

环境因素对冷库地坪立柱散冷影响的数值模拟

Numerical simulation of the influence of environmental factors on the column dissipating cooling of cold storage floor

孙小红

SUN Xiao-hong

(北海职业学院机电工程系, 广西 北海 536000)

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Beihai Vocational College,
Beihai, Guangxi 536000, China)

摘要: 为防止冷库地坪立柱散冷导致地坪局部冻胀, 提高冷库科学管理水平, 降低建筑能耗, 建立了某冷间通风地坪及立柱模型, 以地坪及立柱散冷量、立柱附近温度为指标, 探讨了室内温度、室内对流换热系数、通风管进口风速、风速对散冷量及温度的影响。结果表明: 立柱加速散冷耗, 室内温度越低, 散冷量越大, 地坪温度越低, 对流换热系数对此影响不明显; 通风管进口通风温度越高、风速越大, 散冷量越多, 地坪温度越高, 通风管进口风速 $> 1 \text{ m/s}$ 时对散冷量和温度的影响减缓。当通风温度为 279 K 、室内温度 $\geq 246 \text{ K}$ 时, 地坪无冻胀区, 此时需开启机械通风装置维持通风管进口风速 $\geq 1 \text{ m/s}$; 当通风温度增加至 281 K 、室内温度 $\geq 240 \text{ K}$ 时, 无需机械通风, 维持通风管进口风速 $\geq 0.5 \text{ m/s}$ 可预防地坪冻胀; 当通风温度上升至 283 K 、室内温度 $\geq 240 \text{ K}$ 时, 无需机械通风, 维持通风管进口风速 $\geq 0.3 \text{ m/s}$ 可预防地坪冻胀。立柱保温模型表明立柱散冷量明显减少、地坪温度提高。

关键词: 环境因素; 冷库地坪; 立柱散冷; 数值模拟

Abstract: Modeling of the ventilation floor and the column of a cold storage was investigated. The aim was to prevent the local frost heaving of the floor caused by the scattered cooling of the floor column of the cold storage, as well as to improve the scientific management level of the cold storage and reduce the building energy consumption. Using the cooling capacity of the floor and column, and the temperature near the column as indexes, the influence of the indoor temperature, indoor convective heat transfer coefficient, inlet air temperature of ventilation pipe and wind speed on the cooling capacity and temperature were studied. The

results showed that the cooling dissipation was accelerated by the column. The lower the indoor temperature, the greater the cooling capacity and the lower the floor temperature, while the effect of convective heat transfer coefficient were not significant; The inlet air temperature and the wind speed could affect the cooling capacity and floor temperature positively. The effect on the cooling capacity and temperature was reduced when the wind speed was greater than 1 m/s . It was also found that when the ventilation temperature 279 K and the indoor temperature $\geq 246 \text{ K}$, no frost heaving area on the floor could be detected. Moreover, it was necessary to open the mechanical ventilation device to maintain $\geq 1 \text{ m/s}$; when the wind temperature increased to 281 K and the indoor temperature $\geq 240 \text{ K}$, the mechanical ventilation was not necessary, and the floor frost heaving could be prevented by maintaining the wind speed $\geq 0.5 \text{ m/s}$; when the wind temperature rose to 283 K and the indoor temperature $\geq 240 \text{ K}$, the floor frost heaving could be prevented, and there was no need for the mechanical ventilation and the floor frost heave could be prevented by maintaining the wind speed $\geq 0.3 \text{ m/s}$. The thermal insulation model of the column showed that the cooling capacity of the column was significantly reduced and the floor temperature increased.

Keywords: environmental factors; cold storage floor; column dissipating cooling; numerical simulation

冷库作为冷链物流最重要的基础设施, 其主要功能是保障物品低温下贮藏不变质。“冷桥”的存在使冷库维持低温运行的能耗加大, 0°C 以下还会使冷桥附近围护结构中的水分冻结成冰, 体积膨胀, 导致围护结构开裂, 降低保温效果。冷库地坪上的钢筋混凝土立柱即冷桥, 从室内穿过地坪进入土壤层, 由于钢筋传热系数明显大于其他部位, 使得冷量集中地从立柱快速传入地下, 导致冷量损失、地坪立柱附近环境恶化。

基金项目: 广西职业教育教学改革研究项目 (编号: GXGZJG2018B080)

