

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.08.014

汽车空调风道改进及对乘员热舒适性影响分析

谷正气^{1,2}, 申红丽¹, 杨振东¹, 尹郁琦³

(1. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082;
2. 湖南工业大学, 湖南 株洲, 412007; 3. 一汽-大众汽车有限公司, 长春 130011)

摘要: 利用计算流体动力学软件 Fluent, 对汽车空调风道中的气流进行数值仿真, 其结果与试验对比误差较小, 并得出驾驶员侧出风口风量所占比例较小, 从而致使驾驶员热舒适性较差。为改善这一现象, 利用响应表面法, 以空调风道中所加导流片的 3 个结构尺寸为设计变量, 以驾驶员一侧的出风量比例和空调总出风量为优化目标对空调风道系统进行优化改进, 并将改进后的空调系统应用于驾驶员热舒适性的分析。结果表明: 改进后的汽车空调使驾驶员一侧的空调出风量比例由原来的 44.9% 提高至 51.3%, 驾驶员的热舒适性得到明显改善。

关键词: 空调风道; 计算流体动力学; 响应面模型; 热舒适性

中图分类号: U27

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)08-091-06

Improvement of vehicle air-conditioning duct and analysis of its impact on occupant thermal comfort

GU Zhengqi^{1,2}, SHEN Hongli¹, YANG Zhendong¹, YIN Yuqi³

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China; 3. FAW -Volkswagen Automotive Co., Ltd., Changchun 130011, China)

Abstract: A numerical simulation on the air flow in vehicle air-conditioning duct is conducted by applying computational fluid dynamics(CFD)code Fluent and its result is compared to test result within a very small difference. Besides, the result shows that the distribution of air flow is so uneven that the thermal comfort of driver is rather poor. To improve it, the air-conditioning duct system is optimized by response surface methodology which took three structural dimensions of the deflector attached to it as design variables and considered the airflow ratio of the driver side and the overall airflow as optimized purposes, and then the thermal comfort analysis of the driver was performed to the improved air-conditioning system. As a result, the airflow ratio of the driver side is improved to 51.3% from 44.9% due to the optimized air-conditioning duct, as well as that the thermal comfort of the driver is obviously improved.

Key words: air-conditioning duct; computational fluid dynamics; response surface model; thermal comfort

收稿日期: 2013-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(50975083); 湖南省科技攻关计划重点项目(2009JT1014); 教育部长江学者与创新团队发展计划(531105050037); 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主课题(61075001)

作者简介: 谷正气(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事汽车空气动力学研究, (E-mail)545712834@qq.com。

现在大多数轿车都安装了空调系统,这不仅提高了汽车的舒适性,也提高了汽车的安全性能。设计汽车空调系统时,需要考虑很多因素^[1];乘员舱内乘客头部位置的风速要均匀、平稳,气流流速大致稳定在 0.15~0.40 m/s 之间;对于仪表板处驾驶员侧的风量比重应比副驾驶一侧稍大,大约占总风量的 52% 左右;同时各个出风口风速差不应该超出 2 m/s 的范围,否则就会出现乘员舱内温度场、速度场分布不均匀,产生旋涡,不利于乘员舱内空气更新。其中,汽车空调的送风风道是汽车空调系统中重要的部件之一,其设计水平直接影响车内气流组织的合理性,从而影响乘员的热舒适性。对空调风道进行风量分析,评价空调系统设计是否合理,对提高乘员的热舒适性具有非常重要的工程意义^[2]。

