

文章编号:1001-8360(2012)06-0008-07

# 横风作用下高速列车安全运行速度限值的研究

郗艳红<sup>1</sup>, 毛 军<sup>1</sup>, 高 亮<sup>1</sup>, 杨国伟<sup>2</sup>, 曲文强<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190;  
3. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司 国家工程实验室, 山东 青岛 266111)

**摘 要:**横风作用下的列车安全运行速度限值应通过列车气动特性和车辆轨道动力学特性的分析得到。以我国 CRH3 型高速列车实车为原型, 考虑真实受电弓、转向架等列车的细部特征, 假定列车在平地上行驶, 对列车速度分别为 200、250、300、350 和 380 km/h, 横风速度分别为 10、15、20、25 和 30 m/s, 风向角为 90° 的 25 个工况进行气动特性的数值模拟, 并采用国内实测轨道谱和德国轨道谱分别对这 25 个工况的车辆轨道动力学性能进行仿真计算和对比分析。结合国家标准和技术规范, 给出 CRH3 型列车在平地上运行时, 横风风速与列车最大安全运行速度之间的对应关系, 为横风作用下的列车运行安全控制提供参考。

**关键词:** 高速列车; 横风; 气动特性; 轮轨动力学; 运行速度限值

**中图分类号:** U270.11 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-8360.2012.06.002

## Research on the Limited Safe Speed of a High-speed Train under Cross Wind

XI Yan-hong<sup>1</sup>, MAO Jun<sup>1</sup>, GAO Liang<sup>1</sup>, YANG Guo-wei<sup>2</sup>, QU Wen-qiang<sup>3</sup>

(1. Institute of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. CSR Qingdao Sifang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao 266111, China)

**Abstract:** The limited safe speed of a high-speed train under crosswind should be obtained by analyzing the aerodynamic and vehicle-track dynamic characteristics. A real high-speed train of Type CRH3 was taken for case study. The train was assumed to run on a plane area under 25 numerically simulated operating conditions when the train speeds were chosen as 200, 250, 300, 350 and 380 km/h, the crosswind velocities as 10, 15, 20, 25 and 30m/s and the wind direction angle as 90°. The detailed characteristics of real bogies and pantographs and so on were taken into account. The dynamic vehicle-track characteristics corresponding to the above 25 operating conditions were calculated respectively and compared in line with the domestic measured track spectra and the German track spectra. In accordance with the National standards and technical specifications concerned, the relationship between the crosswind velocity and the maximum safe operating speed of the CRH3 train running on a plane area was found. The results will play a guiding role in control of safe operation of a train under crosswind.

**Key words:** high-speed train; cross-wind; aerodynamic characteristics; vehicle-track dynamics; limited value of the train speed

高速列车在强横风作用下的稳定性问题十分突

出,横风对高速铁路的运行安全造成明显威胁<sup>[1]</sup>。避免和减小这一威胁的重要措施之一是对在横风条件下运行的高速列车实行限速。国内外针对大风条件下高速列车的空气动力学性能开展了诸多研究,对横风效应所引起的问题进行了分析,并把计算流体力

收稿日期:2011-05-20;修回日期:2011-12-29

基金项目:国家科技支撑计划(GTYZ200902)

第一作者:郗艳红(1980—),女,河北唐山人,博士。

E-mail:06121404@bjtu.edu.cn

通讯作者:毛 军(1966—),男,湖北公安人,副教授,博士。

E-mail:jmao@bjtu.edu.cn

学和动力学仿真结合起来对高速列车的安全速度进行了探讨<sup>[2-11]</sup>。由于这些研究对列车的几何外形进行了过度简化,且将横风风场取为均匀风,与实际情况有一定差异。本文以我国 CRH3 型高速列车在平原上运行为例,根据其真实外形和细部结构建模,横风风场取为大气底层边界速度型风场,采用 STAR\_CCM+ 软件对高速列车以不同行驶速度在不同风速横风中运行时的气动特性进行数值模拟计算,并采用 SIMPACK 软件进行动力学仿真,初步给出横风作用下高速列车的最大安全运行速度限值与横风风速之间的关系。

