

快速集装箱平车在明线和隧道内会车时的气动性能

李志伟, 梁习锋, 周丹

(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: 利用三维、可压、非定常 N-S 方程, 采用滑移网格技术对我国正在研制的 160 km/h 快速集装箱专用平车与动车组分别在明线和隧道内会车时的气动性能进行数值模拟。研究表明: 集装箱平车以 160 km/h 的速度与动车组等速交会时, 在隧道内会车时车载集装箱中部压力变化幅值是在明线会车时的 3.46 倍; 在明线和隧道内会车时, 集装箱列车受到的侧向力和侧滚力矩均与交会列车运行速度近似成平方关系; 因隧道内压力分布一维特性较强, 集装箱平车交会侧与非交会侧压力相差并不大, 因此, 在明线会车时集装箱平车受到的侧向力和侧滚力矩均比隧道会车时的大, 大约是其 1.1 倍。

关键词: 集装箱专用平车; 隧道; 列车交会; 数值计算

中图分类号: U272.3; V211

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2008)05-1029-06

Aerodynamic performance for container flat wagon passing in open air and in tunnel

LI Zhi-wei, LIANG Xi-feng, ZHOU Dan

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

Abstract: Based on unsteady N-S equation of three dimensional and compressible viscous fluid, the aerodynamic performance for the fast special container flat wagon at the speed of 160 km/h was calculated numerically by adopting the technology named slippage grid. The results show that the air crossing pressure pulse magnitude of the container generated in the tunnel is 3.46 times that generated in open air when container flat wagon at the speed of 160 km/h passed by EMU moving at the same speed. Both the lateral force and overturning moment of the container train during the crossing induced in open air and tunnel are approximately proportional to the square of running speed of the passing train. The pressure of crossing side and uncrossing side for the container flat wagon is almost equal since the one-dimensional characteristic of pressure distributing induced in the tunnel is not faintish. Consequently, the value of the lateral force and overturning moment of the container train generated in open air is greater than that generated in the tunnel, about 1.1 times.

Key words: special container flat wagon; tunnel; trains crossing; numerical simulation

为加快铁路集装箱运输事业的发展, 我国正在研制速度为 160 km/h 的快速专用集装箱平车。由于集装箱外形棱角分明, 车辆气动性能复杂, 当其与高速运行的动车组交会时, 车载集装箱将受到较大横向气动

力的作用, 此作用力是进行列车横向稳定性计算的重要依据^[1-5]; 当 2 列列车在隧道内交会时, 由于隧道内的空气流动受到隧道壁的限制, 隧道内产生的空气压力变化将比在明线交会更为激烈、复杂^[6]。

收稿日期: 2007-11-25; 修回日期: 2008-01-20

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目(Z2007-068)

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: 0731-2655294; E-mail: gszx@mail.csu.edu.cn

隧道空气动力效应数值计算是一个非常复杂的流场计算问题,其复杂性表现在以下几个方面:

- a. 列车在隧道内运行时引起的空气流动是三维、可压缩、非定常紊流流动;
- b. 隧道与列车、列车与列车之间有相对运动,不能采用传统的数值风洞方法进行计算;
- c. 相对于隧道来说列车尺度较小,给计算区域网格划分带来很大困难。

受上述因素影响,国内外研究工作者在计算隧道空气动力效应时对流场作了较大简化,采用一维模型进行近似计算^[7-10]。这些简化措施与真实情况相比有较大差距,如用一维模型无法模拟列车头部外形对隧道内压力波的影响,而列车头部外形在减小列车经过隧道和列车在隧道内交会时的压力波有重要作用。

鉴于上述情况,为真实模拟隧道内空气的复杂流动,本文作者采用基于三维、可压、非定常 N-S 方程的流场计算软件(FLUENT)对隧道空气动力效应进行数值计算,用滑移网格(Sliding Mesh)技术实现列车与隧道、列车与列车之间的相对运动。

