

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.033

基于多目标决策模糊物元法的冷藏车传感器布点优化^{*}

刘 静¹ 张小栓² 肖新清³ 傅泽田²
(1. 鲁东大学商学院, 烟台 264025; 2. 食品质量与安全北京实验室, 北京 100083;
3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 提出了多目标决策模糊物元分析法,采用中心效果测度方法构建模糊物元矩阵,依据综合关联度对监测点进行优选,实现冷藏车厢内传感器布局的点位优化。结果表明,该方法能够在保证监测结果准确的前提下,传感器数量从 27 个减少到 7 个,降低了冷链运输成本。采用统计分析方法和温度场分析法,验证了优化后传感器布局的合理性。优化后传感器监测值具有 95% 以上的置信水平,优化前、后温度场分布图相似率达到 90%,达到冷链运输中既节约成本又准确监测的双重要求。

关键词: 冷链物流 冷藏车 温度场 布点优化 物元法

中图分类号: U169.42; O159 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0214-06

引言

鲜食葡萄冷链运输过程的有效监测是保证其品质的重要手段,有效监测离不开冷藏车厢内传感器的合理布局^[1-3]。冷藏车厢内各处的温度是由产品的呼吸热、车辆维护结构的冷风渗透、车门漏风以及气流循环等因素共同决定的,这种温度分布的差异性决定车厢不同位置的温度、相对湿度以及二氧化碳浓度是不同的,采用单传感器监测冷藏车厢环境参数无法满足系统精度及鲁棒性的要求^[4-7]。但是过多传感器的使用会导致资源的浪费,研究传感器布点优化方法,可实现冷链运输过程监测效果最优,监测成本最低的目的^[8-10]。

目前关于传感器节点部署方法可以分为随机部署^[11]、规则部署^[12]、优化点位部署^[13-14]和模型预测部署^[15]。农产品冷链物流传感器部署方面的研究还处于起步阶段,相关文献较少^[16]。本文提出多目标决策模糊物元法对鲜食葡萄冷链运输过程传感器的布点进行优化,通过建立模糊物元矩阵和权重矩阵,计算各点位之间的关联度,并依据综合关联度对监测点位进行优选,实现既节约成本又准确监测冷藏车厢环境状态的双重要求。

1 原理与算法

1.1 冷藏车厢温度场分布的空间差异性

冷藏车厢内气流循环直接影响鲜食葡萄的品

质。冷空气在冷藏车厢内循环流动,会同时与车外环境和车内货物之间进行热交换,并伴随着各种形式能量的转换并遵循能量守恒定律和热力学第二定律^[17]。质量流率,即质量流量,指单位时间内流过管道某一截面的物质质量^[18]。依据热平衡理论、等效送风流量和空气再循环理论,图 1 给出冷藏车厢内部气流循环示意图。