## 1 横风作用下高速列车的空气动力学计算

在通过模型实验确定了数值模拟方法的适用性的基础上<sup>[7]</sup>,对高速列车在平原上运行的横风效应进行数值模拟分析。

### 1.1 计算模型与条件

列车中部截面不变,缩短的模型不改变列车流场结构的基本特征<sup>[6]</sup>,采用 3 辆车编组,即头车+拖车+尾车,长度分别为 25.675 m、24.775 m 和 25.675 m,列车宽度为 3.265 m,高度为 3.89 m,考虑真实的转向架、受电弓和风挡等。主要计算工况和条件是:

(1)车速为 200、250、300、350、380 km/h;横风采用大气底层边界速度型,根据文献<sup>[12]</sup>,在气象上 10 m 高度处的风速分别为 10、15、20、25、30 m/s,横风风向角为 90°。

(2)采用相对运动模拟列车附近的外流场。使用剪切应力输运 SST  $k-\omega$  模型湍流模型,流场内黏性流体为可压缩、定常流动,流动控制方程见文献<sup>[13]</sup>。用有限体积法(FVM)将控制方程离散,扩散项用二阶精度中心差分格式离散,用分离式解法对离散后的控制方程组求解。使用 SIMPLE 法耦合压力-速度场,压力采用迭代法修正。

### 1.2 计算域及网格划分

流场计算模型参照文献<sup>[14]</sup>,计算域的长度为 420 m、宽度为 420 m、高度为 100 m。列车头部鼻尖处到计算域前端边界距离取 120 m,尾部距计算域后端边界取 300 m,横风入口距列车的距离取 120 m,横风出口距列车的距离取 300 m。

采用六面体网格,在车体表面及地面处生成边界层网格,加密尾流、列车表面和受电弓等流场变化较大区域的网格。整个计算区域的网格总数约为 3 100 万个。

### 1.3 横风作用下高速列车所受的气动荷载

对车速为 200、250、300、350、380 km/h,风速为 10、15、20、25、30 m/s,风向角为 90° 的 25 个组合工况进行气动荷载模拟计算。由于工况较多,仅在表 1 中列出了部分工况的计算结果。由于气动力模拟与轮轨动力学仿真的坐标系不同,这些气动荷载在加载到多体动力学仿真模型上时进行了变换,动力学仿真的参考坐标系如图 1 所示。

表 1 横风和列车风形成的列车气动荷载

车辆	车速/(km·h <sup>-1</sup> )- 风速/(m·s <sup>-1</sup> )	$F_x$ /kN	$F_y$ /kN	$F_z$ /kN	$M_x$ /(kN·m)	$M_y$ /(kN·m)	$M_z$ /(kN·m)
头车	380-10	-13.34	-20.98	-1.78	8.08	-160.922	-157.443
	350-15	-12.41	-32.487	-8.179	11.279	-147.184	-203.551
	300-20	-9.2	-40.474	-21.39	12.97	-137.23	-229.92
	250-25	-6.041	-49.06	-34.96	13.690	-118.077	-221.78
	200-30	-3.67	-63.303	-28.09	17.53	35.726	-160.032
拖车	380-10	-18.206	-7.75	-6.277	-2.47	-5.559	-10.073
	350-15	-16.789	-12.304	-20.736	-3.267	1.693	2.27
	300-20	-13.91	-17.87	-32.5	-1.96	40.17	16.02
	250-25	-11.943	-25.399	-32.101	1.88	57.189	22.687
	200-30	-8.96	-41.92	-46.16	0.9	-77.75	-8.55
尾车	380-10	-15.268	5.708	-18.17	-0.859	-0.74	-98.119
	350-15	-14.863	2.527	-19.631	-0.995	20.13	-127.631
	300-20	-13.31	-3.48	-10.78	2.56	9.529	-155.43
	250-25	-13.366	-5.617	-24.965	2.88	-44.23	-195.374
	200-30	-9.476	-9.64	-29.4	2.624	91.91	-158.04

