

综合零部件-整车的 VOCs 多级溯源数学模型与方法

何莉萍^{1,2†}, 辛宇航¹, 杨金¹, 夏凡¹, 李琦^{2,3}, 江楠^{2,3}, 肖咏坤¹, 刘丹凤^{2,3}

(1. 湖南大学机械与运载工程学院, 湖南长沙 410082;

2. 车辆排放与节能重庆市重点实验室, 重庆 401122;

3. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

摘要:为降低整车挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)并寻求解决方案,提出一种新的 VOCs 多级溯源定量分析数学模型与方法.该方法首次综合考虑零部件散发 VOCs 的交互协同效应以及基于国标限值的 VOCs 单一组分危害程度,建立了从零部件到整车的 VOCs 溯源分析数学模型.综合应用多目标决策法和三角模糊数语义学定义理论,构建定量分析多级 VOCs 溯源数学模型中各级影响权重的成对比较矩阵和计算多级组合权重的理论方法.所提出的 VOCs 溯源定量分析数学模型与方法不仅能够准确分析各种 VOCs 组分对整车 VOCs 贡献度大小序次,而且能够定量求解零部件散发 VOCs 交互协同作用下各零部件对整车 VOCs 的贡献度大小,从而为开展车内 VOCs 的溯源与控制提供更为准确的理论方法.某款车型的案例验证研究结果表明:各 VOCs 组分对案例车型中 VOCs 组分贡献大小的排序为甲醛>乙醛>甲苯>二甲苯>乙苯;零部件对整车 VOCs 贡献大小的排序为前排座椅>后排座椅>地毯>仪表板和顶棚.案例研究证明了某一零部件对车内 VOCs 的贡献,并不是该零部件各种 VOCs 组分的简单叠加,而是多种零部件 VOCs 散发组分协同作用的综合体现.

关键词: VOC; 数学模型; 多目标决策法; 三角模糊数语义学定义; 权重因子; 定量分析

中图分类号: U27

文献标志码: A

Multi-level VOCs Traceability Mathematical Model and Method Synthetically Considering Parts and a Whole Vehicle

HE Liping^{1,2†}, XIN Yuhang¹, YANG Jin¹, XIA Fan¹, LI Qi^{2,3}, JIANG Nan^{2,3},
XIAO Yongkun¹, LIU Danfeng^{2,3}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Vehicle Emission and Energy Saving, Chongqing 401122, China;

3. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: In order to reduce volatile organic compounds (VOCs) in a vehicle and find the solution, this study proposes a new mathematical model and method of quantitative analyzing and tracing VOCs at multi-levels. In the present work, it is the first time to establish a multi-level VOCs mathematical analysis model and tracing method

* 收稿日期:2021-09-05

基金项目:车辆排放与节能重庆市重点实验室开放基金重点项目(PFJN-01), Chongqing Key Laboratory of Vehicle Emission and Economizing Energy(PFJN-01)

作者简介:何莉萍(1967—),女,湖南长沙人,湖南大学教授,博士

† 通信联系人, E-mail:lphe@hnu.edu.cn

from vehicle parts to a whole vehicle by synthetically considering both the interactive effects of VOCs compositions emitted from different vehicle parts, and the hazard level of each composition of VOCs based on the national standard limits. This study also applies the multi-objective decision method with the triangular fuzzy number semantics definition theory to construct a pairwise comparison matrix for quantitatively analyzing the influence weights of different levels and the combined weights of multi-levels. The proposed VOCs tracing method can not only accurately analyze the contribution sequence of different VOCs compositions to the VOCs in a whole vehicle, but also quantitatively calculate the contribution of each typical vehicle part to the VOCs in a whole vehicle considering the interaction effects of different VOC compositions coming from different parts, and thus providing a more accurate theoretical method for the traceability and control of VOCs in vehicles. The case study shows that the contribution sequence of different VOC compositions is ranked as formaldehyde > acetaldehyde > toluene > xylene > ethylbenzene. The contribution sequence of vehicle parts to the VOCs in a whole vehicle is ranked as front seats > rear seats > carpet > dashboard and ceiling. The case study proves that the contribution of a vehicle part to the VOCs in a whole vehicle is not a simple superposition of all VOCs compositions, and it is the interaction results coming from different vehicle parts.