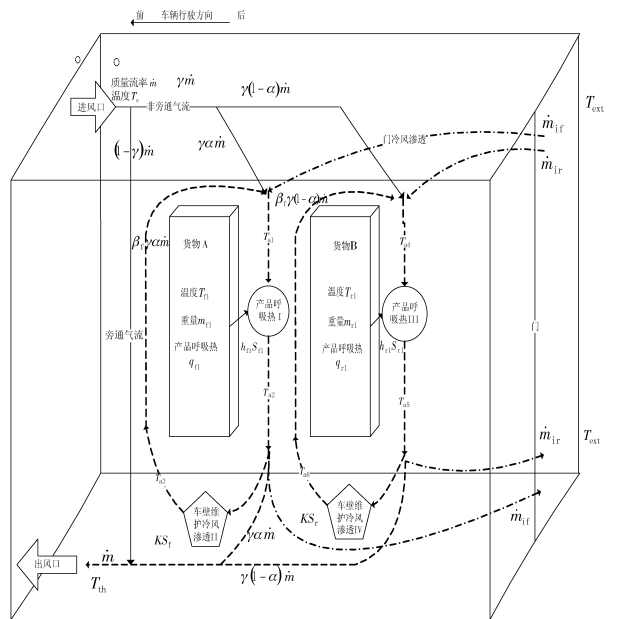


图 1 冷藏车厢内部气流循环示意图
Fig.1 Diagram of air circulation inside refrigerator car

为了说明问题,图 1 中简化冷藏车厢内装有 A、

收稿日期: 2014-06-18 修回日期: 2014-07-11
^{*} 国家自然科学基金资助项目(31371538)和教育部新世纪优秀人才计划资助项目(NCET-11-0491)
作者简介: 刘静,讲师,博士,主要从事农产品冷链物流研究,E-mail: ljlddx@163.com

B 两箱鲜食葡萄。A 箱位于冷藏车厢前部,B 箱位于冷藏车厢后端。A 箱葡萄的质量、温度和呼吸热分别记为 $m_{\text{fl}}, T_{\text{fl}}, q_{\text{fl}}$; B 箱葡萄的质量、温度和呼吸热分别记为 $m_{\text{rl}}, T_{\text{rl}}, q_{\text{rl}}$ 。进风口位于冷藏车厢左上部。进风口冷空气温度为 T_s , 质量流量为 $\dot{m}$ 。进风口冷空气的一部分作为旁通气流没有进行热交换, 直接返回出风口, 质量流量为 $(1-\gamma)\dot{m}$, 于是非旁通气流的质量流量为 $\gamma\dot{m}$ 。非旁通气流又被分为两部分, 分别参与 A 箱与 B 箱的热循环, 分配率设为 α 和 $1-\alpha$ 。门漏风是影响车厢内热量流失的重要因素, 因此门漏风也要考虑。被分为两部分的非旁通气流与从车门进入的冷空气混合, 经过产品呼吸热 I、III 和车辆围护结构的冷风渗透耗热 II、IV 后, 气流温度 T_{a3} 与 T_{a6} 比进风口气流温度 T_s 要高, 这两部分气流继续参与冷藏车厢内气流的循环。A 箱(以 A 箱为例子, B 箱类似)上方温度为 T_{a1} 的气流成分如表 1 所示。

表 1 A 箱鲜食葡萄上方气流成分

Tab.1 Airflow over the commodity A

T_{a1} 的气流成分	温度	质量流率
进风口气流	T_s	$\gamma\alpha\dot{m}$
门漏风	T_{ext}	$\dot{m}_{\text{if}}$
围绕 A 货物的循环气流	T_{a3}	$\beta_f\gamma\alpha\dot{m}$

依据质量守恒定律, 温度为 T_{a2} 的气流有 3 个流向: ①开关门导致的温度为 T_{a2} 、质量流率为 $\dot{m}_{\text{if}}$ 的热量流失。②车厢维护结构冷风渗透导致的热损耗, 质量流率为 $\beta_f\gamma\alpha\dot{m}$ 的气流继续参与冷藏车厢内气流的再循环, 温度升高为 T_{a3} 。③质量流率为 $\gamma\alpha\dot{m}$ 的气流流向回风口。回风口温度为 T_{th} 的气流由温度为 T_s 的旁通气流和 A、B 箱底部温度分别为 $T_{\text{a2}}, T_{\text{a5}}$ 的非旁通气流 3 部分构成。

综上, 冷藏车厢内各点的温度是由产品呼吸热、车辆维护结构冷风渗透、车门漏风等因素共同决定, 依据各处气流分配系数 $\alpha, \beta_f, \beta_r, \gamma, K$ 等取值的不同而变化。采用单传感器监测冷藏车厢环境参数无法满足系统精度及鲁棒性的要求。

