

双层集装箱车辆和棚车气动性能的比较

李燕飞, 梁习锋

(轨道交通安全教育部重点实验室, 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙, 410075)

摘要: 基于三维定常不可压 Reynolds 时均 Navier-Stokes 方程和 $k-\varepsilon$ 双方程模型, 采用有限体积法对横风、路堤、挡风墙等环境耦合下运行的双层集装箱车辆和棚车的气动性能进行数值分析。研究表明: 双层集装箱车辆周围流场较棚车复杂, 前者横向力与侧滚力矩均比后者的大; 无挡风墙时, 双层集装箱车辆和棚车的气动力与路堤高度均呈线性关系, 前者横向力及侧滚力矩与路堤高度的线性比例系数均比后者的大, 分别为 5.37 和 -11.09, 对棚车则分别为 3.53 和 -10.46; 有挡风墙时, 两车的气动力差值随路堤高度增加而减小, 路堤高度 0 m 时其差值最大, 前者横向力较后者大 57.12 kN, 侧滚力矩则大 177.11 kN·m; 设置挡风墙后, 车辆横向力和侧滚力矩大大减小, 路堤高度越高, 减小幅度越明显, 表明挡风墙对提高大风区尤其是高路堤区段的车辆气动性能效果显著。

关键词: 双层集装箱车辆; 棚车; 气动性能; 数值分析

中图分类号: U270.11

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2009)01-0169-06

Comparison of aerodynamic performances between double container car and boxcar

LI Yan-fei, LIANG Xi-feng

(Key Laboratory of Traffic Safety on Track, Ministry of Education,
School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on three dimensional, steady, incompressible Navier-Stokes equation and $k-\varepsilon$ turbulence model, finite volume method was adopted to carry out aerodynamic force numerical analysis of double container car and boxcar which run on complex conditions of strong wind, embankment and wind-break wall. The results indicate that the flow field around double container car is more complex than those of boxcar. Side force and overturning moment that double container car receives are bigger than those of boxcar. To no wind-break wall, the relationship between aerodynamic force of cars and embankment height is linear. Side force and overturning moment linear coefficients of double container car are bigger than those of boxcar, 5.37 and -11.09 for the former, 3.53 and -10.46 for the latter. With wind-break wall, the aerodynamic differences decrease with the increase of embankment height. On 0 m height embankment, side force difference is 57.12 kN, and the overturning moment is 177.11 kN·m. Side force and overturning moment of cars decrease greatly behind wind-break wall, and the reduction becomes bigger with the increase of embankment height, which shows wind-break wall has significant effect on improvement of car aerodynamic performance in strong wind section especially on embankment.

Key words: double container car; boxcar; aerodynamic performance; numerical analysis

兰新线是典型的大风铁道线路, 为降低强横风的影响, 我国在该线路上修筑有多处挡风墙。几年来,

我国研究人员通过实车试验、风洞试验以及数值模拟计算等研究方法, 对强横风环境下运行的客车、敞车、

收稿日期: 2008-03-12; 修回日期: 2008-05-25

基金项目: 铁道部科技发展计划项目(Z2007-068)

通信作者: 李燕飞(1981-), 女, 浙江衢州人, 博士研究生, 从事列车空气动力学研究; 电话: 13107486861; E-mail: zhongnanyanfei@yahoo.com.cn

棚车、罐车等常见车辆的气动性能进行了大量研究,并通过比较分析得出棚车气动性能最差^[1-8]。但以往的车辆气动性能比较中均未涉及双层集装箱车辆。为了增大铁路运输量,兰新线上拟将运行双层集装箱车辆。双层集装箱车辆具有体积大、车身高等特点,运行后其气动性能及设防车型有待进一步研究。在此,本文作者应用大型流场计算软件 Fluent,对强横风和多种高度路堤环境中在有挡风墙和无挡风墙条件下,具有相同运行速度的双层集装箱车辆和棚车的气动力进行数值模拟计算,并对计算结果进行比较分析,以便为兰新线上车辆的安全运行及《大风天气列车安全运行办法》的进一步完善提供理论依据。

