

多温冷藏车降温影响参数敏感度分析

李锦¹ 谢如鹤²

(1. 韶关学院汽车系, 韶关 512005; 2. 广州大学物流与运输研究所, 广州 510006)

摘要: 考虑到各参数敏感因子差异大, 为了更加客观地分析多温冷藏车降温过程影响参数的影响程度, 采用敏感权重分析方法, 对多温冷藏车冷冻与冷藏车厢降温影响参数进行了敏感度分析。结果表明: 对于冷藏车厢, 当取 δ_i 为 100 mm, λ_i 为 0.033 8 ~ 0.043 8 W/(m·K) 时, 权重对应呈反比关系, 由 0.564 降至 0.477; 当 δ_i 取 20 ~ 200 mm 时, 权重对应为 0.448 ~ 0.126; 当 F_f 取 0.01 ~ 0.02 m² 时, 对应权重为 0.28 ~ 0.113, 其它参数的权重小到可以忽略; 当 $\delta_g, v_w, Q_0, v_f, F_f, \lambda_i, \delta_i, \beta_1, H$ 值增加 30% 时, 对应的权重变化率分别为 -32%、-36%、-30%、-37%、-34%、-17%、-30%、1%、0.5%, 反之, 减小 30% 时的权重变化率分别为 90%、58%、42%、78%、56%、17%、44%、-1%、0.5%。冷冻与冷藏车厢的权重变化规律几乎相同, 当 $v_w, Q_0, v_f, F_f, \delta_g, \lambda_i, \delta_i, \beta_2$ 增加 30% 时, 除 β_2 权重变化率逐渐向正方向增大外, 各敏感因子的权重变化率变化幅度都逐渐向负方向增大, 对应的权重变化率分别为 -23%、-39%、-35%、-29%、-46%、-19%、-20%、-5%; 减小 30% 时, 除 β_2 权重变化率逐渐向负方向增大外, 各敏感因子的权重变化率都向正方向逐渐增大, $v_w, Q_0, v_f, F_f, \delta_g, \lambda_i, \delta_i, \beta_2$ 的权重变化率分别为 104%、50%、66%、54%、138%、20%、25%、5%。

关键词: 多温冷藏车; 降温; 影响参数; 敏感因子; 敏感度; 权重

中图分类号: U469.6⁺6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0274-08

Sensitivity Analysis of Cooling Influence Parameters for Multi-temperature Refrigerated Truck

Li Jin¹ Xie Ruhe²

(1. Department of Automobile, Shaoguan University, Shaoguan 512005, China

2. Institute of Logistics and Transport, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Considering the sensitive factor of each parameter differences, in order to analyze the effect of influence parameters of multi-temperature refrigerator truck on the cooling process, sensitivity analysis method was used to analyze the cooling influence parameters sensitivity of freezing and refrigerated zone for multi-temperature refrigerated trucks. The result shows that: for refrigerated zone, when δ_i is 100 mm, λ_i is 0.033 8 W/(m·K) to 0.043 8 W/(m·K), the weights shows an inverse trend which decreases from 0.564 to 0.477; when δ_i is 20 ~ 200 mm, the corresponding weight is 0.448 ~ 0.126; when F_f is 0.01 ~ 0.02 m², the corresponding weights is 0.28 ~ 0.113, the heavy weights of other parameters are negligibly small; when $\delta_g, v_w, Q_0, v_f, F_f, \lambda_i, \delta_i, \beta_1$ and H increased by 30%, the corresponding changing rates of weight are -32%, -36%, -30%, -37%, -34%, -17%, -30%, 1% and 0.5% respectively. Whereas, when $\delta_g, v_w, Q_0, v_f, F_f, \lambda_i, \delta_i, \beta_1$ and H decreased by 30%, the corresponding weight changing rates are 90%, 58%, 42%, 78%, 56%, 17%, 44%, -1% and 0.5% respectively. The weight changing rates of the freezing and refrigerated zone are almost the same.

收稿日期: 2016-04-19 修回日期: 2016-05-18

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAD19B01-1)、广东省自然科学基金项目(2015A030310411)、广东省高等学校优秀青年教师培养计划项目(YQ2014156)、广东省青年创新人才类项目(2014KQNCX206)和韶关市科技计划项目(2014CX/K233)

作者简介: 李锦(1979—),男,副教授,博士,主要从事冷藏运输车辆控温技术及其设计优化研究, E-mail: 653251849@qq.com

When v_w , Q_0 , v_f , F_f , δ_g , λ_i , δ_i and β_2 increased by 30%, the corresponding weight change rates of all the sensitive factors gradually increases in the negative direction except β_2 , which increases in the positive direction, the corresponding weight changing rates are -23%, -39%, -35%, -29%, -46%, -19%, -20%, -5%. When v_w , Q_0 , v_f , F_f , δ_g , λ_i , δ_i and β_2 decreased by 30%, the corresponding weight change rates of all the sensitive factors gradually increases in the positive direction except β_2 , which increases in the negative direction, the corresponding weight changing rates are 104%, 50%, 66%, 54%, 138%, 20%, 25%, 5%, respectively.

