DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2022.04.101

铁道机车车辆

脉动横风载荷对高速列车曲线运行平稳性的影响

田宝春[1]，张　捷[2]

（1.呼和浩特职业学院 铁道系，内蒙古 呼和浩特　010050；
2.内蒙古农业大学 能源与交通工程学院，内蒙古 呼和浩特　010000）

摘　要：为探究脉动横风载荷对高速列车曲线通过平稳性和安全性影响问题，使用SIMPCAK建立了3编组列车动力学模型，利用MATLAB实现了脉动横风气动载荷的模拟，并加载到车体质心，计算得到列车在风载荷下的时域/频域响应。参考相关标准设置了线路参数，分析了加载曲线内外横风的影响、编组内车辆振动响应，并分析了不同外轨超高、不同曲线半径、不同风攻角、不同风速、不同车速等参数对车辆曲线安全通过的影响和相应限值。结果表明，脉动风容易激起3 Hz以下车体结构低频振动，“风-车”参数差异导致列车编组内动力响应差异，其中头车对风攻角α在60°~90°时对横风最敏感。曲线外轨欠超高时，车辆横向响应内侧风占主导，而过渡到过超高时横向响应外侧风占主导地位。曲线半径减小、风速及车速增长都会使得车辆安全性迅速变差。在车速200 km/h、风速12 m/s、风向角90°条件下，曲线安全半径为3 800 m；在车速200 km/h、风向角90 °、曲线半径为3 200 m条件下，最大风速限值为25 m/s；在风向角90°、曲线半径为3 200 m、风速12 m/s条件下，最大车速限值为300 km/h。

关键词：脉动横风；高速列车；曲线通过性能；运行安全性；高速铁路；仿真；动车组
中图分类号：U292.91+4　　**文献标识码：**A
文章编号：1000-128X(2022)06-0058-09

Influence of fluctuating transverse wind load on smoothness of high-speed train curve running

TIAN Baochun[1], ZHANG Jie[2]

(1. Institute of Railway, Hohhot Vocational College, Hohhot, Inner Mongolia 010050, China;
2. College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010000, China)

Abstract: In order to explore the influence of fluctuating cross wind load on the curve passing stability and safety of high-speed train, the three-marshalling train dynamics model was established by using SIMPCAK in this paper. The simulation of pulsating wind aerodynamic load was realized by MATLAB and loaded into the vehicle body centroid. The time / frequency response of the train under wind load was calculated. The line parameters were set with reference to relevant standards, the influence of load curve both inside and outside horizontal wind and the vibration response of vehicles in the marshalling were analyzed. Then, the effects of different superelevation, radius of circular curve, wind attack angle, wind speed and vehicle speed on vehicle safe passage of curve and the corresponding limits were analyzed. The results showed that the pulsating wind was easy to arouse the low frequency vibration of the train structure below 3 Hz. The difference of wind-vehicle parameters leaded to the difference within the train dynamic response in the marshalling,

收稿日期：2021-03-05；修回日期：2021-04-13
基金项目：内蒙古自然科学基金项目（2018MS07009）；内蒙古教育科学十三五规划项目（HGJCH2019398）
通信作者：张　捷（1980—），女，副教授，博士，研究方向为车辆工程；E-mail：lugu148324na@163.com

among which the first train T1 was most sensitive to the transverse wind when the wind attack angle α = 60°-90°. In the case of deficient superelevation, the inside wind dominated the lateral response of the vehicle, while in the case of over elevation, the outside wind dominated the lateral response. The decrease of the radius of the circular curve and the increase of the wind speed and the train speed would make the vehicle safety deteriorate rapidly. Under the conditions of speed at 200 km/h, wind speed at 12 m/s and wind direction angle at 90°, the safe radius of the circular curve was 3 800 m. Under the conditions of speed at 200 km/h, wind direction angle at 90° and circular curve at 3 200 m, the maximum wind speed was limited to 25 m/s. Under the conditions of wind angle at 90°, circular curve at 3200 m and wind speed at 12 m/s, the maximum speed was limited to 300 km/h.

Keywords: fluctuating transverse wind; high-speed train; curve passing performance; operation safety; high-speed railway; simulation; multiple-unit train

0　引言

目前，列车设计正朝着高速、轻量化的方向发展，气动载荷对列车扰动更强，列车在强风环境下曲线行车的平稳性问题凸显。我国高速铁路建设正在向西部地区推进，西南有高原，西北有大漠风区，这些地区的自然条件因素对于列车平稳运行有着重大影响。横风轻则影响运行平稳性、乘坐舒适性，重则导致列车脱轨、倾覆，列车曲线通过风致平稳性问题不容忽视。目前，许多学者对风环境下车辆安全运行问题进行了一定讨论。文献[1]专门对“风–车–桥”领域进行了调研，讨论了列车过桥时遭遇大风的各种情况。文献[2]研究了非稳态横风下车辆稳定性。文献[3]针对风屏障及TMD吸振措施进行了数值研究。文献[4]探索了非稳态横风下车辆稳定性问题。文献[5-6]针对山地城市探究了地铁列车在山地高架区的风致平稳性。

本文将着重研究高速列车通过曲线段遭遇横风时的安全运行问题。为实现该目标本文首先进行脉动横风载荷–高速列车模型的搭建，再利用该模型计算横风加载方式和风攻角对编组内各车辆响应的影响，并在此基础上分析对曲线线路设计参数的影响及其限值，分析风速和车速等运行条件的影响及其限值。

