

# 基于汽车空调温度控制性能提升的导流板响应面优化分析

刘翔 朱帅 朱凯

(信阳职业技术学院, 信阳 464000)

**【摘要】**为解决汽车空调出风口温度不均匀和差异性大的问题,对汽车空调出风口温度控制曲线进行试验和仿真,采用响应面优化的方法对导流板结构的外边长度、里边长度和倾斜角度与平均温度和温度差进行相关性分析,得出回归多项式、响应面曲线图和导流板结构的最优参数设计,仿真结果表明,该方法改进了汽车空调的温度控制曲线性能。

**关键词:**汽车空调 温度控制曲线 导流板 响应面优化 结构设计

**中图分类号:**U463.85 **文献标志码:**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20230233

## Improvement of TCC Performance of Automotive Air Conditioner by Deflector Based on Response Surface Optimization

Liu Xiang, Zhu Shuai, Zhu kai

(Xinyang Vocational and Technical college, Xinyang 464000)

**【Abstract】**To solve the problem of unevenness and large difference in temperature at the air outlet of car air conditioners, temperature control curve of a car air conditioning outlet is simulated and tested. The correlation analysis of the outer length, inner length and inclination angle of the deflector structure with the average temperature and temperature difference is performed by using response surface optimization to derive the regression polynomials, response surface graphs, and the optimal parameter design of the deflector structure. The simulation results show that this method improves the temperature control curve performance of the car air conditioner

**Key words:** Automobile air conditioner, Temperature control curve, Deflector, Response surface optimization, Structural design

**【引用格式】**刘翔,朱帅,朱凯.基于汽车空调温度控制性能提升的导流板响应面优化分析[J].汽车技术,2025(4):56-62.

LIU X, ZHU S, ZHU K. Improvement of TCC Performance of Automotive Air Conditioner by Deflector Based on Response Surface Optimization[J]. Automobile Technology, 2025(4): 56-62.

## 1 前言

优化汽车空调的温度控制性能对自动控温空调的研究十分重要,是提高汽车舒适性和安全性的重要手段<sup>[1-2]</sup>。杨洁<sup>[3]</sup>探索了汽车热环境的分布及变化对乘员的影响并建立乘员热舒适性预测模型。胡杨<sup>[4]</sup>对比了3种不同壳体结构对汽车空调温度性能的影响,对所有模型内部的温度特性曲线进行对比研究,选出具有最佳温度曲线的空调模型。王金凤<sup>[5]</sup>改进了原汽车空调内部结构及其部件设计,提高了温度控制与降噪性能。先前

研究对汽车空调温度控制的评价标准尚不清晰或优化方法较为复杂,应用困难,因此,本文通过仿真试验对汽车空调的温度场进行分析,并对该空调的温度控制曲线进行评价,分析汽车空调的温度控制性能,采用响应面优化导流板提升空调的温度控制性能。

## 2 温度控制曲线试验

### 2.1 温度控制曲线采集

汽车空调温度控制是指控制经蒸发器降温或暖风芯体加热后在壳体内部形成混合风的温度。温度控制

通信作者:朱帅(1996—),男,河南驻马店人,硕士研究生,主要研究方向为汽车空调及CFD仿真,1263017846@qq.com。

曲线(Temperature Control Curve, TCC)是汽车空调出风口的温度随空调内部风门打开角度变化的曲线,是评价汽车空调温度控制性能的重要依据。本研究分别对某汽车空调吹脸、吹脸吹脚、吹脚、吹脚除霜和除霜5种模式进行试验,得到该空调的温度控制曲线。

TCC试验如图1所示,试验配置状态完好的空调样件、试验台和若干热电偶等部件。将带有风道的汽车空调安装在TCC试验台上,并在进风口和各个出风口布置4个热电偶,监测进风和出风的平均温度。