Key words: multi-temperature refrigerated truck; cooling; influence parameters; sensitive factors; sensitivity; weight

引言

多温冷藏车的降温过程受到各种内外在因素的影响^[1-4]。笔者曾对包括多温冷藏车在内的冷藏车降温速率、温度波动特性、温度分布的不均匀性等影响因素进行过系统研究^[1-6]，龙恩深、刘洪胜等^[7-10]也对车内温变特性及影响因素进行过试验与模拟仿真研究，国外的 VIRSEDA、SESTRADA 等^[11-13]对冷藏车厢与冷藏室内温度波动规律及其影响参数进行过研究。但多温冷藏车的各影响因素是综合存在的，考虑到各参数敏感因子差异大，分析过程不能简单的代数迭加^[14-15]，为了分析冷藏车降温影响参数的重要程度及影响规律，在前期研究文献的基础上，通过计算敏感权重与敏感权重变化率，对多温冷藏车降温影响参数进行敏感度分析，为分析多温冷藏车降温影响参数的重要程度及影响规律提供一种新的思路。

1 降温模型与试验验证

1.1 降温数学模型

基于对多温冷藏车降温过程的变化规律及其影响因素的研究，建立多温冷藏车的降温数学模型^[2]

$$\frac{dt_d}{d\tau} = At_d + B + Ct_c \quad (1)$$

$$\frac{dt_c}{d\tau} = Dt_c + E + Gt_d \quad (2)$$

其中

$$A = - \left(\sum \frac{1}{\frac{1}{a_w} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_{1n}}} \frac{F_{dj}}{\rho_d V_d c_{pd}} + \frac{1}{\frac{1}{a_{2n}} + \frac{\delta_g}{\lambda_i} + \frac{1}{a_{1n}}} \frac{F_g}{\rho_d V_d c_{pd}} + \frac{\beta_2}{3600} + \frac{\sum v_f F_f}{V_d} \right)$$

$$B = \left(\sum \frac{1}{\frac{1}{a_w} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_{1n}}} \frac{F_{dj}}{\rho_d V_d c_{pd}} \right) t_w + \frac{\beta_2 t_k}{3600} + \frac{\beta_2 \gamma_1 (\Phi_{1w} x_{1w} - \Phi_{1n} x_{1n})}{3600 c_{pd}} + \sum \frac{N \Psi \varepsilon}{\rho_d V_d c_{pd}} - \frac{Q_0}{\rho_d V_d c_{pd}}$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{a_{2n}} + \frac{\delta_g}{\lambda_i} + \frac{1}{a_{1n}}} \frac{F_g}{\rho_d V_d c_{pd}} + \frac{\sum v_f F_f}{V_d}$$

$$D = - \left(\sum \frac{1}{\frac{1}{a_w} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_{2n}}} \frac{F_{cj}}{\rho_c V_c c_{pc}} + \frac{1}{\frac{1}{a_{1n}} + \frac{\delta_g}{\lambda_i} + \frac{1}{a_{2n}}} \frac{F_g}{\rho_c V_c c_{pc}} + \frac{\beta_1}{3600} + \frac{\sum (v_f F_f) \rho_d c_{pd}}{\rho_c V_c c_{pc}} \right)$$

$$E = \left(\sum \frac{1}{\frac{1}{a_w} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_{2n}}} \frac{F_{cj}}{\rho_c V_c c_{pc}} \right) t_w + \frac{\beta_1 t_k}{3600} + \frac{\beta_1 \gamma_2 (\Phi_{2w} x_{2w} - \Phi_{2n} x_{2n})}{3600 c_{pd}} + \sum \frac{N \Psi \varepsilon}{\rho_c V_c c_{pc}} - \frac{MH}{24 \times 3600 \rho_c V_c c_{pc}}$$

$$G = \frac{1}{\frac{1}{a_{1n}} + \frac{\delta_g}{\lambda_i} + \frac{1}{a_{2n}}} \frac{F_g}{\rho_c V_c c_{pc}} + \frac{\sum (v_f F_f) \rho_d c_{pd}}{\rho_c V_c c_{pc}}$$

$$a_w = 1.163(4 + 12 \sqrt{v_w})$$

$$a_{1n} = a_{2n} = 1.163(4 + 12 \sqrt{v_f})$$

式中 t_d ——冷冻车厢内空气温度, °C

t_c ——冷藏车厢内空气温度, °C

τ ——时间, s

a_w ——车厢外表面换热系数, W/m²

δ_i ——除两温区隔热壁面外车厢体各传热表面的当量厚度, m

λ_i ——车厢各传热表面的当量导热系数, W/(m·K)

a_{1n} 、 a_{2n} ——多温冷藏车厢冷冻、冷藏内表面换热系数, W/m²

F_{dj} ——除两温区隔热壁外的冷冻车厢总传热面积, m²

ρ_d 、 ρ_c ——冷冻、冷藏车厢内空气密度, kg/m³

V_d 、 V_c ——冷冻、冷藏车厢的体积, m³

F_g ——两温区间隔热壁表面的传热面积, m²

c_{pd}, c_{pc} ——冷冻、冷藏车厢内的空气定压比热容, $J/(kg \cdot K)$

δ_g ——两温区隔热壁面的传热表面的当量厚度, m

β_1, β_2 ——冷藏、冷冻车厢的漏气倍数

v_f ——风扇出风口风速, m/s

F_f ——风扇出风口面积, m^2

t_w ——车厢各外表面综合温度, $^{\circ}C$

t_k ——车厢外空气温度, $^{\circ}C$

γ_1, γ_2 ——冷冻水蒸气凝结热、冷藏车厢水蒸气凝结热, J/kg

$\varphi_{1w}, \varphi_{1n}$ ——冷冻车厢外、内的空气相对湿度, %

$\varphi_{2w}, \varphi_{2n}$ ——冷藏车厢外、内的空气相对湿度, %

x_{1w}, x_{1n} ——冷冻车厢外、内的饱和空气含湿量, g/kg

x_{2w}, x_{2n} ——冷藏车厢外、内的饱和空气含湿量, g/kg

N ——电风扇的额定功率, W

Ψ ——热转换系数, 取 $\Psi = 1$

ε ——电风扇运转时间系数, 取 $\varepsilon = 1$

Q_0 ——制冷机组实际制冷量, W

F_{cj} ——除两温区隔热壁外的冷藏车厢各表面的传热总面积, m^2

M ——车载食品货物的质量, t

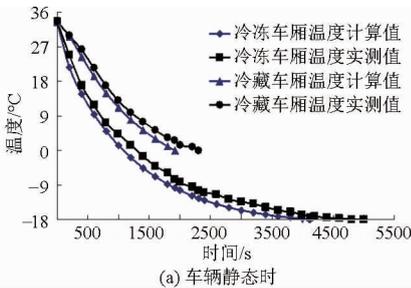
H ——车载食品货物的呼吸热, $J/(t \cdot d)$

v_w ——车速, m/s

将式(1)代入式(2)并整理得

$$\frac{d^2 t_d}{d\tau^2} + p_d \frac{dt_d}{d\tau} + q_d t_d = f_d(\tau) \quad (3)$$

