

文章编号: 1671-6612 (2025) 02-261-07

冷链物流节能技术综述

万 勇¹ 吴宇帆² 徐文娟¹ 李 超² 王 翔²

(1. 四川省农业机械设计研究院 成都 610065;

2. 成都理工大学 成都 610059)

【摘 要】 在我国能源日益紧张、环境被持续污染的严峻形势下, 对能源消耗占比较大的冷链物流需求仍在增大, 因此其节能降耗问题成为研究热点。首先介绍冷链物流的含义并阐述了我国冷链物流的发展现状, 再抛出在节能方面的问题与不足, 提出了从人工管理和设备优化两个角度出发的节能技术, 为冷链物流节能降耗的发展提供参考。

【关键词】 冷链; 物流; 制冷; 节能技术

中图分类号 TB61+1/TB663 文献标志码 A

A Overview of Energy Saving Technologies in Cold-Chain Logistics

Wan Yong¹ Wu Yufan² Xu Wenjuan¹ Li Chao² Wang Xiang²

(1. Sichuan Agricultural Machinery Design and Research Institute, Chengdu, 610065;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059)

【Abstract】 In the severe situation of energy scarcity and continuous environmental pollution in China, the demand for cold chain logistics, which accounts for a large proportion of energy consumption, is still increasing. Therefore, the issue of energy conservation and consumption reduction has become a research focus. Firstly, the meaning of cold chain logistics is introduced, and the current development status of cold chain logistics in China is elaborated. Then, the problems and shortcomings in energy conservation are pointed out, and energy-saving technologies from the perspectives of manual management and equipment optimization are proposed, providing reference for the development of energy conservation and consumption reduction in cold chain logistics.

【Keywords】 Cold chain; Logistics; Refrigeration; Energy saving technology

0 引言

随着我国经济的加速发展, 群众的生活水平较以前有了很大提高, 在此种大环境下, 食品安全成为了人民生活品质的重中之重。全国各地的冷链物流行业正在呈现着持续、高速发展的态势, 食品冷藏业也进入技术更新的关键时期。冷链物流相比于常温物流可以给予货物更加良好的储存环境, 提高货物的出库品质, 但是其制造成本和能耗要远高于

常温物流。据统计, 全球有 40% 的食物都需要冷藏, 而在食品冷藏上消耗的电力达到总电力消耗量的 11%^[1], 在能源日益枯竭的紧张局面下, 冷链物流的节能降耗将对社会的可持续发展显现出重要意义。

1 冷链物流

冷链物流是利用温控、保鲜等技术; 冷库、冷

基金项目: 四川省科技计划项目 (2023YFG0051)

作者简介: 万 勇 (1981-), 男, 本科, 正高级工程师, E-mail: 75926298@qq.com

通讯作者: 李 超 (1989-), 男, 博士研究生, 副教授, E-mail: lichao19@cdut.edu.cn

收稿日期: 2024-04-17

藏车、冷藏箱等设备,确保冷链产品在初加工、储存、运输、流通加工、销售、配送等全过程始终处于规定低温环境下的专业物流方式。它是以冷冻工艺学为基础原理,制冷技术为手段发展起来的,主要目的在于满足人们对新鲜食品的需求,使食物在运输途中尽量减少损失和浪费。具体而言,冷链物流的适用范围包括以肉、禽、蛋、水果、蔬菜、水产品为主的初级农产品;以奶制品、速冻食品、快餐原料为主的加工食品;以医药制剂、生物制品为主的特殊商品。

为了保证易腐生鲜物品的品质,冷链物流有以下几点特征:(1)复杂性。冷链物流的最终质量取决于冷链的储藏温度、流通时间和产品本身的耐储藏性,冷藏物品在流通过程中质量随着温度和时间而变化,不同的产品都必须要有对应的温度控制和储藏时间,这就大大提高了冷链物流的复杂性;(2)协调性。由于易腐生鲜产品的不易储藏性,要求冷链物流必须高效运转,物流过程中的每个环节都必须具有协调性,这样才能保证整个链