Key words: VOC; mathematical models; multi-objective decision method; semantic definition of triangular fuzzy number; weight factor; quantitative analysis

汽车制造业是我国经济增长的重要产业之一。汽车已成为人们出行的重要交通工具。相关资料显示,人们平均每天在车内待 115 min^[1],在交通拥堵的地区用车时间可能更长^[2]。车内空间较小且构成复杂,是一种特殊的室内微环境。现代汽车厂商和用户对车内空气质量尤为关注,车内挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)影响车内空气质量,危害乘员健康和行车安全。车内 VOCs 是指熔点低于室温而沸点为 50 ~ 260 °C 的挥发性有机化合物,主要包括甲醛、甲苯、二甲苯、苯及苯乙烯等有害物质。这些有害物质主要来自车内内饰零部件,如仪表盘、座椅、门板、地毯和顶棚等。车内 VOCs 超标会严重影响车内空气质量,从而危害驾驶员和乘员的呼吸、循环和神经系统,引发“驾驶综合征”并影响行车的安全性^[3-4]。目前,世界卫生组织已明确将车内 VOCs 等有害气体污染与高血压、艾滋病等共同列入人类健康的十大危害之一^[5]。因此,国内外均制定和颁发了车内 VOCs 测试及评价标准的相关法规^[6-9],如德国 PV3938 标准、日本《车内 VOC 试验方法》、俄罗斯《GOST R51206—2004 标准》以及我国《车内挥发性有机物和醛酮类物质采样测定方法》(HJ/T 400—2007),并开展基于 VOCs 的车内空气质量评价研究^[10-11]。

汽车 VOCs 溯源分析是降低整车 VOCs 和提高整车空气质量的重要途径,与汽车主机厂及其零部件

供应商的绿色正向设计以及 VOCs 的逆向管控密切相关。为此,国内外学者从试验和理论方面开展了 VOCs 溯源研究。Yang 等^[12]、胡懿等^[13]和梁波等^[14]通过实验检测不同材料散发的某种单一 VOCs 组分质量浓度,比较各材料散发的该 VOCs 组分质量浓度大小,确定对该 VOCs 组分贡献最大的车内材料;Lü 等^[15]以及徐永新等^[16]通过实验检测了不同零部件散发的某种 VOCs 组分质量浓度,通过比较不同零部件散发的该 VOCs 组分的质量浓度大小,确定对该 VOCs 组分贡献度最大的零部件。从零部件角度来开展整车 VOCs 溯源的理论方法主要有 2 种:李人哲等^[17]、姜金分等^[18]采用匹配分析方法,通过将第 i 种 VOCs 组分质量浓度除以各 VOCs 质量浓度总和计算出 VOCs 组分 i 对整车 VOCs 贡献权重 K_i ,再将 n 种 VOCs 组分的权重 K_i ($i=1, 2, \dots, n$) 与第 j 种零部件散发的 n 种 VOCs 组分质量浓度对应相乘并求和,从而获得该零部件对整车 VOCs 的贡献度,再依据贡献度值的大小来溯源分析并寻求对整车 VOCs 贡献度大的零部件;Liang 等^[19]、朱振宇等^[20]采用化学质量平衡模型分析法,基于各零部件散发的 VOCs 组分质量浓度有明显的差别和零部件散发 VOCs 之间没有相互作用等假设,建立了计算各零部件对整车 VOCs 贡献度的方程组,并通过最小二乘法求解车内零部件对整车 VOCs 的贡献度。

分析上述车内 VOCs 溯源研究不难发现,前期的

实验检测研究主要从单一 VOCs 组分方面进行溯源,并不是以综合考虑零部件各种 VOCs 组分的方式进行溯源.现有的 VOCs 溯源理论方法中,往往以某 VOCs 组分质量浓度占各 VOCs 质量浓度总和的比重作为对整车 VOCs 贡献权重,仅仅从某种 VOCs 组分的质量浓度角度考虑其对整车 VOCs 的贡献度.事实上,不同 VOCs 组分具有不同的国标限值,国标限值反映了某种 VOCs 组分的危害程度以及对整车 VOCs 的重要性.综合考虑某种 VOCs 组分浓度大小和危害性两方面的整车 VOCs 权重研究值得开展.另外,在整车微空间环境中,各个零部件中所含 VOCs 的组分种类和大小不同,这些 VOCs 组分在扩散过程中对整车 VOCs 的贡献存在交互作用和协同影响效应^[21],考虑零部件散发的 VOCs 之间协同效应的溯源理论方法尚未见报道.

鉴于此,本文首次尝试建立一种能够反映零部件散发 VOCs 的交互协同效应的零部件-整车 VOCs 溯源分析数学模型;基于国标限值从质量浓度和危害度两方面探讨某种 VOCs 组分对整车 VOCs 贡献权重;采用多目标决策法和三角模糊数语义学定义理论,寻求一种可以定量求解多级 VOCs 溯源分析数学模型中各级影响权重和多级组合权重的理论方法.旨在完善和丰富车内 VOCs 溯源的理论与方法,为整车低 VOCs 正向绿色设计和逆向管控提供技术支撑.此外,本研究以某款车型及其内饰零部件 VOCs 质量浓度实测值为依据开展了案例验证研究.

