DOI: 10.3901/JME.2020.04.185

强风雨环境下高速列车空气动力学性能研究*

于梦阁^{1,2} 李海庆¹ 刘加利³ 李 田⁴

- (1. 青岛大学机电工程学院 青岛 266071;
2. 青岛大学自动化与电气工程学院系统科学博士后流动站 青岛 266071;
3. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 青岛 266111;
4. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

摘要: 为研究强风雨环境对高速列车空气动力学性能的影响,利用 Lagrangian discrete phase model 模拟雨滴在空气中的运动,并考虑空气与雨滴之间的相互作用,采用相间耦合方法实现强风雨环境模拟。通过开展强风环境下高速列车空气动力学计算及重力作用下的雨滴降落计算,验证计算模型的准确性。在此基础上,开展不同侧偏角、不同降雨强度条件下的高速列车风-雨两相流计算,研究强风雨环境下高速列车的流场特性及气动载荷特性。计算结果表明:当侧偏角相同时,随着降雨强度的增加,受雨滴撞击的影响,头车迎风侧的正压有所增大,头车背风侧的负压有所增大,列车横向气动性能恶化。强风雨环境下,气动载荷系数随着侧偏角和降雨强度的增加而增大,且近似与降雨强度成线性关系。当侧偏角相同时,气动载荷系数增加百分比随着降雨强度的增加而增大;当降雨强度相同时,气动载荷系数增加百分比随着侧偏角的增加而减小。强风雨环境下,高速列车气动载荷系数可以近似拟合为关于侧偏角和降雨强度的二次多项式,且降雨强度的二次项可以忽略不计。

关键词: 高速列车; 降雨强度; 气动性能; 离散相; 侧偏角

中图分类号: U270

Study on the Aerodynamic Performance of the High-speed Train under Strong Wind and Rainfall Environment

YU Mengge^{1,2} LI Haiqing¹ LIU Jiali³ LI Tian⁴

- (1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071;
2. Postdoctoral Research Station of System Science, College of Automation and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071;
3. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111;
4. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: In order to study the influence of the strong wind and rainfall environment on the aerodynamic performance of the high-speed train, the Lagrangian discrete phase model is used to simulate the movement of the raindrop in the air. The interaction between the air and raindrop is considered, and the phase-to-phase coupling method is used to simulate the strong wind and rainfall environment. Through performing the aerodynamic calculation of a high-speed train under strong wind and the raindrop landing calculation due to the gravity force, the accuracy of the computational model is verified. On this basis, the wind-rain two phase flow computation of the high-speed train under different yaw angles and rainfall intensities is carried out, and the flow field characteristics and aerodynamic characteristics of high-speed trains under strong wind and rainfall environment are studied. Computational results show that, for the same yaw angle, with the increase of the rainfall intensity, the positive pressure on the windward of the head car increases, and the negative pressure on the leeward of the head car increases due to the impact of the raindrops, leading to the deterioration of the lateral aerodynamic performance of the train. Under strong wind and rain conditions, the aerodynamic load coefficients increase with the increase of the yaw angle and rainfall intensity, and follow a linear relationship with the rainfall intensity. For the same yaw angle, the increased percent of the aerodynamic load coefficient increases with the increase of the rainfall intensity. For the same rainfall intensity, the increased percent of the aerodynamic load coefficient decreases with the increase of the yaw

* 国家自然科学基金(51705267, 51605397)和中国博士后科学基金(2018M630750)资助项目。20190228 收到初稿, 20191020 收到修改稿

angle. The aerodynamic load coefficient of the train can be approximated as a quadratic polynomial with respect to the yaw angle and rainfall intensity, and the squared term of the rainfall intensity can be ignored.

