

基于 STAR-CCM+的某高速动车组空气动力性能分析

Analysis of the Aerodynamic Performance of a High-speed EMU Based on STAR-CCM+

刘涛 刘凤华 余以正 姜旭东 王云霄

(长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春, 130000)

摘要: 列车空气动力性能的研究是列车设计研发的重要内容, 随着计算机技术与数值计算方法的快速发展, 计算流体力学(CFD)在列车气动特性的研究中得到日益广泛的应用。本文应用 STAR-CCM+ 软件对某高速动车组外流场 CFD 计算过程与结果做了通用性的描述, 并从阻力系数、速度场和压力场几个方面对列车在明线运行工况下的空气动力性能进行了研究。通过仿真分析表明, 列车的总阻力主要来源于列车所遭受的压差阻力, 且鼻端处压力值最大并沿着过渡区域逐渐降低。本文对列车 CFD 分析应用流程做了初步的归纳与总结, 并对相关设计流程提出参考性的建议。

关键词: 计算流体力学、STAR-CCM+、压差阻力、模拟仿真

Abstract It is important content for the design of train to research on the aerodynamic performance of train. With the rapid development of computer technology and numerical method, computational fluid dynamics (CFD) has an increasingly extensive application in the study of train aerodynamic characteristics. In this paper, through using the software of STAR-CCM +, the general description that calculation process and results of external flow field for a high-speed EMU is given, and the aerodynamic performance of train, which was in the conditions of open wire, is studied in the aspects of drag coefficient, velocity and pressure field. Simulation shows that the total resistance of the train is mainly from suffered pressure drag of the train and the pressure value, of which the maximum appears in nasal tip, gradually decreased along the transition zone. This paper makes a preliminary induction and summary for analysis and application process of CFD, and reference recommendations for the related design flow are putted forward.

Key words: CFD、STAR-CCM+、Pressure drag、Simulation

1 引言

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD) 是一种由计算机模拟流体流动、传热及相关传递现象的系统分析方法和工具。近年来, 随着计算机技术与数值模拟方法的快速发展, CFD 技术以其快速、经济、高效等特有的优势已被广泛应用于各个工程科学领域, 并逐渐成为工程设计人员用于分析、解决问题强有力的工具。

随着我国高速铁路行业的快速发展, 列车的空气动力特性越来越受到广泛的关注。它不仅关系到列车牵引效率, 而且还影响旅客乘坐舒适性和列车运行安全性。特别是自 CRH5 与 CRH3 型动车组上线运营以来, 国内众多科研院所和高校在列车空气动力学方面做了大量工作, 研究其周围流场特性。列车外流场属于不可压空气的钝体绕流, 流动尺度跨度大, 各局部的流动特征差异大, 尾部和底部的流场十分复杂, 局部的非定常性很强。列车空气动力学与航空空气动力学相比, 具有显著的特点: (1) 多体连接、长大编组, 形成的复杂湍流边界层和非定常分离流动结构复杂; (2) 外形结构复杂, 车顶受电弓和车下走行部使得列车的外形很不光滑, 网格生成及流场模拟难度大; (3) 运行工况复杂, 地面效应、隧道、交会、弯道、流固耦合效应等[1]。

列车的空气动力学性能与列车外形有着密切的关系, 其外形的流线型程度直接影响整列车的空气动力性能[2]。头、尾车的阻力系数、升力系数的绝对值深受流线型头部的影响, 头车、尾车的阻力系数越小, 同样编组情况下的列车总阻力就越小, 能耗也越少。因此, 如何在造型阶段控制整车阻力系数是整车气动性能研发工作中的重中之重。

国内外对高速列车空气动力学的研究主要有两种方法: 一种是以风洞实验为主的实验法, 另一种是利用计算流体动力学(CFD)技术进行数值模拟。传统的列车空气动力学研究是在风洞中进行实验, 存在着研发周期长、费用昂贵等问题。另外, 在风洞实验时, 只能在有限个截面和其上有限个点处测得速度、压力和温度值, 而不可能获得整车流场中任意点的详细信息。随着 CFD 技术的不断发展, 特别是 CFD 商业化软件的推出, 列车外流场的计算机数值仿真由于其具有可再现性、周期短以及低成本等优越性而成为研究列车空气动力学性能的另一有效方法。

