

Simulation Study of Automotive HVAC Evaporator Airflow Uniformity for an Electric Vehicle

Nankui Han, Lin Su, Shasha Hu, Kang Li, Yidong Fang

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai
Email: 289490462@qq.com

Received: Dec. 11th, 2019; accepted: Dec. 24th, 2019; published: Dec. 31st, 2019

Abstract

The HVAC module is the most important part of air conditioning system in an electric vehicle, the design of which strongly influences the passenger cabin comfort. In this paper, the simulation study of air flow, air distribution and airflow uniformity of evaporator in an HVAC of an electric vehicle is carried out. Through simulation analysis, it is found that there is a drift phenomenon in the inlet air expansion section of the HVAC, resulting in airflow uniformity of the evaporator. This paper divides the radius of curvature R of the expansion section and the angle θ between the shell and the evaporator into three cases. The influence on the airflow uniformity of the evaporator is studied in three types. It is found that from case 1 to case 2, the airflow uniformity of the evaporator is significantly improved, and the effective utilization area of the evaporator is gradually increased. While from case 2 to case 3 solution, the airflow uniformity of the evaporator is again deteriorated, the effective use area is reduced.

Keywords

Electric Vehicle Air Conditioner, HVAC, Numerical Simulation, Flow Uniformity

电动汽车HVAC模块蒸发器进风均匀性数值模拟研究

韩南奎, 苏林, 胡莎莎, 李康, 方奕栋

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海
Email: 289490462@qq.com

收稿日期: 2019年12月11日; 录用日期: 2019年12月24日; 发布日期: 2019年12月31日

文章引用: 韩南奎, 苏林, 胡莎莎, 李康, 方奕栋. 电动汽车 HVAC 模块蒸发器进风均匀性数值模拟研究[J]. 建模与仿真, 2020, 9(1): 46-55. DOI: 10.12677/mos.2020.91006

摘要

电动汽车HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning)模块是电动汽车空调系统中最为重要的部分,与乘员舱舒适性密不可分。本文针对某款电动汽车HVAC模块中气体流动、蒸发器进风均匀性等特征进行数值模拟研究。通过分析,发现该电动汽车HVAC模块的扩压段内存在偏流现象,导致蒸发器进风均匀性较差。针对该问题,本文通过改变扩压段蜗壳曲率半径 R 以及壳体与蒸发器进口截面之间的角度 θ ,分为三种方案,研究在典型模式下这两种参数变化对HVAC模块内部气体流动及蒸发器进风均匀性等特征的影响。发现从case 1变化到case 2的过程中,蒸发器进风均匀性得到明显改善,蒸发器的有效利用面积也逐渐增大,而在case 3方案中,蒸发器的进风均匀性再次变差,蒸发器有效利用面积再次减小。

关键词

电动汽车空调, HVAC, 数值分析, 进风均匀性

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着工业科技的不断发展以及环境保护要求的提高,电动汽车的普及已经成为必然趋势。空调系统作为电动汽车上十分重要的一部分,与乘员舱的舒适度密不可分,而HVAC模块更是整个电动汽车空调系统中的重要部件。空气经过HVAC模块内蒸发器的均匀性关系到了整个汽车空调系统的工作效率以及乘员舱的舒适性。因此,对HVAC模块进行仿真分析,研究空气经过蒸发器的流动均匀性具有十分重要的意义。

历年来国内外学者对电动汽车HVAC模块进行了大量研究,郭莹[1]等建立了汽车空调箱的数学模型,与换热器的单体实验结合,通过分析换热器内部速度场、压力场,揭示了空气在空调箱内的流动特性。徐龙等[2]采用数值模拟的方法对空调蒸发器总成内的流动与传热问题进行研究,为空调蒸发器总成的优化设计寻求了理论依据。陈佳[3]对某汽车顶置蒸发器总成和前置蒸发器总成进行数值模拟分析,在此基础上提出优化方案并对比分析,从而找到最佳优化方案。王胜[4]针对汽车空调后蒸发器出风量小的问题进行分析研究,运用了CAE模拟分析的方法对蒸发器进行结构上的分析。陈杨华[5]等利用CFD方法对某型汽车的空调风道进行数值模拟,得出了风道整体的速度场、压力分布以及各出风口的风量分配。通过对中、侧风道进行结构优化使得风道风量分配更均匀,风量损失减少。赵浩鸣[6]利用仿真实验的方法研究了汽车空调风道CFD分析中的各种简化方法和参数设置对计算结果的影响,并且整理得到了一套较为完善的简化方法,运用整理的方法对汽车空调风道进行了分析和优化。

