

基于 CO₂ 和 PM_{2.5} 浓度对汽车空调内外气模式切换的实验研究及 CFD 模拟

杭州龙碧科技有限公司 王琼琼 王力 潘微* 秦敬轩 陈拼 张维

摘要：汽车内的空气品质主要由 CO₂ 和 PM_{2.5} 浓度决定。本文主要以本田雅阁汽车为例，用 CO₂ 和 PM_{2.5} 浓度两者为依据来衡量汽车内空气质量。调节汽车空调档位，分析在不同档位下切换内外气模式时 CO₂ 和 PM_{2.5} 的浓度变化，从而找到较优的空调档位及在不同档位下内外气切换的时间点，并采用 CFD（计算流体力学）模拟 2 档条件下内外气模式汽车内 CO₂、PM_{2.5} 的浓度变化及空间分布情况。通过研究发现 CO₂ 和 PM_{2.5} 的聚集位置，汽车空调档位是 1 档时最有利于汽车内空气质量满足我们的需求。

关键字：汽车；CO₂；PM_{2.5}；内外气切换；CFD 模拟

Experimental study and CFD simulation of vehicle AC internal and external air switchover according to concentration of CO₂ and PM_{2.5}

Wang Qiongqiong, Wang Li, Pan Wei, Qin Jingxuan, Chen Pin, and Zhang Willim (Wei)

Abstract: The air quality in a vehicle is mainly determined by the concentration of CO₂ and PM_{2.5}. This study mainly uses Honda Accord as an example to measure the air quality in a compartment of vehicle by adjusting the internal and external AC switch position, analyzing the changes of CO₂ and PM_{2.5} concentration, it focuses to figure out a better AC switch position and the timing of switchover between internal and external air change. Computational Fluid Dynamic(CFD) simulation is also used to simulate the distribution and change of the concentration of CO₂ and PM_{2.5} in the compartment. As a result, the detailed of CO₂ and PM_{2.5} distribution is analyzed and AC switch position 1 of vehicle provides better internal air quality in comparison with other switch position.

Keyword: vehicle, CO₂, PM_{2.5}, internal and external switchover, CFD simulation

王琼琼，女，1992.03，硕士，分析化学工程师，山西吕梁人，北京科技大学，环保

*潘微，通讯作者

310053 浙江省杭州市滨江区东冠路 611 号金盛工业园 2 幢 4 层

联系方式：0571-56560782 panwei0711@longbh.com

1. 引言

由于环境问题与人类健康息息相关，环境污染问题受到了越来越多的人的关注与重视。特别是可吸入颗粒物 PM2.5，由于粒径小，可通过呼吸系统进入支气管，影响在肺泡上进行氧气与二氧化碳气体的正常交换，从而引发哮喘、支气管炎甚至心血管病等多种疾病^{[1][2]}。

随着人们生活水平的不断提高，选择小汽车出行已经成为主流。如何保证车内相对密封的环境健康与舒适，也成为广大研究者的热点话题^[3]。由于大气环境庞大而复杂，PM2.5 的来源较多，例如能源工业部门煤炭的燃烧、燃油汽车尾气的排放、金属冶炼过程中金属蒸汽的冷凝聚结及居民生活炉灶的燃烧等^[4]，因此很难在短时间内控制 PM2.5 的排放^[5]，所以保证车内环境的清洁只能从车子本身出发。Huifang Ding 等^[6]研究了车内 PM2.5 的分布和传递机理，发现车内外空气交换率随着驾驶速度的增大而增加，车内和车外 PM2.5 浓度之比在外气循环和内气循环下分别大约为 0.6 和 0.25。N Yu 和 S Shu 等人^[7]同时监测了 17 辆正在行驶的出租车，表明在有高效空气过滤器的情况下，车内细颗粒物和超细颗粒物浓度相比于没有过滤器的条件下可以降低 37%和 47%。潘峰等^[8]用试验研究了道路环境的颗粒物分布特点，并且用 CFD 模拟的方法分析空气流场、温度场对车内环境可吸入颗粒物热运动的作用，研究了空调工况、气流组织、送风量、过滤器效率等条件变化对颗粒物分布的影响。此外，CO₂ 浓度也是评价车内空气质量的重要指标，若汽车内新风量不足，会让人感到不适甚至呼吸困难^[9]。陈焕新等人^{[10][11]}根据列车内 CO₂ 浓度的高低设计了一套空调通风控制系统，以此改善车厢内空气品质。邓大跃等人^[12]分析了四种通风模式（关闭通风口和风扇、关闭通风口打开风扇、打开通风口关闭风扇、打开通风口和风扇）下，汽车在不同车速时车内 CO₂ 浓度的变化，发现在车速较高的情况下，四种通风模式汽车换气量都增加。

CO₂ 和 PM2.5 浓度同时影响车内空气质量，然而目前大部分研究都只着重于单独考虑 CO₂ 或者 PM2.5，而且同时以两者为依据对汽车空调内外循环模式调节的研究较少，从而存在对车内空气质量评价不全面、不充分的现象。

为了解决上述问题，也为了提出研究车内空气质量的另一种可行的方案，本文将车内 CO₂ 和 PM2.5 同时作为评价车内空气质量的指标，进行详细的实验研究，找到了不同档位下切换汽车空调内外气模式的时间点，并结合 CFD 模拟，对车内 CO₂ 和 PM2.5 的浓度分布做了分析。并且比较了不同性能过滤器对切换内外气模式的影响。本文的研究也为将来汽车内设置通过 CO₂ 和 PM2.5 传感器自动切换汽车内外气模式提供了实验及理论依据。

2.实验设备和装置

2.1 实验设备

实验过程中使用的设备如下：

表 1 实验设备

名称	型号	厂家
气溶胶发生器	氯化钾（0.3-10μm）	嘉兴隆曼测控技术有限公司
温湿度计	HTC-1	科舰
粉尘仪	TSI 8530	美国 TSI 公司
CO ₂ 检测仪	Testo 5350	德图
电子天平	FA2204	邦西仪器科技（上海）有限公司
净化机	LBJH	杭州龙碧科技有限公司
风速仪	Testo 405i	德图

