

Study on Energy-Saving Optimization of Fresh Air Preheating in Cigarette Factory Cut Tobacco Warehouse

Li Chen Yangzhou Feng Ji Yan Ao Luo Zejun Lei

Sichuan China Tobacco Industry Co., Ltd. Chengdu Cigarette Factory, Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

Objective: To solve the problems of high energy consumption and low temperature control accuracy in fresh air preheating of cut tobacco warehouses in cigarette factories in winter, and help achieve the "double carbon" goal and stabilize production quality. **Methods:** Taking the leaf storage room of Chengdu Cigarette Factory as the research object, an optimization scheme of "dynamic load adaptation + fuzzy PID intelligent control" was proposed. The research was carried out through load modeling (constructing the correlation model between load and outdoor temperature based on the air enthalpy difference method), control strategy upgrading (designing a fuzzy PID control algorithm with multiple inputs and outputs and a multi-working condition operation mode), and on-site transformation verification. **Results:** After transformation, the fluctuation of fresh air preheating temperature decreased from $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ to $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (meeting GB/T 18935-2003); winter steam consumption decreased from 42.3kg/h to 6.3kg/h (a reduction of 85.1%); the coefficient of variation of leaf moisture content decreased from 8.2% to 4.8%, and the wire breakage rate decreased from 1.8% to 1.2%. **Conclusion:** The scheme achieves a win-win situation of "energy consumption-quality", and the adaptation schemes for severe cold, mild and plateau areas based on dynamic load characteristics can provide a technical paradigm for similar projects.

Keyword

Cut tobacco warehouse; Fresh air preheating; Fuzzy PID control; Dynamic load; Energy consumption optimization; Climate zone adaptation

卷烟厂片烟库新风预热节能优化研究

陈利 冯杨洲 晏吉 骆澳 雷泽均

四川中烟工业有限责任公司成都卷烟厂, 中国·四川成都 610000

摘要

目的: 解决卷烟厂片烟库冬季新风预热能耗高、温度控制精度低的问题, 助力“双碳”目标达成与生产质量稳定。**方法:** 以成都卷烟厂叶片储存间为对象, 提出“动态负荷适配+模糊PID智能控制”方案, 通过负荷建模(空气焓值差法构建负荷-室外温度关联模型)、控制策略升级(多输入输出模糊PID算法与多工况模式)及现场改造验证展开研究。**结果:** 改造后新风预热温度波动从 $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 降至 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (符合 GB/T 18935-2003); 冬季蒸汽消耗量从 42.3kg/h 降至 6.3kg/h (减少 85.1%); 叶片含水率变异系数从 8.2% 降至 4.8%, 断丝率从 1.8% 降至 1.2%。**结论:** 方案实现“能耗-品质”双赢, 基于动态负荷提出的严寒、温和、高原地区适配方案, 可为同类工程提供技术范式。

关键词

片烟库; 新风预热; 模糊PID控制; 动态负荷; 能耗优化; 气候区适配

1 引言

1.1 研究背景与意义

片烟库是卷烟生产关键仓储环节, 需按 GB/T 18935-2003 维持 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ 、55%~65% RH 的恒定环境, 冬季新风预热是保障温湿度稳定的核心工序 [1]。预热温度偏低易导

致烟叶吸湿结块(含水率超 13%), 偏高则加速放湿(含水率低于 11%), 降低烟丝韧性 [2]。

调研显示, 片烟库空调冬季总能耗中, 新风预热占比 30%~40%。传统“定流量蒸汽加热+人工调节”存在明显缺陷: 一是室外气温波动(如成都冬季昼夜温差 $8\sim 10^{\circ}\text{C}$)时, 预热温度调节滞后 15~20min, 波动 $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$, 导致烟叶含水率变异系数超 8%; 二是负荷与热源不匹配, 低负荷(室外温度 $> 3^{\circ}\text{C}$)时蒸汽浪费率超 40%, 高负荷(极端低温 -2°C)时预热不足 [3]。因此, 实现新风预热“精准化、节能化”, 对卷烟厂践行“双碳”目标、稳定烟叶储存及生产质量具有重要价值。

