

汽车环境风洞降雨模拟影响因素研究

伊虎城¹, 许翔², 牟连嵩¹, 张艺伦¹, 王远¹, 于镒隆¹, 徐俊芳¹

(1. 中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司, 天津 300399;

2. 中汽研(常州)汽车工程研究院有限公司, 江苏 常州 213167)

摘要: **目的** 研究自然界降雨量与汽车环境风洞模拟降雨量之间的关系, 得到中国气象条件的雨量设定经验公式, 为汽车环境风洞模拟降雨量的设定提供理论依据。**方法** 理论分析自然界气象降雨和汽车环境风洞模拟降雨的特点和差异, 研究影响汽车环境风洞模拟降雨量的因素。**结果** 在无风条件下, 影响汽车环境风洞降雨量的因素有气象降雨量、前挡风玻璃倾角、雨滴直径和车速等。按照车速将降雨分为汽车停止和汽车行驶2种模式, 提出结合中国气象条件的汽车环境风洞模拟降雨量的经验公式。**结论** 在相同降雨等级下, 汽车停止状态下的汽车环境风洞降雨量一般大于车辆行驶状态。在气象降雨量等级为短时中雨时, 行驶汽车的雨量设定值与车速呈指数增长关系。

关键词: 中国气候; 汽车环境风洞; 降雨等级; 前挡风玻璃倾角; 雨滴直径; 车速

中图分类号: TJ06

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)02-0132-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.02.018

Influence Factors of Rainfall Simulation Based on Climate Wind Tunnel

YI Hu-cheng¹, XU Xiang², MU Lian-song¹, ZHANG Yi-lun¹, WANG Yuan¹, YU Yi-long¹, XU Jun-fang¹

(1. CATARC (Tianjin) Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300399, China;

2. CATARC (Changzhou) Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Jiangsu Changzhou 213167, China)

ABSTRACT: The work aims to study the relationship between natural rainfall and vehicle climate wind tunnel simulated rainfall, and obtain the empirical formula of rainfall setting in Chinese climate, so as to provide a theoretical basis for the setting of vehicle climate wind tunnel simulated rainfall. The characteristics and differences between natural meteorological rainfall and vehicle climate wind tunnel simulated rainfall were analyzed theoretically, and the factors affecting the vehicle climate wind tunnel simulated rainfall were studied. Under the condition of no wind, the factors affecting the rainfall of vehicle climate wind tunnel included meteorological rainfall, tilt angle of front windshield, raindrop diameter and vehicle speed. According to the vehicle speed, the rainfall was divided into two modes: vehicle stop and driving. An empirical formula for simulating rainfall in vehicle climate wind tunnel combined with Chinese climate was proposed. At the same rainfall grade, the rainfall of vehicle climate wind tunnel during vehicle stop is greater than that during driving. When the meteorological rainfall grade is short-term moderate rain, the rainfall setting value of the driving vehicle increases exponentially with the vehicle speed.

收稿日期: 2022-03-08; 修订日期: 2022-04-12

Received: 2022-03-08; Revised: 2022-04-12

基金项目: 天津市科技支撑重点项目(20YFZCGX00580)

Fund: Tianjin Science and Technology Support Key Project(20YFZCGX00580)

作者简介: 伊虎城(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为热系统控制策略技术。

Biography: YI Hu-cheng (1991-), Male, Master, Engineer, Research focus: thermal system control strategy technology.

引文格式: 伊虎城, 许翔, 牟连嵩, 等. 汽车环境风洞降雨模拟影响因素研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(2): 132-138.

YI Hu-cheng, XU Xiang, MU Lian-song, et al. Influence Factors of Rainfall Simulation Based on Climate Wind Tunnel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(2): 132-138.

KEY WORDS: Chinese climate; climate wind tunnel; rainfall grade; front windshield tilt angle; raindrop diameter; vehicle speed

在降雨条件下, 汽车前风窗玻璃和侧窗玻璃上的雨水会对驾驶员的视野造成影响, 从而影响行车安全^[1-2]。统计表明, 我国 50% 的交通事故、70% 的特大交通事故均发生在雨雾等恶劣天气。因此, 提高车辆在雨天驾驶的安全性非常重要^[3-4]。

