

文章编号: 1000-4750(2015)12-0249-08

防风栅对高速列车挡风作用的数值模拟

李 波^{1,2}, 杨庆山^{1,2}, 冯少华¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 结构风工程与城市风环境北京市重点实验室, 北京 100044)

摘 要: 该文采用 CFD 数值模拟的方法研究了防风栅对高速列车的挡风作用。首先, 根据附加源项法的基本原理, 将防风栅等效为多孔介质, 给出了对其挡风性能模拟的高效方法, 通过与风洞试验对比, 验证了该方法的有效性。在此基础上, 研究了不同开孔率防风栅下游的流场特征, 结果表明, 40%开孔率的防风栅挡风性能较好。然后, 应用动网格技术, 仿真得到列车运行状态下的气动力, 对比表明该文得到的列车气动力与实测结果相吻合。最后, 通过脱轨系数和轮重减载率, 评估了 40%开孔率的防风栅遮挡下高速列车在横风作用下的安全性, 结果表明, 该种防风栅提高了列车在强风区的运行效率。

关键词: 防风栅; 高速列车; 挡风; CFD 模拟; 多孔介质

中图分类号: U298.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.09.0743

WINDBREAK PERFORMANCE OF WIND FENCE ON HIGH SPEED TRAIN BASED ON NUMERICAL SIMULATION

LI Bo^{1,2}, YANG Qing-shan^{1,2}, FENG Shao-hua¹

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

2. Beijing's Key Laboratory of Structural Wind Engineering and Urban Wind Environment, Beijing 100044, China)

Abstract: The windbreak performance of the wind fence on a high speed train is investigated by CFD numerical simulation method. Firstly, a wind fence is equivalent to porous media and the additional source method is explored to simulate its windbreak performance. By comparing of the results drawn from simulation and wind tunnel tests, the provided method is validated. Based on the given method, the windbreak performance of a wind fence with different porosity is investigated, the results show that optimal porosity is 40%. The aerodynamic forces of a train are simulated by the moving grid method, which agree with the results drawn from the site measurement. Finally, the safety of a high speed train is evaluated in the action of across wind. The results show that a wind fence can improve the efficiency of a train.

Key words: wind fence; high speed train; windbreak performance; CFD simulation; porous media

列车的安全运行是铁路运输的基本要求, 横风影响下的列车的稳定性是衡量列车安全运行的重要指标^[1]。然而, 随着运行速度的不断提升, 列车行车的安全性也在遭受极大挑战, 横向风作用下列车的安全显得更加突出。横风导致的各类列车脱轨、倾覆以及停运事故时有发生。1981年在印度发生了飓风将客车吹落桥下造成 800 多人死亡的重大

灾难^[2]; 1986 年 12 月在日本山阴线的余部桥上, 强风将列车吹落桥下, 造成了日本列车运行史上最为重大的列车车辆交通事故, 自余部事故以后的 10 年间日本又发生了 3 起强风引起的铁路事故^[3]; 2007 年 2 月 28 日 02:05, 由乌鲁木齐开往阿克苏的 5807 次旅客列车行至南疆线珍珠泉至红山渠间 4500 m 处, 因大风造成机后 9 位~19 位车辆脱轨,

收稿日期: 2014-09-01; 修改日期: 2015-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378060); 高等学校学科创新引智计划项目(B13002)

通讯作者: 李 波(1978—), 男, 湖北武汉人, 副教授, 工学博士, 从事风工程与钢结构研究(E-mail: libo_77@163.com)。

作者简介: 杨庆山(1968—), 男, 河北蓟县人, 教授, 工学博士, 从事风工程与空间结构研究(E-mail: qshyang@bjtu.edu.cn);

冯少华(1986—), 女, 山西大同人, 工学硕士, 从事风工程研究(E-mail: 10121222@bjtu.edu.cn)。

造成 3 名旅客死亡, 2 名旅客重伤的重大事故^[4]。

为了保证列车的安全运行, 我国已经建立起了铁路防风体系, 主要包括在强风区铁路沿线修建风屏障与构建大风预警指挥系统^[5]。

实腹式风屏障(也称挡风墙)在列车运行速度较低的条件较常采用, 特别是在地质条件较好的地区, 采用实腹式风屏障较为经济。但是, 对于高速铁路, 实腹式风屏障对下部结构反作用力大, 造价高, 施工周期长的缺点更加突出, 因此, 常需要在风屏障上开设孔洞(也称防风栅)^[6], 在保证挡风效果的同时, 减小基底反力, 并采用钢立柱+金属板的制作方式(图 1), 提高施工速度。



