

基于风洞试验验证的高速列车CFD网格设计

刘 祥

兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年2月17日; 录用日期: 2025年2月26日; 发布日期: 2025年3月24日

摘 要

随着高速列车运行速度的不断提升, 空气动力学特性对列车性能的影响日益显著。风洞试验与数值仿真是研究高速列车气动性能的重要手段, 但现有研究对网格设计在验证过程中的关键作用缺乏系统性探讨。本文以国内某型高速列车为研究对象, 基于STAR CCM+流体仿真软件, 结合风洞试验数据, 分析了不同网格设计对气动阻力计算结果的影响。通过对比棱柱层网格与切割体网格的设计方案, 发现车身棱柱层至少需6层以准确捕捉边界层流动, 转向架区域棱柱层设计需与车身网格协调过渡, 而车头、车尾加密块对阻力计算结果影响较小。研究表明, 合理的网格设计可将仿真结果与试验数据的相对误差控制在5%左右, 验证了网格优化对提高数值模拟精度的重要性。本研究为高速列车空气动力学仿真中的网格设计提供了参考依据。

关键词

三维仿真, 风洞试验, 网格设计

CFD Grid Design for High-Speed Trains Based on Wind Tunnel Testing Verification

Xiang Liu

School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Feb. 17th, 2025; accepted: Feb. 26th, 2025; published: Mar. 24th, 2025

Abstract

With the continuous increase in the operating speed of high-speed trains, the impact of aerodynamic characteristics on train performance is becoming increasingly significant. Wind tunnel testing and numerical simulation are important means of studying the aerodynamic performance of high-speed trains, but existing research lacks systematic exploration of the key role of grid design in the verification process. This article takes a certain type of high-speed train in China as the research object, and

文章引用: 刘祥. 基于风洞试验验证的高速列车 CFD 网格设计[J]. 力学研究, 2025, 14(1): 33-41.

DOI: 10.12677/ijm.2025.141004

based on STAR CCM+ fluid simulation software, combined with wind tunnel test data, analyzes the influence of different grid designs on the calculation results of aerodynamic resistance. By comparing the design schemes of prism layer mesh and cutting body mesh, it was found that the body prism layer needs at least 6 layers to accurately capture the boundary layer flow, and the prism layer design in the bogie area needs to coordinate and transition with the body mesh. However, adding dense blocks at the front and rear of the vehicle has a relatively small impact on the resistance calculation results. The research results indicate that a reasonable grid design can control the relative error between simulation results and experimental data about 5%, verifying the importance of grid optimization in improving numerical simulation accuracy. This study provides a reference for grid design in aerodynamic simulation of high-speed trains.

Keywords

3D Simulation, Wind Tunnel Testing, Grid Design

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

当前,随着动车组列车速度性能的持续提升,其引发的空气动力问题日益显著。为应对这一技术挑战,国内外科研人员综合运用多种研究手段,主要采用现场实测、缩比模型风洞试验及数值模拟等研究方法对高速列车气动特性展开深入探究[1],其中在没有合理有效的数值计算方法前,通常会进行高速列车模型试验,这是一种快速、简单、经济的研究技术。高速列车模型试验研究手段主要包括风洞试验、动模型试验、水槽或水洞试验,其中,风洞试验是当前应用最广泛的研究手段之一[2]。随着计算机性能的不不断提升,各国学者对计算流体力学方面进行了大量突破,一方面解决了实车试验带来的不易重复的缺陷,另一方面也降低其他研究手段的成本。

近年来,国内外研究学者针对高速列车数值计算进行了大量研究分析。1995年,符松[3]阐述了数值计算方法在解决高速列车空气动力学问题中的现状及前景,使用二维数值模拟模型得到初步结果;1997年,梁习锋[4]等人使用三维面元法对不同列车头型表面压力进行数值计算并与风洞试验进行对比;2009年,梅元贵[5]使用一维程序对高速列车通过隧道产生的隧道压力波进行数值模拟。

