

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.030

海水淡化装置串联容器液位自适应模糊 PID 控制方法

凌云杰¹, 黄志伟²

(1. 苏伊士环境科技(北京)有限公司, 北京 100026;

2. 黄河水利职业技术学院 机械工程学院, 河南 开封 475003)

摘要:传统海水淡化装置使用 Smith 设计预估控制器, 导致控制液位不拟合。提出自适应模糊 PID 的海水淡化装置串联容器液位控制方法。构建海水淡化装置串联容器液位控制模型, 通过能量守恒获取控制平衡, 生成控制传递函数; 引入自适应调整机制, 对原始控制结构优化。实验结果表明控制液位与预设液位拟合状态良好, 无突变极值。

关键词:海水淡化装置; 串联容器; 液位; 自适应; 模糊 PID 控制

中图分类号:TP273⁺.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0152-06

Adaptive Fuzzy PID Control Method for Liquid Level in Series-Connected Vessels of Seawater Desalination Units

Ling Yunjie¹, Huang Zhiwei²

(1. Suez environment technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100026, China;

2. College of Mechanical Engineering, Yellow River Conservancy Vocational and Technical University, Kaifeng 475003, China)

Abstract: Traditional seawater desalination devices use Smith predictive controllers, resulting in poor fit for liquid level control. To this end, an adaptive fuzzy PID method for the liquid level in series-connected vessels of seawater desalination units is proposed. A liquid level control model for the series-connected vessels of the seawater desalination unit is constructed, control balance is obtained through energy conservation, and a control transfer function is generated. Introduce adaptive adjustment mechanism to optimize the original control structure. An adaptive adjustment mechanism is introduced to optimize the original control structure. Experimental results show that the controlled liquid level fits well with the preset liquid level, with no abrupt extreme values.

Keywords: seawater desalination unit; series-connected vessels; liquid level; adaptive; fuzzy PID control

0 引言

海水淡化装置是由预处理系统、取水系统等组成, 可完成杀菌灭藻、混凝过滤等步骤, 去除不同类型的杂质, 在海岛、船舶等领域应用广泛。串联容器是海水淡化装置的重要组成部分^[1], 具有分段处理、控制压力温度、调整液位等功能。受上下游蒸发器状态变化的影响, 串联容器存在液位与流量控制干扰问题, 影响淡化进程。因此, 有必要对海水淡化装置串联容器液位控制进行研究。

近年来, 众多学者对此开展研究。卢靖等^[2]提出基于 Transformer 的液位控制方法, 结合控制参数序列完成液位预测, 降低控制约束。该方法控制时未考虑外部扰动, 模型易受多迭代负面作用影响, 应用效果不佳。步同杰等^[3]提出改进灰狼算法的液位控制方法, 引入自适应权重因子提

高控制效果, 获取液位控制函数。但未考虑外部扰动对液位的影响, 采用的控制函数易受线性收敛作用影响, 应用效果不佳。叶章林等^[4]提出带约束自适应 GPC 的液位控制方法, 针对液位控制过程存在的虚假液位时变约束问题进行调整, 构建双向输出数学模型进行蒸汽液位描述。但未对外部扰动对控制的影响进行考虑, 导致控制液位与实际液位偏差较大。王超锋等^[5]提出改进差分进化算法的液位控制方法, 结合种群分布状况完成自适应匹配, 进行控制搜索调整。未考虑外部扰动影响, 易受上升稳态变化影响, 液位控制效果不佳。

因此, 本文基于自适应模糊 PID 技术提出海水淡化装置串联容器液位控制方法, 确定进出料流量, 计算控制前馈量, 构建海水淡化装置串联容器液位控制模型, 获取海水淡化装置串联容器液位控制。

基金项目:2021 年河南省职业教育教学改革研究与实践项目 (2021SJGLX757)