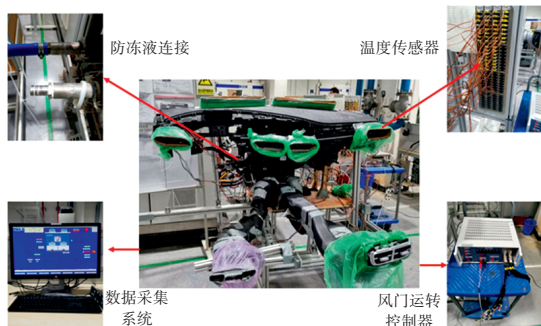


图1 某汽车空调TCC试验

## 2.2 温度控制曲线评价标准

汽车空调TCC评价标准主要包括均匀性、差异性、渐进性和滞后性<sup>[6-9]</sup>。均匀性是指同一功能仪表板出风口左右温差不超过 $5^{\circ}\text{C}$ ,前后排温差不超过 $8^{\circ}\text{C}$ 。差异性是指半模式时2种不同模式出风口的温差值不可过大,如吹脸吹脚模式下吹脸出风口和吹脚出风口的温差应在 $0\sim 10^{\circ}\text{C}$ 范围内。渐进性是指所有出风口的温度控制曲线在风门由全开到全关的过程中曲线曲率合适,逐步变化,即混合风门角度每变化 $10\%$ ,温差不能超过全程的 $20\%$ 。滞后性是指同一出风口,在不同转向时的同一混合风门位置的出风温度差异不超过 $5^{\circ}\text{C}$ ,如吹脸模式下在混合风门 $50\%$ 位置处,由混合风门全开状态转到 $50\%$ 处与由混合风门全关状态转到 $50\%$ 处的温差不可超过 $5^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.3 温度控制曲线试验结果

试验台测试系统控制内部风门旋转,依次测量出吹脸模式、吹脸吹脚模式、吹脚模式、吹脚除霜模式和除霜模式下混合风门由全关到全开(出风由冷到热),再由全开到全关(出风由热到冷)过程中出风口温度。本文以整模式的吹脸模式和半模式的吹脸吹脚模式为例,得到出风口的TCC曲线如图2、图3所示。

## 2.4 温度控制曲线结果分析

由图2可以看出,吹脸模式下均匀性较差,在混合风门开度 $40\%\sim 80\%$ 附近左右吹脸出风口温差较大,最左侧和中间左侧吹脸出风口温度高于最右侧和中间右侧出风口的温度,温差最高可达 $20^{\circ}\text{C}$ 。当乘员进行温

度调节时,出风口温度一致性较低,影响车内温度调节;由于温差过大渐进性不易评价;滞后性在要求范围内。从图3吹脚吹脸模式下的温度控制曲线可以发现,存在明显的温度均匀性问题和差异性问题,吹脚出风口和吹脸出风口的温差最高可达 $20^{\circ}\text{C}$ 。

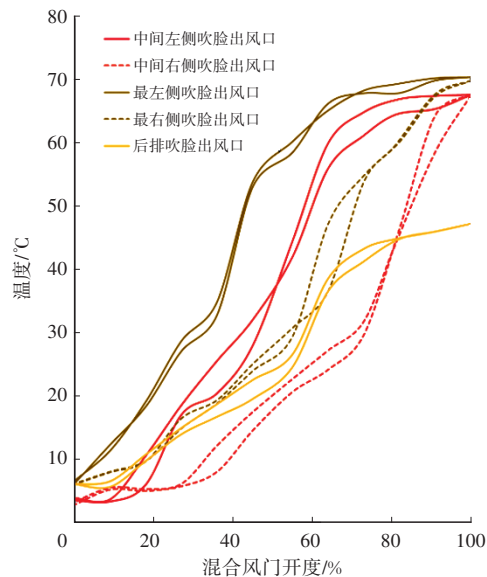


图2 吹脸模式TCC结果

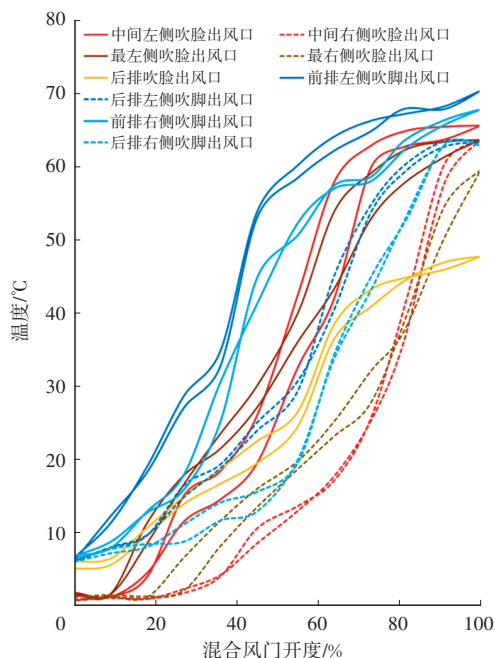


图3 吹脸吹脚模式TCC结果

从该试验结果综合分析可知该TCC性能均匀性和差异性问题较为严重,渐进性其次,滞后性较好。因此,为解决该空调TCC性能的均匀性和差异性问题,本文根据试验结果,借助流体仿真,分析空调内部流场情况,对导流板结构进行适当优化,然后通过响应面分析方法确定改善空调内部流场和温度场的结构设计方案,使各个模式下的均匀性和差异性均满足要求。