STAR-CCM+是 CD-adapco 集团推出的新一代 CFD 集成化平台, 采用最先进的连续介质力学算法并同卓越的现代软件工程技术相结合, 拥有出色的性能和高度的可靠性, 是热流体领域强有力的分析工具。本文基于 STAR-CCM+软件对某列车外流场 CFD 计算过程与结果做了通用性的描述, 并从阻力系数、速度场和压力场几个方面对列车在明线运行工况下的气动性能进行了研究。

2 模型建立

2.1 基本理论

研究高速列车的空气动力特性, 其实质是研究流体流动的问题。控制所有流体流动的基本定律是: 质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。由它们可以分别导出连续性方程、动量方程(又称纳维尔—斯托克斯方程)和能量方程。由它们联立得到纳维尔—斯托克斯方程组, 简称 N-S 方程组, N-S 方程组是流体流动所需遵守的普遍规律。现在工程中应用最广泛的是雷诺时均 N-S 方程[3]:

$$\begin{aligned} \left(\bar{u}_i\right)_t + \bar{u}_j \left(\bar{u}_i\right)_{x_j} + \frac{(\bar{p})_{x_i}}{\rho} - \gamma \cdot \nabla^2 \cdot \left(\bar{u}_i\right) + \frac{(\rho \bar{u}_j \bar{u}_i)_{x_j}}{\rho} &= 0 \\ \left(\bar{u}_j\right)_{x_j} &= 0 \end{aligned}$$

其中, $i=1, 2, 3$ 表示坐标轴的三个方向, x_i 是坐标的三个分量。

求解偏微分方程的数值方法主要分为有限差分法、有限元法及有限体积法 3 种。它们中的任意一种都可以用来求解偏微分方程，但求解的精度各不相同。一般对椭圆型方程使用有限元法，对抛物型和双曲型方程使用有限体积法。STAR-CCM+使用的是有限体积法。

2.2 网格模型

为了简化计算，本文采用三车编组，模型比例为 1:8 的缩比模型。对列车外流场进行仿真分析，首先是车身模型的建立和简化处理，如图 1 所示，包括车身表面、受电弓、转向架、空调箱等。在 CATIA 环境下，将装配好的列车头车模型文件 igs 格式转化成 stl 格式，并导入 STAR-CCM+ 中。STAR-CCM+ 搭载了 CD-adapco 独创的最新网格生成技术，可以完成网格创建所需的一系列操作。对质量较差的表面进行包面处理，对空调导流罩等部件进行网格加密，保持相对完整的结构特征，包面处理后的模型，如图 2 所示。对已有的表面进行再次三角化的网格重构，以便提高表面网格质量，为进一步自动体网格生成和模拟计算做准备，网格重构后的模型，如图 3 所示。