1 控制方程

当研究 2 列车交会、列车经过隧道等问题时,气流流动需按压缩性气流流动处理^[11],采用大型流场计算软件 FLUENT 对快速集装箱平车在明线和隧道内会车的气动性能进行数值模拟。FLUENT 采用有限体积法对计算区域和控制方程进行离散,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、能量方程及湍流模型方程^[11-12]。大型流场计算软件 FLUENT 提供了多种湍流模型,这里选取工程上应用广泛的 $k-\epsilon$ 湍流模型。

2 计算模型、计算区域、计算网格及边界条件

2.1 计算模型

为了能较真实地模拟实际情况,集装箱列车计算模型对某些重要部件如机车和集装箱平车的转向架、裙板等均进行模拟,省略对列车交会气动性能影响不大的车钩、受电弓等车辆细微结构。集装箱列车计算模型采用四车编组,其中包括 SS9 型机车和 3 节单层集装箱平车,每个集装箱长为 12.192 m,宽为 2.438 m,高为 2.896 m,列车总长 61.950 m,如图 1 所示。高速列车采用流线型头车、中间车和流线型尾车三车编组,模型总长 78.5 m,如图 2 所示。

2.2 计算区域

建立计算区域时,考虑到流场的充分发展及气流的绕流影响,计算区域的尺寸取值较大。对在明线交会的模型,长度方向尺寸的选取则应便于入口和出口边界条件的给定。所以,计算区域上游边界应当远离车体,以避免受到列车绕流的影响;下游边界尽可能远离列车尾部,以避免出口截面受列车尾流的影响^[13]。考虑到本次计算模型的尺寸,在明线两车交会的计算区域的长、宽和高分别为 800 m, 160 m 和 70 m,见图 2。复线间距为 4.4 m。隧道计算区域见图 3,隧道采用横截面积为 80 m²,长为 500 m 的双线隧道。列车距隧道入口 50 m。

2.3 计算网格

列车在明线和隧道内交会,列车与列车、列车与隧道之间存在相对运动,本文采用滑移网格技术对这一现象进行模拟。当列车向前运动时,计算区域边界也必须相应地改变,并与周围网格不断进行大量的信息交换,利用分区网格生成的方法^[14-15]划分计算流域