图 1 铁路风屏障

Fig.1 Railway wind barrier

关于铁路风屏障挡风性能的研究大多集中于实腹式挡风墙。姜翠香等^[7]采用 CFD 数值模拟的方法研究了挡风墙高度及其设置位置对列车气动性能的影响。刘风华^[8]则对 4 种不同类型挡风墙对列车的挡风效能进行了分析, 结果表明加筋对拉式挡风墙的防护效果最好, 其次是“L”型和薄型挡风墙, 土堤式挡风墙防护效果最差。针对上述问题, 张洁等^[9]对土堤式挡风墙的坡角进行了优化研究, 用以提高其挡风性能。李燕飞等^[10]采用 CFD 数值模拟的方法, 首次研究了开孔式挡风墙对列车气动力的影响。值得注意的是, 上述研究均是以静态列车为研究对象, 并未考虑列车车速的影响, 对于普通列车, 上述结论具有一定指导作用, 但对于高速列车, 其气动性能与车速密切相关, 需要应用动网格技术进行动态模拟^[11]。更为重要的是, 需要选择合适的实测工况, 验证 CFD 数值模型的有效性。

另一方面, 在 CFD 数值模型中直接模拟风屏障上的孔洞, 会显著增加模型的网格数, 严重影响计算效率, 甚至导致计算难以进行。因此, 需要采用简化的方法来模拟开孔式风屏障的挡风性能。Wilson 等^[12]最早提出可以将开孔式风屏障等效为

多孔介质, 采用附加源项法模拟其挡风性能。Santiago 等^[13]应用附加源项法研究了孔隙率在 0~50% 范围内的防风栅下游流场特性。Maruyama^[14]将附加源项法扩展至 LES 求解, 并通过风洞试验验证了模拟结果。

本文首先将根据附加源项法建立并验证铁路风屏障 CFD 数值简化模型; 然后选择实测工况, 验证列车动模型的有效性; 在此基础上研究了防风栅对高速列车的挡风作用。

1 防风栅的简化 CFD 数值模型

1.1 附加源项法基本原理^[15]

多孔介质是指一类由不规则骨架形成、包含空隙或缝隙的物质(图 2)。

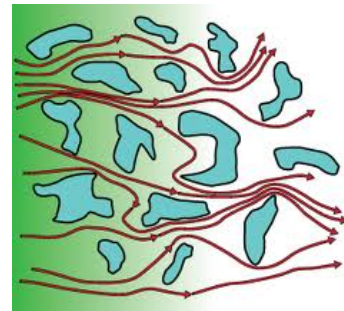


图 2 多孔介质

Fig.2 Porous Media

如果无需模拟流体在多孔介质中的流动状态, 仅仅只关心该类物质对流体流动的影响, 那么在 CFD 数值模拟中, 可以在多孔介质区域中设置以试验为基础的流动阻力, 以此模拟多孔介质对流动的影响, 并通过在动量方程中增加动量源项来实现, 即所谓的附加源项法。

附加源项法的基本方程可以写为:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_i 表示速度矢量; x_i 表示尺度矢量; t 表示时间; P 表示压力; ρ 表示空气密度; ν 表示粘度; S_i 表示附加源项, 可以写成如下形式:

$$S_i = \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu u_j + \sum_{j=1}^3 k_{ij} \frac{1}{2} \rho |u_j| u_j \quad (2)$$

式中: μ 表示粘性系数; D_{ij} 表示渗流系数; k_{ij} 表示压力损失系数。

可以看出, 附加源项由粘性损失项(即式(2)中

右边第一项)和惯性损失项组成(即式(2)中右边第二项)。风屏障厚度方向较其它两个方向小很多,可以忽略粘性损失项,仅考虑来流向的惯性损失项,此时附加源项可以写为:

$$S_1 = \sum_{j=1}^3 k_j \frac{1}{2} \rho |u_j| u_j \approx k \frac{1}{2} \rho |u_1| u_1 \quad (3)$$

