

冷库制冷过程的自适应控制模型构建与优化

魏鑫鑫 李韦毅

烟台中宠食品股份有限公司, 山东 烟台 264000

[摘要]针对传统冷库制冷系统依赖人工判断、定时化霜精度不足、蒸发器结霜导致换热效率下降以及硬件改造成本较高等问题,文中以食品冷库制冷过程为研究对象,构建并优化了一种基于 PLC 的自适应控制模型。该模型以蒸发温度与库房温度的温差为核心判断变量,通过“温差监测、PLC 判断、自动化霜、系统恢复”的闭环逻辑,实现结霜状态的精准识别和制冷过程的自动调节。实践结果表明,该控制方式可使库房温度稳定维持在设定值附近,温差判断精度达到 $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$,化霜响应时间约 8 秒,日均耗电量由 126kWh 降至 111kWh,能耗降低约 12%,年节约电费超 10 万元。该方案依托现有设备和 PLC 程序优化完成,改造成本低、适配性强、安全性高,可为食品、医药等行业冷库智能化运维提供可复制的技术路径。

[关键词]冷库制冷; PLC 自动控制; 温差阈值; 自动化霜; 智能运维; 节能降耗

DOI: 10.33142/ect.v4i8.20332

中图分类号: TB657

文献标识码: A

Construction and Optimization of Adaptive Control Model for Cold Storage Refrigeration Process

WEI Xinxin, LI Weiyi

Yantai China Pet Foods Co., Ltd., Yantai, Shandong, 264000, China

Abstract: In response to the problems of traditional cold storage refrigeration systems relying on manual judgment, insufficient timing defrosting accuracy, reduced heat transfer efficiency caused by evaporator frosting, and high hardware modification costs, this paper takes the refrigeration process of food cold storage as the research object and constructs and optimizes an adaptive control model based on PLC. This model takes the temperature difference between evaporation temperature and warehouse temperature as the core judgment variable, and achieves accurate identification of frost state and automatic adjustment of refrigeration process through closed-loop logic of "temperature difference monitoring, PLC judgment, automated frost, and system recovery". The practical results show that this control method can maintain the temperature of the warehouse stable near the set value, with a temperature difference judgment accuracy of $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$, a defrosting response time of about 8 seconds, and a daily electricity consumption reduced from 126kWh to 111kWh, reducing energy consumption by about 12%. The annual electricity cost savings exceed 100,000 Yuan. This solution relies on existing equipment and PLC program optimization to achieve low renovation costs, strong adaptability, and high safety, which can provide a replicable technical path for intelligent operation and maintenance of cold storage in industries such as food and medicine.

Keywords: cold storage refrigeration; PLC automatic control; temperature difference threshold; automated frost; intelligent operation and maintenance; energy conservation and consumption reduction

1 研究领域

本课题属于食品冷链设备自动控制、制冷系统节能优化和智能运维管理领域,研究范围主要包括冷库制冷过程中的温度监测、蒸发器结霜判断、PLC 自动控制、自动化霜逻辑、压缩机安全保护以及冷库运行能耗优化等内容。其核心是将传统依赖人工经验和固定时间控制的冷库化霜方式,转变为以实际运行状态为依据的自适应控制方式。

在食品存储、冷链物流、宠物食品生产和低温仓储场景中,冷库制冷系统是保障产品质量和存储安全的核心设施。库房温度是否稳定、蒸发器换热是否充分、压缩机是否处于安全工况,直接影响食品品质、设备寿命和运营成本。由于冷库在生产过程中经常存在开关门、人员进出、货物入库、空气湿度变化等情况,蒸发器表面容易形成霜层。霜层增厚后会降低换热面积和空气流通效率,使蒸发

温度进一步下降,形成“结霜-换热效率下降-蒸发温度更低-继续结霜”的恶性循环。

从制冷理论看,蒸发温度对系统制冷量、压缩机功耗和 COP 具有直接影响。蒸发温度升高时,压缩机吸气压力升高,压缩比降低,系统功耗下降;蒸发温度降低时,制冷量下降,压缩机负荷升高,能耗增加。通常情况下,蒸发温度每降低 1℃,制冷量可能下降 3%~5%,功耗可能增加 2%~4%。因此,通过控制蒸发温度与库房温度的合理温差,可以间接识别蒸发器结霜状态,并及时触发化霜动作。