1 控制方程

采用的横风风速为 35.1 m/s, 马赫数远小于 0.3, 数值计算可按三维、定常、不可压缩进行处理。根据流场特点, 描述列车周围空气流动的控制方程包括连续性方程、Reynolds 时均 Navier-Stokes 方程 (Reynolds-averaged navier-stokes, 简称 RANS) 以及湍流模型方程(这里选取工程上应用较广的标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型)等 6 个方程^[9-10]。

2 计算模型、计算区域、边界条件及计算网格

2.1 计算模型

计算模型中, 路堤高度有 0(即平地), 2, 4, 6 和 8 m 共 5 种, 道床高度为 0.6 m。根据兰新线受单向正

横风的特点, 在路堤迎风侧设置挡风墙。挡风墙的结构类型为线路上广泛应用的高度为 3 m 的“L”型板式挡风墙, 一线轨道中心距挡风墙内侧的距离为 3.95 m。列车采用四车编组, 由 SS₈ 型电力机车牵引 3 节车辆; 简化列车表面, 并对车体底部进行光滑处理。计算模型按照原始尺寸^[11-14]建立, 见图 1~3。

2.2 计算区域和计算网格

考虑到气流的绕流和流场, 流场区域长×宽×高选取为 400 m×320 m×100 m。如图 4 所示, 坐标原点落在一线轨道中心、机车头部的轨面高度位置; 列车沿 X 轴负方向运行, 大风沿 Y 轴正方向流动。

有、无挡风墙模型的计算区域均采用非结构网格离散, 空间为四面体网格, 物面为三角形网格。为考虑壁面边界层的影响, 在靠近车体表面附近对网格进行加密处理(见图 5)。无挡风墙计算模型空间体单元约 120 万, 有挡风墙模型空间体单元约 130 万。

2.3 边界条件

为了解不可压缩 N-S 方程的定解问题, 还需要给出初始条件和边界条件。设初始条件为 $\phi(x, y, z, t)|_{t=0} = f(x, y, z)$, $f(x, y, z)$ 已知。定义边界条件时假设车体静止, ABDC 和 BFHD 为速度进口边界, 速度分别等于车速和风速, 方向分别沿 X 轴和 Y 轴的