其中,来流向压力损失系数 k 与风屏障孔隙率密切相关,可以按下式通过测试风屏障上游压力 p_u 与下游压力 p_d 计算得到(图 3)。

$$p_u - p_d = k \frac{1}{2} \rho |u_1| u_1 \quad (4)$$

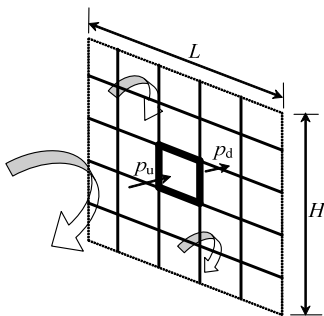


图 3 压力降测试

Fig.3 Pressure reduction measurement

不同学者通过试验给出了压力损失系数模型,目前比较常用的模型有以下几种^[16]:式(5)表示的是 Reynolds 模型,式(6)表示的是 Hoerner 模型,式(7)表示的是 Bailey 模型。

$$k = 1.04(1 - \phi^2) / \phi^2 \quad (5)$$

$$k = \frac{1}{2} \left(\frac{3}{2\phi} - 1 \right)^2 \quad (6)$$

$$k = \left(\frac{1 - \phi^2}{\phi^2} \right) \left[\frac{18}{Re} + \frac{0.75}{\log(Re + 1.25)} + 0.055 \log(Re) \right] \quad (7)$$

式中: ϕ 是风屏障孔隙率; Re 是以孔洞尺寸表示局部雷诺数。

1.2 模型的建立与验证

上节可以看出,选择合适的压力损失系数模型是风屏障挡风性能简化模拟的关键,本节将以 Maruyama 完成的风洞试验^[14]为算例,建立并验证防风栅 CFD 数值模型。该试验在风速为 10 m/s 的均匀风场中完成,为了避免风洞洞壁边界层的干扰,试验在风洞内搭建的平台上完成。试验所用防风栅由 3 mm×3 mm 的长条粘合而成,高 100 mm,长 300 mm,厚 6 mm,孔隙率为 48%。Maruyama 测量得到了防风栅不同位置处的流场特性。

定义防风栅底部中心为原点,来流方向为 x 轴正向, z 轴沿防风栅高度方向指向上, y 轴沿防风栅长度方向指向右,按照试验尺寸建立 CFD 数值模型。流域取为 4500 mm(长)×2000 mm(宽)×1800 mm(高),模型置于流域 1/3 处。采用结构化网格划分单元,通过大量试算,防风栅壁面第一层网格尺寸设为 10 mm,内层网格尺寸设为 20 mm,外层网格尺寸为 70 mm,单元总数超过 30 万(图 4)。

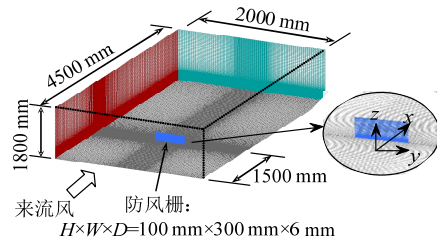


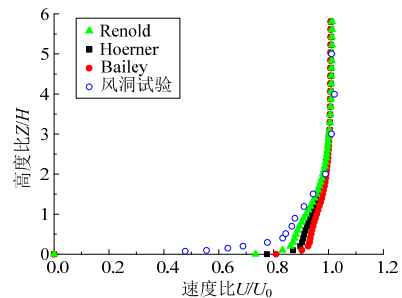
图 4 CFD 数值模型

Fig.4 CFD numerical model

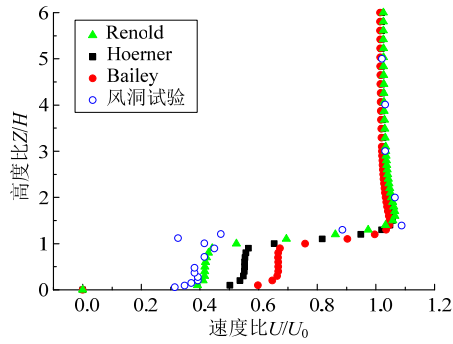
采用速度入口条件(10 m/s 的均匀来流)和压力出口条件,流域顶部设置为对称边界,流域两侧面及底面设置为无滑移壁面。将防风栅区域定义为多孔介质,采用上节所述的附加源项法进行 RANS 求解,其中,湍流采用 RNG $k-\epsilon$ 两方程模型模拟,压力损失系数模型分别采用了 Reynolds 模型、Hoerner 模型和 Bailey 模型。