1 VOCs 多级溯源分析理论方法

1.1 建立车内 VOCs 多级溯源分析数学模型

本文通过分析讨论车内 VOCs 的主要来源与危害性相对较大的 VOCs 组分^[22-23],确定整车 VOCs 中危害大的主要成分分别为甲醛、乙醛、乙苯、甲苯及二甲苯,这些 VOCs 组分的主要来源是座椅、地毯、仪表板等内饰零部件.综合考虑各种零部件(座椅、地毯、仪表板等)散发的 VOCs 主要组分(二醛三苯)之间的交互作用和协同影响效应,首次建立了综合考虑零部件-整车的 VOCs 多级溯源分析数学模型,如图 1 所示. VOCs 多级溯源分析数学模型中 C_j 代表散发污染物 VOCs 的零部件(j 代表整车中某一种零部件, $j=1, 2, \dots, m$),这些零部件对整车中某一种 VOCs 组分(B_i , i 代表某一种 VOCs 组分, $i=1, 2, \dots, n$)都有大小不一的贡献,零部件(C_j)对整车 VOCs 组分(B_i)的贡献是多个零部件散发 VOCs 交互作用的体现.在

分析模型中,假设某一种零部件(C_j)对某一种 VOCs 组分(B_i)的贡献权重为 P_{ij} ,第 i 种 VOCs 组分(B_i)对整车 VOCs 的贡献权重为 f_i ,本研究中 f_i 将不再是第 i 种 VOCs 组分质量浓度除以各 VOCs 质量浓度总和的比值,而是从质量浓度和危害度两方面综合考虑某种 VOCs 组分对整车 VOCs 贡献权重.

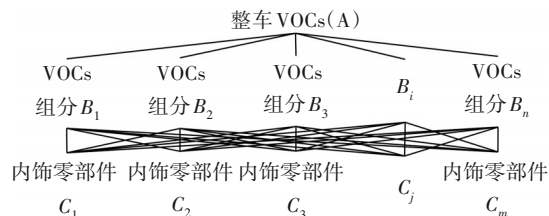


图 1 综合考虑零部件-整车的 VOCs 多级溯源分析数学模型

Fig.1 Mathematical analysis model for multi-level VOCs traceability considering parts and a whole vehicle

1.2 VOCs 溯源定量分析理论方法

为了定量分析确定 VOCs 溯源分析数学模型的 P_{ij} 和 f_i ,提出了一种综合应用多目标决策法和三角模糊数语义学定义的多级 VOCs 溯源数学模型定量分析方法.

基于 $M(l, m, u)$ 三角模糊数原理,确定反映不同零部件对某一种 VOCs 组分贡献相对大小以及各 VOCs 组分对整车 VOCs 贡献相对大小的 VOCs 溯源分析的三角模糊数语义学定义(表 1).三角模糊数 M 中的 l, u 分别是模糊数的下界和上界,当 $m>1$ 时,从 $B\sim C$ 层面来看,视为某零部件对某种 VOCs 组分的贡献大于另一零部件,从 $A\sim B$ 层面来看,视为某 VOCs 组分对整车 VOCs 的贡献大于另一 VOCs 组分;当 $m<1$ 时则相反^[24-25].

表 1 VOCs 溯源分析的三角模糊数语义学定义
Tab.1 Semantic definition of triangular fuzzy number for VOCs traceability analysis

三角模糊数 M_{ij}	两两相比
(1, 1, 1)	视为同等大小
(2/3, 1, 3/2)	视为稍微大
(3/2, 2, 5/2)	视为比较大
(5/2, 3, 7/2)	视为十分大
(7/2, 4, 9/2)	视为极其大
(2/3, 1, 3/2)	视为稍微小
(2/5, 1/2, 2/3)	视为比较小
(2/7, 1/3, 2/5)	视为十分小
(2/9, 1/4, 2/7)	视为极其小

依据表 1,应用多目标决策方法^[26]构建车内 VOCs 多级分析模型中求解各级权重因子的成对比较矩阵.通过比较各 VOCs 组分质量浓度值与国标限值之间的比值,可以构造第 i 种 VOCs 对整车 VOCs 贡献权重 f_i 的成对比较矩阵 $A \sim B$,从而求解 f_i ;通过比较各零部件散发各 VOCs 组分质量浓度大小,可以求解第 j 种零部件对第 i 种 VOCs 组分贡献权重 P_{ji} 的成对比较矩阵 $B \sim C$,从而分析判断各种 VOCs 组分对整车 VOCs 贡献度大小序次,确定哪一种 VOCs 组分的危害性最大.

$$A \sim B = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & \cdots & M_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$B \sim C = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1m} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{m1} & M_{m2} & \cdots & M_{mm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

三角模糊数 M_1, M_2 的计算遵守下列理论法则:

$$(l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (3)$$

$$(l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2) \quad (4)$$

$$(l_1, m_1, u_1)^{-1} = (1/u_1, 1/m_1, 1/l_1) \quad (5)$$

在上述理论基础,求解多级 VOCs 溯源数学模型中权重组合权重向量,从而判断哪种零部件对整车 VOCs 贡献最大,为整车 VOCs 的溯源以及企业降低汽车零部件 VOCs 提供决策依据.表 2 为整车 VOCs 溯源分析中各级权重.

