

制药工厂冷站

AI 监督控制案例 - I-P 单位

二次泵变流量冷冻水系统在 AI 控制窗口内，平均运行期冷站效率从 0.74 降至 0.65 kW/ton。在 BMS 兼容的冷却水泵和冷却塔风机频率区间内，实测冷站效率提升 12.11%。

12.11%	37 天	0.74 -> 0.65 kW/ton
冷站效率提升	AI 运行窗口	平均冷站效率

摘要。AI 运行期为 9 月 1 日至 10 月 7 日，共 37 天；对比 6 月 1 日至 7 月 7 日有效历史基线。

测量窗口。基线运行在剔除缺失用电数据后有 27 条有效日记录；AI 控制有 37 条日记录。AI 期平均更热、更湿。

范围说明。AI 层优化冷却水泵频率和冷却塔风机频率。冷水出水温度和冷冻水泵频率为预留接口，不在本次实测范围内。

1. 现场背景

该站点为制药工厂，中央空调为二次泵变流量冷冻水系统。冷站包含 4 台冷机（3 用 1 备）、4 台冷冻水泵、4 台冷却水泵、3 台空调侧冷冻水泵和 4 台工艺侧冷冻水泵。

设备	品牌	I-P 规格	状态
离心冷机	Trane	650 tons cooling ; 539 hp	运行
冷冻水泵	Grundfos	66 ft 扬程 ; 40 hp ; 1,541 gpm	运行
冷却水泵	Xylem	72 ft 扬程 ; 60 hp ; 837 gpm	运行
冷却塔	BAC	2,201 gpm ; 30 hp	运行

控制项	运行边界
冷却水泵频率	42 Hz 至 50 Hz，以不触发低流量保护为前提
冷却塔风机频率	22 Hz 至 50 Hz，以冷站能耗和室内温度响应为优化目标
当前优化范围	冷却水泵与冷却塔
预留后续接口	冷机出水温度与冷冻水泵频率

2. AI 优化方法

软件监督层使用强化学习，根据当前运行状态、设备限制、天气上下文和反馈，选择冷却水泵和冷却塔风机命令。

本项目中，ClimaMind DDQN 策略在批准的 BMS 兼容频率区间内选择命令。边界检查与策略选择保持分离。

奖励同时考虑冷站运行能耗和与舒适度或工艺相关的响应。

图 1. 软件侧冷却优化流程



反馈回路：操作员 + M&V 反馈 -> ClimaMind DDQN 策略

4. 冷站效率计算

本次实测范围优化冷却水泵和冷却塔，因此按冷站运行效率而非整栋建筑节能呈报。kW/ton 越低，表示单位冷量的电耗越低。

指标	基线运行	AI 控制
有效日记录	27	37
运行期	6 月 1 日至 7 月 7 日	9 月 1 日至 10 月 7 日
平均 COP	4.75	5.41
平均冷站效率	0.74 kW/ton	0.65 kW/ton
平均干球	72.8 deg F	78.2 deg F
平均湿球	66.8 deg F	72.4 deg F

提升率 = $(0.74 - 0.65) / 0.74 \times 100\% = 12.11\%$ 。

AI 期平均比基线期更热。

本案例不公布总 kWh 和推算 kWh 节能量。

小结

AI 控制窗口将平均冷站运行效率从 0.74 提升到 0.65 kW/ton，在所述计量边界下提升 12.11%。

控制流程保持 BMS 兼容，将边界检查与策略选择分离，并把操作员和 M&V 反馈回传到 ClimaMind DDQN 策略。

该结果的技术价值在于：频率命令有实测变化、命令包络明确，并且冷站效率计算绑定每日运行数据。