Key words: high-speed train; rainfall intensity; aerodynamic performance; discrete phase; yaw angle

0 前言

随着世界高速铁路的快速发展及列车运行速度的不断提高,作用于列车上的气动力和气动力矩不断增大^[1-2],制约着高速列车的进一步提速,并对列车的运行安全产生影响。近年来,高速列车的空气动力学性能越来越受到重视。我国幅员辽阔,气候环境多变,高速列车在运行过程中不可避免地会遇到强侧风、强风雨、强风沙等恶劣气候条件,恶劣气候条件使得高速列车的空气动力学性能进一步恶化,严重威胁高速列车的运行安全性,并有可能引发高速列车脱轨或倾覆事故^[3-4]。因强侧风导致的行车安全事故在各国时有发生。近年来,针对强侧风对高速列车气动性能及运行安全的影响,各国学者已经开展了大量的研究工作^[5-8]。我国《中长期铁路网规划》中的“八纵八横”高速铁路大部分处于季风区,东南沿海地区更是处于强台风影响区域,而强季风和强台风往往都伴随着强降雨。雨滴在降落过程中,因受强风的作用,会在水平方向产生速度分量,对列车产生冲击作用,形成气流、雨滴与列车之间复杂的耦合作用,使得高速列车的气动性能进一步恶化。强风雨环境本质上为气-液两相流流动,目前常用的数值模拟方法包括 Euler-Lagrange 方法和 Euler-Euler 方法。二者对空气的建模均采用 Euler 方法,即采用 Navier-Stokes 方程描述空气的流动,其主要差异在于离散相雨滴的建模方法。Lagrange 方法将雨滴视为离散颗粒,建立雨滴的运动方程,追踪雨滴的运动轨迹^[9-10]; Euler 方法将雨滴视为连续流体(离散颗粒相质心距离与空间特征尺寸的比值小于 0.01),建立雨滴的流动控制方程,模拟雨滴的流动特性^[11]。有关强风雨对高速列车气动性能及运行安全特性的影响,已有一些初步的研究成果。NESTOR 等^[12-14]采用 Euler-Euler 方法研究了强风雨下高速列车的气动特性,发现降雨使列车的侧力和倾覆力矩增加;张淼等^[15-17]采用 Euler-Lagrange 方法研究强风雨对高速列车气动特性的影响,发现相对于强风环境,强风雨环境下列车的阻力、升力及倾覆力矩均有不同程度的增大。

由以上分析可知,目前强风雨对高速列车空气动力学特性的研究尚处于起步阶段,以往的研究工作所采用的列车模型较为简单,忽略了转向架、风

挡等可能会对列车周围流场产生影响的局部结构,且并未详细分析降雨强度和侧偏角对气动载荷系数的影响特性,亟需建立较为精确的计算模型,并系统地研究强风雨对高速列车空气动力学性能的影响。基于此,本文采用 Euler-Lagrange 方法建立强风雨环境下高速列车空气动力学计算模型,并对计算模型进行验证。在此基础上,开展强风雨环境下高速列车空气动力学性能计算,研究侧偏角、降雨强度对高速列车空气动力学性能的影响。

1 计算方法

强风雨环境在本质上为气液两相流流动,且离散相雨滴的体积分数通常远低于 10%^[18],因此,可以采用 Euler-Lagrange 方法进行模拟。空气的建模采用 Euler 方法,即采用 Navier-Stokes 方程描述空气的流动。高速列车流场是典型的湍流流场,湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型^[19]。离散相雨滴的建模采用 Lagrange 方法,假设雨滴为轴对称的圆球形,且雨滴在降落过程中是独立的,无蒸发,无水凝聚,也无碰撞现象,采用 Lagrangian discrete phase model 对雨滴降落过程进行模拟^[20]。

采用 Euler-Lagrange 方法进行强风雨环境模拟时,一般有两种途径:一种是不考虑雨滴对空气流动的影响(即非耦合),一种是考虑雨滴对空气流动的影响(即相间耦合)。本文采用相间耦合方法进行强风雨环境模拟。空气与雨滴之间的动量交换主要是由相间阻力引起的。离散相雨滴对空气流动的影响主要是通过动量源项引入到动量方程中^[20]。

描述降雨环境特性的主要参数包括降雨强度、雨滴谱、雨滴降落末速度、体积分数等。通常情况下,采用降雨强度来描述降雨的宏观特征量,采用雨滴谱来描述降雨的微观特征量。Best 总结雷达观测数据得到了降雨过程中雨滴尺寸的分布及其与降雨强度的关系,提出雨滴谱经验公式^[18]

$$\begin{cases} F(d_p) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d_p}{AI^p}\right)^n\right] \\ W = BI^q \end{cases} \quad (1)$$