2.2 实验装置

本实验采用本田雅阁汽车完成，汽车空调进风口配有市面上出售的原装过滤器，过滤器为全新。实验之前将汽车清理干净，关闭所有车窗。

2.2.1 车外环境及参数设置

本实验由实验舱系统完成，图 1 为实验舱系统示意图。实验舱尺寸为长 7m、宽 4m、高 3m，其 4 个立面正中央位置分别开有一个小孔，顶部开有两个小孔，用来引进 PM2.5 颗粒。图 1 左边示意图为气溶胶发生装置，用来发生气溶胶，作为实验用 PM2.5。实验舱侧面开有一个小门，方便实验员进出，顶部装有两个吊扇，对舱内气溶胶进行搅拌。实验舱内配有净化机，用来去除舱内颗粒物。汽车由实验舱大门进入，在实验过程中，大门处于关闭密

封状态。

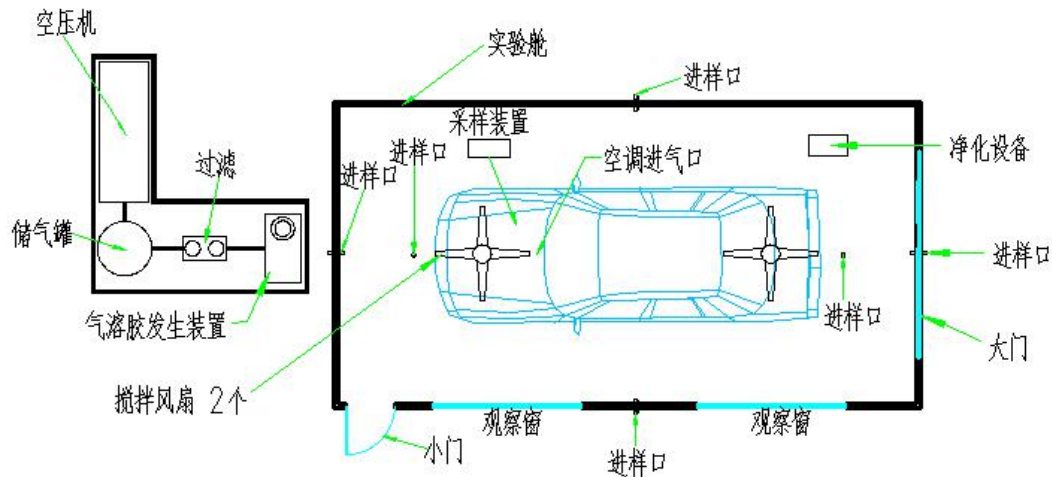


图 1 气溶胶发生器及实验舱和汽车示意图

近几年，中国大部分地区空气质量最差的月份是 1 月，2016 年-2018 年 1 月份 PM2.5 日平均浓度可以达到 $140\text{--}170\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，因此，为了模拟全年空气质量较差的一天，本文在实验过程中，保持实验舱内气溶胶浓度稳定在 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 5% 的范围内，舱内温度是 10°C ，湿度是 50%HR。在距离汽车空调进风口 30cm 的位置设有一个采样点，用 CO_2 检测仪、粉尘仪、温湿度计监测空调进风口的 CO_2 浓度、PM2.5 浓度及温湿度。

2.2.2 车内环境及参数设置

为了集中研究在切换空调档位下 CO_2 和 PM2.5 浓度分布，本次实验在固定的 FACE（吹脸）模式下，仅调节空调送风口的档位即风量，不调制冷制热工况，汽车空调在仪表台上有 4 个送风口。实验过程中，车内有 2 名乘客，一名女生，一名男生，使测试更接近于实际生活。汽车内配有一台净化机，同样在实验开始前用来去除汽车内背景颗粒物。

车内设有 3 个采样点，即主驾驶头部位置、副驾驶头部位置和空调送风出口位置，分别安装有 CO_2 检测仪、粉尘仪、温湿度计，可以在实验过程中，同时监测车内 3 个位置处 CO_2 浓度、PM2.5 浓度和温湿度。

根据《环境空气质量标准》^[13]，24 小时 PM2.5 的平均浓度的一级标准是 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，二级标准是 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。因此，本文中规定将汽车内 PM2.5 浓度限定为：空调外循环模式满足二级标准（ $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ ），内循环模式满足一级标准（ $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。另外在《室内空气质量标准》^[14]中， CO_2 浓度的日平均限值是 1000ppm，且当超过 1500ppm 时，人的呼吸会变得急促，会产生轻度头疼。因此本研究将 CO_2 浓度限定在空调外循环模式条件下满足 1000ppm 以下，空调内循环条件下满足 1500ppm 以下， CO_2 和 PM2.5 浓度限值列于表 2 中。

表 2 汽车内 CO_2 和 PM2.5 浓度限值参数

监测目标		CO_2	PM2.5
浓度限值	内循环	1500ppm	$35\mu\text{g}/\text{m}^3$
	外循环	1000ppm	$75\mu\text{g}/\text{m}^3$

3. 实验方法

3.1 实验前处理

将汽车开进实验舱内，开启车内外 CO_2 检测仪、粉尘仪、温湿度计。 CO_2 检测仪和粉尘仪都是一秒钟记录一个数据。密封实验舱大门和小门，同时开启实验舱及汽车内空气净化机，使实验舱和汽车内的 PM2.5 背景浓度降为 0。

3.2 实验过程

两名实验员从实验舱小门进入，并关闭小门，然后进入车内，分别坐于汽车主驾驶和副驾驶位置，关紧车门。调节汽车空调为 FACE 模式，开始实验。

阶段一：风量调节为 1 档，并且开启内循环模式。此时通过向实验舱内充气溶胶使舱内 PM2.5 浓度稳定在 $143\text{--}157\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而随着时间增长，车内 PM2.5 浓度保持为 0， CO_2 浓度逐渐上升，直到 CO_2 浓度上升到 1500ppm。

阶段二：空调系统由内循环模式切换为外循环模式。在外循环模式下，随着时间增长，车内 PM2.5 浓度升高，而 CO₂ 浓度降低，直到汽车内 PM2.5 浓度稳定在最大值 30 秒。

