

暴风雪条件下列车气动特性及倾覆稳定性分析*

崔阳阳¹, 熊红兵^{1*}, 陈大伟², 邵雪明¹, 万 军¹

(1. 浙江大学 力学系, 浙江 杭州 310027;

2. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司 高速列车系统集成国家工程实验室, 山东 青岛 266111)

摘要: 为研究高速列车在恶劣气候条件(暴风雪)下的气动特征及安全性等问题,将采用欧拉双流体模型进行数值模拟的方法应用到对CRH-2高速列车在暴风雪条件下的研究中。开展了对列车周围空气流场的分析,建立了流场与列车受力之间的关系,提出了有关列车稳定性的临界倾覆速度的计算方法;在强侧风及强侧风和强降雪耦合的两种情况下对列车的倾覆稳定性进行了评价。研究表明,两种情况下列车倾覆临界速度的趋势相似,而且在强侧风及强降雪情况下,列车的侧向力系数、侧滚力矩系数比较单纯的侧风天气条件显著增加;降雪工况下列车的临界速度比无降雪时减小20%~50%,即降雪条件下,列车更容易发生倾覆;计算结果可以为在暴风雪条件下列车的安全行驶提供参考。

关键词: 高速列车;双流体模型;气动特性;暴风雪;倾覆稳定性

中图分类号: U271.91;O359;TH113.2*5 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)08-0877-05

Aerodynamic performance and overturning stability of high-speed trains in snowstorms

CUI Yang-yang¹, XIONG Hong-bing¹, CHEN Da-wei², SHAO Xue-ming¹, WAN Jun¹

(1. Department of Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. National Engineering Laboratory for System Integration of High-speed Train(South),
CSR Qingdao Sifang Co.,Ltd., Qingdao 266111, China)

Abstract: In order to solve the problems of aerodynamic characteristics and operation safety issues of the CRH-2 high-speed train under extreme weather conditions(snowstorms), the Eulerian two-phase model was investigated. After the analysis of aerodynamic performance around the train, the relationship between the flow around the train and the forces on the train was established. A method was presented to compute the limit safety speed of the train. The overturning stability of high-speed train was evaluated on the strong crosswind and the heavy snow coupling a strong cross-wind. The experimental results show that, in the above two conditions the trends of the limit velocity are the same that both have more possibility of overturning from inside to outside, and in snowstorm weather the side force and overturning moment increase significantly comparing with the crosswind condition. Comparing with the condition of crosswind without snow, the train limiting speeds under snowstorm decrease about 20%~50%, this means that the train is more easily to overturn under snowstorm condition. The results can provide a frame of reference for the train safe operation under strong snow and crosswind conditions.

Key words: high-speed train; two-phase model; aerodynamic performance; snowstorms; overturning stability

0 引 言

近些年来,高速列车显示出高效、节能、环保等优势,其发展也步入黄金时期。随着我国高速铁路的飞

速发展,列车的速度越来越快,列车在如此高速下行驶时,列车的气动阻力会急剧增加,列车周围流场受环境影响变化更大。如列车在强横风气候下行驶时,列车所受侧向力、侧偏力矩等随侧风风速的增加而急

收稿日期: 2012-02-23

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2009BAG12A01-C03)

作者简介: 崔阳阳(1985-),女,山东荣成人,主要从事高速铁路相关的多相流体力学方面的研究。E-mail: cuiyangyang@zju.edu.cn

通信联系人: 熊红兵,女,副教授,博士。E-mail: hbxiang@zju.edu.cn

剧增大,气动性能恶化,可能引起列车脱轨,甚至导致列车侧滚。2007年南疆线上,列车被13级大风吹翻,造成11节车厢脱轨,造成严重事故^[1-2]。

目前,针对横风对列车气动性能的影响研究较多。马卫华^[3]研究了高速动车组以350 km/h直线运行时,列车受横风影响的气动特性。文献[4-6]运用数值模拟较为系统地研究了列车在直线和曲线上的气动性能。文献[7-10]分别从风洞实验和数值模拟角度分析了横风对列车的影响,数值模拟结果与风洞实验结果都很好地吻合,进一步验证了使用数值模拟方法研究列车高速行驶时气动特性的可行性。