其中 $p_d = -(A+D)$ $q_d = AD - CG$ $f_d(\tau) = CE - BD$



式(3)为常系数非齐次二阶线性微分方程, 按照常系数非齐次二阶线性微分方程求解过程^[2], 代入初始条件可得冷藏车厢内温度随时间变化的函数表达式, 即

$$t_c = \frac{\varepsilon_{1d}(\nabla_{1d} - A)}{C} e^{\nabla_{1d}\tau} + \frac{\varepsilon_{2d}(\nabla_{2d} - A)}{C} e^{\nabla_{2d}\tau} - \frac{A\varepsilon_{3d}}{C} - \frac{B}{C} \quad (4)$$

式中 $\varepsilon_{1d}, \varepsilon_{2d}$ ——齐次二阶线性微分方程通解中的两个任意常数

∇_{1d}, ∇_{2d} ——齐次二阶线性微分方程特征方程的两个根

ε_{3d} ——非齐次二阶线性微分方程的一个解

将式(2)变换后代入式(4)可得

$$t_d = \frac{1}{G} \left[\frac{\nabla_{1d}\varepsilon_{1d}(\nabla_{1d} - A)}{C} e^{\nabla_{1d}\tau} + \frac{\nabla_{2d}\varepsilon_{2d}(\nabla_{2d} - A)}{C} e^{\nabla_{2d}\tau} - \frac{A\varepsilon_{3d}}{C} - \frac{B}{C} \right] - \frac{D}{G} \left[\frac{\varepsilon_{1d}(\nabla_{1d} - A)}{C} e^{\nabla_{1d}\tau} + \frac{\varepsilon_{2d}(\nabla_{2d} - A)}{C} e^{\nabla_{2d}\tau} - \frac{A\varepsilon_{3d}}{C} - \frac{B}{C} \right] - \frac{E}{G} \quad (5)$$

1.2 试验验证

试验用车为与广州大学合作研发的聚氨酯隔热材料厢体庆铃五十铃厢式货车, 具体车厢结构见文献[2]所述, 冷冻与冷藏两个温区体积相同, 其内部尺寸(长×宽×高)均为 $1.99 m \times 1.67 m \times 1.74 m$, 车载制冷设备为带备电的 QK290(R134a)型制冷机组, 蒸发器型号为 EVK300。本次验证性试验主要进行静态(车辆静止)、动态(车速为 $85 km/h$)2种测试, 具体测试要求与测试条件设定参见文献[2]中的试验系统与测试部分内容, 此处不再重复描述。其冷藏车厢降温曲线如图1所示。

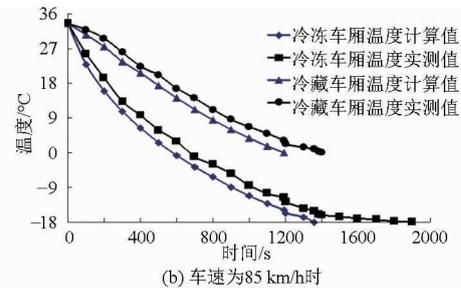


图1 多温冷藏车降温计算与实测曲线

Fig.1 Calculated and measured temperature curves of multi-temperature refrigerated truck

由图1可看出, 多温冷藏车不管是冷冻车厢还是冷藏车厢, 不管是动态还是静态情况下, 代入相关参数到数学模型中得到的降温曲线与实际测试所得降温曲线大致相同, 由此说明所建多温车降温数学模型的正确性, 只是在降温所需时间上, 理论计算值略小于实际测试值, 这主要是因为理论模型未考虑冷藏车厢体实际的蓄热, 且实际计算时采用的是制

冷机组标定的制冷量, 其制冷量在实际使用过程中普遍小于厂家给定值, 从而造成理论降温曲线比实际降温曲线提前达到车厢设定温度。特别在车辆动态行驶时, 多温车厢降温时间与实际降温时间偏差比静态时大些, 因为车辆实际行驶过程中车辆不可能保持匀速, 造成发动机转速小于 $2400 r/min$, 导致制冷机组制冷量比标定值小。

2 敏感度模型

2.1 降温过程的敏感因子确定

从式(4)、(5)可以看出,多温冷藏车降温数学模型为非线性模型,与诸多因素有关,在某一状态下降温模型可用诸参量的非线性方程描述为

$$t = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (6)$$

由式(4)、(5)可知,当所有因素发生变化,分别由 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ 变成 $x'_1, x'_2, \dots, x'_i, \dots, x'_n$, 变量为 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_i, \dots, \Delta x_n$, 则在冷藏车中的温度必然改变,车厢内空气温度 t 也发生变化,由 t 变成 t' , 则可由 $\Delta t = t' - t$ 表示所有因素变化共同造成的 t 变化量。利用多元函数的泰勒展开式为

$$\Delta t \approx \frac{\partial t}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial t}{\partial x_i} \Delta x_i + \dots + \frac{\partial t}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (7)$$

由于本文是根据厂家设计制造实际情况,研究的是冷藏车相关参量在设计制造或初始设定值时各参数不同情况下对降温影响的重要程度,因此,可假设某一参量的偏离并非是客观变化所致,其他参量并不引起变化,后续计算也不需要考虑参数变化对权重的影响。只有参量 x_i 发生变化, t 的变化量为 Δt_{xi} , 即 Δx_i 影响 t , 可表示为

$$\Delta t_{xi} = \frac{\partial t}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (8)$$