阶段三：重复阶段一操作，将空调切换到内循环模式，此时，PM2.5 浓度下降，CO₂ 浓度上升。直到 CO₂ 浓度再次上升到 1500ppm。

阶段四：重复阶段二操作，空调系统由内循环模式再次切换到外循环模式，使 PM2.5 浓度上升，CO₂ 浓度下降。

依次改变空调风量为 2 档-7 档，重复以上实验。

4. 实验结果分析

4.1 同一位置不同档位 CO₂ 和 PM2.5 浓度的比较

本文选取了具有代表性的汽车档位来进行分析，分别是 1 档、2 档和 6 档。为了同时考虑 CO₂ 和 PM2.5 浓度对车内空气质量的影响，选取主驾驶头部位置，监测 CO₂ 和 PM2.5 浓度，从而找到合适的空调档位，在合理进行内外气切换的条件下，可以保证 PM2.5 和 CO₂ 浓度满足表 2 所列的限值。主驾驶位置，1 档、2 档和 6 档的 CO₂ 和 PM2.5 浓度随时间的变化曲线列于图 2。

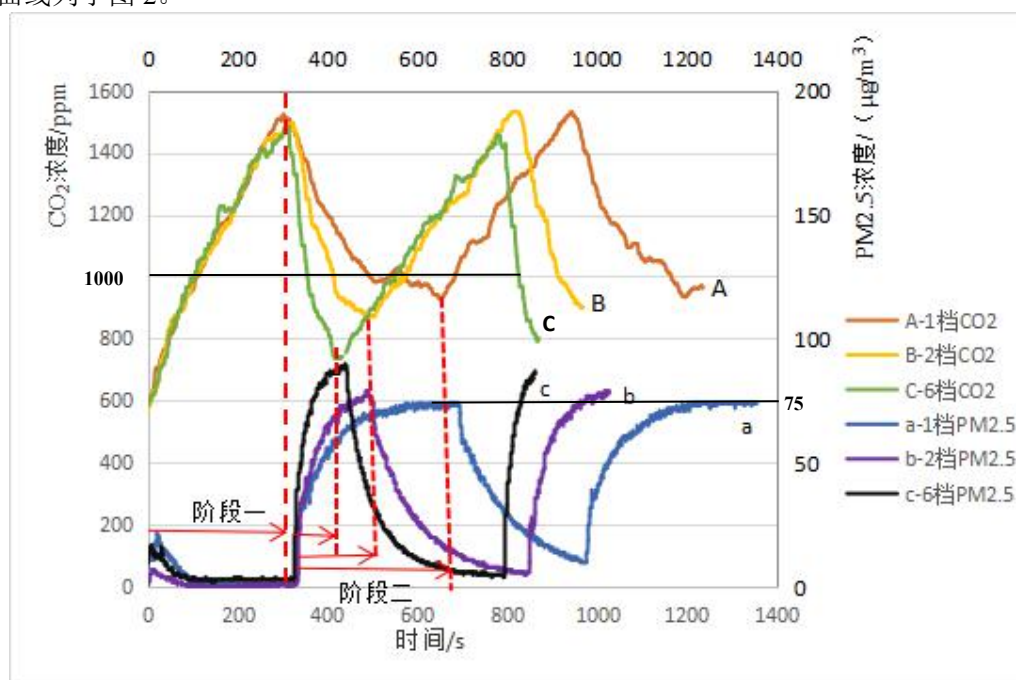


图 2 主驾驶位置不同空调档位 CO₂ 和 PM2.5 浓度随时间的变化曲线

图 2 中，横坐标代表实验时间，主纵坐标代表 CO₂ 浓度，次纵坐标代表 PM2.5 浓度，曲线 A、B、C 分别是 CO₂ 在 1、2、6 档的浓度变化曲线，曲线 a、b、c 是 PM2.5 在 1、2、6 档的浓度变化曲线。阶段一和阶段二分别是汽车空调第一次内循环和外循环模式，由于阶段三、四是验证实验的重复性，在图中没有标出。

从图 2 中可以看出车内 PM2.5 和 CO₂ 变化的总体趋势。在内循环模式下，PM2.5 浓度维持在 0，而 CO₂ 浓度则随着两名实验员在密闭汽车内的呼吸逐渐增多，在大约 330s 后，达到了 1500ppm 左右。外循环模式下，汽车内外进行空气交换，PM2.5 经过空调过滤器，其中一部分被过滤器过滤掉，而另一部分进入车内，使车内 PM2.5 浓度升高，同时车内高浓度的 CO₂ 经过汽车排气孔排到车外，浓度下降。

图 2 中 1 档情况下，对比 CO₂ 和 PM2.5 浓度曲线发现，汽车空调外循环模式下，CO₂ 浓度可以降到 1000ppm 以下，而且 PM2.5 浓度低于 74µg/m³。因此，在空调档位是 1 档时，一直开外循环模式就可以满足对 CO₂ 和 PM2.5 浓度的要求。比较图中 2 档情况，外循环模式下，t=410s 时，CO₂ 浓度从 1500ppm 降到了 1000ppm，此时 PM2.5 浓度是 68µg/m³，并未超过 75µg/m³，但在 t=480s 时 PM2.5 浓度达到了 75µg/m³，由此可以得出，在 2 档外循环情况下，在 410s~480s 时间段内，可以保证 CO₂ 和 PM2.5 浓度分别在 1000ppm 和 75µg/m³ 以下，此时若由外循环切换到内循环模式，也可以满足对 CO₂ 和 PM2.5 浓度要求。但是在 6 档情况下，当 t=360s 时，CO₂ 浓度降到了 1000ppm，这时 PM2.5 浓度已经达到了 81µg/m³，