作者简介: 孙小红 (1971—), 女, 北海职业学院副教授, 硕士。

E-mail: annasunxuzhan@126.com

收稿日期: 2020-09-14

地坪防冻常用的处理措施有设框架架空层、设地垄墙通风层、砂垫层埋通风管、地坪埋加热管等^[1]。对冷库而言,其并不总是在设计环境下运行,地坪立柱是地坪防冻胀的薄弱环节,研究环境因素对地坪立柱影响和立柱附近温度情况对保障整块地坪不被冻胀十分关键。刘金平^[2]对某冷库地坪 $\Phi 90$ 通风管的温度进行了测试,由于管径过小,流通截面积仅为设计规范推荐 $\Phi 250$ 管截面积的 13%,且长度过长,会导致通风管内空气的流动情况很差,无法靠室外热空气在通风管内以自然通风的方式加热土壤,土壤出现冻胀,增设机械通风加热土壤可以保持其正温而不被冻胀;高祖锟^[3]对冷库地坪机械通风防冻进行了传热分析,提出了当外界环境温度 $<16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时采用加热空气在封闭通道中流动,当环境温度 $\geq 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时关闭加热风道、采用新风开式循环以防地坪冻胀的措施,建议根据气象参数布置通风管道、在防冻胀前提下限制通风管热量导致的冷间负荷增加;贾景福等^[4]研究了通风流速变化时冷库地坪通风管上、中、下表面温度的波动规律,提出了当流速增大到一定程度时对地坪通风防冻系统传热性能的影响明显减弱,当通风管间距为 1.5 m 时,流速选取 1.5 m/s 可满足防冻要求和节约机械装置通风运行能耗;陈曦等^[5]建立了冷库地坪通风防冻系统的计算模型,发现通风管散冷量和通风管温度均随风道内流速的增大而增加,且风道内流速不宜过大,不同工程应有取值上限;孙小红等^[6]研究了冷库地坪通风管散冷与风速的关系,发现无论风速取何值时,通风管壁的温度随位置的变化呈先上升后下降再上升的趋势,风速增大越有利于土壤防冻。上述研究多是为冷库设计提供理论依据,未涉及冷库运行管理中运行参数的变化对立柱附近地坪冻胀和冷耗的影响。

冷库地坪运行环境因素主要有室内温度 T_w 、室内对流换热系数 α 、地坪通风管进口风温 T_n 、风速 v 。数值计算提供了一种冷桥计算方法,其通过计算机模拟,对冷桥的传热进行近似于理论值的求解^[7]。文章拟针对广西北海某水产冷库建筑参数,在 CFD 软件上建立冷库地坪、通

风管及立柱模型,以立柱散冷量和立柱附近最低温区为评价指标,讨论环境因素对其影响,为冷库安全低能耗运行方案设计与调整提供依据。

1 建筑模型

1.1 建筑尺寸与地坪构造

以一冷间地坪为研究对象,其建筑尺寸如图 1 所示,地坪下 3.2 m,地坪上立柱净高 6.4 m,地坪长 24 m,宽 8.7 m,内埋通风管,管径 0.3 m,管间距 1.5 m,立柱截面 $0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}$,立柱构造如图 2 所示。

地坪结构由钢筋混凝土面层、防水卷材、保温层(聚苯乙烯泡沫塑料)、钢筋混凝土、填沙层(含通风管)、混凝土和土壤层组成,各层厚度及物性系数见表 1。

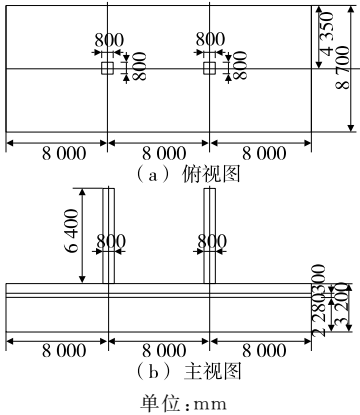


图 1 地坪、立柱及通风管建筑示意图

Figure 1 Floor, column and ventilation pipe building schematic diagram of column

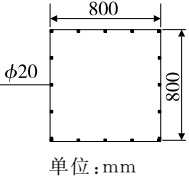


图 2 立柱钢筋构造示意图

Figure 2 Schematic diagram reinforcement structure

表 1 地坪各层材料尺寸及其热工参数

Table 1 Material size and thermal parameters of each layer of floor

构造层材料	厚度/m	导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
钢筋混凝土面层	0.150 0	1.740	2 400	837.36
防水卷材 1	0.001 2			
聚苯乙烯挤塑板	0.250 0	0.039	18	1 172.30
防水卷材 2	0.002 0			
水泥砂浆找平	0.020 0			
钢筋混凝土	0.100 0	1.740	2 400	837.36
填沙层	0.500 0	1.160	1 980	1 130.44
混凝土	0.100 0	1.510	2 280	711.76
土壤层	3.200 0	0.093	2 650	1 130.44