1　脉动横风–高速列车模型

1.1　高速列车动力学模型

本文使用通用多体动力学软件SIMPACK建立高速列车编组模型，3节车分别为头车、中间车和尾车，如图1所示。脉动风激励作为横向力时域载荷加载到车体上，每辆车间横向自由度和垂向自由度为弱耦合，因此弱化了车钩。车辆建模时考虑为经典多刚体（车体、构架、车轮）弹簧–阻尼振动系统，基于铁道车辆基本特性，各类线性与非线性特性也在SIMPACK中给予了考虑。钢轨采用CN-60轨，车轮踏面为LMA型[5]。CRH3车辆的动力学参数详情可参考文献[7]。

横风激扰下车辆动力学方程可描述为

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{v}}\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{v}}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{v}}\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{v}}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{v}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{v}}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{wv}} \tag{1}$$

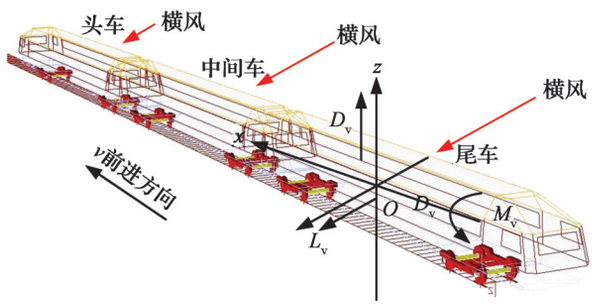


图 1　高速列车多刚体动力学模型

Fig. 1　Multi-rigid-body dynamics model of high-speed train

式中：$\boldsymbol{M}_{\mathrm{v}}$, $\boldsymbol{C}_{\mathrm{v}}$, $\boldsymbol{K}_{\mathrm{v}}$ 分别为车辆的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵；$\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{v}}$, $\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{v}}$, $\boldsymbol{X}_{\mathrm{v}}$ 分别为车辆的加速度矢量、速度矢量、位移矢量；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{wv}}$ 为车辆所受风载荷。

根据标准《高速铁路设计规范》，曲线线路由直线段、缓和曲线和圆曲线复合而成，形式为“直线+缓和曲线+圆曲线+缓和曲线+直线”，直线与圆曲线间采用三次抛物线型缓和曲线连接，如图2。

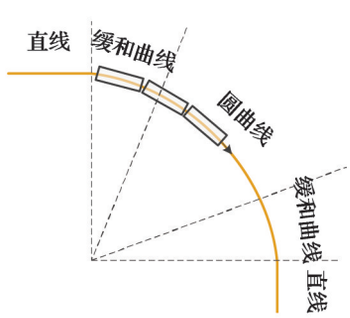


图 2　曲线线路示意图

Fig. 2　Curve line diagram

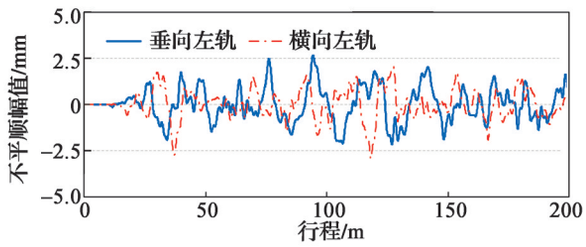
根据标准《高速铁路设计规范》，曲线上欠超高 h_{q} (mm)和过超高 h_{g}(mm)为（V_{v}'为实际车速，km/h）为：

$$\left.\begin{aligned} h_{\mathrm{q}}&=11.8\,V_{\mathrm{v}}'^{2}/R-h_0\\ h_{\mathrm{g}}&=h_0-11.8\,V_{\mathrm{v}}'^{2}/R\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

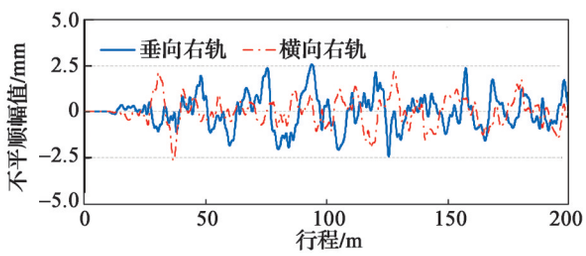
基于线路实际，本文几何不平顺样本见图3，波长为2~150 m。

1.2　脉动横风载荷仿真的实现与加载

本文基于概率论和随机振动理论对波动进行分析，采用MATLAB编程进行风速模拟，流程如图4所示[8]。



(a) 左轨



(b) 右轨

图 3　线路不平顺时域样本

Fig. 3　Time-domain sample of line irregularity

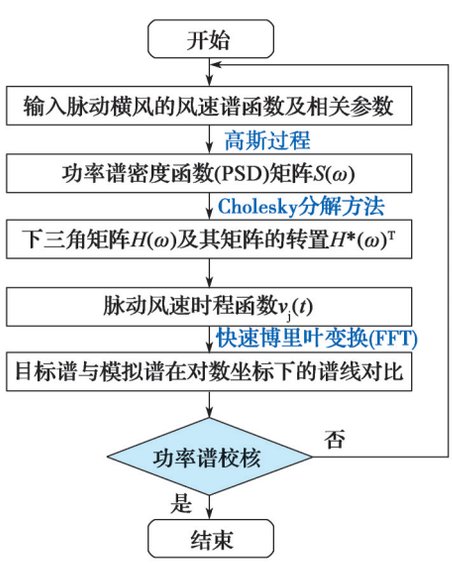


图 4　脉动风数值仿真

Fig. 4　Numerical simulation of fluctuating wind

风速谱选取了经典可靠的Davenport风速谱[9]，而3节编组列车长度有限，故暂时忽略了风速的纵向空间相关性，其谱密度函数为

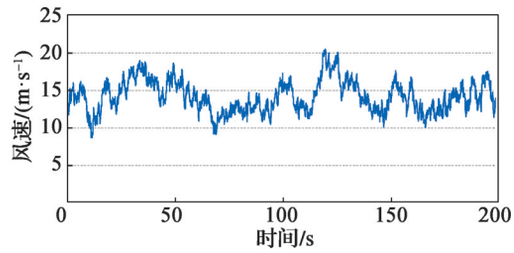
$$S_u(n)=\frac{4K_rV_{10}^2}{f}\frac{x_0^2}{(1+x_0^2)^{4/3}} \tag{3}$$