式中, d_p 为雨滴直径; $F(d_p)$ 为总体积中直径不大于 d_p 的雨滴所占百分数(%); I 为降雨强度; W 为单位体积空气中雨滴的总体积; n 为雨型常数; A 、 B 、 p 、

q 为经验系数, 各参数的取值如下: $n=2.25$; $A=1.30$; $B=67$; $p=0.232$; $q=0.846$ 。

考虑计算效率, 本文采用均一粒径, 即选取一定降雨强度下雨滴数量最多的粒径值作为该降雨强度下的代表粒径, 根据 Best 的研究, 该代表粒径值可以通过式(2)计算^[18]

$$d_p = AI^p \left(\frac{n-1}{n} \right)^{1/n} \quad (2)$$

强风雨环境数值模拟时, 雨滴由计算区域顶端进入计算区域, 故需要计算雨滴降落末速度。雨滴在重力和空气阻力的共同作用下运动, 随着雨滴降落速度不断变大, 雨滴所受到的空气阻力也变大, 当雨滴的重力和空气阻力达到平衡时, 雨滴匀速下降, 此时雨滴的降落速度称为雨滴降落末速度。雨滴直径不同, 其降落末速度也不同。雨滴降落末速度可以通过式(3)计算^[21]

$$V_p = 9.58 \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{10^3 d_p}{1.77} \right)^{1.147} \right) \right) \quad (3)$$

式中, V_p 为雨滴降落末速度。

2 计算模型

借用某 CRH 型动车组的几何外形, 建立高速列车三维几何模型, 考虑了转向架和风挡等主要结构。与以往的单相流场相比, 多相流场计算复杂性加大, 计算量增大, 因此为简化计算量, 并考虑到高速列车头车的横风气动性能最为恶劣^[7], 本文中的高速列车模型采用 1.5 车编组, 这类模型在 EN 14067-6 2010 标准中广泛采用^[22]。计算区域如图 1 所示, 其中计算区域的长度为 600 m, 宽度为 240 m, 高度为 20 m, 车底与地面之间的距离为 0.376 m。

图 1 计算区域(m)

在强风雨环境模拟时, 雨滴由计算区域顶端进入计算区域。计算区域顶端设置为入射面。为准确模拟降雨特性, 入射面上需给定雨滴粒径、雨滴降

落末速度和雨滴质量流量。当给定降雨强度时, 由式(2)计算雨滴粒径, 再由式(3)计算雨滴降落末速度。雨滴质量流量则由入射面面积和式(1)计算得到。

雨滴进入计算区域后, 受入口风速的作用, 雨滴水平方向的速度将接近入口风速^[23]。为保证雨滴能降落到车体表面, 列车前方的计算区域应足够长。本文计算时, 合成风速为 70 m/s, 降雨强度范围为 100~500 mm/h, 由此可以获得入口风速与雨滴降落末速度之间的关系, 通过分析, 确定列车到计算区域前端速度入口之间的距离为 360 m, 列车纵向对称面与计算区域侧面风速入口之间的距离为 160 m, 以保证由计算区域顶端进入的雨滴能够降落到车体表面。

采用混合网格法对计算区域进行网格划分, 列车表面网格采用三角形网格, 空间网格采用四面体网格。车体表面最大网格尺寸为 100 mm, 转向架和风挡表面最大网格尺寸为 50 mm。车体、转向架及风挡表面均设置边界层, 边界层首层厚度为 1 mm, 增长比为 1.2, 总层数为 6 层。计算网格总量约 1 000 万。图 2 给出流线型头型及转向架表面计算网格, 在曲率变化较大的地方对网格进行局部加密。

(a) 流线型头型表面网格

(b) 转向架表面网格

图 2 计算网格

连续相的边界条件设置如下: 沿列车运行方向看, 计算区域前端及右侧设置为速度入口边界条件, 入口速度采用合成风速, 计算区域后端及左侧设置为压力出口边界条件, 计算区域顶端设置为对称边

