

空气动力制动制动风翼纵向位置制动力规律

田春¹, 吴萌岭¹, 费巍巍¹, 黄启超²

(1. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804; 2. 中国北车集团大同电力机车有限责任公司, 山西 大同 037038)

摘要: 分析了全列车均装制动风翼时, 不同纵向位置处制动风翼周围流场特性, 数值计算得到迎风面第1块制动风翼产生的制动力最大, 其余制动风翼产生的制动力逐渐减小, 且减小幅度逐渐减慢的制动力规律. 结合某高速列车车型, 考虑减少受电弓影响, 分析受电弓车辆不装制动风翼时, 纵向位置各制动风翼产生制动力规律, 并同每辆车均安装制动风翼时制动力规律进行对比. 最后, 对空气动力制动产生制动力效果进行了分析.

关键词: 高速列车; 空气动力制动; 制动风翼; 制动力规律

中图分类号: U 270.1; V 211

文献标识码: A

Rule of Aerodynamics Braking Force in Longitudinal Different Position of High-speed Train

TIAN Chun¹, WU Mengling¹, FEI Weiwei¹, HUANG Qichao²

(1. Research Institute of Railway & Urban Mass Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. CNR Datong Electric Locomotive Co. Ltd., Datong 037038, China)

Abstract: Characteristics of the flow field around the brake panels are analyzed when all carriages of the train are equipped with aerodynamic brake. The kinetic rule is acquired that the first windward brake panel produces the largest drag, and the drag is reduced step by step in the windward. Then, principle of the braking force is also studied by taking a high-speed train model as an example, when the vehicles with the pantographs are not equipped with brake panels in order to reduce the impact of brake panels on the pantograph. This principle of braking force is compared with the rule of braking force when all carriages are equipped with brake panels. Finally, an analysis is made of the braking force effect generated by aerodynamic brake.

Key words: high-speed train; aerodynamics brake; brake

panels; rule of braking force

我国高速铁路快速发展, 京津城际已投入运行, 京沪等一系列高速客运专线正在建设, 列车运行速度已经提高至 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上, 传统利用黏着进行制动的方式将面临考验, 有必要研究非黏制动作为紧急情况下的备用制动^[1-3]. 欧洲和日本等国研发的 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上高速列车通常采用的非黏制动方式有: 轨道涡流制动、磁轨制动和空气动力制动^[1-5]. 但轨道涡流制动和磁轨制动均是在转向架下增加制动装置, 增加列车质量, 且产生磁辐射和轨道磨损等副作用; 与之相比空气动力制动是利用随着列车速度的增加, 空气阻力与速度平方成正比的原理, 通过在车顶上展开制动风翼实现制动^[6]. 日本对空气动力制动方式研究相对较早^[4-7], 但所能查到的文献较少, 特别是比较详细的关于制动风翼在车上具体布置位置的研究未见报道. 国内中南大学的苗秀娟等对风阻制动板的数值模拟作了研究^[8], 但只是说明制动风翼作为辅助制动装置可以提供较大的风阻制动力, 没有针对具体几何外形的制动风翼进行分析, 也未对制动风翼纵向位置产生制动力规律进行探讨. 基于此, 本文通过对比研究整列车每块制动风翼产生制动力规律, 并通过减少制动风翼数探寻制动风翼产生制动力规律, 最后结合具体车型, 考虑减少受电弓影响, 分析受电弓车辆不装制动风翼时各制动风翼产生制动力规律, 得到考虑受电弓时列车空气动力制动产生的制动力效果, 为进一步研究制动风翼车上实际布置方式奠定基础.

收稿日期: 2010-01-05

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2009BAG12A05-13); 同济大学青年优秀人才培养行动计划(2008KJ016)

第一作者: 田春(1977—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为载运工具运用工程. E-mail: chtian@tongji.edu.cn

1 空气动力制动原理

空气动力制动是制动时打开制动风翼,制动风翼的迎风面受正压力作用^[4](图 1),背风面由于流体产生分离,导致制动风翼后的流场为负压,即制动风翼前后面产生压差,即产生阻力作用.此制动风翼受到的阻力作用等效于高速列车的制动力.空气动力制动产生的阻力与速度平方成正比^[7],速度越高则制动力越大.在高速时这一制动方式具有优良性能.