### 3 温度控制曲线仿真

本文采用STAR-CCM+流场仿真软件进行仿真模拟,建立完整的几何模型,将其分割为不同的区域,并进行网格划分,如图4所示。设置湍流模拟模型和边界条件,在区域连续体物理模型中选择三维、定常、分离流、空气、恒密度、雷诺平均纳维-斯托克斯、标准的 $k-\epsilon$ 两层模型,壁面采用两层 $y+$ 壁面处理。空调入口处风量设置为质量流量入口 $0.06\text{ kg/s}$ ,湍流长度比例为 $0.7\text{ mm}$ ,湍流强度为 $0.043\text{ m/s}$ ,温度为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ ;出风口为压力出口;暖风芯体和蒸发器为正交各向异性多孔介质区域<sup>[10]</sup>。对该模型网格、物理模型和边界条件设置完成后依次转动混合风门进行仿真,按照实际空调混合风门位置点,得到对应的12个仿真数据。整理每个模式下所有出风口在各个位置的平均温度,即得到仿真的TCC结果,如图5、图6所示。

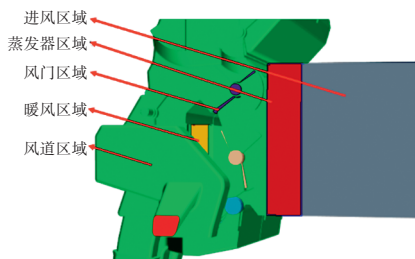


图4 分割区域后的局部模型

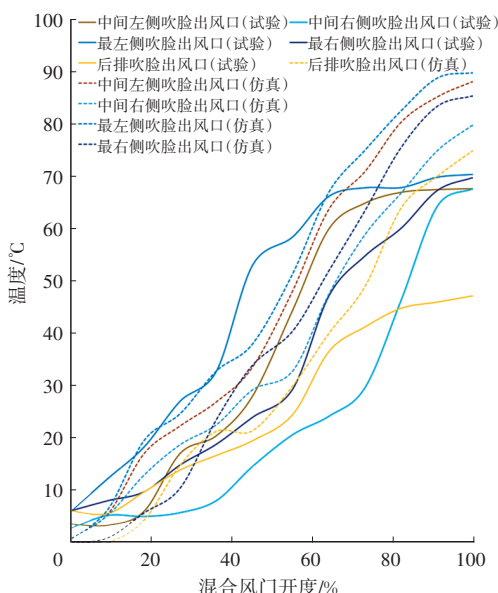


图5 吹脸模式仿真与试验对比

图5为吹脸模式下试验与仿真的温度控制曲线对比,图6为吹脸吹脚模式下仿真与试验的温度控制曲线对比。从图中可以看出,各个出风口的温度高低顺序与试验测得的出风口温度高低顺序一致,即仿真与实际测试中混合风的流动状态一致,因此,可认为TCC仿真结

