

集装箱专用平车气动性能分析与比较

梁习锋, 胡哲龙, 刘堂红

(中南大学 轨道交通安全教育部重点实验室, 湖南 长沙, 410075)

摘要: 基于三维、不可压、定常 $N-S$ 方程和 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型, 采用有限体积法对 3 种不同设计方案在运行时速为 160 km/h 的集装箱专用平车(以下简称平车)在有、无横风情况下的气动性能进行分析与比较, 其中: 方案一的平车无端墙, 侧梁侧面平直; 方案二和三的平车均加有端墙, 且侧梁加高、侧面形状分别为钝形和弧形。研究表明: 在无横风情况下, 方案一中没有端墙, 迎风面积较小, 受到的气动阻力最小, 方案二和三中平车有端墙, 迎风面积较大, 受到的气动阻力也较大; 有横风情况下, 方案三中平车侧梁较高, 车体迎风面正压区较大, 而背风侧产生较大的涡流区, 在此区域内压力较小, 故其横向力较大, 方案一中平车侧梁没有加高, 受到的横向力最小; 方案一中平车倾覆力矩最小, 稳定性最好。因此, 在有、无横风情况下, 方案一中平车的气动性能均比其他 2 种设计方案的平车的优。

关键词: 集装箱专用平车; 气动性能; 数值模拟; 设计方案

中图分类号: U272.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2008)04-0781-06

Analysis and comparison of aerodynamic performance of container flat wagon

LIANG Xi-feng, HU Zhe-long, LIU Tang-hong

(Key Laboratory for Traffic Safety on Track of Ministry of Education, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on 3D steady and incompressible $N-S$ equation and $k-\varepsilon$ turbulent model, the aerodynamic performance of three different design options of 160 km/h container flat wagon was analyzed and compared using finite volume method. The three design options are as follows: the first design option has no headwall and the side surface of side beam is flat; the second and the third both have headwall and high side beam, and the side surface of side beam of the second is obtuse, while the third is cambered. The results show that, for the first with no headwall, when there is no crosswind, it has small front face areas, so the aerodynamic resistance is the least. Since the second and the third have headwall, the front face areas are large, so they have bigger aerodynamic resistance. Under the condition of crosswind, as the third design option has the highest side beam, the area of positive pressure at the upwind is bigger, and the area of negative pressure is smaller when the bigger eddy area appears, so the side forces become larger. The first has the least side forces; the overturning moment of the first is the least. So under the two conditions, the aerodynamic performance of the first design option is the best.

Key words: container flat wagon; aerodynamic performance; numerical simulation; design option

集装箱运输具有安全、迅速、经济、便利的特点, 还可以实现多种运输的联运, 是世界货物运输的主要

方式。根据铁路跨越式发展的需要, 为促进我国铁路集装箱运输事业的发展, 我国拟开行 160 km/h 快速集

收稿日期: 2007-12-21; 修回日期: 2008-03-10

基金项目: 铁道部科技研究开发计划资助项目(J2005G003)

通信作者: 梁习锋(1963-), 男, 湖南长沙人, 教授, 从事列车空气动力学研究; 电话: 0731-2656675; E-mail: gszx@mail.csu.edu.cn

装箱专用列车,需设计生产一批新型集装箱专用平车。过去,我国的列车时速较低,对列车外形的空气动力学性能要求不高,提速后,列车的气动性能对列车运行安全性、经济性等影响较大^[1-5]。钝头列车时速在 160 km/h 以上时,空气阻力将占有阻力的 70% 以上^[6]。若车辆横向气动性能较差,则在有大风环境下运行时,会发生大风将车辆吹翻的严重事故。因此,列车的气动性能必须受到重视^[7-10],在设计新型快速集装箱专用平车时也必须考虑平车的气动性能。在此,本文作者对集装箱专用平车的 3 种不同设计方案在有、无横风情况下的气动性能进行研究,利用流场计算软件 (FLUENT) 进行数值模拟计算,对结果进行分析和比较,最后,选出气动性能最好的设计方案。