开展这个课题研究的意义主要体现在以下三个方面。第一,提高公司各冷库的库温控制精度,降低因蒸发温度过低导致库内频繁结霜,降温不良导致库温升高,而造成的库内存储的冷冻/冷藏食品变质的风险。第二,减少压缩机加载满负荷运行时间,从而可以实现降低运行功率、压缩机故障率。第三,利用冷库自有的 PLC 控制系统,在几乎不用增加硬件的前提下,实现当前冷库制冷系统的智能控制,提升企业设备管理水平。

2 课题选定背景及设备运行状况

(1) 行业背景与技术现状

宠物食品行业经济当前飞速发展,尽管我们更追求鲜肉加工,但在所难免地会因为生产计划、生产节拍、供应保障等原因,需要冷链储存原料、辅料、半成品及成品。这就对冷库的管理要求日趋严格。当下冷库制冷温度基本上是以制冷班组巡检人员巡检管理,如果冷库内出现结霜现象,要依靠制冷工的实践经验判断是否化霜,即使需要化霜也基本上采取制冷工设定一个固定时长进行化霜的方式。该方式虽然控制逻辑简单,但不能准确反映实际结霜程度,容易出现化霜不及时或过度化霜的问题。化霜不及时会导致换热效率下降,以及压缩机满负荷运行,甚至可能引起压缩机润滑油的碳化;而过度化霜则会造成用电量等能源的浪费,甚至可能影响到库温的稳定性。

针对上述制冷工巡检存在的弊端,目前大部分企业采取的改善措施是设置冷冻过道及快速卷帘门的方式,通过增设一道预冷关卡,来预防、阻止冷库开门时外界空气的进入,且不说这种改善需要投入较大资金进行基建工程,对于发展迅速的宠物食品行业,没有停产整改的时间,以及基建扩建的空间。另外还有一种方式可以避免制冷工巡检化霜,即设定时间定时化霜,不过定时化霜又出现另外的问题,每天的室外环境温度不同、出入库频次不同、出入库货物的湿度不同,这都会影响化霜时间,所以也不能

彻底解决上述问题。所以对于公司而言,亟需一种投入较低、同时又可自动实现化霜功能的库温控制方案,即冷库制冷过程自适应控制模型。

(2) 企业前期运行状况

企业平稳发展期,采用设定时间定时化霜的模式亦未尝不可。但随着宠物食品经济的飞速发展,所需的原辅料(以鸡肉、鸭肉、鱼肉为主)日趋增加,冷库的吞吐量也日趋频繁,在这种情形下,定时化霜模式已不适用。

以公司湿粮工厂某冷藏库为例,原机组采用固定运行时间和固定化霜时间控制:运行时间设定为 200min,随后开始化霜;化霜时间 40min 后开始滴水;滴水时间 20min 后恢复降温。该模式在负荷稳定时可以基本运行,但当车间生产需求增加、开门次数增多、入库货物温度较高时,蒸发器结霜明显增厚,换热效果变差,蒸发温度降低,系统能耗升高。相反,在负荷较低时,固定化霜又可能造成不必要的停机和能耗浪费。

那我们再来看看依靠制冷工巡检这一方案是否可以解决这一问题。制冷工进入冷库,通过观察库房内的结霜情况依据经验进行判断,若其认为需要化霜则操作制冷系统执行化霜指令,若其认为不需要,则继续保持观察。这就对制冷工的专业性要求极高,若误判,则会产生频繁化霜或化霜过晚的问题。此外,我司属于集团性公司,旗下有不同厂址的多个工厂,如果每个工厂均配备制冷工的话,那会产生相当高的人工成本。

3 冷库运行过程存在的问题

通过对烘干制造中心各厂冷库及产业园区冷库的现场勘察与分析,本课题需要解决的问题如下。

第一,采用定时化霜的方式,到时间点强制化霜,结果根本无法根据冷库内是否真正结霜的情况判断化霜,在生产任务重、节奏加快的时候,人员频繁进出冷库时提前预订的化霜时间会与真正的结霜情况出现偏差,不能正确匹配。

