

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.06.009

汽车空调风道性能定量评价与结构优化

刘水长, 潘神功, 张 勇, 刘 赫, 胡 健, 田承春

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对汽车空调风道压力损失大、出口风速不均匀、常用的 CFD 优化仿真方法存在因网格重复划分和几何模型重修而导致的效率低下问题, 提出一种速度均匀性系数的定量评价方法, 并在气流分离严重的管道位置创建了网格变形参数, 形成了基于 Isight 的 Sculptor 网格变形和 STAR-CCM+ 技术的集成优化方法, 实现了空调风道的自动优化。对比分析结果表明: 采用出风口速度均匀性系数和自动优化技术, 在各出风口出风量不变的前提下, 风道压力损失降低了 26%~34%, 出风口速度均匀性系数提高了 16%~33%, 优化效率大幅提升。

关键词: 空调风道; 风速均匀性系数; 网格变形; 集成优化

中图分类号: U463.85⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)06-0063-08

引文格式: 刘水长, 潘神功, 张 勇, 等. 汽车空调风道性能定量评价与结构优化 [J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(6): 63-70.

Research on Performance Quantitative Evaluation & Structural Optimization of Vehicle Air-Conditioning Ducts

LIU Shuichang, PAN Shengong, ZHANG Yong, LIU He, HU Jian, TIAN Chengchun

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A quantitative evaluation method for velocity uniformity coefficient has been proposed to address the issues of high pressure loss, uneven outlet wind speed, and low efficiency of commonly used CFD optimization simulation methods in automotive air conditioning ducts. And grid deformation parameters are created at the locations of pipelines with severe airflow separation, thus forming an integrated optimization method based on Isight integrated Sculptor grid deformation and STAR-CCM+ technology so as to achieve an automatic optimization of air conditioning ducts. The comparative analysis results show that by using the uniformity coefficient of air outlet velocity and automatic optimization technology, the pressure loss in the air duct is reduced by 26% to 34%, and the uniformity coefficient of air outlet velocity is increased by 16% to 33%, with the optimization efficiency significantly improved and the air outlet airflow remaining unchanged.

Keywords: air-conditioning duct; velocity uniformity coefficient; mesh deformation; integrated optimization

收稿日期: 2023-10-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52372352); 湖南省自然科学基金资助项目 (2023JJ50192); 湖南省重点研究计划基金资助项目 (2022GK2065); 湖南省人才托举工程-中青年优秀科技人才培养计划基金资助项目 (2023TJ-Z16)

作者简介: 刘水长, 女, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为流体力学, 优化设计, E-mail: 834130255@qq.com

通信作者: 张 勇, 男, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为流体力学, 汽车空气动力学等,

E-mail: 289714423@qq.com

1 研究背景

汽车空调风道的设计水平直接关系到乘用车乘坐时的热舒适性。开展空调风道结构优化、降低压降损失和实现风量分配的合理调控,对于提高乘用车内流热舒适性和品质体验感,具有重要的工程价值^[1-2]。对此,早在 2005 年,祁照岗等^[3]提出了采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 法对汽车空调管道的结构进行改进,以改善汽车空调的通风性能。

近年来, G. I. Bicalho 等^[4]通过改进风管和风扇的几何形状,使分支管道的压降、流量和气流分配都得到了显著改善; Gao R. 等^[5]提出了导叶的合理安装位置,并且对导叶结构进行了优化,使风道内阻力明显降低;蔡路等^[6]按照 ASHRAE 23 的相关舒适性评价指标,对双层客车客室的风速场进行了评估,并采用圆角过渡、变截面、横向整流等措施对其送风均匀性进行了优化;严运兵等^[7]在暖风芯体与后吹脸风道出风口处增设了风门,改善了轿车前后排温差问题; Cheng Q. Y. 等^[8]采用 CFD 仿真模拟技术,研究了导流板对室内风速和气流均匀性的影响,并且利用风速变化系数对气流分布均匀性进行了评估。然而这些研究在优化过程中,采用的是多组模型修改、网格划分、CFD 仿真等重复、耗时的数据采样基础上的优化方法,不仅优化效率较低,而且难以保证所得方案为全局最优方案;同时,在出风口速度均匀性评价时,仅采用定性分析,这是因为缺乏相关的评价指标,无法进行定量评价。

基于上述分析,本研究拟提出一个空调管道通风效能定量评价的出风口速度均匀性系数概念,并且基于 Isight 平台集成 Sculptor 网格变形与 STAR-CCM+ (computational continuum mechanics) 的一体化自动仿真优化技术,进行某汽车空调风道通风性能的优化研究。