则冷藏车温度总体变化为

$$\Delta t = \sum_{i=1}^n \Delta t_{xi} \quad (9)$$

定义 t 的变化率与因素 x_i 的变化率之比为 t 对 x_i 的敏感因子 S_i , 则有

$$S_i = \frac{\frac{\Delta t_{xi}}{t}}{\frac{\Delta x_i}{x_i}} = \frac{\frac{\partial t}{\partial x_i} \Delta x_i}{\frac{\Delta x_i}{x_i} t} = \frac{\partial t}{\partial x_i} \frac{x_i}{t} \quad (10)$$

S_i 为正数, 则 Δt_{xi} 与 Δx_i 的变化方向相同, 反之 Δt_{xi} 与 Δx_i 的变化方向相反。

降温过程敏感度因子 S_i 为车厢空气温度 t 对参量 x_i 的偏导数 $\partial t / \partial x_i$, 由式(4)、(5)对相关参量求

偏导数, 可以求得各参量的敏感因子表达式。

2.2 敏感权重

为了更好地分析各敏感因子对多温区冷藏车降温特性影响程度, 对敏感因子进行归一化处理, 处理方法为

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \quad (11)$$

则各敏感因子的权重可表达为

$$S'_i = S_i / S \quad (12)$$

对于多种初始条件下敏感因子的权重可表达为

$$S'^m_{i,j} = S_{i,j} / S^m_i \quad (13)$$

S^m_i 为某初始条件下敏感因子之和, 为

$$S^m_i = \sum_{j=1}^n S_{i,j} \quad (14)$$

3 敏感度实例分析

3.1 计算参数的确定

计算所用车辆的 V_d, V_c 均取为 5.84 m^3 , 其内部尺寸为 $1.99 \text{ m} \times 1.67 \text{ m} \times 1.74 \text{ m}$, 本文数据以广州夏至日相关参数为例, t_k 在 $32 \sim 35^\circ\text{C}$ 之间, 计算时取其平均值 33.5°C , t_w 为 40°C , 设降温最终使冷冻与冷藏车厢内温度 t_d, t_c 为 $-18, 0^\circ\text{C}$, v_w 为 80 km/h , δ_i 为 100 mm , δ_g 为 60 mm , λ_i 为 $0.0358 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 两温区 v_f 均为 2 m/s , F_f 为 0.01131 m^2 , $\varphi_{1w}, \varphi_{2w}$ 均为 72% , $\varphi_{1n}, \varphi_{2n}$ 均为 95% , N 为 9.6 W , F_g 为 3.1 m^2 , F_{d1}, F_{d2} 均为 17.3 m^2 , β_2, β_1 均为 0.63 , ε 为 1 , ψ 为 1 , Q_0 为 1190 W ; M 为 3 t , H 为 $4000 \text{ kJ}/(\text{t} \cdot \text{d})$, 具体参照文献[2]所述。

3.2 冷藏车厢降温影响参数的敏感度分析

由式(4)、(6)~(10), 可得到各敏感因子表达式, 代入多温冷藏车的相关参数值, 并按照式(11)~(14)进行处理, 结果如表1所示。

从表1可知, 各参量对多温冷藏车冷藏车厢降温影响程度不同, 其敏感度大小依次为 $\lambda_i, F_f, \delta_i, \beta_1, \delta_g, v_f, v_w, Q_0, H$, 其中, $F_f, \delta_i, F_f, v_f, Q_0$ 与冷藏车降温呈反向关系, 其他参数则呈正相关性。 λ_i, F_f, δ_i 的权重最大, 其余参数的权重几乎可以忽略。

表1 冷藏车厢降温影响参数的敏感因子与敏感权重

Tab.1 Sensitive factors and sensitive weights of cooling influence parameters of refrigerated zone

参数	λ_i	δ_i	δ_g	v_w	β_1	Q_0	F_f	H	v_f
敏感因子	1516.807	-546.869	6.401	0.0016	25.131	-0.0609	-662.752	2.591	-3.748
敏感权重	0.549	0.198	2.23				0.24		

3.2.1 单参数变化对敏感权重的影响

根据多温冷藏车冷藏车厢各参数实际取值范围, 分析参量变化对各参量敏感权重的影响, 图2为

单个参量变化对冷藏车厢降温敏感权重的影响。

由图2a可知, 当 δ_i 为 100 mm , λ_i 取 $0.0338 \sim 0.0438 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时, 权重对应为 $0.564 \sim 0.477$;