果符合要求。

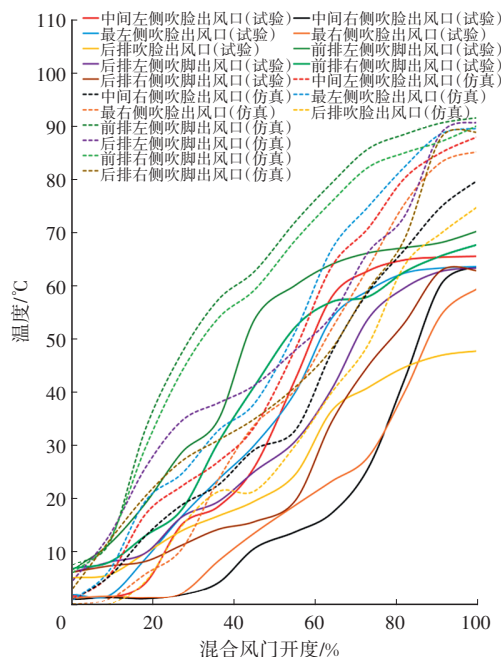


图6 吹脸吹脚模式仿真与试验对比

### 4 导流板优化

#### 4.1 导流板响应面优化方案设计

通过研究分析发现,针对TCC性能的均匀性和差异性进行优化时最直接有效的方法是改变空调内部的导流板结构,从试验数据和仿真云图对导流板流场和温度场进行分析,初步确定可以通过在导流板结构中增加挡板改善空调内部流场状态,加速冷风和热风的均匀混合,如图7所示。已知根据汽车空调内部空间结构和装配要求设计:倾斜角度范围为 $0\sim 20^\circ$ ;里边长度范围为 $50\sim 80\text{ mm}$ 、外边长度范围为 $10\sim 35\text{ mm}$ ;通过对导流板结构的3个重要参数进行响应面分析,获得3个影响因素的优先级并得出多项式回归预测模型,找出对改善汽车空调内部流场和温度场最合适的设计参数方案。

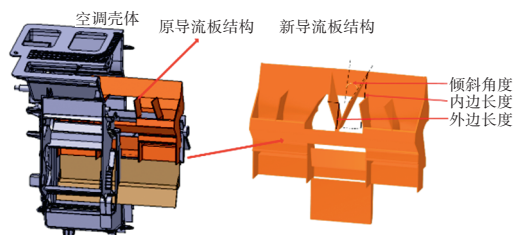


图7 导流板结构

图8为导流板在原空调模型中的流线图,流经暖风芯体的热风从导流板下方流入,流经蒸发器的冷风从导流板上流入,为提高仿真效率,本文对汽车空调导流板结构进行简化仿真,选取汽车空调混合风门在中间位置的冷热风混合时的状态进行仿真。

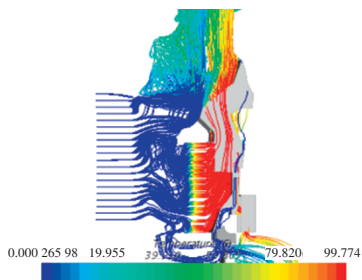


图8 原空调模型内部流线图

简化后导流板流场区域模型如图9所示,参考实际空调在该风门状态下的冷热风进风出口、进风面积和进风速度等,忽略后排吹脸流场部分,对该导流板的对应区域建立简化的流体区域,并分别设置0℃流速为1.5 m/s的冷风入口和100℃流速为3 m/s的热风入口,在出风口上方设置压力出口平面监控该出风口的质量流量和平均温度,并在该平面的左右对称位置取相同出风面积 $S_1$ 、 $S_2$ ,输出 $S_1$ 和 $S_2$ 的平均温度来评价该状态

下的左右温度差。

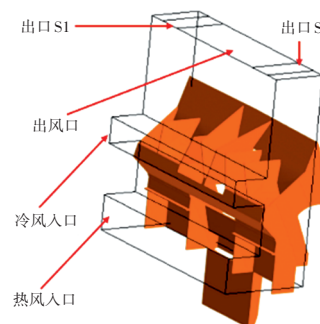


图9 简化后导流板流场

本次优化借助 Design-Expert 试验设计分析软件,采用响应面设计优化(Box-Behnken Design, BBD)方法,输入倾斜角度范围 $5^\circ \sim 15^\circ$ 、里边长度范围60~80 mm、外边长度范围15~35 mm,软件自动生成中心点数为5、总试验次数为17的不同结构参数的试验方案,如表1所示。

表1 三因素BBD试验设计数据表

标准顺序	运行顺序	倾斜角度 $A/^\circ$	里边长度 $B/\text{mm}$	外边长度 $C/\text{mm}$	平均温度 $R_1/^\circ\text{C}$	温度差 $R_2/^\circ\text{C}$	风量 $R_3/\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$	标准顺序	运行顺序	倾斜角度 $A/^\circ$	里边长度 $B/\text{mm}$	外边长度 $C/\text{mm}$	平均温度 $R_1/^\circ\text{C}$	温度差 $R_2/^\circ\text{C}$	风量 $R_3/\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$
1	8	5	60	25	51.83	6.74	42.57	10	11	10	80	15	51.32	6.31	42.58
2	14	15	60	25	54.25	2.99	42.58	11	4	10	60	35	53.82	7.78	42.59
3	7	5	80	25	51.84	5.63	42.56	12	17	10	80	35	53.16	6.66	42.61
4	12	15	80	25	53.95	2.36	42.57	13	15	10	70	25	52.42	6.66	42.61
5	6	5	70	15	52.71	4.55	42.56	14	2	10	70	25	53.42	5.56	42.59
6	16	15	70	15	51.27	2.32	42.59	15	3	10	70	25	52.99	6.71	42.58
7	10	5	70	35	52.01	11.86	42.58	16	9	10	70	25	52.62	7.36	42.62
8	1	15	70	35	55.58	0.70	42.67	17	5	10	70	25	52.52	6.76	42.58
9	13	10	60	15	52.32	6.41	42.6								

