

Optimal Design of Pantograph Platform for High-Speed Trains

Peng Lin¹, Ye Zhang^{1,2}, Dilong Guo^{2*}

¹National Engineering Research Center, CRRC Qingdao SIFang Co., LTD., Qingdao Shandong

²Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing

Email: linpeng@cqsf.com, *guodl@imech.ac.cn

Received: May 22nd, 2018; accepted: Jun. 4th, 2018; published: Jun. 11th, 2018

Abstract

In order to study the aerodynamic impact of pantograph platform on the pantograph system, six different pantograph platforms were designed, and the flow characteristics and aerodynamic drag characteristic of pantograph system were studied by IDDES (improved delayed detached eddy simulation) in computational dynamics. The results show that there is a strong vortex in the pantograph region, the external type of pantograph platform causes increase of the aerodynamic force of the pantograph system; under the condition that the sinking height is determined, the topology of the sinking platform has little influence on the aerodynamic forces of the pantograph system. The research results provide the basis for the selection and design of the pantograph platform for high-speed trains.

Keywords

High-Speed Train, Pantograph Platform, Sinking-Type, Aerodynamic Force

高速列车受电弓平台的优化设计

林 鹏¹, 张 业^{1,2}, 郭迪龙^{2*}

¹中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 国家工程研究中心, 山东 青岛

²中国科学院力学研究所, 流固耦合系统力学重点实验室学院, 北京

Email: linpeng@cqsf.com, *guodl@imech.ac.cn

收稿日期: 2018年5月22日; 录用日期: 2018年6月4日; 发布日期: 2018年6月11日

摘 要

为了研究高速列车受电弓平台对受电弓系统的气动阻力影响, 本文设计了六种不同形式的受电弓平台,

*通讯作者。

文章引用: 林鹏, 张业, 郭迪龙. 高速列车受电弓平台的优化设计[J]. 力学研究, 2018, 7(2): 27-35.

DOI: 10.12677/ijm.2018.72004

采用计算流体力学中IDDES (improved delayed detached eddy simulation)方法研究了受电弓系统区域的流动特性、气动阻力特性。研究表明：高速列车受电弓区域存在强烈的旋涡运动；外置式无下沉结构的受电弓平台导致整个受电弓系统的气动力增大；在下沉高度确定的条件下，下沉式平台的拓扑形式对于气动力的影响很小。研究结果为高速列车受电弓平台的选型与设计提供了依据。

关键词

高速列车, 受电弓平台, 下沉式, 气动力

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高速铁路是交通系统中的重要组成部分, 高速列车相对于汽车、飞机等交通工具, 具有能耗小的特点[1] [2], 高速列车的空气阻力与列车的运行速度成平方关系, 随着列车运行速度的提高, 空气阻力占总阻力的比例越来越高, 根据相关文献[3] [4] [5] [6], 对于流线型非常好的高速列车, 列车运行速度达到 300 km/h 时, 空气阻力可以占到总阻力的 75%以上。高速列车运行时所受的空气阻力包括压差阻力和表面摩擦阻力, 摩擦阻力主要与列车的表面面积有关, 而压差阻力与列车的头型、列车表面的凸起物形状(如受电弓、空调整流罩、受电弓整流罩)、列车底部结构形状、风挡形式等有关, Raghathan 等的研究指出[6]: 对于流线型较好的高速列车, 压差阻力可以占总阻力的 60%。因此, 优化列车表面凸起物的形状对于减小高速列车的空气阻力有重要意义。受电弓是一个位于高速列车车顶的重要附属装置, 目前, 由于受到结构、线路条件的限制, 受电弓必须裸露于车顶, 造成了高速列车一个较大的阻力源。王洪娇[7]、张雪[8]研究了列车运行时受电弓的受力状态, 发现受电弓后部存在强烈的漩涡。郭迪龙研究了高速列车受电弓气动力的非定常特性[9], 得到了受电弓气动力的振荡频率、振幅等。姚拴宝等人的研究表明[10]: 对于 8 编组高速列车, 受电弓系统的空气阻力占总空气阻力的 12%。可见, 虽然受电弓系统的体积较小, 但对于整车的阻力有较大的影响。受电弓系统包括绝缘子、受电弓、受电弓平台等, 受电弓平台支撑着受电弓立于车顶之上, 不同的平台拓扑结构将会直接影响受电弓的受力特性。目前高速列车受电弓平台主要有外置式和下沉式两种, 外置式将受电弓直接置于车厢上表面, 受电弓受到气流的直接作用承受较大的阻力, 如 CRH380AL 高速列车; 下沉式平台将受电弓置于车厢上表面的凹腔内, 如 CRH380BL 高速列车。对于具有凹腔的受电弓平台, 气流经过时会形成凹腔流动, 不同的凹腔结构会影响气流的流动特性, 进而影响受电弓系统的受力情况, 因而需要合理设计平台的结构, 使之既能有效降低受电弓承受的阻力, 又不会增加平台带来的额外阻力。本文通过比较不同受电弓的拓扑, 分析受电弓系统的受力, 得到高速列车受电弓平台的合理形式。