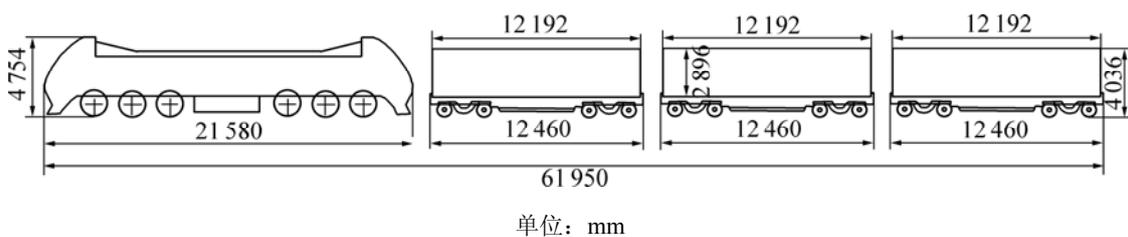


图 1 集装箱整车计算模型

Fig.1 Calculation model of whole container train

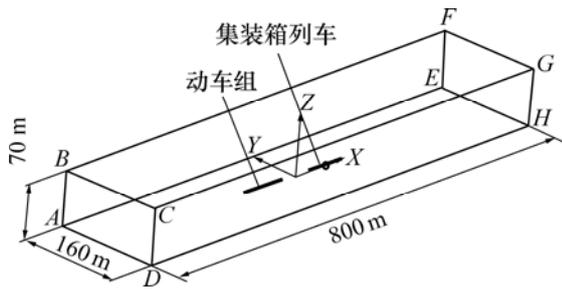


图 2 明线交会计算区域

Fig.2 Computation area on crossing in open air

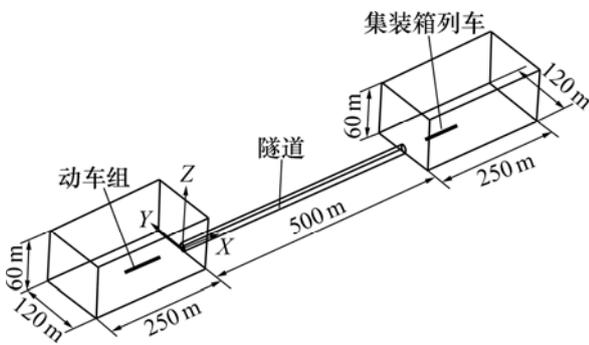


图 3 隧道内交会计算区域

Fig.3 Computation area on crossing in tunnel

的网格, 这样, 既可以节省资源, 又可以加快计算速度。对于在明线交会的计算流域的网格采用非结构网格, 列车表面为三角形面网格, 空间为四面体网格, 共生成约 160 万个个体单元。隧道内 2 车交会计算区域采用结构化网格和非结构化网格相结合的方法划分, 共生成混合体网格约 185 万。图 4 所示为集装箱平车的网格图, 图 5 所示为隧道入口网格图。

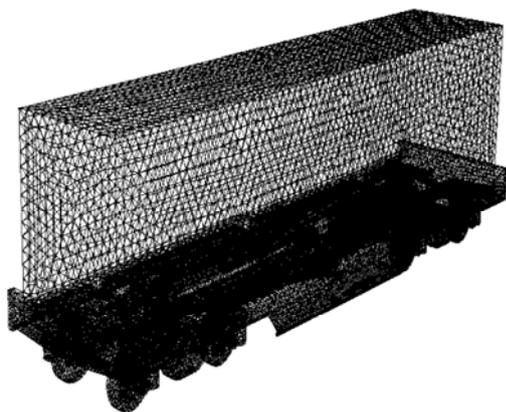


图 4 集装箱平车网格

Fig.4 Grid of container car

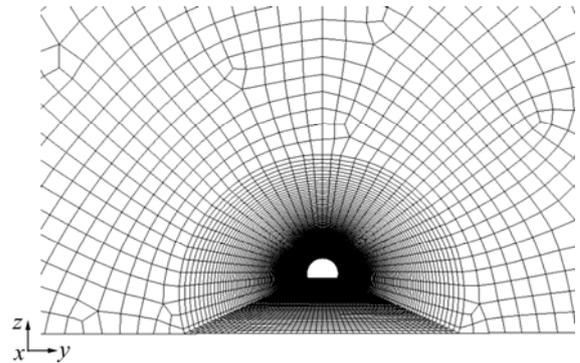


图 5 隧道入口网格

Fig.5 Grid on entrance for tunnel

2.4 边界条件

列车外流场的数值模拟在有限区域内进行, 因此在区域边界上需给定边界条件。确定边界条件要求在数学上满足适定性, 在物理上具有明确意义。明线交会计算边界条件设置如图 2 所示。在截面 ABCD 和截面 EFGH 处, 设置为压力边界条件, $p_{EFGH, ABCD}=0$; 对于两交会列车车身表面, 其运动边界条件为: X 方向给定列车运行速度, Y 和 Z 向速度分量为 0; 在流域上、下底面, 按光滑壁面处理, 给定无滑移边界条件, 即: $v_{\text{bottom, top}}=0$ 或 $(u, v, w)_{\text{bottom, top}}=(0, 0, 0)$ 。

在隧道内交会的边界条件的设置与在明线交会的基本相同: 对于列车表面, 给运动边界条件。流域两侧面、顶面、底面: 按光滑壁面处理, 给定无滑移边界条件。隧道壁面采用标准壁面函数模拟。