目前,随着计算机和数值技术的快速发展,通过对空调风道中气流的流动进行 CFD 仿真分析,进而对风道系统提出改进措施。利用 CFD 方法进行乘员舱热舒适性的研究也较多。2007 年,江淮汽车公司的霍长宏、刘江波等^[3]用 CFD 方法对某轻卡驾驶室除霜风道出口流量分配进行了分析,同时对风道结构进行了改进。2008 年,上海交大的吴金玉、陈江平^[4]通过对暖通空调(HVAC)及风道内部场的 CFD 分析,考察了风道内部结构对风量分配和送风量的影响,并提出了改进方法。文献^[5]利用 CFD 分析了 HVAC 内气流的流动,并考虑了 3 种模式:吹面模式、除霜模式、吹脚模式。2010 年,江淮汽车公司的陶其铭、许至宝等^[6]运用 CFD 方法对某款汽车空调除霜风道内部流动进行了分析,并对其内部扰流板结构进行了改进设计,使得除霜风道各出风口分风比较为合理。2011 年,上海工程技术大学的杨国平等^[7]借助 CFD 方法建立了某轿车风道模型,并通过改进中央风道的性能,使各出风口的均匀性得到了提高。但在前人的研究中,对空调风道系统进行改进设计时,大多是对风道系统进行了结构上的改进,而在对乘员舱的热舒适性进行仿真分析时没有把整个空调系统考虑在内。基于此,文中在改进空调风道系统时,通过实验设计 DOE(design of experiment)方法选取 40 个样本点,建立了三阶响应面模型,然后利用遗传算法对该响应面模型进行优化设计^[8]。将空调系统和乘员舱作为一个整体,加入驾驶员模型,综合考虑乘员舱的热舒适性。

1 CFD 模型及计算方法

1.1 数学模型

空调风道内空气的湍流流动采用不可压缩流体的 $k-\epsilon$ RNG 湍流模型描述。在对 $k-\epsilon$ RNG 湍流模型方程进行推导时,必须对雷诺应力做出某种假定,在大量的实验基础上推导出了雷诺应力方程^[9]为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \epsilon, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon}^* \epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (2)$$

式中: ρ 是流体密度; k 为湍流动能; ϵ 为湍流动能耗散率; G_k 是由平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; μ_{eff} 为湍流有效粘性系数; α_k 、 α_ϵ 、 C_μ 、 $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 η_0 、 β 为经验常数。具体数值见表 1。

表 1 湍流数学模型中的常数

α_k	α_ϵ	C_μ	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	η_0	β
1.39	1.39	0.084 5	1.42	1.68	4.377	0.012

1.2 物理模型

研究采用带有离心通风机的 4 出口式标准空调风道模型,风道结构基本为对称设计。为了便于后续的计算分析,在 UG 4.0 中建立本模型时,设置了 5 个监控面分别用来监测空调风道的总出风量以及 4 个出风口的出风量,逐次将其标记为 1、2、3、4、5,其中驾驶员在靠近 5 号风道侧(见图 1)。

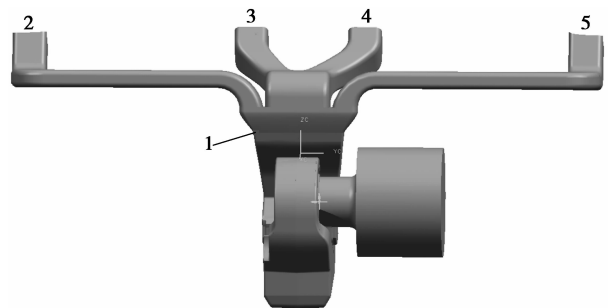


图 1 带有离心通风机的空调风道 UG 模型

1.3 网格划分及边界条件设置

网格划分是运用前处理软件 ICFM CFD 10.0 完成的,由于最后需要的结果是风道系统整体运行

时的各个出风口的出风量比例,所以对连接在一起的整个计算区域整体进行了网格划分,在划分网格时采用区域扩充法,在风道外部某些区域扩充计算区域,使整个计算区域尽量趋于规则^[4](见图2)。