图 5 给出了 x 坐标分别为 $-H$ 、 H 、 $2H$ 、 $4H$ 、 $8H$ (H 为防风栅高度)中线处试验与数值模拟得到的风速剖面,其中, Z 是高度, U 是风速, U_0 是来流风速。

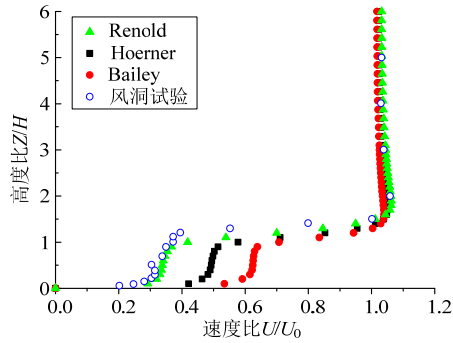
由图 5 可以看出,数值模拟得到的不同位置处风速剖面变化规律与试验结果相同,但风速值均偏大;压力损失系数模型对防风栅上游(即 $X=-H$)流场影响不显著,三种模型得到的结果基本相同,但对下游流场影响十分显著,不同压力损失系数模型得到的结果差别较大,采用 Renolds 模型得到的结果与试验最为接近,这说明该模型能够较好的模拟防风栅挡风性能。因此,本文将采用 Renolds 模型对铁路风屏障的挡风性能进行模拟。



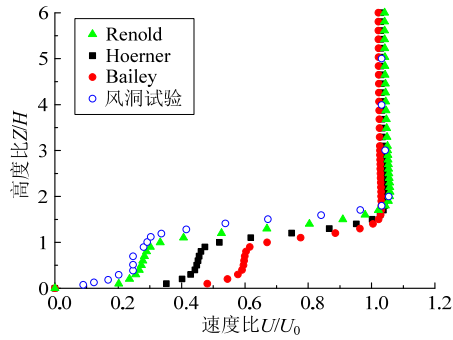
(a) $X=-H$



(b) $X=H$



(c) $X=2H$



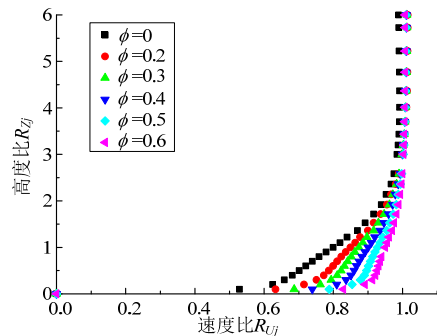
(d) $X=4H$

图5 模拟与试验结果

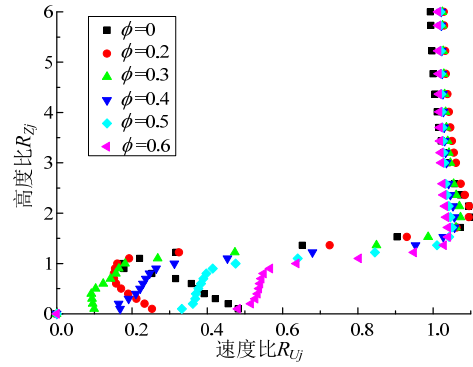
Fig.5 Simulation and test results

图6给出了不同开孔率风屏障下游无量纲风速分布图。

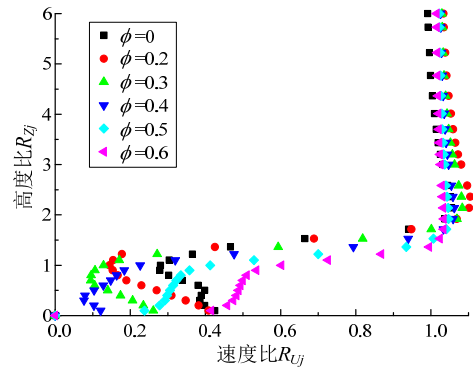
由图6可以看出,风屏障上游(即 $X=-H$ 处),风屏障挡风高度大致为 $2H$,在该区域内,风速均随着高度的增加而增加,同一高度处,孔隙率越大,