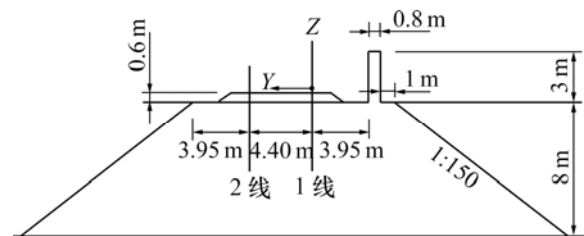


图1 挡风墙计算简图

Fig.1 Calculation diagram of wind-break wall

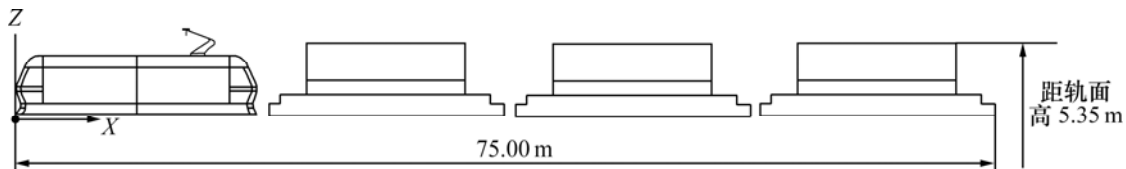


图2 双层集装箱货运列车计算模型

Fig.2 Calculation model of double container car

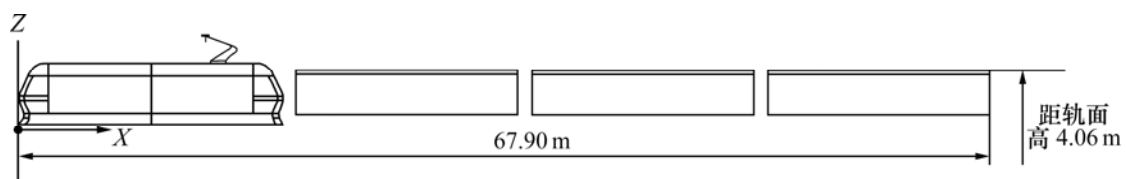


图3 棚车计算模型

Fig.3 Calculation model of boxcar

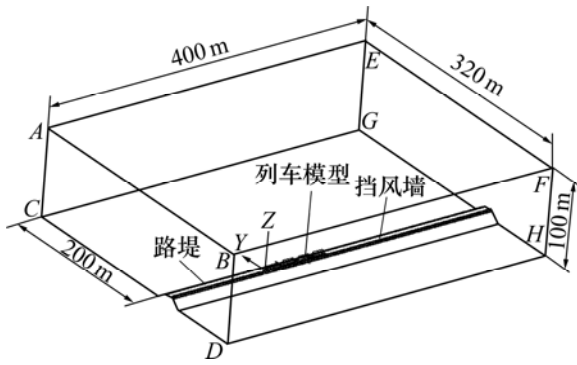


图 4 计算区域图

Fig.4 Diagram of calculation region

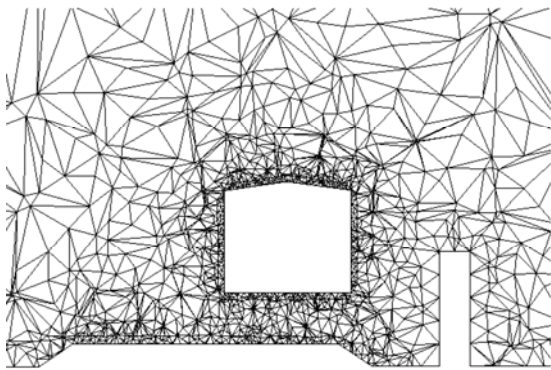


图 5 棚车横截面网格图

Fig.5 Grid around boxcar in cross section

正方向; $EFHG$ 和 $AEGC$ 为压力出口边界, 静压为零; 流域顶面、列车表面按无滑移壁面边界条件给定; 为体现与列车之间的相对运动, 地面、路堤、道床及挡风墙的表面均设置为滑移壁面边界条件, 其滑移速度与列车运行速度大小相等, 方向相反。

3 计算结果与分析

在风速为 35.1 m/s (风向角为 90°), 路堤高度为

$0, 2, 4, 6$ 和 8 m 时, 以 120 km/h 速度运行的列车气动力进行数值计算。为更加有效地比较双层集装箱车辆和棚车的气动性能, 以第 2 节车辆为对象, 分析 2 种车型车辆的流场分布情况。

3.1 压力分布

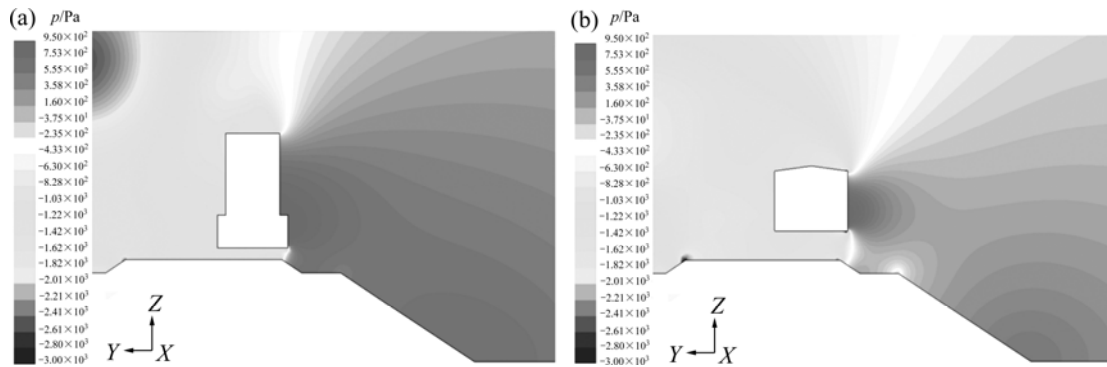
图 6 和图 7 所示分别是高度为 4 m 的路堤上, 在无挡风墙和有挡风墙条件下, 第 2 节双层集装箱车辆和棚车的中部横截面压力分布云图。