国外对于车辆雨水管理的主要研究方向为 A 柱溢流, 通常使用道路试验和汽车环境风洞模拟试验 2 种方式验证^[5-6]。国内对于该部分研究主要集中在仿真和道路试验, 由于自然界降雨的随机和不可控性, 导致汽车道路试验受地区和天气的制约, 从而影响验证周期。汽车环境风洞降雨模拟可以通过设定风速和雨量模拟降雨条件下汽车的行驶工况, 为汽车的降雨安全性开发验证提供了便利, 如何设定汽车环境风洞的模拟降雨量, 国内还没有相关经验或案例可以参考^[7]。

本文以汽车前风窗玻璃降雨量相等为研究基础, 分析中国气象降雨参数, 结合自然气象降雨和汽车环境风洞模拟降雨方式的差异性, 进而分析出汽车环境风洞模拟降雨量的影响因素, 得到结合中国气象条件的汽车环境风洞模拟降雨量设定经验公式, 为汽车环境风洞模拟降雨提供理论基础。

1 气象降雨分析

1.1 气象降雨

降雨是指在大气中冷凝的水汽以不同方式下降到地球表面的天气现象。雨滴形成的条件(如图 1 所示): 地球上的水经蒸发、升华等方式变成水蒸气, 由于水蒸气密度小于空气密度而上升, 遇到高空冷空气后迅速凝聚成小水珠。一方面, 与空气中的灰尘等“核”凝结凝华; 另一方面, 自身的碰撞继续增大,

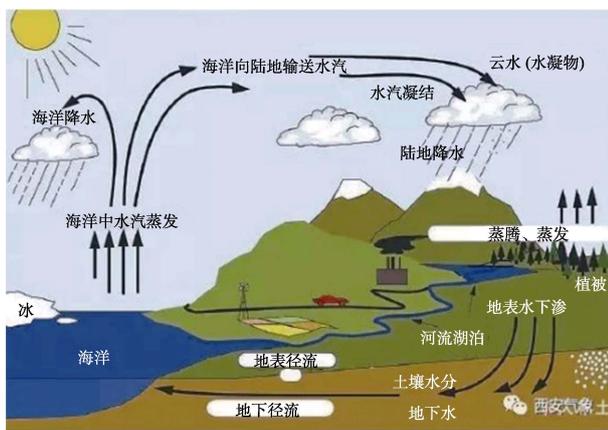


图 1 自然界降雨形成过程
Fig.1 Precipitation formation process in nature

形成雨滴。当云层密度大于空气密度时, 雨滴便成为我们常见的雨水^[8]。

1.2 气象降雨量

降雨量是指某一时段从天空降落到地面未蒸发、渗透流失的雨在水平面上积累的深度。GB/T 28592—2012《降水量等级》^[9]中对降雨量做了明确规定, 可以将降雨量分为: 小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨, 但该标准中是以 12 h 和 24 h 的累计降雨量为分类依据, 不能反映短时降雨效果。本文降雨等级的定义参照标准为 T/CMSA 0013—2019《短时气象服务降雨量等级》^[10], 具体内容见表 1。

表 1 短时气象服务降雨量等级划分
Tab.1 Classification of short-term meteorological service rainfall grades

降雨等级	时段		
	10 min	30 min	1 h
短时小雨	<0.5	<1.0	<2.0
短时中雨	0.5~0.9	1.0~1.9	2.0~3.9
短时大雨	1.0~1.9	2.0~3.9	4.0~7.9
短时暴雨	2.0~4.9	4.0~9.9	8.0~19.9
短时大暴雨	5.0~15.0	10.0~30	20.0~50.0
短时特大暴雨	>15.0	>30.0	>50

由表 1 可得, 该标准规定了 10、30 min 和 1 h 时段的气象降雨量等级。经对比发现, 相同降雨量等级下, 10 min 时段单位时间、单位面积的降雨量最大, 30 min 次之, 1 h 最小。降雨类试验为极限条件测试, 本文选择 10 min 时段对应的降雨等级数据。

假设单位面积收集的降水为 q ($L \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), 其与单位面积 (1 m^2)、收集深度为 h (mm) 和对应的时段 t (min) 之间的关系见式 (1)。

$$q = h \cdot 1 / t \tag{1}$$

将表 1 中 10 min 时段气象降雨量数据按照式(1)进行处理, 结果见表 2。

表 2 10 min 降雨量等级划分
Tab.2 Classification of rainfall grades within 10 min

等级	雨量/ $(L \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$
短时小雨	0~0.5
短时中雨	0.5~
短时大雨	1~1.9
短时暴雨	2~4.9
短时大暴雨	5~15
短时特大暴雨	>15