#### 4.2 导流板响应面优化分析

由表1的试验结果可以看出,导流板结构对风量影响较小,可忽略,通过 Design-Expert 软件进行响应面分析,建立平均温度和温度差的多元二次回归方程如下:

$$R_1 = +57.35 - 0.351A - 0.03B - 0.22C - 1.55 \times 10^{-3}AB + 0.025AC + 8.5 \times 10^{-4}BC \quad (1)$$

$$R_2 = -14.33 + 2.083A + 0.176B + 0.565C + 2.4 \times 10^{-3}AB - 0.0446AC - 2.55 \times 10^{-3}BC - 0.0823A^2 - 1.24 \times 10^{-3}B^2 + 3.04 \times 10^{-3}C^2 \quad (2)$$

对式(1)进行平均温度响应面方差分析,结果如表2所示。可以看出,模型大于检验水平( $F$ 值)的概率 $P < 0.001$ ,表明回归模型极显著,可靠性极高;其中单一因素倾斜角度 $A$ 和外边长度 $C$ 对响应值的影响极显著( $P < 0.001$ );模型失拟项的 $P$ 值为 $0.46 > 0.05$ ,表明回归模型残差对响应值的影响不显著。由此证明了该模型符合实际情况,可以应用该模型对出风口平均温度进行

分析和预测。从表2中看出,模型的相关系数 $R^2 = 0.9082$ ,校正系数为 $0.8532$ ,说明该模型可以解释90.8%的试验所得降解率;变异系数为 $0.82\%$ ;说明该模型能较好地反映真实的试验值,即试验的可靠性较高。

对式(2)进行温度差响应面方差分析,其结果如表3所示。可以看出,模型大于 $F$ 值的概率 $P < 0.005$ ,表明回归模型显著,可靠性较高;其中单一因素倾斜角度 $A$ 对响应值的影响极显著( $P < 0.001$ );模型失拟项的 $P$ 值为 $0.0656 > 0.05$ ,表明回归模型残差对响应值的影响不显著。由此证明了该模型符合实际情况,可以利用该模型对出风口温度差进行分析和预测。从表3中看出,模型的相关系数 $R^2 = 0.9182$ ,校正系数 $R_{\text{Adj}} = 0.8129$ ,说明模型可以解释91.8%的试验所得降解率;变异系数 $CV$ 值为 $19.55\%$ ,说明模型能较好地反映真实的试验值,试验的可靠性较高。

表2 平均温度二次响应面回归模型的方差分析结果

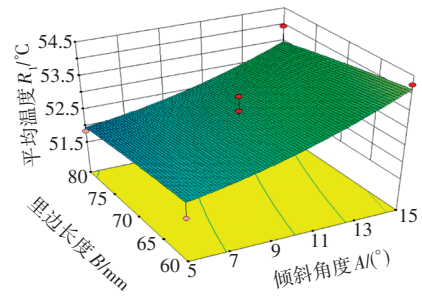
方差来源	平方和	自由度	均方	检验水平 $F$	显著性差异水平 $P$	显著性
模型	18.39	6	3.06	16.48	0.000 1	显著
倾斜角度 $A$	5.54	1	5.54	29.82	0.000 3	
里边长度 $B$	0.48	1	0.48	2.56	0.140 9	
外边长度 $C$	6.04	1	6.04	32.48	0.000 2	
倾斜角度 $A \times$ 里边长度 $B$	0.024	1	0.024	0.13	0.726 7	
倾斜角度 $A \times$ 外边长度 $C$	6.28	1	6.28	33.75	0.000 2	
里边长度 $B \times$ 外边长度 $C$	0.029	1	0.029	0.16	0.701 7	
残差	1.86	10	0.19			
失拟项	1.18	6	0.20	1.17	0.460 7	不显著
纯误差	0.68	4	0.17			
总和	20.24	16				
相关系数 $R^2$	0.908 2					
矫正系数	0.853 1					
变异系数	0.82					