2. 受电弓平台的模型及拓扑

根据高速列车车顶的约束, 本文设计了 6 种形式的受电弓平台, 如图 1 所示, 图中 Model-1 为五边形造型, Model-2 为外置式无下沉结构, Model-3 为椭圆形, Model-4 为梯形, Model-5 为水滴形, Model-6 为矩形。所有下沉式平台深度均为 450 mm, 相邻面连接处均做倒角处理。在评估时, 需要考虑受电弓系统的受力(包括受电弓平台、受电弓), 因此, 在计算模型中增加了受电弓装置, 同时, 为了模拟头型和边

界层对受电弓区域的影响, 采用了 8 编组的简化高速列车外形, 升弓安装于第 3 车, 降弓安装于 6 车, 受电弓平台、受电弓的安装位置如图 2 所示。

3. 网格划分及计算方法

在本文中, 采用大型流体计算软件 STAR-CCM+对流场进行计算, 该软件集成了网格生成、求解器及后处理等功能, 本研究中采用切割网格方法对整个计算区域进行网格划分, 为了模拟边界层的影响, 在壁面附近生成 10 层边界层网格, 总厚度为 0.02 m, 边界层网格法向的增长比为 1.2, 这样, 第一层的网格高度约为 8×10^{-4} m, 这样能保证壁面 Y^+ 在 30~100 的范围内。整车的长度为 200 m, 以列车的高度作为特征长度, 简称为 H, 计算域中气流的入口位于列车头部前 30 H, 气流出口位于列车尾车鼻锥的 60 H, 左右两侧及高度方向位于 30H。为了能够更精确模拟受电弓区域的流动, 在受电弓区域和列车区域进行了加密, 采用两个加密区, 最内层的网格尺度为 0.08 m, 外层为 0.64 m, 整个计算域的网格量约为 4000 万。图 3 给出了受电弓平台分析的计算网格。

高速列车受电弓区域的流动呈现出强烈的非定常特性, 需要采用非定常方法进行计算, 计算中来流的速度为 97.22 m/s (350 km/h), 马赫数为 0.2859, 气流达到了可压缩的范围, 因此选用可压缩的求解器,