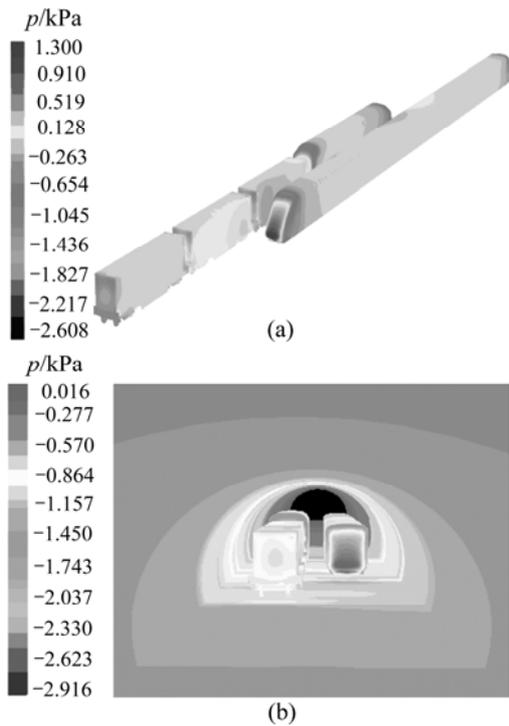
3 计算结果与分析

在列车交会计算中, 专用集装箱列车以 160 km/h 的速度运行, 动车组运行速度分为 5 个速度等级, 分别为 160, 180, 200, 220 和 250 km/h。

3.1 列车交会压力分布分析

图 6 所示为集装箱列车以 160 km/h 的速度与动车组在明线上和隧道内等速交会时的压力分布云图。

图 6 表明, 当列车会车时, 交会的客车头部推动前端气流向前、向外流动, 使集装箱表面产生较大的正压, 处于斥力作用下。由图 6(b)可以看出, 2 列车在隧道内交会时, 由于列车周围空气受到隧道壁面约束, 不像在明线交会时空气压力冲击波能及时得到扩散(见图 6(a)), 而是各种压缩波和膨胀波相互叠加。



(a) 列车在明线上交会的压力云图;

(b) 列车在隧道内交会的压力云图

图 6 列车在明线和隧道内的交会压力分布云图

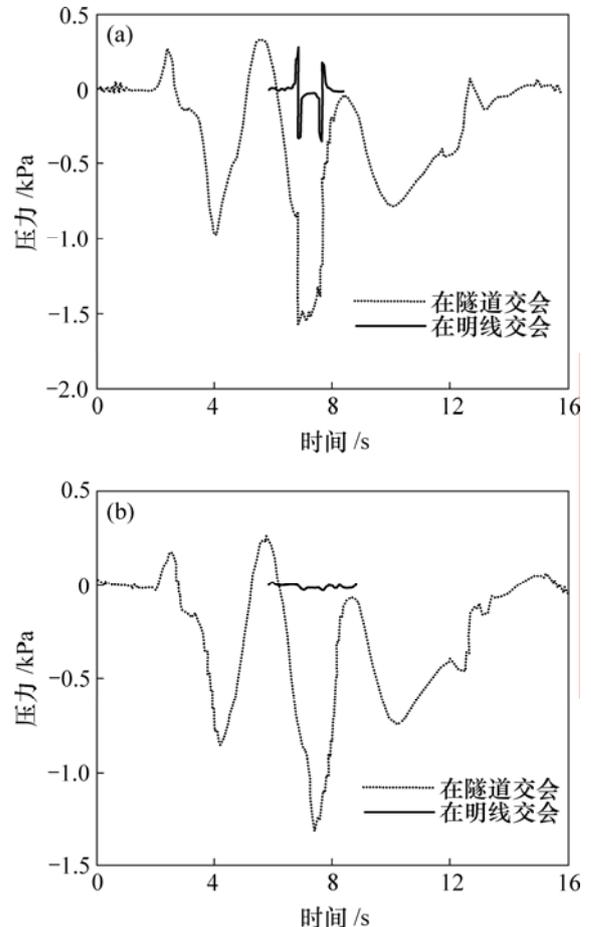
Fig.6 Pressure contours of passing trains in open air and in tunnel