条的稳定运作;(3)高成本性。为了确保易腐生鲜产品在流通各环节中始终处于规定的低温条件下,必须安装温控设备,使用冷藏车或低温仓库,为了提高物流运作效率又必须采用先进的信息系统等。这些都决定了冷链物流的成本要比其他物流系统成本更高^[2]。

冷链物流的体系主要有原料、预冷处理、食品加工厂、保鲜储藏、卖场和消费者六个环节,其中原料在当地被采摘后需要立即进行预冷处理(空气预冷、水预冷、真空预冷)以延长原料保鲜期和降低冷库系统的运行能耗。预冷后的原料运送至食品加工厂进行加工后再进行贮藏(为适应不同物料的贮藏需求,冷库可分为高温、中温、低温三种类型,高温冷库温度在 -5°C 至 $+7^{\circ}\text{C}$ (也称为保鲜库),中温冷库温度在 -10°C 至 -23°C (也称为冷藏库),低温冷库温度在 -23°C 至 -30°C (也称为冷冻库))、售卖等流程,期间的运输过程需要采用公路、铁路、水路等形式的冷藏运输以保证物料的品质。图1为冷链物流的体系图。

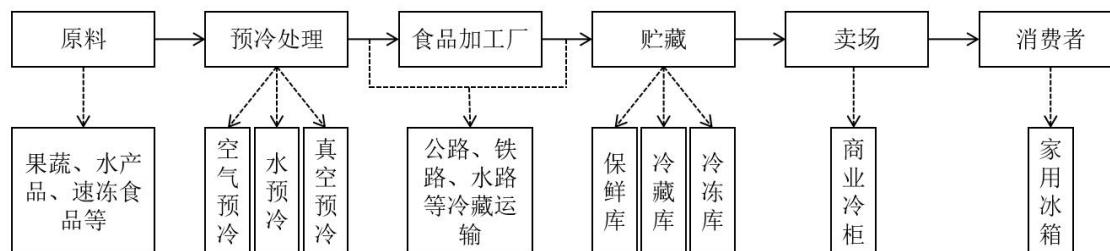


图1 冷链物流体系图

Fig.1 Cold chain logistics system diagram

2 中国冷链物流的发展现状

我国作为农业生产和农产品消耗大国,对于冷链物流的需求是极大的。近年来,群众的收入水平持续提高,生活质量也得到很大提升,这使得冷链物流的行业规模显著扩大。据统计,2022年我国冷链物流总需求量达3.35亿吨,大约是2016年的

三倍;冷链物流的市场总规模达4916亿元,近六年复合增长率达到14.3%;冷库总容量达8365万吨,近六年复合增长率为12.1%;冷藏车保有量约39万辆,接近六年前的四倍^[3]。表1为近六年我国食品冷链物流需求总量、冷链物流市场总规模、冷库总容量、冷藏车保有量具体数据。

表1 中国冷链物流近年发展情况

Table 1 The development of cold chain logistics in China in recent years

冷链物流	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
需求总量(亿吨)	1.25	1.47	1.88	2.33	2.65	3.02	3.35
市场总规模(亿元)	22.10	2550	2886	3391	3832	4586	4916
冷库总容量(万吨)	4200	4750	5238	6053	7080	7858	8365
冷藏车保有量(万辆)	11.5	14	18	21.47	28.67	34.14	39

就能耗而言,我国冷链物流的能耗高、效率低,在冷藏和运输方面,我国的单位能耗是发达国家的2~3倍,冷链物流的成本占总成本的比例高达70%,为发达国家的2倍以上^[5],其原因是:(1)冷藏运输的技术落后和规范性较差。我国冷链运输车辆制造工艺、密封性能较差,很多操作者在运输货物前未进行预冷或未有效预冷,导致需要车载制冷系统对货物进行直接制冷,其成本远远高于地面预冷。另外,货物在车厢内码垛方式、车厢内的送风口的布置不合理和温度的控制精准度低也使得能耗升高。(2)冷库的制冷技术落后、设计不合理与管理不到位。冷库制冷系统的耗电量占冷库总体耗电量的80%左右,但是我国现有冷库很多设计落后、加工工艺差、设施陈旧甚至超期服役,这导致了冷库的能耗浪费。据统计,我国冷库平均耗电量为131kWh/m³,日本为48~56kWh/m³,英国为60kWh/m³。另外,冷库使用者的管理不到位也是导致能耗升高的重要因素,许多冷库管理者对冷库