第二,采用制冷工判断化霜的方式,如上述所讲,这一方面对制冷工专业度要求极高,要求人员稳定性,导致成本增加;另一方面每个不同厂址的冷库均配备制冷工,造成整体人工成本的增加。

第三,蒸发器结霜会降低换热效率,使蒸发温度继续降低,进而导致压缩机吸气压力下降、压缩比升高、功耗增加,形成能耗上升和制冷能力下降并存的问题。

第四,当吸气压力过低时,系统存在压缩机“带液运行”或液击风险,必须在控制逻辑中加入安全保护机制。

第五,企业不希望通过大规模土建或复杂硬件改造解决问题,因此方案必须尽量依托现有制冷设备和 PLC 控制平台完成,保证低成本、易实施、可维护。

因此,本文准备重点解决的是:如何以蒸发温度与库房温度之间的温差为核心变量,建立一套能够自动监测、自动判断、自动化霜并自动恢复制冷的闭环控制模型,使冷库在不同负荷条件下都能保持稳定制冷、合理化霜和低能耗运行。

4 课题的创新性、难点、取得的成绩和应用效果

(1) 创新性

本课题的核心创新点在于将“温差阈值”作为蒸发器结霜状态的判断依据,建立以 PLC 为执行核心的自适应控制模型。传统控制方式多以固定时间为依据,而本方案将蒸发温度与库房温度的差值作为核心控制变量。当温差超过设定上限时,系统判断蒸发器换热效率下降、结霜较重,自动停止制冷并进入化霜程序;当温差恢复到合理范围后,系统自动结束化霜并恢复制冷。

该控制方式形成了“监测-判断-执行-反馈”的闭环逻辑。监测阶段实时采集库房温度和蒸发温度;判断阶段由 PLC 计算温差并与阈值比较;执行阶段控制电磁阀、压缩机或化霜装置动作;反馈阶段记录化霜时长、温度变化和系统状态,为后续参数优化提供数据基础。这种控制方式能够避免人工误判,也能避免单纯定时控制与实际负荷脱节的问题。

第一个创新点是以温差为核心控制变量,精准判断蒸发器结霜状态,解决传统人工判断误差大的问题,温差判断精度达 $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ 。

第二个创新点是利用既有控制系统,低成本改善。我司各厂冷库的制冷压缩机有德国比泽尔、台湾复盛等多个品牌,而本课题研究不是针对单一品牌,而是不依赖于压缩机的型号及品牌,无论是水化霜还是加热管化霜,都可利用现有制冷系统的控制平台对制冷过程进行自适应优化。对于已经具备 PLC 控制条件的冷库,只需调整控制程序便可实现;对于未具备 PLC 条件的冷库,我司选用小型 PLC 投入实现。这种方式的改造成本远远低于加装冷冻过道或快速卷帘门的方式。

第三个创新点是压缩机的安全系数提升。通过设定“温差阈值”避免压缩机频繁启动,一方面实现了电能的节省,另一方面也提升了设备的使用寿命。同时在控制系统中设置系统压力骤降保护以及化霜超时报警等条件,再利用声震仪每周采集数据进行趋势分析,确保压缩机的安

全运行。

(2) 技术难点

该课题落地实施的难点一是“温差阈值”的确定。该参数设定的差值过低会出现频繁化霜的情况,从而造成停机时间的延长,库房拉温出现断断续续的情况,导致能耗也随之增加;反之参数设定过高则可能出现该化霜时不化,造成霜层过厚,蒸发冷的换热效率下降,长时间不降温压缩机一直满负荷运行,故障风险上升。根据我司产品特性以及冷库运行情况,本方案将蒸发温度与库房温度的温差值设定在 10°C 与 15°C 之间。当该温差大于 15°C 上限时,程序判定为结霜较厚,系统触发自动化霜;当温差位于 10°C 至 15°C 之间时,系统维持当前运行状态;当温差低于 10°C 下限时,压缩机满负荷运行进行拉温。

难点二是蒸发温度如何获取。通常的方法是设置温度传感器,将蒸发温度通过传感器传输到控制系统。本方案则采取不增加硬件的方式,而是利用压缩机本身的参数——吸气压力,自动换算出蒸发温度的方法。自动换算时要去掉异常值及瞬时值的影响。

