

# 高速列车头型优化设计

王秀平, 崔凯, 高太元, 胡守超

(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京海淀区 100190)

**摘要** 随着高速列车速度的提高, 气动阻力成为制约高速列车提速的重要因素之一。而在国内外公开发表的文献中, 都是针对速度在 500km/h 以下的高速列车对称头型的气动性能进行研究。本文是针对速度为 500km/h 的高速列车对称和非对称头型气动性能的评估与优化设计开展高速列车空气动力学研究。针对新给出的 rocket 和 sword 两种头型, 组合成四种列车外形, 生成结构化计算网格, 采用大规模并行计算, 模拟了高速列车时速 500 公里稳态运行的流场, 并对列车气动特性进行了统计分析。经分析发现, r-r 组型是四种阻型中气动性能最优的组合。本文的研究对实际工作具有一定的参考价值。

**关键词** 高速列车, 头型, 计算流体力学, 优化设计

## 引言

当今, 高速列车的速度可与轻型飞机巡航速度和喷气式飞机的起飞速度相当, 与其相关的空气动力学问题不容忽视。随着列车运行速度的不断提高, 空气动力学对其的影响也愈加剧烈。其中阻力性能对列车的速度影响尤为剧烈。随着列车运行速度的提高, 空气阻力的影响也不断增大。当运行速度超过 270km/h 后, 列车牵引力的 90% 以上用于克服空气阻力, 而当列车的运行速度超过 300km/h 后, 空气阻力达总阻力的 95% 以上。因此, 通过对列车进行合理的气动外形优化设计, 使其在运行条件下具有较小的阻力和交会压力波等, 对于提高列车运行速度和保障列车安全稳定运行具有十分重要的意义。

由于受到各种约束条件的限制(如轨道宽度、列车高度、载客量等), 列车车身的外形一般很难变化。因此对于高速列车而言, 更具有实际意义的工作是通过合理的头型设计, 使其空气阻力尽可能的减小, 即列车的头型气动外形优化设计。

作者将给出的两种列车头型进行组合, 并进行适当的简化, 得到四种列车简化外形。依托中国科学院力学研究所的计算力学平台, 以四种组合外形为模型, 对时速 500 公里的三辆编组简化外形在稳态运行条件下进行了数值模拟, 并归纳总结了每种外形的气动性能, 并分析了对称头型和非对称头型的队列车气动性能的影响, 得到最优头型组合, 对实际工作有一定的指导价值。

## 1 计算模型和方法

### 1.1 计算模型

计算模型为三列编组, 如图 1 是给出的两种列车头型, rocket 和 sword。rocket 总长度为 26250mm, 流线型长度为 12000mm, sword 总长度为 26750mm, 流线型长度 12000mm。车身长度是 25500mm, 宽度 29400mm, 高 36500mm, 参考面积  $9.323\text{m}^2$ 。

图 2 是由这两种头型组合得到的四种三列编组的列车外形。以 rocket 为车头, 以 sword 为车尾的列车阻型写为 r-s, 以此类推。由于在稳态运行进行计算, 列车模型从中轴线进行划分只取一半, 参考面积也取一半。

### 1.2 计算网格和计算条件的设置

本文采用计算流体力学软件 CFD 进行计算, 控制方程为三维可压缩 N-S 方程, 湍流模型为标准 K- $\omega$  模型。计算参数为:

$Ma_\infty=0.4071(500\text{km/h})$ , 远场压力取为 1 个大气压,  $T_\infty=288.15\text{k}$ , 列车横断面参考面积为  $4.6615\text{m}^2$ 。边界条件: 进出口及远场均为自由来流边界, 车体为无滑移边界条件。同时计算中包含了对地面效应的模拟, 地面为移动地面, 与来流速度相等。计算区域为: 车头前 500m, 上 200m, 左右各 200m。本文采用结构网格, 网格量约为 360 万。考虑到车身附近流场对车体气动力影响较大, 故对车体周围进行了网格加密, 第一层厚度为特征长度 1mm。

## 2 计算结果分析

### 1.1 计算云图和曲线

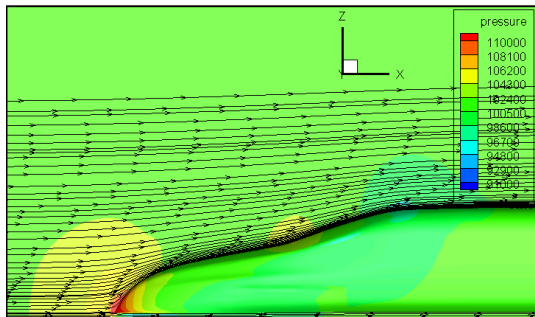
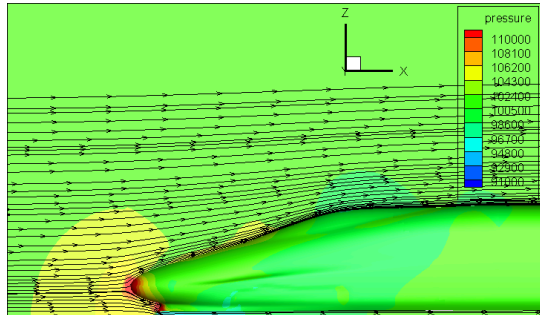