1.3 雨滴直径

研究表明^[11]，一般情况下，小雨滴（直径≤2.5 mm）近似为球形，大雨滴（直径>5.5 mm）为纺锤形^[12-14]，如图2所示。大雨滴在受到空气阻力作用而呈现扁平形，两侧微微向上弯曲，大雨滴不稳定，极易破碎^[15]。

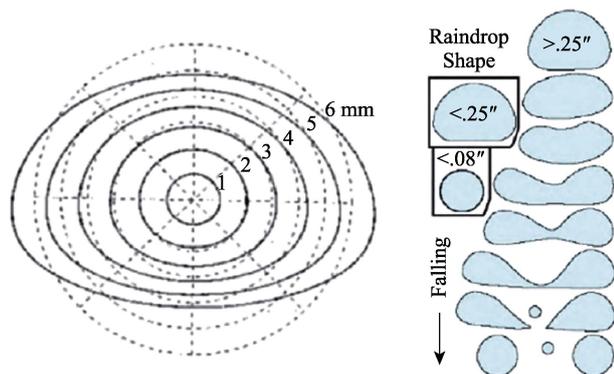


图2 雨滴形状
Fig.2 Raindrop shape

雨滴分布用雨滴累积体积百分曲线来表示，其中累计体积为50%所对应的雨滴直径称为中数直径，用 D_{50} 表示^[16-18]，它与平均雨滴直径的涵义是不同的。通常 D_{50} 越大，表明该降雨越大，反之则该次降雨越小。气象降雨量与 D_{50} 的关系见表3^[19]。

表3 降雨量和 D_{50} 的关系
Tab.3 Relationship between rainfall and D_{50}

降雨量/ (mm·h ⁻¹)	D_{50} /mm	降雨量/ (mm·h ⁻¹)	D_{50} /mm
0.25	0.75~1.00	25.4	2.00~2.25
1.27	1.00~1.25	50.8	2.25~2.75
2.54	1.25~1.50	101.6	2.75~3.00
12.7	1.75~2.00	152.4	3.00~3.25

1.4 雨滴终速

降雨过程中，雨滴受自身重力与空气浮力的双重作用，其中空气的浮力与速度正相关。假设降落过程中雨滴大小不发生变化，当重力大于浮力时，雨滴会持续加速；当重力与浮力相等时，雨滴达到最终速度，即此时雨滴接近于匀速状态。据有关研究^[20-22]表明，当雨滴达到匀速降落时，极限速度分段公式见式（2）—（4）。

$$v_r = 3.843 5 \times d^{0.920 1} \quad 0.5 \text{ mm} < d < 1.5 \text{ mm} \quad (2)$$

$$v_r = 4.625 4 \times \sqrt{d} \quad 1.5 \text{ mm} \leq d \leq 4 \text{ mm} \quad (3)$$

$$v_r = 9 \quad 4 \text{ mm} < d < 6 \text{ mm} \quad (4)$$

式中： d 为雨滴直径，mm； v_r 为雨滴终速，m/s。

2 汽车环境风洞降雨模拟

2.1 汽车环境风洞简介

汽车环境风洞（如图3所示）是模拟自然环境条件的一种高精设备，可以模拟的参数包括温度、湿度、阳光、辐射、道路负载和雨雪等，主要用于车辆的环境适应性验证试验。汽车环境风洞结构主要包括：流道、风机、环境模拟系统、四驱转鼓及控制系统等多个部分^[23]。

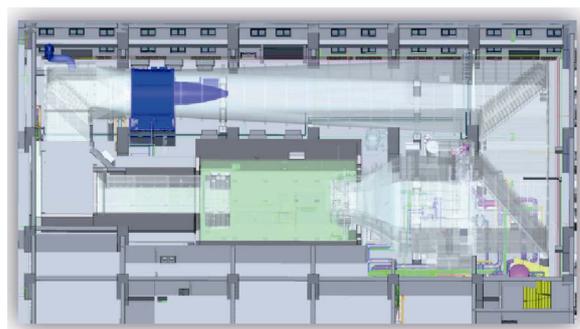


图3 汽车环境风洞结构
Fig.3 Diagram of CWT structure

2.2 汽车环境风洞降雨模拟

汽车环境风洞通过在喷口处安装的雨架喷水来模拟自然界的降雨（如图4所示），且汽车环境风洞喷口的风可以将雨滴加速到一定的初速度。但由于汽车环境风洞的设计条件，雨滴只能以从前往后的形式落到前风窗，与自然界雨滴从上而下的降落方式存在差异^[24-26]。