本文以某款电动汽车的HVAC模块为数学模型,通过数值模拟研究了HVAC模块内蒸发器进风均匀性等问题,并在此基础上提出三种方案进行分析,探究扩压段蜗壳曲率半径以及壳体与蒸发器进口截面角度对HVAC模块内部蒸发器进风均匀性的影响。

2. HVAC 仿真模型的建立

2.1. HVAC 三维模型建立以及网格划分

图1为某款电动汽车的HVAC模块的模型图,该模型图完全由该款电动汽车原有空调箱实体模型扫描而成,未做任何改动。

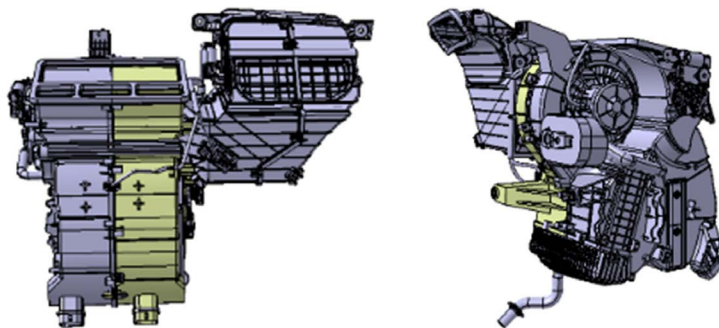


Figure 1. HVAC model diagram
图 1. HVAC 总成模型图

在数值模拟分析中,根据 HVAC 模块的工作模式不同,将 HVAC 模块工作模式分为三个模式,分别是制冷吹面模式、制热除霜模式、制热吹脚模式。三个模式的模型都是利用前处理软件对空调箱模型进行流场提取得到的实体,并根据工作模式不同进行了适当简化,以减少计算成本。在网格划分过程中,三种模式的面网格类型均为混合型网格,网格大小均为 2 mm,面网格数量均约为 50 万,体网格均为混合型网格,体网格数量均为 1200 万。三种模式下的模型如图 2 所示。

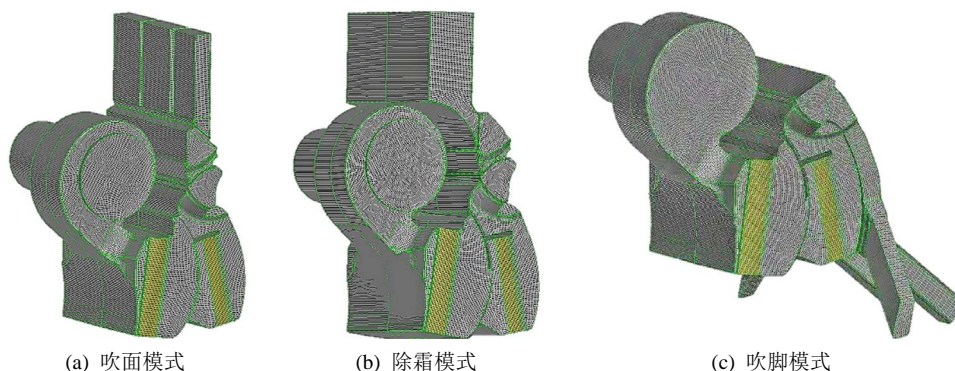


Figure 2. Grid model diagram
图 2. 网格模型图

2.2. 数学模型

空气从外界经鼓风机进入 HVAC 模块,已经发展为完全的三维湍流流动,所以在扩压段以及空调箱内的空气流动均可视为湍流流动,符合粘性流体动力学 N-S 方程连续介质假设。而目前可以应用于汽车空调箱内流场的湍流数值模拟方法主要有直接数值模拟(DNS)、大涡模拟(LES)、Reynolds 平均法(RANS),其中 RANS 数值模拟方法为目前工程湍流计算中所采用的基本方法,这种模型把未知的更高阶的时间平均值表示成较低阶的计算中可以确定的量的函数,故本文选择该数值模拟方法。由于 k-e 模型在模拟空调箱内流场较试验结果吻合很好,因此本文湍流模型采用 k-e 方程描述。