式中：V_{10}为10 m高处的平均风速；x_0=1 200f/V_{10}，f为风振频率，T=1/f ≈ 1/(0.0018V_{10})；K_r为10 m处摩擦因数，当地面粗糙度为0.30时该值为0.026。

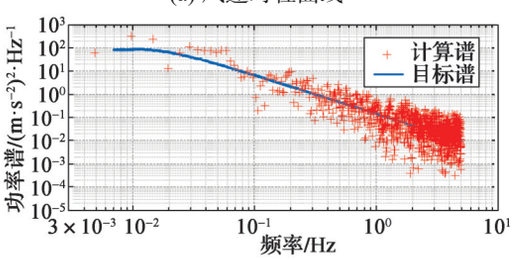
基于以上参数，计算得出脉动风速时程样本（平均风速为12 m/s）和频域校验如图5。由图5可知，本次模型谱与目标谱对应良好，符合要求。

当车辆遭遇横风时，由车速、风速几何关系可得合成风速V_R和合成风向角β[10-12]，详见图6。

横风与车辆移动合成的相对速度V_R和偏航角β可描述为：



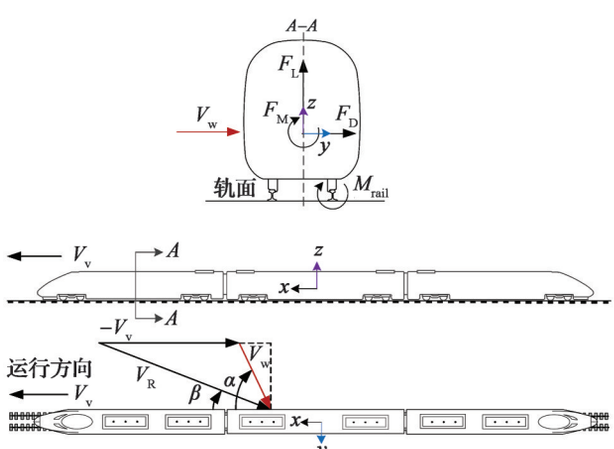
(a) 风速时程曲线



(b) 模拟谱与目标谱对比

图 5　脉动风速数值样本及校核

Fig. 5　Numerical samples and verification of fluctuating wind



V_v—列车车速；V_R—合成速度；V_w—横风速度；α—横风风向角；β—合成风偏航角。

图 6　横风下列车所受气动力及力矩

Fig. 6　Air force and torque received by train under cross wind

$$V_R=\sqrt{\left(\left|-V_v\right|+V_v\cos\alpha\right)^2+\left(V_w\sin\alpha\right)^2} \tag{4}$$

$$\beta=\arctan\left(\frac{V_w\sin\alpha}{\left|-V_v\right|+V_w\cos\alpha}\right) \tag{5}$$

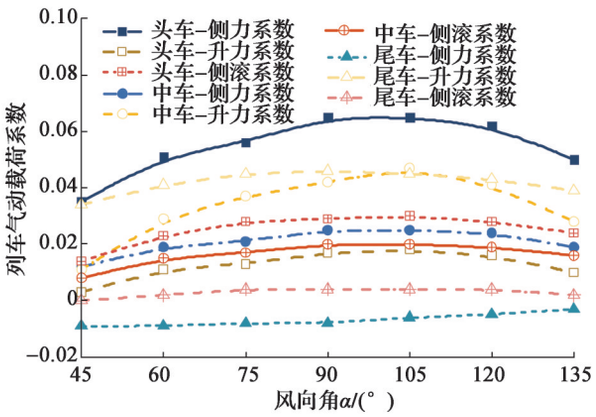
车辆通过曲线时所受横风力系主要考虑由侧向力F_D、竖向升力F_L和侧滚力矩F_M组成

$$\begin{Bmatrix}F_D(t)\\F_L(t)\\F_M(t)\end{Bmatrix}=0.5\rho AV_R^2\cdot\begin{bmatrix}C_D\\C_L\\HC_M\end{bmatrix} \tag{6}$$

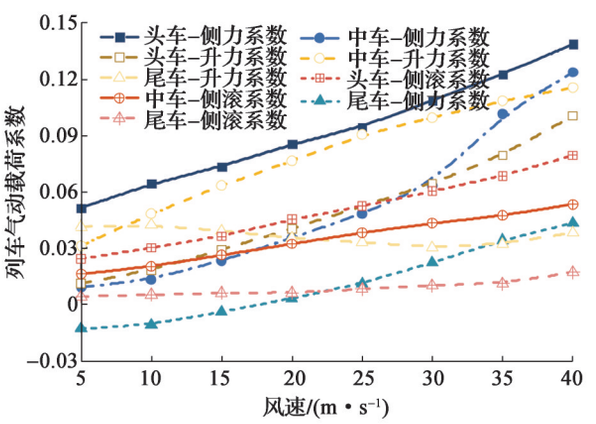
式中：ρ为空气密度(1.225 kg/m^3)；A为车辆侧面迎风面积；H为车体质心到轨面高度。

基于STAR-CCM+对列车气动载荷进行计算的计算结果如图7所示，计算工况中风偏角考虑为45°~135°（自然风的风向角大小定义为：来流方向位于车辆横向轴线法线方向右侧为大于90°，反之为小于90°，定义垂直于车体为90°），计算风速为1~40 m/s（此时车速