1.2 多目标决策模糊物元算法

文献[19]利用模糊物元法, 以大气监测区域内预先设定的环境监测点探测到的环境数据, 对设定监测点进行优选。大气污染物属于小者为优的指标, 其模糊矩阵隶属度函数的确定采用的是下限效果测度。本文的研究对象为鲜食葡萄冷链物流过程中的冷藏车厢, 监测指标为冷藏车厢内的温度、相对湿度和二氧化硫体积浓度, 这 3 个指标均为适中为优, 因此不能采用小者为优或者大者为优的方法构

造标准化矩阵。模糊矩阵的选取很重要, 如果使用了不恰当的隶属度函数对物元矩阵进行标准化, 最终评价结论可能是错误的。因此, 本文提出采用中心效果测度的方法来构建模糊物元矩阵, 依据综合关联度对冷藏车厢监测点进行优选。具体算法步骤如下:

(1) 建立物元矩阵 A 。假设冷藏车厢内有 m 个监测点, 每个点均有 n 个监测指标, 将监测点、监测指标、监测值与物元分析的三要素(事件、特征、特征值)一一对应, 建立物元矩阵

$$A = \begin{pmatrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_j & \cdots & C_n \\ M_1 & A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1j} & \cdots & A_{1n} \\ M_2 & A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2j} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & & & & \vdots & & \\ M_i & A_{i1} & A_{i2} & \cdots & A_{ij} & \cdots & A_{in} \\ \vdots & & & & \vdots & & \\ M_m & A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mj} & \cdots & A_{mn} \end{pmatrix}_{m \times n}$$

(1)

式中 M_i ——第 i 个监测点, 即物元矩阵三要素的事件
 C_j ——第 j 个监测指标, 即物元矩阵三要素的特征
 $A_{i,j}$ ——第 i 个监测点、第 j 个监测指标的监测值, 即物元矩阵三要素的特征值
($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$)

(2) 采用中心效果测度方法构建模糊物元矩阵 B 。按照模糊理论^[20], 需要选择隶属度函数对物元矩阵进行标准化, 使之成为无量纲的量。设 $[A_{\min,j}, A_{\max,j}]$ 为第 j 个监测指标的变化区间, $A_j(0)$ 为第 j 个监测指标的适中值, 则可构造隶属度函数

$$B_{ij} = 1 - \frac{|A_{i,j} - A_j(0)|}{\max \{ |A_{(\min, \max),j} - A_j(0)| \}}$$

(2)

其中, $\max \{ |A_{(\min, \max),j} - A_j(0)| \}$ 取 $|A_{\min,j} - A_j(0)|$ 和 $|A_{\max,j} - A_j(0)|$ 中绝对值大者, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

依据隶属度函数建立模糊物元矩阵

$$B = \begin{pmatrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_j & \cdots & C_n \\ M_1 & B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1j} & \cdots & B_{1n} \\ M_2 & B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2j} & \cdots & B_{2n} \\ \vdots & & & & \vdots & & \\ M_i & B_{i1} & B_{i2} & \cdots & B_{ij} & \cdots & B_{in} \\ \vdots & & & & \vdots & & \\ M_m & B_{m1} & B_{m2} & \cdots & B_{mj} & \cdots & B_{mn} \end{pmatrix}_{m \times n}$$

(3)

(3) 确定关联矩阵 X 。隶属度函数代表冷藏车厢内各监测点之间的关联程度, 因此隶属度函数 B_{ij}

等价关联函数 X_{ij} , 即 $B_{ij} = X_{ij}$ 。

(4) 计算权重矩阵 α 。在冷藏车厢内, 同一监测指标对不同监测点的权重相同, 而不同监测指标对整个冷藏车厢环境影响的权重不同, 假设每一个监测指标对整个冷藏车厢环境影响的权重为

$$\alpha_j = \frac{\sum_{i=1}^m B_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m B_{ij}}$$

即权重矩阵为

$$\alpha = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ \alpha_j & \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

