

受电弓空气动力学的仿真模型研究

吴燕¹ 郑积浩¹ 周海鹰²

(1 北京交通大学电气学院, 北京市 100044 2 CDAJ 中国公司)

摘要: 当高速列车达到 250~300km/h 及以上时, 高速气流产生的气动力对列车的影响越来越大, 空气阻力占到了总阻力的 75~80%。性能良好的受电弓应具有良好的空气动力学性能, 但受到实物进行试验和试运行范围的限制, 计算机仿真的方法是成为空气动力学作用研究一条途径。本文利用计算机进行了流体力学(CFD)的数值仿真, 作为研究受电弓气动力学性能的一种有效方法, 模拟了受电弓在开放空间的空气动力学性能, 结果显示与实验结果接近。采用仿真手段减少了试验成本, 为优化设计受电弓, 进一步研究高速受流问题奠定了基础。

关键词: 受电弓 弓网受流 空气动力 仿真分析 噪声 应力

1. 引言

随着高速铁路的大力发展, 电力牵引以其速度高和牵引力的优点已越来越被世界各国公认, 然而高速铁路受电弓—接触网的受流质量的好坏是决定高速行车的关键[1]。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输到电力机车上。高速列车牵引供电的新型接触网系统不同于传统的接触网系统, 当列车由普通速度提高到高速运行时限制实现最高速度的因素有很多, 而受电弓的空气动力学性能是保证弓网系统有良好跟随性和稳定性的重要因素[2]。空气动力影响到列车的运行性能、运行安全以及噪声污染等。当高速列车达到 250~300km/h 及以上时, 高速气流产生的空气动力对列车部件的影响越来越大, 空气阻力占到了总阻力的 75~80%。性能良好的受电弓应具有良好的空气动力学性能, 但受到对实物进行试验和试运行范围的限制, 计算机仿真的方法是成为空气动力学作用研究一条有效途径, 模拟方法的采用特别有助于开发新系统并提高性能要求。

本文利用计算机进行了流体力学(CFD)的数值仿真, 作为研究受电弓气动力学性能的一种有效方法, 模拟了受电弓在开放空间的空气动力学性能, 结果显示与实验结果接近。采用仿真手段减少了试验成本, 为优化设计受电弓, 进一步研究高速受流问题奠定了基础。

2. 受电弓气力学仿真模型

问题的提出

高速列车是在充满着以空气为介质的空间里运行, 其研究对象可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。

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, 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。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。

在计算机技术飞速发展的今天, 研究人员完全可以借助于计算机进行计算流体力学(CFD)的数值仿真来辅助研究受电弓的气动性能。CFD 又称计算流体力学, 是流体力学的一个分支, 是在经典力学、数值计算方法和计算机技术的基础上建立起来的新型学科。CFD 方法即是对流场的控制方程用计算数学的算法将其离散到一系列网格节点或中心上求其离散的数值解的一种方法。简言之, CFD 包括三方面的内容, 一是对流场的研究, 二是计算数学的算法, 即通常称为数值计算方法, 三是求出数值解。而数值解中就包括流体的速度场、压力场以及空气剪切力等。

CFD 的核心技术就是数值计算方法, 其中包括边界条件的设定、湍流模型的选择和偏微分方程的求解, 边界条件的设定大都能从各种工程数据中获得, 例如流量、大气压力环境等等, 而湍流模型和求解偏微分方程则是各种 CFD 软件编程人员将各种经过大量实验验证过的物理模型和数值算法来编写程序来实现的, 也是湍流和数值计算两门学科几十年的精华积累。这为受电弓建立空气动力仿真模型提供了有利的工具。

模型的建立

STAR-CD/CCM+使用者只要经过简单的流场几何模型构建、流体网格的划分、选择某个成熟的湍流模型, 设定好流量等边界条件后, 就能启动软件进行数值计算, 若干时间, 计算收敛后便能得到与实验测试结果大小不相上下的各种数值结果。本文建立的受电弓三维立体模型如图 1 所示:



图1 受电弓的三维模型

CFD 技术目前正在发展成为一门工程技术，在产品前期，可以对其进行虚拟流体计算仿真，从而预先得知产品性能，为改进和完善产品提供方案和建议，从而缩短整个产品开发流程，提高产品的稳健性和可靠性。

受电弓 CAD 几何模型

下面采用 STAR-CCM+ 软件建立受电弓的空气动力学模拟的模型，如图 2 所示。

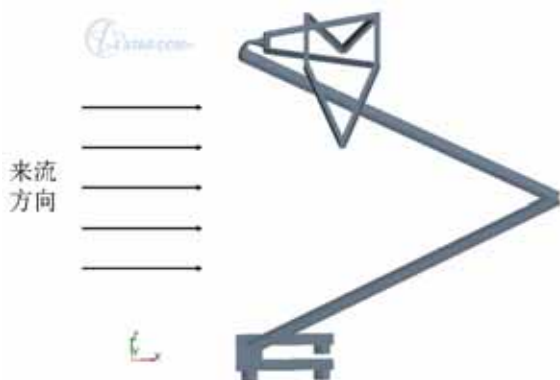


图2 受电弓的 CAD 模型

计算域在 X-来流方向长度为受电弓高度的 5 倍；在 X+尾流方向长度为受电弓高度的 6 倍；在 Y+、Y-左右两方向宽度均为受电弓高度的 5 倍；在 Z+方向高度为受电弓高度的 5 倍。如图 3 所示：