流场计算结果表明,当动车组的头部驶近第 2 节集装箱平车的前部时,该集装箱平车交会侧面的最前端处为负压,其余部分主要为正压,非交会侧主要为负压,其合成效应使该车受到向外起排斥作用的侧向力作用(见图 6(a)).而当动车组的尾部驶至第 2 节集装箱平车的后部时,该集装箱平车交会侧和非交会侧主要受负压作用,且交会侧负压绝对平均值比非交会侧的大,其合成效应使该车受到向内吸引的侧向力作用。

列车在隧道内交会的空气动力效应比较复杂,当 2 列车分别从隧道两端口进入隧道时,气流受到列车头部挤压形成压缩波,此压缩波以音速分别从隧道两端口以不同的方向传播至另一端口,在隧道端口处压缩波突然膨胀转换成膨胀波并以音速沿隧道返回;当两列车尾部进入隧道时情况正好与上述相反,首先是形成一个膨胀波并以音速传播至隧道出口,在隧道出口处此膨胀波转换成压缩波并以音速沿隧道返回。这 2 种波是列车在隧道交会引起隧道内压力变化的主要因素,压缩波与膨胀波在隧道口反复转换与反射,在隧道内形成复杂的波系(见图 6(b))。

3.2 明线与隧道交会时集装箱压力测点压力波比较

图 7 所示为集装箱列车以 160 km/h 速度与动车组在明线上和隧道内等速交会时集装箱中部测点的压力变化历程。



(a) 列车中部交会侧测点压力变化历程;

(b) 列车中部非交会侧测点压力变化历程

图 7 集装箱中部测点压力在明线和隧道 2 种工况下的压力变化历程

Fig.7 Time course curves of pressure for middle measuring point of container in open air and tunnel

从压力随时间的变化历程来看,在明线交会与隧道内交会明显不同之处在于:一是在隧道内列车交会压力变化较为缓慢,且交会列车头部通过测点时,压力突然下降;二是隧道内压力分布呈现较强的一维特性,车载集装箱交会侧与非交会侧压力相差并不大。

从压力变化幅值来说,在明线与在隧道内交会时,集装箱中部交会侧测点的压力变化幅值分别为 0.482 kPa 和 1.667 kPa,隧道是明线交会的 3.46 倍。

3.3 侧向力和侧滚力矩的比较

图 8 所示为在明线和在隧道内 2 种环境下列车交

会时, 第2节集装箱列车受到的侧向力和侧滚力矩随动车组运行速度的变化曲线。图9所示为集装箱列车以160 km/h的速度与动车组在明线上和隧道内等速交会时第2节集装箱平车整车侧向力和侧滚力矩随时间变化的曲线。