1.2 模拟模型

为减少运算及数据比较,取局部地坪、立柱、通风管为模拟单元如图 3 所示,模型长 3 m,地坪上立柱 3.2 m (实际立柱中部传热很少),其他尺寸与实际一致。另外,忽略防水卷材热阻,找平层与其下的钢筋混凝土合并处理,即假设地坪构造由钢筋混凝土面层、保温层、钢筋混凝土承重层、混凝土层、填沙层(含通风管)和土壤层组成。由于钢筋混凝土立柱与地坪连接处传热较高,平均热阻较低,温度值变化快^[8]。试模拟[室内温度 $T_n = 249$ K、对流换热系数 $\alpha = 20$ W/(m² · °C)、风管进口风温 $T_w = 280$ K、风速 $v = 0.5$ m/s]地坪内 a 面上温度云图如图 4 所示,最低温区在立柱附近。由图 4 可知,控制 a 面上 d 处温度在冻结点以上,可保障整块地坪不被冻胀。后续模拟时主要研究环境因素对立柱散冷量及 c 、 d 处温度的影响,优化立柱周围地坪不被冻结的环境参数。

1.3 试验方法

1.3.1 环境因素单因素试验 设室内温度 $T_n = 255$ K, 对流换热系数 $\alpha = 20$ W/(m² · °C)、风管进口风温 $T_w = 283$ K、风速 $v = 0.5$ m/s,研究单因素影响时,其他值不变。

(1) 室内温度:根据《冷库设计规范》^[9]规定及低温冷库实际运行环境,考察室内温度(257,255,253,251,249,

247,243 K)对立柱散冷量及地坪温度的影响。

(2) 室内对流换热系数:参照《冷库设计规范》^[9],考察室内对流换热系数[8,10,12,14,16,18,20 W/(m² · °C)]对立柱散冷量及地坪温度的影响。

(3) 通风管进口温度:考虑到北海地区冬季室外气温会出现 279.15 K(6 °C),模拟时,考察通风管进口温度(279,281,283,285,287,289 K)对立柱散冷量及地坪温度的影响。

(4) 通风管进口风速:当气温下降至地坪冻结风险时,启动机械通风机强制空气对流,以增加地坪风管散冷量。根据《冷库设计规范》^[9]规定,机械送风风速 ≥ 1 m/s,模拟时风速从自然通风到机械通风,考察通风管进口风速(0.1,0.3,0.5,1.0,2.0,3.0,4.0,5.0,6.0 m/s)对立柱散冷量及地坪温度的影响。

1.3.2 立柱附近地坪冻胀运行环境 综合环境因素影响结果及北海地区冬季运行环境,模拟室外温度 T_w 为 279,281,283 K 时,地坪不被冻胀的室内温度。

1.3.3 立柱保温对散冷量及地坪温度的影响 立柱是冷库建筑的冷桥但又无法避免,工程上常对立柱包裹保温材料以削弱立柱散冷量、改善地坪运行环境。保温材料厚度、高度与散冷量存在经验关联式,综合分析材料造价、使用周期和电费前提下存在的最佳厚度和高度^[10]。该冷库立柱保温材质同地坪,厚 0.2 m,保温高度 1.5 m (如图 5 所示)。为验证立柱保温效果,结合冷间运行实际,取该冷间室内温度 $T_n = 249$ K、对流换热系数 $\alpha = 18$ W/(m² · °C)、通风管进口风温 $T_w = 279$ K,模拟通风管进口风速(0.1,0.3,0.5,1.0 m/s)对立柱散冷量及 d 处温度的影响。

1.3.4 立柱散冷量的测定 为更好理解立柱散冷量大小,模拟时提取地坪散冷量作为参考。立柱、地坪散冷面积为图 3 中的立柱截面积(0.8 m × 0.4 m)和地坪表面扣除与立柱接触面(3.0 m × 8.7 m - 0.8 m × 0.4 m)的面积。地坪和立柱侧面散冷量 $Q = h \cdot A \cdot (T - T_n)$, h 为室内空气与地坪和立柱侧面对流换热系数, A 为地坪与立柱