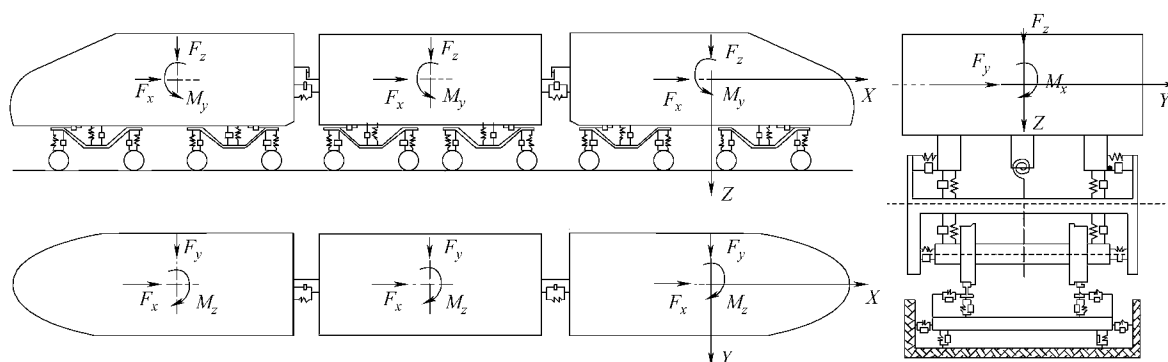


图 1 列车所受气动荷载和动力学仿真计算模型

## 2 横风作用下高速列车的动力学仿真

### 2.1 动力学仿真模型

与空气动力学模型相对应,建立由头车、拖车和尾车组成的高速列车动力学模型,如图 1 所示。

动车组中每节车辆模型为车体-构架-轮对的组合。每一转向架由轴箱悬挂和中央悬挂 2 部分组成。轴箱悬挂包括垂向、横向和纵向 3 个方向的弹簧刚度以及垂向减振器阻尼。中央悬挂为空气弹簧,其悬挂参数包括垂向、横向和纵向 3 个方向的非线性弹簧刚度和减振器阻尼。车体和转向架均分别具有纵向  $x$ 、横向  $y$ 、垂向  $z$  及侧滚(绕  $x$  轴)、点头(绕  $y$  轴)、摇头(绕  $z$  轴)等 6 个方向的自由度,轮对则具有横向、垂向、侧滚和摇头 4 个自由度。3 节车之间通过车钩缓冲装置依次相连。模型还包含较为完整的轮轨接触几何关系、横向缓冲器、抗蛇行减振

器等非线性环节。

采用实际的 S1002G 轮对踏面和 60kg/m 钢轨相匹配;考虑轮轨蠕滑非线性及车辆系统中一、二系横向、垂向减振器及横向止挡的非线性特性;基于等效的 Hertzian 接触特性,使用 Kalker 简化的滚动接触非线性理论 Fastsim 算法,计算轮轨间蠕滑力和蠕滑力矩。分别采用德国低干扰轨道谱和京津线实测轨道谱作为轨道随机激励输入。

### 2.2 动力学仿真结果

表 2 为采用德国轨道谱和京津线轨道谱对 25 个工况进行仿真的轮轨动力学性能参数的计算结果。由表 2 可知,全部工况的轮轴横向力和轮轨垂向力均在安全限值内,但脱轨系数和减载率则出现了超过安全限值的情形。因此,应根据脱轨系数和减载率的标准极限值来确定横风下的车速阈值。