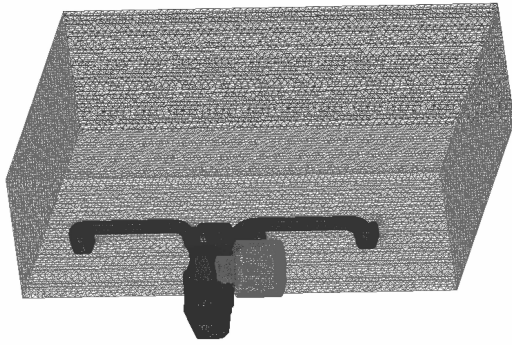


图2 全局网格划分示意图

计算采用商用软件 Fluent V6 为求解器,选用 $k-\epsilon$ RNG 湍流模型求解^[10]。离心通风机叶片绕风机轴心旋转,叶片与风机壁面是相对运动的,在 Fluent 中可以通过多重参考系(MRF)模型和滑移网格来实现这种定轴旋转运动。多重参考系是将静止的区域采用静止的绝对坐标系,而旋转的区域采用旋转的相对坐标系,坐标系的旋转速度为叶片的旋转速度。2个区域的交界面处交换流动参数,保证交界面上的连续性。滑移网格则是将动静2个区域都采用静止的绝对坐标系,在计算时旋转区域的网格以叶片的角速度进行旋转。研究采用 MRF 来对风机叶片进行模拟,可以节省资源提高计算效率。具体边界条件设置如表2所示。

表2 边界条件设置

计算域边界	设置值
入口	压力入口
	($p=101\ 325\ \text{Pa}$)
出口	压力出口
	($p=101\ 325\ \text{Pa}$)
通风机壁面、风道	无滑移壁面边界
旋转区域	多重参考系(MRF)模型
	旋转角速度 1 500 r/min

1.4 试验验证

试验基于风量性能测试台,对原车空调系统进行出风口风量分布检测,此性能试验台被测风量范围为 $0\sim 800\ \text{m}^3/\text{h}$,测定精度可达 3%,并满足标准 QC/T 657—2000 的要求。如表3所示,为 CFD 仿

真和试验原车空调系统各风道风量分配对比。

表3 仿真和试验对比

对比内容	总出风口/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	出风口/%			
		2号	3号	4号	5号
试验	208	20.3	35.6	34.3	9.8
仿真	210	20.6	34.5	35.5	9.4

由于风量泄漏等因素,所以试验时总出风口风量偏小。由仿真试验对比可知,CFD 仿真的误差在 5%以内,因此 CFD 仿真方法是可行的。

2 优化设计

2.1 设计变量

研究利用 UG4.0 在空调风道里所加的导流片模型及决定其结构形状的 3 个关键尺寸如图3所示。选取这 3 个尺寸变量为设计变量并将其参数化为: y 为导流片距离风道中心线的距离、 α 为导流片的倾斜角、 r 为导流片的拐角半径。

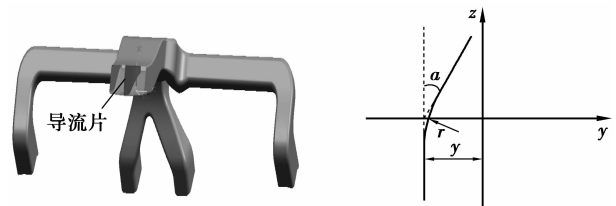


图3 导流片模型及设计参数示意图

采用 DOE 分析中的优化拉丁方法确定 40 组设计样本点,如表4所示。

表4 优化拉丁方法确定的样本点

组号	y	α	r
1	10.00	39.87	171.79
2	11.79	43.08	128.21
3	13.59	37.31	164.10
4	15.38	36.03	107.69
5	17.18	23.85	133.33
.....
40	80.00	34.74	184.62

在 UG 里面根据不同的样本点作出不同的导流片模型,将其导入 ICEM CFD 10.0 中进行网格划分,然后将网格文件导入 Fluent 求解器里计算得出 40 组样本数值。在进行双目标优化时,由于风量分

配与总出风量这 2 个目标同等重要,所以配备了相同的权重,优化问题可以描述为

$$\begin{aligned} \min \quad & f = \omega_1 D_1 + \omega_2 D_2, \\ \text{s. t.} \quad & y \in [10 \text{ mm}, 80 \text{ mm}], \\ & \alpha \in [20^\circ, 45^\circ], \\ & r \in [100 \text{ mm}, 200 \text{ mm}] \end{aligned}$$

式中: D_1 为驾驶员侧风量比重与 52% 的差值; D_2 为导流片施加前后空调出风口总出风量的差值,kg/s; ω_1 、 ω_2 为权重系数,分别取为 0.5,0.5。