因此，当空调档位是 6 档时，外循环模式下，无法达到 CO₂ 和 PM_{2.5} 浓度分别在 1000ppm 和 75μg/m³ 以下。

表 3 空调外循环模式下各档位的风量

档位	1 档	2 档	6 档
风量/(m ³ ·h ⁻¹)	100	120	262

另外，对比图 2 中 3 个档位阶段二的时间长短，可以得到不同档位 CO₂ 和 PM_{2.5} 浓度的变化速度，在外循环模式下，CO₂ 浓度从 1500ppm 降到 1000ppm，1 档，2 档和 6 档分别用时 210s，80s，30s，而且，PM_{2.5} 浓度上升的速度也是 6 档>2 档>1 档。从表 3 可知，风量 6 档远远大于 2 档、1 档，从图 2 中也可看出风量越大，CO₂ 和 PM_{2.5} 浓度变化越快。在外循环模式下，PM_{2.5} 浓度在 1 档、2 档、6 档条件下，可以达到的最大浓度分别是 74μg/m³、79μg/m³、90μg/m³，可见风量越大，粉尘被过滤器滤掉的比例越小，过滤器的一次过滤效率越低。

4.2 同一档位不同位置 CO₂ 和 PM_{2.5} 浓度的比较

为了比较汽车内不同位置的空气质量，本文也详细分析了车内多个位置 CO₂ 和 PM_{2.5} 的监测数据，由于每个档位不同位置的变化规律类似，我们仅以 2 档为例来进行分析说明。我们分别对主驾驶头部位置、副驾驶头部位置和空调新风出风口位置同时监测了 CO₂ 和 PM_{2.5} 浓度的变化，结果如图 3。

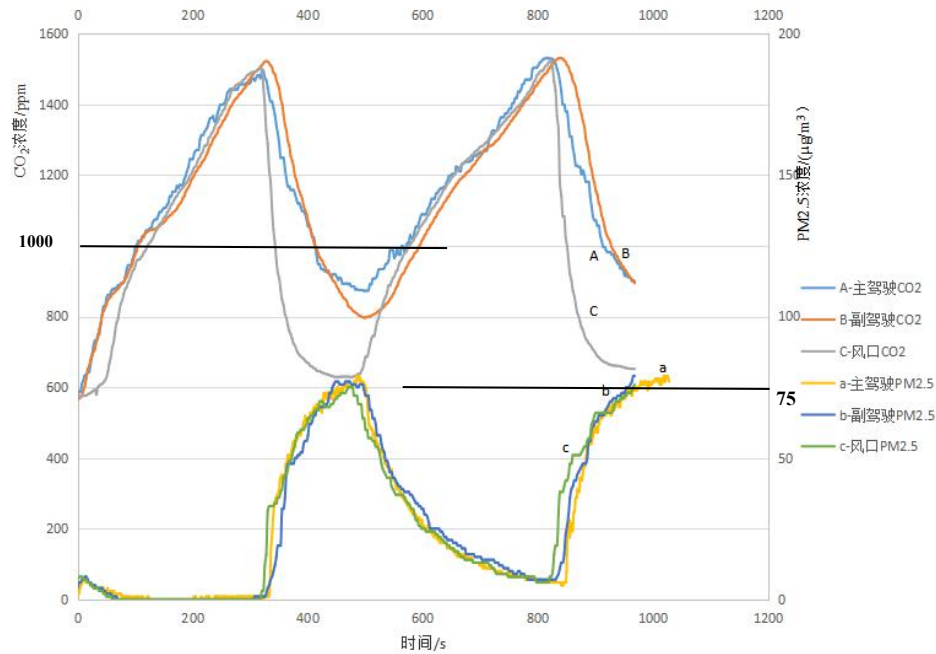


图 3 2 档不同位置处 CO₂ 和 PM_{2.5} 浓度随时间的变化曲线

图 3 中，曲线 A、B、C 分别是 CO₂ 在主驾驶头部位置、副驾驶头部位置、空调出风口位置的浓度变化曲线，曲线 a、b、c 是 PM_{2.5} 在主驾驶头部位置、副驾驶头部位置、空调出风口位置的浓度变化曲线。从图中可以看出，CO₂ 浓度在主驾驶和副驾驶头部位置变化基本一样，这是由于它两处于对称位置。而空调出风口处，在外循环模式下，由于实验员距离风口处较远，且有车外风送到汽车内，所以实验员呼出的 CO₂ 很难到达风口位置，使风口 CO₂ 浓度在外循环下可以降低到和车外浓度基本一致。在内循环模式下，实验员呼出的 CO₂ 在空调内循环风的作用下可以很快到达送风口处，所以呈现出三个位置的 CO₂ 浓度曲线重叠。PM_{2.5} 浓度由于不受人的影响，且主驾驶和副驾驶位置在新风口风速方向上，因此三者在内外循环模式下都基本呈现一致现象。

为了详细分析不同位置处的 CO₂ 与 PM_{2.5} 浓度分布，本研究采用 CFD 技术(OpenFOAM 开源计算软件^[15])对二档的工况进行了模拟，其中几何模型如图 4 所示：

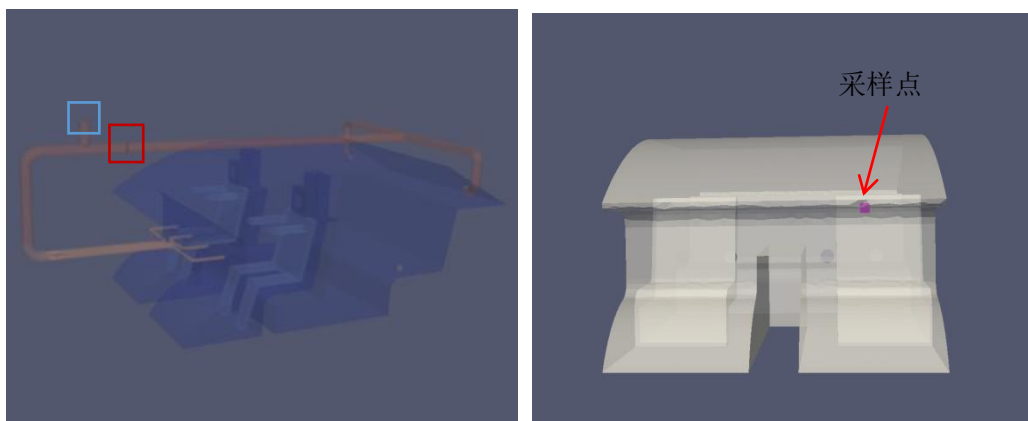


图 4 汽车几何模型(左)及测试点示意图(右)