温度的调节全凭经验,库内物料码垛不规范,出风口位置设置不合理导致库内温度不均匀且回升快,制冷系统频繁启动,使用者对库门开关频繁,开门时间过长也导致能耗上升。(3)我国东西部冷链发展程度差异较大,导致能源浪费严重。我国经济更加发达的东部地区虽然拥有更多的冷藏设备,但是依然无法满足需求,经常出现冷藏车和冷库超载的情况,而西部地区货源稀缺,冷藏车和冷库常常不能满载,导致能源浪费。

3 冷链物流的节能降耗措施

冷链物流的节能降耗指的是采取一系列措施,在保证冷链物流正常运作的同时,降低能源消耗和减少环境污染。其中包括选择高效节能的冷藏设备、采用新能源车辆、优化运输路线和载货量等。在整个冷链物流中,冷处理、贮藏、运输和销售的能耗所占比例大约分别是23%、5%、19%和53%,各环节的能耗以及节能潜力如表2所示^[6]。

表2 冷链物流中各环节的能耗和节能潜力

Table 2 Energy consumption and energy-saving potential of each link in cold chain logistics

环节	排放/($\times 10^3 \text{tCO}_2 \cdot \text{年}^{-1}$)	能耗量/GWh $\cdot \text{年}^{-1}$	节能百分比/%	节能量/GWh $\cdot \text{年}^{-1}$
销售	3100~6800	5800~12700	30~50	6300
餐饮制冷	2100	4000	30~50	2000
运输	1200	4820	20~25	1200
贮藏	500	900	20~40	360
预冷	20~330	310~610	20~30	180
速冻	120~220	220~420	20~30	130

3.1 销售

冷链物流销售环节是冷链物流体系中的关键一环,它确保了易腐食品在最终到达消费者手中时仍能保持其新鲜度和品质,其节能降耗方式主要有两点:(1)电商与冷链物流协同,随着生鲜电商的崛起,许多生鲜电商企业开始自主建设冷链平台,不仅自用,还为平台上的其他客户提供冷链物流服务。科学的协同模式将电商与冷链物流紧密结合,实现从产地到餐桌的全程冷链覆盖,可以在很大程度上减少能耗且保障了生鲜产品的品质。刘成^[7]深入分析电商与物流协同度的影响因素,探析其协同机理,从动因、自组织过程、相变三个角度提出将农产品电商与物流结合成一个整体的协同

路径,以达到降低农产品供应链节点的能耗和流通成本的目的。(2)区块链技术,将区块链技术应用于冷链物流领域,以提高冷链物流的透明度、可追溯性、安全性和效率,区块链技术可以自动化冷链物流中的许多任务,如文件处理、支付和运输安排等,从而简化流程、提高效率并降低运营成本。

3.2 冷处理

冷处理是冷链物流中的重要环节,其主要目的是在保证产品质量和新鲜度的同时,最大程度地降低产品在运输和贮藏过程中的温度上升,从而延长产品的保质期,其有预冷和速冻两种方式,如表3所示,不同的冷处理方式,适用于不同的货物,因此需根据需冷藏的产品综合成本进行冷处理。