(5) 构建综合关联矩阵 Y 。依据权重矩阵 α 和关联矩阵 X 可以确定各监测点的综合关联矩阵

$$Y = X\alpha^T \quad (5)$$

Y 中各个元素代表各监测点间的综合关联程度。

(6) 方案的优选。首先绘出综合关联度散点图, 以监测点序为横坐标, 综合关联度为纵坐标; 依据散点图进行监测点的分类, 选择有代表性的监测点, 尽量选取综合关联度最大值或最小值对应的监测点作为同一分类区间的代表点。

2 实证分析

2.1 实验设计

鲜食葡萄冷链运输路线: 新疆伊犁—深圳龙岗; 出发日期: 2013 年 7 月 26 日; 冷藏车厢尺寸(长×宽×高) 12 m×2.5 m×2.6 m; 载重 2 800 kg。选用瑞士 Sensiron 公司生产的 SHT11 型数字式温湿度传感器对温湿度数据进行采集; 采用瑞士 MEMBRAPOR 公司生产的 MF-20 型二氧化硫(SO₂) 传感器记录 SO₂ 体积分数数据。冷链运输鲜食葡萄品种为红地球, 无病虫害, 无损伤, 每箱质量约 5 kg。由于红地球葡萄对 SO₂ 比较敏感, 放置 SO₂ 时, 要在葡萄上方放一层牛皮纸, 然后放上 SO₂ 型保鲜剂和其他复合型防腐剂, 最后再用一层牛皮纸盖在药剂上, 防止药剂释放不均匀。堆码方式采用两边留空的方式, 塑料箱与冷藏车厢两侧面各留 10 cm 空隙。

2.2 实验步骤

(1) 将 27 个传感器进行编号后, 置于冷藏车厢内, 如图 2 所示。每个编号后括号内的数据为该传感器在冷藏车厢内的坐标。

(2) 记录冷藏车中温度、相对湿度和 SO₂ 体积分数的变化, 设定数据采集时间间隔为 2 min。冷藏车设定温度为 0℃, 对 2013 年 7 月 26 日 8:00—18:00 时间段内的每一个传感器监测数据取平均值。

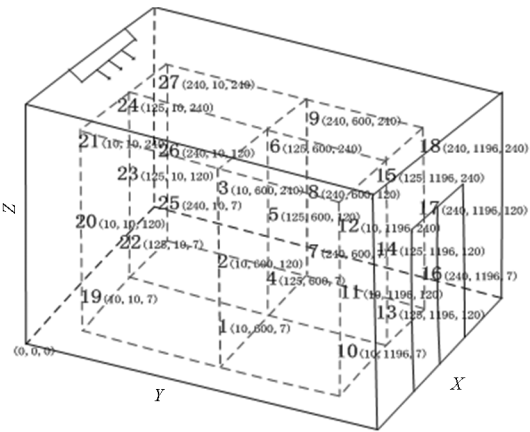


图 2 优化前传感器布局

Fig. 2 Sensor layout before optimization

(3) 用本文提出的多目标决策模糊物元法分析监测到的数据, 计算综合关联度。这里, 根据经验与调研, 取温度、相对湿度和二氧化硫体积分数的适中值分别为 0℃、92.5% 和 1.25×10^{-5} 。

(4) 对监测点进行分类优选。

2.3 优化结果分析

根据 27 个点的 3 种指标的监测值和式(4), 可得到权重矩阵

$$\alpha = \begin{bmatrix} \text{温度} & \text{相对湿度} & \text{SO}_2 \text{ 体积分数} \\ \alpha_j & 0.2950 & 0.3390 & 0.3660 \end{bmatrix}$$