1 控制方程

FLUENT 软件采用目前应用最广泛且较成熟的有限体积法对方程求解;采用非结构网格技术对计算区域进行离散,能对网格进行细分或粗化,或生成不连续网格、可变网格和滑动网格。由于采用了多种求解方法和多重网格加速收敛技术,因而,采用 FLUENT 软件能达到最佳的收敛速度和求解精度。描述列车周围空气流动的控制方程包括连续性方程、动量方程及湍流模型方程。选取工程上应用较广的 $k-\varepsilon$ 双方程模型,并采用稳态计算,不考虑空气的可压缩性。控制方程由下列方程组成(注:忽略空气的彻体力)。

a. 连续性方程:

$$\operatorname{div} \rho \mathbf{v} = 0;$$

b. X 方向动量方程:

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{v} u - \mu_{\text{eff}} \operatorname{grad} u) = -\frac{\partial P_{\text{eff}}}{\partial x} + \operatorname{div}\left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x}\right)。$$

c. Y 方向动量方程:

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{v} v - \mu_{\text{eff}} \operatorname{grad} v) = -\frac{\partial P_{\text{eff}}}{\partial y} + \operatorname{div}\left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y}\right)。$$

d. Z 方向动量方程:

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{v} v - \mu_{\text{eff}} \operatorname{grad} v) = -\frac{\partial P_{\text{eff}}}{\partial z} + \operatorname{div}\left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z}\right)。$$

e. 湍流动能 k 方程:

$$\operatorname{div}\left(\rho \mathbf{v} k - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \operatorname{grad} k\right) = G - \rho \varepsilon。$$

f. 湍流动能耗散率 ε 方程:

$$\operatorname{div}\left(\rho \mathbf{v} k - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \operatorname{grad} \varepsilon\right) = \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon)。$$

式中: \mathbf{v} 为速度矢量; u , v 和 w 为各坐标方向的速度分量; ρ 为空气密度; μ_{eff} 和 P_{eff} 分别为有效粘性系数和有效压力,与湍流动能 k 和湍流动能耗散率 ε 有关。上述方程组 6 个方程含有 6 个未知量: u , v , w , P , k 和 ε , 方程组封闭,可对它进行数值求解^[11-13]。