第一作者简介:凌云杰 (1978—), 男, 安徽濉溪人, 工程师, 本科, 研究方向为水处理自动化, yun789jie@163.com。

1 海水淡化装置串联容器液位自适应控制设计

1.1 构建海水淡化装置串联容器液位控制模型

海水淡化装置包含多个蒸发器,每个蒸发器均可称为1效。在淡化中换热管内的蒸汽被冷凝,收集后得到淡水,海水主汇集至蒸发器底部排出,结构如图1所示。

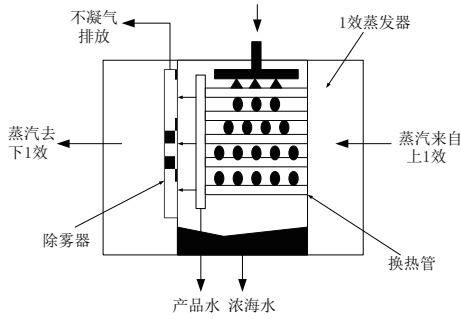


图1 海水淡化装置运行示意图

由图1可知,淡化装置的首尾连接状态对出料流量有重要影响^[6],按照液位高低波动状态构建海水淡化装置串联容器液位控制模型。在构建模型中,依据能量守恒关系获取控制平衡方程,如式(1)所示

$$S = Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

式中: S 表示平衡流量; Q_{in} 表示进入流量; Q_{out} 表示输出流量^[7]。通过调节进出口流量实现前馈控制,设置不同的操作变量,并计算控制前馈量 Q_R ,如下式

$$Q_R = \frac{as_n \sqrt{2h}}{S} \quad (2)$$

式中: a 表示原始水位; s_n 表示排水差量; h 表示控制系数。控制前馈量根据系统实际运行状态实时调整,以提前对液位变化进行补偿。考虑液位控制存在的蒸发加热关系,为完成海水加热需设置有效热源^[8],调整浓盐水出料流量。构建的海水淡化装置串联容器液位控制模型如图2所示。

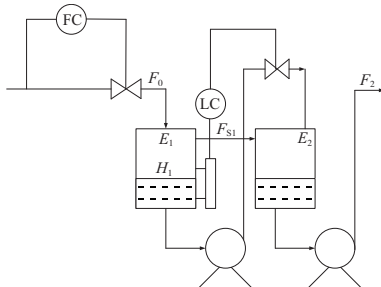


图2 海水淡化装置串联容器液位控制模型

由图2可知, F_0 表示进料海水, F_{s1} 表示加热水蒸气, E_1 表示1效蒸发器, E_2 表示2效蒸发器, H_1 表示浓盐水液位, F_2 表示出料流量^[9],结合上述方程生成控制传递函数 A ,其表达式如下

$$A = (F_{s1} - F_0) H_R Q_R \quad (3)$$

式中 H_R 表示蒸发器底面积。

1.2 设计串联容器液位自适应模糊PID控制器

完成海水淡化装置串联容器液位控制模型构建,使淡化系统的液位稳定在预定范围内。结合模糊控制和PID控制器进行处理。将两者结合使控制器面对复杂系统时,能够保证系统的稳态精度。自适应模糊PID控制模型控制器如图3所示。

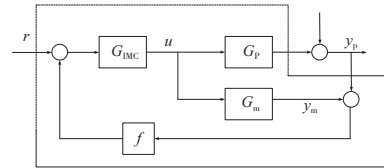


图3 自适应模糊PID控制器

由图3可知,通过监测系统的运行状态和性能指标,自动调整模糊控制规则和PID参数,使控制器能适应不同的工况和扰动。其中, y_p 代表控制液位的输出量, u 代表控制液位的操作量, y_m 代表控制模型的输出量, r 代表给定液位值, G_P 代表被控制对象^[10], G_m 代表内部控制对象, G_{IMC} 代表内模控制中心^[11], f 代表反馈滤波。由此,在控制前需对原始控制信号进行分解,考虑式(3)的传递函数进行控制滞后调整^[12], G_{IMC} 代表内模控制中心,其代表式如下