难点三是系统的安全保护。制冷过程是一个完整的程序,其中制冷、冲霜、滴水和降温几个环节之间存在一定的顺序关系。如果增加温差控制程序后,出现切换不合理,则可能会引发压缩机运行紊乱、故障、拉温不均等问题。因此系统程序需要设置温差计算、异常监测和报警记录功能,必要时可以将参数初始化,保证各动作按逻辑顺序完成。

难点四是该方案要适配我司不同工况。一方面我司冷库数量较多,规格参数不同;另一方面零食、干粮、湿粮、饼干洁齿骨、烘焙粮及冻干粮的原料不尽相同。而冷库蒸发器结霜速率受铜管排数、翅片形式、库内温湿度、出入库频率以及原料温度等因素影响。所以本方案必须允许制冷工根据存储品类和运行工况调整阈值参数,同时保留手动模式,以满足异常情况下的需求。

(3) 方案设计与实施过程

本方案以“精准控制、低成本适配、安全稳定、通用可推广”为构建原则。精准控制方面,系统以蒸发温度与库房温度的温差作为判断指标,设置 $10^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 为主要阈值区间。低成本适配方面,优先利用现有制冷系统和 PLC 平台,避免大规模硬件改造。安全稳定方面,在程序中设置压缩机吸气压力保护、化霜超时报警、传感器故障报警和应急停机机制。通用推广方面,控制逻辑不依赖特定品牌,可适配风冷式、盘管式等不同蒸发器形式。

硬件支撑系统包括库房温度传感器、PLC 模块、执

行元件、通信线路和人机交互界面。库房温度传感器安装在冷库内部蒸发器进风口处，测量精度控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。PLC 模块负责接收温度和压力数据、计算温差、输出控制指令。执行元件主要包括化霜电磁阀、继电器、压缩机控制回路和报警装置。数据传输可采用 RS485 工业总线，必要时通过以太网模块实现多区域集中采集和控制。

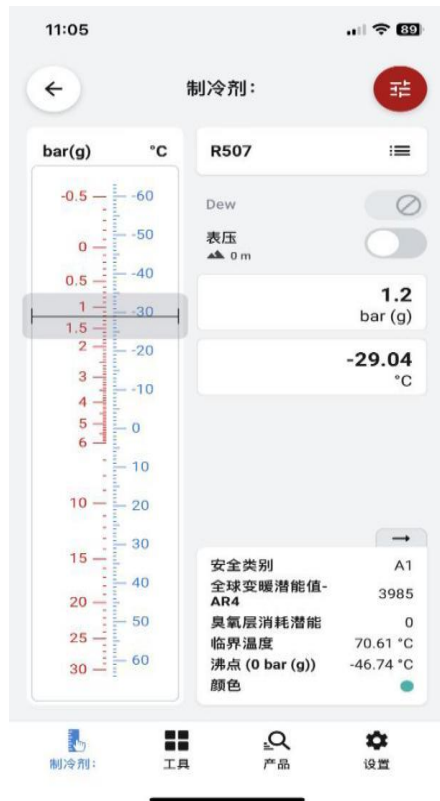


图1 制冷系统参数与蒸发温度显示界面

软件控制系统采用梯形图编程思路，主要包括四个模块。①数据采集模块：读取两路的温度信号，一路是库房温度，另一路是蒸发温度（蒸发温度如上述所讲，依靠吸气压力进行转换，上图1即为吸气压力与蒸发温度的关系图）；②逻辑判断模块：PLC 计算温差后与设定阈值比较；③执行模块：若温差大于 15°C ，输出化霜指令并压缩机停机；若温差处于 $10^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ 之间，则维持当前状态（小提示：化霜停止后执行滴水程序，滴水时间可按现场效果设定为10min左右，防止化霜水残留后再次冻结）；④报警模块：若出现压缩机异常（声震仪检测）、拉温不均等问题，系统发出报警提醒。