目前对列车在其他恶劣天气(特大暴雨、暴雪等)下行驶的气动性能研究较少。近似的研究也并不是以高速列车为对象,如北航的常士楠,艾素霄等^[11]利用动网格和UDF技术,数值模拟机翼表面结冰过程;也有一些学者研究风吹雪现象和形成机理,从而保证在大雪天气下的公路畅通等。关于在大雨、暴雪、风沙或者冰雹环境中运行的高速列车,一方面是研究安全监控系统的设计,及时掌握灾害发生信息保证高速列车安全运行^[12];另一方面基于实验研究分析,模拟暴风雨雪等气候条件,来验证新型列车各关键部件的功能性和安全性指标^[13]。此外,也有针对在恶劣天气条件下的改进预防措施,如融冰问题^[14],通过建造防雪栅以及铁轨除冰等来避免大雪以及由此产生的各类气象现象给列车运行的危害。

降雪对列车的行车安全有很大影响,因此通过研究给出列车在暴风雪工况下运行的安全行车速度是很有必要的。

基于此,本研究主要开展暴风雪条件下列车气动特征及倾覆稳定性分析。

1 双流体模型数值模拟

本研究采用Fluent对模型进行数值模拟分析,对于多相流问题进行数值模拟研究时,主要采用两种多相流模型,即由Crowe C. T(1982 & 1996)和Smoot L D(1985)^[15]等人提出的颗粒轨道模型和Gidaspo^[16]提出的以颗粒动力学为基础的双流体(Euler-Euler)模型。

颗粒轨道模型对流体相采用欧拉方法进行求解,采用拉格朗日方法跟踪求解颗粒相。对于复杂流动,该方法计算量大,难以给出颗粒相速度以及浓度的空间分布。双流体模拟将颗粒相视为拟流体,都将颗粒相和流体相视为连续介质,分别以各相的连续性方程、动量方程、能量方程为基础,采用统一的方法建立颗粒相和连续相守恒方程,并且可以考虑颗粒自身的湍流输运,以及和连续相之间因速度差引起的时均速

度的滑移,便于应用计算流体力学的已有成果。如刘永兵^[17]通过双流体模型研究管道内液固浆液输运,所建模型能有效描述管道内浆液流体形态,曹玉春^[18]对管式布风流化床内气泡的生长、融合,以及流动特性进行了数值研究。

本研究采用双流体模型对算例进行数值模拟研究。列车周围流场为不可压(列车速度为360 km/h ($Ma < 0.3$))、定常、粘性流动,湍流模型采用标准k-ε双方程模型。

1.1 双流体模型的连续相方程和动量守恒方程

1.1.1 空气相g和降雪相s的连续性方程

空气相g和降雪相s的连续性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k U_k) = 0 \tag{1}$$

式中: k —相,当 $k = g$ 时候,代表气相, $k = s$ 时候,代表降雪相; α_k — k 相的体积分数,双流体模型中 $\alpha_g + \alpha_s = 1$; ρ_k — k 相的密度, $\rho_g = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $\rho_s = 800 \text{ kg/m}^3$; U_k —第 k 相的速度。

1.1.2 动量守恒方程

(1) 空气相g:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g U_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g U_g U_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \cdot \tau_g + \alpha_g \rho_g g + K_{sg}(U_s - U_g) \tag{2}$$

式中: p —空气相g和降雪相s共享的压力; τ_g —空气相的应力应变张量; g —重力加速度, $g = 9.8 \text{ kg/m}^2$; $K_{gs} = K_{sg}$ —气相-固相动量交换系数。

(2) 降雪相s:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s U_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s U_s U_s) = -\alpha_s \nabla p + -\nabla p_s + \nabla \cdot \tau_s + \alpha_s \rho_s g + K_{gs}(U_g - U_s) \tag{3}$$

式中: p_s —固体压力^[19]。

其中:

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s(1 + e_s)\alpha_s^2 g_0 \theta_s$$

式中: e_s —雪的相碰撞恢复系数, $e_s = 0.7$; g_0 —径向分布函数; ρ_s —降雪相间碰撞概率; θ_s —雪相温度,与雪随机运动的动能成正比^[20]。

1.2 计算区域及网格划分

由于本研究重点研究列车整车的气动特性,为节省计算资源和时间,列车模型采用3节车(两动一拖编组)光滑车体,且简化了转向架、受电弓、风挡等机构。列车计算模型及计算区域如图1所示。模型采用半圆柱计算区域,在纵向、横向、垂向方向分别为600 m、400 m、200 m,列车长76.4 m。车头距进口边界为100 m。列车纵向上处于计算区域中线上。列车静止不动,流场速度与车速相等,方向相反即Z轴反方向。