表3 温度差二次响应面回归模型的方差分析结果

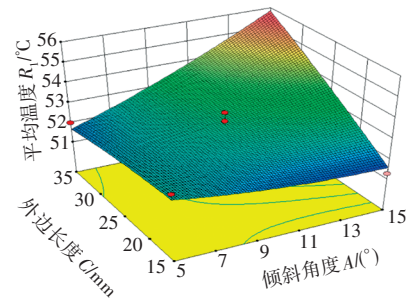
方差来源	平方和	自由度	均方	检验水平 $F$	显著性差异水平 $P$	显著性
模型	98.45	9	10.94	8.73	0.004 6	显著
倾斜角度 $A$	52.07	1	52.07	41.53	0.000 4	
里边长度 $B$	1.10	1	1.10	0.87	0.381 1	
外边长度 $C$	6.86	1	6.86	5.47	0.051 9	
倾斜角度 $A \times$ 里边长度 $B$	0.058	1	0.058	0.046	0.836 4	
倾斜角度 $A \times$ 外边长度 $C$	19.94	1	19.94	15.90	0.005 3	
里边长度 $B \times$ 外边长度 $C$	0.26	1	0.26	0.21	0.662 6	
倾斜角度 $A \times$ 倾斜角度 $A$	17.80	1	17.80	14.20	0.007 0	
里边长度 $B \times$ 里边长度 $B$	0.064	1	0.064	0.051	0.827 1	
外边长度 $C \times$ 外边长度 $C$	0.39	1	0.39	0.31	0.595 1	
残差	8.78	7	1.25			
失拟项	7.08	3	2.36	5.55	0.065 6	不显著
纯误差	1.70	4	0.43			
总和	107.23	16				
相关系数 $R^2$	0.918 2					
矫正系数	0.812 9					
变异系数	19.55					

### 4.3 导流板响应面优化结果

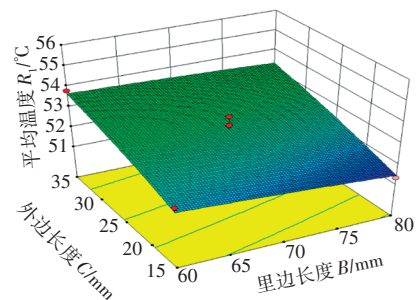
根据回归模型分析结果,利用 Design-Expert 软件绘制各因素交互效应响应曲面图,如图 10、图 11 所示。由图 10 可以看出,对平均温度影响最大的因素为倾斜角度,其次是外边长度,最后为里边长度。由图 11 可以看出,对温度差影响最大的因素为外边长度,其次是倾斜角度,最后为里边长度。因此,可知在导流板优化设计时需着重注意倾斜角度和外边长度,优化结果如表 4 所示。



(a) 里边长度与倾斜角度交互作用



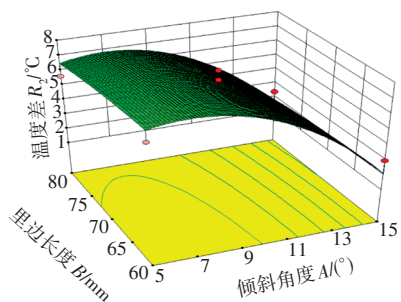
(b) 外边长度与倾斜角度交互作用



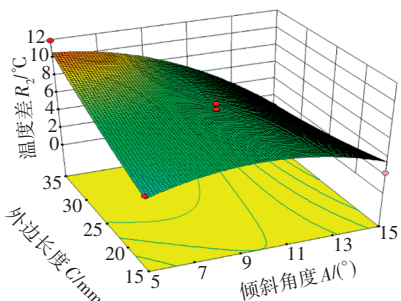
(c) 外边长度与里边长度交互作用

图 10 平均温度交互效应响应曲面图

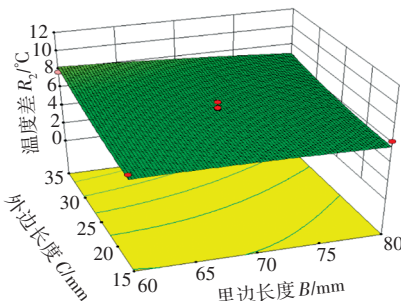
优化要求如表 4 所示,平均温度  $R_1$  越大说明热交换效果越好,因此选取“约束”最大值,并适当增大范围,将最大值设置为  $60\text{ }^\circ\text{C}$ ;温度差  $R_2$  越小说明均匀性效果越好,因此选取“约束”最小值,并设置最小温差为  $0\text{ }^\circ\text{C}$ 。求解后即可得  $A$ 、 $B$ 、 $C$  对应的最优试验值,即倾斜角度  $A$  为  $15^\circ$ ,里边长度  $B$  为  $60\text{ mm}$ ,外边长度  $C$  为  $35\text{ mm}$ ,此时响应值平均温度  $R_1$  为最大值  $56.050\text{ }^\circ\text{C}$ ;温度差  $R_2$  为最小值  $1.381\text{ }^\circ\text{C}$ ,如表 5 所示。