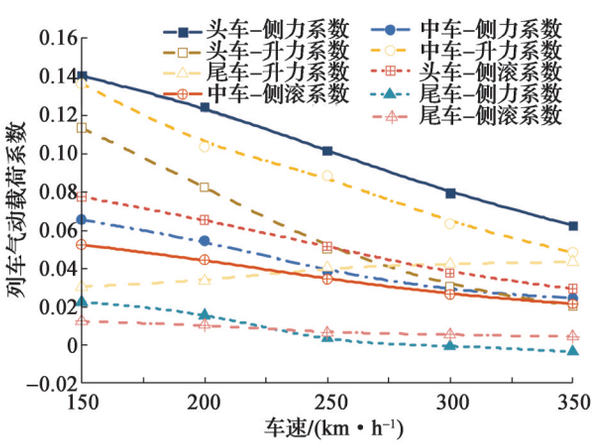
为 200 km/h），计算车速为 150~350 km/h(风速为 12 m/s)。



(a)列车气动载荷系数随风向角变化



(b) 列车气动载荷系数随风速变化



(c) 列车气动载荷系数随车速变化

图 7　车辆气动载荷系数

Fig. 7　Aerodynamic load coefficient of vehicle

真实大风环境下列车行驶时车体整个迎风面均匀受力，但在仿真计算中均布气动力无法实现加载。按照力的平移与等效原则，可使气动力加载至列车各气动简化中心上实现模拟，如图 8 所示（图中尺寸单位为 m）。列车气动载荷加载过程如图 9。

气动载荷加载分加载、稳定及卸载 3 个过程。SIMPACK 列车动力学模型坐标系与横风载荷气动模拟的车辆坐标系方向不同，计算得到的风载荷数据在与

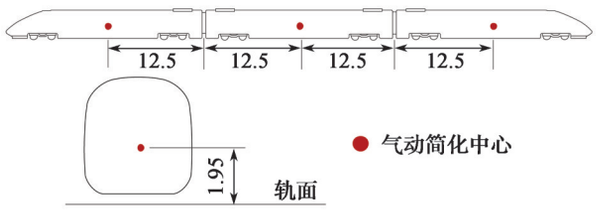


图 8　气动加载简化中心

Fig. 8　Pneumatic loading simplification center

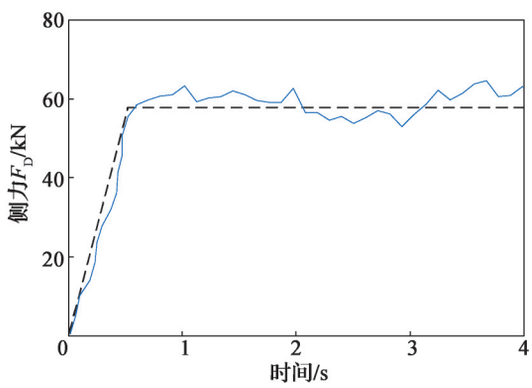


图 9　列车气动载荷加载过程

Fig. 9　Aerodynamic loading process of train

SIMPACK 坐标系统相匹配、转换后才可加载[13]。本文采用加载时间为 0.5 s，以车速 200 km/h，风速为 12 m/s 横风从列车运行方向右侧垂直作用于车体，以侧力为例且气动力载荷加载方式相同。

2　脉动横风激励对车辆曲线通过的影响

2.1　曲线内外侧风对车辆曲线运行影响

由曲线线路模型，输入线路参数可计算出列车过曲线时的脉动风激励下的动力学响应。曲线段线路条件设置见表 1。

表 1　曲线段线路条件设置(I)

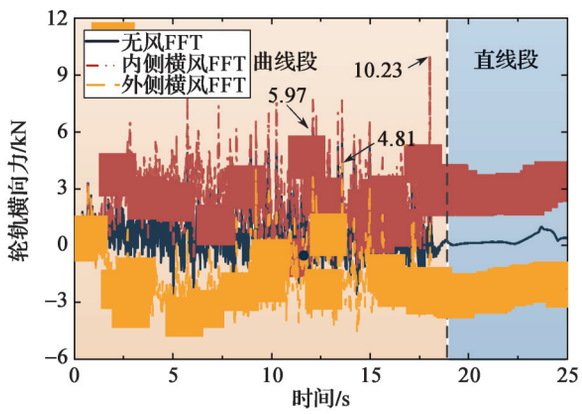
Table 1　Circuit condition setting of curved section (I)

项目	缓+圆+缓曲线长/m	圆曲半径/m	车速/(km·h⁻¹)	设计超高/mm
数值	480+200+480	3 200	200	110

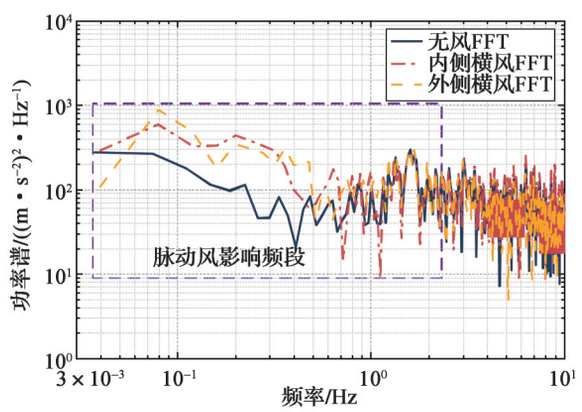
车辆行驶条件为车速 V_v=200 km/h(55.56 m/s)，风环境参数横风平均风速 12 m/s，以头车为例，脉动横风对车辆振动的影响结果如图 10 所示。