2 空调风道出风速度均匀性系数

汽车空调风道流动属于内流场,出风口通流截面速度的不均匀,会直接影响车内气流组织的合理性,在出风口边缘处产生严重的气流分离,压力分布不均匀引起的气动噪声、乘员舱内旋涡,均会导致司乘人员热舒适性、通风质量体验感降低。然而,如何定量评价汽车空调风道风口的出风速度均匀性,至今还鲜有研究。已有研究多沿用了模糊的定性评价,对此,本研究根据汽车空调风道结构的特点,提出出风口出风速度均匀性系数。

流场速度分布均匀性在诸多流动问题中,有着重要作用。对此,如何评价速度均匀性,已经形成了相对标准偏差、均匀性指数、基于面积加权或质量加权的平均速度、克里斯琴森均匀系数等评价指标^[9-11]。其中,基于面积加权的平均速度是针对平面出风进行的平均指标,又称速度均匀性系数,由 H. Weltens 等^[12]提出,该系数通过统计通流截面各监测点与平均值的偏差来反映截面的流体速度分布特性,因而具有可比性较强、适用范围较广的特点。

速度均匀性系数用 γ 表示,其表达式为

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n \left(\sqrt{(v_j - \bar{v})^2} / \bar{v} \right), \quad (1)$$

式中: v_j 为监测点速度;

$\bar{v}$ 为通流截面平均速度;

n 为出口截面单元数。

显然,在理想条件下,各监测点的速度趋同,即有 $v_j \rightarrow \bar{v}$, 此时 γ 取值为 1; 若 γ 取值为 0, 则表示流体仅从 1 个测点通过。然而式 (1) 中以监测点为单位进行统计,不适合通流截面为平面的有限元 CFD 数值模拟,对此,本研究引入通流截面微元面积,即用微元面积的速度 v_j 来替代监测点的速度,则由式 (1) 可以得到式 (2):

$$\gamma = 1 - \left(\sum_{j=1}^n A_j \sqrt{(v_j - \bar{v})^2} \right) / \left(2 \sum_{j=1}^n A_j v_j \right), \quad (2)$$

式中, A_j 为微元单元面积, m^2 。

引入微元面积后,在具体的 CFD 仿真中,可与通风截面的面网格单元关联,如图 1 所示的通流截面网格单元,图中 A_j 、 v_j 即为某具体的微元面网格单元面积和该面网格单元速度。

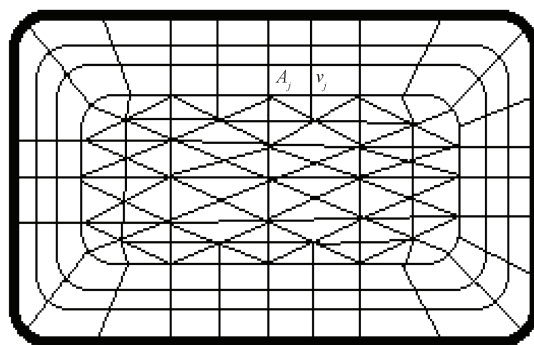


图 1 通流截面网格单元示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flow cross-section grid elements

由以上描述可知,采用以通流截面网格单元为计量单位的速度均匀性系数计算方法,可以有效地对整个截面速度均匀性进行定量评价,使得评价更为准确、全面。

3 原始通风管道及其通风性能

3.1 原始通风管道模型

本研究采用某实车用空调通风系统, 该空调风道为 4 出口标准空调风道, 由于本研究仅研究空调的出风通风管道, 故仅研究离心风机后端的风道部分。在进行模型处理时, 仅保留与内部气流直接接触的内表面, 删除其他无关面; 为了避免数值仿真计算过程中出现回流现象, 对进口、出口适当进行了延长处理, 简化后的原始通风管道模型如图 2 所示, 图中, 1~4 为出风口, 5 为进风口, 由风量性能测试台架测量各风口风量。

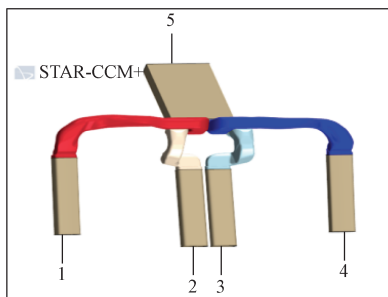


图 2 简化处理后的空调风道模型

Fig. 2 Simplified air conditioning duct model

由图 2 可见, 除出风口附近管道结构较为规则外, 其余弯管因附近受安装空间的限制, 管道截面并非规则形状。

3.2 原始模型通风性能

采用 CFD 仿真模拟研究原始通风管道的通风性能, 并以风量性能测试台架测得数据进行验证。测试中风量的测量量程为 0~100 kg/s, 分辨率为 0.000 2 kg/s, 测量面积为 0~0.999 m²。

应用四面体网格进行空间离散, 空调通风管道的内壁面采用 3 层棱柱体网格, 厚度为 2 mm, 增长率为 1.2, 网格总数为 6 × 10⁶。此时, 4 个出风口通流截面面积和数量就成为已知条件, 其面积单元数量具体如表 1 所示。