2.2 遗传算法

遗传算法是一种基于生物选择与进化的随机性搜索算法,它采用概率转移率,以一定的概率选择部分个体繁殖,选一些个体灭亡,从而将索引向解空间中最可能获得改进的区域。

遗传算法解决优化问题的稳定性和鲁棒性要好于常规优化算法,虽然这是以计算量大幅度增加为代价的,但随着计算机硬件技术的发展,这已不是制约因素。遗传算法的内在并行机制及其全局优化的特点适合于多目标优化问题的解决,特别是目标函数多、数学表达式非线性或者不明确、优化变量多、常规方法难以奏效的复杂场合^[11]。

研究利用遗传算法进行优化设计的流程如图 4 所示。

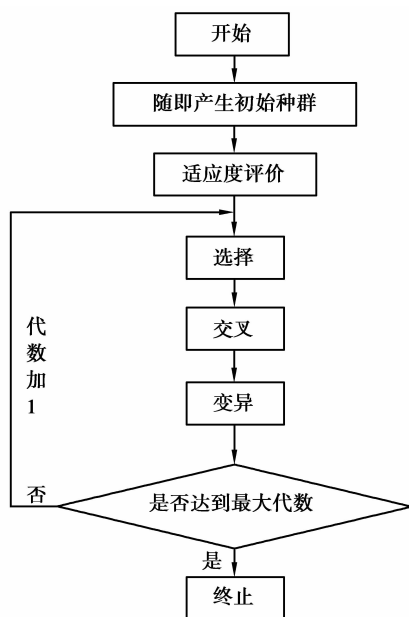


图 4 遗传算法优化设计流程图

3 计算结果分析

3.1 建立响应面模型

通过计算出来的 40 组样本数值,运用最小二乘原理建立三阶响应表面模型,即关于 y 、 α 、 r 的一个 3 次多项式。

在得到响应表面后,需要对响应表面的拟合程度进行验证。可以通过方差分析中决定系数 R^2 和调整的决定系数 R_{adj}^2 ,来验证响应表面对响应量的拟合情况。决定系数 R^2 和调整的决定系数 R_{adj}^2 为

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^P (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^P (y_i - \bar{y}_i)^2}, \quad (3)$$

$$R_{\text{adj}}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^P (y_i \hat{y}_i)^2 (P-1)}{\sum_{i=1}^P (y_i - \bar{y}_i)^2 (P-k-1)}, \quad (4)$$

式中: P 是设计点的个数; k 是自由度,其值为调整参数的个数减 1; y_i 、 \hat{y}_i 、 \bar{y}_i 分别是响应量的实测值、响应量的预测值以及响应量实测值的平均值。 R^2 和 R_{adj}^2 越接近于 1,近似模型的拟合越好^[12]。

根据式(3)和式(4),得到所建响应面模型的决定系数 R^2 达到 91.32%,调整的决定系数 R_{adj}^2 达到 90.07%。由此可知,该模型对响应量达到了高度拟合,使用此近似模型来替代直接的 CFD 仿真计算是可行的。

3.2 优化结果分析

采用遗传算法进行优化分析,设置初始种群个体数为 30,其他默认为缺省参数(进化繁殖 100 代),最终得出模型最优解。根据最优点建立相应的 UG 模型进行 CFD 仿真计算,CFD 计算得出的数值与近似模型得出的结果误差仅为 -1.74% 和 -2.11%。具体见表 5 所示。

优化后的空调风道系统,驾驶员侧出风口风量(即 4、5 号出风口)所占比重为 51.298%,总出风口风量比之前减少 0.000 92 kg/s,约 1.2%,影响不大,故满足设计要求。具体如表 6 所示。

表 5 最优仿真值与近似模型响应值对比

y	α	r	CFD 仿真值		近似模型值		误差/%	
			D ₁	D ₂	D ₁	D ₂	D ₁	D ₂
			17.37	21.32	131.58	-0.007 022	-0.000 918	-0.006 900

表 6 优化前后出风量对比

对比模型	出风口				总出风量	驾驶员侧出风量比例/%
	2	3	4	5		
原始模型	0.015 360	0.025 681	0.026 366	0.007 017	0.074 696	44.855
优化模型	0.014 042	0.021 834	0.027 829	0.009 274	0.073 776	51.298