田红旗[6]指出时速 200 km 时,头部长度稍大于 5 m 的流线型动车组(列车底部除转向架外全部包起来),空气阻力占总阻力的 85%左右;当列车头部长度在 10 m 左右,流线型程度非常高的动车组,在 300 km 的时速下,空气阻力占总阻力的 75%左右;余以正[7]等人通过对比分析普速列车与动车组的气动阻力分布特征,研究发现高速列车头尾部结构的空气动力学优化设计(流线型轮廓与表面平顺化处理)使车体突出构件得以消除,头尾车厢空气阻力贡献率下降。研究数据证实,列车高速运行工况下气动阻力系数已成为影响牵引能耗的关键制约因素,该发现为气动外形优化提供了理论支撑。通过以上研究可以看出,高速列车气动阻力对列车运行产生较大影响。

在高速列车空气动力学研究前期通常会进行风洞试验,后续再对风洞试验进行数值验证,这样不仅验证风洞试验的正确性,还提高了数值验证的准确性。郗艳红[8]使用 STAR CCM+流体仿真软件对高速列车风洞试验进行验证,并有较好的验证结果;潘永琛[9]使用 CRH380A 列车模型对其周围流场进行数值模型,对高速列车车体表面的边界层流动和湍流尾流的讨论和分析。

由此可见,国内外学者虽然对数值计算持积极态度,但对高速列车风洞试验验证时的网格设计却少

有说明, 本文研究了不同网格设计思想对高速列车气动阻力的影响, 其结果可为 CFD 网格设计规律提供一定参考。

2. 计算模型与方法

本文通过使用 STAR CCM+流体仿真软件对某型高速列车风洞试验进行验证, 采用静态绕流形式对列车进行阻力计算, 并对比多种网格设计方案结果, 探究网格设计对验证结果的影响。采用静态绕流形式可避免物体运动造成的数值误差和网格质量问题, 也可与风洞试验条件保持一致。

2.1. 计算模型与网格划分

2.1.1. 列车几何模型

列车采用 1:8 缩尺比例三编组模型, 列车长 9.76 m, 本文定义列车车高为特征长度, 即 $H = 0.5$ m, 忽略列车受电弓等细节结构, 但保留转向架、风挡结构, 见图 1, 为与风洞试验保持一致在三节车底各保留一个天平支架, 各节车之间保留 5 mm 间隙, 三节车分别测量气动阻力。



Figure 1. Train aerodynamic model

图 1. 列车气动模型

2.1.2. 计算区域

风洞试验在中国空气动力研究与发展中心 $8\text{ m} \times 6\text{ m}$ 风洞[10]中进行。为保证计算域范围不影响结果, 最终确定计算域尺寸见图 2。计算域地面安装路基、轨道模型和天平支架, 列车安装在天平支架上。

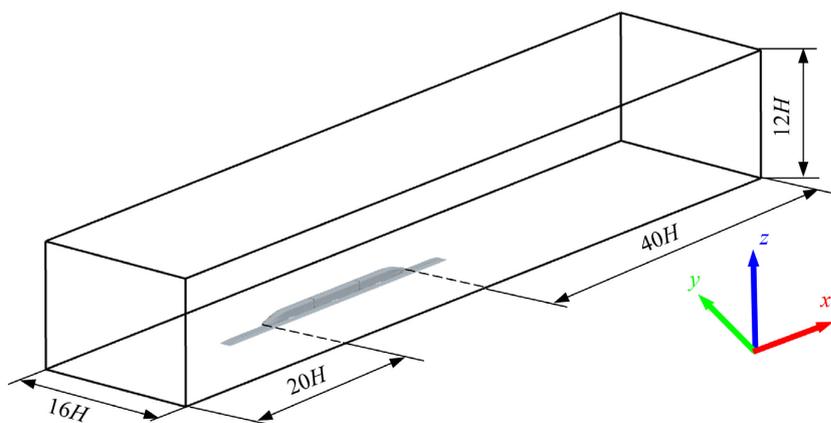


Figure 2. Schematic diagram of computational domain

图 2. 计算域示意图

2.1.3. 网格划分

本文模型的网格设计使用流体仿真软件 STAR CCM+进行, 主要对计算区域及列车进行网格划分, 其中主要使用切割体 Trimmer 网格进行流场空间区域的网格划分。地面和列车表面的流动边界层使用棱柱层 Prism 网格技术进行网格划分。