表 1 4 个出口面单元数量

Table 1 Four outlet surface units

出口	outlet 1	outlet 2	outlet 3	outlet 4
面单元数量	18 730	20 010	19 610	19 970

由于空调管道内空气的最大风速不超过 10 m/s, 故视为不可压缩定常流动。根据台架试验测得最大档位入口 5 的质量流量为 0.157 887 kg/s, 出口背压为 0 Pa, 管壁为无滑移壁面边界条件。

不考虑温度和压力的影响, 压力和速度的耦合采

用 SIMPLE 方法, 并采用 realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型, 近壁区域采用 All y^+ 壁面函数。

以空调风道仿真计算结果和各出口监测质量流量计算各风口风量配比, 并与试验台架监测结果进行对比, 结果如表 2 所示。

表 2 出口流量的仿真值与试验值及风量配比结果

Table 2 Simulation and experimental values of export flow rate and air volume ratio results

出风口	出口质量流量 / (kg · s ⁻¹)		风量配比 / %
	仿真值	实验值	
outlet 1	0.039 77	0.038 58	25.19
outlet 2	0.039 90	0.039 10	25.27
outlet 3	0.038 66	0.036 73	24.48
outlet 4	0.039 56	0.038 77	25.06

由表 2 可以得知, 4 个出风口的风量配比均为 25% 左右, 基本满足初始设计风量均衡性要求。同时, 试验值小于仿真值, 这是由于测试台架管道泄漏等原因造成的, 但是仿真值与实验值误差较小, 基本为 2%~3%, 表明仿真方案是可靠的。

计算压力损失 ($\Delta P_{\min}=P_{\text{in}}-P_{\text{out}}$)、各出风口平均风速, 并按照式 (2) 进行速度均匀性系数统计计算, 所得结果如表 3 所示。

表 3 风管道压力损失与风速均匀性系数

Table 3 Pressure loss and velocity uniformity coefficient in air ducts

风管道 / 出风口	压力损失 / Pa	平均风速 / (m · s ⁻¹)	均匀性系数 γ
pipe1	66.71	7.06	0.626
pipe2	68.85	6.78	0.542
pipe3	56.04	5.34	0.413
pipe4	52.14	5.22	0.434

由表 3 可知, 各风道压降相对较高, 平均风速有较大差异, 均匀性系数在 0.5 左右, 表明单个出风口的通流截面上的速度梯度较大。

为进一步分析造成空调风道压降较大、各出风口速度不均匀的原因, 对管道壁面压力和流场结构进行分析。图 3 为风道壁面压力分布云图。

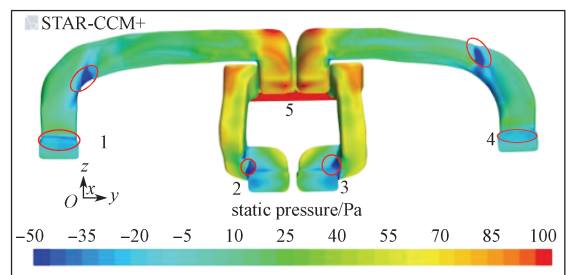


图 3 风道壁面压力分布云图

Fig. 3 Cloud map of wall pressure distribution of air ducts

由图 3 可以得知, 壁面压力从入口到出口逐渐降低, 在管道拐弯处出现负压区, 引起能量损耗, 需要对如图 3 中标记位置的结构进行优化, 以降低风道压力损失, 改善其流动性能。

图 4 为 4 个出风口的速度分布云图, 由图可以得知, 出风口 2、3 外侧和出风口 1、4 上部均存在较大面积的低速区, 此处无气流流出。出风口的气流速度均匀性较差, 会影响乘员舱的温度场、湿度场、速度场及舒适度。

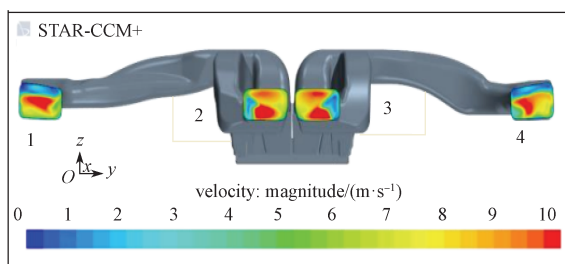
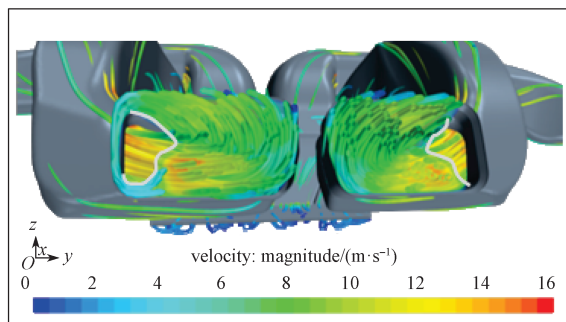