(a)里边长度与倾斜角度交互作用



(b)外边长度与倾斜角度交互作用



(c)外边长度与里边长度交互作用

图 11 温度差交互效应响应曲面图

表 4 响应面优化约束

因素	目标	下限	上限
倾斜角度 $A/(^\circ)$	在范围内	5	15
里边长度 $B/\text{mm}$	在范围内	60	80
外边长度 $C/\text{mm}$	在范围内	15	35
平均温度 $R_1/^\circ\text{C}$	最大值	51.27	60
温度差 $R_2/^\circ\text{C}$	最小值	0	11.86

表 5 响应面优化结果

倾斜角度 $A/(^\circ)$	里边长度 $B/\text{mm}$	外边长度 $C/\text{mm}$	平均温度 $R_1/^\circ\text{C}$	温度差 $R_2/^\circ\text{C}$	结果
15.00	60.00	35.00	56.015	1.381 2	选择
15.00	60.14	35.00	56.012	1.377 6	
15.00	60.34	35.00	56.007	1.372 4	

为验证模型预测的准确性,按照优化后的条件进行仿真验证,所得结果为  $R_1=57.04\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $R_2=1.28\text{ }^\circ\text{C}$ ,与模型预测值较为接近,表明该模型能较好地预测实际情况。

### 5 优化导流板后 TCC 分析

图 12 为原导流板吹脸模式混合风门半开状态下

的温度流线云图,可以看出,原结构的热风向左偏移,使出风口的左侧温度较右侧高,影响了 TCC 的均匀性。图 13 为优化后导流板吹脸模式半热温度流线图,优化后的结构由于中间部分添加的导流结构,从图中流线可以看出,热风被导向中间部分,提高了均匀性。

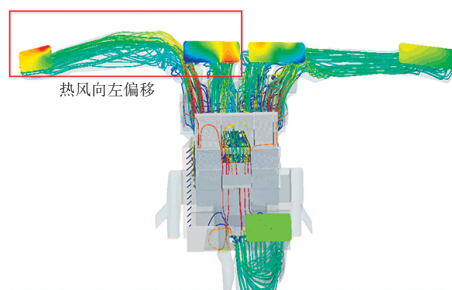


图 12 原导流板吹脸模式半热温度流线图

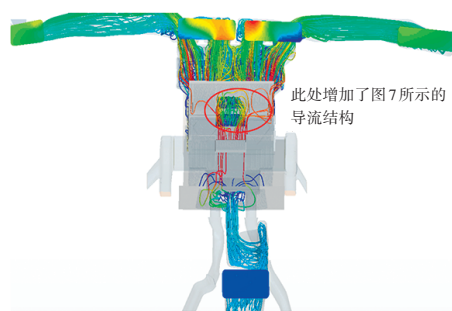


图 13 优化后导流板吹脸模式半热温度流线图

从仿真结果中可以看出,优化后导流板结构对提高 TCC 性能更具显著效果,因此,继续对优化导流板进行 TCC 仿真验证,得出优化后的温度控制曲线,如图 14、图 15 所示,对比图 2、图 3 可以看出,导流板优化后的 TCC 性能在均匀性和差异性方面较原状态导流板明显改善,渐进性同样满足标准要求。