表 3 冷处理方式的原理和特点

Table 3 The principle and characteristics of cold treatment methods

冷处理方式		原理	特点
预冷	冰水预冷	将产品浸泡在冰水中，利用冰水混合物的低温来降低产品的温度	冻结速度快，适用于需要快速降温的产品，如水果和蔬菜等
	真空预冷	将产品放入真空室中，利用真空环境下的低温来降低产品的温度	具有快速降温、节能环保等优点，但需要使用昂贵的真空设备
	强制通风预冷	通过强制通风的方式，将冷空气吹向产品表面，利用空气的低温来降低产品的温度	这种方法适用于需要中等降温速度的产品，如肉类、鱼类等
	冰蓄冷预冷	通过在预冷设备中蓄存大量冰块，利用冰块的低温来降低产品的温度	适用于需要长时间低温储存的产品，如疫苗、血液等
速冻	隧道式速冻	将产品在运输途中通过一条隧道，在隧道中通过低温空气进行速冻	冻结速度快，但需要大量的冷空气，因此能源消耗较高
	液氮速冻	将产品在液氮中浸泡，利用液氮的超低温进行速冻	冻结速度非常快，且能源消耗低，但需要使用昂贵的液氮设备
	真空速冻	将产品在真空环境中进行速冻	冻结速度非常快，且能够保持产品的原有口感和质地，但需要使用昂贵的真空设备

选择适当的冷处理方式除了可以防止产品在运输和贮藏过程中的温度上升，避免冷链断裂，保证产品的安全和可靠性，同时也可以降低产品的后期冷藏能耗。Pedersen^[8]比较了家禽肉类的几种预冷方式，结果显示冰水预冷的能耗是强制通风预冷的1/5。Chen^[9]指出真空预冷的能耗是最少的，其能效比为2.65，而冰水预冷和强制通风预冷的能效比分别为1.2和0.52。

另外对于我国农产品产地分散、不同地区产量差异大的特点，不科学的预冷资源分配会导致大量的能源浪费，因此，如何合理调度有限的移动式分级车、预冷车等预冷服务资源是一个节能降耗、减少农产品损耗量的重要研究点。王旭坪^[10]等就分级车和预冷车的调度问题通过混合遗传算法对其车辆分配、服务路径、服务时间作出优化。结果表明，在求解质量上，该算法最优值相较于标准遗传算法平均改进幅度为12.32%，相较于变邻域搜索算法平均改进幅度为17.13%，表明其具有显著优势，有更好的协同调度作用。

3.3 制冷系统

冷链制冷系统的组成包括制冷设备、运输工具等，制冷设备是其中的核心组成部分，包括制冷机组、冷库等。此部分的节能降耗是至关重要的。

3.3.1 制冷机组

制冷机组的作用是产生冷源，通过制冷剂的循

环和压缩，将热量从冷库内排出，从而降低库内温度。对制冷机组的节能降耗可以通过以下两个途径：（1）使用高品质变频压缩机。变频压缩机相较于定频压缩机有：节能、稳定、高效的优点，蔡婷^[11]设计了小型冷库的变频模糊控制系统，将传感器采集到的温度数据经模糊控制给出适当的压缩机输入信号，变频控制板根据压缩机频率输入信号采用FOC控制方法驱动压缩机以实现针对不同温度采用对应的转速，实验结果表明，采用此种变频压缩机相较于原来的定频压缩机节能约30%。（2）使用高效冷风机。在同等工况下，采用较小的蒸发温差，合理提高蒸发温度，以提高整个系统的运行效率，确保冷凝器迅速凝结，有利于迅速降低周边环境的温度，达到节能的目的，有研究表明，蒸发温度每升高1℃，可使系统冷量增加约2.4%^[12]。

3.3.2 融霜机制与方法

先进、智能的融霜机制可以使融霜操作做到更加精准、节能，定时融霜法是最早使用的融霜机制，此种方式极易出现误融霜的情况，能耗高；更加节能且普遍的是时间-温度融霜法，此种方式需蒸发器盘管温度和时间均达到预设值时才启动融霜，相较于定时融霜更加精准。

霜层的厚度也是融霜启动的重要判定因素，YE H Y 等^[13]通过微压计获得霜层厚度引起的蒸发器两端压力变化，从而间接获得霜层厚度，制定时

间-温度-压差除霜法,此机制融霜效率高,但是如果 有异物遮挡蒸发器表面时会出现误融霜的情况。XIAO J^[14]等通过在蒸发器盘管两端安装红外收发器,由红外接收器产生的电信号判定霜层厚度从而 决定是否融霜,此种方式所测得的霜层厚度 95%的 数据偏差都不超过 10%,有较高的精度,但是成本 较高。林明^[15]等使用摄像装置对蒸发器结霜部位进 行图像采集,再将 有霜图像和无霜图像进行人工标 注,利用搭建好的神经网络进行训练并实现对图像 的识别,通过识别结果进行融霜控制,此种方式拥