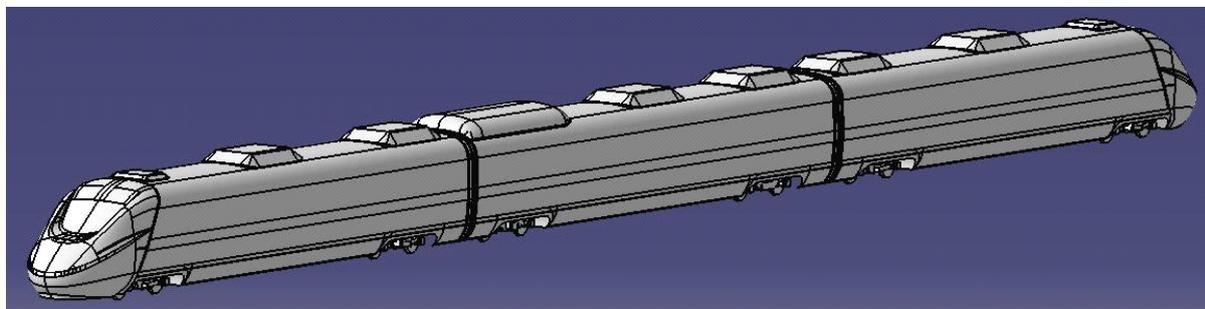


图 1 三车编组的 catia 模型

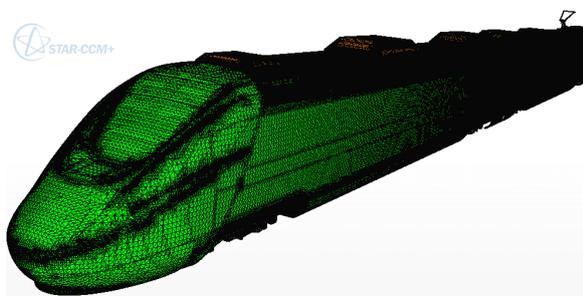


图 2 包面处理后的模型



图 3 网格重构后的模型

2.3 体网格生成

采用六面体核心 (Trim) 网格和边界层 (Prism Layer) 网格对计算区域进行离散 (相比较于传统的四面体网格，使用切割体网格，在保持相同计算精度的情况下，可以提高计算性能 3~10 倍)。考虑到壁面边界层的影响，在车体表面以及地面选取合适的边界层尺寸，使最终计算的车体表面粘性长度值在一个合理的范围内。为提高模拟精度并控制网格数量，对计算区域采用密度渐变的网格布局。本例中设定计算区域长 35m，宽 10m，高 8m，如图 4 所示。

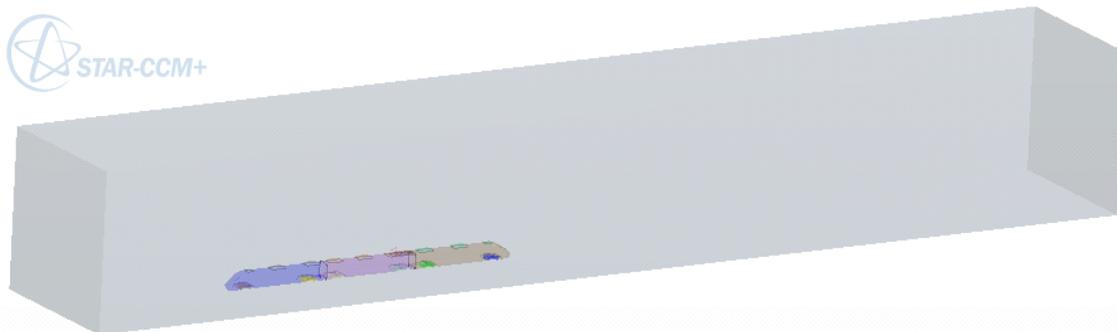


图4 整车分析模型

因为车身的几何形状复杂，整个外流求解域大，网格数目多，通过体积源项 (Volume Source) 进行局部体网格加密，捕捉细节，这样既能保持计算的精度、提高计算的收敛性和稳定性，又能控制网络的总体数量，获得更加精确的流场信息。本例分别在车尾、车身和受电弓区域设置了三个体网格加密区，三个加密区在三个方向的区域位置和加密尺寸均逐级扩大，如图 5 所示。STAR_CCM+ 的集成化和参数化操作可以快速高效地生成质量很好的计算网格，最终总计生成网格数约 626 万，生成体网格后的模型，如图 6 所示。