$$G_{IMC} = AG_m(s)f(s) \quad (4)$$

式中: $G_m(s)$ 表示控制滞留时间; $f(s)$ 表示控制相位特征。受传递内外部扰动影响,存在控制结构不稳定问题^[13],可对原始控制结构进行优化,将其转换为反馈控制结构 $C(S)$,代表式如下

$$C(S) = \frac{G_{IMC}}{1 - G_{IMC} G_m(s)} \quad (5)$$

该反馈控制结构根据控制对象的波动状态获取控制积分^[14],利用下一阶环节进行积分逼近处理,计算反馈控制PI权重 K_p 如下式

$$K_p = k\lambda + \frac{1}{C(S)} \quad (6)$$

式中: k 表示控制反馈超调量; λ 表示控制积分。在实际控制中,存在上下并联装置液面状态不稳定问题,陷入局部最优解,引入 Tent 混沌序列进

行自适应调整^[15-17],结合高斯变异状态进行控制优化^[18],计算PID控制增益值 $Y(s)$ 如下式

$$Y(s) = \frac{U(s)}{K_p} \quad (7)$$

式中 $U(s)$ 表示微分控制输出。结合增益值获取的液面控制阶次 $h(t)$ 如式(8)所示

$$h(t) = Y(s) \frac{k}{T_s} \quad (8)$$

式中; k 表示液位波动变化量; T_s 表示液阻。利用Tent序列产生初始控制种群,确定模糊控制适应值,按照迭代状态获取控制因子,满足自适应控制权重^[19-20]。再按照个体更新状态进行搜索,保证液面控制迭代最优^[21-23]。液面控制迭代公式为

$$y(k+1) = y(k) + T \cdot \left(K_p e(k) + K_i \sum_{i=0}^k e(i) + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right) \quad (9)$$

式中; $y(k+1)$ 表示液位波动变化量; $y(k)$ 表示液位状态值; T 表示采样周期; K_i 表示积分控制系数; K_d 表示微分控制系数; $e(k)$ 表示液位偏差。对液位进行控制,通过自适应调整机制得到PID控制增益值,使控制系统适应不同工况,提高控制液面与预设液面的拟合性^[24-25]。

2 实验

2.1 参数与准备

为验证所提方法的先进性,基于TTS20三容水箱液位控制中心开展实验。采用并列式三容水箱,通过多回路控制及循环水路实现液位调控,初始液位经排放阀预设。实验玻璃圆柱截面积 154 cm^2 ,配备直流泵(流速 100 ml/s)及流出系数 0.465 。数据采集系统通过信号处理箱配合MF634多功能I/O卡完成模数转换,经PCL Express扩展实现控制,实验参数详见表1—表5。

表1 模拟输入参数

模拟输入	参数
通道	8路单端
A/D转换器	14位,同时采样
转换时间/ μs	1.6(1通道);1.9(2通道); 2.5(4通道)
输入范围/V	± 10
输入阻抗/ Ω	10^{10}
触发模式	软件、定时器、外部

表2 模拟输出参数

模拟输出	参数
通道	8通道,14位
输出范围/V	$-10 \sim 10$
最大输出电流/mA	5

表3 数字I/O口参数

数字I/O接口	参数
输入信号	8位兼容TTL
输出信号	8位兼容TTL

表4 计数器参数

选项	参数
通道数	4
分辨率	32位,20 ns
模式	PWM,计数器,脉冲发生

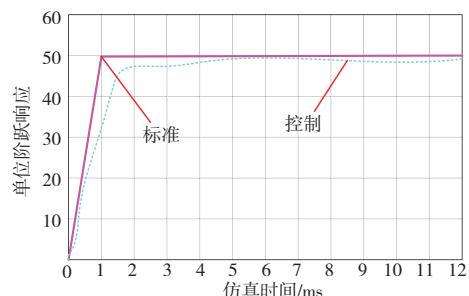
表5 编码器输入参数

选项	参数
通道	4,单端差分
输入	A,B,Index
最大输入频率/MHz	2.5
分辨率	32位

由表1—表5可知,将参数输入MATLAB完成初始化控制布局,提供实验函数编写代码,获取有效的海水淡化装置液位自适应模糊PID控制结果。

2.2 串联容器液位自适应模糊PID控制阶跃响应结果

以单位阶跃信号为控制输入条件,调整上下界参数为 $(0.001, 100]$,采样频率为 100 Hz ,种群规模为50,设置控制适应度参量为 0.9 、 0.8 、 0.7 控制场景,得到串联容器液位自适应模糊PID控制阶跃响应结果如图4所示。