由图 10(a)可知，对比列车曲线通过时分别在曲线内侧和外侧加载脉动风的情况，轮轨横向力在无风条件下为 5.97 kN，在内侧横风条件下为 10.23 kN，在外侧横风条件下为 4.81 kN。由超高计算公式可知，平衡超高为 147.5 mm，而该线路超高 110 mm，欠超高量为 37.5 mm。分析可知，欠超高时未平衡力向外轨方向，内侧横风对车辆的倾覆稳定性影响更大。对于头车的轮轨横向力而言，内侧横风将本就靠外轨的轮对通过

车体的横向作用力更加推向了外轨方向，造成横向的轮轨动作用力加大，而外侧加载横风则正好相反。从图 10(b)可知，脉动风主要激起了车体结构低频振动，尤其从轮轨横向力可以看出，3 Hz以下振动激发最为显著。



(a) 不同工况下轮轨横向力时域对比



(b) 不同工况下轮轨横向力频域对比

图 10 曲线内外侧加载脉动横风对车辆振动影响

Fig. 10 Influence of fluctuating wind loaded inside and outside the curve on vehicle vibration

2.2 脉动横风对编组内车辆运行的影响

列车采用3辆编组，各车迎风面积、气动系数以及遭遇曲线内、外横风情况等均有所差异，车辆行驶条件为车速 200 km/h，风环境参数横风 12 m/s（强风中值），线路为曲线（I），计算结果见表2。

由表 2 可知，加载内侧风后各车响应大幅升高，而一定强度外侧风会使响应峰值降低，与此前结果一致。不同动力学评价指标的最大值并非总出现在同一节车，这是由车辆参数、气动系数差异等造成的，但头车仍最易受横风影响。

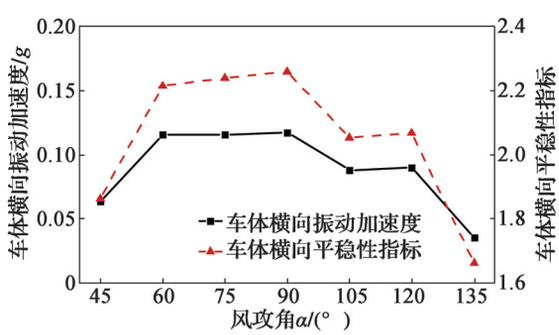
2.3 风攻角对车辆曲线平稳运行的影响

选定风攻角 α 为 45°~135°，平均风速 12 m/s 和 γ=0°，列车匀速 V_v=200 km/h(55.56 m/s)，对应气动载荷系数见图 7。线路为曲线（I），可得轮轨及车体响应，如图 11 所示。

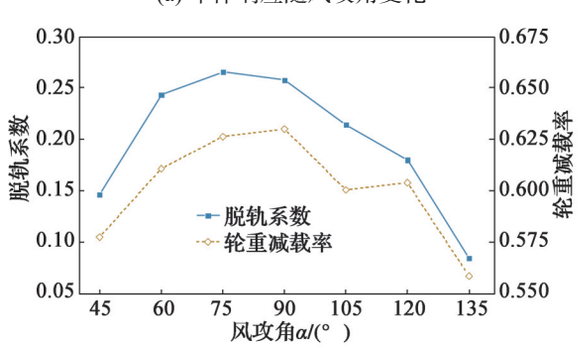
表2 脉动横风激扰下车辆动力学响应

Table 2 Vehicle dynamic response under gust excitation

动力学评价指标		工况	头车	中间车	尾车
车体	车体横向加速度/g	内侧风	0.161	0.159	0.156
		外侧风	0.152	0.150	0.159
		无风	0.157	0.158	0.152
	车体横向平稳性指标	内侧风	1.711	1.703	1.717
		外侧风	1.664	1.670	1.687
		无风	1.672	1.669	1.686
	车体垂向平稳性指标	内侧风	1.495	1.502	1.516
		外侧风	1.582	1.495	1.556
		无风	1.483	1.474	1.456
轮轨	脱轨系数	内侧风	0.120	0.125	0.134
		外侧风	0.131	0.207	0.117
		无风	0.109	0.100	0.127
	轮轨横向力/kN	内侧风	10.380	9.188	13.948
		外侧风	4.905	6.409	4.978
		无风	6.222	6.626	12.102
	轮重减载率	内侧风	1.013	0.916	0.988
		外侧风	0.585	0.538	0.573
		无风	0.904	0.815	0.881



(a) 车体响应随风攻角变化



(b) 轮轨响应随风攻角变化

图 11 风向角对车辆曲线运行的影响

Fig. 11 Influence of wind angle on vehicle curve passing

由图 11 知，列车通过曲线段时，车体及轮轨响应在风攻角 α 为 60°~90°出现峰值，风攻角为锐角时给车辆行驶带来风速效果叠加，造成响应加大。后续工况将取 α=90°作为典型参数进行计算。

3　脉动横风载荷下曲线参数限值管理

3.1　不同外轨超高工况

为研究不同外轨超高条件下的情况，特别设计了 5 种超高，如表 3 所示，涵盖了从欠超高过渡至过超高的情况。

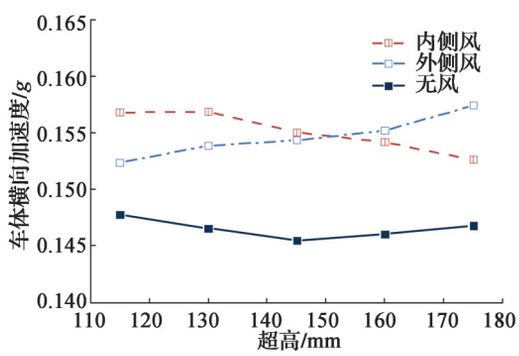
表 3　曲线段线路条件设置(II)

Table 3　Circuit condition setting of curved segment (II)