图4 汽车环境风洞降雨
Fig.4 Diagram of CWT rainfall

影响汽车环境风洞降雨量的因素主要有：气象降雨量、车速、风速、前挡风玻璃倾角和雨滴直径（雨滴终速）等。由于气象降雨中风速的不确定性较大，对结果的分析带来较大难度，本文暂不做深入分析。气象降雨量、雨滴直径可参考相关标准，雨滴终速可通过公式计算，前挡风玻璃倾角为汽车结构参数。因此，本文主要研究在无风条件下车速与汽车环境风洞

模拟降雨量之间的关系。

3 车速对汽车环境风洞模拟降雨影响分析

3.1 汽车静止

对气象降雨进行简化处理, 即汽车处于静止淋雨状态, 雨滴竖直下落, 此时气象降雨和汽车环境风洞降雨效果如图 5 所示。

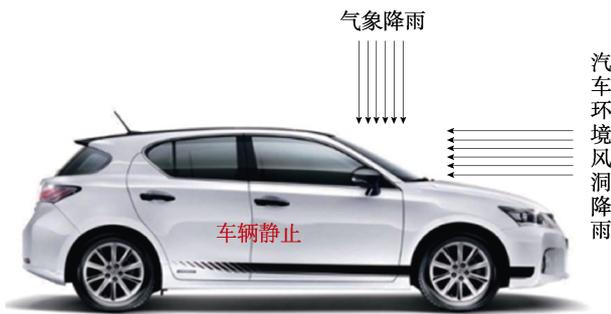


图 5 汽车静止时气象降雨与汽车环境风洞降雨
Fig.5 Natural and CWT rainfall during vehicle stop

本文研究基础为 2 种降雨条件下, 单位时间内落在前风窗玻璃上的雨量保持一致, 如式 (5)、(6) 所示。

$$q_3 \times A = q_1 \times A_1 \quad (5)$$

$$q_3 \times A = q_2 \times A_2 \quad (6)$$

式中: q_3 为单位时间内落到前风窗玻璃单位面积上的降雨量, $L/(\min \cdot m^2)$; A 为前风窗玻璃面积, m^2 ; q_1 为气象降雨条件单位时间内单位面积降雨量, $L/(\min \cdot m^2)$; A_1 前风窗玻璃在水平方向投影面积, m^2 ; q_2 为汽车环境风洞单位时间内单位面积降雨量, $L/(\min \cdot m^2)$; A_2 前风窗玻璃在竖直方向投影面积, m^2 。

对公式 (5) 和 (6) 进行简化合并处理可得:

$$q_1 / q_2 = A_2 / A_1 \quad (7)$$

已知某款车型前风窗总面积为 $A=1.25 \text{ m}^2$, 水平投影面积 $A_1=1.078 \text{ m}^2$, 正投影面积 $A_2=0.617 \text{ m}^2$, 则 $A_2/A_1=0.572 \ 356$ 。前挡风玻璃倾角 $\alpha=29.6^\circ$, $\tan \alpha=0.568 \ 08$, $\tan \alpha \approx A_2/A_1$, 类推可以得到以下结论:

$$A_2 / A_1 = \tan \alpha \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (7) 可得:

$$q_2 = q_1 / \tan \alpha \quad (9)$$

由式 (9) 可知, 当车辆处于静止状态时, 汽车环境风洞模拟降雨量与气象降雨量和前挡风玻璃的倾角 α 有关。

3.2 汽车行驶

汽车行驶状态时, 气象降雨和汽车环境风洞降雨

效果如图 6 所示。



图 6 汽车行驶时气象降雨与汽车环境风洞降雨
Fig.6 Natural and CWT rainfall during vehicle driving

将汽车相对地面静止, 雨滴增加与车速 v 方向相反大小一致的水平速度 v' (如图 7 所示), 时间 t 后收集到的前风窗收集的雨量 Q_1 为:

$$Q_1 = q_1 \times A_1 \times t \quad (10)$$

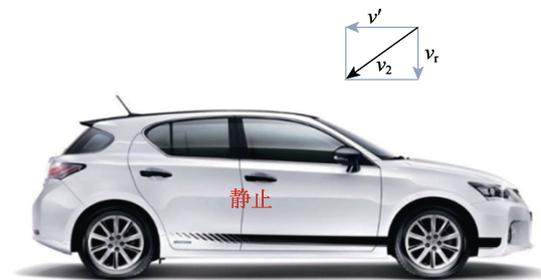


图 7 简化后降雨效果
Fig.7 Rainfall state after simplification

几何处理后, 可得到各角度之间对应关系, 如图 8 所示。

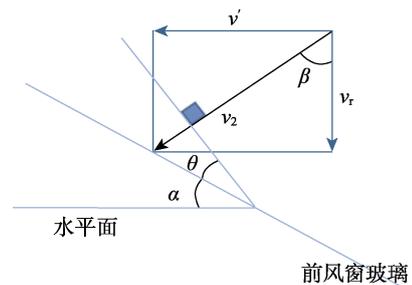


图 8 角度对应关系
Fig.8 Correspondence between angles

其中角度对应关系如下:

$$\theta = \beta - \alpha \quad (11)$$

式中: θ 为车窗玻璃与合速度垂直面夹角; β 为雨滴合速度与雨滴竖直方向的夹角。

综合以上公式, 可得单位时间内气象降雨落到前风窗玻璃上的雨量:

$$q_3 = q_1 \times A \times \cos \theta \quad (12)$$

汽车环境风洞内单位时间内落到前风窗上的雨量为:

$$q_3 = q_2 \times A \times \cos \alpha \quad (13)$$

将公式(12)代入公式(13)可得:

$$q_1 / q_2 = \cos(\beta - \alpha) / \cos \alpha \quad (14)$$

经过三角函数简化可得:

$$q_1 / q_2 = \cos \beta + \tan \alpha \sin \beta \quad (15)$$

由图8可得 β 的值为:

$$\beta = \arctan(v / v_r) \quad (16)$$

将公式(16)代入(15)可得:

$$q_1 / q_2 = \cos[\arctan(v / v_r)] + \tan \alpha \sin[\arctan(v / v_r)] \quad (17)$$

由式(17)可知,当车辆以速度 v 行驶时,汽车环境风洞雨量的气象降雨量 q_1 、车速 v 、雨滴终速 v_r 和前挡风玻璃倾角 α 均有关。

4 结果分析

将上述公式及相关内容进行归纳总结,使用VisualBasic软件对公式及数据进行处理^[27],开发用于计算汽车环境风洞模拟降雨量的软件。在该软件中输入气象降雨量等级、车速、前挡风玻璃倾角和雨滴直径等参数,可以计算出在该条件下的汽车环境风洞需设定的模拟降雨量。

假定某车型前挡风玻璃倾角为 30° ,通过该软件可计算得到汽车环境风洞模拟降雨量随车速和气象降雨量等级的变化,见表4。

由表4可得,当汽车处于静止状态时,气象降雨与汽车环境风洞模拟降雨量随降雨等级的变化曲线如图9所示。由图9可得,随着降雨等级的增加,气象降雨量与汽车环境风洞的模拟降雨量均呈上升趋势,但相比气象降雨量,汽车环境风洞模拟降雨量的上升率更大。在短时特大暴雨时,汽车环境风洞模拟降雨量已经达到了 $120 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。该状态下人员已经不适合继续待在车内,故非必需不建议开展相关的测试工作。

不同气象降雨量等级下的汽车环境风洞模拟降雨量随车速的变化如图10所示。由图10可得,相同降雨等级下,汽车环境风洞模拟降雨量在车辆静止时均高于在低速时的雨量设定。随着车速的增加,雨量呈上升趋势,并且随着降雨等级的增加,降雨量的上升斜率也变大。