(a) 适应度参量0.7

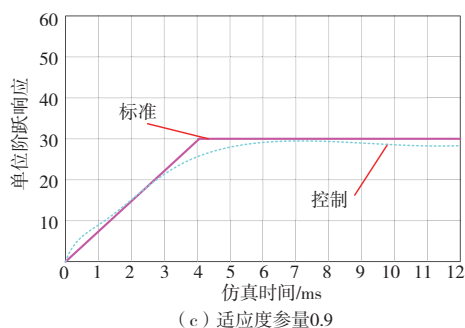
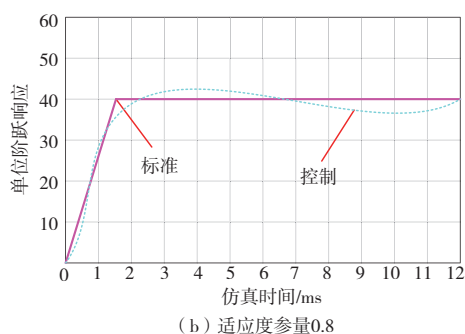


图4 控制阶跃响应结果

由图4可知,在不同的控制场景下,研究方法的单位阶跃响应与预设阶跃响应接近,无过高或过低的突变偏差,可知研究方法具有较好的控制可行性。

2.3 串联容器液位自适应模糊PID控制波动结果

根据输入输出变量状态进行PID控制参数调整,在满足预期要求的基础上设置模糊域为 $[-10, 10]$,模糊语言设置为NB\NM\NS\ZO\PS\PM\PB,将trimf作为对应隶属度函数,将一阶惯性与一阶滞后环节进行组合,得到的串联容器液位自适应模糊PID控制波动结果如图5所示。

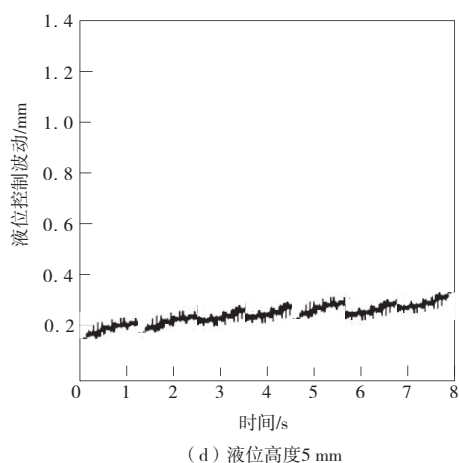
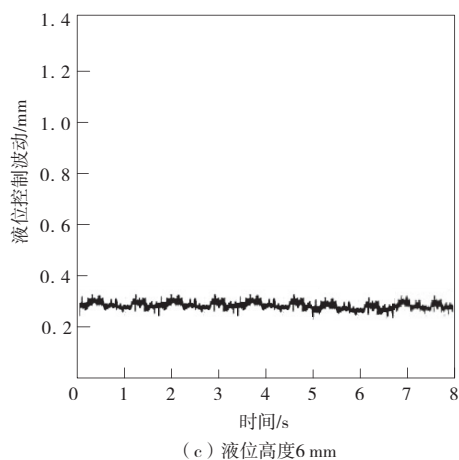
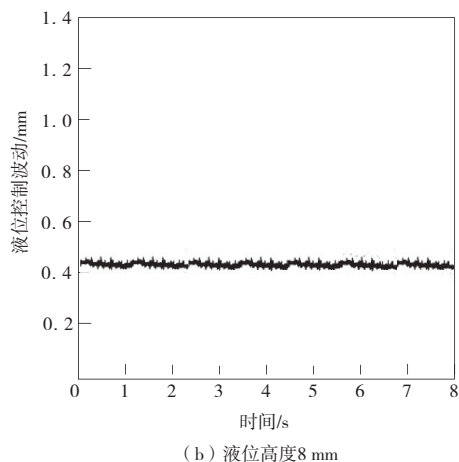
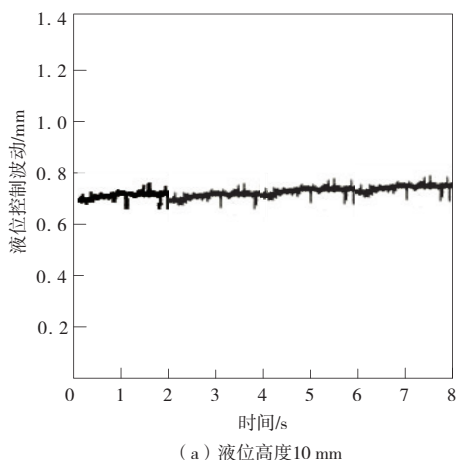