由图 6 和图 7 可知, 列车运行于强横风、路堤高度为 4 m 和无挡风墙的环境中时, 车体表面的最大正压和最大负压分别位于车体迎风面和车体顶部, 除迎风面分布有大面积正压外, 车体其他表面均处于大面积的负压区域, 且棚车车体顶部负压比双层集装箱的大, 车体底部和背风面的负压分布则相反, 因而棚车的升力将比双层集装箱车辆的大; 有挡风墙条件下, 流域的正压区域分布在挡风墙及路堤的迎风面, 由于双层集装箱车辆车身较高, 其迎风侧高于挡风墙的位置也存在一定面积的正压, 车体其余表面以及棚车表面均为负压, 且最大负压仍位于车体顶部, 双层集装箱车体表面压力大于棚车表面压力。

3.2 速度分布

图 8 和图 9 所示分别是高度为 4 m 的路堤上, 在无挡风墙和有挡风墙条件下, 第 2 节双层集装箱车辆和棚车的中部横截面气流速度分布图。

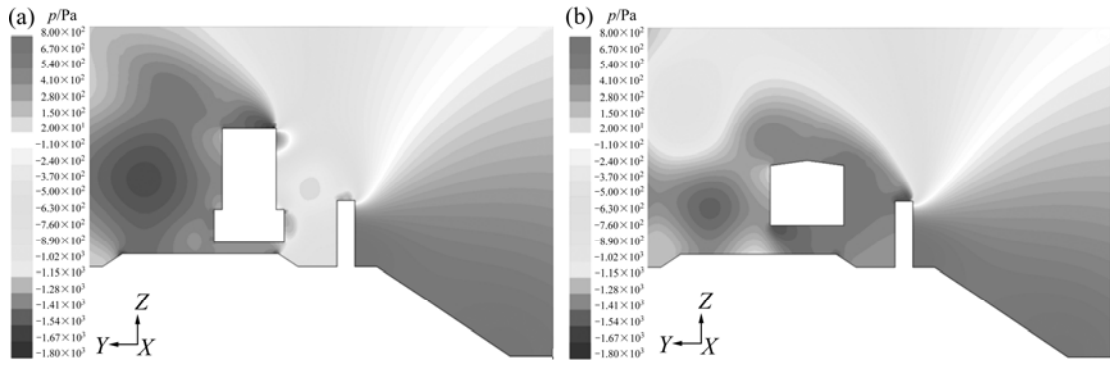
由图 8 和图 9 可知, 气流由于路堤的导流作用顺着路堤的陡坡向上爬, 当遇到钝体(如挡风墙)顶部的尖缘时, 气流将发生分离, 分离点固定为尖缘的顶点; 分离后的气流以与钝体顶面呈一定角度的方式流动, 当速度增大的气流遇到车身较高的钝形车辆(如双层集装箱车辆, 其顶面高于绕过 3 m 高挡风墙的气流分离边界)时, 气流在车顶尖缘位置将再次发生分离, 见图 9(a); 气流绕过钝体顶面, 在钝体的背风面产生一系列漩涡, 如图 8 和图 9 中挡风墙背风面和车体背风面



(a) 双层集装箱; (b) 棚车

图 6 无挡风墙时横截面压力分布云图

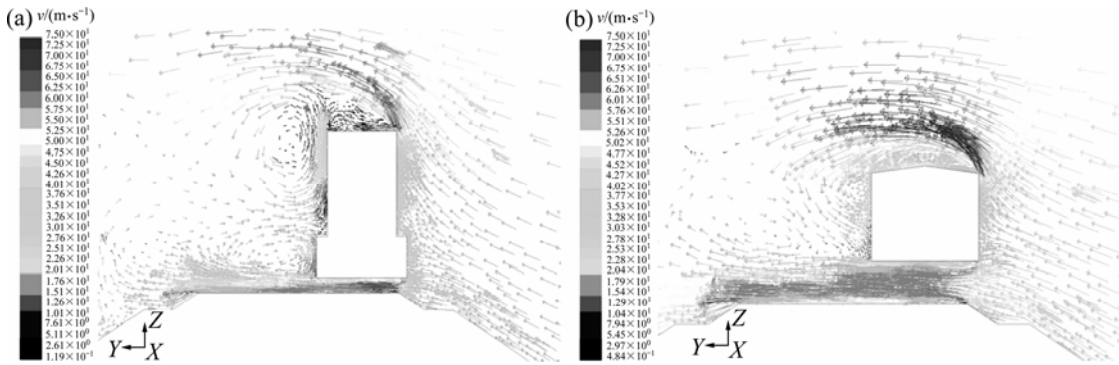
Fig.6 Pressure distributions of cross section under no wind-break wall