于是有综合关联矩阵

$$Y = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 \\ 0.8486 & 0.8073 & 0.7789 & 0.1331 & 0.1361 & 0.8218 \\ M_7 & M_8 & M_9 & M_{10} & M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ 0.8901 & 0.7410 & 0.9144 & 0.7585 & 0.8292 & 0.8270 & 0.6052 \\ M_{14} & M_{15} & M_{16} & M_{17} & M_{18} & M_{19} & M_{20} \\ 0.7597 & 0.7605 & 0.7557 & 0.6389 & 0.7130 & 0.7722 & 0.8364 \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & M_{27} \\ 0.6257 & 0.7840 & 0.9224 & 0.5647 & 0.9046 & 0.9076 & 0.6376 \end{bmatrix}$$

绘制综合关联度散点图如图 3 所示。

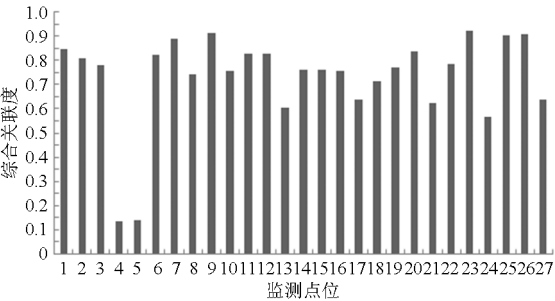


图 3 综合关联度散点图

Fig. 3 Scatter of comprehensive correlative degree

由散点图 3, 把监测点分为 7 类, 各类包含的监测点分别为: {1、2、6、11、12、20}、{3、19、22}、{5、4}、{7、9、23、25、26}、{8、10、14、15、16、18}、{13、

17、21、27}、{24}。依据分类优化择点方案,选取 2、19、5、7、18、13、24 作为每一类的代表点。使用这 7 个监测点替代原来的 27 个监测点监测冷藏车厢内的环境变化。

2.4 结果验证

采用统计检验法和温度场分布检验法 2 种方法验证多目标决策模糊物元法的有效性。

2.4.1 采用统计检验方法对优化结果进行验证

本文从方差的显著性检验(F 检验)与平均值差别的显著性检验(t 检验)2 个方面验证优化前后监测结果无显著差异。

(1) F 检验。假设优化前与优化后监测值标准差较大者用 $S_{\max}$ 代表,较小者用 $S_{\min}$ 代表,则有

$$F = \frac{S_{\max}^2}{S_{\min}^2}$$

(6)

由式(6)得到的 F 与查表得到的 F_1 进行比较。如果 $F < F_1$,表明优化前与优化后两组监测值无显著性差异;如果 $F \geq F_1$,表明优化前后两组监测值存在显著性差异。

(2) t 检验。 t 检验存在一个前提条件,样本来自的总体须符合正态分布。经验证,监测样本均符合正态分布。由于样本容量 $n = 7 < 30$,因此 t 检验统计量为

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n - 1}}}$$

(7)

式中 μ ——总体(优化前)平均值
 $\bar{X}$ ——样本(优化后)平均值
 s ——样本标准差

经过 t 检验与 F 检验(表 2),优化后确定的 7 个点位监测值在 $p < 0.05$ 的概率水平上方差和均值与优化前均无显著性差异,精度一致,能够准确、可靠的反映冷藏车厢内的环境状况,即优化结果可信。

(3)泛化验证。为进一步验证本文提出的布点优化方案的可靠性和准确性,对未参加优化运算的 2013 年 7 月 27 日 7:00—15:00 时间段相同监测点优化前后的监测值进行统计检验。由表 3 可知,经过 F 检验和 t 检验,优化前、后监测结果无显著性差异。