2.3. 边界条件

在三个模式中,本文采用多重参考坐标系(MRF 模型)来处理风机叶片间的流体。风机模型的旋转轴原点为(297.10, 45.36, 581.41),旋转轴方向为(0, -1, 0),转速为 4000 rpm。空气由鼓风机吸风口进入 HVAC 模块,由 HVAC 模块出风口流入乘员舱内,故进出口边界条件设为压力进出口,压力均为 0 Pa。由于蒸发器和暖风芯体的结构中含有扁管和翅片结构,故将蒸发器和暖风芯体作为多孔介质处理,阻力系数由单体实验获得。

3. 计算结果及分析

对于本文 HVAC 模块, 当各项残差都小于 10^{-3} , 且进、出口流量误差小于 10^{-8} 时, 认为当前工况的计算已经收敛。对 HVAC 模块内流体在各截面上的速度和压力等参数进行后处理分析, 探究流体流经蒸发器是否均匀以及判断模型结构是否合理。

3.1. 截面参数分析

表 1 所示为三个模式下各截面的平均压力以及各部分的压降, 在空调箱中各部分压力以及压降是观察空调箱结构以及数值模拟结果是否合理的重要参数。由表 1 可以看出, 由于在实验过程中存在换热、相变、震动等复杂因素, 三个模式下模拟结果与各截面平均压降数值与实验数据存在一定误差, 但是误差较小, 计算结果相对合理。

Table 1. Average pressure and pressure drop of each section

表 1. 各截面平均压力以及压降

		蒸发器进口压力(Pa)	蒸发器出口压力(Pa)	蒸发器压降(Pa)	PTC 进口压力(Pa)	PTC 出口压力(Pa)	PTC 压降(Pa)
模拟结果	吹面模式	874	756	117	308	308	0
	除霜模式	1146	1084	62	1038	895	143
	吹脚模式	937	887	49	852	744	107
实验结果	吹面模式	878	753	125	315	315	0
	除霜模式	1151	1082	69	1042	889	153
	吹脚模式	943	886	57	857	741	116

表 2 为各个模式下蒸发器进出口截面平均速度。在汽车空调 HVAC 模块中, 为了保证空气流经蒸发器时进行高效的换热, 提高汽车空调的制冷效率以及乘员舱的舒适性, 必须保证空气流过蒸发器时具有一个稳定的风速, 但是该风速不宜过大也不宜过小, 这是因为蒸发器表面以及底部含有大量冷凝水, 风速如果过大, 可能将冷凝水吹进乘员舱, 而风速过小则换热器换热效率偏低。由表 2 我们可以看出, 本文 HVAC 模块出风口风速都没有超过 3 m/s, 冷凝水不会被吹出, 确保了蒸发器的换热效率以及乘员舱的舒适性。

Table 2. Vent speed of evaporator inlet and outlet

表 2. 蒸发器进风口速度

模式	蒸发器进风速度(m/s)	蒸发器出口速度(m/s)
制冷吹面模式	5.34	2.84
制热除霜模式	4.53	2.67
制热吹脚模式	3.79	2.26

3.2. 流场分析

空气在经过蒸发器芯体时速度分布是否均匀将影响到蒸发器芯体的使用效率, 而在蒸发器入口面上的空气分布直接影响到气体流经芯体时的分布且对蒸发器芯体的换热效率有着很大的影响。有学者研究发现非均匀风速下蒸发器的换热量比均匀风速时减小了 8.59% [7]。进风非均匀分布会导致蒸发器换热量降低, 严重降低蒸发器换热效率, 提高了鼓风机功率, 且影响乘员舱舒适性。因此应当使空气在蒸发器进口截面上的分布尽可能的均匀, 以提高蒸发器芯体的换热效率。

以制冷吹面模式为例, 图 3 所示为制冷吹面模式下的蒸发器进口截面速度云图和 HVAC 模块内 Y =

46 mm 截面处的速度云图, 由蒸发器进口截面速度云图可以看出: 在吹面模式下, 由于出风口大小左右不对称, 蒸发器进口截面速度云图分布左右不对称。同时蒸发器进口截面速度分布均匀性较差, 主要表现为蒸发器进口截面上只有少部分区域风速适中且主要集中于蒸发器进口截面上部, 而大部分区域风速极低, 也可以看出蒸发器进口截面进风速度范围过于广泛, 最大达到 20 m/s, 最小不到 5 m/s, 局部风速两极分化严重, 这说明 HVAC 模块结构有设计不合理的地方, 需要优化改进。