界条件, 计算区域底端设置为壁面边界条件。

离散相雨滴的边界条件设置如下: 车体表面设置为 wall-film 边界条件, 认为离散相雨滴在与车体表面碰撞后破碎成小液滴并在车体表面形成壁膜, 其中雨滴碰撞计算选用 Stanton-Rutland 模型; 计算区域入口及出口均设置为 escape 边界条件, 认为离散相雨滴穿过计算区域而逃逸(雨滴的运动轨迹也在此处终止计算); 计算区域底端设置为 trap 边界条件, 认为离散相雨滴在壁面处被捕集而终止雨滴运动轨迹的计算。

强风雨环境下高速列车的气动性能可以通过侧力系数、升力系数及倾覆力矩系数进行评估, 其表达式为

$$C_{F_s} = \frac{F_s}{0.5\rho Au^2} \quad (4)$$

$$C_{F_l} = \frac{F_l}{0.5\rho Au^2} \quad (5)$$

$$C_{M_r} = \frac{M_r}{0.5\rho Ahu^2} \quad (6)$$

式中, C_{F_s} 为侧力系数; F_s 为侧力; C_{F_l} 为升力系数; F_l 为升力; C_{M_r} 为倾覆力矩系数; M_r 为倾覆力矩; u 为合成风速, $u = \sqrt{v^2 + w^2}$; v 为列车速度, w 为风速; A 为参考面积, 取为车体断面面积, $A = 11.19 \text{ m}^2$; h 为参考长度, 取为车体断面高度, $h = 3.7 \text{ m}$ 。

3 计算验证

由于强风雨环境下高速列车的实车试验及风洞试验开展难度较大, 且目前尚无公开的试验数据发表。本文分别对强风环境下高速列车空气动力学计算模型的准确度和重力作用下雨滴降落模拟的可靠性进行验证。

3.1 列车空气动力学计算验证

为验证高速列车空气动力学计算模型的准确性, 开展强风环境下高速列车空气动力学数值计算, 并将数值计算结果与风洞试验结果^[24]进行对比。图 3 给出不同侧偏角下头车侧力系数的计算值与试验值的对比。由图 3 可以看出, 数值计算结果与风洞试验结果非常接近, 误差在 3% 以内, 可以满足工程计算精度要求。

3.2 雨滴降落计算验证

雨滴在降落过程中, 受重力和空气阻力的作用, 最终匀速下降。文献[21]通过对试验结果进行分析, 得到不同粒径下的雨滴降落末速度公式。为了验证

图 3 气动侧力系数对比

本文 Lagrangian discrete phase model 模拟强风雨环境的可靠性, 选取不同粒径(0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm、3.0 mm)的雨滴, 计算雨滴在重力和空气阻力作用下的运动, 获得不同粒径雨滴的降落末速度, 并与文献[21]进行对比, 如图 4 所示。由图 4 可以看出, 当雨滴粒径较小时, 雨滴降落末速度的计算值与试验值相差很小。随着雨滴粒径的增大, 计算值与试验值的差异增大。当雨滴粒径为 3.0 mm 时, 计算值偏大 0.58 m/s, 这主要是由于计算时将雨滴假设为球形, 而实际中, 当雨滴粒径较小时, 雨滴接近于球形, 随着雨滴粒径的增加, 雨滴开始变为纺锤形, 导致计算误差偏大。

图 4 雨滴降落末速度对比

综合而言, 本文建立的强风雨环境下高速列车空气动力学计算模型具有较好的准确性和可靠性。

4 结果分析

本文采用商业软件 ANSYS FLUENT 进行强风雨环境下高速列车气动性能计算。数值计算时, 降雨强度分别取 0 mm/h、100 mm/h、200 mm/h、300 mm/h、400 mm/h、500 mm/h, 侧偏角分别取 5°、10°、15°、

