

高速受电弓的 CFD 建模及分析

Modeling and Analysis of CFD for High-speed Pantograph

宋洪磊 吴燕 郑积浩 张群峰

(北京交通大学)

摘 要: 当列车速度超过 250km/h 时, 高速气流对受电弓-接触网受流性能的影响越来越大。在弓网受流性能方面, 风阻对弓网接触力的影响增大, 因此要满足动车组的取流要求就要对高速受电弓的空气动力性能进行研究。本文从空气动力学的角度出发, 首先通过 UG 软件建立受电弓的三维模型, 然后利用 STAR-CD 软件对受电弓的气动力学性能进行数值分析。经仿真计算研究得出, 在动车组安装受电弓处加装导流罩, 即可以保证良好的高速动态受流动态性能来确保安全稳定运行, 也会改善气动噪声的影响。

关键词: 受电弓 STAR-CD 空气动力 弓网受流

Abstract When the train's speed is over 250km/h, the influence of interaction of Pantograph-Catenary is highly increasing, which comes from aerodynamic of the high-speed airflow. In terms of properties of interaction of Pantograph-Catenary, the resistance of air which impacts on contract force of Pantograph-Catenary is enlarging. So it should take on aerodynamic performance of high-speed pantograph research to meet the EMU's requirements of current collection. This paper begins with the point of aerodynamic analysis. First of all, use 3D modeling software UG to establish 3D model of high-speed pantograph, and then use STAR-CD software to analyze aerodynamic numerical performance of pantograph. By simulation study, we can conclusion that installation of current dome in pantograph of Train Set With Power Car can not only improve the dynamic performance of current collection of electric locomotive to ensure the security and stability, but it will improve the aerodynamic noise.

Key words: Pantograph; STAR-CD; Aerodynamic; Interaction of Pantograph-Catenary

1 引言

铁路运输正朝着高速行车方向发展, 高速度已成为时代的标志。制约电气化铁路机车运行速度提高的主要因素之一就是受电弓-接触网系统的高速受流特性。随着高速铁路的迅速发展, 舒适安全快速的优点已经被越来越多的人所重视, 当列车的速度达到250km/h及以上时, 高速气流产生的空气

动力对列车部件的影响也越来越大,并且空气阻力占到了总阻力的75-80%,影响了高速铁路中受电弓-接触网的受流质量,受流质量的好坏直接影响到列车行进的速度。电能通过接触网悬挂系统经由安装在机车顶部的受电弓传到电力机车上,运行中的弓网实物如图1所示,而受电弓的空气动力性能是保证弓网系统具有良好的稳定性和跟随性的重要因素,而且空气动力也影响到列车的运行性能,安全运行以及噪声污染等问题。因此良好的受流应该具有良好的空气动力性能,但是受到现实硬件条件的限制,用计算机仿真的方法成为研究此类问题的一种快捷有效的措施,并且通过模型仿真也有助于新系统的开发和性能要求的提高。



图1 运行中弓网相互作用图

通过研究空气动力特性而改善动车列车的动力性、经济性、安全性及舒适性成为重要的研究方向。同时应用比较成熟的计算流体力学软件STAR - CD对受电弓的简化模型进行了CFD (计算流体力学)数值模拟,对受电弓的空气动力特性进行了分析,为CFD技术在铁路方向上的应用提供了经验。

2 受电弓的空气动力学研究

受电弓的空气动力学研究是以列车为主体的整个系统分析的,高速列车是在充满着以空气为介质的空间里运行的,其研究的对象可以归纳为研究空气流体及在空气流体中的刚体间相互作用力的问题,于是引入了空气动力学理论。

2.1 研究的流体力学理论

在空气动力学研究中,忽略流体系的分子结构,将流体看作是连续介质,其中没有真空的地方,没有分子间隙和分子运动,物质连续地分布于其所占有的整个空间,物质宏观运动的物理参数是空间及时间的可微连续函数。这个假设对空气动力是成立的,称之为连续性假设或流体介质密度稠度性假设。采用流体连续截止假设后,表征流体属性的物理量为空间和时间的连续函数。在解决流体力学实际问题时,就可以应用数学分析这一有力工具来处理。因而,对于连续介质模型,微积分等现代数学工具可以加予应用。