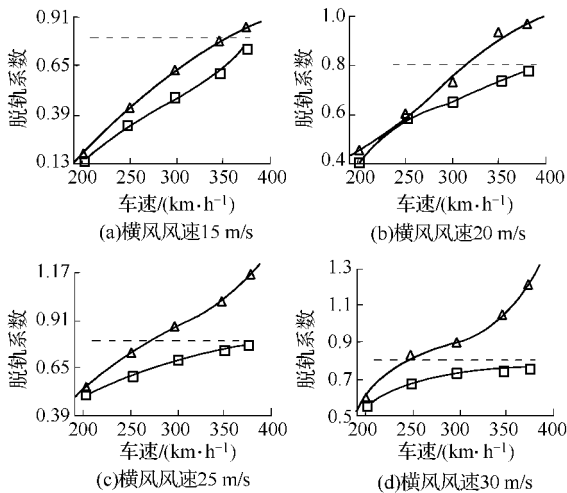
表 2 横风作用下的轮轨动力学参数

风 速 /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	车 速 /( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	京津线轨道谱				德国轨道谱			
		最大脱轨系数	最大减载率	轮轴横向力/kN	轮轨垂向力/kN	最大脱轨系数	最大减载率	轮轴横向力/kN	轮轨垂向力/kN
10	200	0.09	0.38	6.8	93.8	0.10	0.40	6.0	104.0
	250	0.10	0.43	7.1	95.0	0.15	0.48	6.5	104.1
	300	0.11	0.48	8.2	96.0	0.20	0.50	7.8	105.1
	350	0.15	0.54	10.1	96.0	0.24	0.59	10.1	106.0
	380	0.16	0.59	9.8	97.1	0.43	0.64	11.3	107.0
15	200	0.28	0.39	7.1	94.2	0.18	0.42	9.4	100.1
	250	0.35	0.43	11.5	98.2	0.42	0.50	11.1	110.2
	300	0.48	0.51	12.5	100.1	0.62	0.61	13.2	116.1
	350	0.61	0.66	16.1	107.9	0.77	0.77	15.7	130.2
	380	0.75	0.72	17.5	115.1	0.85	0.82	17.4	138.1
20	200	0.40	0.42	14.1	100.1	0.45	0.45	13.5	105.1
	250	0.59	0.55	17.1	102.0	0.60	0.60	16.7	112.1
	300	0.65	0.62	19.2	108.0	0.73	0.68	17.8	121.2
	350	0.74	0.81	22.1	116.9	0.92	0.86	22.5	136.0
	380	0.78	0.88	25.2	118.0	0.96	0.92	25.3	139.2

续表 2 横风作用下的轮轨动力学参数

风 速 $/(m \cdot s^{-1})$	车速 $/(km \cdot h^{-1})$	京津线轨道谱				德国轨道谱			
		最大脱轨系数	最大减载率	轮轴横向力/kN	轮轨垂向力/kN	最大脱轨系数	最大减载率	轮轴横向力/kN	轮轨垂向力/kN
25	200	0.51	0.53	19.1	105.2	0.55	0.54	15.3	110.1
	250	0.61	0.61	22.1	107.1	0.73	0.69	22.2	118.1
	300	0.70	0.74	26.1	112.0	0.88	0.81	25.1	132.0
	350	0.75	0.83	28.2	121.0	1.00	0.92	27.4	140.1
	380	0.78	0.91	30.3	124.1	1.15	1.00	32.2	142.1
30	200	0.56	0.60	23.1	117.1	0.60	0.62	24.3	121.1
	250	0.68	0.75	28.2	120.1	0.82	0.78	26.2	135.3
	300	0.74	0.83	33.2	123.0	0.89	0.88	33.4	136.2
	350	0.75	0.92	39.1	130.1	1.04	0.98	35.5	148.2
	380	0.76	0.96	40.1	134.1	1.20	1.00	37.6	157.1

图 2 为脱轨系数随风速和车速变化的关系曲线。图中虚线对应于《铁道车辆动力学性能评估和试验鉴定规范》<sup>[15]</sup> 给出的脱轨系数安全限值, 根据它们与脱轨系数变化曲线的交点可以得到以脱轨系数作为安全判据的、列车在某一风速下的安全速度阈值, 也可以得到某一列车速度所对应的最大横风风速。

