

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 四川省成都市 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 $15\sim 20\text{min}$, 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。

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

成都卷烟厂叶片储存间面积 1500m^2 , 配套空调机组型号KA-5/ZK20, 额定送风量 $20000\text{m}^3/\text{h}$, 新风占比20%(新风量 $4000\text{m}^3/\text{h}$)。按GB50019-2003, 冬季需将室外新风从 1.0°C 加热至 21.2°C , 再与库内回风(23°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($1.2\text{kg}/\text{m}^3$); L 为新风量($4000\text{m}^3/\text{h}$); h_2 为室外新风焓值(kJ/kg ,由温湿度查焓湿图得); h_1 为预热后新风焓值($25.1\text{kJ}/\text{kg}$,对应温度 21.2°C 、含湿量 $3.6\text{g}/\text{kg}$)。

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°C ,负荷增 1.2kW ;极端低温 -2°C 时,负荷较设计温度 1°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RH 60%、风速 $0.3\text{m}/\text{s}$ 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°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 $\dot{e} = \frac{\Delta e}{\Delta t}$,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 $0\sim 100\%$;②余热旁通阀开度 V_h ,调节范围 $0\sim 100\%$;③新风风机频率 f ,调节范围 $30\sim 50\text{Hz}$ 。

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

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

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 ($T_{\text{out}} > 2^\circ\text{C}$): $K_p = 0.5$ 、 $K_i = 0.3$; $|\text{lecl}| = 0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 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 $80\%\sim 100\%$,响应 $< 5\text{min}$ 。

3.3.2 过渡季模式(3月、11月,室外 $5\sim 15^\circ\text{C}$)

关闭蒸汽与余热系统,“全新风自然预热”,新风量调节至 $3000\sim 5000\text{m}^3/\text{h}$,节能率 40% 。

3.3.3 应急模式(预热温度 $< 18^\circ\text{C}$ 或 $> 24^\circ\text{C}$)

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($\pm 0.3^\circ\text{C}$)、西门子7ME6320蒸汽流量计($\pm 0.5\%$)、PT100室外温度传感器($\pm 0.1^\circ\text{C}$);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 $\pm 1\%$)。

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,核心指标对比见表1。

表 1 改造前后新风预热温度与能耗对比

评估指标	改造前	改造后	变化幅度
平均预热温度	21.1℃	21.2℃	无显著变化
温度波动范围	± 2.0℃	± 0.2℃	缩小 90.0%
温度超差率 (> ± 0.5℃)	65.2%	0%	降低 100%
调节响应时间	15~20min	5~8min	缩短 60.0%
冬季蒸汽消耗量 (kg/h)	42.3	6.3	减少 85.1%
冬季蒸汽总耗量 (t)	60.9	9.1	减少 85.1%

极端低温 (−2℃, 负荷 32.8kW) 测试: 8min 内 Vs 从 30% 升至 85%, Vh=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

表 2 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℃	Kp=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	Kp=0.5, 采用定频控制
高原地区 (云南)	−5~5℃	空气密度低 (0.9kg/m³), 负荷偏高	新风量增至 5000m³/h, 余热 + 蒸汽协同预热	负荷模型 $Q=-1.0T_{out}+29.2$, $Kp=1.0$

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”。

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

[1] 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.
[2] 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.
[3] 王守强, 高宪君. 卷烟工艺空调新风用量的节能策

负荷 Vs 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 2。

略 [J]. 节能, 2017 (2): 33 – 35.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

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, 四川成都, 本科, 工程师, 从事动力能源保供与节能研究