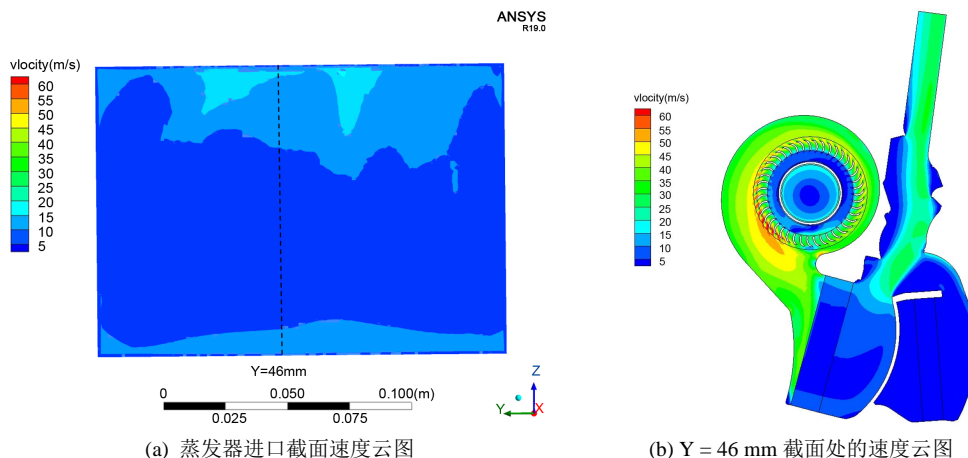


Figure 3. Velocity cloud image in blown mode
图 3. 制冷吹面模式下的速度云图

由 HVAC 模块内 $Y = 46 \text{ mm}$ 截面处的速度云图可知, 由于风机扩压段出口面与蒸发器入口面成 90° 角的关系, 角度偏小, 所以在蒸发器入口面上进风速度分布极不均衡, 如蒸发器进口截面速度云图所示, 在蒸发器进口截面的上部气体流速很高而下部流速很低。这样就使蒸发器芯体下部流过的空气很少, 虽然芯体有一定的均流作用, 但仍使蒸发器的换热效率大大降低。

4. HVAC 模块扩压段优化及分析

由以上分析可知, 原 HVAC 模块结构存在蒸发器进风不均匀等不合理现象, 风速非均匀分布会导致蒸发器换热量降低, 应当使空气在此面上的分布尽可能的均匀, 以提高蒸发器的换热效率。所以需要对其结构进行优化处理, 优化方案的主要工作是改进蒸发器进口截面的进风均匀性。

4.1. 优化方案模型

针对以上问题, 本文提出了对扩压段的优化方案。如图 4 所示, 对 HVAC 模块中扩压段蜗壳曲率半径 R 以及壳体与蒸发器进口截面的夹角 θ 进行调整, 分为 case 1、case 2、case 3 三组方案, 原 HVAC 模块为 case 1。对这三组方案进行流动分析, 通过分析三组方案中 HVAC 模块的速度云图、矢量图等, 对流体的速度和压力等流场参数进行后处理分析, 找出二者变化对 HVAC 模块的影响。

4.2. 优化方案计算结果及分析

4.2.1. 流场分析

以制冷吹面模式为例, 图 5 为制冷吹面模式下三个方案中蒸发器进口截面上的速度云图。由蒸发器进口截面速度云图可以看出, 在 case 1 方案中, 高速气体主要通过蒸发器进口截面的上下部分, 而中间部分进风速度偏低, 大部分面积换热效率较低; 当 HVAC 模块变化到 case 2 时, 高速气体开始向蒸发器进口截面的中下部移动, 反而上部出现低速气体, 这是由于扩压段蜗壳曲率半径以及壳体与蒸发器进口截面夹角的增大,

气流沿着扩压段在离心力的作用下，出现了偏流现象，此时蒸发器进口截面上高风速段分布面积较大，蒸发器利用面积较好，表明换热较充分；但是当 HVAC 模块变化到 case 3 时，偏流现象更加严重，蒸发器进口截面上出现了与 case 1 相反的速度分布，大量高速气体从蒸发器进口截面下部通过，而上部空气流速偏低。