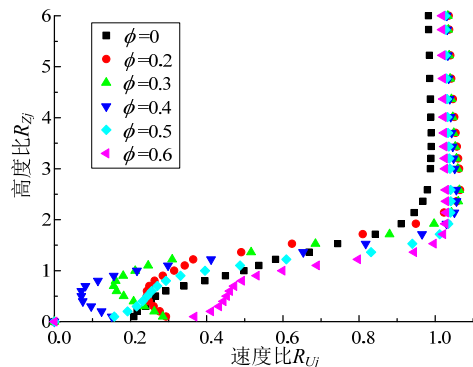
(a) $X=-H$



(b) $X=H$



(c) $X=2H$



(d) $X=4H$

图6 风速分布图

Fig.6 Distribution of wind velocity

风速越大。风屏障下游, H 高度范围内风速下降较多,该高度以上风速急剧增加,达到 $2H$ 高度处时,风速与来流基本一致。需要注意的是, H 高度范围内风速并非随着高度的增加而增加,孔隙率小于50%时,受回流风影响,风速随高度的增加而减小,底部会出现较大风速,这说明合适的孔洞能够提高挡风效率。当距离较近时($x=H$),30%开孔率挡风效果最优,随着距离的增加,40%开孔率的挡风效果越来越明显。综合考虑后,40%开孔率的风屏障挡风性能较好,该开孔率时,风屏障下游风速比分布如图7所示。

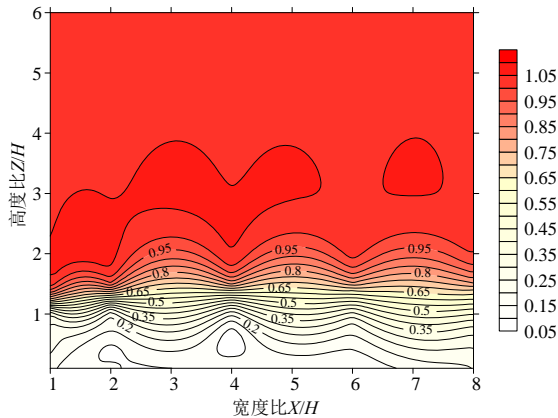


图 7 风速分布图

Fig.7 Distribution of wind speed

2 运动列车气动效应的数值模拟

乌鲁木齐铁路局和中南大学联合对新疆百里风区运行的列车气动特性进行了实测试验^[17]。该试验在小草湖至红层区段进行，通过布置在试验车体表面的压力传感器获得风压分布，然后采用分块积分法得到作用于试验列车的气动力。表 1 给出了实测时列车运行车速与风速。由于上行时列车静止，本节将主要采用 CFD 数值的方法对下行工况进行模拟。

表 1 实测环境

Table 1 List of environment conditions

运行方向	列车车速/(km/h)	风速/(m/s)
上行	0	19.4~21.0
下行	99	21.2

本文通过多次建模试算确定流域为：600 m (长)×400 m(宽)×150 m(高)。在 CFD 数值模拟中，列车采用四节编组，由一节 DF11 型机车与三节 YZ25K 型客车组成，车厢之间由风挡连接。列车编组总长 98.05 m，忽略转向架、车门把手、受电弓等局部小型构造(图 8)。流域顶面设为对称边界，流域底面设为无滑移壁面，风来流面设为速度入口(风速为 21.2 m/s)，其他侧面均设置为自由出流^[18]。

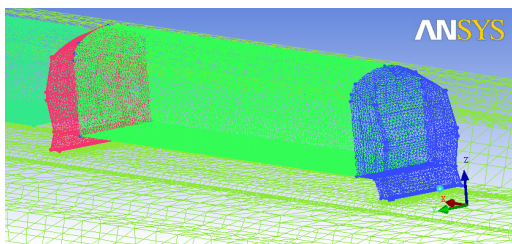


图 8 DF11 型机车模型

Fig.8 DF11 train model

采用非结构网格，经过大量试算，车身最大网格尺寸取为 0.015 m，控制整个流域网格尺寸不超过 5 m，网格总数达到 500 万。列车网格设置为动网格，并按 99 km/h 的速度运动。计算步长取为 0.001 s，共计算 6000 步^[19-20]。