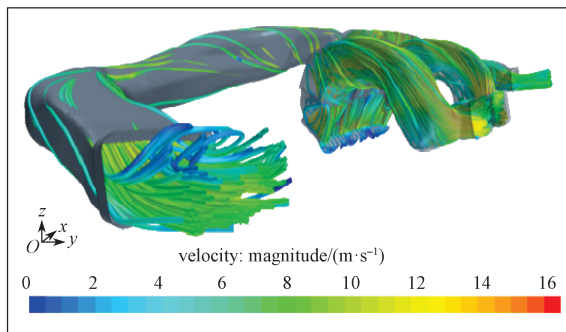
图 4 出风口速度分布云图

Fig. 4 Velocity distribution of air outlets

图 5 为出风管道内部速度流线图, 由图可见, 在出风口 2、3 外侧和出风口 1 上部处, 由于气流提前分离, 导致出口截面上相当一部分面积内无流动空气。



a) 出风口 2、3



b) 出风口 1

图 5 出风口速度流线图

Fig. 5 Speed streamline diagram of air outlets

以上结果表明, 原始管道虽然满足通风配比要求, 但是整体压降较大, 并且各出风口风速存在较为

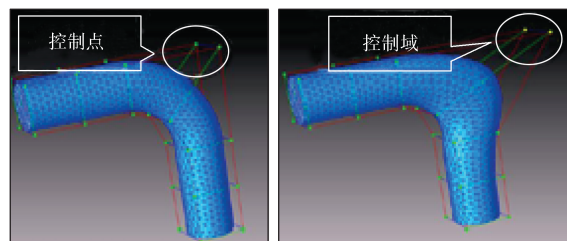
严重的不均匀现象, 这制约着车内气流组织的合理性与高品质体验感, 出风口边缘出风速度梯度较大, 也成为空调内流气动噪声产生的隐患, 故需要进行结构优化。

4 空调风道自动优化技术

目前, 已有研究对空调风道进行结构优化时, 一般需要先进行试验设计的基础上进行几何模型修改、网格划分、CFD 计算等一系列采样, 再基于某种优化算法开展寻优, 该操作效率较低、周期较长。对此, 本研究提出基于 Isight 集成 Sculptor 网格变形和 STAR-CCM+ 技术, 实现了空调风道的自动优化, 以解决几何模型采样和网格划分等重复性操作导致的优化效率低等问题。

4.1 风道网格自动变形

空调风道的 CAD (computer aided design) 几何模型修改和 CFD 网格划分是其仿真优化计算的首要环节。而 Sculptor 网格变形技术基于高阶 B 样条 FFD (full functional device) 技术, 无需模型的参数化, 可直接在 CFD 网格模型上定义参数, 并且通过自查技术, 可以网格边界曲率变化连续率、体网格实体性等约束条件, 控制网格的质量^[13], 特别是对于附面层、流动敏感区域的几何外形, 能够很好地保证仿真技术的收敛性, 空调风道的网格变形原理示意图如图 6 所示。



a) 控制点

b) 控制域

图 6 网格变形控制体

Fig. 6 Mesh deformation control body

如图 6 所示, 在原始的 CFD 网格模型周围建立参数化的控制域, 并且以此作为变量, 以控制域内的网格节点作为控制点。由于其基于高阶 B 样条插值控制, 控制点移动后, 能够保证网格变形后过渡段的斜率导数的连续性, 因而可获得具有较好质量的网格。控制域和控制点一般根据原始模型流场特性敏感区域进行选择。

对此, 本研究根据对原始模型的分析, 对空调风管道气流分离严重区域创建 6 个网格变形控制域 {A~F}, 共包含出风段长、宽、曲率半径等在内的 11 个变量, 网格变形控制模型如图 7 所示。

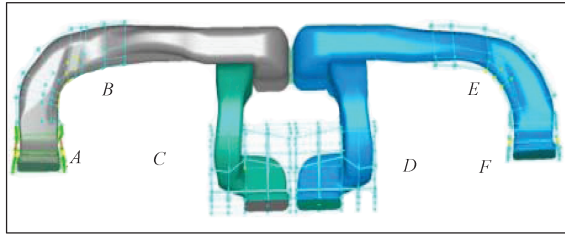


图7 管道网格变形控制模型

Fig. 7 Pipeline mesh deformation control model

4.2 自动优化技术

对空调风道结构进行优化, 其优化目标为降低各风道压降损失 (即 $\Delta P_{\min}$)、减小各风口风速均匀性系数 ($\gamma_{\min}$)。引起目标变化的变量共有 11 个, 为减少优化试验因子的盲目性、提高优化效率, 需要进行变量与目标的敏感性分析, 在此基础上再对有重要影响的变量进行多目标优化计算。在进行敏感性分析和优化时, 基于 Isight 平台, 需要进行试验设计, 生成 DOE (design of experiment) 变量空间, 然后集成网格变形软件 Sculptor、STAR-CCM+, 再生成具体试验设计空间变量的 DOE 样本空间, 可以根据具体的研究对象选择具体试验设计算法^[14-15], 此时, 建立集成的试验设计计算流程如图 8 所示。

