

侧风对高速动车组运行安全性的影响研究

刘帅,梁树林,罗赞,王欢声,池茂儒

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室,四川成都610031)

摘要:将列车空气动力学和多体动力学理论相结合,利用SIMPACK软件建立国内某时速400 km中国标准化动车组的动力学模型。介绍考虑侧风作用下的车辆动力学仿真计算方法,通过此方法较为全面地研究在“中国帽”侧风风载下,不同风速和车速下的列车运行安全性问题,为特殊风环境下高速动车组的安全运行速度提供理论依据。研究表明:侧风风速越高,列车受到的气动载荷越大,列车的最高安全运行速度越低,因此在车辆通过强风区时,需要采取限速、停运等安全措施。

关键词:高速列车;侧风安全性;评价指标;最高安全速度;SIMPACK

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)06-0173-04

Research on Effect of Side Wind on Operational Safety of High-speed Rolling Stock

LIU Shuai, LIANG Shulin, LUO Yun, WANG Huansheng, CHI Maoru

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: By combining train aerodynamics with multi-body dynamics theory and applying SIMPACK software, designs a dynamics model of a domestic OEM of 400 km/h Chinese standardized rolling stock. The simulation method of vehicle dynamics under the consideration of side wind is introduced, by which the safety of train operation under different wind speeds and vehicle speeds is studied more comprehensively under the "Chinese cap" side wind load, which provides a theoretical basis for determining the safe operation speed of high-speed rolling stock in special wind environment. The study shows that the higher the side wind speed, the greater the aerodynamic load on the train, and the lower the maximum safe operating speed of the train. Therefore, it is of necessity to take safety measures such as speed limit and stopping when the vehicle passes through the strong wind area.

Keywords: high-speed train; side-wind safety; evaluation index; maximum safe speed; SIMPACK

0 引言

早在20世纪70年代,国外学者就开始研究侧风对轨道车辆运行性能的影响,研究表明,空气动力对车辆系统动力学有着明显的影响^[1-2]。我国的高速铁路建设起步相对较晚,近些年来随着科学技术的不断发展,我国的高铁建设取得了举世瞩目的成就。不断创造奇迹和惊喜,是中国高铁给人们留下的最深刻印象。然而我国幅员辽阔、地势复杂,铁路线路经常会位于特大桥梁、高架桥、路堤、丘陵、山区风口地段以及导致侧向气动力与离心力叠加的曲线线路等风力较大的区域,在这些区域列车流场明显改变,导致列车掉轨、翻车的可能性大大增加,严重危及车辆的运行安全^[3-5]。

王璐雷等^[6]介绍了3种强侧风监测以及控制系统,重点研究了强侧风对高速列车运行安全性的影响。研究表明在强侧风的作用下,随着高速列车运行速度的增加,列车的动力学性能也会变得越来越差,在危险的情况下,有必要采取减速甚至停车等措施来保障安全。田红旗等^[7]通过对高速列车气动力性能研究发现,当轨道车辆

在恶劣风的工况下运行时,会对列车运行的稳定性以及舒适性产生非常严重的影响。公衍军等^[8]基于多体动力学软件Simpack建立某高速动车组的动力学模型,介绍了侧风安全性的计算方法,并详细分析了侧风对列车运行安全性的影响规律,明确指出由于铁道车辆轮轨匹配关系的特殊性,导致列车在运行时侧风对其动力学性能的影响很大。因此,在车辆的设计阶段,将侧风影响予以考虑是一个不可或缺环节。

本文以我国某时速400 km中国标准化动车组为研究对象,参照高速列车运行安全性相关限定标准,对其侧风安全性进行计算分析,提出不同侧风风速下高速列车的最高安全运行速度,为特殊风环境下动车组的安全运行提供理论依据。

1 车辆系统动力学模型建立

高速列车是一个复杂的多体系统,不但有各部件之间的相互作用力和相对运动,而且还有轮轨之间的相互作用关系。为了更好地模拟国内某时速400 km中国标准化动车组的运行性能,建模时将车辆横向运动和垂向运动进行耦合。

动力学模型由3节车组成,每节车由1个车体、2个

基金项目:国家自然科学基金区域联合基金项目(U21A20168)

第一作者简介:刘帅(1996—),男,河南漯河人,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学,3213871706@qq.com。