图 5 和图 6 是优化前后空调风道系统的速度云图及管道表面静压云图,从图中可以看出,原始空调风道由于离心通风机的影响,在副驾驶一侧,即 2、3 号风道侧的出风速度及管道表面静压都大于驾驶员一侧,导致空调出风量分配不均匀且驾驶员侧出风量比例过小;优化后由于导流片的作用,使得出风速度及表面静压较之前分配更均匀,从而空调出风量也更加均匀,并且驾驶员侧的出风量有大幅的增加。

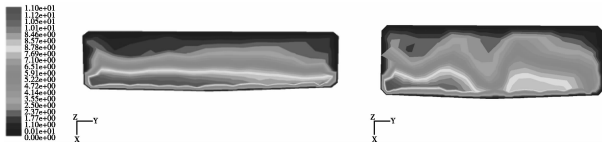


图 5 优化前后进风口速度云图(左为原始)

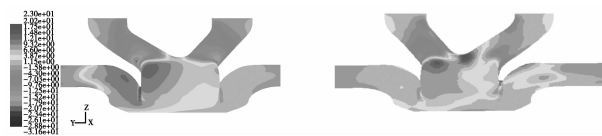


图 6 优化前后管道表面静压云图(左为原始)

4 乘员热舒适性分析

4.1 热舒适性评价

汽车乘员舱是一个微环境,所受的热源众多,而且太阳辐射分布不均,乘员舱内的温度与速度变化梯度大,热环境非常不均匀。因此本文中当量温度 $T_{eq,i}$ 作为热舒适性评价指标。当量温度 $T_{eq,i}$ 包括了传热、对流换热、热辐射以及太阳辐射对人体的影响。同时该评价标准也能反应出人体的不同部位对温度的敏感度。因此该评价标准非常适合汽车乘员舱的热舒适性研究。

将驾驶员人体分为 16 个节段,分别对人体不同

节段进行热舒适性评价。 $T_{eq,i}$ 的计算公式为

$$T_{eq,i} = T_{s,i} - \frac{8.3v_{air,i}^{0.6}S_i(T_{s,i} - T_{a,i})}{h_{cal,i}S_i} - \frac{\sum_n \sigma \epsilon_i f_{i,n} S_i (T_i^4 - T_n^4) - Q_{sol}}{h_{cal,i}S_i}$$

式中: $T_{eq,i}$ 为第 i 节段的当量温度; $T_{s,i}$ 为第 i 节段的表面温度; $v_{air,i}$ 为第 i 节段周围的空气速度; S_i 为第 i 节段的表面面积; $T_{a,i}$ 为第 i 节段周围的空气温度; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼; ϵ_i 为第 i 节段的发射率; $f_{i,n}$ 为第 i 节段对部件表面的角系数; T_i 为第 i 节段的温度; T_n 为汽车乘员舱内部件的温度; Q_{sol} 为人体得到的太阳辐射; $h_{cal,i}$ 为在标准环境下感受器标定的第 i 节段的对流换热系数, i 为人体的节段^[14]。

4.2 热舒适性分析

将优化前后的空调风道系统应用于乘员热舒适性分析^[13-15],图 7 是带有驾驶员人体模型及空调风道系统的整车模型。

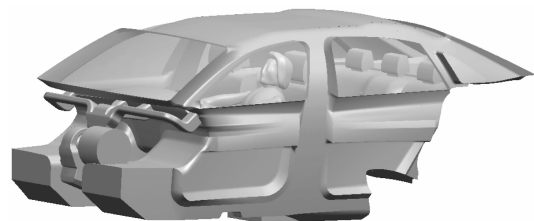


图 7 带有人体模型的整车模型

通过 Fluent 软件仿真得出人体表面温度分布云图,如图 8 所示。可以看出,优化后由于驾驶员侧的冷风风量比重增大,所以驾驶员躯干部位的温度有所降低,人体散热效果得到了改善。图 9 为人体各部位热舒适性示意图,与优化前相比,优化后人体各部位温度都有所降低,躯干部位温度大约下降