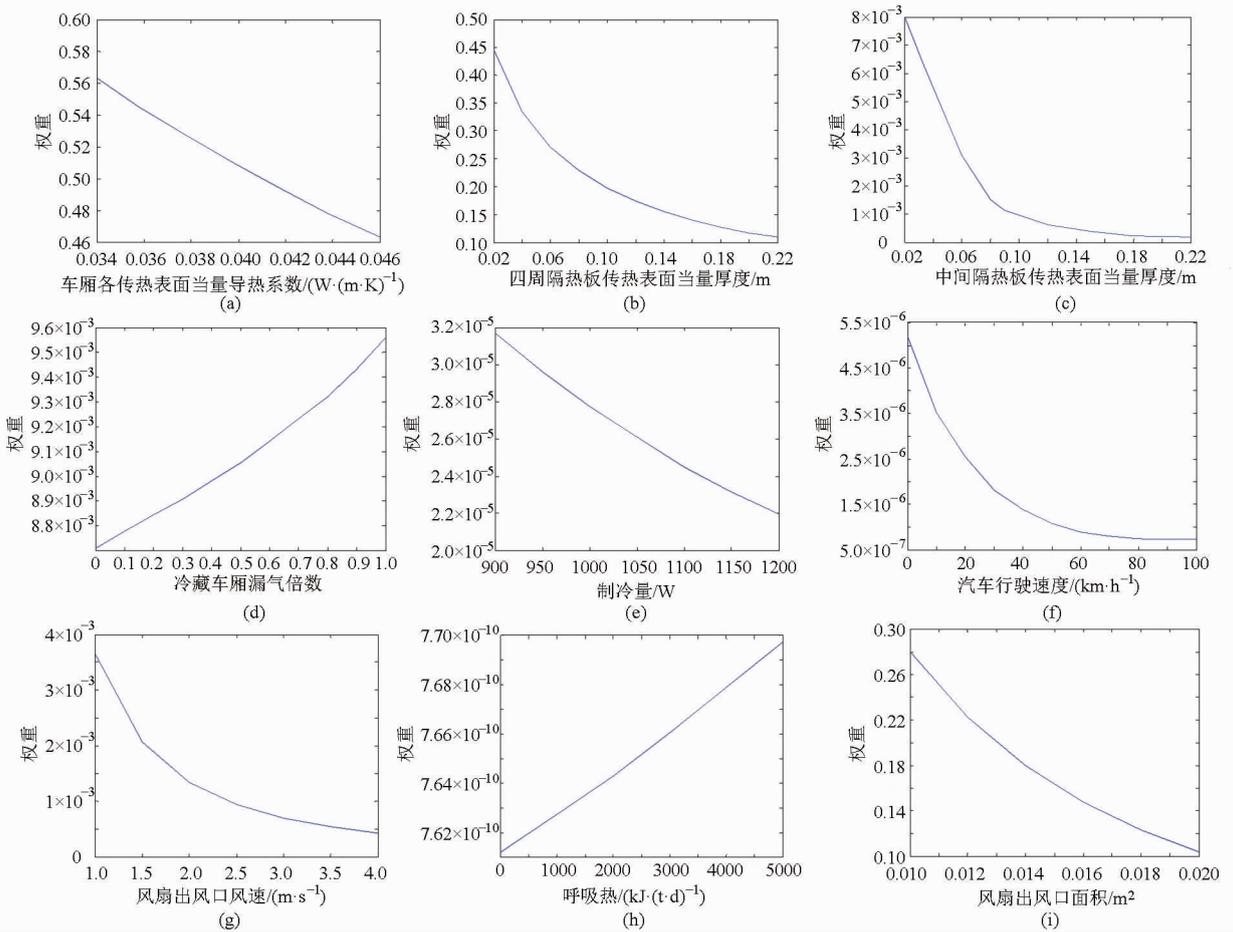


图2 冷藏车厢参数变化对敏感权重的影响

Fig. 2 Effect of parameter change on weight change in refrigerated zone

图2b可知,当 δ_i 在20~200 mm范围内取值时,权重由0.448按指数下降规律降到0.126;由图2c~2g可知,当 δ_g 、 β_1 、 Q_0 、 v_w 、 v_f 、 H 分别取0.02~0.18 m、0.1~0.8、900~1200 W、20~100 km/h、1~4 m/s、0~5000 kJ/(t·d)时,这几个参数的权重变化非常小,变化范围分别为 $7.7 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-4}$ 、 $4 \times 10^{-3} \sim 9.27 \times 10^{-3}$ 、 $3.16 \times 10^{-5} \sim 2.19 \times 10^{-5}$ 、 $4.18 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-7}$ 、 $3.63 \times 10^{-3} \sim 4.8 \times 10^{-4}$ 、 $7.613 \times 10^{-10} \sim 7.75 \times 10^{-10}$;图2i为 F_f 在0.01~0.02 m²时,对应权重变化为0.28~0.113。参数的取值发生变化,权重也发生变化,因此,设计制造多温冷藏车冷藏车厢时,要根据具体要求来确定相关参数及权重。

3.2.2 参量变化率对敏感权重变化率的影响

考虑到各参数敏感因子大小差异大,为了更加客观地分析敏感因素变化对敏感权重的影响,根据冷藏车的实际参数,计算出各影响参数的平均敏感度系数,其中,平均敏感度系数为评价指数变化幅度(%)与不确定性因素变化的幅度(%)之比,具体见表2所示。

对平均敏感度系数取绝对值,由表2可知,各因

素平均敏感度系数较大的分别是 δ_g 、 v_w 、 Q_0 、 v_f 、 F_f ,一般的是 δ_i 、 λ_i ,最小的是 β_1 、 H 。

图3为敏感度系数较为接近的几组数据进行比较的曲线,其中, x 轴坐标为敏感因素的变化率,在计算时取相等的变化率, y 轴坐标为权重变化率。由图3a可看出,当 δ_g 、 v_w 、 Q_0 、 v_f 、 F_f 敏感因素均减少或增加30%幅度时,减少30%时权重变化率的幅度比敏感因素增加30%时要大,其中,增加30%时敏感因素 δ_g 、 v_w 、 Q_0 、 v_f 、 F_f 的权重变化率分别为-32%、-36%、-30%、-37%、-34%,减小30%幅度时敏感因素 δ_g 、 v_w 、 Q_0 、 v_f 、 F_f 的权重变化率分别为90%、58%、42%、78%、56%,敏感因素 δ_g 的权重变化率最大,敏感因素 Q_0 的权重变化率最小。由图3b可看出,敏感因素 λ_i 变化 $\pm 30\%$ 时,权重变化率对应为 $\pm 17\%$,趋于一条直线,而敏感因素 δ_i 向30%方向变化时,其权重变化率逐渐向-30%直线变化,反之,权重变化率逐渐向44%直线变化。由图3c可知,影响因素 β 、 H 变化 $\pm 30\%$ 时,权重变化率范围均在 $\pm 1\%$ 左右。参数变化率不同,权重变化率也不同,进一步说明设计制造多温冷藏车冷藏车厢时一定要根据具体要求来确定相关参数及权重。