表 2 整车 VOCs 溯源分析中各级权重
Tab.2 Weight factors at all levels for VOCs traceability in a whole vehicle

各层级	VOCs 组			VOCs 组
	分 B_1	分 B_2	...	
组分对整车 VOCs 权重	f_1	f_2	...	f_n
零部件 C_1	P_{11}	P_{12}	...	P_{1n}
零部件 C_2	P_{21}	P_{22}	...	P_{2n}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
零部件 C_m	P_{m1}	P_{m2}	...	P_{mn}

表 2 中的初始权重值应用模糊数学理论中的权重计算公式(6)计算^[27]:

$$S_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} \otimes \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} \right)^{-1} = (l_i, m_i, u_i), \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

初始权重值是由 l_i, m_i, u_i 构成的三角模糊数,依据模糊数学理论中的去模糊化公式(7)^[28]和常用的归一化公式(8)进行去模糊化和归一化处理.

$$S_i^* = \frac{l_i + m_i + u_i}{3}, i = 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

$$f_i = \frac{S_i^*}{\sum_{i=1}^n S_i^*} \quad (8)$$

基于零部件-整车的车内 VOCs 多级定量溯源分析数学模型权重向量依据公式(9)计算:

$$\omega_j = \sum_{i=1}^n (P_{ji} \times f_i) \quad (9)$$

式中: $P_{ji} \times f_i$ 为第 j 种零部件中 VOCs 组分 i 下对整车 VOCs 的贡献; ω_j 为零部件 j 对整车 VOCs 贡献的权重.

各零部件对整车 VOCs 贡献组合权重向量为:

$$W = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \dots \quad \omega_m] \quad (10)$$

2 案例研究

依据本文提出的综合零部件-整车的 VOCs 多级溯源分析数学模型,建立从零部件到整车的案例车型 VOCs 多级溯源分析模型,如图 2 所示.

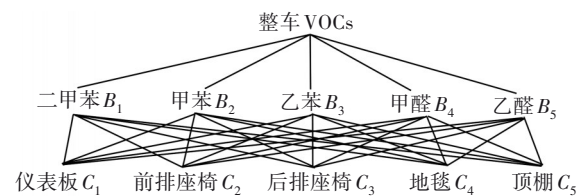


图 2 案例车型 VOCs 多级溯源分析模型

Fig.2 Multi-level traceability analysis model of VOCs in the case model

案例车型中零部件散发的主要 VOCs 组分及其质量浓度采用采样袋法检测.测试条件和步骤如下(ISO 12219-2—2012):1)预处理.将零部件放入 2 000 L 采样袋,充入 50% 氮气.然后将密封的采样袋放入恒温箱中,在 65 °C 下加热 2 h. 2)气体采集.利用 TENEX 管与 DNPH 管吸附采样袋中的苯烃类物质和醛酮类物质. 3)仪器分析.采用气质联用(ATD-GC/MS)仪器以及高效液相色谱(HPLC)仪分别检测苯烃类物质质量浓度和醛酮类物质质量浓度^[29].采样袋法示意图如图 3 所示,各 VOCs 质量浓度检测结果如表 3 所示.

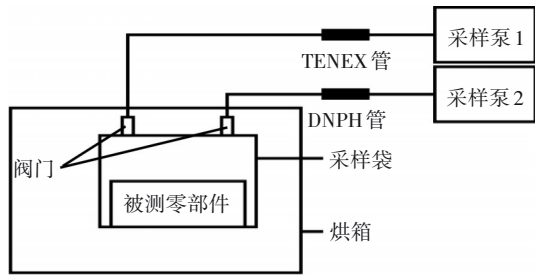


图 3 采样袋法示意图

Fig.3 Bag method schematic diagram

2.1 计算各零部件对 VOCs 组分的贡献权重

以二甲苯计算为例,对比各零部件散发二甲苯的质量浓度值,并基于三角模糊数语义学定义(如表 1 所示),建立了 5 种零部件对二甲苯贡献的成对比

$$B_1 \sim C = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (2/3, 1, 3/2) & (2/3, 1, 3/2) & (2/5, 1/2, 2/3) & (2/9, 1/4, 2/7) \\ (2/3, 1, 3/2) & (1, 1, 1) & (1, 1, 1) & (2/3, 1, 3/2) & (2/7, 1/3, 2/5) \\ (2/3, 1, 3/2) & (1, 1, 1) & (1, 1, 1) & (2/3, 1, 3/2) & (2/7, 1/3, 2/5) \\ (3/2, 2, 5/2) & (2/3, 1, 3/2) & (2/3, 1, 3/2) & (1, 1, 1) & (2/7, 1/3, 2/5) \\ (7/2, 4, 9/2) & (5/2, 3, 7/2) & (5/2, 3, 7/2) & (5/2, 3, 7/2) & (1, 1, 1) \end{bmatrix}$$