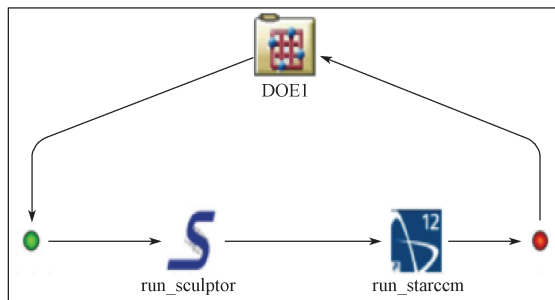


图8 试验设计集成计算流程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of integrated calculation process of test designs

对本例空调风道而言, 考虑 11 个试验变量的实际意义和风管道周围安装时的空间布局约束, 优化变量上下限取值见表 4 (采用 CAD 模型系统坐标)。

表4 变量上下限取值

Table 4 Upper and lower limit values of variables mm

设计变量	上限	下限	设计变量	上限	下限
x_1	0	100	x_7	0	20
x_2	0	150	x_8	0	15
x_3	0	15	x_9	0	15
x_4	0	15	x_{10}	0	20
x_5	0	20	x_{11}	0	20
x_6	0	20			

11 个试验变量将引起 4 个出风口压力损失和出风速度均匀性响应, 故可应用优化拉丁方法进行试

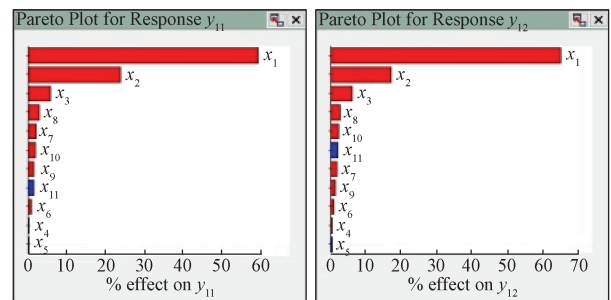
验设计, 根据表 4 中的取值, 建立 DOE 分析样本点 120 个, 如表 5 所示。

表5 优化拉丁方样本点

Table 5 Sample points of optimizing Latin square mm

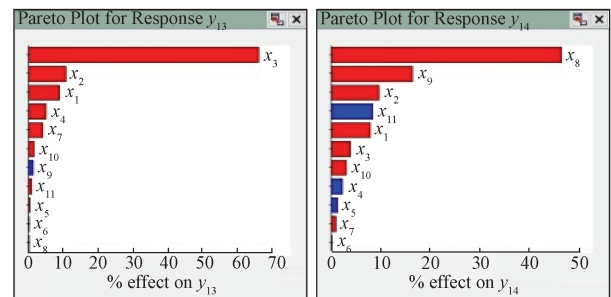
变量	x_1	x_2	x_3	...	x_{11}
1	1.68	100.84	1.26	...	12.61
2	4.20	80.67	11.34	...	2.18
3	7.56	55.46	6.05	...	4.54
...	...	...	...	...	...
120	94.96	122.27	6.93	...	10.08

按照图 8 所示集成优化技术流程, 可得管道压力损失、速度均匀性系数贡献量, 分别见图 9 和图 10。



a) outlet 1

b) outlet 2



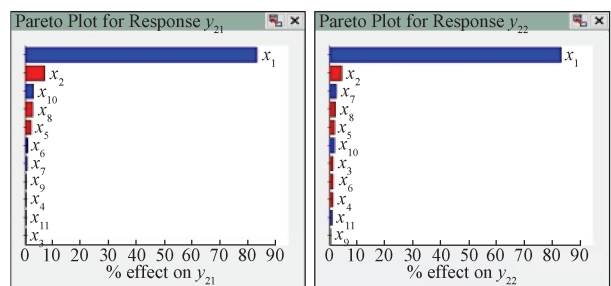
c) outlet 3

d) outlet 4

图9 管道压力损失贡献量

Fig. 9 Contribution of the pipeline pressure loss

由图 9 可知, 对于出风管道 1、2, 引起压力损失的主要变形参数依次为 x_1 、 x_2 、 x_3 , 其他可忽略不计; 对于出风管道 3, 影响较大的变形参数依次为 x_3 、 x_2 、 x_1 、 x_4 、 x_7 ; 而对于出风管道 4, 影响较大的变形参数依次为 x_8 、 x_9 、 x_2 、 x_{11} 、 x_1 。