为进一步分析降雨量随车速变化趋势,选择短时中雨的气象降雨等级条件,结果如图11所示。由图11可知,随着车速的增加,汽车环境风洞的模拟降雨量上升趋势明显,呈一条较为平滑的曲线。通过拟合求解得到汽车环境风洞模拟降雨量随车速变化的关系,见式(18)。

$$q = 0.7644 \times e^{0.033v} \quad (18)$$

表4 某车型汽车环境风洞降雨量设定参数
Tab.4 Parameters of CWT rainfall for a certain vehicle model

气象降雨量等级	车速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	雨滴直径/mm	汽车环境风洞雨量/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)
短时小雨	0		2.97
	5.56		0.81
	11.11	1.50	1.61
	16.67		3.07
	22.22		6.04
短时中雨	0		5.35
	5.56		1.45
	11.11	1.50	2.90
	16.67		5.52
	22.22		10.87
短时大雨	0		11.29
	5.56		2.76
	11.11	2.00	5.03
	16.67		8.80
	22.22		15.25
短时暴雨	0		29.13
	5.56		6.89
	11.11	2.25	12.14
	16.67		20.68
	22.22		34.61
短时大暴雨	0		89.17
	5.56		19.65
	11.11	3.00	31.98
	16.67		51.35
	22.22		80.36
短时特大暴雨	0		118.89
	5.56		25.74
	11.11	3.25	41.02
	16.67		64.86
	22.22		99.94

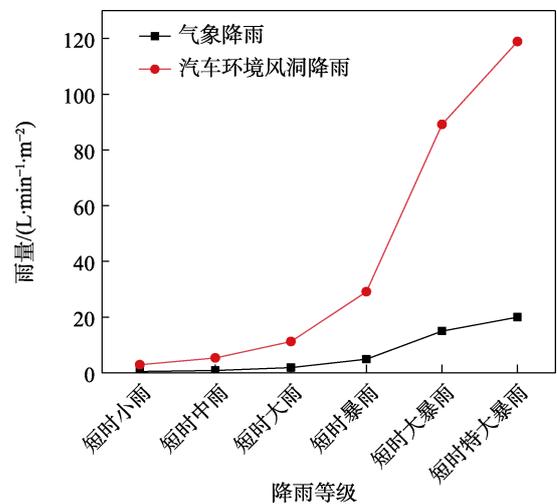


图9 $v=0$ 时降雨量随降雨等级的变化曲线
Fig.9 Variation curve of rainfall with rainfall grade at $v=0$

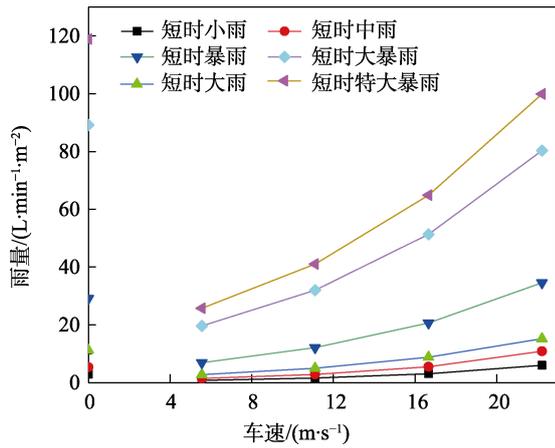


图 10 不同气象雨量等级随车速的变化曲线

Fig.10 Variation curves of different rainfall grades with vehicle speed

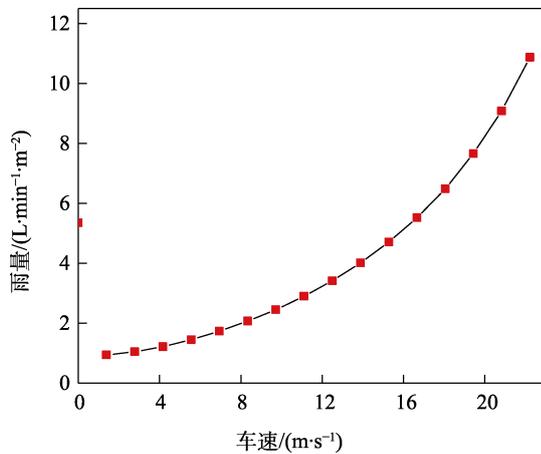


图 11 短时中雨等级降雨量随车速的变化曲线

Fig.11 Variation curve of short-term moderate rainfall with vehicle speed

5 结论

1) 在无风条件下, 影响汽车环境风洞降雨量的因素为降雨等级(气象降雨量)、车速、前挡风玻璃倾角以及雨滴直径等。

2) 按照汽车状态将降雨类型分为静止和运动状态。 $v=0$ 时, 汽车环境风洞模拟降雨量随气象降雨量和汽车前挡风玻璃倾角变化的经验公式见式(9); $v \neq 0$ 时, 汽车环境风洞降雨量随气象降雨量、车速、雨滴直径和前挡风玻璃倾角变化的经验公式见式(17)。