同理,对不同 VOCs 组分下的各零部件进行对比,构建各零部件对每种 VOCs 组分贡献的成对比较

$$B_2 \sim C = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (5/2, 3, 7/2) & (5/2, 3, 7/2) & (5/2, 3, 7/2) & (7/2, 4, 9/2) \\ (2/7, 1/3, 2/5) & (1, 1, 1) & (2/3, 1, 3/2) & (3/2, 2, 5/2) & (5/2, 3, 7/2) \\ (2/7, 1/3, 2/5) & (2/3, 1, 3/2) & (1, 1, 1) & (3/2, 2, 5/2) & (5/2, 3, 7/2) \\ (2/7, 1/3, 2/5) & (2/5, 1/2, 2/3) & (2/5, 1/2, 2/3) & (1, 1, 1) & (3/2, 2, 5/2) \\ (2/9, 1/4, 2/7) & (2/7, 1/3, 2/5) & (2/7, 1/3, 2/5) & (2/5, 1/2, 2/3) & (1, 1, 1) \end{bmatrix}$$

$$B_3 \sim C = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (2/3, 1, 3/2) & (2/3, 1, 3/2) & (3/2, 2, 5/2) & (2/5, 1/2, 2/3) \\ (2/3, 1, 3/2) & (1, 1, 1) & (2/3, 1, 3/2) & (2/3, 1, 3/2) & (2/5, 1/2, 2/3) \\ (2/3, 1, 3/2) & (2/3, 1, 3/2) & (1, 1, 1) & (2/3, 1, 3/2) & (2/5, 1/2, 2/3) \\ (2/5, 1/2, 2/3) & (2/3, 1, 3/2) & (2/3, 1, 3/2) & (1, 1, 1) & (2/7, 1/3, 2/5) \\ (3/2, 2, 5/2) & (3/2, 2, 5/2) & (3/2, 2, 5/2) & (5/2, 3, 7/2) & (1, 1, 1) \end{bmatrix}$$

$$B_4 \sim C = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (2/7, 1/3, 2/5) & (2/7, 1/3, 2/5) & (2/5, 1/2, 2/3) & (2/3, 1, 3/2) \\ (5/2, 3, 7/2) & (1, 1, 1) & (3/2, 2, 5/2) & (5/2, 3, 7/2) & (7/2, 4, 9/2) \\ (5/2, 3, 7/2) & (2/5, 1/2, 2/3) & (1, 1, 1) & (3/2, 2, 5/2) & (5/2, 3, 7/2) \\ (3/2, 2, 5/2) & (2/7, 1/3, 2/5) & (2/5, 1/2, 2/3) & (1, 1, 1) & (3/2, 2, 5/2) \\ (2/3, 1, 3/2) & (2/9, 1/4, 2/7) & (2/7, 1/3, 2/5) & (2/5, 1/2, 2/3) & (1, 1, 1) \end{bmatrix}$$

$$B_5 \sim C = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (2/7, 1/3, 2/5) & (2/5, 1/2, 2/3) & (2/5, 1/2, 2/3) & (2/3, 1, 3/2) \\ (5/2, 3, 7/2) & (1, 1, 1) & (3/2, 2, 5/2) & (3/2, 2, 5/2) & (5/2, 3, 7/2) \\ (3/2, 2, 5/2) & (2/5, 1/2, 2/3) & (1, 1, 1) & (2/3, 1, 3/2) & (3/2, 2, 5/2) \\ (3/2, 2, 5/2) & (2/5, 1/2, 2/3) & (2/3, 1, 3/2) & (1, 1, 1) & (3/2, 2, 5/2) \\ (2/3, 1, 3/2) & (2/7, 1/3, 2/5) & (2/5, 1/2, 2/3) & (2/5, 1/2, 2/3) & (1, 1, 1) \end{bmatrix}$$

较矩阵,即 $B_1 \sim C$.

表 3 案例车型中零部件散发的主要 VOCs 组分及其质量浓度值

Tab.3 The main emitted VOCs components and concentrations of the parts in the case model

零部件	质量浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)				
	二甲苯 B_1	甲苯 B_2	乙苯 B_3	甲醛 B_4	乙醛 B_5
仪表板 C_1	189	1 926	56	57	21
前排座椅 C_2	203	298	41	416	74
后排座椅 C_3	216	324	38	307	59
地毯 C_4	393	164	30	138	55
顶棚 C_5	1 576	28	83	46	19

根据式(6)求解仪表板对二甲苯贡献的初始权重:

$$S_1 = \sum_{j=1}^n M_{1j} \otimes \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} \right)^{-1} = \frac{(2.96, 3.75, 4.95)}{(26.32, 31.74, 38.65)} = (0.077, 0.120, 0.190) \quad (11)$$

通过式(7)和式(8)进行去模糊化和归一化处理,最终获得仪表板对二甲苯的贡献权重为0.122.

同理可以获得前排座椅、后排座椅、地毯和顶棚对二甲苯的贡献权重分别为0.139、0.139、0.171和0.429.