图 4 的管道内部添加了如图中红色区域内所示的内部面,在内循环模式下为循环边界条件:速度、紊流能量、紊流耗散率、 CO_2 设置为周期边界; $\text{PM}_{2.5}$ 设置为净化边界(根据实验测得的净化效率得到);压力设置为循环增压边界,内部面在外循环模式下为壁面边界条件。蓝色区域为外部进风口,在内循环模式下为壁面边界条件,在内循环模式下为 $\text{PM}_{2.5}$ 进口,进口处 $\text{PM}_{2.5}$ 根据实验值得到,外循环进口风量为 $120\text{m}^3/\text{h}$ 。具体如图 5 所示,利用改变不同边界条件,来模拟内循环、外循环的切换。同时为了与实验对比选取图 4 右所示观测点(红色位置),位于主驾驶右侧位置。

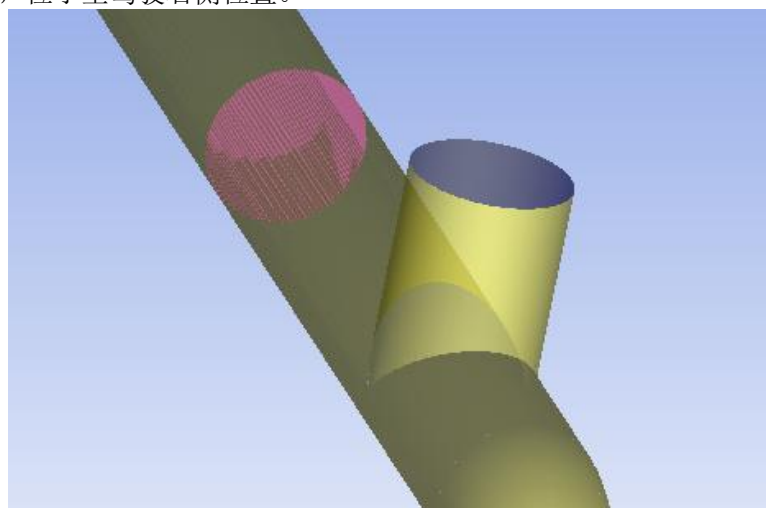


图 5 不同模式下改变的边界条件

计算采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型。非稳态项为隐式推进格式,对流项为二阶迎风格式,扩散项为中心差分格式。进口处的紊流能量、紊流耗散率根据 5% 的脉动强度得到,计算方法如文献 16 中所述。

车内人口呼吸源项的速度根据人每次呼吸气体体积 500mL 、1 分钟呼吸 15 次计算得到 ($U = \frac{VN}{60A}$)。 CO_2 呼出浓度根据每人在中等运动强度下每小时生成 CO_2 体积为 0.041m^3 计算得到 ($C_{\text{CO}_2} = \frac{0.041 \cdot 22.4 \rho_{\text{CO}_2}}{44 \cdot 10^6 UAT}$)。

外循环风量是根据表三中 2 档总风量为 $120\text{m}^3/\text{h}$ 得到的,内循环压力梯度设置为测量值 1.5Pa ,不同模式下空调出风口截面速度相同,如图 6 所示。

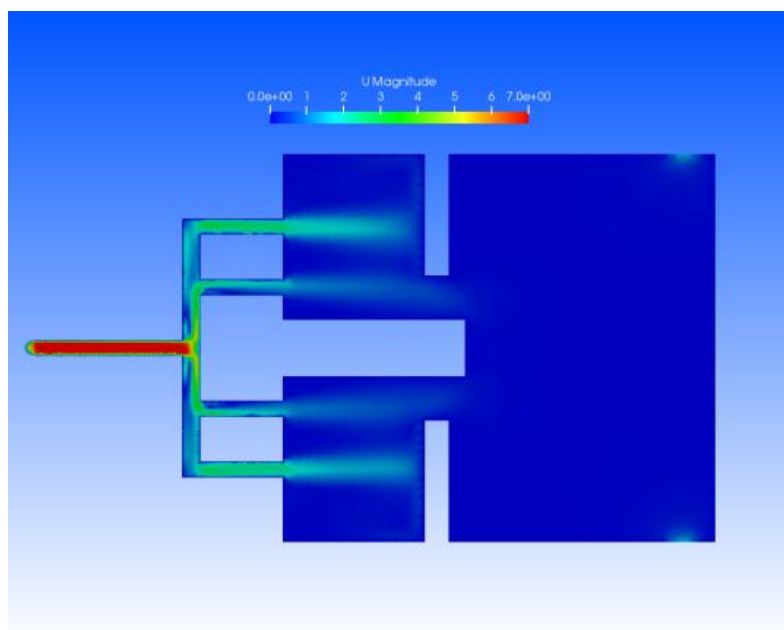


图 6 不同模式下空调进风截面速度

计算得到 CO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随时间变化如图 7 所示，其中红点图为主驾驶位置实验测得 CO_2 浓度随时间的变化曲线，黑色点线图为模拟结果在主驾驶位置 CO_2 浓度随时间的变化曲线，蓝点图为主驾驶位置实验测得 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随时间的变化曲线，绿色实线图为模拟结果在主驾驶位置 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随时间的变化曲线。如图 7 所示内循环(阶段 1 过程)的 CFD 模拟与实验吻合的较好，这一阶段汽车处于内循环过程， CO_2 由人体呼吸产生，因此在人体呼出位置前方产生聚集，图 8(a,b)为阶段 1 结束时(320s)主驾驶及空调进风口截面 CO_2 浓度分布，此时主驾驶位置 CO_2 浓度达到 1500ppm，而在前挡风玻璃附近存在聚集现象，浓度达到 2000ppm 以上，后座部分由于没有乘员，浓度较低。