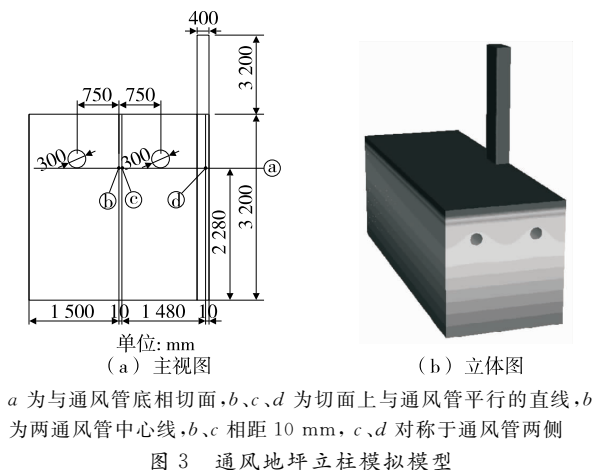


Figure 3 Simulation model of ventilation floor and column

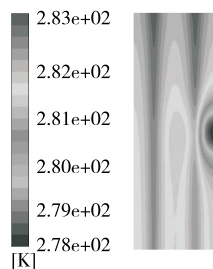


图 4 平面 a 温度云图

Figure 4 Plane a temperature nephogram

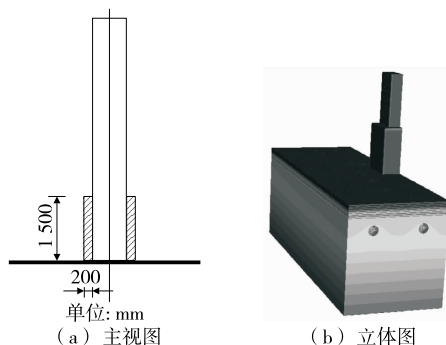


图 5 通风地坪及立柱保温模拟模型

Figure 5 Simulation model of ventilation floor and column insulation

侧面(未保温面和保温面之和)散冷面积, $(T - T_n)$ 为地坪和立柱侧面与室内温度差值。立柱散冷量为立柱与地坪接触面上下界面间的导热方程, 数值上与立柱侧面散冷量相等。

1.3.5 数据处理 ORIGIN 软件处理 CFD 输出数据。地坪和立柱散冷量采用双纵坐标, 横坐标为环境变量; 为使直线 c 、 d 温度曲线清晰, 取两个反映温度变化规律及地坪冻胀趋势代表性变量。有曲线突变或变化不显著时对变量加密处理。

2 结果与讨论

2.1 环境因素单因素试验

2.1.1 室内温度对立柱散冷量及地坪温度的影响 由图 6 可知, 室内温度越低, 其与地坪土壤层间的温度梯度越大, 地坪及立柱散冷量越多。地坪散冷面积是立柱的 80.56 倍, 而地坪散冷量是立柱的 10 倍左右, 进一步表明立柱作为冷桥引起了冷耗散。对冷间而言, 满足产品冷加工前提下, 尽量提高室内温度, 降低地坪立柱散冷量, 减少库内冷量损耗; 对冷库制冷系统而言, 库温的升高意味着蒸发温度的升高, 制冷系统能效比增大。

由图 7 可知, 室内温度越高, 地坪 c 、 d 处温度越大, 且远离立柱的 c 处温度高于立柱附近 d 处温度, 越靠近立柱温度越低; d 处中间温度下降明显, 这是因为 c 处温度主要受风管内空气的影响, 管内空气温度先下降, 至出口处有所上升^[5], 曲线 d 还同时受立柱散冷的影响, 使立柱附近地坪温度迅速下降, 甚至出现土壤被冻结危险。

2.1.2 室内对流换热系数对立柱散冷量及地坪温度的影响 由图 8、9 可知, 随着对流换热系数的增大, 地坪及立柱散冷量上升, 但总增幅较小, 且 c 、 d 处温度曲线在不同对流换热系数时十分靠近, 温度受影响微弱。这主要因为地坪表面层及其上的立柱温度梯度小, 且接近室内温度, 散冷量及温度分布受对流换热系数的影响甚微, 地坪下的土壤高温带来的温度梯度是散冷量的主要动力。生产管理中, 加快产品冷加工速度往往需增大对流换热系

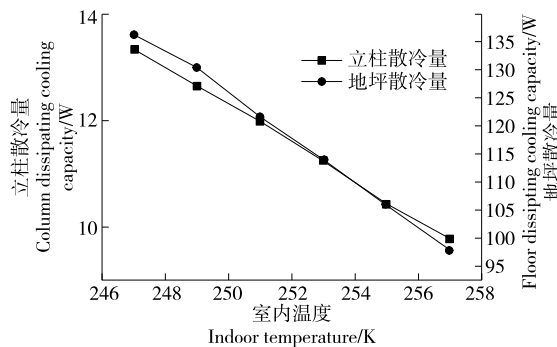


图 6 室内温度对散冷量的影响

Figure 6 Influence of indoor temperature on dissipating cooling capacity

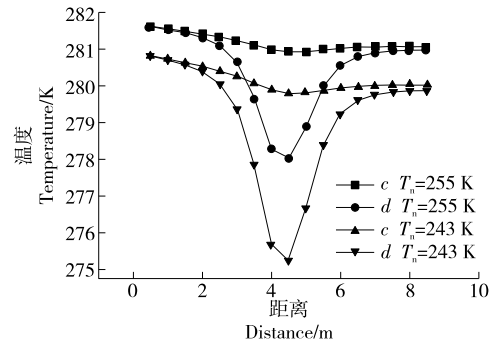


图 7 直线 c 、 d 的温度曲线

Figure 7 Straight line c , d temperature curve

数, 虽不引起散冷量大幅波动, 但通风机功耗增加, 产品干耗加重。

2.1.3 通风管进口温度对立柱散冷量及地坪温度的影响

由图 10、11 可知, 通风管进口温度越高, 空气通过管壁散热量越多, 促使地坪温度升高, 进而立柱散冷越多。通风管的存在可使地坪不产生冻胀, 对能耗而言, 风管的设计又使热量通过立柱快速传入室内, 引起库内冷量耗散。