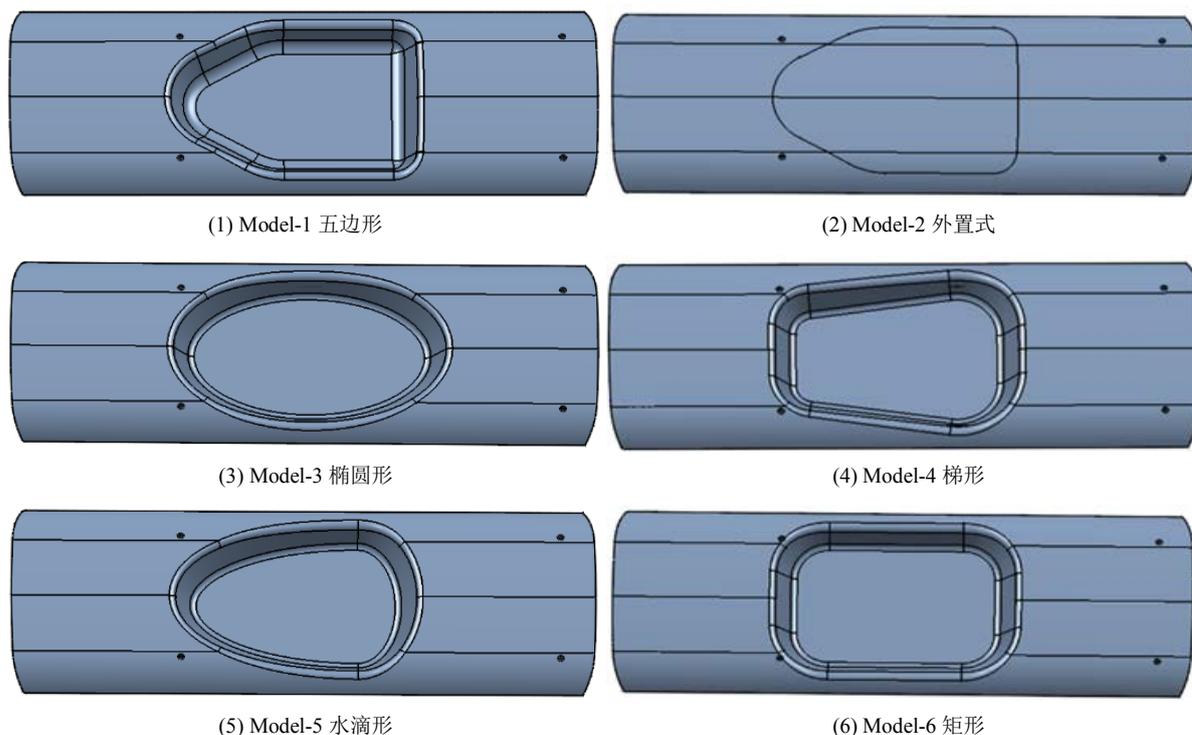


Figure 1. Six kinds of different pantograph platforms design

图 1. 16 种不同受电弓平台设计方案



Figure 2. The sketch of the calculation model of the pantograph platform

图 2. 受电弓平台的计算模型示意图

时间项离散采用二阶欧拉方法，物理时间步为 0.001 s，内迭代步为 20 步。为了精确模拟受电弓区域的非定常流动，根据上节中第一层网格高度的设计，湍流模拟采用改进的延迟脱体涡方法(IDDES)结合壁面函数进行模拟。边界条件包括：计算域的四周采用自由来流条件，地面采用运动地面，地面的运动速度与列车运动速度一致，保证地面与列车无相对运动，列车壁面采用绝热无滑移壁面边界条件。

4. 计算方法的验证

为了验证计算方法和计算网格的正确性，采用具有详细试验数据的 3 编组，1/8 比例的 CRH380A 风洞模型进行对比，该试验在同济大学的汽车风洞进行。3 编组模型包括头车、中间车和尾车，风洞的试验速度为 60 m/s，计算网格的划分策略及计算方法的选取与上文中保持一致。图 4 为风洞的试验模型及网格划分示意图，图 5 为模型的测压点在车身上的分布。图 6 为试验数据与计算结果的对比。

