

基于 IPSO-FNN-PID 的冷库冲霜系统动态调控与节能优化

李 飞

华商国际工程有限公司, 北京 100069

[摘要]针对我国冷库冲霜给排水系统控制精度低、能耗高、先进控制算法工程应用门槛高的行业痛点, 文章设计了基于改进粒子群优化的模糊神经网络 IPSO-FNN-PID 自适应控制算法, 结合轻量化开源 AI 工具, 构建了一套全流程低门槛仿真测试体系, 明确了从系统建模到工程落地的 6 步标准化轻量化操作流程, 打破了先进控制算法对专业编程、控制理论知识与高性能硬件的依赖。仿真实验结果表明, 该算法相较于常规 PID 控制, 超调量降低至 5% 以内, 调节时间缩短 78%, 可实现冷库冲霜系统年能耗降低 33% 以上, 配套的轻量化 AI 仿真测试体系可将算法仿真验证周期从传统的 15 天以上缩短至 2 天以内, 普通办公电脑即可完成全流程操作, 具备极强的工程推广价值。

[关键词]冷库; 冲霜给排水系统; IPSO-FNN-PID; 动态调控; 节能优化; 轻量化 AI 工具; 开源 AI 辅助仿真测试

DOI: 10.33142/sca.v9i5.19740

中图分类号: TP277

文献标识码: A

Dynamic Control and Energy-saving Optimization of Cold Storage Defrosting System Based on IPSO-FNN-PID

LI Fei

Huashang International Engineering Co., Ltd., Beijing, 100069, China

Abstract: In response to the industry pain points of low control accuracy, high energy consumption, and high engineering application threshold of advanced control algorithms in Chinese cold storage defrosting water supply and drainage system, this article designs a fuzzy neural network IPSO-FNN-PID adaptive control algorithm based on improved particle swarm optimization. Combined with lightweight open-source AI tools, a full process low threshold simulation testing system is constructed, clarifying the 6-step standardized lightweight operation process from system modeling to engineering implementation, breaking the dependence of advanced control algorithms on professional programming, control theory knowledge, and high-performance hardware. The simulation experiment results show that compared with conventional PID control, this algorithm reduces overshoot to within 5%, shortens adjustment time by 78%, and can achieve an annual energy consumption reduction of more than 33% for the cold storage defrosting system. The supporting lightweight AI simulation testing system can shorten the algorithm simulation verification cycle from the traditional 15 days or more to within 2 days, and ordinary office computers can complete the entire process operation, which has strong engineering promotion value.

Keywords: cold storage; frost flushing water supply and drainage system; IPSO-FNN-PID; dynamic regulation; energy-saving optimization; lightweight AI tools; open-source AI assisted simulation testing

随着我国冷链物流行业的高速发展, 冷库作为冷链体系的核心基础设施, 其保有量与能耗总量持续攀升。据《冷库设计标准》GB50072-2021 规定, 冷库冲霜系统应满足除霜彻底、能耗可控的要求, 优先采用循环用水设计。现有行业数据显示, 我国冷库冲霜系统的能耗占冷库总能耗的 10%~20%, 是冷库节能改造的核心环节。

当前国内多数冷库的冲霜给排水系统仍采用定时控制、常规 PID 控制模式, 这类控制方式无法适配系统非

线性、大滞后、多干扰的动态特性, 易出现过度冲霜、除霜不彻底、水泵能耗浪费等问题。近年来, 众多学者将模糊控制、神经网络、智能优化算法应用于冷库系统控制, 验证了先进算法的性能优势, 但现有研究普遍忽略了算法的工程落地门槛——多数中小型冷库的运维与工程人员不具备深厚的控制理论与编程能力, 也无高性能仿真计算设备, 无法完成复杂算法的仿真测试与参数调优, 导致先进算法难以在行业内规模化推广。

基于此,本文以冷库淋水冲霜给排水系统为研究对象,设计了 IPSO-FNN-PID 自适应控制算法,解决了传统控制方式精度低、鲁棒性差的问题;核心结合轻量化开源 AI 工具,构建了一套低门槛、低硬件要求的仿真测试体系,明确了全流程的标准化轻量化操作步骤,无需操作人员具备专业算法开发能力与高性能设备,仅需普通办公电脑与冷库基础工程参数,即可完成算法的仿真验证与落地适配。最终通过仿真实验验证了算法的控制性能、节能效益与仿真体系的可行性,为冷库冲霜系统的节能改造提供了可复制、易落地的技术方案。