由于流体的连续性使得我们能够把流体的运动学上的各个基本量(如速度、压力等)看作是某些物理量(如时间、空间坐标)的连续函数,这样就可以建立在连续函数基础上的数学模型求解空气动力学

问题。

$k-\varepsilon$ 湍流是空间中不规则和时间上无秩序的一种高度复杂的非线性的流体运动。在湍流中流体的各个物理参数，如压力、温度、速度等都随时间与空间发生随机变化。这种湍流运动也是工程技术领域中最常见的流动现象，所谓湍流模型就是依据湍流的理论知识、实验数据，对Reynolds应力做出各种假设，从而使湍流的平均Reynolds方程封闭。

如下式是说明空气的阻力系数和抬升力系数

$$P_x = 0.5c_x \rho v_1^2 s$$

$$P_y = 0.5c_y \rho v_1^2 s$$

式中， c_x —空气的阻力系数， c_y —抬升力系数， P_x —受到的空气的阻力， P_y —受电弓的抬升力。

2.2 受电弓的气动特性

说明受电弓运行时气动抬升力与空气流动速度的关系。通过研究空气的气动力特性分析列车在高速运行时，受电弓受到的阻力和框架受到的抬升力，以便于在后期的设计过程中进行优化。

2.2.1 受电弓的阻力

对于受电弓弓头，上臂和下臂在 x, z 方向上进行气动力分析，在对整个受电弓的受力分析。根据列车空气动力学的定义，在通常研究中，定义空气动力系数为：

$$C_D \square A = D / \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right), \text{ 其中 } D \text{ 为受电弓受到的阻力。}$$

2.2.2 受电弓的抬升力

在受电弓的抬升力分析中，具体的研究目的是为了维持弓头平衡，特别是在高速运行情况下，受电弓弓头的平衡稳定运行是良好受流质量的保证。受电弓是由上框架、下框架、弓头、滑板、上升或下降弹簧阻尼等结构组成，对这样一个复杂系统进行分析，如果弓网接触压力降低到 0，会造成离线和火花，如果接触压力太高，接触线的抬升量会超过范围，甚至会引起断线等事故。接触网和滑板的磨损也是与接触力有关系的，为了避免抬升量过高以及过度磨损，要求接触力不能太大，但是为了避免离线和火花，要求接触力又不能太小。保证接触导线和滑块磨耗最小，又不致使导线产生危险地偏离，从而说明这是可靠和经济的受流条件。

2.2.3 仿真结果

图表1，为速度为350 km/h时，x、z方向受电弓整体作用力。

表1 受电弓受力情况

受电弓来流方向	X方向	Z方向
作用力	500N	20N

3 CFD数值模拟

3.1模型的建立

利用三维几何建模软件 UG，受电弓建模过程中需要确定的参数有，受电弓上框架，下框架，滑板和弓头的几何尺寸参数，通过上面的简化后得到的这个模型可以在 CFD 前处理软件中进行网格划分。下图是采用 UG 软件建立的高速受电弓的空气动力学模型，如图 2 所示。



图 2 受电弓的 CAD 模型

3.2 网格的划分

可以选取单独的前处理软件,或者应用大型商业 CFD 求解器的前处理软件。本研究算例是在 STAR-CD 的前处理 Prostar 中完成的。对于受电弓的计算区域以及受电弓的几何模型,利用 Ansys 软件进行网格划分,共划分为 3095219 个多面体单元,如图 3 所示。