20°、25°、30°, 合成风速取 70 m/s。通过开展不同降雨强度、不同侧偏角条件下的列车空气动力学数值计算, 研究强风雨环境下高速列车的空气动力学性能。

图 5 给出强风雨环境下列车周围三维绕流场中的雨滴运动规律。由图 5 可以看出, 整个列车车身都处于降雨区域内, 本文计算区域的选取是合适的。雨滴颗粒在进入计算区域之后, 不仅受到自身的重力作用以一定的速度降落, 同时还受到计算区域入口风速的影响, 形成“风驱雨”现象, 雨滴会产生一定的水平速度, 雨滴水平速度近似为计算区域入口风速。由图 5 还可以看出, 部分雨滴在与列车碰撞后会破碎成小雨滴, 改变运行方向, 并随来流风速一起运动。

图 5 雨滴运动轨迹

图 6 给出侧偏角为 20° 时, 不同降雨强度条件下距离头车尾端 10 m 处横截面上的流场压力分布及流线。由图 6 可以看出, 不同降雨强度条件下的流场压力分布及流线变化较为相似。随着降雨强度的增加, 迎风侧的正压区域明显增大, 背风侧漩涡中心的负压值变大, 由此将导致列车侧力及倾覆力

矩增大, 列车横向气动性能变得更为恶劣。

图 6 横截面上的流场压力分布及流线(Pa)

图 7 给出头车侧力系数、升力系数及倾覆力矩系数随降雨强度及侧偏角的变化规律, 其中倾覆力矩的矩点为背风侧轨顶。由图 7 可以看出, 当侧偏角相同时, 侧力系数、升力系数及倾覆力矩系数都随着降雨强度的增加而增大, 且近似与降雨强度成线性关系。当降雨强度相同时, 侧力系数、升力系数、倾覆力矩系数都随着侧偏角的增大而增大。侧偏角对气动载荷系数的影响非常显著, 而降雨强度对气动载荷系数的影响相对较小, 这主要是由于离散相雨滴所占的体积分数非常小, 雨滴对列车的作用小于空气对列车的作用。

图 8 给出不同降雨强度及侧偏角下, 强风雨环境下的侧力系数、升力系数及倾覆力矩系数相对于强风无降雨环境的增加百分比。

由图 8 可以看出, 当侧偏角相同时, 侧力系数增加百分比、升力系数增加百分比、倾覆力矩系数增加百分比都随着降雨强度的增加而近似线性增大; 当降雨强度相同时, 侧力系数增加百分比、升力系数增加百分比、倾覆力矩系数增加百分比都随着侧偏角的增加而减小, 这说明随着侧偏角的增加, 由降雨强度引起的侧力、升力、倾覆力矩在总侧力、升力、倾覆力矩中所占的比重逐渐降低。

利用二次多项式函数建立侧力系数与侧偏角和降雨强度的关系, 其表达式为

$$C_{Fs} = a_0 + a_1\beta + a_2I + a_3\beta^2 + a_4I^2 + a_5\beta I \quad (7)$$

式中, β 表示侧偏角, a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 为待定系数。

利用最小二乘法进行拟合, 可得拟合公式为

$$C_{Fs} = -3.034 \times 10^{-3} + 7.257 \times 10^{-2} \beta +$$

$$1.0710 \times 10^{-4} I + 1.2007 \times 10^{-3} \beta^2 - 6.6887 \times 10^{-8} I^2 + 5.6575 \times 10^{-6} \beta I \quad (8)$$

图7 气动载荷系数随降雨强度及侧偏角的变化规律

此拟合公式的相关系数为 0.999, 二次多项式具有非常好的拟合效果。

去除相关性最差的一项, 可得拟合公式为

$$C_{F_s} = -8.0481 \times 10^{-4} + 7.2573 \times 10^{-2} \beta + 7.3654 \times 10^{-5} I + 1.2007 \times 10^{-3} \beta^2 +$$

$$5.6575 \times 10^{-6} \beta I \quad (9)$$

图8 气动载荷系数增加百分比

此拟合公式的相关系数为 0.999, 具有非常好的拟合效果。去除的项为 I^2 , 这说明侧力系数基本上不受 I^2 的影响。

再去除相关性最差的一项, 可得拟合公式为

$$C_{F_s} = 1.7609 \times 10^{-2} + 7.1723 \times 10^{-2} \beta + 1.2007 \times 10^{-3} \beta^2 + 9.0569 \times 10^{-6} \beta I \quad (10)$$