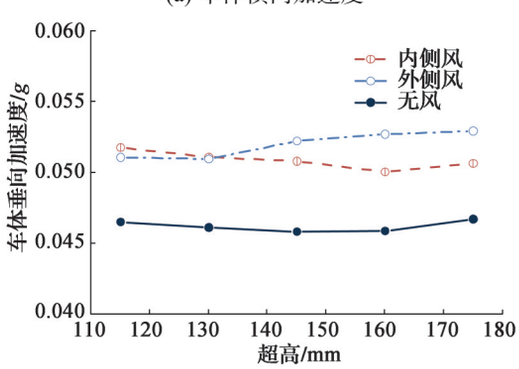
项目	圆曲线半径/m	车速/(km·h^{-1})	设计超高 /mm
数值	3 200	200	115/130/145/160/175

车辆行驶条件为匀速 V_v=200 km/h(55.56 m/s)，风环境横风风速 12 m/s（强风中值），计算结果（选整列车最大值作为代表）如图 12 所示。

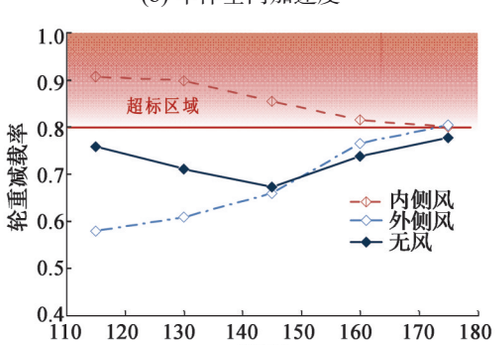
由前文可知，此时平衡超高为 147.5 mm，对应超高设置 145 mm 最为接近，所以可以看到在平衡点附近，无风时的横向加速度、垂向加速度、脱轨系数、



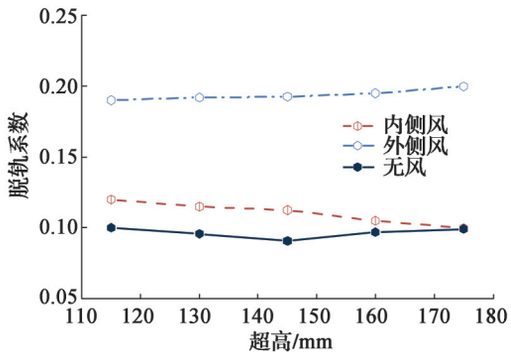
(a) 车体横向加速度



(b) 车体垂向加速度



(c) 轮重减载率



(d) 脱轨系数

图 12　脉动横风激励下不同超高对车辆曲线通过影响

Fig. 12　Influence of different superelevation on vehicle curve passing under the excitation of fluctuating wind

轮重减载率均出现了最小值，曲线呈现明显的“V”字形规律。

外轨欠超高时，车辆横向响应内侧风占主导，而过渡到外轨过超高时横向响应外侧风占主导地位。但外侧风条件下的脱轨系数（可能与外侧风及车体竖向夹角有关），随着超高值由欠超高过渡到过超高，外侧风条件下脱轨系数更大，而内侧风条件下有所减小。轮重减载率反映车辆行驶过程中车轮与钢轨间的贴靠程度，很明显在本文计算工况下，内侧风的作用直接导致了评价指标超标，这一点值得注意。

3.2　脉动横风载荷下的安全圆曲线半径

参考 TB 10621—2014《高速铁路设计规范》及武广高铁规定，进行不同圆曲线半径及配合参数设置，如表 4 所示。

表 4　曲线段线路条件设置(III)

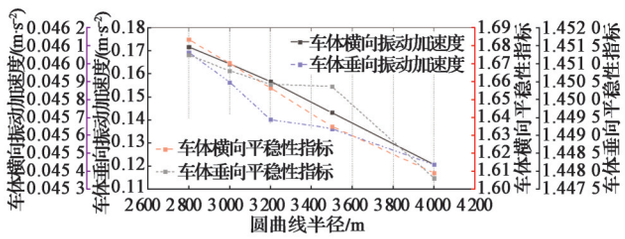
Table 4　Circuit condition setting of curved section (III)

圆曲线半径 R/m	设计超高 h_0/mm	欠超高 h_q/mm	缓和曲线长 l_0/m	夹圆曲线长 l_c/m
2 800	135	34	480	200
3 000	125	32	480	200
3 200	115	32	480	200
3 500	105	29	480	200
4 000	95	23	420	200

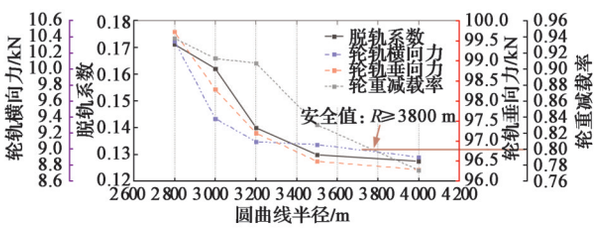
由于内侧风对列车曲线通过影响更大（轮重减载率更易超标），专门计算了加载内侧横风的响应结果，列车匀速 V_v= 200 km/h(55.56 m/s)，平均风速 12 m/s，风向角 α=90°，其余参数设定同 2.1 节，动力学响应指标如图 13 所示。

从图 13 可以看出，脉动横风激扰下高速列车响应评价指标的峰值随着圆曲线半径设置的增大而降低，安全性逐渐增大。其中轮重减载率（参考 GB/T 50157—2013[9]阈值为 0.8）对横风激扰最为敏感，临界半径为 3 800 m，即预设条件下，圆曲线半径[R]配合最小不