1℃,腿部温度下降 1~2℃。由此可以看出经过对空调风道的改进,人体热舒适性得到了改善。

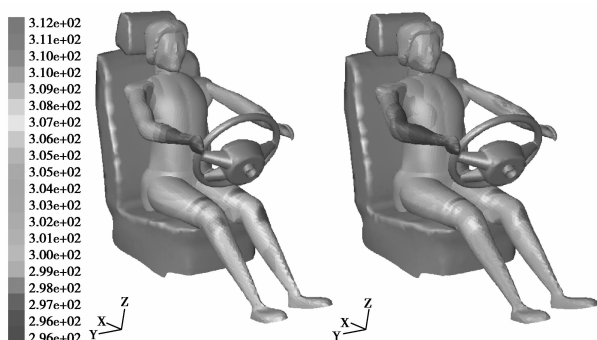


图 8 优化前后人体表面温度分布云图(左为原始)

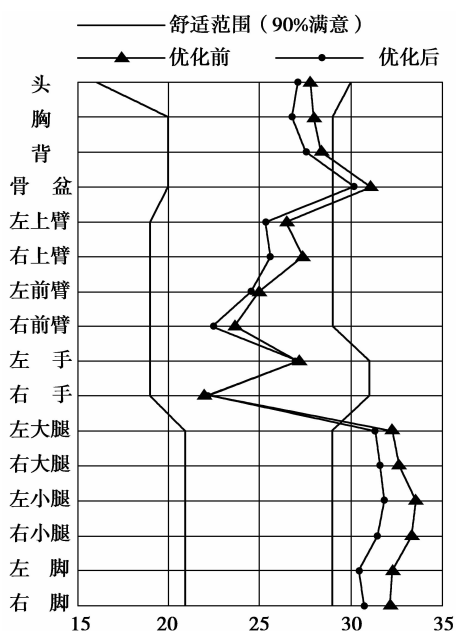


图 9 人体热舒适性示意图

5 结 论

在原有空调风道里加上一导流片,并将此导流片的 3 个结构尺寸参数化后定义为设计变量,通过 DOE 实验设计方法选取样本点建立近似模型并进行优化,并将优化后的风道系统应用于乘员热舒适性分析,驾驶员的热舒适性得到了明显的改善。

1)建立的三阶响应面模型精度很高,可以代替实际的仿真计算分析,提高计算效率。

2)利用遗传算法对建好的近似模型进行优化,得出最优解,并将其代入 CFD 仿真验算,误差很小。

3)通过优化前后的对比分析,优化后驾驶员侧的风量比重达到了约 51.3%,效果明显。

4)将改进后的空调风道系统应用于驾驶员热舒适性分析,优化后驾驶员躯干部位温度有所降低,热舒适性得到了明显改善。

参考文献:

- [1] 方贵银,李辉. 汽车空调技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [2] Chien C H, Jang J Y, Chen Y H, et al. 3-D numerical and experimental analysis for airflow within a passenger compartment[J]. International Journal of Automotive Technology, 2008, 9(4):437-445.
- [3] 霍长宏,刘江波,俞燕. CFD 分析和模拟技术在某轻卡风道设计中的应用[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2007,30(Sup1):19-21.
HUO Changhong, LIU Jiangbo, YU Yan. The application of CFD analysis and simulation techniques in a light truck ventilation duct design [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 30(Sup1):19-21.
- [4] 吴金玉,陈江平. 汽车空调蒸发器总成及风道的数值研究[J]. 流体机械, 2008,36(7): 59-62.
WU Jinyu, CHEN Jiangping. Numerical simulation of HVAC & vent in vehicle air conditioning system [J]. Fluid Machinery, 2008, 36(7):59-62.
- [5] Patidar A, Natarajan S, Pande M. CFD analysis and validation of an automotive HVAC system [C]// Proceedings of the SAE World Congress & Exhibition, April 20, 2009, Detroit, Michigan, United States. [S. l.]: SAE Technical Paper, 2009: 2009-01-0535.
- [6] 陶其铭,许志宝,夏广飞. 汽车空调除霜风道分析及结构优化[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2010,33(4):498-500.
TAO Qiming, XU Zhibao, XIA Guangfei. Analysis and structure optimization for auto HVAC defrosting duct [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 33(4):498-500.
- [7] 杨国平,张缓缓,朱法龙. 基于 CFD 汽车空调中央风道的改进设计[J]. 上海工程技术大学学报, 2011,25(2):108-111.
YANG Guoping, ZHANG Huanhuan, ZHU Falong. Improved design of car central air-conditioning duct system based on CFD [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2011, 25(2): 108-111.
- [8] 郭仁生. 基于 MATLAB 和 Pro/ENGINEER 优化设计实例解析[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [9] Fluent Help [M]. 2005:273-301.