表 2 优化前后监测结果的显著性检验
Tab.2 Significance test of monitoring results

指标	温度/℃		相对湿度/%		SO ₂ 体积分数	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
优化前样本	1.052 593	1.496 456	93.274 81	1.699 627	1.265 852 × 10 ⁻⁵	1.550 141
优化后样本	1.314 286	1.794 379	93.594 29	2.288 987	1.281 000 × 10 ⁻⁵	2.158 726
表 $F_{0.05}(6,26)$	2.47		2.47		2.47	
F 计算值	1.282 459		1.632 386		1.913 13	
方差齐性检验	$F < F_{0.05}(6,26)$		$F < F_{0.05}(6,26)$		$F < F_{0.05}(6,26)$	
方差齐性判别	齐		齐		齐	
应用检验方法	t 检验		t 检验		t 检验	
表 $t_{0.05,6}$	2.447		2.447		2.447	
t 计算值	0.428 355		0.460 419		0.239 367	
检验判别	$t < t_{0.05,6}$		$t < t_{0.05,6}$		$t < t_{0.05,6}$	
结论	无显著差异		无显著差异		无显著差异	

表 3 泛化验证
Tab.3 Generalization test

指标	温度/℃		相对湿度/%		SO ₂ 体积分数	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
优化前样本	1.050 370	1.494 326	93.281 11	1.620 592	1.265 185 × 10 ⁻⁵	1.525 811
优化后样本	1.308 571	1.809 12	93.604 29	2.309 22	1.281 286 × 10 ⁻⁵	2.055 811
表 $F_{0.05}(6,26)$	2.47		2.47		2.47	
F 计算值	1.465 695		2.030 407		1.815 367	
方差齐性检验	$F < F_{0.05}(6,26)$		$F < F_{0.05}(6,26)$		$F < F_{0.05}(6,26)$	
方差齐性判别	齐		齐		齐	
应用检验方法	t 检验		t 检验		t 检验	
界值 $t_{0.05,6}$	2.447		2.447		2.447	
t 计算值	0.423 241		0.488 471		0.258 473	
检验判别	$t < t_{0.05,6}$		$t < t_{0.05,6}$		$t < t_{0.05,6}$	
结论	无显著差异		无显著差异		无显著差异	

2.4.2 冷藏车厢温度场分析

利用 Matlab 软件对传感器点位优化前与优化后的冷藏车厢内温度进行曲面拟合,得如图 4、图 5 所示的温度场分布图。

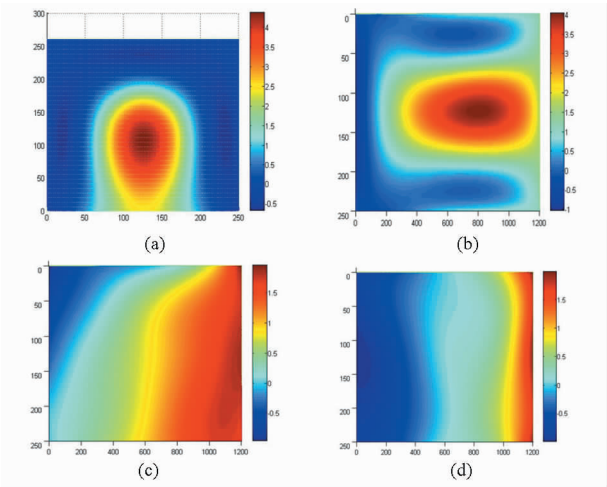


图 4 优化前冷藏车厢内温度场分布图
Fig. 4 Temperature field distribution (before optimization)
(a) 中纵截面图 (b) 中横截面图
(c) 侧视图 (d) 俯视图

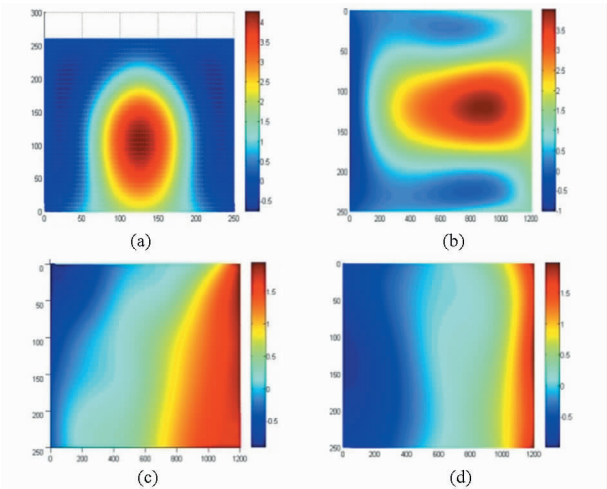


图 5 优化后冷藏车厢内温度场分布图
Fig. 5 Temperature field distribution (postoptimality)
(a) 中纵截面图 (b) 中横截面图
(c) 侧视图 (d) 俯视图