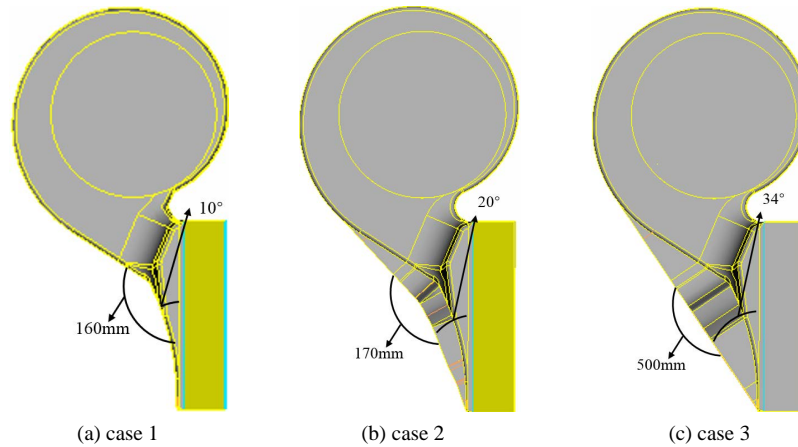


Figure 4. Model of the adjusted volute
图 4. 调整后涡壳的模型

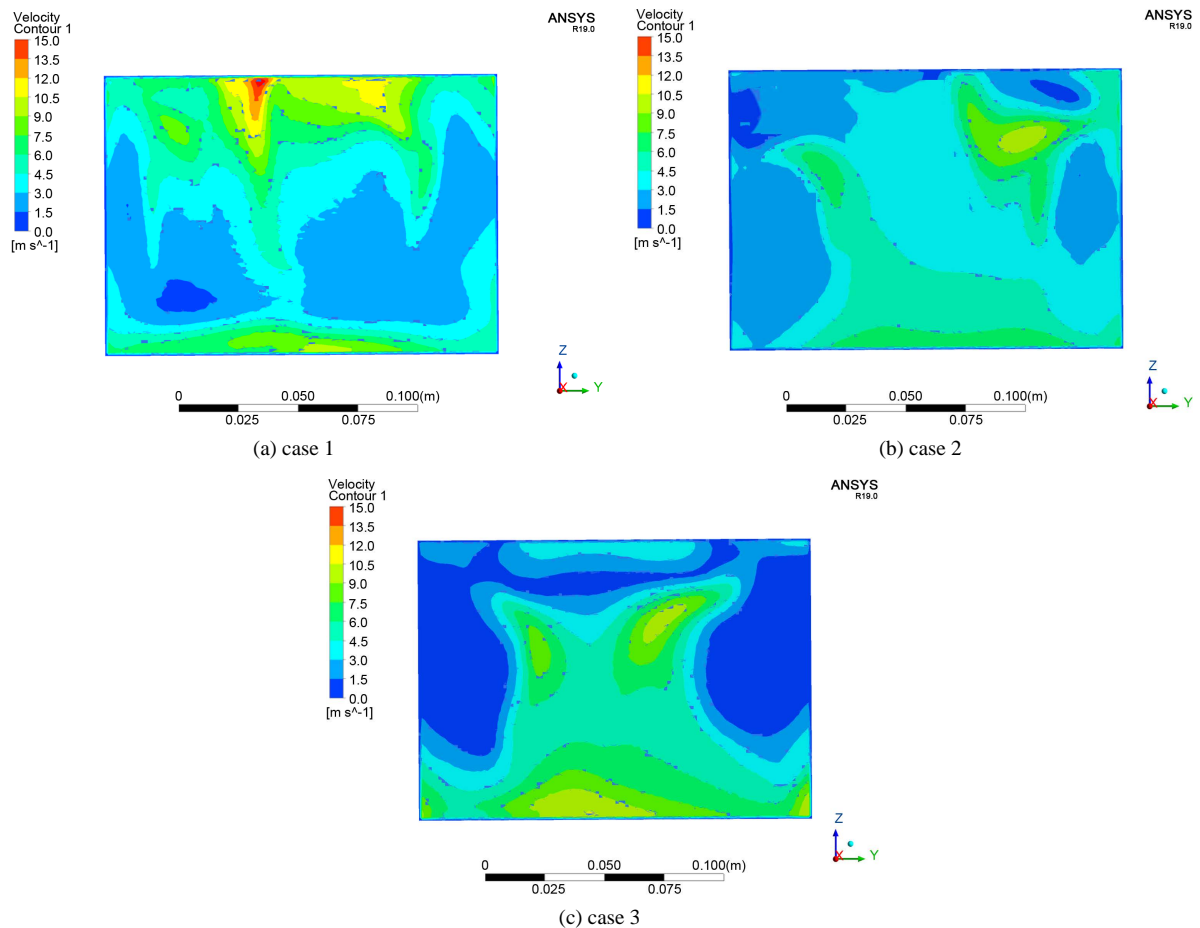


Figure 5. Velocity cloud image of the blown mode
图 5. 制冷吹面模式的速度云图

4.2.2. 截面参数分析

图 6 所示为在三个模式下，三个方案中 HVAC 模块内蒸发器压降变化趋势。由图 6 可以看出，随着 R 和 θ 地不断增大，由于蒸发器的利用面积以及进风速度的增大，蒸发器压降随之增大。压降增大，空气流经蒸发器的阻力也随之增大。