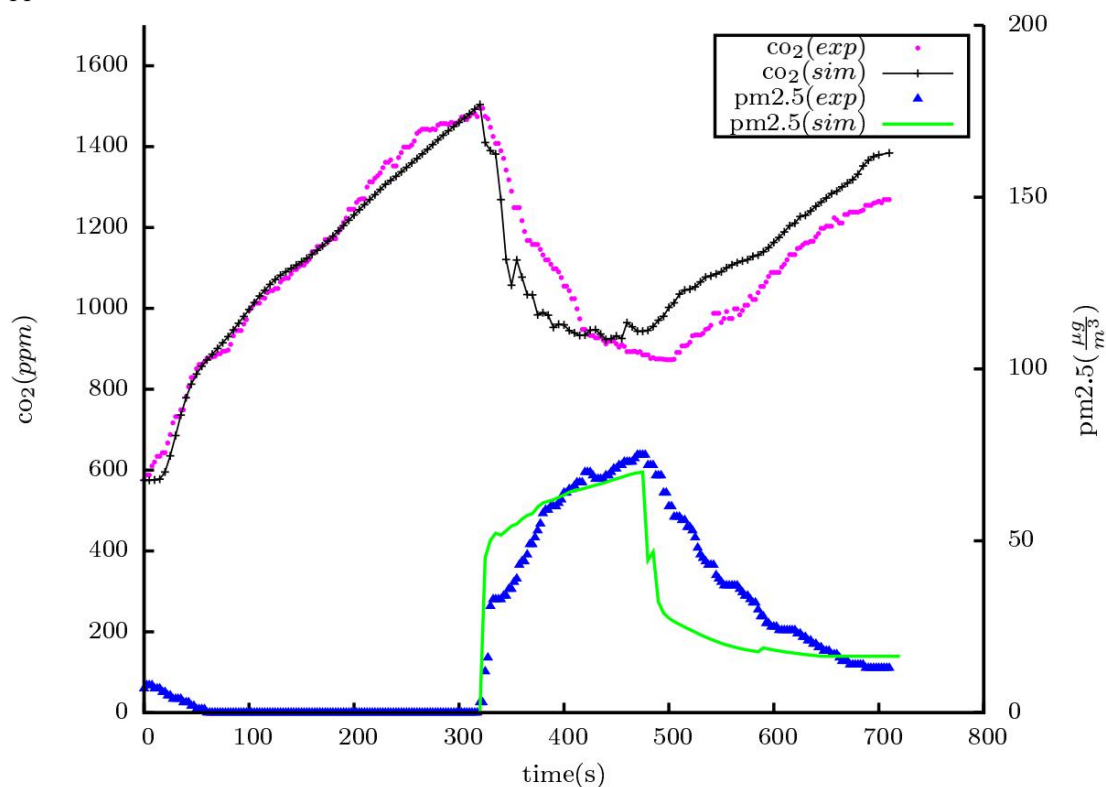
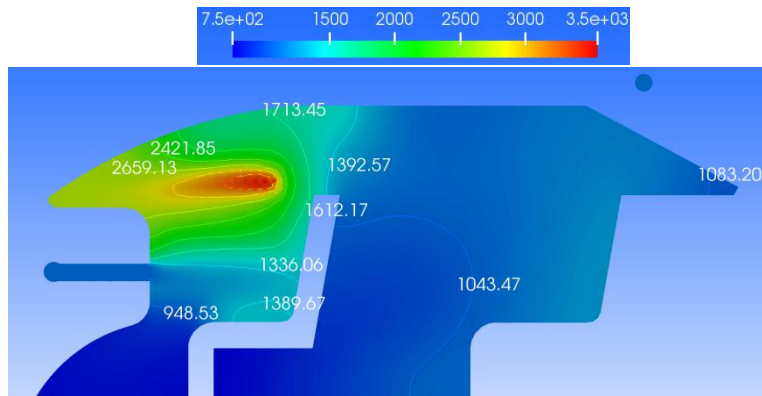
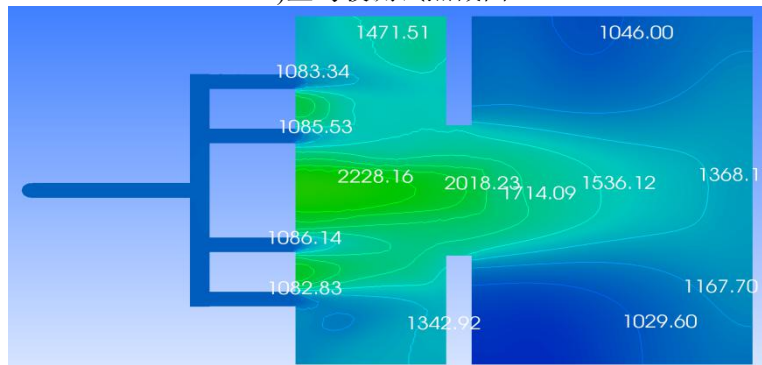