在此基础上,可以得到反映5种零部件对二甲苯贡献的权重向量:

$$P_1 = (0.122, 0.139, 0.139, 0.171, 0.429)$$

以此类推,可以求解获得5种零部件对甲苯、乙苯、甲醛和乙醛组分贡献的权重向量分别为:

$$P_2 = (0.346, 0.242, 0.242, 0.109, 0.061)$$

$$P_3 = (0.195, 0.163, 0.163, 0.137, 0.342)$$

$$P_4 = (0.094, 0.372, 0.274, 0.169, 0.091)$$

$$A \sim B = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (2/3, 1, 3/2) & (2/3, 1, 3/2) & (2/7, 1/3, 2/5) & (2/5, 1/2, 2/3) \\ (2/3, 1, 3/2) & (1, 1, 1) & (3/2, 2, 5/2) & (2/5, 1/2, 2/3) & (2/3, 1, 3/2) \\ (2/3, 1, 3/2) & (2/5, 1/2, 2/3) & (1, 1, 1) & (2/9, 1/4, 2/7) & (2/7, 1/3, 2/5) \\ (5/2, 3, 7/2) & (3/2, 2, 5/2) & (7/2, 4, 9/2) & (1, 1, 1) & (2/3, 1, 3/2) \\ (3/2, 2, 5/2) & (2/3, 1, 3/2) & (5/2, 3, 7/2) & (2/3, 1, 3/2) & (1, 1, 1) \end{bmatrix}$$

根据公式(6)求出各种VOCs组分对整车VOCs的贡献初始权重.以二甲苯计算为例:

$$S_1 = \sum_{j=1}^n M_{1j} \otimes \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} \right)^{-1} = \frac{(3.02, 3.83, 5.07)}{(25.33, 31.41, 39.12)} = (0.077, 0.122, 0.200) \quad (12)$$

通过式(7)和式(8)去模糊化以及归一化,求得二甲苯对整车VOCs贡献权重为0.125.

同理可求得甲苯、乙苯、甲醛和乙醛对整车VOCs贡献权重分别为0.178、0.099、0.344和0.254.

由此可得,各VOCs组分对整车VOCs贡献的权重向量为:

$$F = (0.125, 0.178, 0.099, 0.344, 0.254)$$

2.3 计算各零部件对整车VOCs贡献的组合权重

根据上述分析计算,得到案例车型车内VOCs溯源各级权重数据如表5所示.

$$P_5 = (0.111, 0.352, 0.213, 0.213, 0.111)$$

2.2 计算各种VOCs组分对整车VOCs的贡献权重

依据整车测定的各VOCs质量浓度值,求其与对应的国标限值的比值,可以得到整车中各VOCs组分的超标倍数,如表4所示.

表4 车内各项VOCs组分的超标倍数表

Tab.4 Exceedance multiples of each VOCs component in the vehicle

VOCs组分	整车测定值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	国标限值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	超标倍数
二甲苯 B_1	2 062	1 500	1.37
甲苯 B_2	1 875	1 100	1.70
乙苯 B_3	198	1 500	0.13
甲醛 B_4	772	100	7.72
乙醛 B_5	182	50	3.64

依据车内各项VOCs指标的超标倍数和表1中三角模糊数语义学定义,计算各种VOCs组分对整车VOCs贡献大小的成对比较矩阵 $A \sim B$.

表5 案例车型车内VOCs溯源各级权重数据表

Tab.5 In-vehicle VOCs traceability weight at all levels in the case model

各层级	二甲苯	甲苯	乙苯	甲醛	乙醛
VOCs组分权重	0.125	0.178	0.099	0.344	0.254
仪表板	0.122	0.346	0.195	0.094	0.111
前排座椅	0.139	0.242	0.163	0.372	0.352
后排座椅	0.139	0.242	0.163	0.274	0.213
地毯	0.171	0.109	0.137	0.169	0.213
顶棚	0.429	0.061	0.342	0.091	0.111

根据式(9)计算获得仪表板对整车VOCs贡献的组合权重为:

$$\omega_1 = \sum_{i=1}^n (p_{1i} \times f_i) \approx 0.157 \quad (13)$$

同理可得前排座椅、后排座椅、地毯和顶棚对整车VOCs贡献的组合权重分别为0.294、0.225、0.166和0.158.组合权向量为:

$$W = (0.157, 0.294, 0.225, 0.166, 0.158)$$

由此可见,前排座椅对整车VOCs贡献度最大,其次是后排座椅,然后是地毯,仪表板和顶棚影响最小.结合表3,不难发现,从零部件到整车的多级VOCs分析溯源体系中,整车VOCs不是某一零部件所含各种VOCs组分质量浓度的简单叠加.表3中VOCs组分质量浓度简单叠加最大值对应的是仪表板和顶棚,但是,当考虑各个零部件中污染物(VOCs)在扩散过程中相互作用后,依据本文提出的零部件-整车车内VOCs多级溯源分析数学方法求解得出的结果是前排座椅对整车VOCs贡献最大.