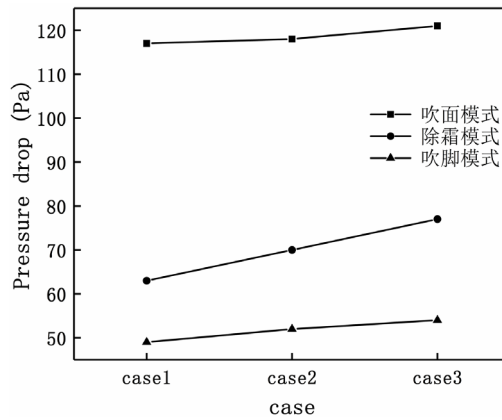


Figure 6. Pressure drop of the evaporator
图 6. 三个模式下的蒸发器压降

图 7 为在三个模式下，蒸发器进口截面上速度分布比例饼图，由图可以看出：HVAC 模块由 case 1 变化到 case 2 的过程中，蒸发器进口截面上中速段进风面积比例增大，低速段和高速段进风面积比例减小；当 HVAC 模块变化到 case 3 时，中速段进风面积比例减小，低速段和高速段进风面积比例增大。这与图 5 中蒸发器进口截面的速度云图现象一致。

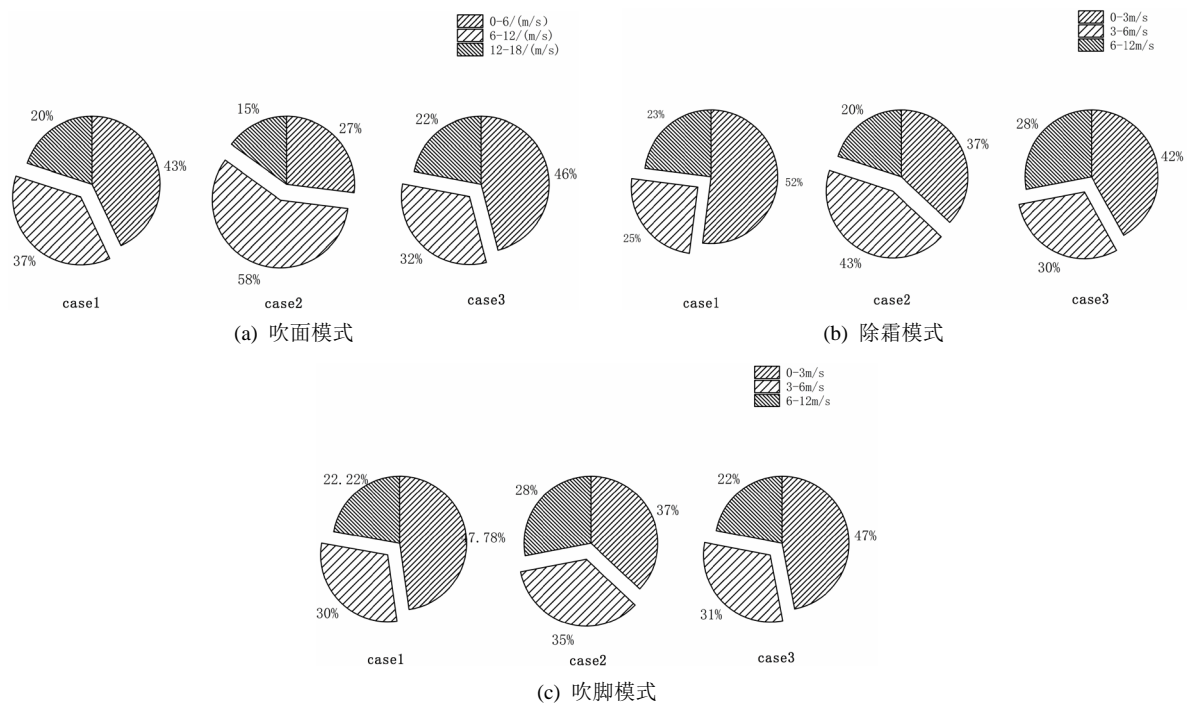


Figure 7. Velocity distribution of the evaporator inlet section
图 7. 三个模式下蒸发器进口截面速度分布