(a) 双层集装箱; (b) 棚车

图 7 有挡风墙时横截面压力分布云图

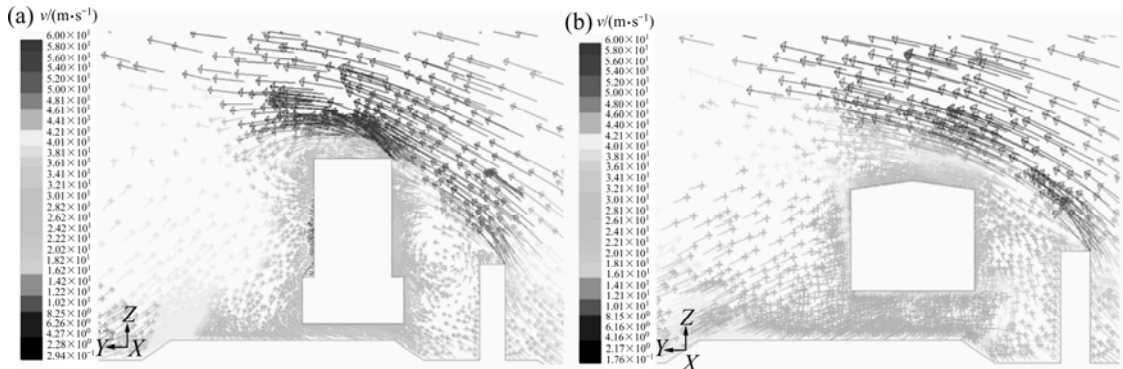
Fig.7 Pressure distributions of cross section under wind-break wall



(a) 双层集装箱; (b) 棚车

图 8 无挡风墙时横截面速度分布图

Fig. 8 Velocity distributions of cross section under no wind-break wall



(a) 双层集装箱; (b) 棚车

图 9 有挡风墙时横截面速度分布图

Fig.9 Velocity distributions of cross section under wind-break wall

的涡流。由于双层集装箱车身比棚车高，在尖缘位置分离的气流与车体顶面所成的角度也较大，因此，双层集装箱车辆的顶部也产生涡流，其分布较棚车复杂。

3.3 气动力计算结果分析

表 1 和表 2 所示分别为无挡风墙和有挡风墙条件

下车辆的气动力计算结果，其中正、负侧滚力矩作用点分别取在迎风侧和背风侧轨道上。图 10 所示为无挡风墙条件下车辆气动力随路堤高度的变化曲线。

由表 1 和图 10 可知，无挡风墙时，2 种车辆受到的横向力和升力为正，侧滚力矩为负；2 种车辆所受

到的气动力与路堤高度均呈线性关系, 双层集装箱车辆的升力随路堤高度线性减小, 其余气动力的绝对值均随路堤高度线性增加; 除升力比棚车的小外, 双层集装箱车辆所受气动力均大于棚车所受气动力, 路堤为 8 m 时气动力差值最大, 横向力、侧滚力矩分别较棚车大 89.73 kN 和 190.16 kN·m, 升力则较棚车小 39.64 kN; 双层集装箱车辆的横向力和侧滚力矩与路堤高度的线性比例系数均比棚车的大, 分别为 5.37 和 -11.09, 棚车则为 3.53 和 -10.46。