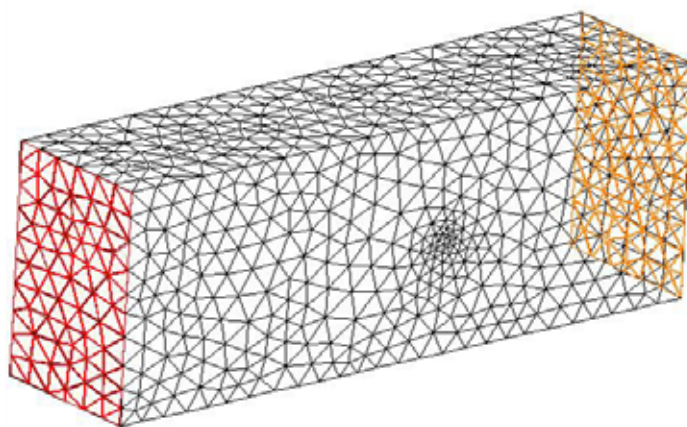


图 3 网格的划分

3.3 边界条件的建立及求解

根据模拟的要求进行边界条件设置。对于列车空气动力学数值模拟一般应用高雷诺数低速不可压模型, 设置与风洞数值模拟相类似的边界条件。根据情况可以进行具有移动地板边界条件的模拟。如果有需要, 还要进行热场边界条件的设置。在进行求解结果输出的设定之后就可以求解了。在准备进行仿真分析的模型中, 将计算域的外边界 (上、左、右面) 定义为滑移壁面, 其他边界均为无滑移壁面; 设定流量边界条件, 入口采用 Inlet 边界条件, 给定入口速度为 100m/s, 出口 outlet 边界条件, 为 100%流出条件。

本模型为稳态流动, 采用高 Reynolds $k-\xi$ 湍流模型。流体属性为空气 (密度为 $1.205\text{kg}/\text{m}^3$; 温度为 293K), Cv 为 $1.006\text{kJ}/\text{K}\cdot\text{kg}$, Conductivity 为 $0.02637\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}$, 稳流模型选择 k-Epsilon/High Reynolds Number, 收敛迭代步长数为 1200。

3.4 计算结果分析

分析受电弓弓头受力情况, 上臂, 下臂以及整体受力情况, 验证阻力情况与速度的关系, 受电弓的所受风压分析。

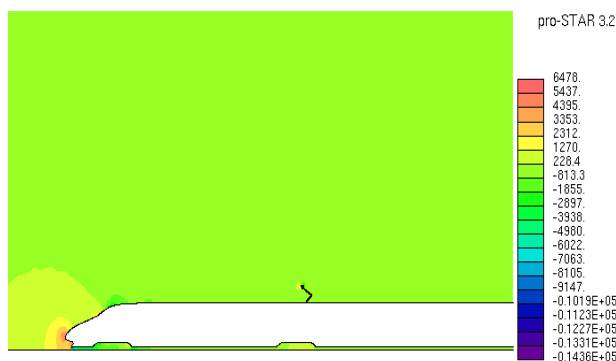


图 3 受电弓与机车表面的压力云图

对整体模型进行分析, 假设受电弓安装在车厢中段上 (由于考虑到模型划分网格的数量, 只引

入单节车厢模型),对网格划分,边界条件设定好的模型进行分析。首先,得到整个车厢与受电弓的表面压力云图,如图3。我们可以清晰知道,在车厢车头和受电弓的弓头部分是受到的压力较大的,这都是着重分析的区域。

将重点放在受电弓部分,我们可以得到受电弓具体表面的压力云图,如图4。图中红色的区域为迎风压力流动滞止面,所以表面压力值较大。由图中可以看出,在弓头方向受到的压力较大,在上臂杆和弓头连接处的锥塞处的压力也很大,而由于此作用的存在,在上臂杆的上部没有受到过大的压力,还有在上臂杆和下臂杆连接处也是重点受力区域。正面的风压决定了滑板的正面阻力。