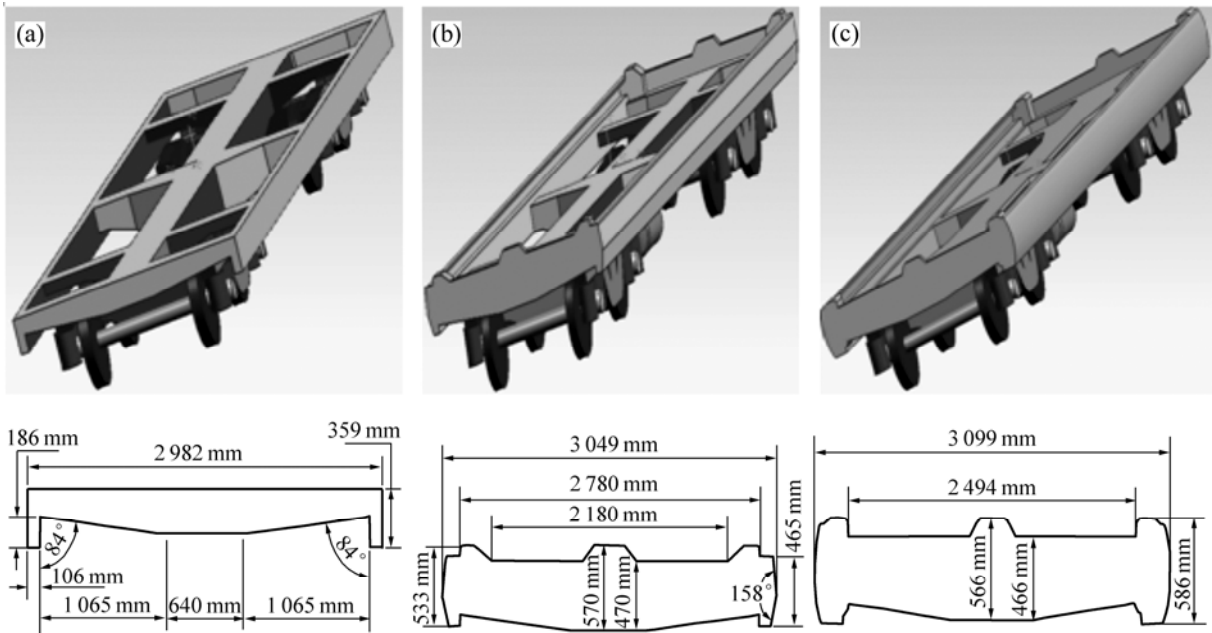
2 计算模型、计算区域、边界条件及计算网格

2.1 计算模型

集装箱平车的气动性能研究分 2 种:一种是装有集装箱工况下的气动性能研究,即研究平车载物情况下在线路上运行时的气动性能;另一种是空平车的气动性能研究,即研究平车空载情况下在线路上运行时的气动性能。本文主要比较、分析不同设计方案下空平车的气动性能,然后,选取最优设计方案。在装有集装箱的情况下,平车的结构外形对整车的气动性能影响不大,不易评定平车结构外形的优劣,因此,本文计算模型采用空平车模型。集装箱空平车的 3 种设计方案对应的计算模型及尺寸如图 1 所示。不同设计方案的集装箱平车其差别主要是端梁、侧梁的外形以及高度不同,以及有、无端墙。方案一的车体宽 2 982 mm,没有端墙,端梁形状尺寸见图 1(a),侧梁高 359 mm,侧面平直;方案二的车体宽 3 094 mm,有端墙,端梁形状尺寸见图 1(b),侧梁高 470 mm,侧梁的内侧有凹槽,外侧面形状是 1 个折角面,夹角为 158°;方案三的车体宽 3 100 mm,有端墙,端梁形状尺寸见图 1(c),侧梁高 586 mm,侧梁的内侧面有凹槽,外侧面是 1 个弧形。

2.2 计算区域、计算网格和边界条件

对横风作用下的平车气动性能进行数值模拟计算时,模拟列车在风洞试验中吹风的方式建立计算模型,入口风速采用合成风方式。合成风的原理见图 2:假设列车运行速度 \mathbf{v} 方向为从左向右,环境侧风风速 u 方向与车辆中心线呈一定角度。根据空气动力学相对



(a) 方案一; (b) 方案二; (c) 方案三

图 1 集装箱专用平车计算模型及端梁尺寸

Fig.1 Calculating model and size of end beam of container flat wagon

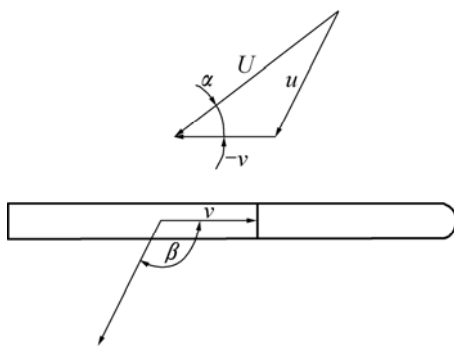


图 2 速度矢量合成图

Fig.2 Figure of speed-vector synthesis

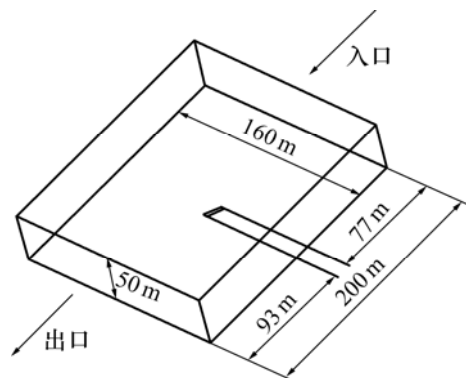


图 3 横风工况下的计算区域

Fig.3 Calculating area under crosswind

运动计算原理, 可视车辆为相对静止, 把运动坐标系固定在车辆上, 则车辆前方空气的(相对)合成风速 U 为列车运行速度负矢量与侧风风速 u 的矢量和, 其中, 侧风 u 与列车速度 v 的夹角(风向角)为 β , 合成风速 U 与列车速度负矢量的夹角(计算风向角)为 α 。