构架、4个轮对、8个轴箱转臂、6个车下设备以及车辆悬挂系统组成。高速列车的车轮踏面外形采用LMA型踏面,钢轨为中国标准60kg/m轨,轮对内侧距沿用中国标准1353mm,轨底坡1:40,轨距1435mm。基于动力学参数,采用“自下而上”的建模步骤,在SIMPACK软件中建立高速列车参数化的多体动力学仿真模型如图1所示。

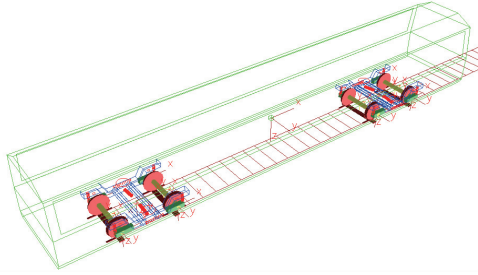


图1 时速400 km中国标准化动车组的动力学模型

2 侧风安全性计算方法

根据空气动力学仿真和风洞试验结果,作用在车体上的侧风载荷不仅有横向力 F_y ,还有升力 F_z 、侧滚力矩 M_x 、点头力矩 M_y 和摇头力矩 M_z ,侧风载荷不仅与风速有关,还与车速有关,各个力和力矩如式(1)一式(5)所示。

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v_a^2 \cdot A_0 \cdot c_{F_y}(\beta) \quad (1)$$

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v_a^2 \cdot A_0 \cdot c_{F_z}(\beta) \quad (2)$$

$$M_x = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v_a^2 \cdot A_0 \cdot d_0 \cdot c_{M_x}(\beta) \quad (3)$$

$$M_y = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v_a^2 \cdot A_0 \cdot d_0 \cdot c_{M_y}(\beta) \quad (4)$$

$$M_z = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v_a^2 \cdot A_0 \cdot d_0 \cdot c_{M_z}(\beta) \quad (5)$$

式中: ρ_0 为空气密度; v_a 为侧风风速与车辆运行速度的合成速度; β 为合成速度与车辆运行速度之间的夹角; A_0 为参考面积; d_0 为参考长度; c_{F_y} 、 c_{F_z} 、 c_{M_x} 、 c_{M_y} 、 c_{M_z} 为气动系数。

某主机厂提供的空气动力学载荷系数的坐标系取法如下:动车组前进的方向为 x 轴; z 轴平行于轨道平面指向右方; y 轴垂直于轨道平面向上方,如图2所示。倾覆力矩参考点 y 方向(车体宽度方向)距离动车组中心线顺风向0.6m, z 方向(车体高度方向)在轨道面,俯仰力矩和偏转力矩的矩中心均为各节车的中心位置。

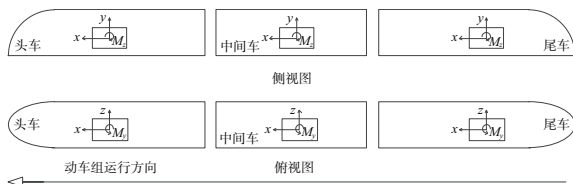


图2 动车组模型车体轴系示意图

EN14067中规定的空气动力学坐标系和某主机厂提供的空气动力学坐标系不同,二者仅升力方向和偏转力矩方向是反向的,其余方向均同号。为了与EN14067中给

出的动车组头车气动系数相对比,在计算气动系数时,首先需要在升力和偏转力矩上变号。

在变换升力和偏转力矩方向后,采用EN14067中规定的坐标系进行气动系数的计算。气动载荷中力矩与取矩位置有关,因此需要将气动载荷变换到EN14067坐标系上去,如图3所示。力矩变换到EN14067规定的坐标系后,就可以采用式(1)一式(5)气动系数与气动力的关系式,反求出气动系数。

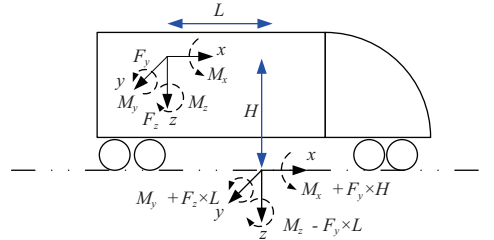


图3 不同坐标系间力矩关系

彭伟恺等^[9]深入研究了在定常稳态风载模型、瞬态“中国帽”风载模型、非定常随机风载模型等3种风载模型下的高速列车运行安全性问题,研究表明瞬态“中国帽”风载模型相较于其他风载模型更安全,很适用于我国大风区域车辆安全性评价。瞬态“中国帽”风载模型如图4所示,在仿真的开始阶段,这些力由0线性增大到对应风速和车速下的恒定值,然后保持恒定一定的时间,再以指数函数的形式增大至最大值,随后再减小至0。