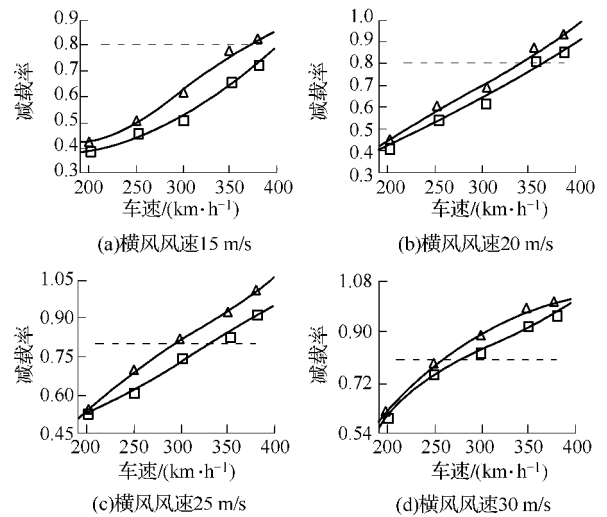


□京津线轨道谱 △德国轨道谱 --- 临界脱轨系数

图 2 脱轨系数随列车速度的变化曲线

由图 2 可知, 在各个风速下, 最大脱轨系数均随着车速的增加而增大。若采用京津线轨道谱, 在各车速下的最大脱轨系数都未超过临界脱轨系数(0.8), 仅以脱轨系数作为安全判据就可认为列车没有脱轨的危险。而若采用德国轨道谱, 则在横风风速为 15~30 m/s 的范围内均出现了脱轨系数超限的情形: 风速为 15 m/s 时, 车速 380 km/h 工况的脱轨系数为 0.85; 风速为 20 m/s 时, 车速 350 km/h 和 380 km/h 工况的脱轨系数分别为 0.92 和 0.96; 风速为 25 m/s 时, 车速 300 km/h、350 km/h 和 380 km/h 工况的脱轨系数分别为 0.88、1.0 和 1.0。

图 3 是车速与最大减载率之间的关系曲线。由



□京津线轨道谱 △德国轨道谱 --- 临界动态减载率

图 3 轮重减载率随列车速度的变化曲线

图 3 可知, 在各个风速下, 头车的最大减载率均随着车速的增加而增大。若采用京津线轨道谱, 风速低于 15 m/s 时, 各个车速下的最大减载率都未超过临界动态减载率(0.8)。而若采用德国轨道谱, 在横风风速为 15~30 m/s 的范围内均出现了减载率超限的情况: 风速为 15 m/s 时, 车速 350 km/h 工况的减载率为 0.77, 接近于临界值, 车速 380 km/h 工况的减载率则为 0.82; 风速为 20 m/s 时, 车速 350 km/h 和 380 km/h 工况的减载率分别为 0.86 和 0.92; 风速为 25 m/s 时, 车速 300 km/h、350 km/h 和 380 km/h 工况的减载率分别为 0.81、0.92 和 1.0; 风速为 30 m/s 时, 车速 300 km/h、350 km/h 和 380 km/h 工况的减载率分别为 0.88、0.98 和 1.0, 且 250 km/h 工况的减载率也达到 0.78, 接近于临界减载率。

同样, 根据文献<sup>[15]</sup> 给出的减载率安全限值, 可以得到以减载率作为安全判据的、列车在某一风速下的安全速度阈值。

### 2.3 列车运行速度安全域分析

由图 2 可知,在列车速度 200~380 km/h 和风速 10~30 m/s 范围内,使用京津线轨道谱得到的脱轨系数均未超限,因此以脱轨系数为判据时,只给出德国轨道谱下的速度限值。由上述计算和分析可知,根据不同动力学性能参数的安全指标限值,可以确定列车在横风作用下的安全速度阈值,见表 3。根据表 3 可以得到拟合曲线,如图 4 所示。

表 3 横风作用下的列车速度限值 km/h

风速 /(m·s <sup>-1</sup> )	以脱轨系数 为判据		以减载率为判据	
	使用德国 轨道谱	使用德国 轨道谱	使用京津 线轨道谱	使用京津 线轨道谱
10	419.03	430.64	462.00	
15	360.69	367.30	402.58	
20	315.42	336.64	357.00	
25	273.10	296.16	331.90	
30	244.13	260.50	277.96	