图 7 主驾驶位置 CO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随时间变化图



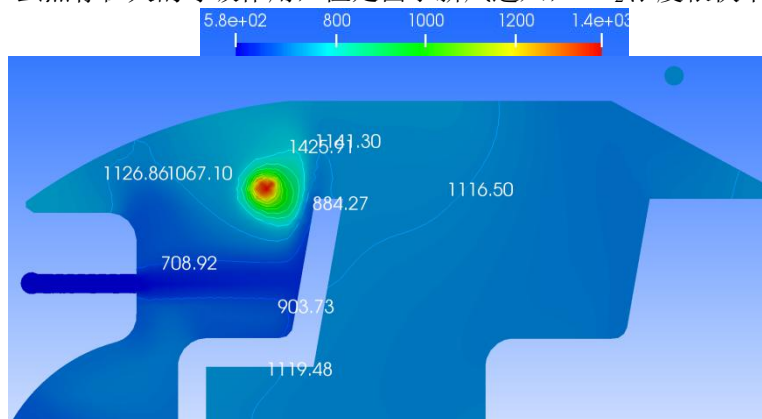
a)主驾驶测试点截面



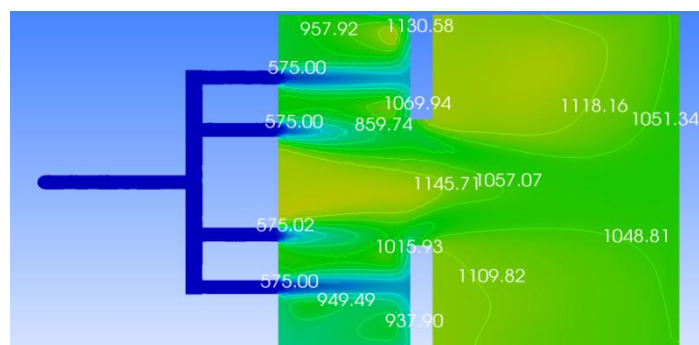
b)空调进风口截面

图 8 阶段 1 结束时 CO₂ 浓度在不同截面的分布

在主驾驶位置 CO₂ 浓度达到 1500ppm 以上后，空调改为外循环模式(阶段 2)，此时 CO₂ 浓度迅速下降，而 PM_{2.5} 也迅速上升。在图 7 中实验值 CO₂ 浓度下降的时间更长，这是因为实验中内外气的切换需要一定的时间，因此图 7 中实验的 CO₂ 浓度下降时间更长，CO₂ 浓度能下降的更低。图 9(a,b)为阶段 2 结束时 CO₂ 浓度分布，此时主驾驶位置 CO₂ 浓度为 850ppm 左右。虽然存在人的呼吸作用，但是由于新风进入，CO₂ 浓度很快下降。



a) 主驾驶测试点截面



b)空调进风口截面

图 9 阶段 2 结束时 CO₂ 浓度在不同截面的分布

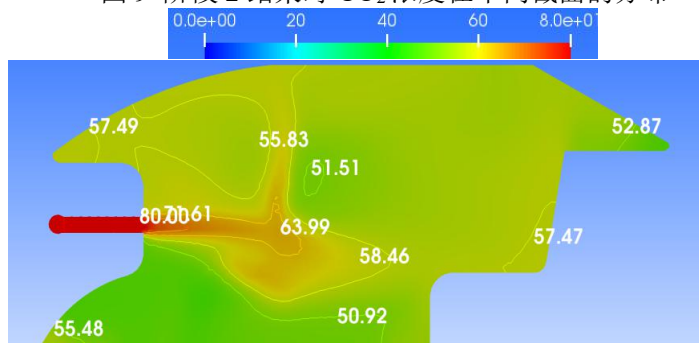


图 10 阶段 2 结束时 PM_{2.5} 浓度在主驾驶的分布

在开启外气达到 150s 后开启内循环(阶段 3)，此时主驾驶位置 PM_{2.5} 浓度为 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，如图 10 所示。在第三阶段，CFD 模拟中按照 52%的净化效率进行净化，因此 PM_{2.5} 很快得到净化，如图 7 中第 3 阶段模拟所示 PM_{2.5} 浓度下降的很快。另外在 4.3 小节所述，PM_{2.5} 的过滤效率对于车内 PM_{2.5} 浓度的影响很大，而实际中过滤器的净化效率与车内浓度为线形关系，因此实验中车内 PM_{2.5} 浓度与模拟相比下降的更为平滑。CO₂ 浓度和实验值相比，因第 2 阶段结束时 CO₂ 浓度偏高，作为第 3 阶段初始状态浓度更高，使模拟结果大于实验值，但 CO₂ 浓度增加的趋势与实验值一致。

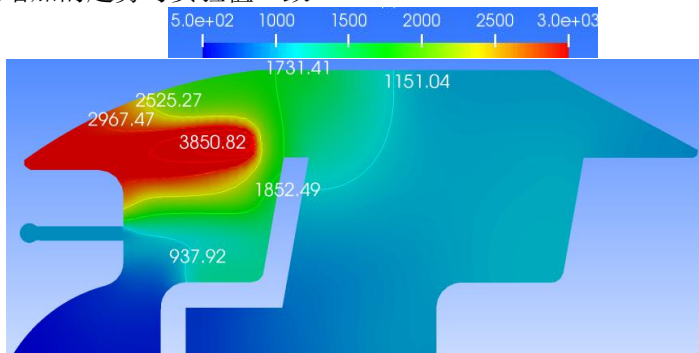


图 11 阶段 3 结束时 CO₂ 浓度在主驾驶测试点截面的分布

基于上述讨论可知，通过 CFD 模拟能得到跟实验较符合的结果，且通过模拟能直观的看到车内各点在不同时间不同内外循环模式下的 CO₂ 和 PM_{2.5} 浓度变化规律。将实验与模拟技术相结合，为科学研究提供了更加准确和全面的分析手段。

4.3 不同过滤器同一档位 CO₂ 和 PM_{2.5} 浓度的比较

为了验证不同汽车过滤器对内外气切换后车内空气质量的影响，将本田雅阁汽车原装的过滤器更换为尺寸及折数一样的纳米膜制作的过滤器（龙碧科技自主研发）进行实验，两种过滤器的性能比较如表 4，可见两种过滤器的阻力几乎一样。

表 4 纳米过滤器与原装过滤器的阻力比较

风量/(m ³ ·h ⁻¹)	原装过滤器	纳米膜过滤器(龙碧科技自主研发)
100	22Pa	24Pa
200	48Pa	50Pa

表 5 6 档外循环模式下龙碧纳米膜过滤器与原装过滤器一次过滤效率的比较

过滤器	一次过滤效率
原装过滤器	40%
纳米膜过滤器（龙碧科技自主研发）	60%

龙碧纳米膜过滤器的 CO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化与原装过滤器比较，结果如图 12，汽车空调档位都是 6 档，A、a 分别是龙碧纳米膜过滤器条件下 CO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度，B、b 分别是原装过滤器条件下 CO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。测试点都是在主驾驶头部位置，对比原装过滤器可以发现，无论在任何情况下（即使长时间处于外循环模式），龙碧纳米膜过滤器汽车内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度都小于 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，所以要满足我们对汽车内空气质量的要求，只需要控制 CO_2 浓度就可以，即在汽车行驶的过程中汽车空调可以一直维持外循环模式。对比表 5 在外循环模式下两种过滤器的一次过滤效率可以看到，龙碧纳米膜过滤器一次过滤效率要远高于原装过滤器，因此选择过滤性能优异的过滤器对汽车内空气质量有重要影响。