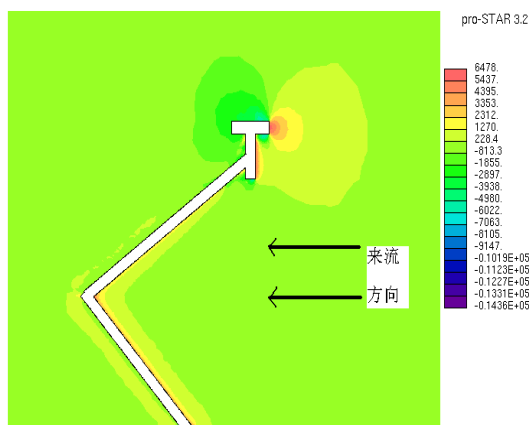


图4 受电弓表面压力云图显示

图5和图6是受电弓的侧面视角和俯视得到的表面压力云图显示。受电弓在迎风流方向受到的力比较大,尤其是在弓头的滑板的迎风方向最明显,图5就显示了在滑板的上下表面受到压力,还有滑板两侧受到的压力分布,由于锥塞处的形状的特殊性,就使得此处受的压力较大。图6显示了在迎风流方向受到的力明显大于被风侧,以致在分析受电弓在高速空气动力时,弓头是一个重要的考虑的因素,特别是弓角的形状对弓头的稳定有重要的作用,决定了空气动力的中心,可以设想在弓角上安装机翼可以调节压心。由于高速空气的作用,涡流作用影响到了被风侧的压力分布,通过此次分析,可以清楚受电弓所受的分压情况。

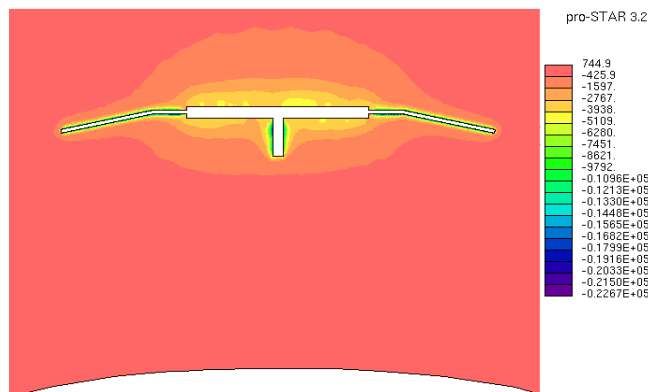


图5 受电弓侧视表面压力云图显示

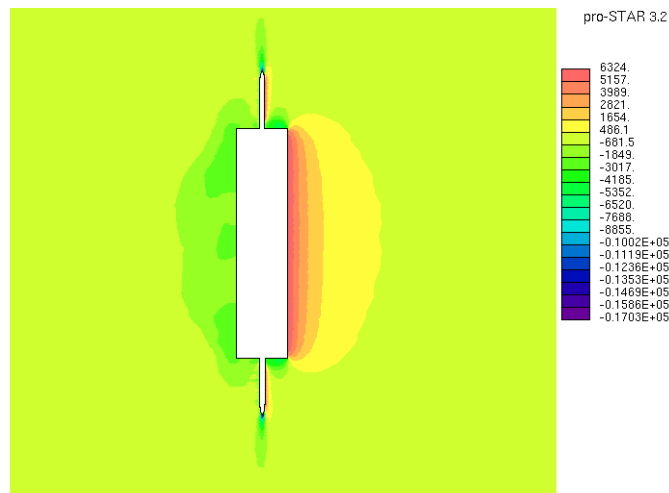


图 6 受电弓俯视表面压力云图显示

4 结论

本文通过流体力学计算软件 STAR-CD 的数值仿真，建立受电弓的三维模型，在合理的计算条件下对受电弓的空气动力特性进行了分析，能够正确的反映弓网的动态受流性能，为进一步研究弓网配合、参数优化提供了有效的手段。高速电力机车要具有良好的受流性能，以确保安全运行，由于空气动力对受电弓的受流稳定性影响很大，因此有必要对动车加装导流罩，对车头形状进行设计等结合起来考虑。

5 参考文献

- [1] 张卫华,沈志云.受电弓动力学研究.铁道学报,1993,15(1):23-30.
- [2] 蔡国华.高速列车受电弓气动力特性测量.流体力学试验与测量,2004,18(1):53-56.
- [3] A Collina, A.Facchinetti, and F.Resta, "A feasibility study of an aerodynamic control for a high speed pantograph," IEEE international conference on advanced intelligent mechatronics, 2007.
- [4] M.Bocciolone, F.Resta, D.Rocchi, A.Tosi and A.Collina, "Pantograph aerodynamic effects on the pantograph-centenary interaction," IEEE Vehicle System Dynamic, Vol. 44, pp. 560-570, 2006.