由图 5a 和图 5b 知,当货箱紧密堆码时,货箱中部的鲜食葡萄产生的呼吸热不能散发,导致冷藏车厢中部温度较高,因此建议鲜食葡萄堆码时货箱之

间留一定的间隙。由图 5c 与图 5d 可知,进风口附近的温度最低,冷气流从冷藏车厢前端向后流动过程中,受太阳辐射热、车厢门漏风以及车厢壁面冷风渗透等因素影响,消耗一部分的能量,温度逐步升高。特别是在车门附近,由于搬卸货物车门的开启和门漏风的影响,温度较高。

Duplicate Photo Finder 软件给出 2 张图像的相似度,经验证传感器优化前与优化后温度场分布图的相似率达到 90% 以上,说明本文提出的多目标决策模糊物元法能够有效优化冷藏车厢内传感器节点的个数,实现既节约成本又准确监测的双重要求。

文献[16]采用插值法利用以点带面外推估计得到冷藏车厢监测点之间的温度数据,但是这种方法对所选监测点的位置和插值方法的选择有较大的依赖性,并且计算过程较为复杂。本文提出的方法计算过程简单,并且能够通过试验验证优化后传感器节点信息采集的完整性。但是本文的前提是假定节点无故障的理想状态下,实际上对节点的优化除了应考虑采集区域的覆盖性,还应考虑系统的鲁棒性和功耗等问题,在后续研究中会进一步丰富这两方面的研究。

3 结论

(1) 提出的多目标决策模糊物元分析法,依据监测指标在冷藏车厢内不同位置的权重对传感器监测点位进行优选。优化后传感器数量从 27 个减少到 7 个,在保证监测值准确的前提下,降低了冷链成本。

(2) 应用统计分析方法,对传感器点位优化前后的监测值分别进行了 F 检验和 t 检验,验证了优化后 7 个监测点的监测值在 $p < 0.05$ 的概率水平上无显著性差异,有 95% 以上的置信水平,能够准确、可靠地反映冷藏车厢的环境状况。

(3) 验证了传感器个数优化前后的温度场分布图相似率达到 90% 以上,说明本文提出的多目标决策模糊物元法能够有效地优化传感器节点的个数,实现冷链过程中既节约成本又准确监测冷藏车厢内环境状态的双重要求。

参 考 文 献

1 Ruiz G L, Barreiro P, Rodriguez B J, et al. Monitoring the intermodal, refrigerated transport of fruit using sensor networks[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2007, 5(2): 142 – 156.

2 Soledad E D, Jesús C P, Alejandro C M, et al. A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 76(2): 252 – 265.

3 傅泽田,邢少华,张小栓. 食品质量安全可追溯关键技术发展研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 144 – 153.

Fu Zetian, Xing Shaohua, Zhang Xiaoshuan. Development trend of food quality safety traceability technology[J]. Transactions of

the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(7):144 – 153. (in Chinese)

4 Moureh J. Airflow patterns within a refrigerated truckloaded with slotted filled boxes[M]. Boca Raton: CRC Press,2009.

5 Oprea A, Courbat J, Bârsan N, et al. Temperature, humidity and gas sensors integrated on plastic foil for low power applications[J]. Sensors and Actuators B:Chemical,2009,140(1):227 – 232.