表 2 列车气动力

Table 2 Aerodynamic force on the train

气动力	实测值	模拟值	误差/(%)
横向力/kN	18.113	18.524	2
侧滚力矩/(kN·m)	51.369	58.431	12

实测与数值模拟得到的列车气动力如表 2 所示，其中，数值模拟提取的是第二节车厢气动力。可以看出，本文建立的模型能够较好模拟运动状态列车的气动力，其中横向力的误差仅为 2%。因此，能够采用本文的方法对运动列车的气动效应进行模拟。

3 风屏障遮挡下列车安全性评估

本节将以某线路堤式线路为例(图 9)，研究风屏障对高速列车的挡风性能，分析工况如表 3 所示。

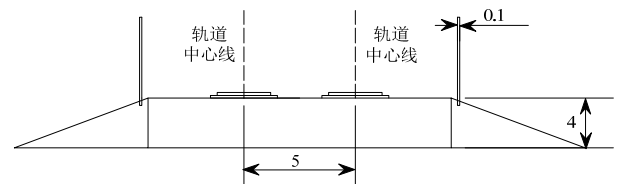


图 9 路堤式线路示意图 /m

Fig.9 High speed railway embankment

表 3 分析工况

Table 3 Analysis cases

车速/(km/h)	横风风速/(m/s)	孔隙率
250	10	0.4
300	20	
350	30	

3.1 模型的建立

将某型号高速列车编组简化为三车，即头车+动车+尾车的形式，车厢与车厢之间以光滑风挡连接，并忽略局部小型构造。头车、尾车的长度均为 25.2 m，中间动车的长度为 24.1 m(图 10)。

经过大量试算确定流域为：305 m(长)×112 m(宽)×45 m(高)，边界条件的设置与第 2 节相同。采用非结构网格进行剖分，车身最大网格尺寸为 0.015 m，控制整个流域网格尺寸不超过 5 m(图 11)。按第 2 节方法，列车网格设置为动网格，并按 250 km/h、300 km/h、350 km/h 的速度运动，计算

步长取为 0.001 s，共计算 6000 步。防风栅采用第 1 节给出的简化方法进行模拟。

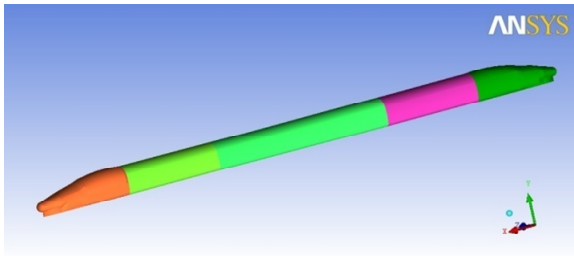


图 10 高速列车模型

Fig.10 High-speed train model

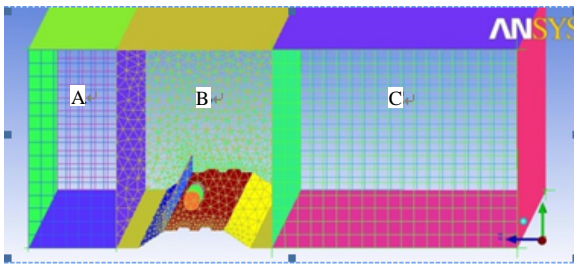


图 11 数值模型

Fig.11 Numerical model

3.2 安全性评估

我国通常采用列车气动力计算作用于轮轨的脱轨系数、轮重减载率来评估列车安全运行的稳定性^[21-22]。

横风作用下，高速列车受力简图如图 12 所示。图中， F_S 、 F_L 、 M 分别表示作用于列车的横向力、升力和侧滚力矩，在本文中可以通过 CFD 数值模拟得到； G 为车厢重量； P_1 和 P_2 分别表示作用在轮轨 A、B 两点上的荷载，可以通过力平衡条件计算得到。