小于3 800 m才可以保障列车在脉动横风激励下的曲线通过安全性。



(a) 车体动力学响应指标



(b) 轮轨动力学响应指标

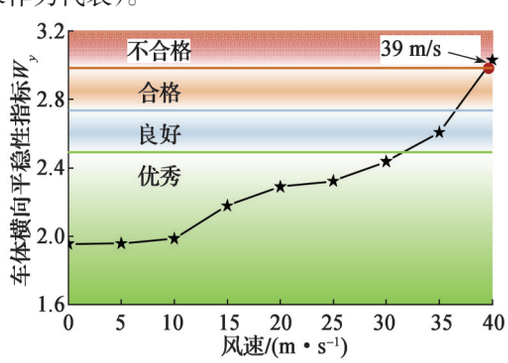
图 13　不同圆曲线半径工况下的动力学响应指标

Fig. 13　Dynamic response index under different radius of circular curve

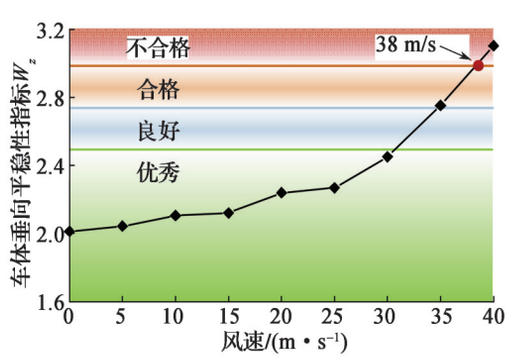
4　脉动横风载荷下列车运行限值管理

4.1　脉动风载荷下的安全风速

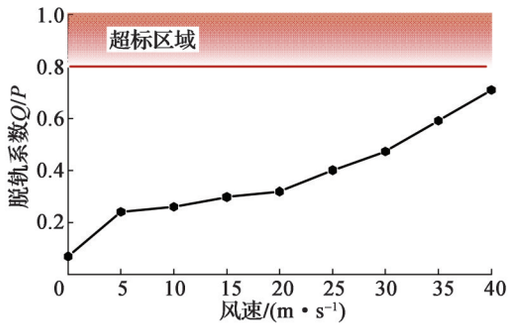
继续分析脉动横风不同平均风速的影响及其阈值，本节分析中平均风速为0.1~40 m/s，列车车速V_v=200 km/h (55.56 m/s)，其余参数与曲线（I）条件下相同，结果如图14所示（仅选取各指标最先超标的对应车辆结果作为代表）。



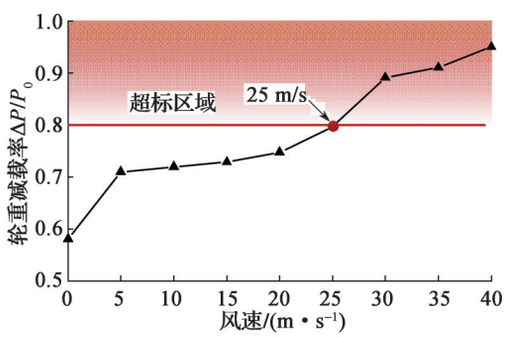
(a) 车体横向平稳性指标



(b) 车体垂向平稳性指标



(c) 脱轨系数



(d) 轮重减载率

图 14　脉动横风风速影响规律及其限值

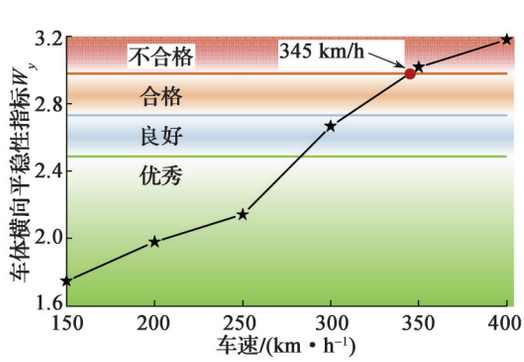
Fig. 14　Influence law and limit of fluctuating crosswind speed

由图14可知，车体振动响应中的W_y（阈值3.0）、W_z（阈值3.0）及轮轨响应中的$\Delta P/P_0$（阈值0.8）对风速变化最为敏感，临界平均风速分别为39 m/s、38 m/s及25 m/s。即当预设下（车速200 km/h时），最大平均风速达到25 m/s时轮重减载率已超标，已无法保障列车安全通过曲线段。

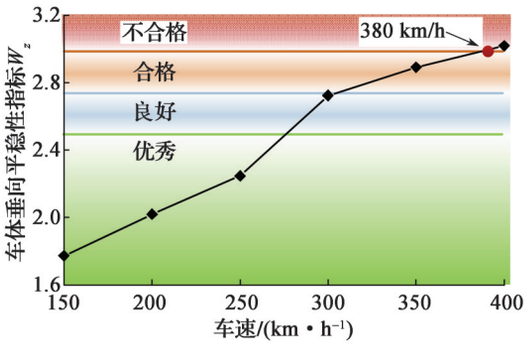
4.2　脉动横风载荷下的安全车速

研究脉动横风下不同车速的影响及其阈值，本节选定平均风速12 m/s，风向角α=90°，列车车速V_v从150 km/h(41.67 m/s)到400 km/h(111.11 m/s)，其余参数与曲线（I）条件下相同，结果如图15所示（仅展示最先超标指标）。

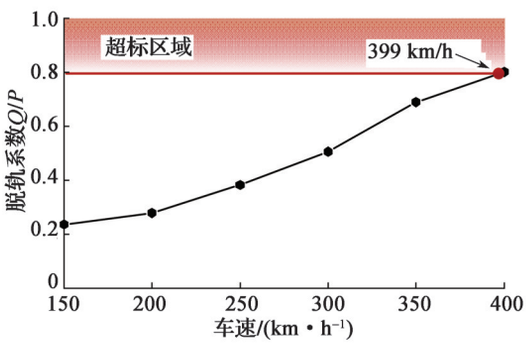
从图15可以看出，其中车体振动的W_y（阈值3.0）、W_z（阈值3.0）及轮轨响应中的Q/P（阈值0.8）、$\Delta P/P_0$（阈值0.8）对车速提高最为敏感，临界车速分别为345