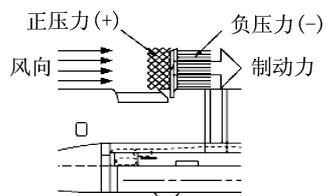


图 1 空气动力制动制动风翼产生制动力原理

Fig.1 Principle of generation of the aerodynamic braking force

2 高速列车制动风翼几何模型

2.1 列车几何参数

本论文以国内某动车组外型为参考,列车 3 维模型如图 2.模型采用 1:1 实车比例模型,编组方式为 8 节联挂,即:头车+6 节中间车+尾车.其基本尺寸如表 1 所示.

表 1 列车几何参数

长度			宽度	高度
头	中间	尾		
25 530	24 175	25 530	3 255	3 680



图 2 列车模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of train model

2.2 制动风翼几何参数

论文以研究高速列车空气动力制动制动风翼纵向不同位置制动力规律为主,制动风翼沿列车中截面对称分布,如图 3 所示.为使计算结果具有可比性,计算均采用相同制动风翼形状,单块制动风翼面积为 1.083 m^2 ,如图 4 所示.



图 3 制动风翼位置示意图

Fig.3 Layout of braking panels

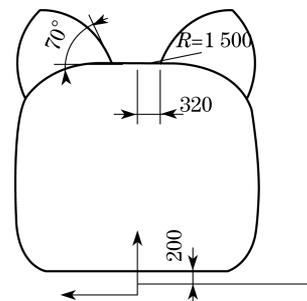


图 4 制动风翼几何参数(mm)

Fig.4 Geometric parameters of brake panels

3 数值模拟计算

3.1 计算域及网格

列车为中截面几何对称,因此计算域采用对称计算域,并考虑空气绕流和流场的充分发展,计算域设置如图 5 和图 6 所示.

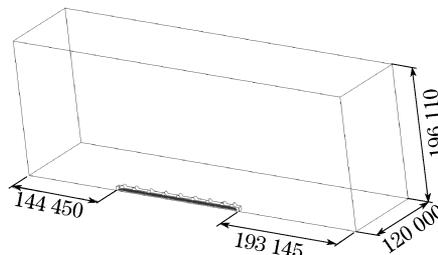


图 5 计算域大体示意图(单位:mm)

Fig.5 Big computational domain (unit:mm)

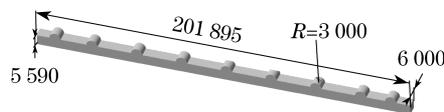


图 6 计算域小体示意图(单位:mm)

Fig.6 Inner computational domain (unit:mm)

网格划分采用非结构网格,车体和制动风翼表面为三角形网格,空间采用四面体网格.为保证计算精确性和提高计算速度,网格划分时将整个计算域

分成两部分(图5),即靠近车体附近采用一小体包围,并考虑制动风翼突出影响,小体的形状如图6所示,小体以外计算域称为大体.为了更多地获得列车表面边界层信息,对列车表面进行了附面层控制和网格控制,分别在制动风翼、车底以及小体上采用了尺寸函数(size function)控制其周围网格尺度,加密了列车表面及制动风翼附近网格单元(图7).本次计算所有工况的空间单元体网格均在400万以下.

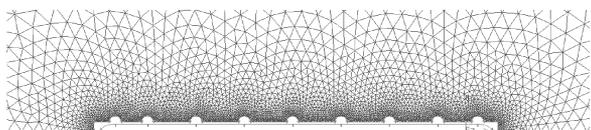


图7 车体附近网格示意图
Fig.7 Grid near the body

3.2 边界条件及计算设置

选用基于有限体积法的商用软件 FLUENT,边界条件设置:在入口截面均匀来流给定主流方向 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度分布,雷诺数为 2.46×10^7 (以车体高度为特征长度);出口面设为压力出口边界条件;地面为移动壁面边界条件,大小和方向与来流速度相同;对称面为对称边界条件;车体表面以及制动风翼均为无滑移壁面边界条件;流域上表面和侧面设为无滑移光滑壁面边界条件.