图5 液位自适应模糊PID控制波动结果

由图5可知,在不同初始液位高度下研究方法的液位波动相对较小,满足微分惯性组合要求。由此可知,该方法具有可靠的控制效果。

2.4 串联容器液位自适应模糊PID控制液位性能结果

在MATLAB/simulink仿真环境下,设置控制参数 $k_1 \sim k_5$ 分别为0.2、0.5、1.3、2.7、4.5,按照控制量化筛选干扰控制变量,结合LSTM预设海水淡

化装置串联容器液位,调整控制迭代极值,将本文方法与文献2方法、文献3方法进行比较,串联容器液位自适应模糊PID控制液位性能结果如图6所示。

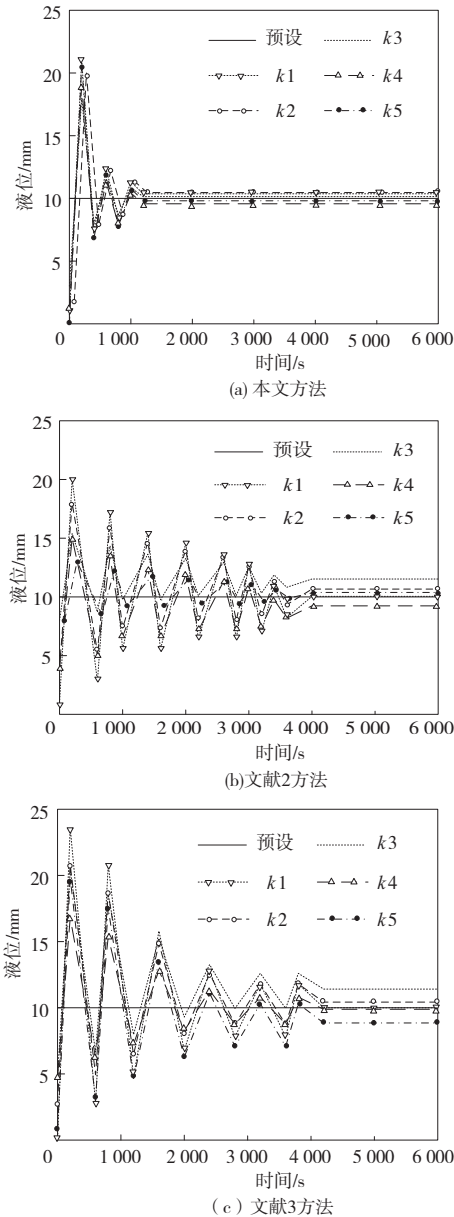


图6 液位自适应模糊PID控制液位性能结果

由图6可知,本文通过设计自适应模糊PID控制器优化控制滞后问题,将原始结构改进为反馈控制形式,采用下一阶积分逼近并结合Tent序列初始化控制种群,经适应值评估与迭代优化获取控制因子。实验显示,在 $k_1 \sim k_5$ 参数设置下,液位控制与预设值高度拟合,验证了该方法良好的补偿效果与反馈鲁棒性。