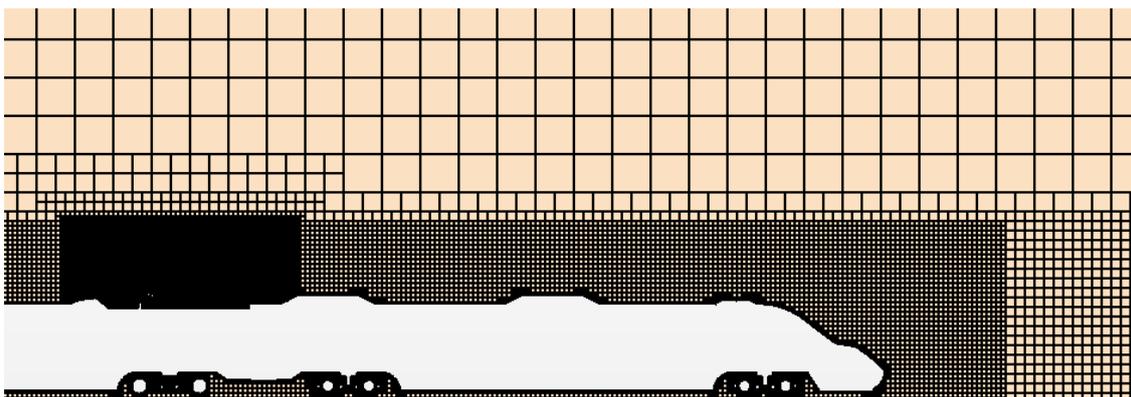
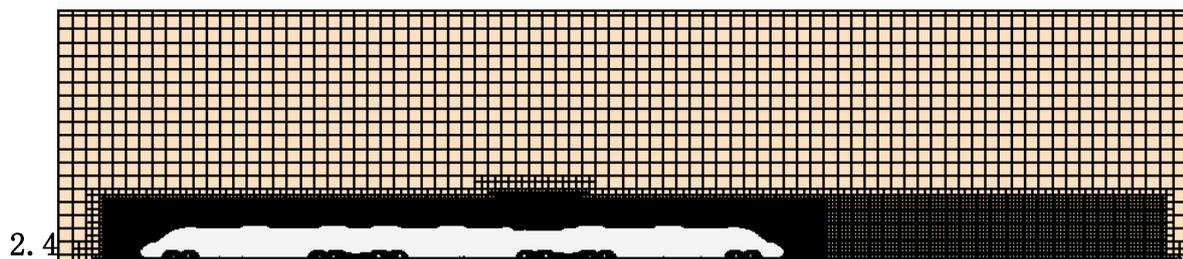


图5 设置三个加密区后的体网格截面



2.4

边界条件的设置对求解

图6 生成体网格后的模型

内进行，因此在区域的

边界上需要给定边界条件。列车外流场的边界条件设置如下：入口来流取理论上的无穷远处均匀分布的来流速度，方向与列车运行速度相反，气流速度为车速 250kph；车身后远端端面为出口边界，压强为 0Pa（相对于大气压），其余各变量分量梯度为 0；列车车身表面、计算域的侧壁和顶壁均按光滑壁面处理，取滑移、流线不穿透边界条件；计算域下底面设置无滑移边界条件和移动壁面边界条件，无滑移边界条件模拟地面与气流的摩擦作用，移动壁面边界条件以消除假设条件为来流吹袭、

列车静止而引起地面附面层对列车气动性能计算的影响[4]。

2.5 计算设置

求解模型建立后我们希望得到稳定的外流场情况，所以选择：Steady, Gas, 3D，采用分离求解器 Segregated flow，该求解器在求解低速不可压缩流动时比分离求解器收敛性更好，求解更高效。同时选择理想气体，湍流模型选择 Realizable K-Epsilon 模型，需要说明的是 STAR-CCM+中对该湍流模型的壁面修正默认采用的是壁面函数法，即 All y^+ Wall Treatment。