图 3 所示为有横风作用下的计算区域图。由于列车运动, 同时作用环境风, 所以, 整个计算区域的长度方向以及宽度方向取值都较大, 尽可能远离列车尾部, 以避免出口截面受列车尾流的影响, 便于出口边界条件的给定。计算模型空间网格采用四面体非结构网格, 物面采用三角形网格。空间体单元约 92 万。图 4 所示为采用 3 种不同设计方案时集装箱空平车车体

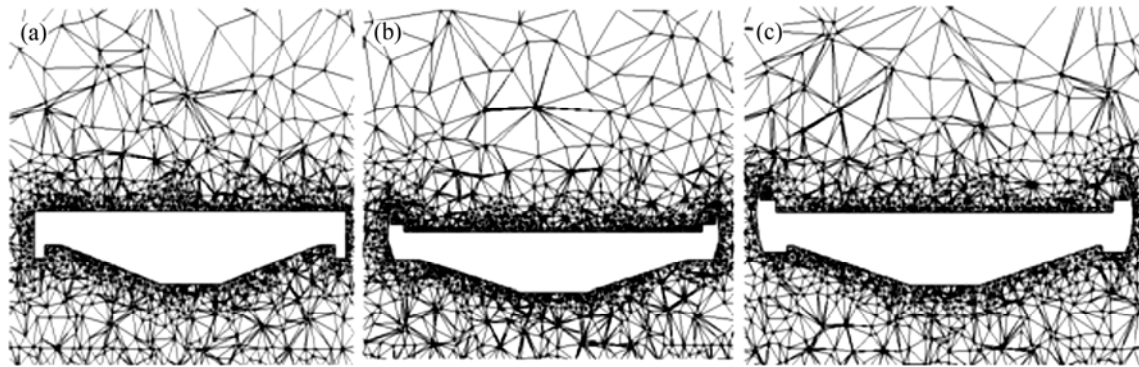
计算模型的局部横截面网格图。

边界条件包括: 根据合成风速所给定的入口速度条件; 根据空气静压为 0 所给定的压力出口条件; 流域的顶面与两侧面以及车体表面给定光滑的无滑移壁面边界条件^[14-15]。

3 计算结果与分析

3.1 气动力计算结果

在无横风情况下, 集装箱空平车的气动性能主要考虑平车受到的阻力和升力。表 1 所示为 3 种不同设



(a) 方案一; (b) 方案二; (c) 方案三

图 4 集装箱专用平车计算模型局部横截面网格图

Fig.4 Mesh of cross-section for part of container flat wagon

计方案的集装箱空平车以 160 km/h 速度运行时受到的气动阻力与升力结果。由表 1 可知: 在无横风情况下, 方案一受到的气动阻力最小, 方案二和方案三受到的气动阻力基本相同。由于方案一中没有端墙, 端部迎风面面积小于方案二和三的迎风面面积, 车辆在运行过程中所受到的阻力也就较小。方案一受到向上的气动升力, 而方案二和方案三受到向下的气动升力, 且两者相差不大。

表 2 所示是横风速度为 32 m/s、风向角为 90°情况下, 3 种不同设计方案的集装箱空平车以 160 km/h 速度运行时受到的气动力计算结果。横风作用下车体受到的气动力主要有横向力、升力和倾覆力矩, 其中倾覆力矩取车体合力对转向架背风侧的轮对踏面与钢轨的接触点的力矩, 见图 5 中 O 点所受的力矩。由表 2