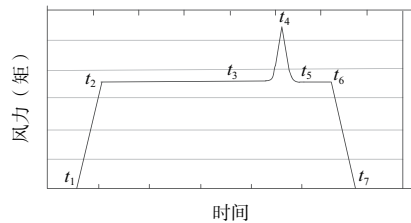


图4 瞬态“中国帽”风载模型

3 基于中国帽的侧风安全性评估

铁道车辆系统动力学性能主要包括运行平稳性、安全性和曲线通过性3个方面,其中运行安全性是铁路运输过程中最重要也是最基本的要求。评价铁道车辆运行安全性的指标主要有轮轴横向力、轮轨垂向力、轮重减载率、脱轨系数、倾覆系数等,本文基于某时速400km中国标准化动车组的动力学模型,计算其在施加“中国帽”侧风风载的作用下,列车在不同风速和车速下通过直线和曲线线路时的各安全性指标,并对何种指标适宜作为侧风安全性的评价指标进行了分析和探讨,同时研究了风速对列车最高安全运行速度的影响规律。

一般将空气动力以集中力和力矩的形式施加在车体上。空气动力学计算表明,在侧风作用下,列车的头车受到的空气动力最大,尾车次之,中间车最小,且当侧风与轨道夹角为 90° 时,车辆受到的风载最大,此时列车的安全性最差^[10]。故本文在进行侧风安全性分析时,仅对最危险的车辆(头车)进行计算分析。

3.1 直线上的侧风安全性

当施加瞬态“中国帽”侧风风载的列车行驶在直线上

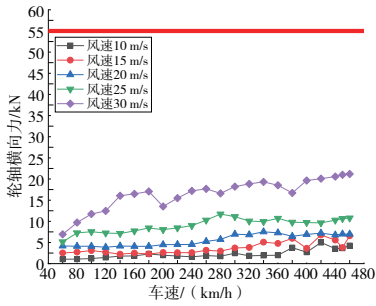


图5 轮轴横向力

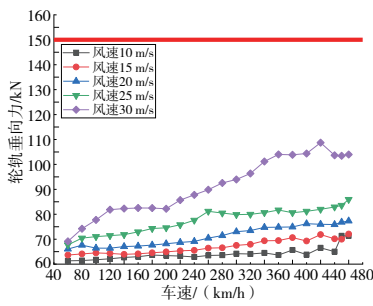


图6 轮轨垂向力

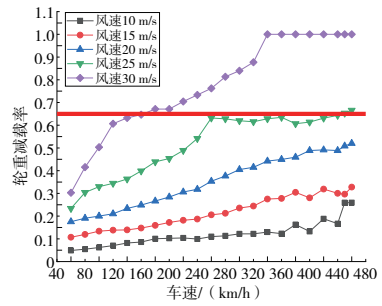


图7 轮重减载率

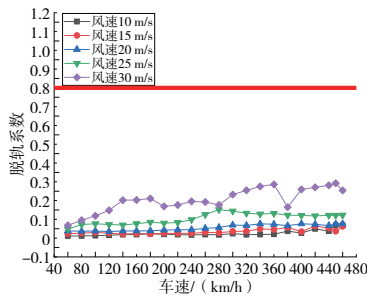


图8 脱轨系数

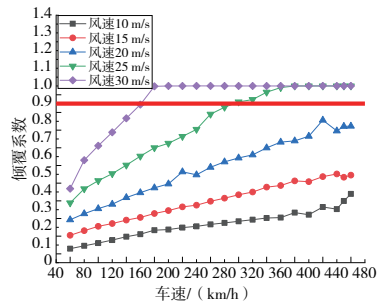


图9 倾覆系数

图5—图9中粗线为相应安全标准的限定值,粗线与不同风速下的安全性指标值曲线的交点对应的横坐标值即为该风速下以这一指标值确定的最高安全运行速度。由图5—图9可知:当列车行驶在直线路路上时,随着车速和风速的增加,头车的各安全性指标值均逐渐增加。从各安全性指标来看,轮轴横向力、轮轨垂向力和脱轨系数的最高安全运行风速比轮重减载率和倾覆系数的最高安全运行风速大了许多,说明轮轴横向力、轮轨垂向力和脱轨系数这3个指标过于宽松,不适宜作为侧风安全性的评价指标。轮重减载率和倾覆系数的最高安全风速较小,相对比较保守,故在进行侧风安全性评价时,结合轮重减载率和倾覆系数作为评价指标较为适宜^[11],即取同一风速下轮重减载率及倾覆系数所确定的最高允许速度中的最低值为列车在该风速下的最高安全运行速度。