由表 2 可知, 有挡风墙时, 双层集装箱车辆所受

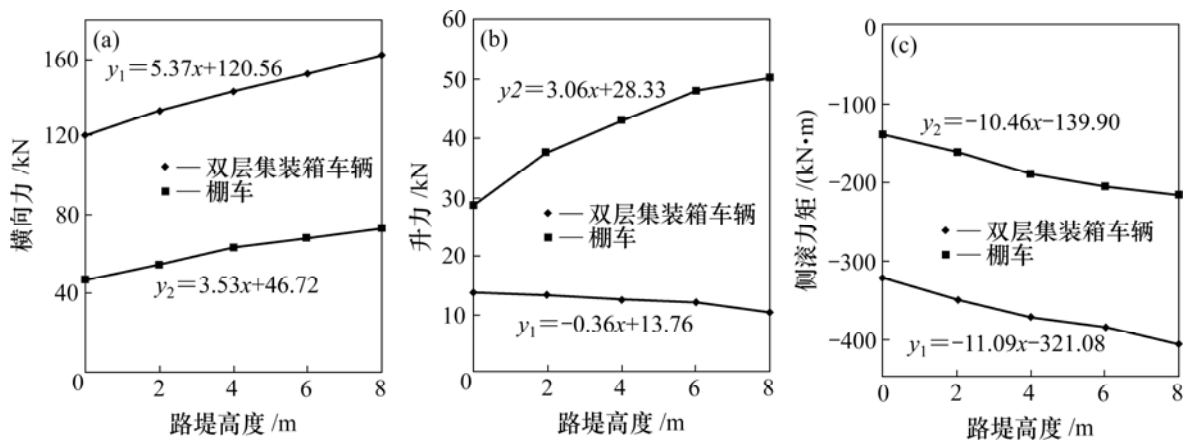
气动力大于棚车所受气动力, 2 种车辆的气动力差随着路堤高度的增加而减小, 路堤高度为 0 m 时差值最大, 前者的横向力较后者大 57.12 kN, 侧滚力矩则较后者大 177.11 kN·m。

比较表 1 和表 2 可知, 设置挡风墙后, 车辆的横向力和侧滚力矩较无挡风墙时大大减小, 并且路堤高度越高, 减小幅度越明显, 如路堤高度为 8 m 时, 双层集装箱车辆的横向力在无挡风墙条件下为 162.69 kN, 设置挡风墙后为 12.56 kN, 减小幅度达 92.28%。这表明挡风墙对改善大风区段尤其是高路堤区段的车

表 1 无挡风墙时气动力计算结果

Table 1 Calculation results of aerodynamic force under no wind-break wall

路堤高度/m	横向力/kN		升力/kN		侧滚力矩/(kN·m)	
	双层集装箱车辆	棚车	双层集装箱车辆	棚车	双层集装箱车辆	棚车
0	120.56	46.72	13.76	28.33	-321.08	-139.90
2	133.64	54.36	13.37	37.34	-349.12	-163.91
4	144.07	63.44	12.32	43.00	-370.54	-189.48
6	151.83	68.55	12.08	47.81	-385.76	-205.12
8	162.69	72.96	10.44	50.08	-407.20	-217.04



(a) 横向力; (b) 升力; (c) 倾覆力矩

图 10 无挡风墙时气动力随路堤高度的变化

Fig.10 Changes of aerodynamic forces with embankment height under no wind-break wall

表 2 有挡风墙时气动力计算结果

Table 2 Calculation results of aerodynamic force under wind-break wall

路堤高度/m	横向力/kN		升力/kN		侧滚力矩/(kN·m)	
	双层集装箱车辆	棚车	双层集装箱车辆	棚车	双层集装箱车辆	棚车
0	58.26	1.14	6.58	10.65	-196.48	-19.37
2	34.97	-7.99	18.33	-4.76	-144.23	13.93
4	23.28	-13.22	18.43	-8.51	-105.97	25.53
6	18.52	-8.86	12.76	-4.73	-84.61	18.00
8	12.56	-10.39	10.83	-5.28	-64.74	21.06