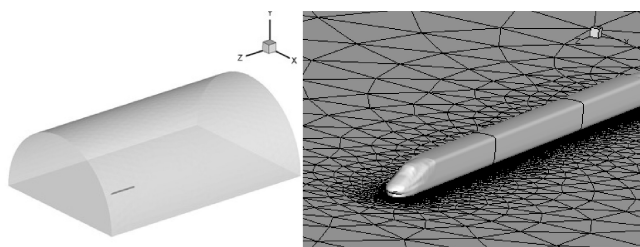


图1 列车计算区域和列车模型

本研究运用ICEM软件进行网格的划分,得到六面体核心hexcore网格类型,即复杂结构表面采用四面体网格,而在主要的计算区域采用六面体网格,这样可以控制网格的总数量,也保证了网格质量和计算精度。为了选择合适的网格,本研究前期比较了高密度、中等密度网格、低等密度网格下的光滑车体计算结果,以列车所受到的阻力为参照对象,高密度网格和中等密度网格的结果相差很小,分别为9 155 N和8 982 N,相差2%左右,但与低密度网格结果相差较大。综合考虑网格质量和计算效率,本研究选定如图1所示的中等密度非结构化网格,网格数量126万。

1.3 数值模拟边界条件设置

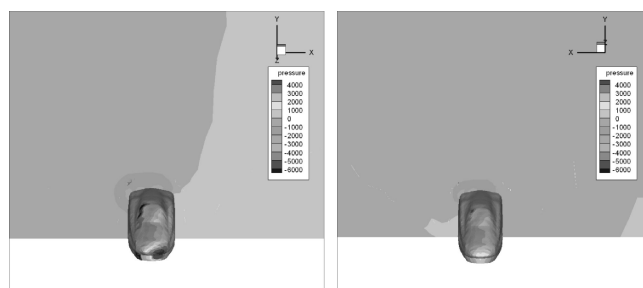
边界条件设置如图1所示,简述如下:

(1) 气相。入口处为速度入口边界条件,无横风的时候,速度方向与车身平行;有横风的时候,除了沿车身方向有速度外,垂直车身的方向有个速度入口(风向角为 90° ,即横风方向垂直于列车车身)。列车车身为无滑移壁面边界条件;地面相对于列车时运动的,设置为移动无滑移边界条件;出口为压力出口边界条件。

(2) 颗粒相。由于雪颗粒所占体积分数很小,本研究认为雪颗粒完全跟随风的运动,速度和风速相同,此外还有沿Y轴负方向下落的运动,速度为0.6 m/s。入口同样为速度入口边界条件。对于壁面,由于列车表明比较光滑,本研究采用部分滑移边界条件,出口为压力出口边界条件。

1.4 数值模拟的结果及分析

列车车头的压力云图如图2(a)所示,车尾压力云图如图2(b)所示。从图2中可以看出,列车在车头迎风侧的车鼻处出现最大正压,并且最大压力处向迎风侧移动了一定距离,而在背风侧车鼻以及车窗曲面过渡处出现了负压,这会使列车受到沿迎风方向的侧向力,有可能会造成列车脱轨。车尾受到的压力与车头相反。车尾在迎风侧在车窗过渡区出现最大负压,并且背风侧受到正压。这使得尾车受到沿背风向的侧向力,由于头车与尾车受到方向相反的侧向力,会使列车受到侧偏力矩的作用,这可能会导致列车遭遇脱轨的危险。这些结论与相关文献是吻合的^[21]。



(a) 车头压力分布

(b) 车尾压力分布

图2 列车车头、车尾压力分布

在无降雪工况下,本研究取车侧滑角 α 为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 的工况计算;而在极端强降雪工况下,考虑特大暴雪工况,即降雪量为24小时,降雪量35 mm,雪花下降速度0.6 m/s,雪的密度为 800 kg/m^3 ,本研究取车侧滑角 α 为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 的工况计算,利用对称原理对数据进行处理,则力及力矩系数曲线图如图3所示。