5. 进风均匀度

越均匀的换热器表面速度分布表明换热器利用效率越高, 系统性能也会提升。如何客观定量地评价换热器的表面进风均匀性成为问题的关键。有学者通过计算换热器表面整体温度分布方差评价其温度分布均匀性[8]。若利用方差衡量蒸发器进风均匀性, 由于进风截面上可能整体速度偏低, 方差较小表明进风均匀性好, 但此时低风速段比重过大, 不符合理想进风要求。利用仿真软件可以输出蒸发器进口截面上的加权均匀性指数和加权平均速度, 故以这两者为指标, 对本文三种方案下的蒸发器进风均匀性进行衡量。

5.1. 加权均匀性指数

均匀性指数描述了指定表面上指定的物理量的变化情况, 1 为最大值, 表示均匀性最好。均匀性指数采用面积或质量进行衡量: 面积加权均匀性指数捕捉量的变化, 质量加权均匀性指数捕捉通量的变化。

指定场变量的面积加权均匀性指数利用下式进行计算:

$$\gamma_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(\phi_i - \bar{\phi}_a) A_i]}{2|\bar{\phi}_a| \sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

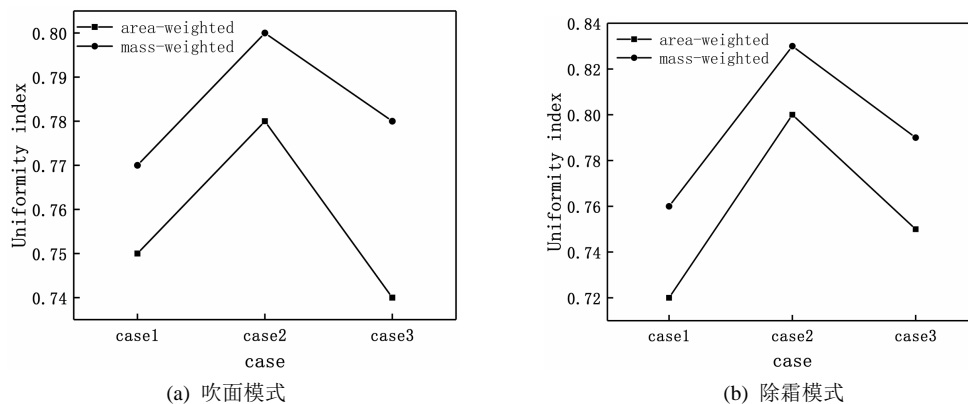
$$\bar{\phi}_a = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2)$$

指定场变量的质量加权均匀性指数利用下式进行计算:

$$\gamma_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(\phi_i - \bar{\phi}_m) (\rho_i v_i A_i)]}{2|\bar{\phi}_m| \sum_{i=1}^n |\rho_i v_i A_i|} \quad (3)$$

$$\bar{\phi}_m = \frac{\sum_{i=1}^n [\phi_i (\rho_i v_i A_i)]}{\sum_{i=1}^n (\rho_i v_i A_i)} \quad (4)$$

如图 8 所示为三个模式下随着扩压段涡壳曲率半径以及壳体与蒸发器进口截面夹角的变化, 面积加权均匀性指数和质量加权均匀性指数的变化趋势。由图可以看出在三个模式下, HVAC 模块由 case 1 变化到 case 2 时, 面积和质量加权均匀性指数均在增大, 但是当 HVAC 模块变化到 case 3 时, 两个均匀性指数均减小。说明 HVAC 模块由 case 1 变化到 case 2 时, 蒸发器进风均匀性变好, 当 HVAC 模块变化到 case 3 时, 蒸发器进风均匀性恶化。



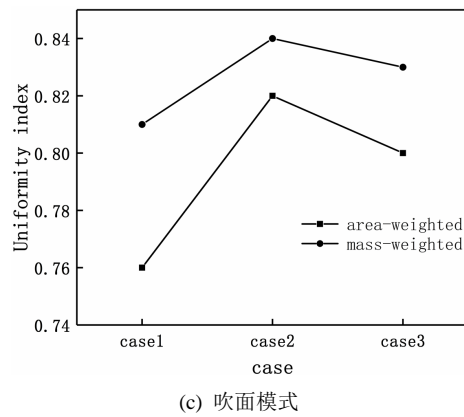


Figure 8. Uniformity index
图 8. 均匀性指数

5.2. 加权平均速度

利用加权平均速度亦可以衡量蒸发器进口截面进风均匀性，利用仿真软件可以输出蒸发器进口截面上的面积加权平均速度 v_a 和质量加权平均速度 v_m 。面积加权平均速度计算公式为：

$$\frac{1}{A} \int v_a dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n v_i |A_i| \quad (5)$$