（4）取得的成绩与应用效果

该课题在湿粮制造中心2号冷库进行运行测试。该冷库内存储的主要物品为鸡肉、鱼肉等肉类原料，按产品说明书其储存温度要求为零下 18°C 。按照方案中的控制逻辑

进行测试，库房温度稳定维持在 $-18.2^{\circ}\text{C} \sim -18.7^{\circ}\text{C}$ 之间。结果表明，该控制方式完全可以实现冷库制冷过程自适应调整，而化霜响应时间约8s，化霜频率由过去每天8次缩减至每天3次，制冷压缩机故障率下降至0.05%，连续运行无异常，同时能耗降低约12%。

表1 冷库制冷自适应控制模型性能测试结果

测试项目	设计指标	实测结果	达标率
库房温度控制范围	$\leq -18^{\circ}\text{C}$ （设定值）	$-18.2 \sim -18.7^{\circ}\text{C}$	100%
温差判断精度	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.8^{\circ}\text{C}$	100%
化霜响应时间	$\leq 10\text{s}$	8s	100%
设备故障率	$\leq 0.1\%$	0.05%	100%
连续运行稳定性	无异常	无异常	100%
能耗降低率	$\geq 10\%$	12%	100%

现场应用后，冷库在每日开关门不少于5次的工况下仍能稳定运行。库房温度波动范围控制在 $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ 以内，食品存储安全得到保障。能耗方面，日均耗电量由126kWh降至111kWh，能耗降低约12%，按年运行周期估算，年节约电费超过10万元。设备运维方面，故障率由0.1%降至0.05%，压缩机和蒸发器的异常负荷减少，有助于延长设备使用寿命。人工效率方面，操作人员不再需要频繁依靠经验判断化霜时机，可同时管理更多冷库区域。

该控制方式已在宠物食品冷库应用，并形成《冷库制冷系统运维管理标准》，明确日、周、月三级运维清单和故障排查指南。方案兼容风冷式、盘管式蒸发器，单库改造成本可控制在8000元以内，特别适合中小型冷库智能化升级。

（5）行业价值与推广应用

本课题的行业价值主要体现在扩展性方面。首先我司各厂合计十多个冷库，在湿粮制造中心冷库验证成功后，立即扩展到其他冷库，均圆满达成了预期效果。正如上文所讲，本课题的解决方案不依赖特定的制冷压缩机设备的品牌（比泽尔、复盛等），只要冷库具备温度采集和系统控制平台，就可以根据运行参数，确定温差阈值，再根据逻辑进行执行程序设定。所以可以很便利地推广至其他任何公司、任何行业的冷库。

常见使用冷库数量多的行业多在食品、药品领域。我司所在地区市设备协会也成立了专门的节能降碳委员会，食药行业有较多的业务交流机会。利用协会的便利，在更多使用冷库的公司或场景中推广本课题阐述的制冷过程自适应的控制方式，可以减少不必要的化霜停机时间、制冷压缩机满负荷运行时间，提升库温的稳定性和电能的利用效率。随着企业自动化、数字化、信息化管理水平的提

升, 后续还可将该控制方式与 SAP、MOM、MES 以及 EnMS 能耗管理平台连接, 实现多冷库集中监控、远程报警和能源数据分析等升级功能。

5 总结。

综上所述, 本创新课题是以温差阈值为基准, 以智能判断、自动控制执行为抓手, 实现冷库制冷过程自适应控制, 改变了以往制冷工的经验控制以及单纯的设置固定时间控制的旧模式, 实现了系统自动判断、执行和恢复、报警的智能化控制。本课题能够根据蒸发温度与库温的实际差值来判断蒸发器的结霜状态, 准确把握化霜时间, 既能保证正常库温, 又能杜绝无效化霜动作, 同时也能减少压缩机高负载运行时间, 实现了系统稳定性、节能环保及智

能化控制的目标, 具有可推广的实用价值。

[参考文献]

- [1]洪登科.基于霜层可视化及模糊 PID 控制对冷库系统的除霜实验研究[D].天津:天津商业大学,2023.
- [2]黄鑫.浅谈大型制冷系统自动控制与节能分析[J].节能,2017,36(12):34-36.
- [3]韩爽,王长江.冷库制冷系统及其自动化研究[J].电力设备,2020,11(31):22-23.

作者简介: 魏鑫鑫 (1981—), 男, 山东省高密市人, 工程师, 山东大学机械工程专业毕业, 现就职于烟台中宠食品股份有限公司, 从事机械工程师工作, 职务是设备与安全生产总监。