为研究本文方法在海水淡化装置串联容器液位控制中的性能,将本文方法与文献2方法、文献3方法的控制性能进行对比,以量化展示各方

法的控制效果,得出的数据如表6所示。

表6 海水淡化装置串联容器液位控制性能表

控制方法	超调量/%	稳态误差/mm	调节时间/s
本文方法	2.5	0.8	1 200
文献2方法	4.2	1.5	1 500
文献3方法	3.8	1.2	1 400

根据表6可看出,本文的自适应模糊PID控制方法,在海水淡化装置串联容器液位控制中具有较好的性能。超调量相对较低,表明在控制过程能更快速、平稳地达到稳态。同时,稳态误差最小,体现了其较高的控制精度。此外,调节时间也相对较短,说明能够更快地使液位达到预设值。本文方法能更好地适应各种复杂工况。这证明了本文方法在液位跟踪、稳定性、偏差和参数敏感性等方面优势明显,为海水淡化装置的液位控制提供了有效方案。

3 结语

本文将自适应模糊PID与海水淡化装置串联容器液位控制融合,可以判断海水淡化过程的物理与化学变化趋势,降低了控制滞后与耦合效果,抑制参数变化,保障了海水淡化的综合经济性。

参考文献:

- [1] 朱美强,汤力凡,王鸿璞,等. 机械臂倒液任务中透明容器的液位高度视觉检测与控制[J]. 仪器仪表学报,2023,44(10):283-293.
- [2] 卢靖,李刚,胡珉,等. 基于Transformer的盾构泥水舱液位智能预测与控制[J]. 隧道建设(中英文),2024,44(11):2213-2222.
- [3] 步同杰,王亚刚. 基于改进灰狼算法的啤酒灌装PID液位控制[J]. 包装工程,2023,44(21):245-252.
- [4] 叶章林,张雨飞. 基于带约束自适应GPC的压水堆蒸汽发生器液位控制研究[J]. 核科学与工程,2022,42(6):1345-1353.
- [5] 王超锋,司呈勇,沈建强. 改进差分进化算法及啤酒灌装机液位控制PID参数整定[J]. 包装工程,2022,43(19):310-319.
- [6] 王东风,谷赫,黄宇,等. 基于动态水印的核电厂蒸汽发生器液位控制系统重放攻击检测方法研究[J]. 动力工程学报,2023,43(9):1174-1180,1189.
- [7] 钱虹,邹明耀. 变论域自适应模糊非线性控制在蒸汽发生器液位控制中的应用[J]. 上海交通大学学报,2023,57(1):116-126.
- [8] 高兴泉,肖新宇,王子硕,等. 基于WinCC的水箱液位控制系统实时仿真平台开发[J]. 实验技术与管理,