针对流动剧烈以及流场变化剧烈的位置进行进一步加密, 网格加密思想根据 Muld [11] [12]进行, 分别设置加密块。其中: 对车身整体设置一个车身加密块; 考虑车头鼻尖及流线型头部影响空气流动故设

置一个车头加密块；由于尾流对车体产生较大影响，在车尾尾流区域设置两个均匀过渡的尾流加密块；车体之间的间隙中，针对各节车风挡设置一个风挡加密块；因列车转向机区域流动较复杂，同样设置转向架加密块。列车外部流动的体网格如图 3 所示。

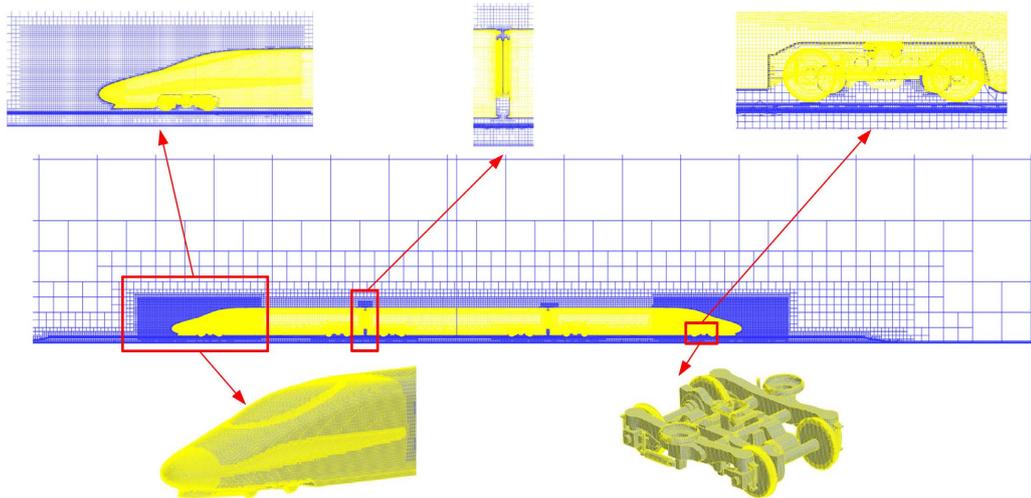


Figure 3. Local grid display
图 3. 局部网格展示

2.2. 计算方法

由于来流风速为 60 m/s，列车附近产生复杂的高雷诺数三维湍流。本报告使用 SST $k-\omega$ 雷诺平均纳维-斯托克斯湍流模型进行湍流建模。其中 SST $k-\omega$ 湍流模型中湍动能和比耗散率的传输方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \bar{V}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] + P_k - \rho \beta^* f_{\beta^*} (\omega k - \omega_0 k_0) + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \omega \bar{V}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + P_\omega - \rho \beta f_\beta (\omega^2 - \omega_0^2) + S_\omega \quad (2)$$

其中， \bar{V} 和 μ_t 分别为来流速度和湍流涡粘度， σ_k 、 σ_ω 、 β^* 和 β 均为模型系数， P_k 和 P_ω 分别为湍动能和比耗散率的产生项， f_{β^*} 和 f_β 分别为自由剪切修正因子和涡流延伸修正因子， S_k 和 S_ω 为源项， ω_0 和 k_0 为环境湍流值。

对于边界条件的设置，将列车壁面视为静止边界条件，使用速度入口边界条件，来流沿 x 方向，使用压力出口边界，其值为参考压力，即大气压，侧墙、顶板、地面和列车表面等设置为无滑移静止固体壁面。因本文仍使用风洞试验进行数值验证，表 1 给出了风洞试验和数值计算结果的对比，其中将头车阻力系数试验值进行归一化处理，同时其余阻力系数也进行无量纲处理。其阻力数值结果相较于风洞试验相对误差范围均在 5% 左右，可见该网格划分对阻力捕捉较好，也对本文的数值验证进行补充。