- 中的应用探讨[J]. 公路交通技术, 2010(5):84-88.
- CHEN Lihua, ZHANG Lei. Development of finite element limit analysis methods and investigation on its application in tunnel projects [J]. Technology of Highway and Transport, 2010(5):84-88.
- [10] 戴自航, 刘志伟, 刘成禹, 等. 考虑张拉与剪切破坏的土坡稳定数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2):375-382.
- DAI Zihang, LIU Zhiwei, LIU Chengyu, et al. Numerical analysis of soil slope stability considering tension and shear failures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2):375-382.
- [11] 张黎明, 郑颖人, 王在泉, 等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 97-101.
- ZHANG Liming, ZHENG Yingren, WANG Zaiquan, et al. Application of strength reduction finite element method to road tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1):97-101.
- [12] 曾亚武, 赵震英, 朱以文. 岩石材料破坏形式的分叉分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 21(7): 948-952.
- ZENG Yawu, ZHAO Zhenying, ZHU Yiwen. Bifurcation analysis on failure forms of rock material [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 21(7): 948-952.
- [13] 王来贵, 赵娜, 周永发, 等. 岩石受拉破坏的数值模拟方法[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(2): 198-200.
- WANG Laigui, ZHAO Na, ZHOU Yongfa, et al. Numerical simulation method of rock bearing tension damage[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(2): 198-200.
- [14] 俞茂宏, 刘继明, Yoshiya O D A, 等. 论岩土材料屈服准则的基本特性和创新[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9):1745-1757.
- YU Maohong, LIU Jiming, Yoshiya O D A, et al. On basic characteristics and innovation of yield criteria for geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9):1745-1757.
- [15] 郑宏, 李春光, 李焯芬, 等. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5):626-628.
- ZHENG Hong, LI Chunguang, LI Chaofen, et al. Finite element method for solving the factor of safety [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5):626-628.

(编辑 陈移峰)

(上接第96页)

- [10] 谷正气, 孟庆超, 杨易, 等. 轿车室内流场的数值模拟研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(7): 1700-1702, 1739.
- GU Zhengqi, MENG Qingchao, YANG Yi, et al. Research on numerical simulation of air-flow field in car cabin[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(7): 1700-1702, 1739.
- [11] Yücenur G N, Demirel N Ç. A new geometric shape-based genetic clustering algorithm for the multi-depot vehicle routing problem [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(9):11859-11865.
- [12] Basa D, Boyaci I H. Modeling and optimization II : comparison of estimation capabilities of response surface methodology with artificial neural networks in a biochemical reaction[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(3):846-854.
- [13] Akyol S M, Kilic M. Dynamic simulation of HVAC system thermal loads in an automobile compartment[J]. International Journal of Vehicle Design, 2010, 52(1/2/3/4):177-198.
- [14] Han T, Huang L. A sensitivity study of occupant thermal comfort in a cabin using virtual thermal comfort engineering[C]// Proceedings of the SAE 2005 World Congress & Exhibition, April 11, 2005, Detroit, Michigan, United States. [S. l.]: SAE Technical Paper, 2005: 2005-01-1509.
- [15] Han T, Chen K. Assessment of various environment thermal loads on passenger compartment soak and cool-down analyses [C]// Proceedings of the SAE World Congress & Exhibition, April 20, 2009, Detroit, Michigan, United States. [S. l.]: SAE Technical Paper, 2009: 2009-01-1148.

(编辑 詹燕平)