a) outlet 1

b) outlet 2

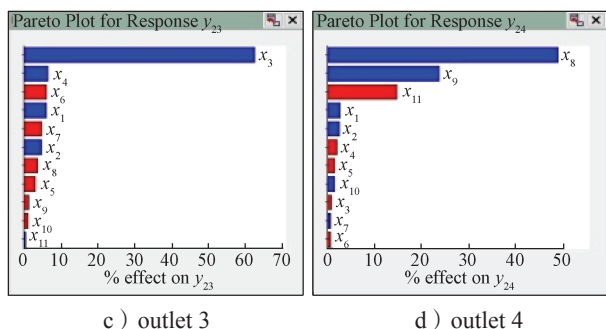


图 10 出口速度均匀性系数贡献量

Fig. 10 Contribution of the uniformity coefficient of outlet velocity

由图 10 可知, 对出风口 1、2 速度均匀性系数起主要作用的变形参数是 x_1 , 其他可以忽略不计; 对出风口 3 影响比较大的变形参数为 x_3 、 x_4 ; 对出风口 4 影响比较大的变形参数为 x_8 、 x_9 、 x_{11} 。

通过上述分析可知, 对 4 个出风口压降和均匀性系数起主要作用的变量有 8 个, 即 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_7 、 x_8 、 x_9 、 x_{11} , 此 8 个变量即成为网格变形的 8 个控制参数。

4.3 响应面近似模型与优化算法

优化时, 需要建立响应面近似优化模型, 优化的约束条件为出口压力损失不高于初始方案, 出口速度均匀性系数不低于初始方案。优化目标函数为压力损失 $\Delta P_i \rightarrow \Delta P_{\min}$, $\gamma_i \rightarrow \gamma_{\max}$, 构建如图 11 所示的集成优化响应面近似模型, 其优化算法根据近似模型和优化目标选择。

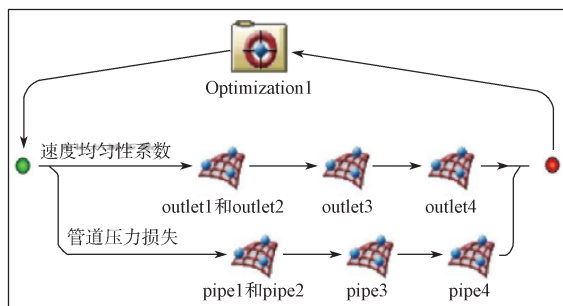


图 11 近似模型优化流程图

Fig. 11 Approximate model optimization flowchart

在本例中, 根据表 5 筛选出 120 个新的仿真样本点, 建立二阶响应面近似模型, 并验证所有模型的相关性系数后, 即可替代 Sculptor 和 STAR-CCM+ 仿真计算, 应用多岛遗传算法, 可得最终的优化结果, 如表 6 所示。

表 6 优化方案对应设计变量值

Table 6 Optimization scheme corresponding to design variable values

设计变量	x_1	x_2	x_3	x_4	x_7	x_8	x_9	x_{11}
优化值	72.11	69.06	14.98	12.92	19.64	14.50	14.90	2.05

5 优化结果分析

将表 6 所示优化设计变量重新生成风道数字模型, 风道数字模型优化前后对比图见图 12。图中浅色部分为初始几何模型, 深色部分为优化调整区域。

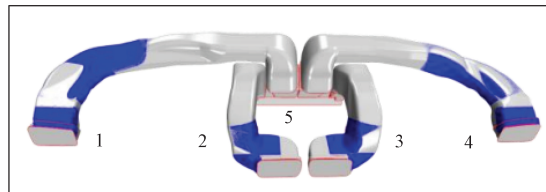


图 12 风道模型优化对比图

Fig. 12 Comparison diagram of optimized air duct models

对优化风道基于 STAR-CCM+ 进行仿真计算, 管道压力损失见表 7, 各出口速度均匀性系数见表 8。

表 7 优化方案管道压力损失

Table 7 Optimization scheme for the pipeline pressure loss

管道	压力损失 /Pa		相对变化量 /%
	初始方案	优化方案	
pipe 1	66.71	49.05	-26.47
pipe 2	68.85	48.65	-29.34
pipe 3	56.04	36.53	-34.81
pipe 4	52.14	35.09	-32.70

表 8 各出口速度均匀性系数

Table 8 Velocity uniformity coefficients of different outlets

出口	均匀性系数		相对变化量 /%
	初始方案	优化方案	
outlet 1	0.626	0.728	16.42
outlet 2	0.542	0.722	33.07
outlet 3	0.413	0.546	32.17
outlet 4	0.434	0.568	30.75