表 2 冷藏车厢影响参数的平均敏感度系数

Tab. 2 Average sensitivity coefficient of influence parameters in refrigerated zone

序号	敏感因子	参数初始值	敏感权重初始值	参数变化率/%	敏感权重变化率/%	平均敏感度系数
1	λ_i	0.0378 W/(m·K)	0.527 216 157	5	-3.05	-0.609 61
				-5	3.17	-0.634 54
2	δ_g	0.06 m	0.002 319 52	5	-5.24	-1.047 29
				-5	22.83	-4.565 9
3	δ_i	0.1 m	0.197 957 316	5	-2.98	-0.596 58
				-5	3.90	-0.780 8
4	v_w	80 km/h	5.871 75	5	-5.51	-1.101 98
				-5	10.22	-2.044 52
5	β_1	0.63	0.009 130 981	5	0.28	0.055 091
				-5	-0.23	0.046 677
6	Q_0	1 100 W	2.448 53	5	-6.04	-1.207 74
				-5	7.27	-1.454 12
7	v_f	2 m/s	0.001 339 758	5	-5.92	-1.184 2
				-5	7.01	-1.402 932
8	F_f	0.012 m ²	0.222 268 699	5	-5.77	-1.154 64
				-5	-6.20	1.240 602
9	H	4 000 kJ/(t·d)	7.667 06	5	0.08	0.015 871
				-5	-0.02	0.003 392

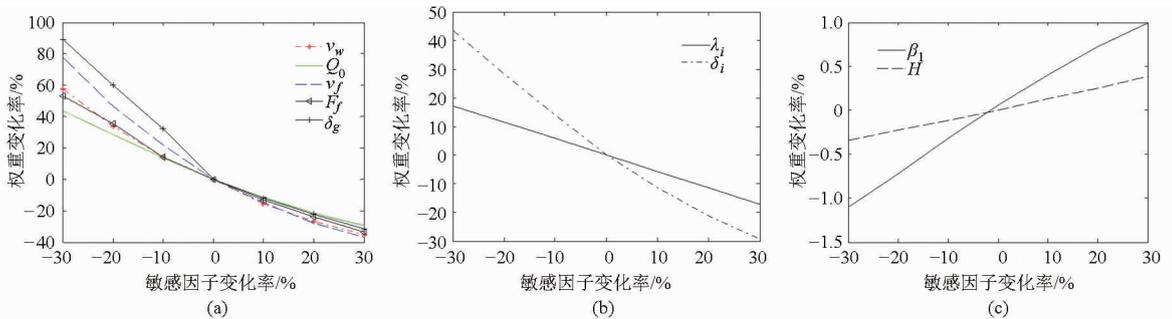


图 3 冷藏车厢参数变化率与敏感权重变化率关系曲线

Fig. 3 Relationship between parameter changing rate and weight changing rate in refrigerated zone

3.3 冷冻车厢降温影响参数的敏感度分析

冷冻车厢的敏感度分析过程与冷藏车厢类似，由式(5)~(10)可得到各敏感因子表达式，代入多温冷藏车的相关参数值，并按照式(11)~(14)进行处理，结果如表 3 所示。

从表 3 可知，各影响参数对冷冻车厢降温影响的敏感度依次为 λ_i 、 F_f 、 δ_i 、 β_2 、 δ_g 、 v_f 、 v_w 、 Q_0 ，其中， δ_i 、 v_f 、 F_f 、 Q_0 与冷藏车降温快慢呈反向关系，其他参数则呈正相关性。由表中数据也可看出， λ_i 、 δ_i 、 F_f 的权重最大，其余参数的权重几乎可以忽略。

表 3 冷冻车厢降温影响参数的敏感因子与敏感权重

Tab. 3 Sensitive factors and sensitive weights of cooling influence parameters in freezing zone

参数	λ_i	δ_i	δ_g	v_w	β_2	Q_0	F_f	v_f
敏感因子	1 611. 876 9	-574. 261 2	-4. 651 5	0.001 7	-3. 423 3	-0. 074 4	481. 645 0	2. 723 7
敏感权重	0. 601 7	0. 214 3	0. 001 7	$6. 385 8 \times 10^{-7}$	0. 001 3	$2. 777 7 \times 10^{-5}$	0. 179 8	0. 001 0

图 4 为单个参量变化对冷冻车厢降温敏感权重的影响。将图 4 与图 2 对比可看出，单个参数变化时，冷冻与冷藏车厢的权重变化规律几乎相同。按照表 2 的计算方法，可知各因素平均敏感度系数较大的分别是 v_w 、 Q_0 、 v_f 、 F_f 、 δ_g ，较小的分别是 δ_i 、 λ_i 、 β_2 。参数的取值发生变化，权重也相应发生变化，设

计制造多温冷藏车冷冻区车厢时，要根据具体要求来确定相关参数及权重。

图 5 为冷冻车厢的各参数变化率与敏感权重变化率的关系，由图 5 可看出，冷冻车厢的权重变化率变化趋势大致与冷藏车厢相似，当敏感因素 v_w 、 Q_0 、 v_f 、 F_f 、 δ_g 、 λ_i 、 δ_i 、 β_2 均减少或增加 30% 时，冷冻车厢