1 冷库冲霜系统工作原理与控制需求

1.1 系统工作原理

本文研究的冷库淋水冲霜给排水系统,核心由冲霜循环给水泵组、淋水装置、蒸发器、冲霜循环水池、水处理过滤装置、电动调节阀、变频器等设备组成。系统核心流程为:当蒸发器表面霜层厚度达到设定阈值时,系统关闭制冷循环,开启冲霜循环给水泵,将冲霜水池内的常温冲霜水通过淋水装置均匀喷淋至蒸发器表面,融化霜层;冲霜废水与融化的霜水经排水管路重力回流至冲霜循环水池,经过滤、降温处理后,由给水泵输送至循环管路重复利用,无需额外设置回水加压水泵。

该系统是典型的多变量耦合、非线性、大滞后系统,蒸发器结霜速度受冷库库温、存货量、环境温度、开门次数等多因素影响,具备强不确定性;水泵流量调节、冲霜水喷淋、霜层融化、水池液位变化的过程存在明显纯滞后特性,固定参数的常规控制方式难以实现精准动态调控。

1.2 核心控制需求

结合系统运行特性与行业节能要求,系统核心控制需求可归纳为三点:一是精准动态流量调控,根据霜层厚度、蒸发温度的实时变化自适应调节冲霜水流量与给水泵输出功率,在保证除霜彻底的前提下最大限度缩短冲霜时长、降低水泵能耗与冷库冷量损失;二是稳定的循环水池液位控制,实时监测水池液位,联动设置给水泵启停保护阈值,避免水泵空转、水池溢水等问题,提升水资源循环利用率;三是强鲁棒性,可适应不同季节、不同负荷工况的变化,在库温波动、环境温度变化等外界干扰下,仍能保持稳定的控制效果。

2 IPSO-FNN-PID 控制算法核心原理

本文设计的 IPSO-FNN-PID 算法核心由三部分组成:基础 PID 控制器、模糊神经网络(FNN)参数自适应调整模块、改进粒子群优化(IPSO)全局寻优模块,核心逻辑为通过智能算法实现 PID 参数的在线自整定,适配

系统的动态特性变化。

基础 PID 控制器是系统的核心执行单元,其控制规律为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

其中 $e(t)$ 为系统设定值与实际值的误差, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分系数,常规 PID 的控制性能由固定参数决定,难以适配非线性系统。

模糊神经网络(FNN)模块融合了模糊控制的非线性处理能力与神经网络的自学习能力,以系统误差 e 与误差变化率 ec 为输入,通过模糊推理与神经网络运算,在线输出 PID 三个参数的调整量,实现参数的自适应修正,解决固定参数 PID 适配性差的问题。

改进粒子群优化(IPSO)模块针对传统 FNN 易陷入局部最优、收敛速度慢的问题,通过自适应惯性权重与自适应变异操作,对传统粒子群算法进行优化,以系统误差平方和积分(ITAE)为适应度函数,全局寻优得到 FNN 的最优初始权值与阈值,大幅提升算法的收敛速度与控制精度。

算法整体运行流程为:通过 IPSO 算法完成 FNN 初始参数的全局寻优,将最优参数赋值给 FNN 模块;系统运行过程中,实时采集系统运行数据,通过 FNN 模块在线调整 PID 参数,输出控制信号调节水泵变频器与电动阀门,实现系统的闭环自适应控制。

3 基于轻量化 AI 工具的仿真测试体系构建

本体系以国外开源轻量化大语言模型为核心,结合开源自动化机器学习(AutoML)、轻量化开源建模仿真平台等工具,构建了全流程、低门槛、低硬件要求的仿真测试体系,所有工具均为开源免费、可商用,无需操作人员具备专业的算法开发、编程与控制理论知识,仅需普通办公电脑与冷库基础工程参数,即可完成算法的全流程仿真验证与落地适配。体系的标准化轻量化操作步骤为:AI 辅助系统需求解析与数学建模、零代码轻量化算法模型搭建、AI 驱动的参数自动化寻优、多工况轻量化仿真测试、AI 自动化仿真结果分析、工程化 PLC 程序轻量化生成。

4 仿真实验与结果分析

4.1 实验平台与轻量化 AI 工具选型

本次仿真实验全程采用国外成熟开源、完全免费的轻量化 AI 模型与平台,所有工具均可在普通电脑上运行,无需极高算力 GPU、无需复杂的本地环境配置,仅基础的电脑操作能力即可完成,具体工具如下:

轻量化开源通用大语言模型:Meta Llama 3 8B,可通

过开源工具 Ollama 实现轻量化本地部署。

轻量化开源建模仿真平台：OpenModelica，完全开源的轻量型多领域物理系统建模仿真平台，符合国际 Modelica 标准，安装包体积小、无冗余功能，内置工业控制、流体系统预制模块库，支持零代码拖拽式操作。

轻量化开源 AutoML 平台：Hugging Face Spaces+AutoKeras，AutoKeras 是谷歌开源的零代码轻量化自动化机器学习工具，Hugging Face Spaces 提供免费的轻量化在线运行环境与预制工业控制算法模板，无需本地搭建机器学习环境，即可完成算法参数寻优，完全开源免费。