2.1.4 通风管进口风速对立柱散冷量及地坪温度的影响

由图 12、13 可知, 散冷量随风速的增大而加大, 抑制冷库地面向土壤层传递冷量, 不同风速下的地坪 c 、 d 处温度升高, 有效防止土壤层被冻胀。这是因为管内空气

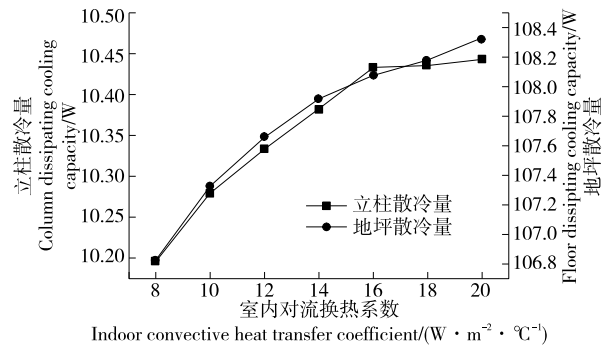


图 8 室内对流换热系数对散冷量的影响

Figure 8 Influence of indoor convective heat transfer coefficient on cooling capacity

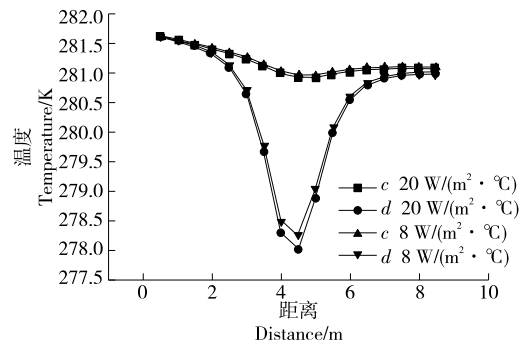


图 9 直线 c 、 d 处的温度曲线

Figure 9 Straight line c , d temperature curve

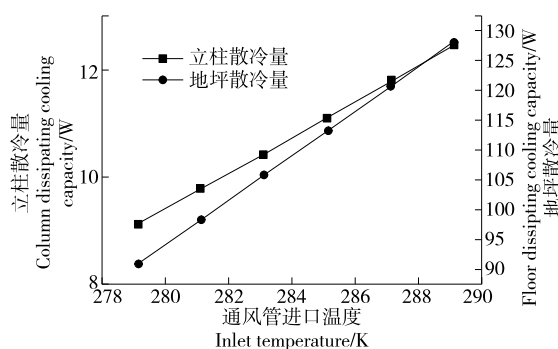


图 10 通风管进口温度对散冷量的影响

Figure 10 Influence of inlet temperature of ventilation pipe on cooling capacity

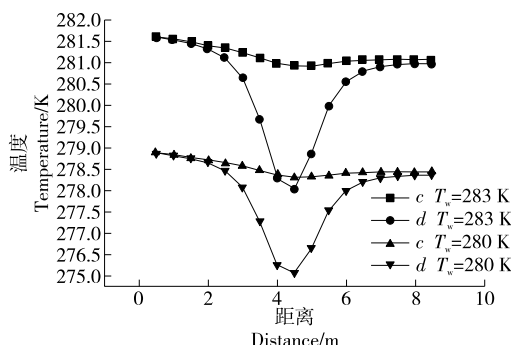


图 11 直线 *c*、*d* 处的温度曲线

Figure 11 Straight line *c*, *d* temperature curve

与管壁对流换热能力增强,加速热量穿过管道壁向地坪层传递,引起地坪温度升高。但当风速 ≥ 1 m/s 时,散冷量影响减弱,*c*、*d* 处的温度曲线逐渐靠近。这主要是因为风速增大阻力增加,在无外动力管道内,风速增幅减缓,散冷量增加不明显。文献[4]中的速度拐点为 2.5 m/s,可能与管径、管长等因素有关。因此,仅通过加大通风管风速抑制地坪冻结,不但效果不理想,还增加了机械功耗。