Table 1. Simulation results

表 1. 仿真结果

车厢	仿真阻力系数结果	相对误差/%
头车	0.9399	-6.03
中间车	0.6314	-3.76
尾车	0.9071	-5.16

3. 结果分析

3.1. 列车外部流场

3.1.1. 列车外部压力场

列车外部周围流场决定其压力分布。图4表示了高速列车气动模型处在60 m/s来流区域下的纵向中心截面的车体周围压力分布，图中黑色箭头为来流方向。由图4可知：动车组鼻见鼻尖区域因流体动压滞止效应产生显著高压梯度场，该高压域沿纵向发展至驾驶舱轮廓转折点后，在气动分离界面诱发湍流剪切层，导致列车肩部背流区出现剧烈压力突变，导致出现负压值。

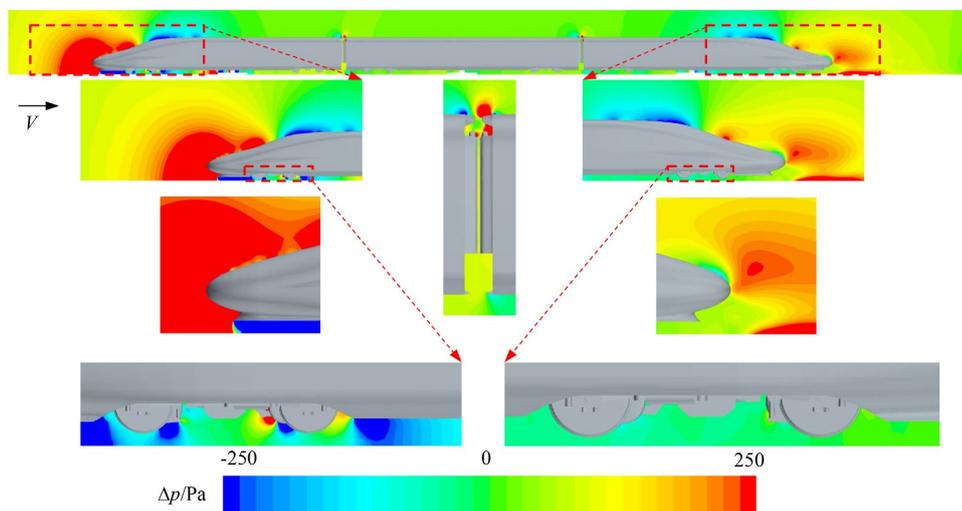


Figure 4. Pressure distribution around the longitudinal section of the train body during static flow around the train
图 4. 列车静态绕流迎流纵向截面车体周围的压力分布

列车周围的压力分布与其外形关联度较高。在列车前端区域(包含车头、排障装置等非平整结构部位)，流场中的压力梯度表现出显著波动特性。针对关键部件的压力分布特征分析显示：风挡装置周边形成了具有明显压差梯度的流场结构，具体表现为其背风面形成高压区，迎风面则产生低压区。值得注意的是，在挡风玻璃与车体构成相对封闭的腔体结构内，测得压力值趋近环境基准压力，这种现象揭示该区域空气介质受外部主气流扰动作用较弱。

列车尾部空气离开其平直车体时出现影响范围较大的负压区。当空气流过列车尾部时，从列车上方加速的空气向后、向下逐渐发展为正压区。车尾压力分布与车头压力分布相似。

综上所述，可以看出列车外部压力分布的三个基本特征：

- (1) 空气高速流向列车时，空气在车头鼻尖、排障器附近形成滞止区，进而产生正压区，当空气绕过鼻尖等部件后，压力剧烈突变，压力低于参考压力；
- (2) 列车表面空气动力特性与其气动外形呈现密切关联。特别是在车体前部区域(如车头整流罩、排障装置等几何突变部位)，流场参数表现出显著的压力梯度特征，关键部件前缘与后缘形成高压区和低压区分布，这种动态压力差直接导致列车运行过程中所受的气动阻力占比；
- (3) 当气流通流列车尾部区域时，形成与车头压力对称的负正压差。

3.1.2. 列车外部速度场

图5表示了高速列车气动模型处在60 m/s来流区域下的纵向中心截面的车体周围速度矢量图，该图清晰展示了关键结构周边的流体分布特征，黑色箭头标识处代表空气来流方向。根据图5分析可知：

列车前端鼻锥与排障装置对周围空气产生压缩和排导作用，导致局部形成气流停滞区域。这种阻滞效应不仅存在于车体近端区域，同时沿列车行进反方向延伸扩展，促使流体速度呈现渐进式提升，并展现出显著的三维流动特性。当气流通过驾驶室顶部结构后，沿车体外表面产生分流现象，逐步形成具有边界层特征的流动模式。