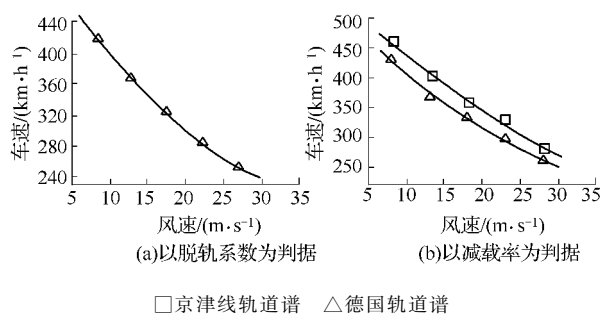


图 4 不同判据确定的风速-车速关系

使用德国轨道谱时,得到以脱轨系数为判据的风速-车速拟合曲线的函数关系为

$$V_{tr,max} = 0.17626v_w^2 - 15.79809v_w + 559.12 \quad (1)$$

相关系数为 0.99969。式中,  $V_{tr,max}$  和  $v_w$  分别为列车的最大安全运行速度和 90° 风向角的横风风速,单位分别是 km/h 和 m/s。由式(1)可知,无横风时的列车限速临界值为 559.12 km/h。

以减载率为判据的风速-车速拟合曲线的函数关系为使用京津实测轨道谱

$$V_{tr,max} = 0.08983v_w^2 - 12.36834v_w + 573.232 \quad (2)$$

使用德国低干扰轨道谱

$$V_{tr,max} = 0.13011v_w^2 - 13.43297v_w + 548.356 \quad (3)$$

相关系数分别为 0.98839 和 0.99278。

图 4 表明:

(1)由不同安全性指标限值所确定的控制列车最

高安全运行速度有所不同;采用不同轨道谱计算得到的最高安全运行速度也不相同,轨道谱对动力学仿真结果的影响比较大。京津线实测轨道谱与德国低干扰轨道谱相比,前者反映的京津线路状态良好,总体优于后者。使用德国低干扰轨道谱计算的动力学指标普遍高于使用我国京津线轨道谱计算的力学指标。若以德国低干扰轨道谱进行仿真计算,制定横风作用下的列车安全运行速度限值,将偏于保守和安全。

(2)风速越大,列车最高安全运行速度越低;风速越小,列车最高安全运行速度越高。如果使用轮轨垂向力和轮轴横向力作为列车安全运行的控制指标,则在所计算的列车速度为 200~380 km/h 的范围内都是安全的;如果以脱轨系数和轮重减载率作为控制指标,则在达到危及安全的速度限值前,其他安全性指标,如轮轨垂向力和轮轴横向力等均在安全限值以内。因此,建议同时以脱轨系数和轮重减载率作为确定高速列车在横风环境中最高允许运行速度的依据,使高速列车在复杂风环境下具有足够的运行安全性。

### 3 横风作用下列车运行速度限值

上述分析表明,脱轨系数和轮重减载率作为控制安全允许行车速度的动力学性能参数,采用京津线实测轨道谱和德国低干扰轨道谱计算的结果也不相同,因此需要进行统筹考虑,确定列车在横风环境中运行的速度安全域。

由拟合关系式(2)可知,无风时的列车限速临界值为 573.23 km/h;由式(3)得到的无风时的列车限速临界值则为 548.36 km/h。为了验证其准确性,对列车速度为 490~550 km/h、无横风的工况进行了气动力和轨道动力学计算。

计算表明,这些工况的最大轮轴横向力和轮轨垂向力均未超过限值,而脱轨系数和轮重减载率则有超过限值的情形。风速为零时对应的极限速度分别是 502 km/h(以脱轨系数为判据,德国轨道谱)、501 km/h(以减载率为判据,德国轨道谱)和 531 km/h(以减载率为判据,京津轨道谱)。它们与从图 4 和拟合关系式(1)~式(3)得到的结果有所差别,需要进行修正。方法是:将零风速的临界速度点加入表 3 和图 3 中,形成新的以脱轨系数和减载率为判据的风速-车速曲线,从而得到不同横风作用下的列车运行速度安全域,如图 5 所示。