综合轮重减载率和倾覆系数这两个指标对侧风安全性进行评价可知:侧风风速越高,列车受到的气动载荷越

路上时,头车在不同风速和车速下的各安全性指标如图5—图9所示。

大,列车最高安全运行速度越低。当平均风速在10 m/s~20 m/s范围内时,高速列车可以在460 km/h内安全运行;当平均风速达25 m/s时,车速需保持在280 km/h内;当平均风速达30 m/s时,车速需保持在150 km/h内。

3.2 曲线上的侧风安全性

由于在强侧风条件下,确定列车在曲线上的最高安全运行速度较为复杂,因为此时列车的运行安全性不仅与风速有关,还与曲线参数设置有关。因此本文通过在一段无轨道激扰的直线路路上加入未平衡离心力来等效模拟列车的曲线通过工况。

1) 0.05g 未平衡离心力作用下的侧风安全性

当施加“中国帽”侧风风载的列车在0.05g未平衡离心力的作用下通过一段无轨道激扰的直线路路时,头车在不同风速和车速下的各安全性指标如图10—图14所示。

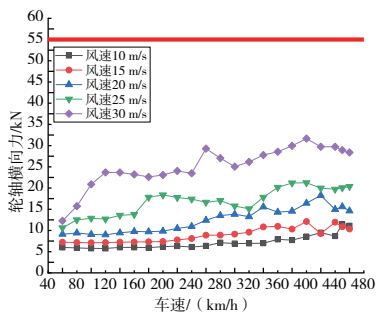


图10 0.05g未平衡离心力作用下的轮轴横向力

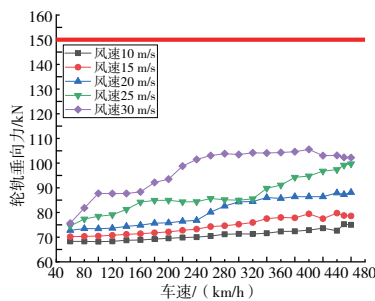


图11 0.05g未平衡离心力作用下的轮轨垂向力

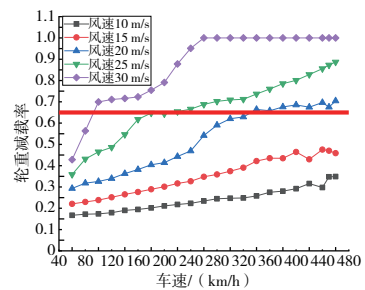


图12 0.05g未平衡离心力作用下的轮重减载率

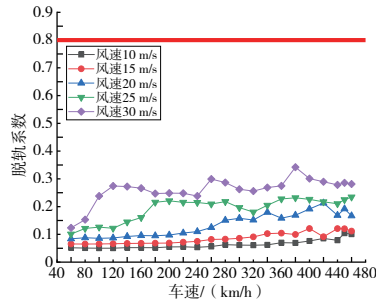


图 13 0.05g 未平衡离心力作用下的脱轨系数

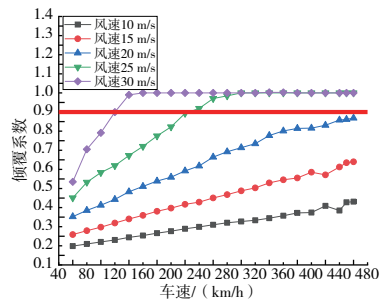


图 14 0.05g 未平衡离心力作用下的倾覆系数

由图 10—图 14 可知:当列车在 0.05g 未平衡离心力的作用下通过一段无轨道扰动的直线线路时,随着车速和风速的增加,头车的各安全性指标均逐渐增加。综合轮重减载率和倾覆系数两个指标对侧风安全性进行评价可知,侧风风速越高,列车最高安全运行速度越低。当平均风速在 10 m/s~15 m/s 范围内时,高速列车可以在 460 km/h 内安全运行;当平均风速达 20 m/s 时,车速需保持在