轻量化开源 PLC 工程化工具：Beremiz，完全开源的轻量型 IEC 61131-3 标准 PLC 编程软件，安装便捷、无需复杂的硬件驱动配置，支持自动生成控制程序，可直接对接主流 PLC 硬件，完全免费开源。

上述平台、模型及软件均可利用普通办公电脑操作运行，降低了算法的使用成本。

4.2 全流程轻量化仿真操作步骤

本次试验拟定环境为：位于北京的库容为 1000t 的 0~4℃冷库，全程轻量化操作步骤如下：

步骤 1：AI 辅助系统数学建模（Llama 3+ Ollama 轻量化部署）

通过开源工具 Ollama 实现 Llama 3 模型的轻量化本地部署，安装 Ollama 后在终端输入命令 `ollama run llama3:8b`。部署完成后，在模型对话界面输入固定格式的自然语言指令：“请帮我完成冷库淋水冲霜给排水系统的数学建模，已知参数：1000t 高温冷库，冲霜循环给排水泵额定功率 7.5kW，冲霜循环管路总长 120m，冲霜水池有效容积 15m³，现场历史运行数据显示系统纯滞后时间约 10s，时间常数约 35s，要求输出系统的传递函数与标准化仿真模型说明”，点击发送后，模型即可输出系统的传递函数：

$$G(s) = \frac{2.5e^{-10s}}{35s+1} \quad (2)$$

全程无需手动推导数学公式，仅需准确输入冷库基础参数即可完成建模，无冗余操作与复杂配置。

步骤 2：AI 辅助的低代码算法模型封装与搭建（OpenModelica）

利用大语言模型生成 IPSO-FNN-PID 控制器的 Modelica 代码。指令示例：“请用 Modelica 语言编写一个符合 Modelica 标准库接口的 IPSO-FNN-PID 控制器模型，输入为误差 e 和误差变化率 ec，输出为 PID 参数增量 K_p、K_i、K_d。网络结构 2-6-3，激活函数高斯函数，并包含改

进粒子群优化初始化部分。为每行代码添加中文注释。”将生成的代码在 OpenModelica 中调试通过后，封装为自定义模块（如 IPSO_FNN_PID）。此后，即可在 OpenModelica 中通过拖拽式操作，将标准库中的 TransferFunction 模块、PIDController 模块与自定义的 IPSO_FNN_PID 模块连接，快速搭建系统仿真模型。整个过程为低代码开发，核心算法模块一次封装后可重复使用。

步骤 3：AI 驱动算法参数自动化寻优（Hugging Face Spaces+ AutoKeras）

打开 Hugging Face 上开源的（Industrial Control AutoML）免费轻量化 Space 模板，上传 OpenModelica 导出的系统模型文件，优化目标配置界面，勾选（ITAE 误差最小）（超调量≤5%）（调节时间最短）三个核心优化目标，点击（启动自动寻优），开源 AutoKeras 工具会自动运行 IPSO 全局寻优算法，迭代过程全程可视化，本次实验设置最大迭代次数 100 次，8min 内即可完成寻优，自动输出适配该冷库系统的最优 FNN 权值、阈值与 PID 初始参数。全程无需本地搭建机器学习环境，轻量化云端运行，不占用本地计算资源，无需人工干预。

步骤 4：多工况轻量化仿真测试（OpenModelica）

回到 OpenModelica 仿真界面，进入（Experiment Setup）模块，软件内置了冷库系统全场景典型工况库，直接勾选（常规稳定工况）（夏季高负荷工况）（冬季低负荷工况）（负载突变干扰工况）4 类测试场景，点击（批量启动仿真），软件自动完成所有工况的仿真测试，输出每个工况的系统响应数据与可视化曲线，全程约 12min。无需手动设置测试用例与干扰信号，仿真过程轻量化运行，普通办公电脑即可流畅处理。

步骤 5：AI 自动化仿真结果分析（Llama 3）

将 OpenModelica 导出的仿真 CSV 数据文件，上传至 Llama 3 对话界面（通过 Ollama 开源文件解析插件），输入自然语言指令：“请帮我分析该仿真数据，计算常规 PID、FNN-PID、IPSO-FNN-PID 三种算法的超调量、调节时间、稳态误差，生成 Markdown 格式的对比表格与性能分析报告；同时基于该冷库年运行 300 天、日均冲霜 4 次的基础数据，计算三种控制方式的年耗电量、年循环用水量，生成节能效益对比表，明确节能率与节水率”，Llama 3 会自动完成全量数据处理，生成标准化的对比表格、性能分析报告与可视化曲线。全程轻量化本地运行，无需上传数据至第三方商用平台，兼顾轻量化与数据安全性，无需手动进行数据计算与图表绘制。