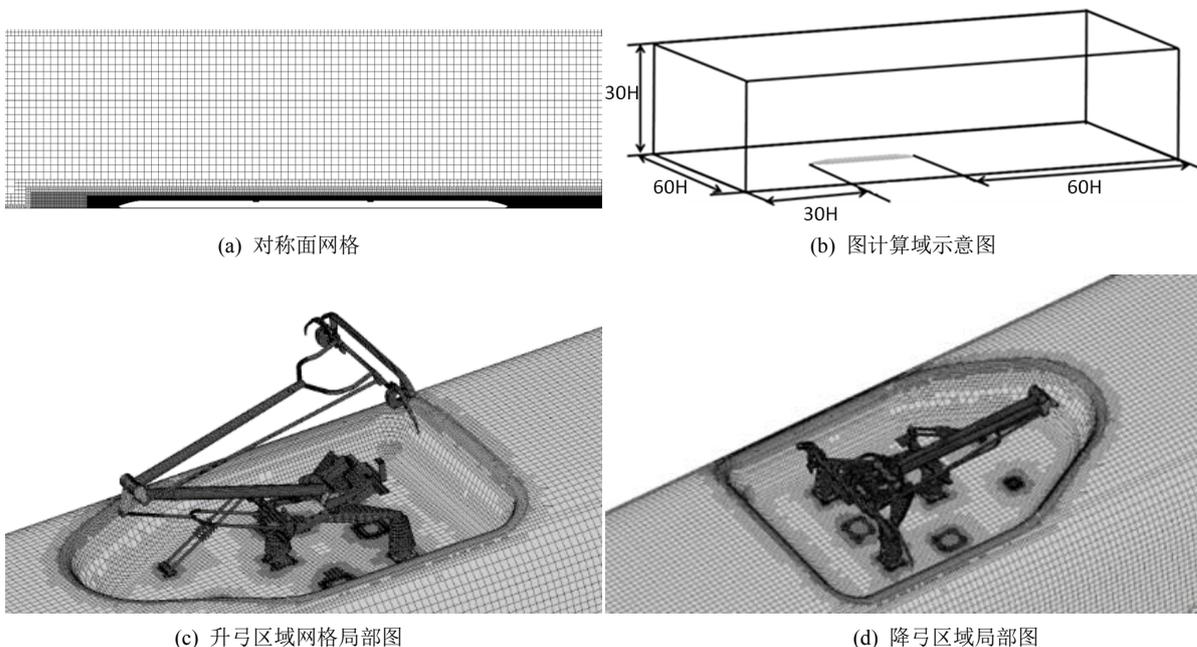


Figure 3. Six kinds of different pantograph platforms design
图 3. 16 种不同受电弓平台设计方案

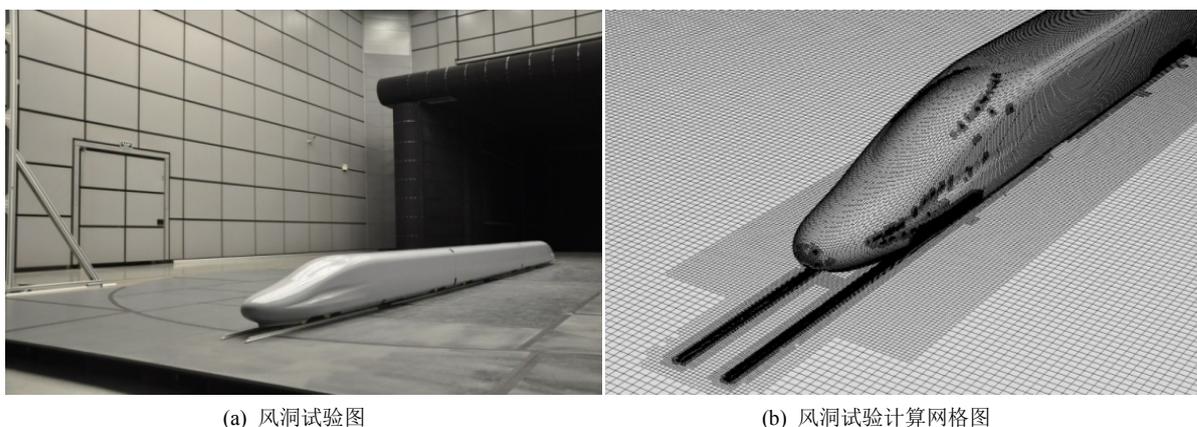


Figure 4. Tunnel experiment model and its mesh
图 4. 风洞试验模型及其网格划分

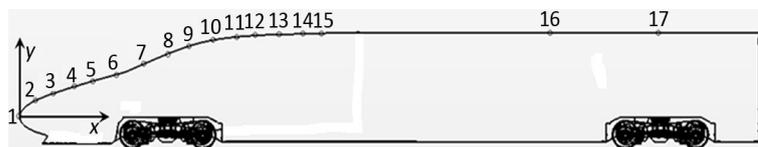


Figure 5. Measuring points of the tunnel model

图 5. 风洞试验模型的测点

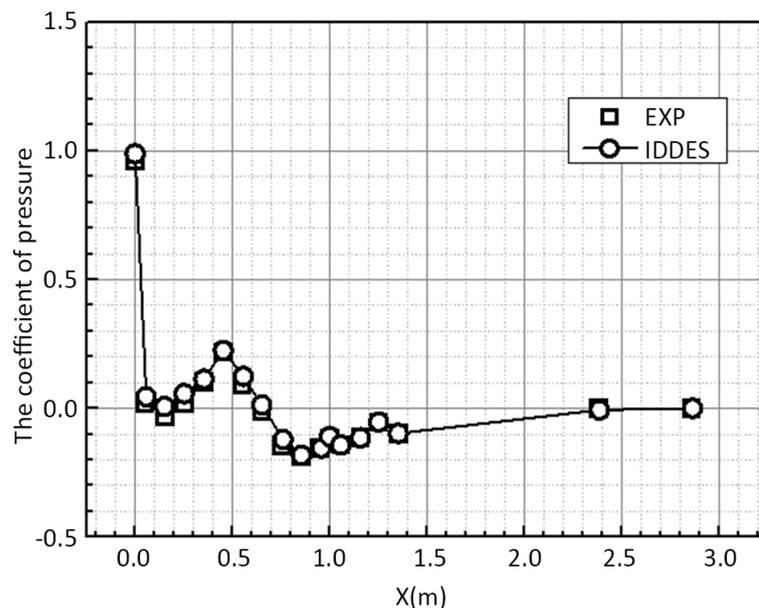


Figure 6. The comparison of computational data and the wind tunnel test

图 6. 计算结果与风洞试验结果的对比

计算结果与试验结果处理时,取测压点压力值稳定后 1 秒内数值进行统计平均,得到该点的压力值,从图 6 中可以看出:在图中峰值部分(驻点区域),试验值和计算值符合很好,在车身的平直段和流线型部分,试验结果与计算结果都能符合得很好,这证明了本文中所用计算方法及网格策略划分的正确性。