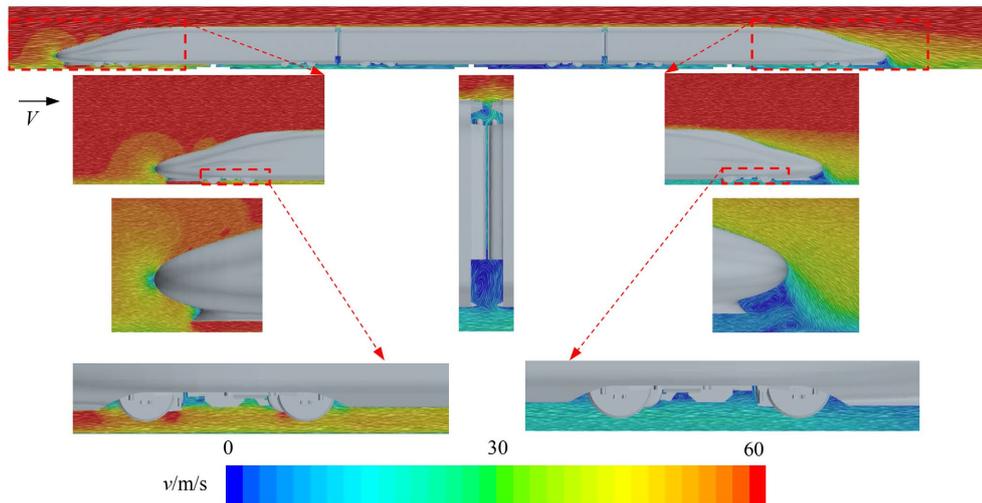


Figure 5. Velocity vector distribution around the longitudinal section of the train body in static flow
图 5. 列车静态绕流迎流纵向截面车体周围的速度矢量分布

列车高速运行时会挤压空气介质产生三维流动效应：在垂直方向(z 向)因车体占据空间促使该方向气流产生加速现象，使其瞬时速度超过环境气流基准值；当与车体表面的间距增大时，流体粘滞效应呈现衰减趋势，气流速度逐步回归环境基准值。观察车顶区域的流动特征可见，表面边界层厚度沿车体纵向呈现递增态势，但受风挡装置、受电弓装置等突出构件的影响，其发展连续性会产生间断现象；当气流运动至车尾区域时，边界层发展达到最大厚度值。在车体底部与路基形成的受限空间内，流体运动呈现多尺度涡旋特征，底部近壁面区呈现准静止流态；而在转向架区域，因机械构件复杂的几何特征形成显著流动阻滞效应，导致气流速度呈现梯度递减现象，特别是尾端转向架周边的低速区范围明显大于前端转向架区域。

综上所述，可以看出列车外部速度分布的六个基本特征：

- (1) 空气高速流向列车时，在车头鼻尖、排障器附近形成滞止区，其影响区域还会向上扩展；
- (2) 当列车在空气中高速运行时，沿车体纵向会形成流动边界层，该边界层的厚度在靠近车尾区域增至最大，且其发展过程受到车身表面凹凸结构的干扰；
- (3) 风挡等部件的后部均存在较强的回流运动；
- (4) 转向架系统与地面之间的流场速度梯度很大，流动结构复杂；
- (5) 在列车关键区域周边，气流运动与尾迹分布展现出显著的三维特性，其流场形态沿车体中心线呈非对称分布；
- (6) 头车转向架系统下方轨道上方的空气流速接近列车速度，尾车转向架系统下轨道上方空气流速低于头车，且头尾车由轨道至转向架机构空气流速减小，转向架机构附近空气流速几乎为零。

3.2. 网格设计对高速列车空气阻力的影响特征

3.2.1. 棱柱层网格影响

本小节主要对高速列车气动模型进行棱柱层网格参数设计，与此同时对车底和风挡处的切割体网格

也进行修改并分析。基础模型车身棱柱层层数为 6 层，风挡也采用相同棱柱层参数，因转向架结构细节较复杂，故对转向架不设置棱柱层。图 6 为以基础模型为例修改棱柱层网格参数的设计树状图，首先增加转向架棱柱层网格，其次将结果较好模型修改部件周围的体网格尺寸，最后也对四周壁面和钢轨棱柱层网格进行设计。由图可知，对棱柱层的探究主要从转向架棱柱层和车身棱柱层层数方面进行，另外，在此基础上也对车底、风挡加密块进行网格尺寸的修改。