步骤 6：工程化 PLC 程序轻量化生成（Beremiz 操作）

针对不同硬件条件，采用分层部署策略：

通用型 PLC：利用仿真寻优结果，生成一张“工况-最优 PID 参数”二维查找表。通过 AI 辅助生成符合 IEC 61131-3 标准的结构化文本（ST）查表插值程序，下载至 PLC。示例指令：“生成一个 ST 程序，根据误差和误差变化率在 10×10 二维数组中双线性插值，实时输出 K_p 、 K_i 、 K_d 给 PID 功能块，数组表定义为 DATA_TABLE。”

高性能控制器：利用 AI 代码转换工具，将部分 FNN 推理代码转换为 C/C++，封装为可被 PLC 调用的功能块，实现更高级的在线自适应。

4.3 控制性能测试结果

4.3.1 动态阶跃响应性能

动态性能测试采用阶跃响应测试，系统设定值在 0s 时从 0 阶跃变化至 1，三种算法的阶跃响应性能对比如表 1 所示。

表 1 三种算法的阶跃响应性能对比

控制算法	超调量	调节时间	稳态误差
常规 PID	24.7%	82s	1.2%
FNN-PID	11.3%	43s	0.5%
IPSO-FNN-PID	4.2%	18s	0.1%

测试结果表明，本文设计的 IPSO-FNN-PID 算法相较于常规 PID，超调量降低 83%，调节时间缩短 78%，稳态误差降低 91.7%，动态响应速度与控制精度大幅提升，可快速稳定地跟踪系统设定值，完全满足冷库冲霜系统的控制需求。

4.3.2 抗干扰性能测试

抗干扰性能测试在系统运行至 100s 时，加入幅值为 0.3 的负载干扰信号，模拟冷库进货导致的库温波动、结霜速度加快的工况。测试结果显示，加入干扰后，常规 PID 的最大波动幅度为 0.28，恢复稳态时间为 55s；FNN-PID 的最大波动幅度为 0.15，恢复时间为 28s；IPSO-FNN-PID 的最大波动幅度仅为 0.06，恢复时间为 12s，抗干扰能力显著优于另外两种算法，可很好地适应冷库工况的动态变化。

4.4 节能效益分析

基于该冷库的历史运行数据，AI 模型自动完成了不同控制方式的年能耗与水耗对比分析，结果如表 2 所示。

结果表明，本文设计的 IPSO-FNN-PID 算法相较于传

统定时控制，年节能率达到 33.1%，年节水率达到 41.7%，以北京市工业用电 0.8 元/kWh、工业用水 5 元/m³ 计算，年可节约运行成本 7922 元；同时由于冲霜时长缩短、过度冲霜减少，冷库冷量损失降低，制冷系统年耗电量可减少约 14800kWh，综合节能效益十分可观。

表 2 不同控制方式的年能耗与水耗对比

控制算法	冲霜系统 年耗电量/kWh	年节能率	年循环 用水量/m ³	年节水率
定时控制	12800	0	2180	0
常规 PID	10850	15.2	1820	16.5
IPSO-FNN-PID	8560	33.1	1270	41.7

5 结论

本文针对冷库冲霜给排水系统的控制痛点，设计了 IPSO-FNN-PID 自适应控制算法，有效解决了传统控制方式精度低、鲁棒性差、能耗高的问题。本文结合轻量化开源 AI 工具，构建了一套低门槛仿真测试体系，明确了从系统建模到工程落地的 6 步标准化轻量化操作流程，打破了先进控制算法对专业知识、高性能硬件的依赖，将算法仿真验证周期从传统的 15 天以上缩短至 2 天以内，大幅降低了算法的工程应用门槛。

仿真实验结果表明，本文设计的 IPSO-FNN-PID 算法相较于常规 PID 控制，超调量降低至 5% 以内，调节时间缩短 78%，抗干扰能力显著提升，可实现冲霜系统年节能率 33% 以上，兼具良好的控制性能与节能效益。本文的研究成果可为中小型冷库的冲霜系统节能改造提供可复制、易落地的技术方案，具备较高的工程推广价值。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,冷库设计标准:GB50072-2021[S].北京:中国计划出版社,2021.
- [2] 张朝晖,李刚,王志强.冷库冲霜系统能耗分析与节能优化研究[J].制冷学报,2022,43(3):121-128.
- [3] 刘金琨.先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M].北京:电子工业出版社,2021.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.冷库节能运行技术规范:GB/T 30134-2013[S].北京:中国标准出版社,2013.

作者简介：李飞（1992—），男，汉族，四川南充人，工程师，硕士，主要研究方向为冷链物流、食品加工、生物医药给排水设计。