表 1 无横风情况下 3 种设计方案的气动力比较

Table 1 Aerodynamic force comparison of three design options without crosswind

设计方案	阻力/kN	升力/kN
方案 1	3.960	0.637
方案 2	5.353	-0.686
方案 3	5.329	-0.753

表 2 横风情况下 3 种设计方案的气动力比较

Table 2 Aerodynamic force comparison of three design options under crosswind

设计方案	阻力/kN	升力/kN	横向力/kN	倾覆力矩/(kN·m)
方案 1	7.347	4.628	12.842	16.671
方案 2	8.456	3.875	14.917	18.908
方案 3	9.198	4.176	18.489	24.062

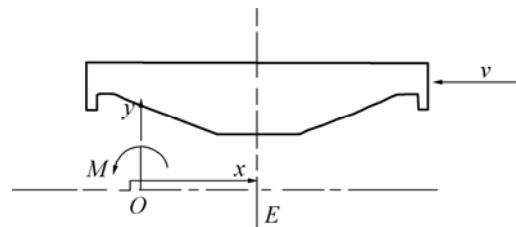


图 5 集装箱专用平车所受侧滚力矩示意图

Fig.5 Overturning moment chart of container flat wagon

可知: 有横风情况下, 方案一受到的气动阻力、横向力以及倾覆力矩最小, 方案三的最大。因此, 方案一的稳定性最强。

3.2 压力云图与流线图

图 6 所示为无横风情况下集装箱平车以 160 km/h 运行时车体局部纵截面压力分布云图。可以看出, 集装箱专用平车顶面的大部分区域为负压, 由于端梁的阻挡作用, 端梁的外侧面为正压, 在相同运行速度下, 由于方案二和方案三中有端墙, 车体的迎风面积变大, 从而导致方案二和方案三受到的气动阻力比方案一的大。集装箱空平车底部结构较复杂, 所以, 车底面压力分布情况比较复杂, 基本处于负压区和微正压区。图 7 所示为 3 种不同设计方案的集装箱平车在有横风作用下车体局部横截面压力分布云图, 图 8 所示为 3 种不同设计方案的集装箱平车有横风情况下局部横截面流线图。在横风时, 集装箱专用平车迎风面处于正压区, 背风面处于负压区。由流线图可以看出: 采用这 3 种设计方案的集装箱空平车的顶部均有涡流产生, 背风侧也出现明显涡流, 说明在横风作用下车体周围的流场比较复杂。由于 3 种设计方案的侧梁高度、外形不同, 迎风面受到的正压和背风面受到的负压也

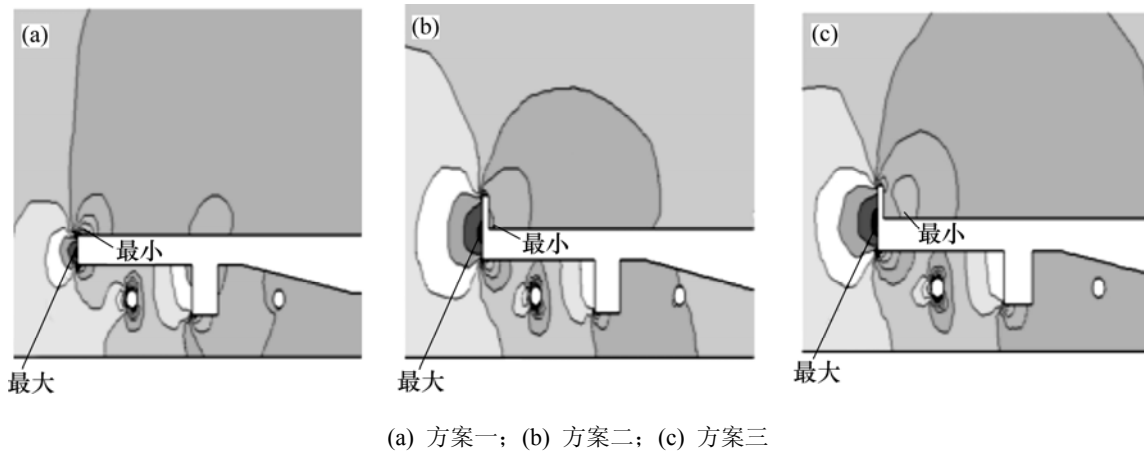


图 6 无横风情况下集装箱专用平车局部纵截面压力分布云图

Fig.6 Contours of pressure on longitudinal section for part of container flat wagon without crosswind