320 km/h 内;当平均风速达 25 m/s 时,车速需保持在 160 km/h 内;当平均风速达 30 m/s 时,列车需要进一步降至 90 km/h 内。

2) 0.10g 未平衡离心力作用下的侧风安全性

当施加“中国帽”侧风风载的列车在 0.10g 未平衡离心力的作用下通过一段无轨道扰动的直线线路时,头车在不同风速和车速下的各安全性指标如图 15—图 19 所示。

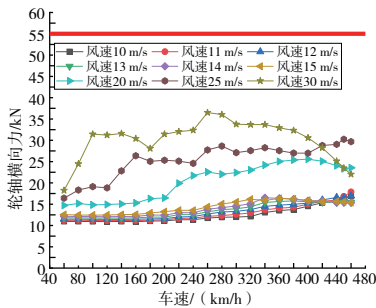


图 15 0.10g 未平衡离心力作用下的轮轴垂向力

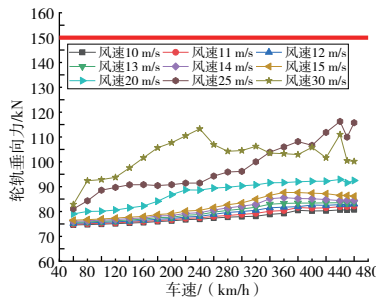


图 16 0.10g 未平衡离心力作用下的轮轴垂向力

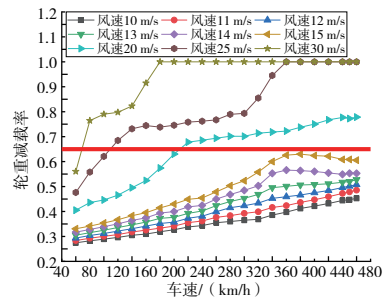


图 17 0.10g 未平衡离心力作用下的轮重减载率

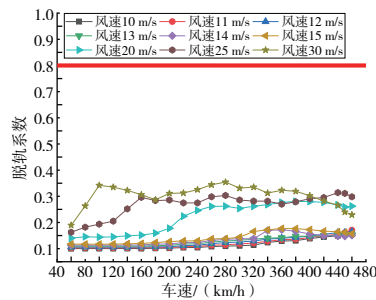


图 18 0.10g 未平衡离心力作用下的脱轨系数

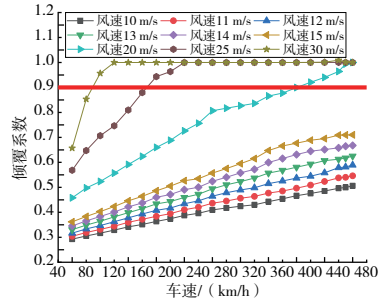


图 19 0.10g 未平衡离心力作用下的倾覆系数

由图 15—图 19 可知:当列车在 0.10g 未平衡离心力的作用下通过一段无轨道扰动的直线线路时,随着车速和风速的增加,头车的各安全性指标均逐渐增加。综合轮重减载率和倾覆系数两个指标对侧风安全性进行评价可知,当平均风速在 10 m/s~15 m/s 范围内时,该高速列车可以在 460 km/h 内安全运行;当平均风速达 20 m/s 时,车速需保持在 200 km/h 内;当平均风速达 25 m/s 时,车速需保持在 100 km/h 内;当平均风速达 30 m/s 时,列车需要进一步降至 60 km/h 甚至停运。

综合以上各计算工况,当列车行驶在不同线路上时,不同侧风风速下高速列车的最高安全运行速度曲线如图 20 所示。

由图 20 可知:风速与列车最高安全运行速度之间的关系并非是完全线性的,但总体趋势是风速越高,列车的最高安全运行速度越低。在风速一定的情况下,随着未平衡离心力的增加,车辆允许的最高安全运行速度也在降低。

(下转第 181 页)

性能检测等特点来说,某大型装备电液比例试验台的控制系统不仅可以再现电液系统的逻辑思维,实现对控制技术性能模拟,还可以对系统元器件技术指标和参量进行检测分析,这对大型装备电液比例控制系统的研发、逻辑思维掌握、故障的排除和性能的提高有着重要的作用。

参考文献:

[1] 赵怡麟. 电液比例位置控制系统的设计与研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.

[2] 谢鲲,杨成东. 电液比例阀综合性能试验台的研制[J]. 机床与液压,2017,45(22):172-175.