5. 计算结果及分析

受电弓平台的形状、平台与受电弓的相对位置的差异会给整个受电弓系统附近的流场乃至整个列车流场造成差异,进而影响受电弓系统和整车的气动力。本文首先对受电弓系统附近的流场进行分析,继而研究整个受电弓系统的压力分布状况,最后分析整个受电弓系统的受力。

5.1. 受电弓区域的流动特性

图 7 中给出了不同方案在升弓平台附近的流线分布。从图中可以看出:当气流从车顶前方流入受电弓系统时,对于存在平台凹腔的受电弓系统,一部分气流流入到凹腔内部,一部分气流直接冲击到受电弓,由于流向横断面存在横断面面积的突然增大,使得流入凹腔内的气流速度减小,使得位于凹腔高度下的受电弓部分受到的冲击减小,该部分的所受的气动力也减小,在凹腔的后部,由于气流要从凹腔内流出,气流将冲击到凹腔的后部,造成凹腔受到气动力增加,在这个过程中,由于断面的突然变化导致压力的巨变,使得在凹腔内部形成强烈的旋涡,凹腔内旋涡的存在不但会影响该凹腔的受力,还会影响受电弓的受力。凹腔内旋涡的强度、范围与凹腔的形状紧密相关。对于不存在凹腔的设计形式,如 Model-2,气流将直接冲击到整个受电弓,导致受电弓的受力会大大增加。