【基金项目】 四川中烟工业有限责任公司科技攻关项目“卷烟厂片烟库节能优化技术研究”(项目编号: SCZY2024-05)。

【作者简介】 陈利(1977-), 男, 中国四川成都人, 本科, 工程师, 从事动力能源保供与节能研究。

1.2 国内外研究现状

当前新风预热研究聚焦“控制精度提升”与“负荷动态适配”：室外焓值变新风比控制可实现冬季节能22%，但未解决温度波动；模糊PID控制通过动态调整 K_p 、 K_i 、 K_d ，能将温度精度提升至 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，响应时间缩至10min内（较传统PID提升40%）[5]；结合LSTM负荷预测可降低能耗波动25%[6]。

现有研究存在三缺口：①未结合片烟库“16h连续运行、温度波动 $\leq \pm 1^\circ\text{C}$ ”的工艺特性，未建“预热精度-烟叶品质”定量模型；②动态负荷建模深度不足，缺乏负荷与室外温度量化关系；③不同气候区适配研究少，普适性受限。本文以成都卷烟厂为案例，针对性展开研究。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

①构建新风预热动态负荷模型，明确室外温度与负荷量化关系；②设计模糊PID智能控制策略，实现“温度精准+能耗最优”；③成都卷烟厂现场改造与效果评估；④提出严寒、温和、高原地区适配方案。

1.3.2 技术路线

采用“数据采集-仿真优化-现场验证-方案推广”闭环路线：①连续72h监测成都卷烟厂系统，采集不同室外温度下的负荷数据，构建负荷-温度关联模型；②基于MATLAB/Simulink搭建模糊PID仿真平台，优化控制参数；③现场安装高精度监测设备，采集改造后3个月运行数据；④对比改造前后指标，形成多气候区适配方案。

2 片烟库新风预热现状与动态负荷分析

2.1 新风预热系统运行现状

成都卷烟厂叶片储烟间面积1500 m^2 ，配套空调机组型号KA-5/ZK20，额定送风量20000 m^3/h ，新风占比20%（新风量4000 m^3/h ）。按GB50019-2003，冬季需将室外新风从1.0 $^\circ\text{C}$ 加热至21.2 $^\circ\text{C}$ ，再与库内回风（23 $^\circ\text{C}$ 、60%RH）混合送入[7]。改造前采用传统蒸汽预热，存在热源定流量供给、温度控制滞后问题，导致能耗高、烟叶品质波动大。

2.2 新风预热动态负荷建模

2.2.1 负荷计算方法

采用空气焓值差法计算预热负荷，公式如下[8]：

$$Q = \frac{\rho \times L \times (h_2 - h_1)}{3600}$$

式中： Q 为预热负荷（kW）； ρ 为空气密度（1.2 kg/m^3 ）； L 为新风量（4000 m^3/h ）； h_1 为室外新风焓值（kJ/kg，由温湿度查焓湿图得）； h_2 为预热后新风焓值（25.1kJ/kg，对应温度21.2 $^\circ\text{C}$ 、含湿量3.6g/kg）。

2.2.2 动态负荷特性

2024年12月-2025年2月连续监测，每小时采集1组数据，获5760组有效数据。线性拟合得负荷-室外温度关联模型：

$$Q = -1.2T_{\text{out}} + 28.7 (R^2 = 0.98)$$

模型显示：室外温度每降1 $^\circ\text{C}$ ，负荷增1.2kW；极端低温-2 $^\circ\text{C}$ 时，负荷较设计温度1 $^\circ\text{C}$ 增19.3%，为控制策略设计提供依据。

2.2.3 预热精度与烟叶品质关联

控制变量试验（库内RH60%、风速0.3m/s不变）显示：预热温度波动与烟叶含水率变异系数Pearson相关系数0.97；波动 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ 时，含水率变异系数 $\leq 5\%$ ，断丝率 $\leq 1.2\%$ （符合生产标准）。据此确定预热温度控制目标：21.2 $^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