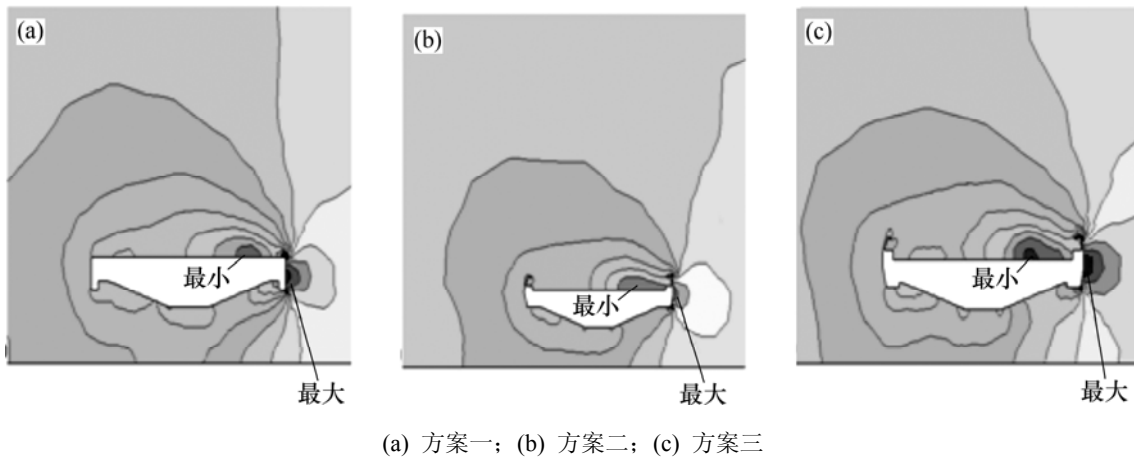


图 7 有横风情况下装箱专用平车局部横截面压力分布云图

Fig.7 Contours of pressure on cross-section for part of container flat wagon under crosswind