Figure 6. Modify the prism layer of tree diagram
图 6. 修改棱柱层网格树状图

对高速列车气动模型进行棱柱层网格设计的气动阻力系数结果见图 7。图中水平线及其色带表示风洞试验归一化结果及其误差带，柱状色条表示各模型头车、中间车和尾车的阻力系数误差，可以看到 11 个模型尾车阻力系数相对误差均在 5%以内，保证较好的误差水平，表示修改转向架棱柱层和车身棱柱层网格对尾车阻力影响较小，同时也表示基础模型捕捉尾车阻力能力较好；对于中间车，模型 1、2 和 9 中间车阻力较好，但其余模型计算中间车阻力结果偏小；对于头车也存在整体模型结果偏小的现象，其中模型 2 修改了风挡 5 mm 间隙的网格，对头车阻力的计算结果偏大，说明列车风挡处的体网格对阻力计算结果影响较大。各模型关于三节车的阻力系数计算结果与试验结果的相对误差见表 2。

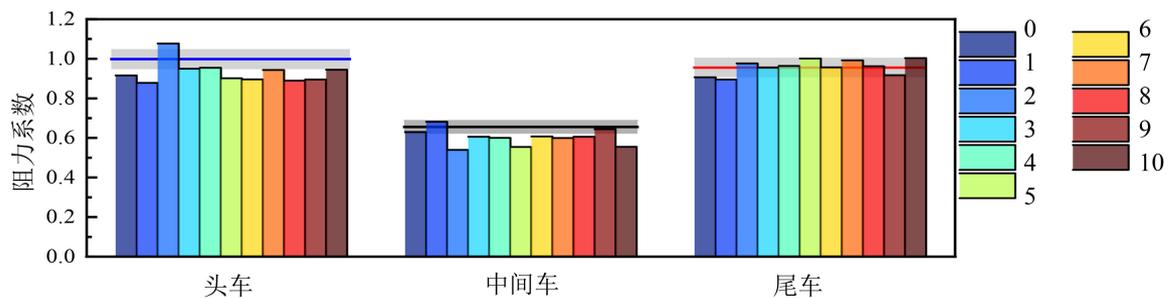


Figure 7. Drag coefficients of each model
图 7. 各模型阻力系数

Table 2. Statistics of prism layer grid design model results
表 2. 棱柱层网格设计模型结果统计

模型号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
车厢	气动阻力系数计算结果相对误差										
头车	-8.42%	-12.17%	7.68%	-5.06%	-4.55%	-9.89%	-10.44%	-5.69%	-11.06%	-10.51%	-5.53%
中间车	-3.99%	3.95%	-17.77%	-7.64%	-8.59%	-15.45%	-7.45%	-8.65%	-7.65%	-1.86%	-15.36%
尾车	-5.24%	-6.43%	2.07%	-0.16%	0.72%	4.68%	-0.01%	3.71%	0.58%	-4.11%	4.83%

通过对转向架棱柱层和车身棱柱层网格的修改及结果可以得出：由模型 0、1、3、4 和 5 结果可知，为保证棱柱层网格能精准捕捉边界层的流动信息，车身棱柱层至少需要 6 层，对于转向架棱柱层可以不要，若需要生成转向架棱柱层，其棱柱层层数不应与车身棱柱层层数差距过大，这主要保证车身网格和棱柱层网格之间的过渡；由模型 2 和 6 结果可知，在模型 0 基础上修改风挡间隙和风挡处的网格，使相对误差增大，表明该处的网格较为独立；由模型 7 和 10 结果可知，加密一次车底加密块后，计算结果仍保持在可接受范围内，再加密后，中间车阻力误差增大，这可能是增大了舍入误差；由模型 3 和 9 结果可知，在进行风洞试验验证过程中，若存在钢轨，则需要对钢轨生成棱柱层。