3 新风预热模糊PID控制策略设计

3.1 核心优化思路

针对传统系统缺陷，以“动态负荷适配”为核心优化：①热源协同：引入制丝车间烘丝机尾气余热（55 $^\circ\text{C}$ ，显热30.9kW），覆盖85%常规负荷，减蒸汽消耗；②智能控制：模糊PID算法以“温度偏差、偏差变化率、室外温度”为输入，动态调节蒸汽阀与余热旁通阀开度；③多工况模式：设计冬季、过渡季、应急模式，提升适应性。

3.2 模糊PID控制算法设计

3.2.1 控制变量定义

将所有输入变量归一化至[-3,3]区间，具体定义如下：①温度偏差 $e = T_{\text{set}} - T_{\text{act}}$ ，其中 $T_{\text{set}}=21.2^\circ\text{C}$ 为预热温度设定值， T_{act} 为实际监测温度；②偏差变化率 $ec = \frac{\Delta e}{\Delta t}$ ，其中 $\Delta t=1\text{min}$ 为数据采样周期，用于反映温度变化趋势；③室外温度 T_{out} ，用于反映预热负荷大小。

输出变量包括：①蒸汽调节阀开度 V_s ，调节范围0~100%；②余热旁通阀开度 V_h ，调节范围0~100%；③新风风机频率 f ，调节范围30~50Hz。

3.2.2 模糊规则与参数调整

输入变量划分为{NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB}7个模糊子集，隶属度函数用三角形函数。核心规则：

高负荷（ $T_{\text{out}} < -1^\circ\text{C}$ ）+ $e=NB$ + $ec=PB$ ： $V_h=100\%$ ， $V_s=80\% \sim 100\%$ ；

中负荷（ $-1^\circ\text{C} \leq T_{\text{out}} \leq 2^\circ\text{C}$ ）+ $e=ZO$ + $ec=ZO$ ： $V_h=100\%$ ， $V_s=20\% \sim 50\%$ ；

低负荷（ $T_{\text{out}} > 2^\circ\text{C}$ ）： $V_h=50\% \sim 80\%$ ， $V_s=0 \sim 10\%$ 。

PID参数自整定：高负荷（ $T_{\text{out}} < -1^\circ\text{C}$ ）： $K_p=1.2$ 、 $K_i=0.1$ ；低负荷（ $T_{\text{out}} > 2^\circ\text{C}$ ）： $K_p=0.5$ 、 $K_i=0.3$ ； $|ec|=0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 时： $K_d=0.3$ 。

3.3 多工况运行模式设计

3.3.1 冬季模式（12月-次年2月）

常规工况： $V_h=100\%$ ， V_s 按模糊PID动态调节；余热不足（预热温度持续 $< 20^\circ\text{C}$ ）： V_s 提至80%~100%，响应 $< 5\text{min}$ 。

3.3.2 过渡季模式（3月、11月，室外5~15℃）

关闭蒸汽与余热系统，“全新风自然预热”，新风量调节至3000~5000m³/h，节能率40%。

3.3.3 应急模式（预热温度<18℃或>24℃）

关闭新风阀，开启回风内循环，V_s=100%，触发声光报警，避免烟叶品质受损。

4 工程案例与新风预热效果评估

4.1 案例概况与改造内容

成都卷烟厂2024年实施改造，核心内容：

①监测升级：装E+E EE160温湿度变送器（±0.3℃）、西门子7ME6320蒸汽流量计（±0.5%）、PT100室外温度传感器（±0.1℃）；

②控制模块：采用西门子S7-300 PLC，基于STEP 7编模糊PID程序，WinCC组态人机界面；

③热源协同：接入烘丝机尾气余热系统，装电动旁通阀，换高精度蒸汽电动调节阀（调节精度±1%）。

4.2 新风预热优化效果

改造后连续3个月（2023年12月-2024年2月）监测。极端低温（-2℃，负荷32.8kW）测试：8min内V_s从30%升至85%，V_h=100%，温度从19.5℃升至21.0℃，超调<0.3℃，无震荡。