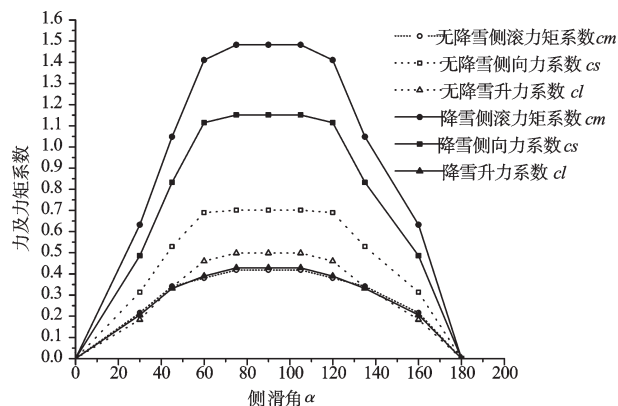


图3 力及力矩系数曲线图

列车在强侧风和强侧风及强降雪条件下的力及力矩系数曲线图如图3所示。由此可知,降雪对列车的气动性能影响较大。在相同侧风工况下,与无降雪工况相比,降雪条件下,列车受到的升力减小,这可能是由于降雪影响列车顶部气流流场的分布,造成了列车升力的降低。而侧向力和侧滚力矩都相较无降雪工况有显著增加,这说明由于雪的密度较大,在伴随强侧风的降落过程中,对列车产生的影响不能忽视,列车侧向力的增大比升力的减小幅值大,起主导作用,因而在降雪工况下,降雪不仅会影响轨道的通行品质,也会导致列车更易倾覆,尤其是在横风天气下,更应引起足够重视。

2 列车倾覆稳定性的分析

学术界一般采用机车抗稳定性和抗脱轨稳定性来衡量列车运行安全性。影响列车稳定性的因数较多,如车体质量、列车横向加速度、转向架横向刚度、列车动载荷、列车外形等。根据对影响列车运行的主

要因素的受力分析可知,列车主要受到气动横向力、气动升力、列车在曲线上运行时受到的离心力、车体振动惯性力、列车重力、以及车厢连接处的车钩力。由于车钩力对列车的横向弯矩较小,对列车的倾覆影响也较小,一般不考虑。综合考虑列车过曲线时的外轨超高等因素,通过动力学力矩平衡原理,即可得出列车临界安全行车速度与侧风之间的关系式^[22-23]。

由不同的风向角 α 可求得不同风速和车速工况,通过对不同车速和不同风速工况的计算,可以得到 α 与列车升力系数 cl 、侧向力系数 cs 、侧滚力矩系数 cm 间的关系式,从而可以求得不同侧风下列车的倾覆临界速度,计算公式如下:

$$\begin{aligned}
 cm &= \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V_{TW}^2 SL}, \\
 cs &= \frac{F_s}{\frac{1}{2}\rho V_{TW}^2 S}, \\
 cl &= \frac{F_l}{\frac{1}{2}\rho V_{TW}^2 S}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

式中: M —侧滚力矩, F_s —侧向力, F_l —升力, V_{TW} —列车速度与风速的和速度, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $S = 268.34 \text{ m}^2$, $L = 76.2 \text{ m}$ 。

本研究计算拟合图3中的6条曲线可得列车在强侧风、无降雪工况下侧滑角 α 和列车升力系数 cl 、侧向力系数 cs 、侧滚力矩系数 cm 间的关系式(忽略常数项),结果如下:

$$\begin{aligned}
 cm &= -2.565 \ 9E-07\alpha^3 - 1.845 \ 0E-05\alpha^2 + 8.500 \ 9E-03\alpha \\
 cs &= -1.149 \ 4E-06\alpha^3 + 9.034 \ 8E-05\alpha^2 + 9.716 \ 8E-03\alpha \\
 cl &= -1.291 \ 5E-06\alpha^3 + 1.432 \ 3E-04\alpha^2 + 3.506 \ 8E-03\alpha
 \end{aligned}$$

本研究通过拟合可得列车在强侧风和强降雪工况下侧滑角 α 和列车升力系数 cl 、侧向力系数 cs 、侧滚力矩系数 cm 间的关系式(忽略常数项),结果如下:

$$\begin{aligned}
 cm &= -3.295 \ 8E-06\alpha^3 + 3.375 \ 2E-04\alpha^2 + 1.452 \ 8E-02\alpha \\
 cs &= -2.540 \ 0E-06\alpha^3 + 2.5676E-04\alpha^2 + 1.176 \ 8E-02\alpha \\
 cl &= -5.240 \ 2E-07\alpha^3 + 2.243 \ 0E-05\alpha^2 + 7.093 \ 9E-03\alpha
 \end{aligned}$$