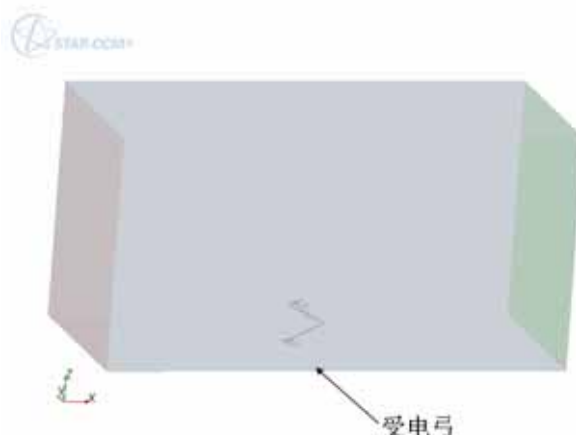


图3 受电弓计算域的设定

计算网格

对受电弓的计算区域以及受电弓的几何模型进行网格的划分，共划分成 315294 个多面体单元，如图 4 所示：

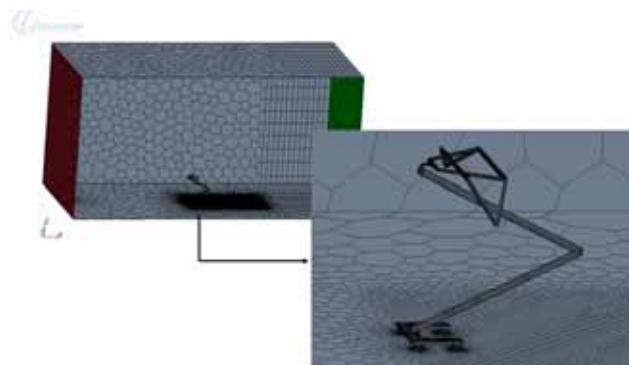


图4 网格的划分

边界条件

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，入口速度为 250km/h，出口 100%流出条件。边界条件如图 5 所示：

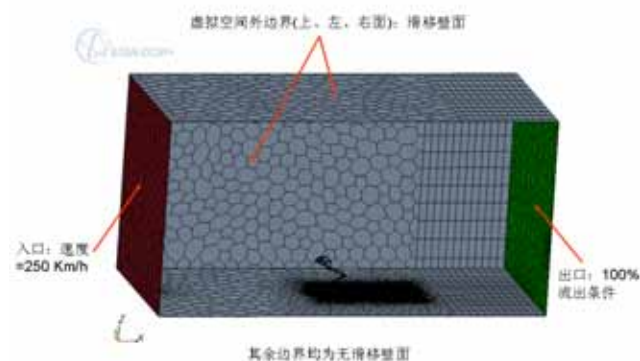


图5 计算模型的边界条件

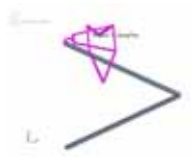
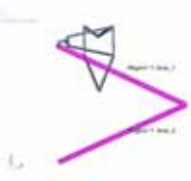
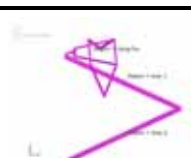
3. 算例

模型为稳态流动, 流体属性为空气(密度为 1.205kg/m^3 ; 温度: 293K), 紊流模型选择 Realizable K-Epsilon Two-Layer, 收敛判据: 最大残差 1×10^{-4} , 求解器为 STAR-CCM+ 2.10.017, 迭代步长数为 800。

受电弓受力分析

对受电弓弓头, 上臂和下臂在 x, z 方向的气动力进行分析。 x 方向为受到的阻力作用的方向, $+z$ 方向为弓头受到的抬升力的作用的方向。具体结果如表 1 所示:

表 1 受电弓受力情况

名称	图片	抬升力 (N) +为向上抬升 力	阻力 (N) +为向右阻力
弓头		$+3.983544\text{e}+00$	$+4.748871\text{e}+02$
受电弓上臂		$+5.944988\text{e}+01$	$+3.449775\text{e}+01$
受电弓下臂		$-5.124508\text{e}+01$	$+3.514366\text{e}+01$
整体受电弓		$+1.218834\text{e}+01$	$5.445285\text{e}+02$

从表中可以得到以下结论: (1) 弓头, 上框架, 下框架三个部分各自受力的总和为受电弓的受力情况, 符合实际情况; (2) 在抬升力方面, 由于弓头运动导致了上臂所受力的绝对值要大于下臂所受压力, 使得受电弓整体有 12N 向上抬升力的作用; (3) 从阻力的数据来看, 弓头所受阻力是整个受电弓阻力的关键因素, 正是由于弓头的作用使得上臂周围流场的运动导致上下臂之间压力差。