2.2 立柱附近地坪冻胀运行环境

由图 14 可知,通风温度 279 K、风速 1 m/s 条件下,

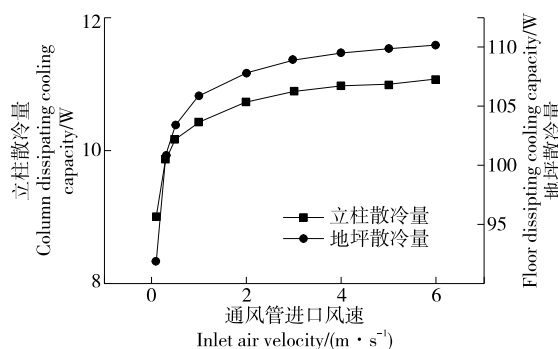


图 12 通风管进口风速对散冷量影响

Figure 12 Influence of inlet air velocity of ventilation pipe on cooling capacity

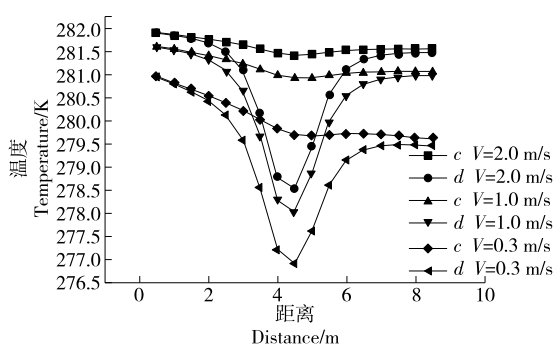


图 13 直线 *c*、*d* 处的温度曲线

Figure 13 Straight line *c*, *d* temperature curve

当室内温度 $T_n \geq 246$ K,地坪 *d* 处将无冻胀区,按机械通风速度要求^[6],此时需开启机械通风装置,维持风速 ≥ 1 m/s 即可预防地坪冻胀。

由图 15 可知,当通风温度增加至 281 K、室内温度为 240 K 时,冷间-33 °C 已达下限,地坪 *d* 处无冻胀区。即 $T_n \geq 240$ K,无需机械通风,维持风速 ≥ 0.5 m/s 即可预防地坪冻胀。

由图 16 可知,当通风温度上升至 283 K、室内温度为 240 K 时,地坪 *d* 处仍无冻胀区,此时无需开启机械通风,

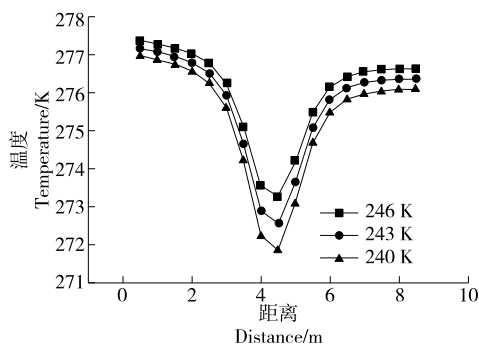


图 14 $T_w=279$ K、 $v=1$ m/s 时室内温度对地坪温度的影响

Figure 14 Influence of indoor temperature on floor temperature when $T_w=279$ K and $v=1$ m/s temperature

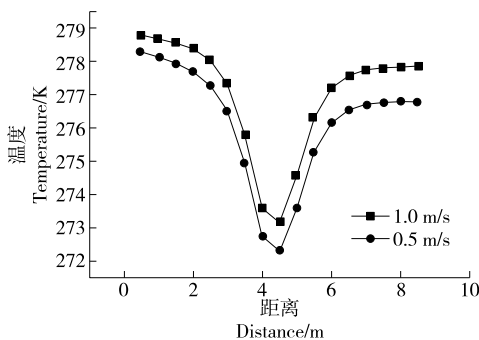


图 15 $T_w=281$ K、 $T_n=240$ K 时风速对地坪温度的影响

Figure 15 Influence of wind speed on floor when $T_w=281$ K and $T_n=240$ K

维持风速 ≥ 0.3 m/s,其风速对地坪温度的影响如图 17 所示。

2.3 立柱保温对散冷量及地坪温度的影响

由表 2 可知,立柱保温能削弱散冷量,有利于降低冷库常年运行能耗。

由图 18 可知,立柱保温后,当通风管进口风速 $v = 0.1$ m/s 时,地坪 d 处最低温度为 272.249 K,比未保温前提高了 1.232 K;当通风管进口风速 $v \geq 0.3$ m/s, d 处最低温度为 274.13 K,比未保温前提高了 1.221 K,地坪无冻胀风险。

3 结论

冷库地坪环境因素影响地坪立柱散冷量,进而影响地坪温度分布,越靠近立柱处的地坪温度越低,越容易形成冻胀危险。针对该冷库地坪而言,多数情况下无需开启机械通风装置,否则,既增加了机械通风能耗又增加了

表 2 通风管进口风速对立柱散冷量的影响

Table 2 Dissipating cooling capacity of column under different inlet wind speed W