此拟合公式的相关系数为 0.998, 去除的项为 I 。从相关系数来看, 拟合公式仍具有非常好的拟合效果, 但此时常数项 a_0 的数值变大, 在无风无雨环境下, 列车的侧力系数应接近于零。

综合分析, 本文采用式(9)建立侧力系数与侧偏角和降雨强度之间的关系。侧力系数可以近似拟合为关于侧偏角和降雨强度的二次多项式, 且降雨强度的二次项可以忽略不计。

利用相同的方法建立升力系数与侧偏角和降雨强度的关系, 通过分析, 相关性最差的一项仍为 I^2 , 拟合公式为

$$C_{F_l} = -4.439\ 0 \times 10^{-1} + 6.379\ 5 \times 10^{-2} \beta + 2.973\ 8 \times 10^{-5} I + 1.758\ 9 \times 10^{-3} \beta^2 + 6.581\ 5 \times 10^{-6} \beta I \quad (11)$$

此拟合公式的相关系数为 0.998, 具有非常好的拟合效果。

利用相同的方法建立倾覆力矩系数与侧偏角和降雨强度的关系, 通过分析, 相关性最差的一项仍为 I^2 , 拟合公式为

$$C_{M_r} = 9.989\ 8 \times 10^{-2} - 4.213\ 4 \times 10^{-2} \beta - 3.452\ 3 \times 10^{-5} I - 9.153\ 1 \times 10^{-4} \beta^2 - 3.830\ 4 \times 10^{-6} \beta I \quad (12)$$

此拟合公式的相关系数为 0.999, 具有非常好的拟合效果。

需要注意的是本文给出的侧力系数、升力系数及倾覆力矩系数关于侧偏角和降雨强度的拟合多项式, 只是针对合成风速 70 m/s 的情况。对于强侧风环境, 气动载荷系数主要由侧偏角决定, 而与合成风速基本无关。然而, 对于强风雨环境, 合成风速对气动载荷系数有无影响, 还需要进一步研究。

5 结论

(1) 利用 Lagrangian discrete phase model 模拟雨滴在空气中的运动, 并考虑空气与雨滴之间的相互作用, 采用相间耦合方法实现强风雨环境的模拟。

(2) 当侧偏角相同时, 随着降雨强度的增加, 头车迎风侧的正压有所增大, 头车背风侧的负压有所增大。考虑降雨以后, 列车侧力和倾覆力矩均会增大, 列车横向气动性能变得更为恶劣。

(3) 强风雨环境下, 气动载荷系数主要受侧偏角的影响, 降雨强度的影响相对较小。当侧偏角相同时, 气动载荷系数随着降雨强度的增加而增大, 且近似与降雨强度成线性关系。