按不可压定常计算方式进行计算,湍流模型选用 Realizable $k - \epsilon$ 两方程模型,并选用 COUPLED 压力修正算法.对计算模型首先进行1阶精度的计算,当残差收敛到 10^{-3} 数量级后再进行2阶精度计算,直至残差减小到 10^{-4} 以下,且所有监测量(所受阻力、升力)不随计算的迭代而发生变化,此时认为计算收敛.

制动风翼在车体横断面为对称分布,如图4所示,且来流方向与 x 方向一致,因此,计算时将列车当作左右对称处理.本文研究计算只考虑单侧列车.

4 计算结果分析

本文分析了每节车均装制动风翼、某节车未装制动风翼、某几节车未装制动风翼等几种工况.列车时速均为 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,得到每节车均装制动风翼时纵向不同位置各制动风翼制动力分布规律;通过对比某节车不设制动风翼时对其他制动风翼产生制动力的影响;找出某几辆车未装制动风翼时纵向不同位置处制动风翼产生的制动力规律.

4.1 每节车均装有制动风翼时制动风翼阻力分布规律

首先研究8辆车均装有制动风翼时每块制动风翼产生的制动力,制动风翼在车上布置如图3所示.从迎风面第1块开始,每块制动风翼产生的制动力如图8所示.从图可见:第1块制动风翼所受气动阻力最大,随后逐渐降低;且下降逐渐趋缓,即2块制动风翼间制动力差别逐渐减小.单侧所有9块制动风翼产生的制动合力约为46 kN,整列车所有制动风翼产生的制动合力约为92 kN.

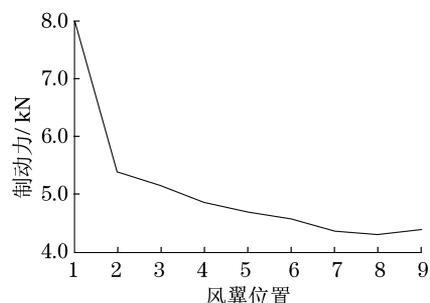


图8 每块制动风翼产生的制动力

Fig.8 Braking force generated by each of braking

车身和制动风翼表面压力分布如图9和图10所示.图中列车运行方向为 x 负方向.由图可见:迎风向制动风翼迎风面所受正压逐渐降低;背风面制动风翼所受负压第1块最大,其他没有大幅度变化.因此迎风向制动风翼所受阻力逐渐降低,即第1块制动风翼产生的制动力最大.

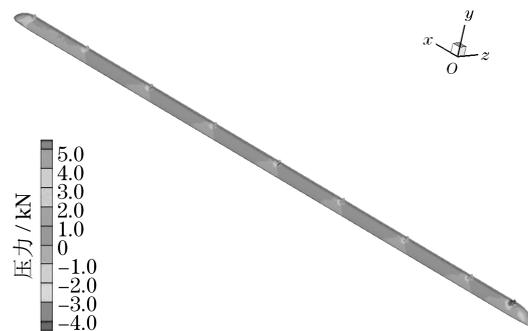


图9 列车和制动风翼表面压力分布图(x 负向视图)

Fig.9 Pressure distribution of the train and the braking panels (the view of x negative)

4.2 某节车未装制动风翼时制动风翼阻力分布规律

为分析某节车未装制动风翼时引起其他制动风翼产生制动力变化以及所有各制动风翼产生制动力规律,分别讨论第2节车(即迎风面第3块)和第4节车(即迎风面第5块)未装制动风翼.第2,4节分

别未装制动风翼时每块制动风翼产生制动力如图 11 所示,可见:未装制动风翼使得其后制动风翼所受阻力增加,迎风面第 3 块未装制动风翼引起其后第 4 块制动风翼所受阻力增大约 1.0 kN,第 5 块制动风翼所受阻力增大约 0.2 kN,但整列车单侧制动风翼产生的制动力比所有节车全装有制动风翼产生制动力下降了大约 3.7 kN;迎风面第 5 块未装制动风翼引起其后第 6 块制动风翼所受阻力增大约 0.7 kN,第 7 块制动风翼所受阻力增大约 0.3 kN,但整列车单侧制动风翼产生的制动力比所有节车全装有制动风翼产生制动力下降了大约 3.3 kN.