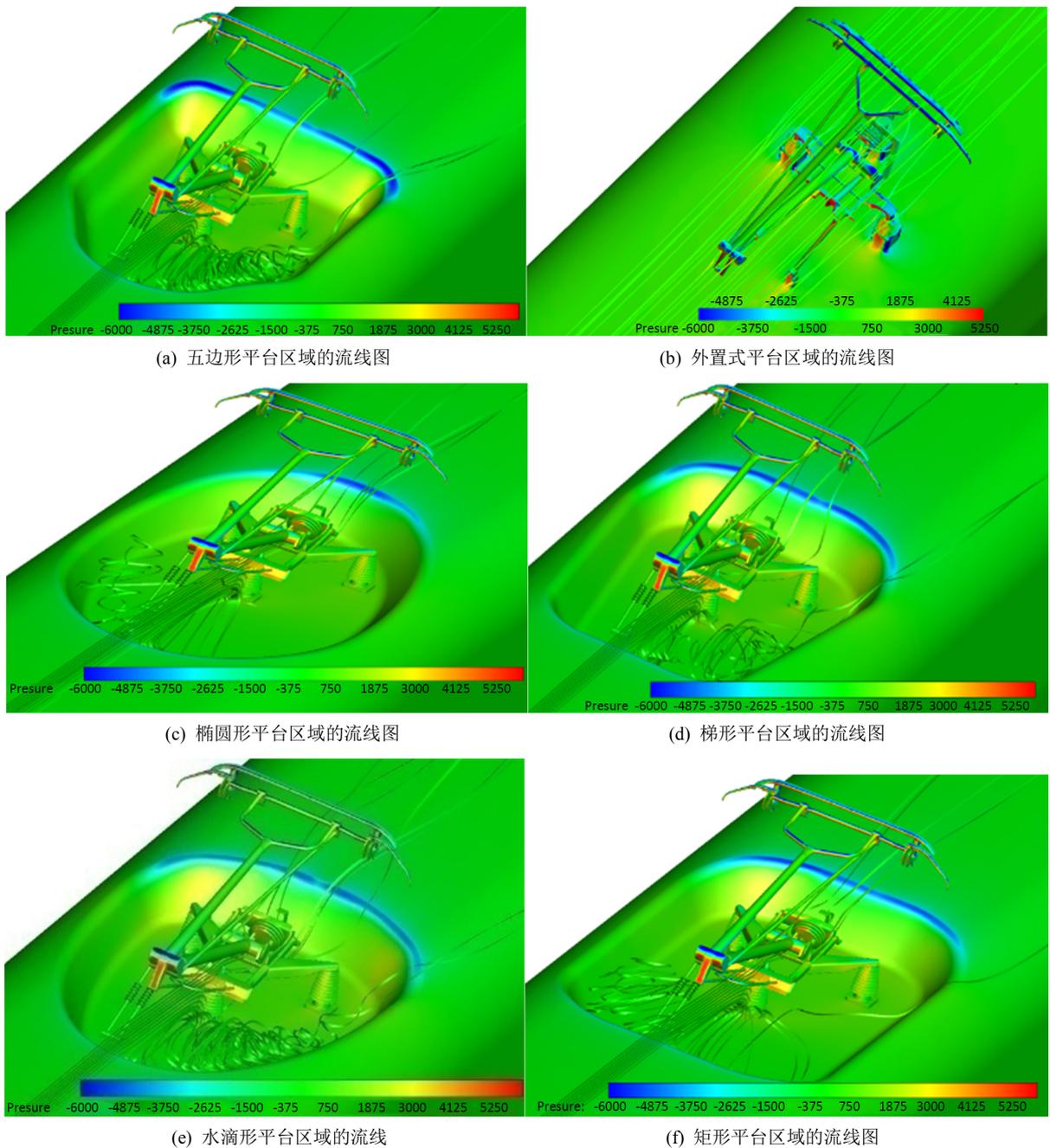


Figure 7. The streamline distribution of the six kinds of pantograph platform

图 7. 六种受电弓平台区域的流线图

5.2. 受电弓区域的压力分布特性

图 8 中给出了受电弓系统附近的区域的压力分布云图，从压力分布上看，外置式平台与下沉式平台存在很大不同。Model-2 中受电弓直接裸露在车顶表面，气流在受电弓底部与车体连接的区域靠近来流一侧产生高压区，受电弓后方压力值较小，因而对于外置式平台，受电弓系统承受的阻力主要为压差阻力，且受电弓为主要受力构件。对于下沉式 Model-1 及 Model-3~Model-6，气流在受电弓后方与凹腔后壁面之间形成高压区，凹腔的壁面成为不可忽略的阻力来源，同时，凹腔形式的不同，造成了高压区的范围，