(4) 当侧偏角相同时, 气动载荷系数增加百分比随着降雨强度的增加而增大; 当降雨强度相同时, 气动载荷系数增加百分比随着侧偏角的增加而减小。

(5) 强风雨环境下, 高速列车气动载荷系数可以近似拟合为关于侧偏角和降雨强度的二次多项式, 且降雨强度的二次项可以忽略不计。

参 考 文 献

- [1] SCHETA J A. Aerodynamics of high-speed trains[J]. Annual Review Fluid Mechanics, 2001, 33: 371-414.
- [2] BAKER C. The flow around high speed trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(6-7): 277-298.
- [3] 王政, 李田, 张继业. 不同类型横风下高速列车气动性能研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 203-211.
WANG Zheng, LI Tian, ZHANG Jiye. Research on aerodynamic performance of high-speed train subjected to different types of crosswind[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 203-211.
- [4] 于梦阁, 张骞, 刘加利, 等. 随机风环境下高速列车运行安全评估研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 245-254.
YU Mengge, ZHANG Qian, LIU Jiali, et al. Study on the operational safety evaluation of the high-speed train exposed to stochastic winds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 245-254.
- [5] DORIGATTI F, STERLING M, BAKER C J, et al. Crosswind effects on the stability of a model passenger train - A comparison of static and moving experiments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 138: 36-51.
- [6] KIKUCHI K, SUZUKI M. Study of aerodynamic coefficients used to estimate critical wind speed for vehicle overturning[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 147: 1-17.
- [7] 郗艳红, 毛军, 高亮, 等. 横风作用下高速列车安全运行速度限值的研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 8-14.
XI Yanhong, MAO Jun, GAO Liang, et al. Research on the limited safe speed of a high-speed train under cross wind[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(6): 8-14.
- [8] BAKER C. A framework for the consideration of the effects of crosswinds on trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 123: 130-142.
- [9] VALENTINE J R, DECKER R A. A Lagrangian-Eulerian scheme for flow around an airfoil in rain[J]. International

- Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(4): 639-648.
- [10] WU Z L, CAO Y H. Numerical simulation of flow over an airfoil in heavy rain via a two-way coupled Eulerian-Lagrangian approach[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 69: 81-92.
- [11] HUANG S H, LI Q S. Numerical simulations of wind-driven rain on building envelopes based on Eulerian multiphase model[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98: 843-857.
- [12] NESTOR D M. 横风大雨对高速列车绕流的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- NESTOR D M. Influence of the crosswind and heavy rain on the flow around a high-speed train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [13] 岳煜斐, 曾秋兰, 李振山, 等. 挟雨风对高速列车气动特性及运行稳定性影响的数值模拟[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 943-950.
- YUE Yufei, ZENG Qiulan, LI Zhenshan, et al. Numerical simulating effects of rain-loaded wind on the aerodynamic characteristics and running stability of high-speed trains[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 943-950.
- [14] SHAO X M, WAN J, CHEN D W, et al. Aerodynamic modeling and stability analysis of a high-speed train under strong rain and crosswind conditions[J]. Journal of Zhejiang University - Science A (Applied Physics & Engineering), 2011, 12(12): 964-970.
- [15] 张淼. 基于颗粒轨道模型的高速列车多相流数值模拟和分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- ZHANG Miao. Numerical simulation and analysis of high-speed train in multiphase flow based on Lagrangian-Eulerian scheme[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [16] 敬俊娥, 高广军. 风雨联合作用下高速列车受力数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(3): 99-102.
- JING June, GAO Guangjun. Simulation of the action effect of wind-drive rain on high-speed train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(3): 99-102.
- [17] 倪守隆. 风雨与沙尘环境下列车运行安全性研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2015.
- NI Shoulong. Study on the running safety of train under rain and sandstorm conditions[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2015.
- [18] BEST A C. The size distribution of raindrops[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1950, 76(32): 16-36.
- [19] COHAN A C, ARASTOOPOUR H. Numerical simulation and analysis of the effect of rain and surface property on wind-turbine airfoil performance[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 81: 46-53.
- [20] WU Zhenlong, CAO Yihua. Numerical simulation of flow over an airfoil in heavy rain via a two-way coupled Eulerian-Lagrangian approach[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 69: 81-92.
- [21] MARKOWITZ A H. Raindrop size distribution expressions[J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15: 1029-1031.
- [22] EN 14067-6. Railway applications-aerodynamics-part 6: Requirements and test procedures for cross wind assessment[S]. CEN, Brussels, 2010.
- [23] CHOI E C C. Wind-drive rain and driving rain coefficient during thunderstorms and non-thunderstorms[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(3): 293-308.
- [24] 张在中, 周丹. 不同头部外形高速列车气动性能风洞试验研究[J]. 中南大学学报, 2013, 44(6): 2603-2608.
- ZHANG Zaizhong, ZHOU Dan. Wind tunnel experiment on aerodynamic characteristic of streamline head of high-speed train with different head shapes[J]. Journal of Central South University, 2013, 44(6): 2603-2608.

作者简介: 于梦阁(通信作者), 女, 1985 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为车辆空气动力学, 车辆系统动力学。
E-mail: yumengge0627@163.com