[3] 朱平平. 基于模糊PID的核环境机器人电液比例位置控制系统设计研究[D]. 衡阳:南华大学,2020.

[4] 武利友,黄勋,刘苗苗. 基于LabVIEW的电液比例控制液压试验台的设计[J]. 机床与液压,2018,46(14):68-71.

[5] 刘丽贞,赵治月,周鹏远,等. 基于自抗扰控制的电液比例位

置同步控制仿真研究[J]. 机床与液压,2021,49(10):146-150.

[6] 毛尾,纪朱珂,韦海利,等. 电液比例伺服系统模糊PID复合控制应用研究[J]. 液压与气动,2019(1):95-99.

[7] 罗艳蕾,杜黎,周山旭,等. 基于模糊PID的冲裁机电液比例位置控制系统仿真研究[J]. 机床与液压,2021,49(22):160-163.

[8] 于保军,于文函,李健,等. 一种驾驶室翻转液压缸试验台的控制系统设计[J]. 液压与气动,2018(5):98-101.

[9] 王浩坤. 多缸液压伺服控制系统设计及实验研究[J]. 微型电脑应用,2021,37(6):139-142.

[10] 张翔,周燕飞,夏天,等. 通用型液压马达实验台的分析与设计[J]. 机械制造与自动化,2020,49(1):56-59,106.

收稿日期:2022-04-22

(上接第176页)

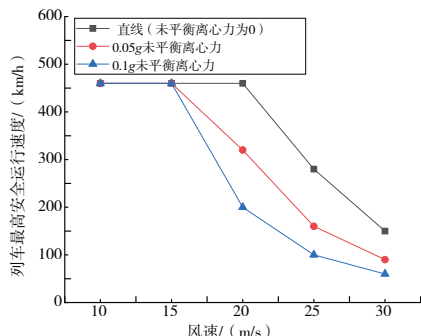


图20 不同线路及侧风风速下列车最高安全运行速度

4 结语

本文通过对我国某时速400km的中国标准化动车组进行侧风安全性计算分析,得出不同侧风风速下高速列车的最高安全运行速度,该项研究表明:

1)从各安全性指标来看,轮轴横向力、轮轨垂向力和脱轨系数这3个指标过于宽松,不适宜作为侧风安全性的评价指标,轮重减载率和倾覆系数的最高安全风速较小,相对比较保守,所以在进行侧风安全性评价时,结合采用轮重减载率和倾覆系数作为评价指标较为适宜;

2)侧风风速越高,列车受到的气动载荷越大,列车的最高安全运行速度越低,车辆的运行速度越高,其允许的最高安全风速越低;

3)在风速一定的情况下,随着未平衡离心力的增加,车辆允许的最高安全运行速度降低。因此在车辆通过强风区时,建议车辆采取限速、停运等措施来保证安全。

参考文献:

[1] 罗仁,石怀龙. 高速列车系统动力学[M]. 成都:西南交通大学出版社,2019.

[2] 胥红敏,张鹏,郭湛. 大风作用下高速列车运行安全性研究综述[J]. 中国铁路,2019(5):17-26.

[3] 毛冉成,曾京. 高速列车抗侧风倾覆稳定性研究[J]. 铁道车辆,2019,57(8):1-5,51.

[4] 宋琛. 横风下高速列车曲线通过的安全性[J]. 大连交通大学学报,2018,39(2):29-34.

[5] SUZUKI M. Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2003,91(1/2):209-218.

[6] 王璐雷,徐宇工,毛军. 强侧风对高速列车运行安全性的影响及其控制[J]. 内燃机车,2004(10):5-8,19.

[7] 田红旗,高广军. 270 km·h⁻¹高速列车气动性能研究[J]. 中国铁道科学,2003,24(2):14-18.

[8] 公衍军,杨东晓. 基于Simpack的车辆侧风安全性仿真计算方法[J]. 机械,2016,43(2):56-59.

[9] 彭伟恺,罗仁,胡俊波,等. 不同侧风模型下的高速列车安全性研究[J]. 铁道车辆,2015,53(9):5-10

[10] 任尊松. 强侧风对高速列车运行安全性研究[R].北京:北京交通大学,2005.

[11] 杨婧. 侧风下高速列车运行安全性分析[J]. 机械工程与自动化,2016(5):19-20,24.

收稿日期:2022-07-14