3) 针对某车型进一步分析, $v=0$ 时, 汽车环境风洞模拟降雨量随降雨等级增大而增大, 在短时特大暴雨时, 达到了非常高的 $120 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$; 在同一降雨等级条件下, $v=0$ 时汽车环境风洞降雨量明显高于当 $v \leq 80 \text{ km}/\text{h}$ 时; $v \neq 0$, 降雨等级为短时中雨时, 汽车环境风洞降雨量随车速的变化呈指数关系。

本文研究主要集中在理论研究, 缺乏相应的道路

和汽车环境风洞的对比试验的支撑。为了进一步该理论的有效性, 下一步重点作为道路试验的相关数据的采集方法和相关试验研究。

参考文献:

- [1] 殷硕, 于梦阁, 盛旭高. 降雨环境下车身表面水相分布特性[J/OL]. 机械科学与技术: 1-7[2022-01-25]. http://hit.alljournals.cn/html/hitxb_cn/2017/7/20170718.html. YIN Shuo, YU Meng-ge, SHENG Xu-gao. Body Surface Water Phase Distribution Characteristics of Rainfall Environment[J/OL]. Mechanical Science and Technology: 1-7 [2022-01-25]. http://hit.alljournals.cn/html/hitxb_cn/2017/7/20170718.html.
- [2] GUO Chao, LI Jia-ke, LI Huai-en, et al. Influences of Stormwater Concentration Infiltration on the Heavy Metal Contents of Soil in Rain Gardens[J]. Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2020, 81(5): 1039-1051.
- [3] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报(2011 年度)[R]. 北京: 人民交通出版社, 2012. Traffic Management Bureau of the Ministry of Public Security. Statistical Annual Report of Road Traffic Accidents of the People's Republic of China (2011) [R]. Beijing: People's Communications Press, 2012.
- [4] Study Data from Instituto Militar de Engenharia Update Knowledge of Water Science and Technology (Spatial Diagnosis of Rain Gauges' Distribution and Flood Impacts: Case Study in Itaperuna, Rio de Janeiro-Brazil)[J]. Ecology, Environment & Conservation, 2020.
- [5] JILESEN J, GAYLARD A, SPRUSS I, et al. Advances in Modelling A-Pillar Water Overflow[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2015.
- [6] KABANOV A, GARMORY A, PASSMORE M, et al. Computational Simulations of Unsteady Flow Field and Spray Impingement on a Simplified Automotive Geometry[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 171: 178-195.
- [7] 许翔, 张众杰, 凤蕴, 等. 汽车环境适应性试验综述[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 61-65. XU Xiang, ZHANG Zhong-jie, FENG Yun, et al. Review of Automobile Environmental Worthiness Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 61-65.
- [8] 杨冬甫, 罗兰, 刘纲玲. GJB 150.8A 淋雨试验解读及淋雨试验探讨[J]. 装备环境工程, 2021, 18(7): 22-28. YANG Dong-fu, LUO Lan, LIU Gang-ling. Interpretation and Discussion of GJB 150.8A Rain Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(7): 22-28.
- [9] GB/T 28592—2012 降水量等级[S]. GB/T 28592-2012 Precipitation Level[S].
- [10] T/CMSA 0013—2019, 短时气象服务降雨量等级[S]. T/CMSA 0013 — 2019, Short-Term Meteorological Service Rainfall Grades[S].
- [11] 陈文亮, 王占礼. 人工模拟降雨特性的试验研究[J]. 水