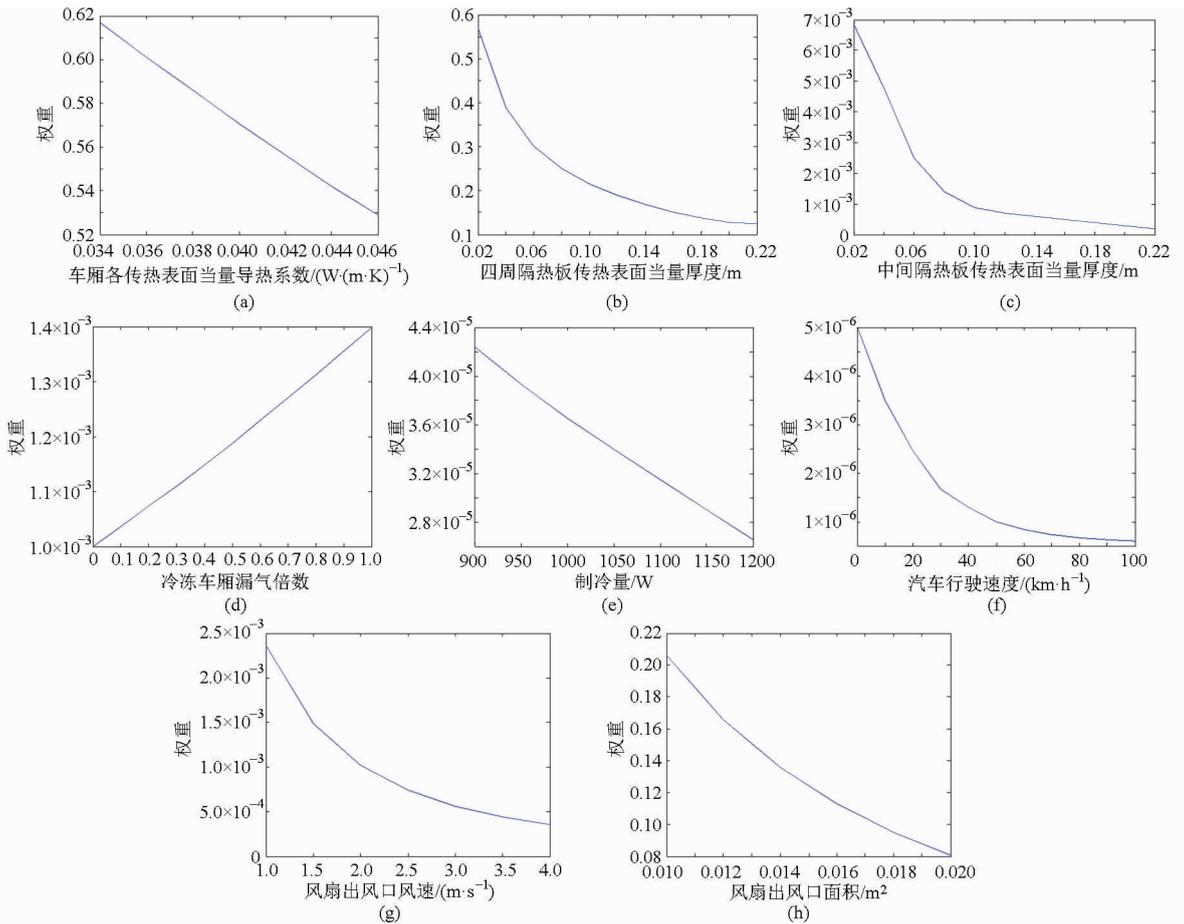


图4 冷冻车厢参数变化对敏感权重的影响

Fig. 4 Relationship between parameter changing rate and weight changing rate in freezing zone

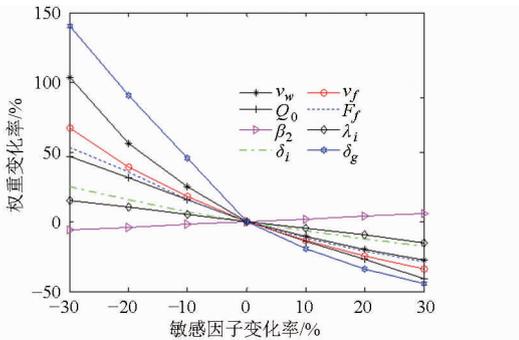


图5 冷冻车厢的参数变化率与敏感权重变化率关系曲线

Fig. 5 Relationship between parameter changing rate and weight changing rate in freezing zone

影响参数减少30%时权重变化率的幅度比敏感因素增加30%时要大,其中,增加30%时敏感因素 v_w 、 Q_0 、 v_f 、 F_f 、 δ_g 、 λ_i 、 δ_i 、 β_2 的权重变化率分别为-23%、-39%、-35%、-29%、-46%、-19%、-20%、-5%,减小30%时敏感因素 v_w 、 Q_0 、 v_f 、 F_f 、 δ_g 、 λ_i 、 δ_i 、 β_2 的权重变化率分别为104%、50%、66%、54%、138%、20%、25%、5%;敏感因子变化率从0增加到30%时,除 β_2 权重变化率在逐渐向正方向增大外,各敏感因子的权重变化率变化幅度都在逐渐向负方向增大;敏感因子变化率从0减少30%时,除 β_2 权重变化率在逐渐向负方向增大外,各敏感因子的权

重变化率都向正方向逐渐增大。参数变化率不同,权重变化率也不同,进一步说明设计制造多温冷藏车冷冻车厢时一定要根据具体要求来确定相关参数及权重。

4 结论

(1)当冷藏车厢的 δ_i 为100 mm, λ_i 为0.0338~0.0438 W/(m·K)时,权重对应呈反比关系,为0.564~0.477;当 δ_i 为20~200 mm时,权重为0.448~0.126,按指数规律下降;当 F_f 在0.01~0.02 m²取值时,对应权重变化为0.28~0.113,其它参数对应的权重值很小。

(2)当冷藏车厢 δ_g 、 v_w 、 Q_0 、 v_f 、 F_f 、 λ_i 、 δ_i 、 β_1 、 H 增加30%时,对应的权重变化率分别为-32%、-36%、-30%、-37%、-34%、-17%、-30%、1%、0.5%,减小30%时敏感因素 δ_g 、 v_w 、 Q_0 、 v_f 、 F_f 、 λ_i 、 δ_i 、 β_1 、 H 的权重变化率分别为90%、58%、42%、78%、56%、17%、44%、-1%、-0.5%。