通风管进口 风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	立柱散冷量/W	
	保温前	保温后
0.1	9.734 788	4.886 749
0.3	10.689 550	5.323 403
0.5	11.009 380	5.487 816
1.0	11.339 620	5.613 525

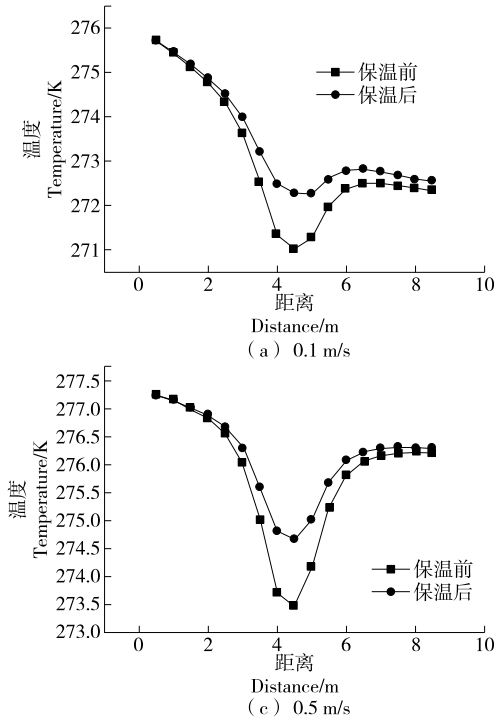


图 18 立柱保温前后 d 处的温度分布

Figure 18 Temperature distribution at d before and after column insulation

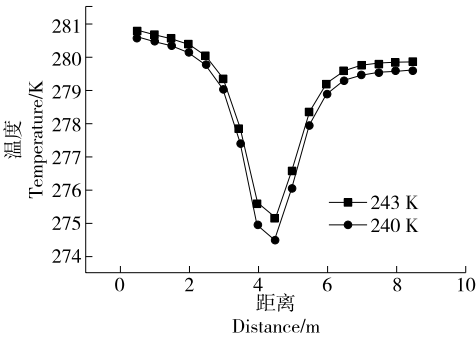


图 16 $T_w = 283$ K、 $v = 1$ m/s 时室内温度对地坪温度的影响

Figure 16 Influence of indoor temperature on floor temperature when $T_w = 283$ K and $v = 1$ m/s

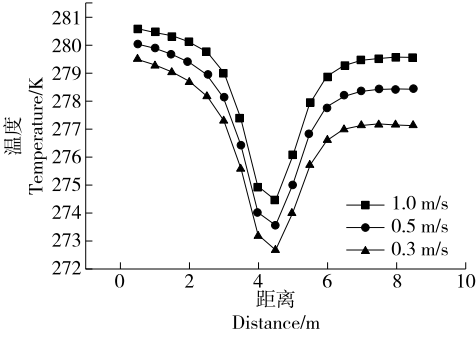
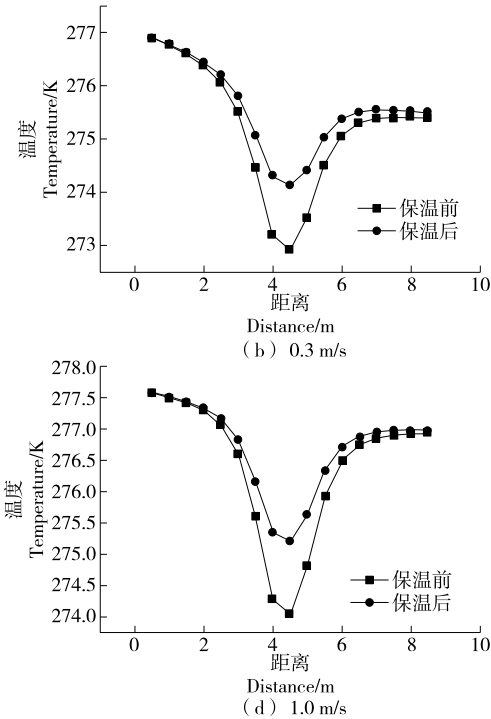


图 17 $T_w = 283$ K、 $T_n = 240$ K 时风速对地坪温度的影响
Figure 17 Influence of wind speed on floor temperature when $T_w = 283$ K and $T_n = 240$ K



(下转第 168 页)

成功率由 87% 提高至 97%，能够满足传送带分拣要求。

微小误差可能来源：传送带传输过程中不稳定，出现左右摆动问题；花生传输过程中与传送带发生相对滑动；编码器脉冲读数不准确，导致传输方向误差；通讯模式有延迟等问题。

5 结论

根据花生生产现场操作条件，改进了传统手眼标定方法，利用专门定制的“9+2”标定块进行平面标定，并对花生处理提取轮廓信息，进行重心高度补偿。结果表明，该标定方法便于在生产现场实际操作，降低了传统手眼标定矩阵求解难度，可满足基于传送带作业的机器人分拣精度要求。但对于相机、传送带平整度及安装精度要求较高的，需后期对此方面问题继续探索，使之得到广泛应用。