6 李锦,谢如鹤. 冷藏车开门状态升温影响因素分析[J]. 农业机械学报,2014,45(6):254 – 259.
Li Jin, Xie Ruhe. Influence factors of air-temperature increasing within refrigerated trucks during door-opening state [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):254 – 259. (in Chinese)

7 杨洲,陈朝海,段洁利,等. 荔枝压差预冷包装箱内气流场模拟与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊1):215 – 217.
Yang Zhou, Chen Chaohai, Duan Jieli, et al. Simulation and experiment of airflow field in cartons of pressure-difference pre-cooling for litchi[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(Supp.1):215 – 217. (in Chinese)

8 齐林,韩玉冰,张小栓,等. 基于 WSN 的水产品冷链物流实时监测系统[J]. 农业机械学报,2012,43(8):134 – 140.
Qi Lin, Han Yubing, Zhang Xiaoshuan, et al. Real time monitoring system for aquatic cold-chain logistics based on WSN[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 134 – 140. (in Chinese)

9 吴振宇,孙俊,王奕首,等. 基于遗传算法的土壤墒情传感器优化布局策略[J]. 农业工程学报,2011,27(5):219 – 223.
Wu Zhenyu, Sun Jun, Wang Yishou, et al. Layout optimization policy of soil moisture sensors, with genetic algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(5):219 – 223. (in Chinese)

10 Soledad E D, Jesús C P, Alejandro C M, et al. A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011,76(2):252 – 265.

11 Onur E, Ersoy C, Ddie H, et al. Surveillance wireless sensor networks: deployment quality analysis[J]. IEEE Network, 2007, 21(6):48 – 53.

12 Huang C F, Tseng Y C. A survey of solutions to the coverage problems in wireless sensor networks[J]. Journal of Internet Technology, 2005,6(1):1 – 8.

13 孙玉文,沈明霞,周良. 农田无线传感器网络的节点部署仿真与实现[J]. 农业工程学报,2010,26(8):211 – 215.

14 Esnaashari M, Meybodi M R. Dynamic point coverage problem in wireless sensor networks: a cellular learning automata approach[J]. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2010,10(2 – 3):193 – 234.

15 Nojeong H, Varshney P K. Energy-efficient deployment of intelligent mobile sensor networks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics:Part A, 2005,35(1):78 – 92.

16 Jedermann R, Ruiz G L, Lang W. Spatial temperature profiling by semi passive RFID loggers for perishable food transportation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(2):145 – 154

17 孙家庆,王权,刘正武. 设备热平衡[M]. 上海:上海机械学院出版社,1980:2 – 4.

18 王晓红,田文德. 化工原理:上册[M]. 北京:化学工业出版社,2011:15.

19 徐明德,陈武. 模糊物元法在优选大气监测点中的应用[J]. 测试技术学报,2007,21(5):391 – 395.

20 Ganesh M. Introduction to fuzzy sets and fuzzy logic[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2008.

Optimal Sensor Layout in Refrigerator Car Based on

Multi-objective Fuzzy Matter Element Method

Liu Jing¹ Zhang Xiaoshuan² Xiao Xinqing³ Fu Zetian²

(1. Department of Business, Ludong University, Yantai 264025, China

2. Food Quality and Safety Laboratory in Beijing, Beijing 100083, China

3. Department of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Multi-objective fuzzy matter element method was put forward to optimize the sensor quantity. Fuzzy matter element matrix was constructed by means of center effect measure, and the monitoring point was optimized according to the comprehensive correlative degree. Twenty-seven sensors was reduced to 7 in the refrigerator car, which reduced the costs of cold-chain transportation. The statistical analysis method and the temperature field analysis were applied to validate the rationality of the optimization algorithm. The measurement data of sensors had more than 95% of confidence level and the similarity rate of temperature field distribution between before and after optimization reached over 90% , which achieved the dual requirements of cost savings and accurate monitoring in cold chain transportation.

Key words: Cold-chain logistics Refrigerator car Temperature field Layout optimization Matter element method