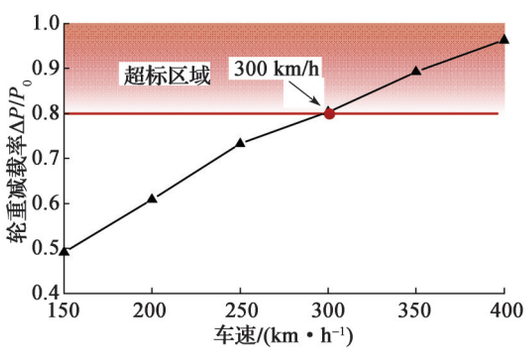
(a) 车体横向平稳性指标



(b) 车体垂向平稳性指标



(c) 脱轨系数



(d) 轮重减载率

图 15　脉动横风下车速影响规律及其限值

Fig. 15　Influence rule and limit of vehicle speed under fluctuating wind

km/h、380 km/h、399 km/h 及 300 km/h。即当预设下（风速 12 m/s 时），最大车速达到 300 km/h 时轮重减载率已超标。

5　结论

为探究脉动横风激励下的高速列车曲线通过平稳性问题，本文借助 SIMPCAK 及 MATLAB 建立了 3 辆车编组的高速列车及脉动横风气动载荷模型，参考相关标准设置了线路参数，分析了加载曲线内外横风影响、编组内车辆振动响应，并分析了不同外轨超高、不同圆曲线半径、不同风攻角、不同风速、不同车速等参数对车辆曲线安全通过的影响。结论如下：

①脉动横风易激起 3 Hz 以下的车体结构低频振动，风–车参数差异导致列车编组内响应呈现差异，多数情况下头车 T1 对横风最敏感，且其车体及轮轨响应在风攻角 α 为 60°~90°出现峰值。

②外轨欠超高时，车辆未平衡力与内侧风方向同向，车辆更易倾覆，外轨过超高时情况相反。外轨欠超高时，车辆横向响应内侧风占主导，而过渡到外轨过超高时横向响应外侧风占主导地位。车速 200 km/h (55.56 m/s)、风速 12 m/s、风向角 90°条件下，圆曲线安全半径为 3 800 m。

③车辆运行速度和横风平均风速的增长都会使得车辆平稳性迅速变差。车速 200 km/h(55.56 m/s)、风向角 90°、圆曲线 R3 200 m 条件下，最大风速限值为 25 m/s。风向角 90°、圆曲线 R3 200 m、风速 12 m/s 条件下，最大车速限值为 300 km/h。

参考文献：

[1] CAI C S, HU J X, CHEN S R, et al. A coupled wind-vehicle-bridge system and its applications: a review[J]. Wind and Structures, 2015, 20(2): 117-142.

[2] PROPPE C, ZHANG X Y. Influence of uncertainties on crosswind stability of vehicles[J]. Procedia IUTAM, 2015, 13: 98-107.

[3] HU P, HAN Y, CAI C S, et al. New analytical models for power spectral density and coherence function of wind turbulence relative to a moving vehicle under crosswinds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 188: 384-396.

[4] OLMOS J M, ASTIZB M Á. Improvement of the lateral dynamic response of a high pier viaduct under turbulent wind during the high-speed train travel[J]. Engineering Structures, 2018, 165: 368-385.

[5] ZHANG Y F, LI J, CHEN Z W, et al. Dynamic analysis of metro vehicle traveling on a high-pier viaduct under crosswind in Chongqing[J]. Wind and Structures, 2019, 29(5): 299-312.

[6] ZHANG Y F, LI J, CHEN Z W, et al. Running safety of metro train over a high-pier bridge subjected to fluctuating crosswind in mountain city[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2020, 76(2): 207-222.

[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] LI T, ZHANG J Y, ZHANG W H. An improved algorithm for fluid-structure interaction of high-speed trains under crosswind[J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19 (2): 75-81.

[9] 国家铁路局 . 高速铁路设计规范 : TB 10621—2014[S]. 北京 : 中国铁道出版社 , 2014.
National Railway Administration of People's Republic of

China. Code for design of high speed railway: TB 10621—2014[S]. Beijing: China Railway Press, 2014.

[10] 于梦阁 , 张继业 , 张卫华 . 平地上高速列车的风致安全特性 [J]. 西南交通大学学报 , 2011, 46(6): 989-995.
YU Mengge, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Wind-induced security of high-speed trains on the ground[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(6): 989-995.

[11] 于梦阁 , 张继业 , 张卫华 . 桥梁上高速列车的强横风运行安全性 [J]. 机械工程学报 , 2012, 48(18): 104-111.
YU Mengge, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Running safety of high-speed trains on bridges under strong cross-winds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 104-111.

[12] 张云飞 . 横风激扰作用下山区地铁车辆–轨道–高墩桥梁耦合振动研究 [D]. 重庆 : 重庆交通大学 , 2019.
ZHANG Yunfei. Research on the coupled vibrations of metro vehicle-track-bridge with high-pier subjected to cross-wind in mountain city[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.

[13] 朱永祥 , 张智华 , 李胜永 . 悬挂参数对横风下山地城市地铁车辆曲线通过性的影响 [J]. 机车电传动 , 2020(6): 126-131.
ZHU Yongxiang, ZHANG Zhihua, LI Shengyong. Influence of suspension parameters on the curve passage performance of metro vehicle under crosswind in mountain city[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(6): 126-131.