由表 7 可知, 优化后所有管道的风道压力损失均大幅减小, 最小压力损失变化量为 26.47%。由表 8 可知, 优化后所有管道的出口速度均匀性得到有效控制, 出风口速度均匀性系数最小提高了 16.42%。

进一步对优化后的风道壁面压力分布和出风口速度进行分析, 结果分别如图 13 和图 14 所示。

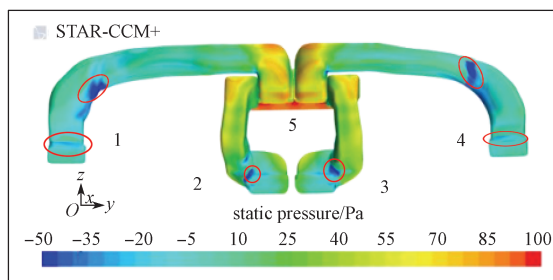


图 13 风道壁面压力分布云图

Fig. 13 Cloud map of the wall pressure distribution of air ducts

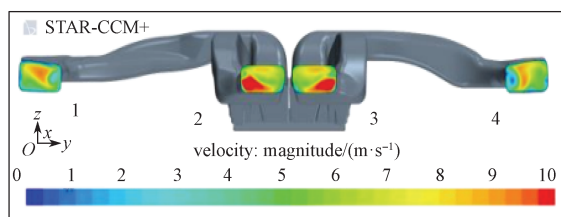


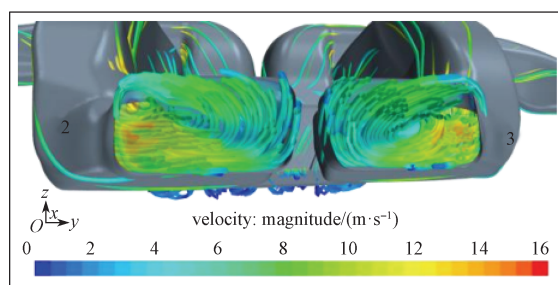
图 14 出风口速度分布云图

Fig. 14 Velocity distribution of air outlets

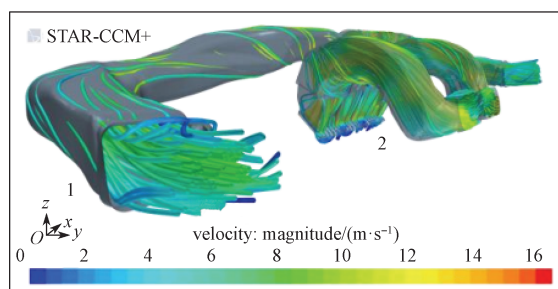
对比图 13 和图 3 可以得知, 优化后的出风道 5 入口段的高压区和各风道出口段拐角处负压区均变小, 同时优化方案的风道表面压力变换梯度明显趋于缓慢, 这一结果与表 7 所示结果高度吻合。

对比图 14 和图 4 可知, 优化后风口 2 和 3 的外侧低速区和出风口 1 和 4 的上部低速区均已消除, 且最大与最小速度差减小, 出风效果得到改善, 进一步验证了出口速度均匀性系数增大了结果的可靠性。

进一步对出口管道内流动状态进行分析, 优化后各出风口流线图如图 15 所示。



a) 出风口 2 和 3



b) 出风口 1

图 15 优化后的风道出风口速度流线图

Fig. 15 Optimized velocity streamline diagram of air duct outlets

对比图 15a、图 5a 和图 15b、图 5b, 可以得知, 各出口气流分离现象得到了有效抑制, 回流现象减少, 气体流动更加顺畅。

同时, 对优化方案的出口质量流量、风量配比及出口平均速度进行了复核, 发现其与初始方案对比, 最大变化不超过 2%。

以上结果表明, 以速度均匀性系数和基于 Isight 集成 Sculptor 网格变形和 STAR-CCM+ 技术, 能够有

效地改善汽车空调管道的出风性能, 大大提高了仿真优化效率。

6 结论

为了提高汽车空调出风口通流截面速度均匀性和仿真优化效率, 本文提出了空调管道通、出风口速度均匀性系数评价方法, 建立了一体化自动仿真优化技术, 并通过试验对比研究, 得到如下结论:

1) 基于 Isight 优化平台, 建立 Sculptor 网格变形集成 STAR-CCM+ 技术, 实现了空调风道自动化优化仿真, 不仅减少了人工工作量, 提高了优化效率, 且仿真结果可靠。

2) 建立的出口速度均匀性系数, 为在全局空间上寻找优化方案提供了定量评价方法, 仿真计算结果证明了该评价方法的有效性。

3) 本文建立的自动优化技术, 实现了在各出口出风量基本不变的前提下, 出口速度均匀性提高 16%~33%; 同时, 管道压力损失降低了 26%~34%, 优化效果显著, 所述方法和结论可以为实际工程应用提供借鉴。