如果上下臂的阻力系数相当那么受到的抬升力绝对值几乎相同, 应大大减少其合成的抬升力, 以保证两个方向的抬升力几乎相同, 这可在上下臂上加装机翼来实现。

实验结果表明, 受电弓框架阻力相对于横向力(风压力)的垂直分量(端顶阻力)与受电弓当时的工作高度有关, 这也与受电弓的振动有关, 在这一方面还需要进一步的分析。

受电弓所受风压分析

对受电弓弓头, 上臂杆, 下臂杆的表面压力进行仿真输出, 结果如图 6 所示:

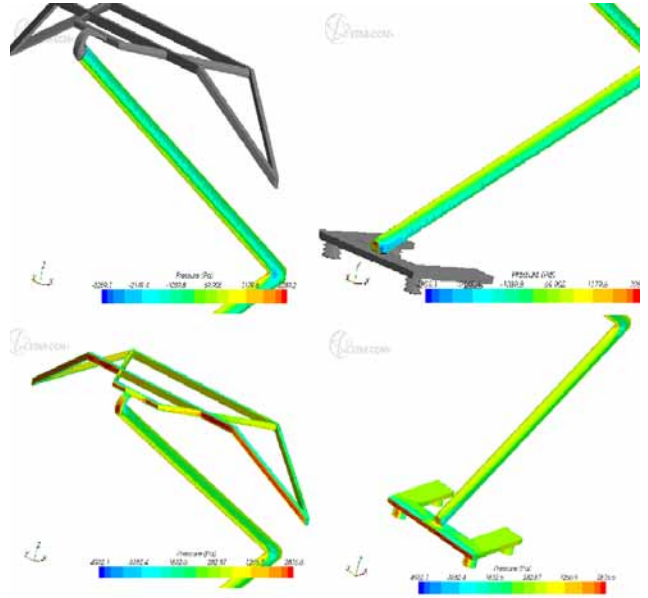


图 6 受电弓表面压力云图显示

图中红色区域为迎风压力流动滞止面, 所以表面压力值较大。可见弓头滑板表面以及底座表面所受到的压力较大, 弓角更大。底座表面流线型设计加装导流罩是必要的。正面的风压决定了两条滑板的正面阻力, 特别是弓角的形状对弓头的稳定有重要的影响, 决定了空气动力的中心, 在弓角上加装机翼可调节压心。但要经过精心调节, 如图 7 所示。



图 7 受电弓空气动力试验

受电弓在高速气流作用下, 空气气流产生的气动力随电力机车的速度变化而变化, 同时气流的冲击可能导致受电弓的振动并使气动力的动态性能变得复杂, 由于振动的原因, 受电弓将出现破坏事故。为了使受电弓获得良好的气动力特性和良好的弓网跟随性和稳定性, 需要合理的加装机翼, 可使受电弓在高速电力机车运行中处于低速气流作用下。

在此处加装导流罩可以减少气流对下臂及底座的作用，也就是说此时只有上臂和弓头处于气流的作用下，而除弓头外，上臂产生风压要比弓头的影响范围要比弓头小得多，所以受电弓的气动力特性实际上只取决于弓头结构的设计好坏，因而可以基本上排除臂杆的作用影响。也就是说加装导流罩以后，我们可以单独去研究弓头的气动力特性和振动特性，加装导流罩也是改善风压振动的有效措施。

4. 结论

本文采用 CFD 的数值仿真，建立了受电弓的三维模型，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，说明研究受电弓的空气动力学的仿真手段是可行的。在进行受电弓样机设计时，可以通过仿真手段来确定相关的参数，并通过试验以确定最后是否合格。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。

参考文献

- [1] Kiesling, Puschmann, Schmieder. Contact Lines for Electric Railways – Planning, Design, Implementation [M]. Publicis Kommunikations Agentur, 2001
- [2] 张弘, 于正平, 吴鸿标. 受电弓空气动力学模型及风洞试验研究. 中国铁道科学, 1995, 16(1): 37-49.
- [3] 郭京波. 高速机车受电弓稳定受流与控制研究. 北京交通大学博士研究生学位论文. 2006.

作者简介：

吴燕（1983-），女，博士研究生，主要研究方向：弓网动态仿真研究与弓网受流可靠性。07117323@bjtu.edu.cn

郑积浩（1964-），男，硕士，工程师，主要研究方向：弓网动态受流分析与受电弓研究。zjhzyc@sina.com

A Study on the Simulation of the Aerodynamics of Pantograph

ABSTRACT :When the high-speed train reached 250 ~ 300 km / h and above, the components of the motor set are highly influenced by the high-speed airflow. The resistance of air resistance accounted for a total of 75 to 80 percent. Good pantograph has a good aerodynamic performance. Computer-Aided method is used to simulate the aerodynamic effects due to the limitation of the test and trial operation. This paper introduces a computer fluid dynamics (CFD) simulation method on the study of the pantograph aerodynamic performance .And the result is close to the realities. Using simulation tools can reduce the cost of the test, design to optimize the pantograph, and lay a foundation of further study on the aerodynamic of high-speed motor set

KEYWORDS : Pantograph ; Interaction of Pantaograph-Catenary ; Aerodynamic ; Aeroacoustics source ; Pressure