辆气动性能具有显著效果。

4 结 论

a. 当路堤高度为4 m时,双层集装箱车辆和棚车的最大负压均位于车体顶部;无挡风墙时,车体迎风面为正压,其余面为负压,棚车顶部负压较双层集装箱车辆的负压大,底部和背风面的负压分布则相反,从而棚车的升力大于双层集装箱车辆的压力;有挡风墙时,双层集装箱车辆迎风面存在正压,其余表面以及棚车表面均为负压,且双层集装箱车体表面压力大于棚车表面压力。

b. 气流遇到钝体顶部的尖缘时,气流将发生分离,分离点为尖缘的顶点;气流绕过钝体顶部,在钝体的背风面产生一系列漩涡;双层集装箱车辆周围流场分布比棚车的周围流场复杂。

c. 无挡风墙时,双层集装箱车辆和棚车受到的气动力与路堤高度均呈线性关系,前者的横向力及侧滚力矩与路堤高度的线性比例系数均比后者的大,分别为5.37和-11.09,棚车则为3.53和-10.46;除升力外,双层集装箱车辆所受气动力均大于棚车所受气动力。

d. 有挡风墙时,双层集装箱车辆所受气动力大于棚车所受气动力,两者气动力差随路堤高度的增加而减小,路堤高度为0 m时差值最大,前者的横向力较后者大57.12 kN,侧滚力矩则较后者大177.11 kN·m。

e. 设置挡风墙后,车辆的横向力和侧滚力矩大大减小,路堤高度越高,减小幅度越明显。当路堤高度为8 m时,高度为3 m的挡风墙使双层集装箱车辆的横向力降低92.28%,这表明挡风墙对改善大风区段尤其是高路堤区段的车辆气动性能有显著效果。

参考文献:

[1] 尹永顺,王厚雄.兰新复线防风安全工程研究报告[R].乌鲁木齐:乌鲁木齐铁路局,1993.
YIN Yong-shun, WANG Hou-xiong. The wind-break safety engineering research report on the Lanzhou—Xinjiang railway line[R]. Urumchi: Urumchi Railway Bureau, 1993.

[2] 梁习锋,熊小慧.4种车型横向气动性能分析与比较[J].中南大学学报:自然科学版,2006,37(3):607-612.
LIANG Xi-feng, XIONG Xiao-hui. Analysis and comparison of lateral aerodynamic performance on four kinds of cars[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(3): 607-612.

[3] 高广军,田红旗,姚松,等.兰新线强横风对车辆倾覆稳定

性的影响[J].铁道学报,2004,26(4):36-40.

GAO Guang-jun, TIAN Hong-qi, YAO Song, et al. 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): 36-40.

[4] 王厚雄,王蜀东,高注,等.防风工程对风特性及铁道车辆横风气动特性的影响[J].空气动力学学报,1990,8(4):430-435.

WANG Hou-xiong, WANG Shu-dong, GAO Zhu, et al. Effects of wind-break engineering on wind characteristics and lateral aerodynamic characteristics on railway cars[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1990, 8(4): 430-435.

[5] Raghunathan R S, Kim H D, Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed railway train[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(6/7): 469-514.

[6] Khier W, Breuer M, Durest F. Flow structure around trains under side wind conditions: A numerical study[J]. Computer & Fluids, 2000, 29(3): 179-195.

[7] Baker C J, Jones J, Lopez2Calleja F, et al. Measurements of the cross wind forces on trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(78): 547-563.

[8] Suzuki M, Tanemoto K, Tat suo M. Aerodynamics characteristics of train/vehicles under cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1): 209-218.

[9] 王福军.计算流体动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004.

WANG Fu-jun. Analysis of computational fluid dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[10] 田红旗.列车空气动力学[M].北京:中国铁道出版社,2007.
TIAN Hong-qi. Train aerodynamics[M]. Beijing: China Railway Press, 2007.

[11] 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 Feng-hua. Wind-proof effect of different kinds of wind-break walls on the security of trains[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(1): 176-182

[12] 曾广勇.兰新线大风地区挡风墙的勘测与设计[J].路基工程,1998(6):24-29.

ZENG Guang-yong. Reconnaissance and design of wind-break wall in the gale district of Lanzhou-Xinjiang railway line[J]. Subgrade Engineering, 1998(6): 24-29.

[13] 严隽耄.车辆工程[M].北京:中国铁道出版社,2003.
YAN Jun-mao. Vehicle engineering[M]. Beijing: China Railway Press, 2003.

[14] 赵叔东.韶山8型电力机车[M].北京:中国铁道出版社,1998.
ZHAO Shu-dong. SS8 electrical locomotive[M]. Beijing: China Railway Press, 1998.