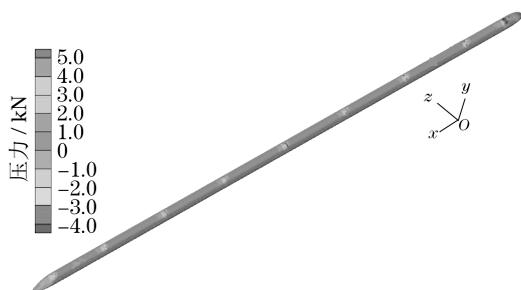


图 10 列车和制动风翼表面压力分布图(x 正向视图)

Fig. 10 Pressure distribution of the train and the braking panels(the view of x positive)

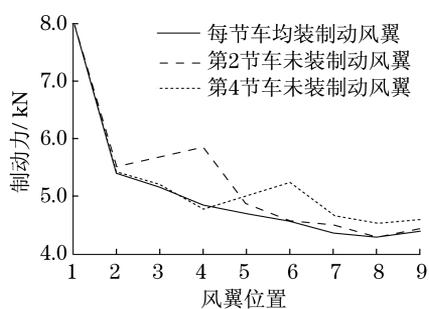


图 11 第 2 或 4 节未装制动风翼时各制动风翼产生制动力

Fig. 11 Braking force generated by each of braking panels when the braking panels are installed except for the second vehicle or the fourth vehicle

第 2 节车未装制动风翼时速度值分布图和压力值分布图分别如图 12 和图 13 所示.可见:从迎风面第 2 块制动风翼起,后 1 块制动风翼处于前 1 块流场尾迹区,导致后 1 块制动风翼流场速度值降低,由于制动风翼产生阻力与速度平方成正比,因此后 1 块制动风翼所受阻力降低,产生的制动力相应降低.第 2 节车(第 3 块制动风翼)未装制动风翼时,第 4 块制动风翼处于第 2 块制动风翼尾迹充分发展区,风翼处速度值回升,导致第 4 块制动风翼所受阻力增加,其制动力相应增加.



图 12 第 2 节车未装制动风翼时压强分布图

Fig. 12 Pressure distribution when the braking panels are installed except for the second vehicle



图 13 第 2 节车未装制动风翼时速度云图

Fig. 13 Velocity distribution when the braking panels are installed except for the second vehicle

4.3 某几节车未装制动风翼时制动风翼阻力分布规律

高速动车组实体结构车顶存在受电弓,安装制动风翼会对受电弓造成干扰.本论文以受电弓位于第 2,6 节车为例,研究安装有受电弓车厢不设制动风翼时列车所受空气动力制动.2,6 节车不装制动风翼时各制动风翼产生的制动力如图 14 所示.从图中同样可见:2,6 节车不装制动风翼(第 3,7 块制动风翼)后引起第 4,8 块制动风翼产生的制动力提高,均提高大约 0.8 kN,与第 3 块或第 5 块未装制动风翼时规律基本符合;但 2,6 节车不装制动风翼后单侧列车产生的总制动力比全列车均装制动风翼产生的总制动力减少了大约 7.0 kN,整列车总制动力减少了大约 14.0 kN.

研究第 2,3,6 节车均不装制动风翼时情况,其每块制动风翼产生的制动力与 2,6 节车不装制动风翼、各车均装制动风翼时制动力对比见图 14.从图可以看出:第 2,3,6 节车不装制动风翼比第 2,6 节车不装制动风翼单侧列车产生的总制动力减少了大约 3.9 kN,减少量小于产生制动力最小的制动风翼产生的制动力.

5 空气动力制动产生的制动力效果

假定 8 辆编组列车轴重为 15 t,速度为 350 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,每节车均装制动风翼时,产生的总制动阻力约为 92 kN,将制动阻力换算成减速度,相当于

速度为 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时产生 $0.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 瞬时减速度. 若受电弓车辆(第 2,6 节)不装制动风翼时,产生的总制动阻力约为 78 kN ,此制动阻力相当于产生了约 $0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的瞬时减速度.