以脱轨系数为判据的风速-车速拟合曲线的函数关系为

$$V_{tr,max} = 500.3679 - 8.8784v_w \quad (4)$$

相关系数为 0.99691。由该式可推算出列车静止

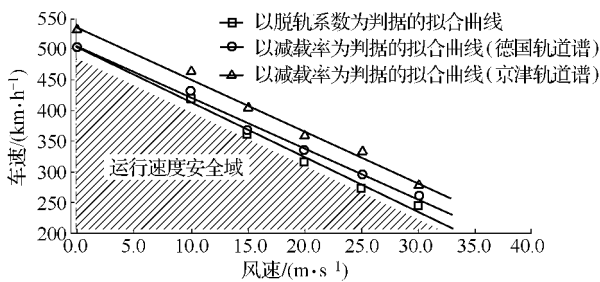


图 5 横风作用时列车在平地上运行的速度安全域  
时能承受的最大风速为 56.35 m/s。

以减载率为判据的风速-车速拟合曲线的函数关系为

使用德国低干扰轨道谱

$$V_{tr,max} = 501.6486 - 8.1765v_w \quad (5)$$

使用京津实测轨道谱

$$V_{tr,max} = 534.8543 - 8.4669v_w \quad (6)$$

相关系数分别为 0.99651 和 0.99597。由它们推算出当列车静止时能够承受的最大风速分别为 61.35 m/s 和 63.17 m/s。

根据拟合关系式(4)~式(6)以及图4可以得到横风风速从 10~30 m/s 范围内任一风速下的列车限速值。采用京津线实测轨道谱和德国低干扰轨道谱,列车的最大运行速度都随着横风风速的增大而减小。但同一风速下,两者给出的列车最大运行速度有一定的差异,风速越小,差异越小。采用德国低干扰轨道谱得到的列车最大安全速度低于采用京津线实测轨道谱得到的列车最大安全速度,偏于安全。当风速不超过 20 m/s 时,二者的差距不超过 5%;当风速为 20~30 m/s 时,二者的差距从 5% 逐步增大到 14% 左右。因此,在风速较低时,例如小于 20 m/s 时,采用由两种轨道谱仿真计算给出的列车最大运行速度基本相等,可以取安全裕量略小的最大运行速度(由京津线实测轨道谱计算);在风速较大,例如大于 20 m/s 时,选取偏安全的最大运行速度(由德国低干扰轨道谱计算)。

#### 4 结论

列车气动力荷载和轮轨动力学仿真计算表明:

(1) 高速列车以不同速度在 90° 风向角的横风中运行时,各节车辆的气动荷载和轮轨动力学性能相差较大。横风对列车头车的气动性能和运行稳定性的影响最大,可以通过头车的运行稳定性分析来评估整车的运行稳定性。

(2) 横风风速和列车运行速度越大,头车的动力学性能参数越大,但并非呈线性关系;根据这些性能参数确定的列车安全速度限值与横风风速的关系也不是

线性关系。

(3) 轨道谱对动力学仿真结果的影响比较大。使用德国低干扰轨道谱计算的动力学指标普遍高于使用我国京津线轨道谱计算的指标。若以德国低干扰轨道谱进行仿真计算,进而制定列车安全运行速度限值,将偏于安全。

(4) CRH3 型列车在平地上运行时,横风风速与列车最大安全运行速度之间的对应关系近似为线性关系。在风速较低,例如小于 20 m/s 时,采用由两种轨道谱仿真计算给出的列车最大运行速度基本相等,可以取偏安全裕量小些的最大运行速度(由京津线实测轨道谱计算);在风速较大,例如大于 20 m/s 时,建议选取偏安全的最大运行速度(由德国低干扰轨道谱计算)。