而质量加权平均速度为：

$$\frac{\int v_m \rho |v_m dA|}{\int \rho |v_m dA|} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \rho_i v_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i |v_i \cdot A_i|} \quad (6)$$

换热器进风截面的进风从非常不均匀到非常均匀的过程中，其面积加权平均速度逐渐靠近质量加权平均速度，到最终等于质量加权平均速度，即面积加权平均速度与质量加权平均速度相差越小，说明蒸发器进口截面上的进风均匀性越好[9]。为了定量反应出换热器进风均匀度，提出以下公式：

$$\lambda = 1 - \frac{|v_a - v_m|}{v_m} \times 100\% \quad (7)$$

其中 λ 表示进风均匀度； v_a 表示面积加权平均速度； v_m 表示质量加权平均速度。

图 9 所示为根据公式(7)计算得出的三个模式下进风均匀度随扩压段涡壳曲率半径以及壳体与蒸发器

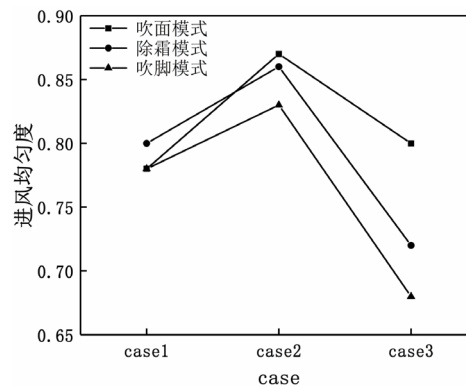


Figure 9. Inlet air uniformity λ
图 9. 进风均匀度

进口截面夹角变化的趋势,可以看出随着 HVAC 模块由 case 1 变化到 case 2,进风均匀度增大,当 HVAC 模块变化到 case 3 时,进风均匀度减小。

6. 结论

对某款电动汽车的空调箱进行仿真分析,针对蒸发器段进风不均匀性提出三种优化方案,并对三种优化方案进行仿真分析,考察了三种方案中蒸发器的进风均匀性、压降、各截面的静压、速度、流量等参数,通过对三种方案中各参数的分析,找出扩压段蜗壳曲率半径 R 以及壳体与蒸发器进口截面夹角 θ 的变化对 HVAC 模块的影响,得出以下结论:

- 1) 随着扩压段蜗壳曲率半径以及壳体与蒸发器进口截面夹角的增大,蒸发器压降增大。
- 2) 加权均匀性指数和进风均匀度均能客观地反映出蒸发器的进风均匀性。

3) 在本文三种方案中, HVAC 模块由 case 1 变化到 case 2,蒸发器进风均匀性提高,蒸发器利用面积增大,当 HVAC 模块变化到 case 3 时,蒸发器进风均匀性再次恶化,蒸发器利用面积再次减小。

改变 HVAC 模块的扩压段蜗壳曲率半径以及壳体与蒸发器进口截面夹角可以有效改善蒸发器的进风均匀性,但是不宜过大或者过小。

参考文献

- [1] 郭莹,李钢. 汽车空调箱内空气流动的数值模拟研究[J]. 机电设备, 2014(4): 78-80.
- [2] 徐龙. 汽车空调蒸发器总成及吹面风道的数值仿真[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [3] 陈佳. 双蒸发器汽车空调 HVAC 总成及除霜风道的流动分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [4] 王胜. 汽车空调蒸发器风量问题的 CAE 模拟分析[J]. 企业科技与发展, 2014(12): 31-34.
- [5] 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(3): 282-285.
- [6] 赵浩鸣. 基于 CFD 轿车空调风道仿真分析与结构优化[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [7] 黄东, 吴蓓. 风速非均匀分布对蒸发器性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(9): 6-10.
- [8] 严瑞东, 徐博, 陈江平, 等. 微通道换热器两相分配特性对空调系统性能的影响[J]. 制冷学报, 2013, 34(3): 20-23.
- [9] 陶红歌, 陈焕新, 谢军龙, 等. 面积加权平均速度与质量加权平均速度的对比分析[C]//中国制冷学会, 中国建筑学会. 全国暖通空调制冷 2010 年学术年会, 2010: 3522-3526.