本研究通过上述拟合曲线即可求得不同侧风下列车的倾覆临界速度,如表1所示,分别可得列车直线运行以及列车在曲线上运行时,风速与列车速度之间的关系。列车以 360 m/s 速度运行时的转弯半径很大,约有 $7 \ 000 \text{ m}$ 。因此在本研究的讨论中可以忽略曲线上弧度的影响。

从表1可知,列车在侧风作用下,随着侧滑角的增加,列车的风速也逐渐增大,列车的临界速度逐渐减小。列车在曲线上运行时,风从外侧吹向内侧时的风速小于风从内侧吹向外侧的风速,即列车更容易向内

表1 无降雪条件下列车在不同工况下风速与临界速度关系表

侧滑角 α $/(^\circ)$	直线上倾覆 $/(nr \ s^{-1})$		曲线外侧倾覆 $/(nr \ s^{-1})$		曲线内侧倾覆 $/(nr \ s^{-1})$	
	风速	车速	风速	车速	风速	车速
	15	17.799	66.461	20.799	77.666	15.718
30	25.494	44.184	27.490	47.643	23.797	41.243
45	31.022	31.047	32.689	32.716	29.513	29.536
60	34.892	20.170	36.406	21.045	33.485	19.356
75	37.205	9.996	38.644	10.382	35.853	9.632
90	37.979	0.030	39.389	0.0314	36.640	0.029

侧倾覆,这与列车运行时侧翻的情况是一致的,由于轨道的超高,列车更易于向轨道较低侧侧翻。而列车在直线上行驶的倾覆风速处于列车在曲线上运行时向两侧倾覆的风速中间值。列车向外侧倾覆时临界风速大,即在同等风速条件下列车向内侧倾覆的可能性小。

降雪条件下列车在不同工况下风速与临界速度关系表如表2所示。从表2可以看出,降雪条件下,列车在强侧风作用下,随着侧滑角的增加,列车的临界风速减小。其倾覆规律趋势与无降雪情况相似,即相对外侧倾覆而言列车更易向内侧倾覆,直线行驶的临界倾覆风速为上述两临界风速的中间值。与无降雪工况相比,降雪工况下处于相同侧滑角时,列车在直线上运行和在曲线上运行而发生倾覆的风速都较无降雪时小,即降雪条件下,列车更容易发生倾覆。与无降雪的情况相比,降雪条件下列车的限速减小约 $20\% \sim 50\%$ 。相较于暴风雨^[24] ($10\% \sim 20\%$)和沙尘暴^[25] ($10\% \sim 15\%$)天气下,限速的减小更为显著。这主要是由于受降雪的影响,列车周围流场较无降雪工况变化较大,尤其是列车迎风面和列车背风面列车的压力变化较大,降雪会部分附着在列车表面,从而影响列车表面的粘性力增大,使列车受到侧向力以及侧滚力矩增大,从而导致列车更易倾覆。

表2 降雪条件下列车在不同工况下风速与临界速度关系表

侧滑角 α $/(^\circ)$	直线上倾覆 $/(nr \ s^{-1})$		曲线外侧倾覆 $/(nr \ s^{-1})$		曲线内侧倾覆 $/(nr \ s^{-1})$	
	风速	车速	风速	车速	风速	车速
	15	13.765	51.398	15.236	56.892	12.600
30	17.577	30.463	18.421	31.926	16.802	29.120
45	19.723	19.739	20.374	20.374	19.101	19.101
60	20.999	12.138	21.569	12.468	20.445	11.818
75	22.087	5.934	22.280	5.986	21.945	5.896
90	22.793	0.018	22.940	0.018	22.647	0.018

3 结束语

研究表明,在强侧风和强降雪的条件下,列

车高速行驶时周围的流场流动情况将更加复杂,气动对列车行车安全的影响将更为显著。降雪条件下,列车受到的升力减小,而侧向力和侧滚力矩都相较无降雪工况有显著增加,列车侧向力的增大比升力减小的幅值大。降雪对轨道的通行品质有很大影响,特别是在横风条件下更易倾覆。列车在侧风作用下,随着侧滑角的增加,列车的风速也逐渐增大,列车的临界速度逐渐减小;列车在曲线上运行时,风从外侧吹向内侧时的风速小于风从内侧吹向外侧的风速,即列车更容易向内侧倾覆;列车在直线上行驶的倾覆风速处于列车在曲线上运行时向两侧倾覆的风速的中间值;降雪工况下处于相同侧滑角时,列车在直线上运行和在曲线上运行而发生倾覆的风速都比无降雪时小,即降雪条件下,列车更容易发生倾覆。与无降雪的情况相比,降雪条件下列车的限速减小约20%~50%。