(3)冷冻与冷藏车厢的权重值大小及变化规律几乎相同,当 v_w 、 Q_0 、 v_f 、 F_f 、 δ_g 、 λ_i 、 δ_i 、 β_2 数值增加30%时,对应的权重变化率分别为-23%、-39%、

-35%、-29%、-46%、-19%、-20%、-5%,除 β_2 权重变化率在逐渐向正方向增大外,各敏感因子的权重变化率变化幅度都在逐渐向负方向增大;反之,减小30%幅度时,除 β_2 权重变化率在逐渐向负方向增大外,各敏感因子的权重变化率都在向正方向逐渐增

大, v_w 、 Q_0 、 v_f 、 F_f 、 δ_g 、 λ_i 、 δ_i 、 β_2 的权重变化率分别为104%、50%、66%、54%、138%、20%、25%、5%。

(4)参数的取值不同,权重也不同,权重的变化率也不同,设计制造多温冷藏车时,要根据具体要求来确定相关参数及权重。

参 考 文 献

- 1 李锦,谢如鹤,刘广海,等. 冷藏车降温数学模型构建及影响因素分析[J]. 农业机械学报,2013,44(6):175-182.
LI Jin, XIE Ruhe, LIU Guanghai, et al. Establishment of cooling mathematical model and analysis of influence factors for refrigerated trucks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(6): 175-182. (in Chinese)
- 2 李锦,谢如鹤,刘广海,等. 多温冷藏车降温特性与其影响参数研究[J]. 农业机械学报,2013,44(2):128-135.
LI Jin, XIE Ruhe, LIU Guanghai, et al. Cooling characteristics and influence parameters of multi-temperature refrigerated truck[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(2): 128-135. (in Chinese)
- 3 李锦,谢如鹤,刘广海,等. 车外综合温度条件下典型冷藏车厢内热稳定性研究[J]. 农业机械学报,2012,43(8):159-166.
LI Jin, XIE Ruhe, LIU Guanghai, et al. Research on the thermal stability of typical refrigerated trucks compartment in the outdoor sol-air temperature conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(8): 159-166. (in Chinese)
- 4 李锦,谢如鹤. 冷藏运输装备技术研究进展[J]. 流体机械,2014,42(5):82-87.
LI Jin, XIE Ruhe. Research progress refrigerated transport equipment technology[J]. Fluid Machinery, 2014, 42(5): 82-87. (in Chinese)
- 5 李锦,谢如鹤,刘广海. 易腐食品冷藏运输车温度场影响因素仿真研究[J]. 食品与机械,2012(3):190-194.
LI Jin, XIE Ruhe, LIU Guanghai. Simulation study on the compartment temperature field influence factors of perishable food refrigerated trucks[J]. Food & Machinery, 2012(3): 190-194. (in Chinese)
- 6 李锦,谢如鹤. 冷藏车厢内温度波动特性分析[J]. 流体机械,2014,42(1):63-67.
LI Jin, XIE Ruhe. Analysis on temperature fluctuations characteristics of the refrigerated compartments[J]. Fluid Machinery, 2014,42(1):63-67. (in Chinese)
- 7 龙恩深,王勇,付祥钊,等. 夏季户外停车空调汽车的车内温变特性研究[J]. 重庆建筑大学学报,2003,25(4):49-53.
LONG Enshen, WANG Yong, FU Xiangzhao, et al. Experimental study on the temperature features inside the car parking in summer outdoors[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003,25(4):49-53. (in Chinese)
- 8 龙恩深,王勇. 空调汽车停-启时车内温变特性的理论分析与实验检验[J]. 重庆建筑大学学报,2003,25(6):83-88.
LONG Enshen, WANG Yong. Theoretical and experimental study on air temperature characteristics inside a car during parking and starting[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, 25(6): 83-88. (in Chinese)
- 9 孙淑凤,王宜义,陈流芳,等. 汽车空调系统降温性能的模拟计算[J]. 低温与超导,2000,28(2):36-40.
SUN Shufeng, WANG Yiyi, CHEN Liufang, et al. Simulation calculation on temperature dropping of the automobile air conditioner[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2000, 28(2): 36-40. (in Chinese)
- 10 刘洪胜,陈江平,陈芝久. CO₂轿车空调降温性能试验研究[J]. 汽车工程,2006,28(6):577-589.
LIU Hongsheng, CHEN Jiangping, CHEN Zhijiu. An experimental study on the performance of mobile CO₂ air conditioner[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(6):577-589. (in Chinese)
- 11 VIRSEDA P, PINAZO J M. Heat conduction in multilayer spherical products by transfer function[J]. International Journal of Refrigeration,1998, 21(4):285-294.
- 12 SESTRADA A C, CLELAND D J. Prediction of the dynamic thermal behavior of walls for refrigerated rooms using lumped and distributed parameter models[J]. International Journal of Refrigeration,2001, 24(6):272-284.
- 13 SEEM J E, KLEIN S A, BECKMAN W A, et al. Model reduction of transfer function using a dominant root method[J]. ASME Journal of Heat Transfer,1990, 112(3):547-552.
- 14 OAKLEY J E, HAGAN O A. Probabilistic sensitivity analysis of complex models a Bayesian approach[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology),2004,66(3):751-769.
- 15 谭碧涛,陈洪斌,王群书,等. 光电系统探测能力敏感度分析方法[J]. 光子学报,2013,42(11):1340-1344.
TAN Bitao, CHEN Hongbin, WANG Qunshu, et al. Sensitivity analysis method on detecting ability of electro-optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2013,42(11):1340-1344. (in Chinese)