- 土保持通报, 1991, 11(2): 55-62.
- CHEN Wen-liang, WANG Zhan-li. The Trial Research on the Behaviours of Artificial Rainfall by Simulation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1991, 11(2): 55-62.
- [12] 王晓森, 邵康, 陶林, 等. GJB 150A 淋雨试验强化试验程序数值模拟和试验装置设计研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(10): 139-144.
- WANG Xiao-sen, SHAO Kang, TAO Lin, et al. The Study on Numerical Simulation of GJB 150A Rain Test Enhancement Test Procedure and Experimental Device Design[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(10): 139-144.
- [13] 吕宏兴, 武春龙, 熊运章, 等. 雨滴降落速度的数值模拟[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 11(2): 14-21.
- LYU Hong-xing, WU Chun-long, XIONG Yun-zhang, et al. Numerical Modeling on Rain Drops Falling Velocity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 11(2): 14-21.
- [14] 卢会国, 贾宁, 蒋娟萍. 风速对雨滴形状及下落速度的影响研究[J]. 成都信息工程大学学报, 2021, 36(3): 270-274.
- LU Hui-guo, JIA Ning, JIANG Juan-ping. Effects of Wind Speed on Shape and Fall Velocity of Raindrops[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2021, 36(3): 270-274.
- [15] 高德文, 赵昶. 雨滴下落的形状和收尾速度[J]. 物理与工程, 2019, 29(6): 65-70.
- GAO De-wen, ZHAO Chang. The Shape and Terminal Velocity of the Falling Raindrops[J]. Physics and Engineering, 2019, 29(6): 65-70.
- [16] LAWS J O. Measurements of the Fall-Velocity of Water-Drops and Raindrops[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1941, 22(3): 709.
- [17] BLANCHARD D, COOPER J. From Raindrops to Volcanoes[M]. New York: Doubleday, 1967.
- [18] 于梦阁, 刘加利, 李田, 等. 强风雨环境下高速列车运行安全特性[J]. 机械工程学报, 2021, 57(20): 172-180.
- YU Meng-ge, LIU Jia-li, LI Tian, et al. Operational Safety Characteristics of High-Speed Train under Strong Wind and Rainfall Environment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(20): 172-180.
- [19] 王倩, 张琼华, 王晓昌. 国内典型城市降雨径流初期累积特征分析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(6): 1719-1725.
- WANG Qian, ZHANG Qiong-hua, WANG Xiao-chang. Cumulative Characteristics of Runoff Pollutants in Typical Domestic Cities[J]. China Environmental Science, 2015, 35(6): 1719-1725.
- [20] 韩文霆, 曹培, 刘文帅. 人工模拟降雨系统喷头喷洒雨滴特性测试[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 56-61.
- HAN Wen-ting, CAO Pei, LIU Wen-shuai. Raindrop Characteristics of Sprinklers for Artificial Rainfall System[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 56-61.
- [21] 李苏军, 吴玲达. 基于粒子系统的实时雨模拟[J]. 计算机工程, 2007, 33(18): 236-238.
- LI Su-jun, WU Ling-da. Real-Time Simulation of Rain Based on Particle System[J]. Computer Engineering, 2007, 33(18): 236-238.
- [22] 李嵩铿. 雨滴降落和溅落过程的连续闪频高速摄影[J]. 喷灌技术, 1985(4): 58.
- LI Ai-keng. Continuous Flash High-Speed Photography of Raindrops Falling and Splashing[J]. Water Saving Irrigation, 1985(4): 58.
- [23] 王磊, 梁婷, 郭瑞庭, 等. 汽车环境风洞实验室的发展与应用[J]. 科技创新导报, 2020, 17(2): 88-89.
- WANG Lei, LIANG Ting, GUO Rui-ting, et al. Development and Application of Automobile Environment Wind Tunnel Laboratory[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2020, 17(2): 88-89.
- [24] 张艺伦, 牟连嵩, 赵丰. 汽车环境风洞设计概述[J]. 装备环境工程, 2020, 17(8): 17-22.
- ZHANG Yi-lun, MU Lian-song, ZHAO Feng. Introduction to the Design of Automotive CWT[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(8): 17-22.
- [25] 赵丰, 孙津鸿, 牟连嵩, 等. 汽车环境风洞试验能力综述[J]. 装备环境工程, 2021, 18(10): 104-109.
- ZHAO Feng, SUN Jin-hong, MU Lian-song, et al. Introduction for the Test Ability of Automotive CWT[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(10): 104-109.
- [26] 伊虎城, 黄寅, 梅铮, 等. 基于环境风洞的环境仓试验结果偏差研究[J]. 汽车实用技术, 2020, 45(21): 148-151.
- YI Hu-cheng, HUANG Yin, MEI Zheng, et al. The Study on Bias of Chamber Test Results Based on Climatic Wind Tunnel[J]. Automobile Applied Technology, 2020, 45(21): 148-151.
- [27] 范围广. 汽车零部件试验中 VB 的绘制试验结果曲线分析[J]. 科技展望, 2015, 25(24): 55.
- FAN Wei-guang. Drawing Test Result Curve Analysis of VB in Automobile Parts Test[J]. Science and Technology, 2015, 25(24): 55.

责任编辑: 刘世忠