能耗降低原因：①模糊PID实现“按需供能”，低负荷V_s降至0~10%；②余热覆盖85%常规负荷，按GB/T 2589-2020核算，年减CO₂排放20.3t、节标煤7.8t [9]。

烟叶品质：含水率均值稳定12.1%，变异系数从8.2%降至4.8%（降41.5%），断丝率从1.8%降至1.2%（降33.3%），结块率从5.2%降至1.1%（降78.8%）；烟丝合格率从97.5%升至99.2%。

4.3 多气候区新风预热方案适配

基于动态负荷模型与我国气候区特性，提出适配方案见表1。

适配逻辑：按温度定预热级数与热源配比，调模糊PID参数匹配负荷变化速率，实现“精度达标+能耗最优”。

表1 不同气候区片烟库新风预热方案适配

气候区	冬季室外温度范围	动态负荷特征	新风预热核心方案	控制参数调整建议
严寒地区（东北）	-20~-10℃	负荷大（45~55kW），波动剧烈	双级预热：一级余热加热至10℃，二级蒸汽至21℃	K _p =1.5，采样周期0.5min
温和地区（华南）	5~15℃	负荷小（15~20kW），波动平缓	单级余热预热，无需蒸汽补热	K _p =0.5，采用定频控制
高原地区（云南）	-5~5℃	空气密度低（0.9kg/m ³ ），负荷偏高	新风量增至5000m ³ /h，余热+蒸汽协同预热	负荷模型Q=-1.0T _{out} +29.2，K _p =1.0

5 结论与展望

5.1 研究结论

①片烟库新风预热核心矛盾为“动态负荷与热源不匹配”，成都案例中负荷随室外温度线性增长（Q=-1.2T_{out}+28.7，R²=0.98），传统系统低负荷蒸汽浪费超40%，温度波动影响品质；②模糊PID控制提升温度精度，波动从±2.0℃降至±0.2℃，响应缩短60%，超调<0.3℃；③方案实现“能耗-品质”双赢，年节蒸汽51.8t，含水率变异系数、断丝率分别降41.5%、33.3%；④多气候区适配方案具普适性，可满足不同区域需求。

5.2 研究展望

①深化“预热-品质”定量模型，结合LSTM建预测模型，实现前瞻性控制；②探索光伏电加热应急热源，降低蒸汽依赖；③设计大型卷烟厂多库集中式预热系统，通过负荷均衡调度降能耗。

参考文献

- 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18935-2003 烟叶储存养护方法[S]. 北京：中国标准出版社，2003.
- 丁永青，余洋，刘东. 烟叶含水率对制丝工艺的影响[J]. 中国

烟草科学，2011，32(3)：56-59.

- 王守强，高宪君. 卷烟工艺空调新风用量的节能策略[J]. 节能，2017(2)：33-35.
- 张磊，王强，刘华. 模糊PID控制在空调新风预热中的应用[J]. 控制工程，2018，25(6)：1032-1036.
- 王强，张磊，刘华. 基于预测控制的空调余热回收系统优化[J]. 自动化仪表，2020，41(5)：68-71.
- 李娜，赵伟，孙亮. 基于LSTM的空调负荷预测及节能控制[J]. 建筑科学，2022，38(8)：123-128.
- 中国建筑科学研究院. GB50019-2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京：中国计划出版社，2003.
- 赵荣义，范存养，薛殿华，等. 空气调节[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2009：215-220.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 2589-2020 综合能耗计算通则[S]. 北京：中国标准出版社，2020.
- 刘刚，陈明，张伟. 卷烟厂空调系统节能改造实践[J]. 烟草科技，2019，52(11)：89-94.
- 周健，李军，王浩. 模糊控制技术在工业空调温度控制中的应用[J]. 制造业自动化，2021，43(7)：156-159.