有较好的精度,但是对于摄像装置的安装要求高、 光源要求高。

融霜方法的不同也对制冷机组的能耗有重要 影响,目前较为普遍的融霜方法为电加热融霜和热 气融霜,前者虽然融霜快且彻底,但是能耗高,后 者更加节能,但是对库温影响较大,有学者^[16-18] 针对热气融霜法,设计了一种冷风机回风隔热装置 用于在除霜时隔绝蒸发器与冷库以避免热量散失, 可以有效减小库温波动。融霜方法及其优缺点如表 4 所示。

表 4 各种融霜方法及其优缺点

Table 4 Various defrosting methods and their advantages and disadvantages

融霜方法	优点	缺点
电加热融霜法	除霜时间短,系统简单	耗能高
热气融霜法	除霜时间短,设备简单	库温波动较大
蓄能融霜法	除霜时间短,节能	系统复杂,成本较高
液体制冷剂融霜法	库温波动小,系统效率高	系统复杂
连续融霜法	结霜严重时库温波动小,除霜速度快	结霜较少时除霜库温波动大
气动融霜法	除霜快,库温波动小	系统复杂
超声波融霜法	除霜速度快	系统复杂,根部霜层无法除完
水或盐水融霜法	可以不停机除霜	有二次结霜风险,成本较高

3.3.3 贮藏

冷库是冷链物流中贮藏易腐产品的关键成 员,其内部温度和湿度等条件需要严格控制,因此 冷库的品质也是保证产品质量、降低整体能耗的 关键点。目前大部分冷库的维护材料采用聚氨 酯或聚苯乙烯夹芯板,可以达到良好的保温性能, 在此基础上加入蓄冷板则效果更佳,孙锦涛^[19]等 通过对某一冷库进行有无蓄冷板,库内温度波动 情况的实验,结果表明放置了高密度聚乙烯蓄冷 板的冷库较未放置的库温波动值更小、不均匀系 数更小、库温回升时间更长,由此可见,添加蓄 冷板可使冷库有更好释冷、保冷效果。王贺^[20]通 过对高度一定的不同库体的传热面积计算,得出 库体长宽越接近时传热面积越小的结论,因此冷 库应尽量设计成正方体结构,另外他还提出了圆 柱形冷库的概念,此种冷库可以使得库内温度流 场更加均匀。

在冷库的使用过程中为避免因库门开关导致 的能源浪费,可以采取以下措施:(1)空气幕。 空气幕可以有效隔离两个环境,安装在冷库门处可 以起到隔热防潮防虫的作用。王哲^[21]等使用天津商

业大学一冷库进行了不同形式空气幕的性能测试, 结果表明单侧送风式空气幕空气渗透量最多,性能 最差,垂直循环式空气幕空气渗透量最低,性能最 佳。(2)设置缓冲间。陈远方^[22]等提出在超低温 冷库门处设置具有自动连锁控温系统的缓冲间,并 且使低温侧、高温侧的门避免同时开启,从而有效 减少冷库冷量的流失。(3)门框加热。传统电热 丝持续加热的方式本身具有较高的能耗,因此需要 更节能的加热方式,江发生^[23]通过在在冷库门框布 置加热油管,将加热的介质注入油管中,当介质冷 却后再加入新的热介质,以此循环,避免了传统方 式的持续加热,降低了能耗。

另一方面,冷库中冷风机和货物的位置会影响 库内的温度均衡。石敏^[24]通过 CFD 技术对一冷库 内冷风机不同安装位置、不同风速、不同货物堆放 位置进行了温度场模拟与分析。最终得出结果为冷 风机安装在库门的对侧具有最快的降温速度;在库 内达到稳态时,冷风机的风速为 9.3m/s 会使冷库 内温度趋于一致;无分层货物在正对冷风机出风口 摆放降温最快且最均匀,当货物以间隔为 0.1m 码 垛且高度超过冷风机出风口时降温最不均匀。