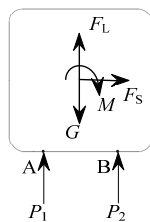


图 12 分析简图

Fig.12 Analysis diagram

脱轨系数 T 是指轮轨所受横向力与竖向力的比值，在本文中可按下式计算：

$$T = \frac{F_S}{P_1} \tag{8}$$

轮重减载率 D 是用来表示两个轮轨之间的荷载差异的比例，在本文中可按下式计算：

$$D = \frac{(P_2 - P_1)}{(P_2 + P_1)/2} \tag{9}$$

按通用方法，脱轨系数 T 与轮重减载率 D 的安全限值取为 0.8。当两个指标均满足要求时，列车运行安全；当有一个或两个指标超限时，列车将不能安全运行。

表 3、表 4 分别给出了防风栅开孔率为 40% 时，列车脱轨系数 T 和轮重减载率 D 。

表 3 脱轨系数 T

Table 3 List of derailment coefficients

列车车速/(km/h)	横风风速/(m/s)		
	10	20	30
250	0.100	0.230	0.364
300	0.191	0.319	0.486
350	0.193	0.439	1.270

表 4 轮重减载率 D

Table 4 Rates of wheel weight lightening

列车车速/(km/h)	横风风速/(m/s)		
	10	20	30
250	0.136	0.306	0.447
300	0.360	0.392	0.549
350	0.261	0.518	1.227

依据目前通用的列车运行安全性评估标准，30 m/s 横风作用时，在防风栅的防护下，高速列车能够以 300 km/h 的速度安全运行。图 13 给出了列车在不同横风风速下列车安全运行曲线，可以看出，设置合理开孔率的防风栅能够提高列车在强风区的运行效率。

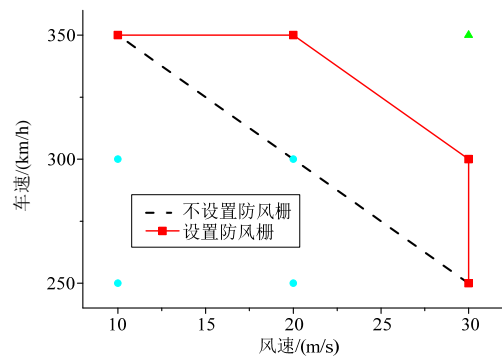


图 13 高速列车安全曲线

Fig.13 Safety curve of high-speed train

4 结论

(1) 将防风栅等效为多孔介质，并选用 Renolds 压力损失系数模型，附加源项法能够高效的模拟具有一定开孔率防风栅的挡风性能。

(2) 参数分析表明, 40%开孔率的防风栅挡风性能较好。

(3) 通过与实测数据对比, 验证了应用动网格技术能够模拟得到列车运行状态下的气动力。

(4) 设置合理开孔率的防风栅能够提高列车在强风区的运行效率。

参考文献:

- [1] Baker C. A framework for the consideration of the effects of crosswinds on train [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 123: 130—142.
- [2] 高广军. 强侧风作用下列车运行安全性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
Gao Guangjun. Study on the safety of railway transportation under strong side wind [D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)
- [3] 刘庆宽, 杜彦良. 日本列车横风和强风对策[J]. *铁道学报*, 2008, 30(1): 82—88.
Liu Qingkuan, Du Yanliang. Train-crosswind and strong wind countermeasure research in Japan [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2008, 30(1): 82—88. (in Chinese)
- [4] 葛盛昌, 尹永顺. 新疆铁路风区列车安全运行标准现场试验研究[J]. *铁道技术监督*, 2006, 34(4): 9—11.
Ge Shengchang, Yi Yongshun. Studying the field tests on the safety operation standards for trains running through the windy area in Xinjiang [J]. *Railway Quality Control*, 2006, 34(4): 9—11. (in Chinese)
- [5] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007: 21—30.
Tian Hongqi. Train aerodynamics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007: 21—30. (in Chinese)
- [6] 张健. 铁路防风栅抗风性能风洞试验研究与分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2007, 4(1): 13—17.
Zhang Jian. Wind-tunnel test investigations and analysis on wind break performances of wind fences on railway [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2007, 4(1): 13—17. (in Chinese)
- [7] 姜翠香, 梁习锋. 挡风墙高度和设置位置对车辆气动性能的影响[J]. *中国铁道科学*, 2006, 27(2): 66—70.
Jian Cuixiang, Liang Xifeng. Effect of the vehicle aerodynamic performance caused by the height and position of wind-break wall [J]. *China Railway Science*, 2006, 27(2): 66—70. (in Chinese)
- [8] 刘风华. 不同类型挡风墙对列车运行安全防护效果的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2006, 37(1): 176—182.
Liu Fenghua. Wind-proof effect of different kinds of wind-break walls on the security of train [J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2006, 37(1): 176—182. (in Chinese)
- [9] 张洁, 刘堂红. 新疆单线铁路土堤式挡风墙坡角优化研究[J]. *中国铁道科学*, 2012, 33(2): 28—32.
Zhang Jie, Liu Tanghong. Optimization research on the slope angle of the earth type windbreak wall of Xinjiang single-track railway [J]. *China Railway Science*, 2012, 33(2): 28—32. (in Chinese)
- [10] 李燕飞, 田红旗, 刘辉. 高速铁路开孔式挡风墙外形优化研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(10): 3207—3212.
Li Yanfei, Tian Hongqi, Liu Hui. Optimization of windbreak wall with holes in high-speed railway [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2011, 42(10): 3207—3212. (in Chinese)
- [11] Baker C. The flow around high speed trains [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(6/7): 277—298.
- [12] Wilson J D, Yee E. Calculation of winds disturbed by an array of fences [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 115: 31—50.
- [13] Santiago J L, Martin F, Cuerva A. Experimental and numerical study of wind flow behind windbreak [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(30): 6406—6420.
- [14] Maruyama T. Large eddy simulation of turbulent flow around a windbreak [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10/11): 1998—2006.
- [15] Rosenfeld M, Marom G, Bitan A. Numerical simulation of the airflow across tree in a windbreak. boundary-layer meteorology [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2010, 135(1): 89—107.
- [16] Yeh C P, Tsai C H, Yang R J. An investigation into the sheltering performance of porous windbreaks under various wind directions [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(10/11): 520—532.
- [17] 熊小慧, 梁习锋, 高广军. 兰州-新疆线强侧风作用下车辆的气动特征[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2006, 37(6): 1183—1188.
Xiong Xiaohui, Liang Xifeng, Gao Guangjun. Train aerodynamic characteristics in strong cross-wind on Lanzhou-Xinjiang railway line [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2006, 37(6): 1183—1188. (in Chinese)
- [18] 龙丽平, 赵丽滨, 刘立东. 列车致声屏障结构的空气脉动力研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(3): 246—250.
Long Liping, Zhao Libin, Liu Lidong. Research on the air turbulent force loaded on noise barrier caused by train [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(3): 246—250. (in Chinese)
- [19] 韩艳, 胡揭玄, 蔡春声. 横风作用下考虑车辆运动的车桥系统气动特征的数值模拟研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(2): 318—325.
Han Yan, Hu Jiexuan, Cai Chunsheng. Numerical simulation on aerodynamic characteristics of vehicles and

- ridges under cross winds with the consideration of vehicle moving [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(2): 318–325. (in Chinese)
- [20] 曾晓辉, 赖姜. 定常气动荷载作用下高速铁路车辆的蛇行运动稳定性[J]. *工程力学*, 2013, 30(4): 52–58.
Zeng Xiaohui, Lai Jiang. Hunting stability of high-speed railway vehicle considering the actions of steady aerodynamic loads [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(4): 52–58 (in Chinese)
- [21] 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 Yanhong, Yang Guowei. 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. (in Chinese)
- [22] 郝艳红, 毛军, 高亮. 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. 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. (in Chinese)

(上接第 248 页)

- [8] Gan C, Guo S, Lei H, et al. Random uncertainty modeling and vibration analysis of a straight pipe conveying fluid [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2014, 77(3): 503–519.
- [9] Jin J D. Stability and chaotic motions of a restrained pipe conveying fluid [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 208(3): 427–439.
- [10] Païdoussis M P, Moon F C. Nonlinear and chaotic fluidelastic vibrations of a flexible pipe conveying fluid [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1988, 2(6): 567–591.
- [11] Wang L. Flutter instability of supported pipes conveying fluid subjected to distributed follower forces [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2012, 25(1): 46–52.
- [12] Sri Namchchivaya N. Non-linear dynamics of supported pipe conveying pulsating fluid-I. Subharmonic resonance [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 1989, 24(3): 185–196.
- [13] Sri Namchchivaya N, Tien W M. Non-linear dynamics of supported pipe conveying pulsating fluid-II. Combination resonance [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 1989, 24(3): 197–208.