3.2.2. 切割体网格影响

本小节主要对高速列车气动模型进行切割体网格参数设计。基础模型车身棱柱层层数为 6 层，风挡也采用相同棱柱层参数，因转向架结构细节较复杂，故对转向架不设置棱柱层。列车周围加密块主要为车头、车身、车底和车尾加密块，因上小节解释了车底加密块对列车车厢阻力的影响特征故本节不对其做过多解释，对于列车车身主要捕捉其边界层流动特征，由棱柱层网格进行控制，本小节不对车身加密块网格进行单独说明，故探究切割体网格对列车车厢阻力的影响特征主要是针对车头 head 加密块、车尾 tail1 和车尾 tail2 网格。

表 3 表示切割体网格设计的计算结果统计。由表可知，加密车头(head)加密块的网格尺寸会导致列车车厢阻力结果变差，而车尾加密块对计算结果影响较小，这说明，基础模型 11 网格设计较为合理，且针对车身周围加密块的网格尺寸对列车车厢阻力影响较小。

Table 3. Statistics of cutting body grid design model results

表 3. 切割体网格设计模型结果统计

项目	基础模型 11	加密 head	加密 tail1	加密 tail2
车厢		气动阻力系数计算结果相对误差		
头车	-8.13%	-8.57%	-8.15%	-9.63%
中间车	-3.32%	3.68%	-2.84%	-2.37%
尾车	-13.54%	-16.80%	-13.63%	-14.22%

4. 结论

本文通过数值仿真与风洞试验相结合的方法，系统研究了网格设计对高速列车气动阻力计算结果的影响。主要结论如下：

(1) 棱柱层网格设计：车身棱柱层需至少 6 层以确保边界层流动的精确捕捉，转向架区域若添加棱柱层，其层数需与车身网格协调，避免过渡不连续；风挡间隙处的网格独立性较强，需单独优化以减小头车阻力误差。

(2) 切割体网格设计：车头加密块过度加密会增大阻力计算误差，而车尾加密块对结果影响较小，表明基础网格设计已能满足尾流区模拟需求。

(3) 验证与误差分析：棱柱层网格主要捕捉列车车身边界层的流动，而对于切割体网格主要捕捉列车车身周围大空间的流动，两种网格适用范围不同，但可以将两者结合使用；头车、中间车和尾车的阻力系数相对误差均控制在 5% 左右，验证了数值模型的有效性，并为风洞试验的补充验证提供了可靠方法。

(4) 本研究揭示了网格参数对高速列车气动特性模拟的关键影响，为后续 CFD 仿真中的网格设计优化提供了实践指导。未来可进一步探索复杂工况(如横风、隧道环境)下的网格适应性，并结合机器学习技术实现网格生成的自动化或智能化。

参考文献

- [1] 田红旗. 列车交会空气压力波研究及应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(1): 83-89.
- [2] 肖京平, 黄志祥, 陈立. 高速列车空气动力学研究技术综述[J]. 力学与实践, 2013, 35(2): 1-12.
- [3] 符松. CFD 在高速列车研究中的应用[J]. 中国科学基金, 1995(4): 23-27.
- [4] 梁习锋, 曾剑明. 高速列车表面压力分布的数值计算[J]. 铁道车辆, 1997(5): 12-14, 52.
- [5] 梅元贵, 等. 高速铁路隧道空气动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [6] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 铁道出版社, 2007: 156-164.
- [7] 余以正, 刘堂红, 夏玉涛, 等. 更高速(400+ km/h)列车气动减阻技术发展展望[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(5): 83-94.
- [8] 郝艳红. 横风作用下的高速列车气动特性及运行安全性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [9] 潘永琛. 高速列车边界层及尾流流动的数值研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2018.
- [10] 黄志祥, 陈立, 蒋科林. 高速列车空气动力学特性的风洞试验研究[J]. 铁道车辆, 2011, 49(12): 1-6.
- [11] Muld, T.W. (2012) Slipstream and Flow Structures in the Near Wake of High-Speed Trains. Ph.D. Thesis, KTH Royal Institute of Technology.
- [12] Muld, T.W. (2010) Analysis of Flow Structures in Wake Flows for Train Aerodynamics. Ph.D.'s Thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2010.