2.6 监测曲线和监测点设定

在 Reports 下创建阻力系数监测工具，建立头车阻力系数监测曲线 Cd，并将监测点建立在头车鼻端处，便于监测模型的阻力情况。

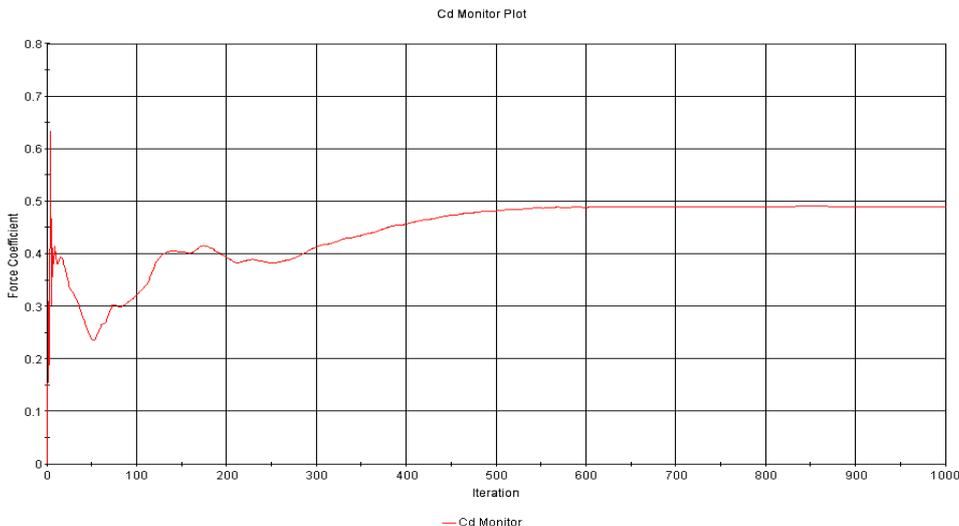
2.7 求解参数设置

一般情况下，根据计算模型需要设定计算步数，本例中由于网格量较大，可设定较多步，初定为 1000，在计算中，根据收敛判据、各监测曲线及输出栏的输出数据，判定是否收敛和是否结束计算。STAR-CCM+的便捷之处在于，在求解过程的任一时刻，都可以停止保存文件，下次求解启动时，会在之前的求解基础上继续求解，除非在求解前先清空之前的求解数据，才能进行新的求解。

3 解析计算

3.1 阻力系数

由图 7 阻力系数曲线可以看到，模型阻力计算曲线在开始一直呈振荡变化状态，振荡程度呈逐渐减缓的趋势，到第 500 步左右时趋于收敛，阻力系数值维持在 0.45-0.5 之间，经计算后 500 步平均值为 0.488。



3.2 速度分布

图 8 是模型的流速矢量图，从图中可以看出，大部分流场均以层流的形式出现，而车身头部及车身尾部出现了较大的涡流，且受电弓、风挡和转向架区域的空腔内存在较为明显的回流、漩涡现象，这是由于空气沿列车表面流动受到外凸物的阻挡时，会出现气流停滞区，使气流速度降低，导致外凸物的表面压力升高，这些部位的流场对列车阻力均有较大的影响。