- 2022,39(1):93-97.
- [9] 胡宁沙,梁晓曦,闫红梅,等. 温排水热能利用-海淡原水热能利用技术方案研究[J]. 给水排水,2024,60(增刊1):611-614,622.
- [10] 李雁飞,冯巧莲,蔡德华,等. 基于 Simulink 的余热驱动冷-淡联产系统动态特性分析[J]. 海军工程大学学报,2022,34(4):87-92.
- [11] 王宇辰,江斌. 热泵辅助的露点蒸发海水淡化装置初步研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(3):315-319.
- [12] 侯峰,张爽,刘瑞,等. 低温多效海水淡化蒸发器换热管振动监测与分析[J]. 噪声与振动控制,2022,42(1):150-155,161.
- [13] 袁合涛,彭昌盛. 光热光电驱动的海岛型太阳能海水淡化装置研制与性能分析[J]. 环境工程,2022,40(11):165-170,181.
- [14] 毕俊召,刘碧伟,罗伟忠. 用于液体容器内液位测量的金属薄壁梁振动模态仿真研究[J]. 机械设计与制造,2024(7):50-56.
- [15] 周琦,夏兆东,成昱廷,等. 铀溶液多体系统核临界安全实验不确定度分析与基准化[J]. 原子能科学技术,2024,58(6):1319-1326.
- [16] 丁俊杰,马万太,张遵祥. 基于内模控制的喷射成形漏包液位时滞控制策略[J]. 机械制造与自动化,2024,53(4):250-254.
- [17] 张锋,李梦蛟,张权,等. 基于模糊 PID 算法的新型双电源自动切换控制器设计[J]. 自动化应用,2025(9):50-52.
- [18] 舒一鸣,戴毅茹. 基于高斯-柯西混合变异的多目标粒子群算法[J]. 计算机与数字工程,2024,52(6):1593-1597,1603.
- [19] 王毅,秦小朋,胡垚,等. 基于遗传模糊控制的燃料电池混合动力汽车燃油经济性提高方法[J]. 汽车电器,2025(1):23-27.
- [20] 朱嵘涛,何朝霞,王腾,等. 基于模糊自适应 PID 算法的直流电机控制设计[J]. 现代电子技术,2025,48(2):103-108.
- [21] 王桥. 自适应机制赋能模糊控制规则库——电机控制优化[J]. 日用电器,2024(12):136-140.
- [22] 黄国争. 双轮铣槽机进给压力自适应模糊控制算法研究[J]. 中国机械,2024(32):33-36.
- [23] 石礁,顾泽明,郭凯. 自适应模糊 PID 控制器的电气设备温度控制研究[J]. 计算技术与自动化,2024,43(3):26-30.
- [24] 肖浩,李涛. 基于 PSO-模糊 PID 电液伺服系统控制[J]. 机床与液压,2025,53(10):139-144.
- [25] 李立,蔡思捷,沈志煌,等. 考虑磁悬浮轴承非线性特征的空间自适应 PID 控制方法[J]. 福州大学学报(自然科学版),2025,53(3):309-317.

收稿日期:2025-06-10

(上接第 147 页)

模型耦合不同 RANS 湍流模型,在预测燃烧室回火时的准确性。结果表明:

1) 湍流 $k-\varepsilon$ 模型耦合诸如典型 EDC 模型的燃烧模型用于计算回火现象比较困难;

2) 湍流涡旋主导 RNG 模型可用于快速预测燃烧室的回火现象,在工程实践中具有一定的应用意义。

3) 数值模拟中尽管 RANS 耦合燃烧模型能捕捉到回火过程,但是受到湍流模型的限制,若要针对回火边界小尺度涡的研究,需要考虑其他的计算方法。

参考文献:

- [1] 李文栋,张文普. 预混燃烧边界层回火的数理模型及研究进展[J]. 应用数学和力学,2023,44(1):36-51.
- [2] 张文普,李宇斌. 燃气轮机燃烧回火机理与数值模拟

的研究进展[J]. 燃烧科学与技术,2016,22(5):385-401.

- [3] 曹敏,张文普. 贫油直喷燃烧室回火的数值研究[J]. 机电工程,2014,31(9):1111-1116.
- [4] 乔英杰,毛荣海. 贫油预混预蒸发燃烧室回火现象的大涡模拟[J]. 航空学报,2014,35(6):1505-1512.
- [5] 李想,王军,宋彩玉,等. 障碍物条件下氢气火焰传播特性的大涡模拟计算[J]. 油气储运,2024,43(2):144-152.
- [6] Wei Z N,Li M H,Li S,et al. Development of natural gas chemical kinetic mechanisms and application in engines: a review[J]. ACS Omega,2021,6(37):23643-23653.
- [7] 杨琨. 基于模型燃烧室的回火过程和机理研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2022.

收稿日期:2024-02-28