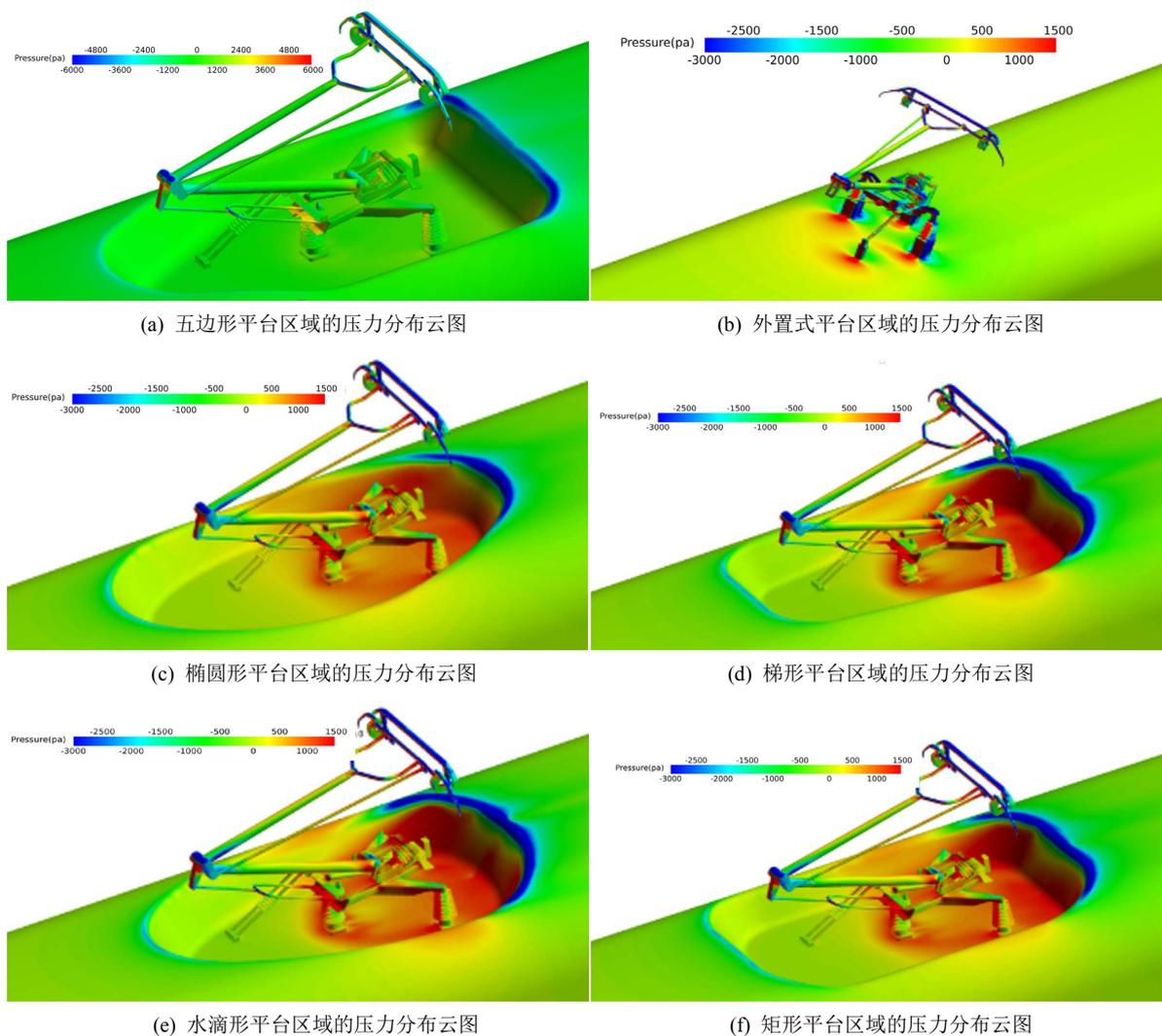


Figure 8. The contours of Surface pressure distribution of the six kinds of pantograph platform

图 8. 六种受电弓平台区域的压力分布云图

高压区的分布有很大的不同(表 1)。

5.3. 不同受电弓区平台的气动力

图 9 和图 10 中给出了不同设计方案下平台和受电弓的阻力系数对比以及整车阻力系数对比。其中阻力系数 C_d 的定义如下式:

$$C_d = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho V^2 S}$$

其中 C_d 为阻力, F_x 为气流密度, ρ 为来流速度, S 为参考面积, 本文取车体的断面面积 11.91 m^2 。

从图中可以看出, 外置式方案(Model-2)受电弓和平台所受总阻力明显高于其他方案, 高 28% 左右, 这是因为受电弓的整个部分直接受到来流的冲击, 整个受电弓受到的阻力很大, 而下沉式平台由于受电弓的大部分位于凹腔内部, 受到的阻力小, 所以外置式方案远远高于下沉式方案。下沉式平台不同拓结构之间相差不大, 阻力系数均在 0.046 (以来流速度, 理想大气密度和车身横断面面积无量纲化) 左右。

Table 1. Drag coefficient of pantograph system and the whole train
表 1. 标受电弓系统和整车阻力系数

平台形式	受电弓系统的阻力系数	整车阻力系数
Model-1	0.0462	0.3782
Model-2	0.0648	0.3882
Model-3	0.0461	0.3752
Model-4	0.0460	0.3751
Model-5	0.0461	0.3783
Model-6	0.0461	0.3780

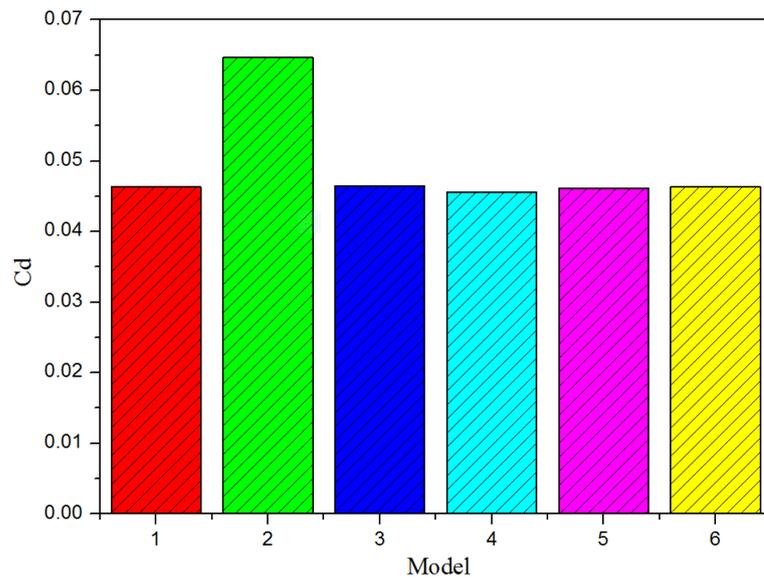


Figure 9. The drag coefficient of pantograph system of different pantograph platform
图 9. 不同平台下受电弓系统的阻力系数