#### 参考文献:

- [1] 刘庆宽,杜彦良. 日本列车横风和强风对策研究[J]. 铁道学报,2008,30(1):82-88.  
LIU Qing-kuan, DU Yan-liang. Train-crosswind and Strong Wind Countermeasure Research in Japan[J]. Journal of the China Railway Society, 2008,30(1):82-88.
- [2] BAKER C J. The Simulation of Unsteady Aerodynamic Cross Wind Forces on Trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010,98: 88-99.
- [3] CARRARINI A. Reliability Based Analysis of the Cross-wind Stability of Railway Vehicles[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95: 493-509.
- [4] ORELLANO A, SCHOBER M. On Side-wind Stability of High-speed Trains[J]. Vehicle System Dynamics Supplement, 2003,40:143-160.
- [5] RAGHU S, RAGHUNATHANA H D, Kimb T. Setoguchi. Aerodynamics of High-speed Railway Train [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002,38:469-514.
- [6] KHIER W, BREUER M, DURST F. Flow Structure Around Trains under Side Wind Conditions: a Numerical Study [J]. Computers & Fluids, 2000,29:179-195.
- [7] 毛军, 郝艳红, 杨国伟. 侧风风场特征对高速列车气动性能作用的研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(4): 22-30.  
MAO Jun, XI Yan-hong, YANG Guo-wei. Research on Influence of Characteristics of Cross Wind Field on Aerodynamic Performance of a High-speed Train [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(4): 22-30.
- [8] 毛军, 马小云, 郝艳红. 基于流动模拟和动力学仿真的高速列车横风运行稳定性研究[J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(1): 44-48.  
MAO Jun, MA Xiao-yun, XI Yan-hong. Research on the Running Stability of High-speed Trains under the Cross

- Wind by Means of Simulation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(1):44-48.
- [9] 蒋崇文, 陈智, 关雪梅, 等. 平原上不同长度集装箱列车横风载荷的数值研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(5):18-24.  
JIANG Chong-wen, CHEN Zhi, GUAN Xue-mei, et al. Numerical Study on Crosswind Loads of Container Trains in Different Length on Plain[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(5):18-24.
- [10] 邓永权, 肖新标. 横风作用时间对高速客车直线运行安全性的影响[J]. 铁道机车车辆, 2008, 28(5):1-5.  
DENG Yong-quan, XIAO Xin-biao. Effects of Cross-wind Acting Time on the Safety of the High-speed Passenger Cars on Straight Line[J]. Railway Locomotive & Car, 2008, 28(5):1-5.
- [11] 任尊松, 徐宇工, 王璐雷, 等. 强侧风对高速列车运行安全性影响研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(6):46-50.  
REN Zun-song, XU Yu-gong, WANG Lu-lei, et al. Study on the Running Safety of High-speed Trains under Strong Cross Winds[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(6):46-50.
- [12] 周宇, 钱炜祺, 邓有奇, 等.  $k-\omega$  SST 两方程湍流模型中参数影响的初步分析[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(2):213-217.  
ZHOU Yu, QIAN Wei-qi, DENG You-qi, et al. Introductory Analysis of the Influence of Menter's  $k-\omega$  SST Turbulence Model's Parameters[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(2):213-217.
- [13] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 72-73.
- [14] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [15] 中华人民共和国国家标准局. 铁道车辆动力学性能评估和试验鉴定规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1986.

(责任编辑 聂清立)

## 下 期 要 目

- 考虑不同满轴约束的编组站阶段计划配流优化
- 高速列车气动阻力分布特性研究
- 横风下高速列车通过挡风墙动力学研究
- 城市轨道交通车辆牵引动态特性建模与实验系统研究
- 基于改进 PCNN 模型的车辆阴影消除方法
- 列车运行控制系统中安全通信协议的形式化分析
- 基于 GPS 和虚拟卫星的列车完整性检查方法研究
- 高速行车条件下轨道几何不平顺敏感波长研究
- 高速铁路路基工程岩溶注浆效果无损检测评估方法研究
- 高水压条件下盾构隧道联络通道及集水井施工力学行为研究
- 高强型 CA 砂浆力学性能影响因素及力学机理研究