鉴于溯源分析表明,该款车型的VOCs主要来源是汽车座椅,因此可以考虑针对座椅零部件从材料和工艺上加以改进.在材料选择方面,禁用或少用聚甲醛树脂材料,并开发和使用新型环保型黏合剂/密封胶;座椅发泡工艺中选择环保型发泡剂和反应型胺类催化剂,提高反应率是降低VOCs的主要改善方向.座椅零部件成型之前对原材料进行适当烘烤加热,可以有效释放材料中的VOCs,降低座椅零部件后期使用中的VOCs释放^[30].

3 结论

本文提出了一种从零部件到整车的VOCs多级溯源分析新方法,综合考虑零部件散发VOCs的交互协同效应以及各VOCs组分的危害程度,是一种更为完善精确的车内VOCs溯源分析方法.该方法可以定量计算从零部件到整车的各级组合影响权重,并确定各零部件对整车VOCs的贡献度大小及影响等级次序.

采用所提出的综合零部件-整车VOCs多级溯源分析数学模型与方法开展案例分析得出:案例车型的主要零部件仪表板、前排座椅、后排座椅、地毯及顶棚对整车VOCs的贡献权重分别为0.157、0.294、0.225、0.166、0.158.前排座椅是对整车VOCs贡献度最大的零部件,需要从制造材料和工艺方面进行改进.另外,案例车型中二甲苯、甲苯、乙苯、甲醛及乙醛对整车VOCs的影响权重向量 $F=[0.125, 0.178, 0.099, 0.344, 0.254]$,表明该案例车型中VOCs组分危害程度大小的排序为甲醛>乙醛>甲苯>二甲苯>乙苯.

本文提出的综合零部件-整车的VOCs多级溯源

分析数学模型与方法可望为主机厂和零部件供应商从零部件开展VOCs溯源管控提供理论指导.

参考文献

- [1] FABER J, BRODZIK K. Air quality inside passenger cars [J]. *AIMS Environmental Science*, 2017, 4(1): 112-133.
- [2] 江浩斌,胡子牛,刘擎超,等. 智能网联汽车中心式匝道合流协同控制[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(4): 159-170.
JIANG H B, HU Z N, LIU Q C, *et al.* Centralized coordinated ramp merging control for intelligent and connected vehicles [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(4): 159-170. (In Chinese)
- [3] WANG H M, ZHENG J H, YANG T, *et al.* Predicting the emission characteristics of VOCs in a simulated vehicle cabin environment based on small-scale chamber tests: parameter determination and validation [J]. *Environment International*, 2020, 142: 105817.
- [4] XU H M, FENG R, WANG Z X, *et al.* Environmental and health risks of VOCs in the longest inner-city tunnel in Xi'an, Northwest China: implication of impact from new energy vehicles [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 282: 117057.
- [5] 于艳敏. 整车开发过程中的车内空气质量管控[J]. *汽车工程师*, 2020(5): 11-13.
YU Y M. In-car air quality control during vehicle development [J]. *Auto Engineer*, 2020(5): 11-13. (In Chinese)
- [6] CHEN X K, CHENG H M, LUO H L. Index assessment of airborne VOCs pollution in automobile for transporting passengers [J]. *Huan Jing Ke Xue Huanjing Kexue*, 2013, 34(12): 4599-4604.
- [7] 宋广生. 中国室内环境污染控制理论与实务[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
SONG G S. *Theory and Practice of Indoor Environmental Pollution Control in China* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (In Chinese)
- [8] 费劲,詹忠,李明华,等. 日本车内空气污染的研究状况和测试方法[J]. *汽车工艺与材料*, 2007(3): 67-68.
FEI J, ZHAN Z, LI M H, *et al.* Research Status and Testing Methods of Vehicle Air Pollution in Japan [J]. *Automobile Technology & Material*, 2007(3): 67-68. (In Chinese)
- [9] 葛蕴珊,尤可为. 车内污染物的影响因素和测量技术研究[J]. *科技导报*, 2006, 24(7): 44-47.
GE Y S, YOU K W. Study of the influence factors of in-car air pollution and its measurement technology [J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(7): 44-47. (In Chinese)
- [10] MURZYN F, SIOUTAS C, CAVELLIN L D, *et al.* Assessment of air quality in car cabin in and around Paris from on-board measurements and comparison with 2007 data [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2021, 158: 105822.
- [11] 董长青,刘伟,徐耀宗,等. 行业进步驱动的车内空气质量自