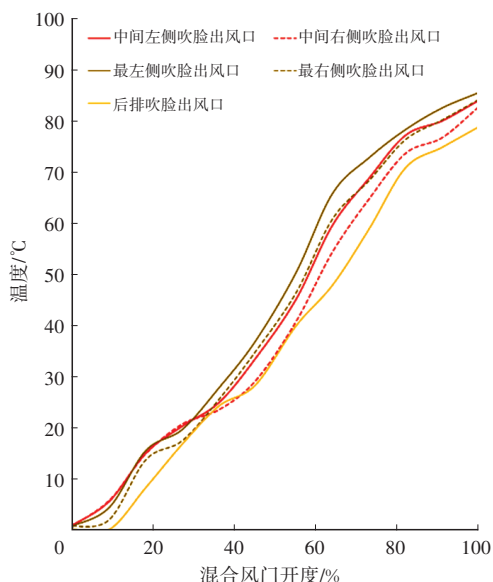


图 14 优化后吹脸模式 TCC 结果

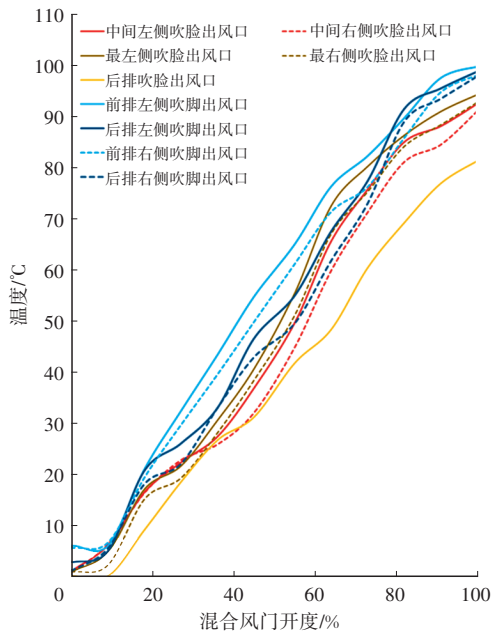


图15 优化后吹脚吹脸模式TCC结果

## 6 结束语

本文以汽车空调为研究对象,从优化汽车空调内部导流板结构入手,通过响应面优化的方法合理设计导流板结构参数,提高了该空调温度控制曲线的均匀性和差异性,进而提高了该汽车空调的温度控制性能。

优化导流板结构结合简化后的CFD仿真模型,采用BBD响应面设计方法,通过对试验数据进行回归拟合和三维响应曲面图的绘制,得出对应各因素水平的响应值,从中预测最优的因素设计方案。仿真验证结果表明,TCC性能明显提高,证明了该优化方法和优化方案能够改进汽车空调温度控制曲线,提高了该空调的温度控制性能。

### 参考文献

- [1] 李志伟. 汽车空调控制系统的现状和发展趋势[J]. 时代汽车, 2019(5): 170-171.  
LI Z W. The Current Situation and Development Trends of Automotive Air Conditioning Control Systems[J]. Times Automotive, 2019(5): 170-171.
- [2] 王东芳, 高志强. 汽车空调系统性能优化研究[J]. 汽车电器, 2020(2): 41-42+44.  
WANG D F, GAO Z Q. Research on Performance Optimization of Automotive Air Conditioning Systems[J]. Automotive Electrical, 2020(2): 41-42+44.
- [3] 杨洁. 汽车乘员舱热舒适性主客观试验与评价[D]. 重庆:

重庆大学, 2020.

YANG J. Subjective and Objective Tests and Evaluations of Thermal Comfort in Car Passenger Compartments[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.

- [4] 胡杨. 汽车空调HVAC的温度线性分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.  
HU Y. Temperature Linear Analysis of Automotive Air Conditioning HVAC[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [5] 王金凤. 一种轿车空调HVAC的性能改进[J]. 上海汽车, 2011(7): 16-18.  
WANG J F. Performance Improvement of A Car Air Conditioning HVAC System[J]. Shanghai Automotive, 2011(7): 16-18.
- [6] 凌婧. 基于空调送风参数的汽车乘员舱热环境分析与优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.  
LING J. Analysis and Optimization of Thermal Environment in Automobile Passenger Cabin Based on Air Conditioning Supply Parameters[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [7] 简余. 基于响应面方法的混凝土梁非线性模型修正[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019.  
JIAN Y. Nonlinear Model Correction of Concrete Beams Based on Response Surface Methodology[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2019.
- [8] 袁峻萍. 基于ADAMS和双响应面法的车辆悬架系统稳健设计[D]. 南昌: 华东交通大学, 2013.  
YUAN J P. Robust Design of Vehicle Suspension System Based on ADAMS and Dual Response Surface Method[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2013.
- [9] 黄新仁. 响应面法在生物过程优化中的应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.  
HUANG X R. The Application of Response Surface Methodology in Biological Process Optimization[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [10] 陈杨华, 冯英. 某型汽车空调风道的CFD数值模拟计算应用[J]. 南昌大学学报, 2012, 36(3): 282-285.  
CHEN Y H, FENG Y. CFD Numerical Simulation Calculation Application of A Certain Type of Car Air Conditioning Duct[J]. Journal of Nanchang University, 2012, 36(3): 282-285.
- (责任编辑 王 一)
- 修改稿收到日期为2023年8月19日