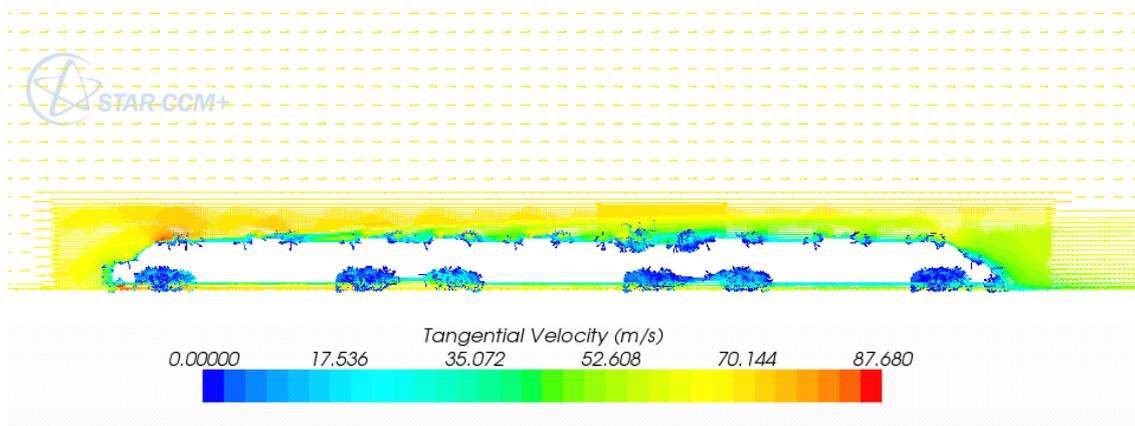


图 8 流速矢量图

3.3 表面压力分布

图 9 为模型表面压力云图。从图中可以看出，压力最大的部分是车头正面鼻端部分，并且压力沿着过渡区域逐渐降低。车头部分的压力主要为正压力，这是由于列车在向前行驶过程中，将迎面静止气流向外排开，气流受到鼓动开始运动，在此形成正压区。车头顶部和底部出现小部分负压，这是由于气流在列车鼻尖处气流发生分离，一部分流向车顶，另一部分流向车底。上部气流在流经列车头部上缘时，气流发生局部分离，气流在此形成负压区。下部气流在列车底部形成为负压区[5]。车尾部分的压力主要是负压，且压力变化较小。正是由于列车前后存在的压力差造成了列车的压差阻力，这部分阻力对列车的总阻力影响较大。

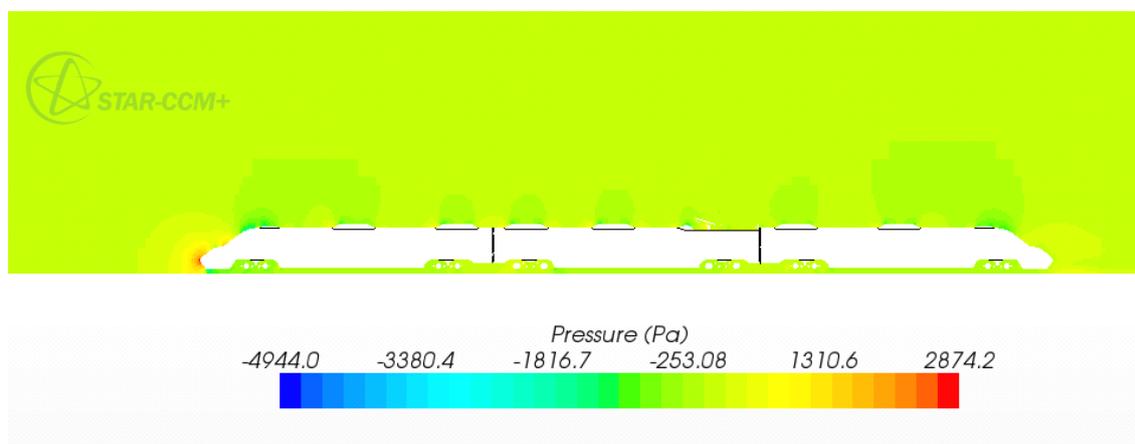


图 9 表面压力云图

4 结论

在我公司已成功搭建了具有自主知识产权和世界一流水平的时速 380 公里动车组技术平台的背景下, 高速列车新开发项目越来越多。在列车设计研发中, 采用 CFD 的方法对整车外形进行空气动力学的分析已经成为整车开发前期对气动性能进行评估的有效手段之一。分析表明:

- 1) 车身头部及车身尾部会出现较大的涡流, 且受电弓、风挡和转向架区域的空腔内也存在较为明显的回流、漩涡现象, 这些部位的流场对列车阻力均有较大的影响。
- 2) 列车的总阻力主要来源于列车所遭受的压差阻力, 且鼻端处压力值最大并沿着过渡区域逐渐降低。合理设计高速列车两端的端车头部的流线型, 将直接影响沿列车头部壁面的压力分布, 进而影响阻力变化。
- 3) 应用 CFD 技术对列车外流场进行建模和仿真模拟, 是一种对其进行气动性能分析快速有效的方法。

5 参考文献

- [1] 李树民 高速列车空气动力学及其相关问题的研究与建议 中国空气动力研究与发展中心计算所 2012
- [2] 田红旗编《列车空气动力学》中国铁道出版社 2007
- [3] 王福军编《计算流体动力学分析》清华大学出版社 2004
- [4] 李明编《STAR-CCM+与流场计算》机械工业出版社 2011
- [5] 刘凤华 高速列车气动阻力仿真分析与试验对比研究 2010