- 适应指数研究[J]. 工程技术与管理, 2019, 3(8): 24-30.
- DONG C Q, LIU W, XU Y Z, *et al.* Research on Air Quality Adaptive Index driven by Industry Progress [J]. *Engineering Technology and Management*, 2019, 3(8): 24-30. (In Chinese)
- [12] YANG S, YANG X D, LICINA D. Emissions of volatile organic compounds from interior materials of vehicles [J]. *Building and Environment*, 2020, 170: 106599.
- [13] 胡懿, 刘丰芹. 城轨车辆内装饰材料对空气质量的影响[J]. 电力机车与城轨车辆, 2019, 42(5): 31-36.
- HU Y, LIU F Q. Influence of interior decoration materials on air quality in urban rail vehicles [J]. *Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles*, 2019, 42(5): 31-36. (In Chinese)
- [14] 梁波, 弥海鹏, 于翔, 等. 汽车内饰件材质类型对 VOCs 释放量的影响研究[J]. 山东化工, 2019, 48(20): 248-251.
- LIANG B, MI H P, YU X, *et al.* Study on the effect of material type of vehicle interior parts on VOCs release [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2019, 48(20): 248-251. (In Chinese)
- [15] LÜ M Q, HUANG W J, RONG X, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in vehicle cabins diffusing from interior materials. Part I: measurements of VOCs in new cars in China [J]. *Building and Environment*, 2020, 175: 106796.
- [16] 徐永新, 桑嫫嫫, 武胜军, 等. 纯电动汽车车内空气质量溯源分析研究[J]. 汽车工艺与材料, 2017(9): 1-6.
- XU Y X, SANG L L, WU S J, *et al.* Research on traceability analysis of air quality inside electric vehicle [J]. *Automobile Technology & Material*, 2017(9): 1-6. (In Chinese)
- [17] 李人哲, 钟源, 关玲玲. 轨道车辆车内空气挥发性有机物溯源研究[J]. 工业安全与环保, 2020, 46(12): 79-83.
- LI R Z, ZHONG Y, GUAN L L. Research on volatile organic compounds source traceability of a railway vehicle indoor air [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2020, 46(12): 79-83. (In Chinese)
- [18] 娄金分, 秦舒浩, 王莉, 等. 汽车地毯材料的挥发性有机物溯源[J]. 塑料工业, 2017, 45(8): 71-75.
- LOU J F, QIN S H, WANG L, *et al.* Study on the tracing of volatile organic compounds in automobile carpet material [J]. *China Plastics Industry*, 2017, 45(8): 71-75. (In Chinese)
- [19] LIANG B, YU X, MI H P, *et al.* Health risk assessment and source apportionment of VOCs inside new vehicle cabins: a case study from Chongqing, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, 10(5): 1677-1684.
- [20] 朱振宇, 王雷, 刘雪峰. 车内挥发性有机物来源解析研究[J]. 汽车实用技术, 2019(21): 208-210.
- ZHU Z Y, WANG L, LIU X F. Study on source analysis of volatile organic compounds in vehicles [J]. *Automobile Applied Technology*, 2019(21): 208-210. (In Chinese)
- [21] LITTLE J C, HODGSON A T, GADGIL A J. Modeling emissions of volatile organic compounds from new carpets [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, 28(2): 227-234.
- [22] XING L Q, WANG L C, ZHANG R. Characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds emitted from interior materials in vehicles: a case study from Nanjing, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(15): 14789-14798.
- [23] 刘丹凤, 江楠, 游刚, 等. 乘用车内挥发性有机物的释放规律[J]. 广东化工, 2020, 47(5): 91-93.
- LIU D F, JIANG N, YOU G, *et al.* Researches on VOCs release in vehicles [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47(5): 91-93. (In Chinese)
- [24] GUO J, LIN Z F, ZU L, *et al.* Failure modes and effects analysis for CO2 transmission pipelines using a hesitant fuzzy VIKOR method [J]. *Soft Computing*, 2019, 23(20): 10321-10338.
- [25] 刘晓悦, 杨伟, 张雪梅. 基于改进层次法与 CRITIC 法的多维云模型岩爆预测[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(2): 118-124.
- LIU X Y, YANG W, ZHANG X M. Rockhurst prediction of multi-dimensional cloud model based on improved hierarchical analytic method and critic method [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(2): 118-124. (In Chinese)
- [26] 杨自厚, 许宝栋, 董颖. 多目标决策方法[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2006.
- YANG Z H, XU B D, DONG Y. *Multi-objective Decision Making Method* [M]. Shenyang: Northeast University Press, 2006. (In Chinese)
- [27] BARZILAI J. Deriving weights from pairwise comparison matrices [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1997, 48(12): 1226-1232.
- [28] CALABRESE A, COSTA R, LEVIALDI N, *et al.* Integrating sustainability into strategic decision-making: a fuzzy AHP method for the selection of relevant sustainability issues [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 139: 155-168.
- [29] 孟超, 袁磊磊, 薛振荣, 等. 零部件 VOC 检测方法的介绍与差异分析[J]. 汽车实用技术, 2019(12): 138-139.
- MENG C, YUAN L L, XUE Z R, *et al.* Parts of VOC detection method and differences are compared [J]. *Automobile Applied Technology*, 2019(12): 138-139. (In Chinese)
- [30] 谢祖峰. 汽车座椅挥发性有机物(VOC)对车内空气质量影响的试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- XIE Z F. Experimental research on car indoor air quality based on volatile organic compounds (VOC) from car seats [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (In Chinese)