting Torque Control in a Milling Process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 131: 815-826.
- [12] 吴晓雪, 张国庆, 张卫东. 基于镜像映射原理的 LNG 液舱压力维持系统 H_∞ 优化控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(2): 501-506.
WU X X, ZHANG G Q, ZHANG W D. H_∞ Optimized Control for Pressure Maintenance System of LNG Tank via the Mirror-Mapping Technique[J]. Control and Decision, 2020, 35(2): 501-506.
- [13] 张显库, 贾欣乐. 闭环增益成形算法在船舶自动舵中的应用[J]. 中国航海, 1999, 22(2): 89-93.
ZHANG X K, JIA X L. Application of the Closed Loop Gain Shaping Algorithm to the Marine Autopilot[J]. Navigation of China, 1999, 22(2): 89-93.
- [14] 张显库, 贾欣乐. 闭环增益成形控制新算法及其应用 [J]. 电子学报, 1999, 27(11): 133-135.
ZHANG X K, JIA X L. New Control Algorithm on Closed Loop Gain Shaping and Its Application[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(11): 133-135.

ZHU Q X, WANG J Q, ZHU Y H. Sliding Mode Feedforward Control and Disturbance Suppression for PMSM Based on Full Parameters Adaptive Smith Predictor Compensation[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(2): 417-428.