参考文献

- [1] 杨少荣. 机器视觉算法与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2008：378-443.
- [2] LEE K M. Machine vision[M]. Taylor and Francis; CRC Press, 2015：15-33.
- [3] XIA Ke, WENG Zheng-xin. Workpieces sorting system based on industrial robot of machine vision [C]// International Conference on Systems & Informatics. [S.l.]: IEEE, 2016：422-426.
- [4] 尹双双, 姜海勇, 李娜, 等. 花生负压分级试验[J]. 食品与机械, 2018, 34(7)：86-89.
- [5] TSAI R Y, LENZ R K. A new technique for fully auto-

mous and efficient 3D robotics hand-eye calibration[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(3)：345-358.

- [6] 胡寒. 基于机器视觉的 Delta 机器人动态抓取系统关键技术研究[D]. 广州：广东工业大学，2019：34-38.
- [7] 李楠, 平雪良, 王晨学, 等. 一种机器人的平面约束自标定技术研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(8)：1 214-1 222.
- [8] 许国树, 言勇华. 一种基于场景特征的工业机器人手眼自动标定方法[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(6)：17-21.
- [9] 郭新年, 白瑞林, 王秀平. 基于主动视觉的手眼矩阵和光平面标定方法[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(19)：56-60.
- [10] LIU Kun, LIU Wei-dong. Detection algorithm for infrared dim small targets based on weighted fusion feature and ostu segmentation[J]. Computer Engineering, 2017, 43(7)：253-260.
- [11] 张凯. 花生米品质分选系统的关键技术研究[D]. 济南：山东大学，2019：26-32.
- [12] 张墨逸, 张秋余, 段宏湘, 等. 基于运动轨迹的单目相机位姿自标定方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(2)：64-69.
- [13] ZHANG Zheng-you. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(11)：1 330-1 334.
- [14] FITZGIBBON A W, PILU M, FISHER R B. Direct least squares fitting of ellipses[J]. IEEE Trans on Pami, 1996, 21(5)：253-257
- [15] 杨麒, 李天伟, 黄谦, 等. 基于直线投影特征的镜头畸变校正方法[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(9)：264-268.

(上接第 157 页)

地坪立柱散冷量。立柱保温更能削弱散冷量、改善地坪温度状况。但环境因素往往是多变的，各种环境因素作用下的散冷量和地坪冻胀问题还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 冷库建筑保温系统设计技术与发展探讨[J]. 物流工程与管理, 2017, 39(10)：76-79.
- [2] 刘金平. 5 000 吨组装式冷库地坪保温及防冻性能测试研究[J]. 制冷, 1994, 48(3)：7-12.
- [3] 高祖锟. 冷库地坪防冻机械通风的传热计算[J]. 暖通空调, 1996(4)：68-71.
- [4] 贾景福, 郝满晋, 赵建华. 通风流速对冷库地坪通风防冻系统传热性能影响的研究[J]. 制冷空调与电力机械, 2009,

128(30)：57-60.

- [5] 陈曦, 王军, 毕文峰. 设计参数对冷库地坪通风防冻系统性能的影响研究[J]. 低温与超导, 2016, 44(10)：58-61.
- [6] 孙小红, 满林香. 冷库地坪通风散冷管道的数值模拟与优化[J]. 低温与超导, 2020, 48(2)：75-79, 106.
- [7] 羊烨, 鲍莉. 运用有限元法计算热桥对围护结构热工性能的影响[J]. 建筑结构, 2016, 43(3)：59-60, 62.
- [8] 沈张. 基于 COMSOL 仿真技术在热桥中三维传热研究及节能利用[M]. 武汉：武汉轻工大学，2017：1-57.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 冷库设计规范：GB 50072—2010[S]. 北京：中国计划出版社，2010：6, 16, 124.
- [10] 蒋小强, 张黎辉, 谢尚桢. 冷库柱体冷桥的形成机理及其保温方案的优化[C]//福建省制冷学会学术年会论文集. 成都：工程科技, 2018：104-114.

(上接第 163 页)

- [18] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J]. Computer Science, 2015(7)：1 409-1 556.
- [19] BAKHODAA, YUAN G L, FUNG W W L, et al. Analyzing CUDA workloads using a detailed GPU simulator[C]//

2009 IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software. [S. l.]: IEEE, 2009：163-174.

- [20] SZEGEDY C, LIU W, JIA Y, et al. Going deeper with convolutions[C]// 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Boston：IEEE, 2015：1-9.