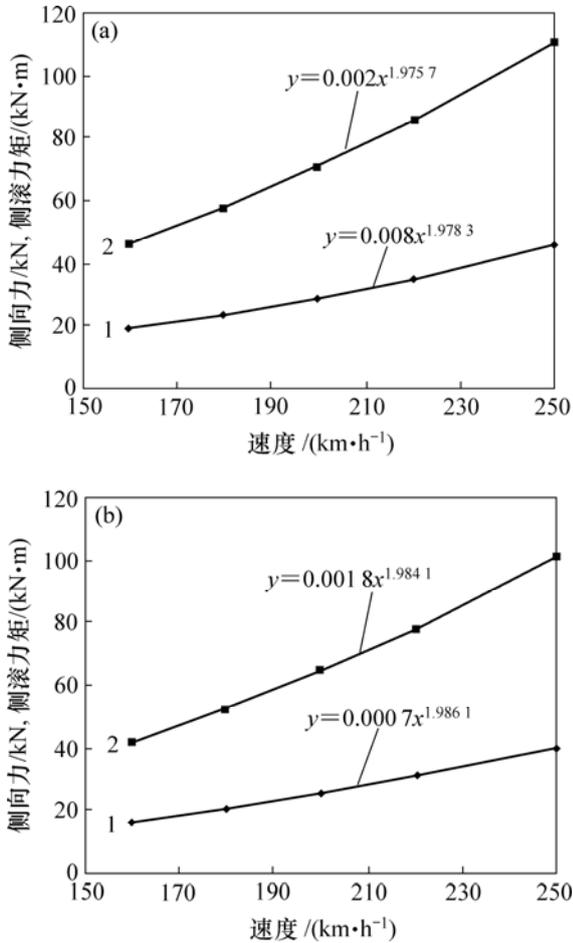
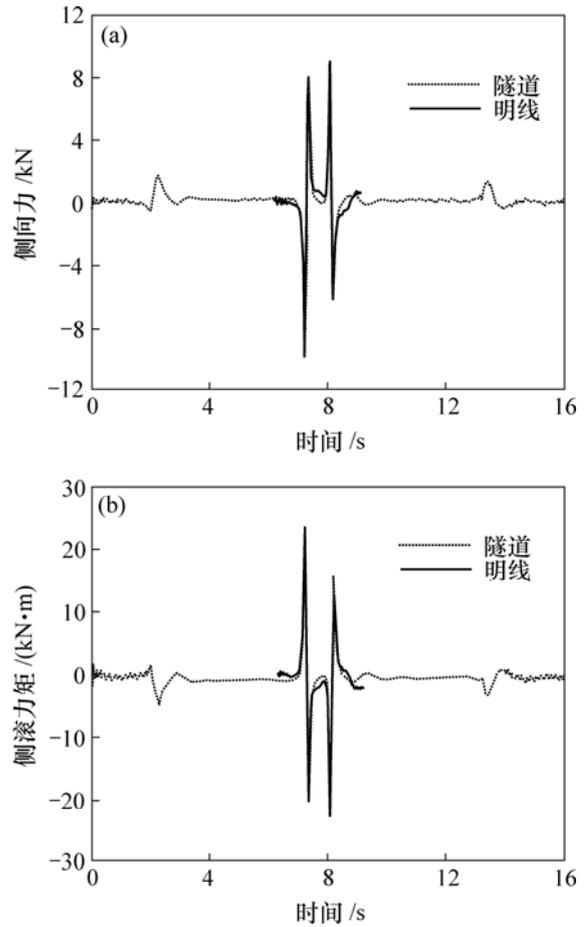


图8 第2节集装箱车气动力随交会车速度的变化曲线
Fig.8 Curves of aerodynamic force for the second container with passing speed

图8中曲线方程为幂函数拟合方程。从得到的拟合方程可以看出, 明线和隧道内交会集装箱平车所受到的侧向力和侧滚力矩均与动车组运行速度近似呈平方关系。由计算结果可知, 明线上列车交会时, 集装箱平车受到的侧向力和侧滚力矩均比隧道内交会的大, 均约为其1.1倍(见图9)。如前所述, 尽管隧道内交会产生的空气压力变化幅值较大, 但隧道内压力分布一维特性较强, 集装箱平车交会侧与非交会侧压力相差并不大, 因此, 隧道内交会集装箱平车受到的侧向力和侧滚力矩均比明线交会的小。



(a) 侧向力; (b) 侧滚力矩
图9 第2节集装箱整车在明线和隧道2种工况中的气动力时间历程

Fig.9 Time course curves of aerodynamic force for the second container in open air and in tunnel

4 结论

a. 明线与隧道内交会压力随时间变化历程明显不同之处在于: 一是隧道内列车交会压力变化较缓慢, 且交会列车头部通过测点时, 压力突然下降; 二是隧道内压力分布呈现较强的一维特性, 集装箱平车交会侧与非交会侧压力相差并不大。

b. 集装箱平车与动车组以160 km/h的速度在明线和隧道内等速会车时, 集装箱中部交会侧测点的压力变化幅值分别为0.482 kPa和1.667 kPa, 隧道是明线交会的3.46倍。

c. 明线和隧道内会车时, 集装箱列车受到的侧向力和侧滚力矩均与交会列车运行速度近似呈平方关系。

d. 因隧道内压力分布一维特性较强, 集装箱平车交会侧与非交会侧压力相差并不大, 因此, 明线会车集装箱平车受到的侧向力和侧滚力矩均比隧道会车的大, 均大约为其 1.1 倍。