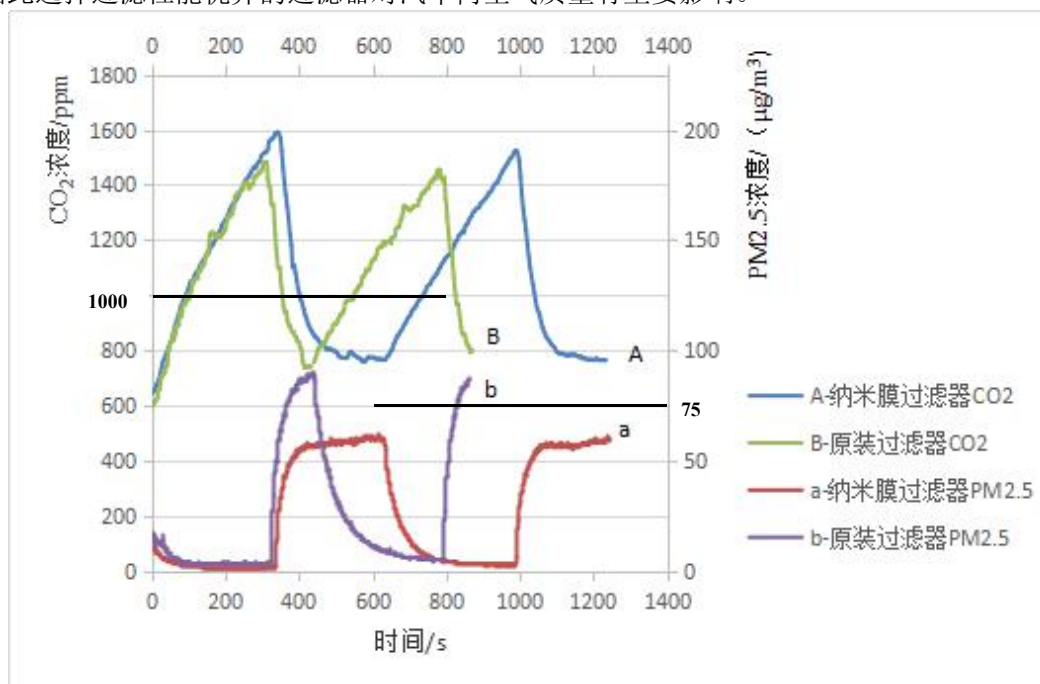


图 12 纳米过滤器与原装过滤器主驾驶位置 CO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随时间的对比曲线

5.结论

本文以配有原装过滤器的本田雅阁汽车为研究对象，控制实验舱车外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，同时改变空调送风档位，分析车内 CO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化情况，以此来找到最佳的空调送风档位，可以使 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在外循环模式下在 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，内循环模式下在 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。 CO_2 浓度在内循环模式下在 1500ppm 以下，外循环模式下可以降到 1000ppm 以下。通过实验发现，空调档位是 1 档时可以一直保持外循环模式，不需要切换到内循环就可以满足要求，2 档时需要在一定的时间范围内由外循环切换到内循环才能满足要求，而在 6 档时，无论任何时候由外循环切换到内循环，都不能满足车内质量控制要求。另外，汽车内主驾驶和副驾驶头部位置，空调风出口位置处 CO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的区别主要受驾驶员和乘客呼出 CO_2 的影响。对比 CFD 结果发现，在 2 档时虽然可以通过内外循环切换使主驾驶位置 $\text{PM}_{2.5}$ 及 CO_2 浓度满足要求，但是在内循环阶段 CO_2 浓度在前窗位置会过高，达到 2000ppm 以上，而外循环阶段靠近风口的位置 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到 $79\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右， CO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布与空间位置相关性较大，因此 2 档情况无法保证任意位置处能满足车内空气质量要求。最后由实验得到不同性能的空调过滤器可以得到不同的车内空气质量及不同的内外气切换规律。

参考文献:

- [1] 张吉洋,耿世彬. 我国大气环境 PM2.5 来源、分布、危害现状分析[J]. 洁净与空调技术, 2014(1):45-50.
- [2] 覃辉艳, 彭晓武, 蒙智娟,等. 大气 PM2.5 致人支气管上皮细胞 DNA 损伤的研究[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(5):391-393.
- [3] 李慧, 李世雄, 张学敏,等. 车内可吸入颗粒物的研究现状与发展趋势[J]. 环境工程, 2015(s1):438-442.
- [4] 戴海夏, 宋伟民. 大气 PM2.5 的健康影响[J]. 环境卫生学杂志, 2001, 28(5):299-303.
- [5] 杨冬冬, 赵树云, 张华,等. 未来全球 PM2.5 浓度时空变化特征的模拟[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4):1201-1212.
- [6] Ding H, Zhang Y, Sun H, et al. Analysis of the PM2.5 Distribution and the Transfer Characteristic in a Car-Cabin [J]. Procedia Engineering, 2015, 121:875-880.
- [7] Yu N, Shu S, Lin Y, et al. High efficiency cabin air filter in vehicles reduces drivers' roadway particulate matter exposures and associated lipid peroxidation.[J]. Plos One, 2017, 12(11):e0188498.
- [8] 潘峰. 车内可吸入颗粒物热运动分析[D]. 吉林大学, 2009.
- [9] 王旭耀. 二氧化碳对空气质量的影响[J]. 读写算:教育教学研究, 2011(17).
- [10] 陈焕新, 黄素逸, 杨培志. 合理控制空调列车车厢内 CO₂ 浓度[J]. 建筑热能通风空调, 2001, 20(6):32-34.
- [11] 陈焕新, 杨培志, 张春安. 空调列车车厢内 CO₂ 浓度变化率的探讨[J]. 通用机械, 2002(z1):54-56.
- [12] 邓大跃, 邵瑞婷, 陈双基. 汽车内二氧化碳污染与通风模式[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(11):94-95.
- [13] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局.环境空气质量标准: GB3095-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局卫生部, 国家环境保护总局.室内空气质量标准: GB/T 18883-2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002:1-2.
- [15] OpenFOAM User Guide[M]. OpenFOAM Foundation Ltd, 2017.
- [16] 王力, 秦敬轩, 潘微. 建筑物自然通风的计算机模拟研究-建筑物绕流及窗户开度对自然通风效果的影响[J]. 建筑环境与能源, 2017,6:161-168.