3.4 能耗管理

要做到对制冷系统的更高层次的节能,就需要对其做更加深入的分析,建立各种运行数据与能耗的关系、制定节能与非节能数据的标准,从而实现节能诊断的反馈系统。

诊断的本质是基于现有数据的模型识别,以及基于过去数据对未来数据或其他数据集模型的预测性诊断。因此,选择预测精度高的预测模型是建立诊断模型的关键。黄芳^[25]等利用时序指数平滑法对银川两个冷库进行了能耗预测,通过将预测值与实际值相对比,验证了预测模型的合理性;杜会军^[26]通过 PCA 方法对空调系统通风、温度和湿度能耗数据三维特征样本进行降维,通过特征归一化处理,查找出异常数据,利用 BP 神经网络完成能耗动态预测,经验证,该算法具有高准确度。

将预测数据作为节能数据,则可以建立制冷系统的异常运行判断标准,给予控制系统或者管理人员反馈,对于非节能数据,则需对其原因进行分析。如周勇^[27]利用 TRNSYS 的动态模拟,将温度、流量、压力的逐时预测值作为制冷机组本应达到的标准,当实际值与预测值差距较大时,则给予系统对应的节能控制建议或者故障检测,建立了空调系统的能耗异常诊断与故障检测系统。

3.5 削峰填谷

在保证产品的冷藏质量的情况下,制冷设备减少用电高峰期的运行时间,充分利用平段或低谷期进行制冷可以有效降低用电成本,史雪菲^[28]等使用位于成都的一冷库进行峰谷电运行实验,将两台完全相同的冷库分别进行峰谷电运行和全天运行,结果表明前者的运行成本仅有后者的 81%。

削峰填谷主要是通过通过在电力使用的低谷时期储存多余的电力,然后在高峰期释放出来以满足能源需求的一种节能技术,可以平衡电力供需之间的差异,对提高电力使用效率、降低运营成本和提高电力系统稳定性等方面都有重要作用。在冷链物流中应用削峰填谷则主要体现为蓄冰技术,在夜间电价较低的时候启动制冷压缩机将水制成冰,在白天电价较高的时候让冰融化释放冷量,以减少用电高峰期制冷压缩机的运行时间,降低成本。但是传统蓄冰槽的设计具有蓄冷密度低和体积大的缺陷,因此吴丽媛^[29]等将蓄冷板与削峰填谷技术相结合,进行了板式冰蓄冷冷库的恒温特性实验,将保温箱安

装蓄冷板在夜间进行制冷。在白天通过蓄冷液释放冷量进行制冷的 8 小时内,温度波动为 0.6℃,波动较小,证明此保温箱具有良好的保温特性,可以大大减少白天制冷设备的运行时间,达到了节能降耗的目的。

4 结论

我国冷链物流还具有较大的节能降耗空间,无论是从总体上对各环节的协同调度,还是具体到每台设备的性能优化和管理,都需要开发者和使用者的共同努力。通过一系列的措施,可以有效降低冷链物流的能源消耗和运营成本,进一步推动我国节约能源和保护环境的前进步伐。

参考文献:

- [1] 申江,宋烨,齐含飞,等.易腐食品冷藏链节能减排新技术研究进展[J].制冷学报,2011,(6):69-73.
- [2] 李晶.水产品冷链物流绩效评价体系研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [3] 吴米加,王月.支持冷链物流发展路径政策研究[J].农业发展与金融,2023,(3):25-30.
- [4] 吴子瑜,唐洁.生鲜冷链物流仓储问题探讨[J].合作经济与科技,2023,(3):88-89.
- [5] 王文铭,刘晓亮.我国冷链物流能耗现状及对策研究[J].中国流通经济,2011,(10):29-33.
- [6] JAMES S J, JAMES C. Improving energy efficiency within the food cold-chain[C]. The 23rd IIR International Congress of Refrigeration, 2011,(885):2-3.
- [7] 刘成.农产品电子商务与物流协同机理与路径研究[D].贵阳:贵州大学,2021.
- [8] PEDERSEN R. Advantages and disadvantages of various methods for chilling of poultry, Landbrugsministeriets Slakteri og Konserverlaboratorium[R]. Copenhagen, Denmark, 1979:189.
- [9] CHEN YL. Vacuum cooling and its energy use analysis[J]. Journal of Chinese Agricultural Engineering, 1986,(32):43-50.
- [10] 王旭坪,王悦,李娅,等.果蔬采后分级和预冷车辆协同调度模型与算法[J/OL].系统管理学报,20230619.1637.002.
- [11] 蔡婷.小型冷库变频控制系统的设计与实现[D].沈阳:东北大学,2016.

- [12] 仲维勤.冷库节能技术的探讨[J].制冷,2011,30(2):61-65.
- [13] YE H Y, LEE K S. Performance prediction of a finand-tube heat exchanger considering air-flow reduction due to the frost accumulati--on-ScienceDirect [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2013,67(12):225-233.
- [14] XIAO J, WANG W, ZHAO Y H, et al. An analysis of the feasibility and characteristics of photoelectric technique applied in defrost control[J]. International Journal of Refrigeration, 2009,32(6):1350-1357.
- [15] 林明,孙巍,孙丹,等.基于深度学习的图像识别技术在除霜系统中的应用[J].办公自动化,2021,26(17):22-24.
- [16] WANG D, JIANG J, TAO L, et al. Experimental investigation on a novel cold storage defrosting device based on electric heater and reverse cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,127:1267-1273.
- [17] 申江,路坤仑,李慧杰,等.附加保温融霜装置的冷风机融霜试验研究[J].制冷学报,2014,35(4):104-107.
- [18] 董立桥,谈向东,厉建国,等.附加回风隔断装置的冷风机融霜试验[J].食品与机械,2018,34(4):99-102,174.
- [19] 孙锦涛,游辉,谢晶.蓄冷板对冷库保温的影响实验[J].包装工程,2022,43(13):107-116.
- [20] 王贺.冷库系统节能及优化研究[D].重庆:重庆大学,2008.
- [21] 王哲,张桦,申江,等.不同形式冷库空气幕性能对比分析[J].低温与超导,2022,50(6):84-90.
- [22] 陈远方,扶鹏宇,李龙雨,等.超低温冷库的创新设计技术[J].成组技术与生产现代化,2023,40(2):47-49.
- [23] 江发生.工业冷库门节能技术开发与应用[D].广州:华南理工大学,2010.
- [24] 石敏.基于 CFD 的小型冷库节能优化研究[D].武汉:湖北工业大学,2021.
- [25] 黄芳,闫锐,牛金洲.基于时序指数平滑法的冷库能耗预测模型构建[J].上海节能,2023,(3):336-341.
- [26] 社会军.基于 PCA-BP 神经网络的智慧建筑暖通空调能耗预测[J].制冷与空调,2023,37(2):225-230.
- [27] 周勇.空调系统的能耗诊断与故障自动检测研究[J].自动化与仪器仪表,2012,(4):26-27.
- [28] 史雪菲,牛新朝,黄广峰,等.某低温冷库峰谷电运行和全天运行对比分析[J].制冷,2020,39(1):57-59.
- [29] 吴丽媛,宋文吉,高日新,等.基于板式冰蓄冷的冷藏库恒温特性的实验研究[J].制冷学报,2012,33(5):66-69.

(上接第 217 页)

- [12] CHEN Y, DENG S, XU X, et al. A study on the operational stability of a refrigeration system having a variable speed compressor [J]. International Journal of Refrigeration, 2008,31(8):1368-1374.
- [13] XIA Y, DING Q, JIANGZHOU S, et al. A simulation study on the operational stability of an EEV-controlled direct expansion air conditioning system under variable speed operation[J]. International Journal of Refrigeration, 2019,103:115-125.