参考文献:

- [1] 田红旗, 姚松, 姚曙光, 等. 列车交会压力波对车体和侧窗的影响[J]. 中国铁道科学, 2000, 21(4): 6-12.
TIAN Hong-qi, YAO Song, YAO Shu-guang, et al. Influence of the air pressure pulse on car-body and side-windows of two meeting trains[J]. China Railway Science, 2000, 21(4): 6-12.
- [2] 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, 4(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, 4(2): 45-48.
- [3] 刘堂红, 田红旗, 鲁寨军. 列车交会压力波对高速磁浮列车横向动态响应的影响分析[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(6): 9-14.
LIU Tang-hong, TIAN Hong-qi, LU Zhai-jun. Analysis of the influence of train passing pressure pulse on the maglev train's transverse dynamic response[J]. China Railway Science, 2004, 25(6): 9-14.
- [4] 梁习锋, 田红旗. 200 km/h 动车组交会空气压力波试验[J]. 中南工业大学学报: 自然科学版, 2002, 33(6): 621-624.
LIANG Xi-feng, TIAN Hong-qi. Test research on crossing air pressure pulse of 200 km/h electric multiple unit[J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 2002, 33(6): 621-624.
- [5] 梁习锋, 陈燕荣. 列车交会空气压力波测量的影响因素[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(5): 810-814.
LIANG Xi-feng, CHEN Yan-rong. Influential factors of measuring air pressure pulse produced by passing trains[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2004, 35(5): 810-814.
- [6] Schetz J A. Aerodynamics of high-speed trains[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(3): 404-423.
- [7] 梅元贵, 余南阳, 赵海恒, 等. 高速列车隧道会车压力波的数值分析方法[J]. 铁道学报, 2002, 24(2): 21-25.
MEI Yuan-gui, YU Nan-yang, ZHAO Hai-heng, et al. Numerical method on transient pressure with high speed trains crossing through a tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2002, 24(2): 21-25.
- [8] 赵海恒, 黄美荣, 王运时. 两列车在隧道中交会期间的压力瞬变的数值计算[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34(2): 127-132.
ZHAO Hai-heng, HUANG Mei-rong, WANG Yun-shi. Numerical computation of pressure transients during the crossing of two trains in a tunnel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1999, 34(2): 127-132.
- [9] 梅元贵, 赵海恒, 刘应清. 隧道内高速列车会车压力波的数值模拟方法[J]. 兰州铁道学院学报, 1996, 15(1): 1-6.
MEI Yuan-gui, ZHAO Hai-heng, LIU Ying-qing. The numerical prediction method of the high speed train crossing pressure waves in a single bore tunnel[J]. Journal of Lanzhou Railway Institute, 1996, 15(1): 1-6.
- [10] 梅元贵, 余南阳. 高速列车隧道会车压力波的数值模拟[J]. 兰州铁道学院学报, 1998, 17(4): 49-53.
MEI Yuan-gui, YU Nan-yang. Numerical simulation of high-speed trains induced pressure waves in a single bore tunnel[J]. Journal of Lanzhou Railway Institute, 1998, 17(4): 49-53.
- [11] 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.
- [12] 王福军. 计算流体力学分析[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] Khier W, Durst F. Flow structure around trains under side wind conditions: A numerical study[J]. Computers & Fluids, 2000, 29(2): 179-195.
- [14] 田红旗. 列车交会空气压力波研究及应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(1): 83-89.
TIAN Hong-qi. Research and applications of air pressure pulse from trains passing each other[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004, 1(1): 83-89.
- [15] 田红旗, 贺德馨. 列车交会压力波三维数值的计算[J]. 铁道学报, 2001, 23(3): 18-22.
TIAN Hong-qi, HE De-xin. 3-D numerical calculation of the air pressure pulse from two trains passing by each other[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(3): 18-22.