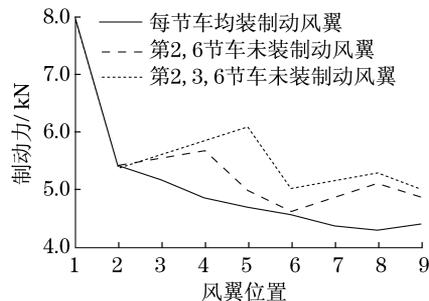


图 14 第 2,6 节或第 2,3,6 节车未装制动风翼时各制动风翼产生的制动力

Fig.14 Braking force generated by each of braking panels when the braking panels are installed except for the second vehicle and sixth vehicle or the second vehicle, third vehicle and sixth vehicle

6 结论

(1) 每节车均装有制动风翼时,迎风面第 1 块制动风翼产生的制动力最大,其余制动风翼产生的制动力逐渐减小,且减小幅度逐渐减慢,即沿着迎风向,第 1 块制动风翼与第 2 块制动风翼的差别最大,随后相邻两制动风翼产生的制动力差别减小. 速度为 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,单侧所有 9 块制动风翼产生的制动力合力约为 46 kN ,整列车所有制动风翼产生的制动力合力约为 92 kN .

(2) 中间某节车不装制动风翼时,导致随后制动风翼产生的制动力升高,且这种效应随着离这节车的距离的增加逐渐减弱. 中间某节车不装制动风翼时整列车制动风翼产生的总制动力低于各节均装有制动风翼时产生的制动力,但减少量小于产生的制动力最小的制动风翼产生的制动力.

(3) 结合实际应用工况,减小对受电弓的干扰,在受电弓车辆上未装制动风翼,单侧列车所有制动

风翼产生的总制动力为 39 kN ,比整列车各节车均装制动风翼减少了大约 7 kN .

(4) 除受电弓车辆未装制动风翼外,另有一节中间车未装制动风翼,单侧列车产生的总制动力减少了大约 3.9 kN .

(5) 本文探讨了制动风翼在车上的各种布置方式情况下制动风翼产生制动力的规律,为制动风翼在车上布置提供参考,但具体布置需根据待安装车体结构实际情况和所需制动力要求而定.

参考文献:

- [1] Johannes G. ICE3 列车直线涡流制动装置[J]. 国外机车车辆工艺,2003,9(5):1.
Johannes G. The linear eddy-current brake on the ICE3—operational concept and first experience[J]. Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology,2003,9(5):1.
- [2] Briginshaw D. The new generation of high speed train AGV in france[J]. IRJ,2000,40 (5):15.
- [3] Albertz D, Dappen S. Calculation of the 3D non-linear eddy current field in moving conductors and its application to braking systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1996,32(3):768.
- [4] Masafumi Y. Characteristics of the aerodynamic brake of the vehicle on the yamanashi maglev test Line[J]. RTRI,2000,41 (2):74.
- [5] Kazumasa O, Masafumi Y. Development of aerodynamic brake of maglev vehicle for emergency use[J]. RTRI,1989,3(11):53.
- [6] 周文. 日本最新研制的“姊妹”高速列车——Fastech 360S 型和 Fastech 360Z 型高速列车[J]. 铁道知识,2006(4):17.
ZHOU Wen. Japan's latest "sister" high-speed train—Fastech 360S type and Fastech 360Z High-Speed Train [J]. Railway Knowledge,2006,4:17.
- [7] 吉村 正文. 宫崎试验线车辆空气动力制动装置的开发[J]. 国外铁道车辆,1996(5):43.
Masafumi Yoshimura. Development of aerodynamic brake of Miyazaki Maglev Test Line Vehicle[J]. Foreign Rolling Stock,1996(5):43.
- [8] 苗秀娟,梁习锋. 高速列车空气制动板的研究[C]//工业空气动力学会议 04 论文集. 北京:中国空气动力学学会,2004:137-141.
MIAO Xiujuan, LIANG Xifeng. Research on air brake board of high-speed Train[C]//04 Industrial Aerodynamics Conference, Beijing: Industrial Aerodynamics Conference,2004:137-141.