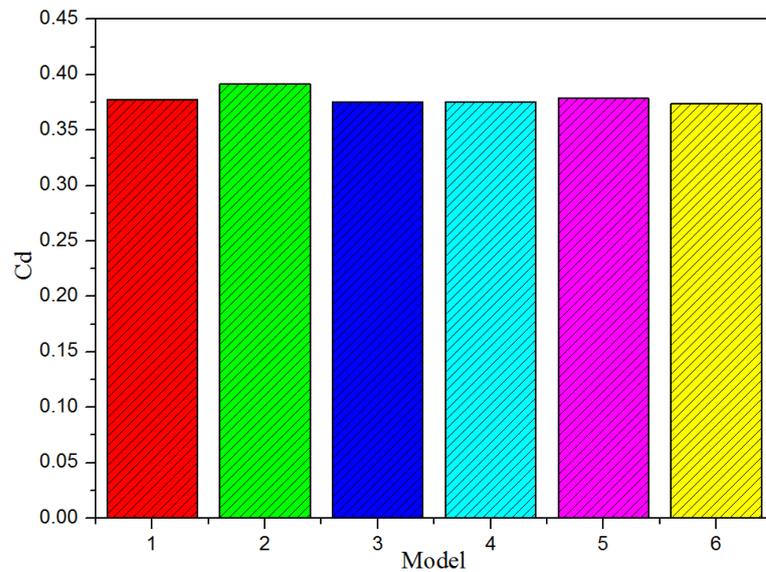


Figure 10. The drag coefficient of the whole train of different pantograph platform
图 10. 不同平台下整车的阻力系数

对于整车阻力系数,无下沉方案整车阻力略高于其他方案,高 3.5%左右。下沉式平台不同拓扑结构之间相差不大,最小的为 Model6 矩形结构,考虑到计算误差,可以认为下沉式平台在平台深度确定的情况下,不同拓扑结构对整车阻力的影响可忽略。

6. 结论

基于 IDDES 的非定常计算流体力学方法,本文研究了不同拓扑形式高速列车受电弓平台的气动阻力特性,得到了以下结论:

1) 外置式受电弓平台导致气流直接冲击到受电弓装置,凹腔形式平台能有效缓解气流对受电弓的冲击,但会在凹腔内部形成强烈的漩涡,同时在凹腔的后缘形成高压区,在前缘形成低压区。

2) 凹腔形式的受电弓平台能有效的减小整个受电弓系统的气动阻力,凹腔的拓扑结构对于整个受电弓系统的气动阻力影响很小。

虽然凹腔形式的受电弓平台能有效减小受电弓系统的气动阻力,但由于凹腔的存在,有可能会产生新的噪声源,需要进行进一步的研究。

基金项目

国家科技支撑计划资助项目(2015BAG12B01)。

参考文献

- [1] 伊藤顺一. 改善空气动力学性能,实现新干线的高速[J]. 国外铁道车辆, 2002, 39(5): 9-12.
- [2] 沈志云. 关于高速铁路及高速列车的研究[J]. 振动、测试与诊断, 1998, 18(1): 1-7.
- [3] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [4] 许平, 田红旗, 姚曙光. 流线型列车头部结构设计方法[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(1): 79-82.
- [5] Schetz, J.A. (2001) Aerodynamics of High-Speed Trains. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **33**, 371-414. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.33.1.371>
- [6] Raghathan, S., Kim, H.D. and Setoguchi, T. (2002) Aerodynamics of High-Speed Railway Train. *Progress in Aerospace Sciences*, **38**, 469-514. [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(02\)00029-5](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(02)00029-5)
- [7] 张雪. 基于空气动力学的高速受电弓研究[M]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [8] 郭迪龙, 姚拴宝, 刘晨辉, 杨国伟. 高速列车受电弓非定常气动特性研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(11): 16-21.
- [9] 王洪娇. 高速列车受电弓的气动力学特性[M]. 成都: 西南交通大学, 2015
- [10] 姚拴宝, 郭迪龙, 杨国伟, 李明高. 高速列车气动阻力分布特性研究[J]. 2012, 34(7): 18-23.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-498X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ijm@hanspub.org