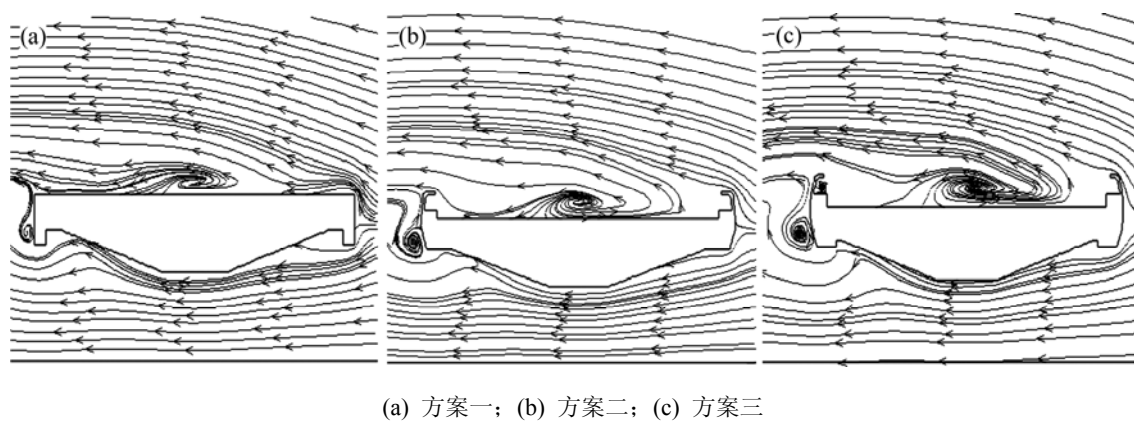


图 8 集装箱专用平车局部横截面流线图

Fig.8 Streamlines patterns of cross-section for part of container flat wagon

略有区别, 从而导致这 3 种方案下平车受到的横向力也有所不同。方案三中侧梁高度尺寸最大, 其迎风侧

正压区较大, 背风侧产生较大的涡流区, 在涡流区内压力较小, 故平车受到的横向力最大。

4 结 论

a. 在无横风情况下, 无端墙、侧梁侧面平直的平台(方案一)迎风面面积较小, 受到的气动阻力也最小, 有端墙、侧梁加高、侧面形状分别为钝形(方案二)和弧形(方案三)的平台受到的气动阻力基本相同, 方案二和三中有端墙, 迎风面面积较大, 故受到的气动阻力也较大; 方案一中平台受到向上的气动升力作用, 方案二和方案三中平台受到向下的气动升力作用, 且两者相差不大。

b. 在有横风作用下, 方案一中平台受到的倾覆力矩最小, 稳定性最强; 方案三中平台的侧梁最高, 迎风侧正压区较大, 背风侧产生较大的涡流区, 涡流区内压力较小, 故其横向力最大; 方案一中平台的侧梁高度没有增大, 迎风侧正压区较小, 背风侧产生的涡流区较小, 故其横向力最小。

c. 在有、无横风情况下, 方案一的平车气动性能均比其他 2 种设计方案的平车气动性能优。

参考文献:

- [1] 兰 叶. 铁路集装箱运输车辆的探讨[J]. 铁道车辆, 1998, 37(8): 22-25.
LAN Ye. Discussion about development of railway container cars in our country[J]. Railway Car, 1998, 37(8): 22-25.
- [2] 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.
- [3] Coleman S A, Baker C J. High sided road vehicles in cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 33(12): 429-438.
- [4] JIANG Zong-lin, Matsuoka K, Sasoh A, et al. Numerical and experimental investigation of wave dynamic processes in high-speed train/tunnels[J]. Acta Mechanica Sinica, 2002, 18(3): 209-226.
- [5] Baker C J, Jones J, Lopez-Calleja F, et al. Measurement s of the cross wind forces on trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(78): 547-563.
- [6] 田红旗. 中国列车空气动力学研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 1-9.
TIAN Hong-qi. Study evolvement of train aerodynamics in China[J]. Journal of Traffic and transportation Engineering, 2006, 6(1): 1-9.
- [7] 朱幼君, 梁习锋, 张 健. 双层集装箱列车与客运列车交会空气压力波数值模拟计算[J]. 电力机车与城轨车辆, 2004, 27(4): 24-26.
ZHU You-jun, LIANG Xi-feng. ZHANG Jian. Numerical simulation on the pressure pulse from double-stack freight train passing passenger train[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2004, 27(4): 24-26.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 高广军, 田红旗, 张 健. 横风对双层集装箱平车运行稳定性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2004, 6(2): 45-48.
GAO Guang-jun, TIAN Hong-qi, ZHANG Jian. Cross-wind affection on double container train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 6(2): 45-48.
- [11] 王勛成, 邵 敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
WANG Xu-cheng, SHAO Min. Basic fundamental and numerical methods of finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [12] 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.
- [13] 严隽耄. 车辆工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
YAN Jun-mao. Vehicle engineering[M]. Beijing: China Railway Press, 1999.
- [14] 周 丹, 张 健. 横风对双层集装箱平车气动特性的影响[J]. 铁道机车车辆, 2004, 24(3): 17-20.
ZHOU Dan, ZHANG Jian. Analysis of the electric erosion reason about rolling stock bearing[J]. Railway Locomotive and Car, 2004, 24(3): 17-20.
- [15] 张 健, 陈南翼. 横风对电动车组中各车辆气动特性影响的试验研究[J]. 机车电传动, 1998(2): 4-6.
ZHANG Jian, CHEN Nan-yi. Experimental investigations into the effect of cross winds on the aerodynamics of EMU vehicles[J]. Electric Drive for Locomotive, 1998(2): 4-6.