参考文献(References):

- [1] 张曙光. CRH2型动车组[M]. 北京:中国铁道出版社, 2008.
- [2] WU Z, ZHANG J, ZHU C. Dynamic factor analysis of train overturning accident in southern Xinjiang[J]. *Advances in Mechanics*, 2007(5): 87-89.
- [3] MA W, LUO S, SONG R. Influence of cross-wind on dynamic performance of high-speed EMU on straight track [J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology*, 2009, 23(3): 1-5.
- [4] KANG K, WANG W, CHEN Y. Operating safety analysis of the high speed-train running on a curve under the steady characteristics forces of cross wind[J]. *Railway Locomotive & Car*, 2009, 29(5): 11-13.
- [5] YANG Z, MA J, CHEN Y. The unsteady aerodynamic characteristics of a high-speed train in different operating conditions under cross wind[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2010, 32(2): 18-23.
- [6] LIANG X, SHEN X. Lateral aerodynamic performances of maglev train when two trains meet with wind blowing[J]. *Journal of Center South University*, 2007, 38(4): 751-757.
- [7] MASSON E, ALLAIN E, PARADOT N. CFD Analysis of the Underfloor Aerodynamics of a Complete TGV High Speed Train Set at Full Scale[C]// *Vehicle Aerodynamics*. Berlin: [s.n.], 2009: 188-203.
- [8] JAVIER G, JORGE M, ANTONIO C, et al. Comparison of Experimental and Numerical Results for a Reference CAF Train Exposed to Cross Winds[C]// *Vehicle Aerodynamics*. Berlin: [s.n.], 2009: 82-92.
- [9] CHRISTINA R, THOMAS R, WU D. Computational modeling of cross-wind stability of high speed trains[C]. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Jyvaskyla. 2004.
- [10] STEPHANE S, CHRISTIAN B, MARC D. Effect of cross winds on high-speed trains: development of a new experimental methodology [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004(92): 535-545.
- [11] 常士楠, 艾素霄, 陈余, 等. 一种飞机机翼表面结冰过程仿真方法[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(5): 2538-2541.
- [12] 王彤. 高速铁路防灾安全监控系统研究与开发[J]. *中国铁路*, 2009(8): 25-28.
- [13] GABRIEL H. 气候试验使列车免受暴风雨雪影响[J]. *国外铁道车辆*, 2008(6): 37-39.
- [14] 王国梁. 接触网融冰防冰问题的分析研究[J]. *铁道工程学报*, 2009(8): 93-95.
- [15] CHE D, LI H. Multiphase flow and its application [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007: 518-525.
- [16] GIDASPOW D. Multiphase Flow and Fluidization [M]. America: Academic Press, Boston, 1994.
- [17] LIU Y, CHEN J, YANG Y. Numerical simulation of liquid-solid two-phase flow in slurry pipeline transportation [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Sciences*, 2006, 40(5): 858-863.
- [18] CAO Y, LI X, YAN J. Numerical simulation of dense gas-solid flow in pipe-type fluidized bed [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2005, 39(6): 795-800.
- [19] LUN C K K, SAVAGE D J. Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flowfield [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1984(140): 223-256.
- [20] DING Jian-min, GIDASPOW D. A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow [J]. *AIChE Journal*, 1990, 36(4): 523-538.
- [21] 宋洋, 任尊松. 强侧向风作用下的高速列车动力学性能研究[J]. *铁道车辆*, 2006, 44(10): 4-7.
- [22] GAO G J, TIAN H Q. Effect of strong cross-wind on the stability of trains running on the Lanzhou-Xinjiang railway line [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2004, 26(4): 36-41.
- [23] TIAN H Q. Train Aerodynamics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.
- [24] SHAO Xue-ming, WAN Jun, CHEN Da-wei, et al. Aerodynamic modeling and stability analysis of a high-speed train under strong rain and cross-wind conditions [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2011, 12(12): 964-970.
- [25] XIONG Hong-bin, YU Wen-guang, CHEN Da-wei, et al. Numerical study on the aerodynamic performance and safe running of high-speed trains in sandstorms [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2011, 12(12): 971-978.