参考文献:

- [1] 赖晨光, 李 亮, 周毓婷, 等. 多目标智能算法的某轿车空调风道改进及乘员热舒适性优化 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2022, 36(4): 19-27.
LAI Chenguang, LI Liang, ZHOU Yuting, et al. Air Duct Improvement and Occupant Thermal Comfort Optimization of an Automobile Air Conditioner with Intelligent Algorithm[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(4): 19-27.
- [2] 邹 平, 牛贝贝, 张 成. CFD 方法的汽车空调风道结构优化 [J]. 汽车零部件, 2021(8): 55-58.
ZOU Ping, NIU Beibei, ZHANG Cheng. Structure Optimization of Automobile Air-Conditioning Duct Based on CFD Method[J]. Automobile Parts, 2021(8): 55-58.
- [3] 祁照岗, 陈江平, 胡 伟. 汽车空调风道系统 CFD 研究与优化 [J]. 汽车工程, 2005, 27(1): 103-106.
QI Zhaogang, CHEN Jiangping, HU Wei. CFD Research and Optimization of Automobile Air Conditioning Duct System[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(1): 103-106.
- [4] BICALHO G I, HANRIOT S M, MAIA C B, et al. Assessment of the Fluid Dynamics Aspects of a Vehicle Ventilation System[J]. International Journal of Ventilation, 2015, 14(1): 65-76.
- [5] GAO R, LIU K K, LI A G, et al. Study of the Shape Optimization of a Tee Guide Vane in a Ventilation and

- Air-Conditioning Duct[J]. Building and Environment, 2018, 132: 345-356.
- [6] 蔡 路, 张继业, 李 田. 双层客车通风模拟与送风均匀性优化 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 129-137.
- CAI Lu, ZHANG Jiye, LI Tian. Ventilation Simulation and Uniformity Optimization of Air Supply for Double-Deck Passenger Cars[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14): 129-137.
- [7] 严运兵, 丁明亮, 刘颖星, 等. 轿车空调风道温度场特性分析与结构优化 [J]. 制造业自动化, 2015, 37(18): 61-65.
- YAN Yunbing, DING Mingliang, LIU Yingxing, et al. Characteristic Analysis of Temperature Field and Structure Optimization for Car Air-Conditioner Duct[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(18): 61-65.
- [8] CHENG Q Y, LI H, RONG L, et al. Using CFD to Assess the Influence of Ceiling Deflector Design on Airflow Distribution in Hen House with Tunnel Ventilation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151(C): 165-174.
- [9] 李 坦, 靳世平, 黄素逸, 等. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究 [J]. 热力发电, 2013, 42(11): 60-63, 92.
- LI Tan, JIN Shiping, HUANG Suyi, et al. Evaluation Indices of Flow Velocity Distribution Uniformity: Comparison and Application[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(11): 60-63, 92.
- [10] 冉景煜, 邓庆波, 牛俊天, 等. 湿法脱硫塔内流场均匀性影响因素及其评价方法 [J]. 动力工程学报, 2020, 40(10): 825-831.
- RAN Jingyu, DENG Qingbo, NIU Juntian, et al. Influence Factors and Evaluation Method on the Uniformity of Flow Field in a WFGD Tower[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(10): 825-831.
- [11] TAO H G, CHEN H X, XIE J L, et al. An Alternative Approach to Quantifying Fluid Flow Uniformity Based on Area-Weighted Average Velocity and Mass-Weighted Average Velocity[J]. Energy and Buildings, 2012, 45: 116-123.
- [12] WELTENS H, BRESSLER H, TERRES F, et al. Optimisation of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction[J]. SAE Technical Papers, 1993: 1156-1161. Doi: <https://doi.org/10.4271/930780>.
- [13] 谷正气, 赵万东, 张 勇, 等. 网格质量评价指标对汽车外流场模拟结果影响的研究 [J]. 汽车工程, 2015, 37(11): 1265-1269.
- GU Zhengqi, ZHAO Wandong, ZHANG Yong, et al. A Research on the Effects of Mesh Quality Evaluation Criteria on the Results of Vehicle External Flow Field Simulation[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(11): 1265-1269.
- [14] HUANG J J, ZHENG L X, MEI Q. Design and Optimization Method of a Two-Disk Rotor System[J]. International Journal of Turbo & Jet-Engines, 2016, 33(1): 1-8.
- [15] NYEIN S M, XU H, YU H P. Parametric Optimization of Vortex Shedder Based on Combination of Gambit, Fluent and iSIGHT[J]. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2016, 9(2): 150-158.
- (责任编辑: 廖友媛)