图 1 头车压力云图比较

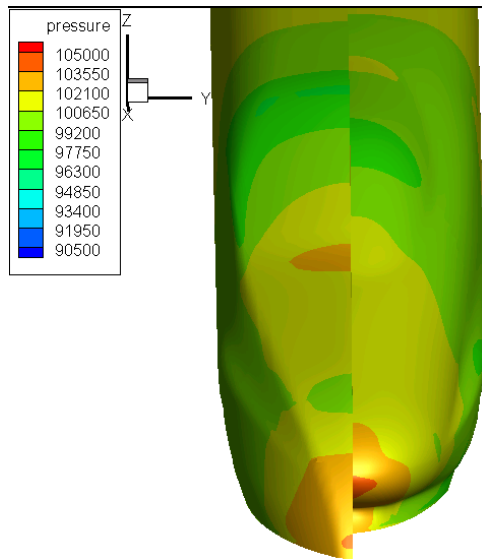


图 2 尾车压力云图比较

图 1 和图 2 分别是头车和尾车的压力分布云图。在数据分析的过程中,我们发现尾车的压力云图差别比较大.在 sword 尾车流线型后部有一个较大面积的低压区,这个区域可能导致 sword 尾车的气动性能和 rocket 尾车的气动性能有较大的差别。

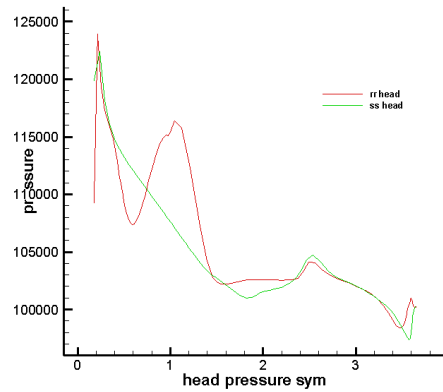


图 3 sword 和 rocket 头车流线型部分对称面的压力分布曲线

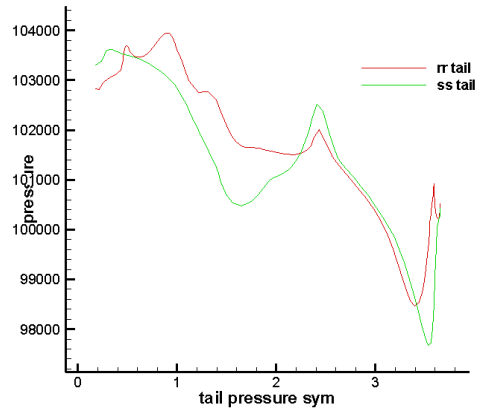


图 4 sword 和 rocket 尾车流线型部分对称面的压力分布曲线

图 3 和图 4 分别是头车和尾车流线型部分在对称面上的压力曲线。该曲线证实了 sword 尾车后部的低压区的存在。

### 1.2 计算数据分析

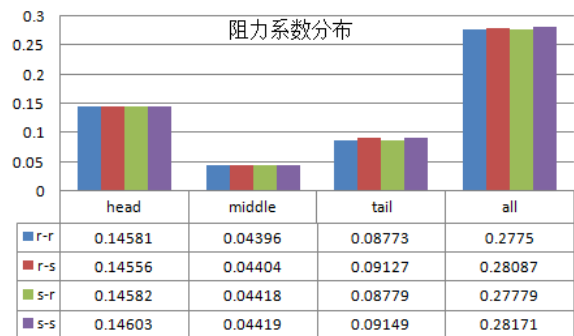


图 5 四种组型的列车阻力系数分布图

从图 5 可以看出:

- 1.最大的阻力系数和最小的阻力系数相差

- 1.5%；
- 2 头车的阻力系数相差 1.7%，中间车阻力系数相差 0.5%，尾车阻力系数相差 4.1%；
- 3.总阻力系数的差别在于尾车阻力系数的差别（这可以从云图以及曲线看出）；
4. 与 s 尾车相比，r 做尾车时的阻力系数较小，这说明 r 适合做尾车；
5. r 头车和 s 头车的阻力系数相当。

由于下表面进行了适当的简化，因此将下表面的阻力系数除去进行阻力系数分析是有必要的。

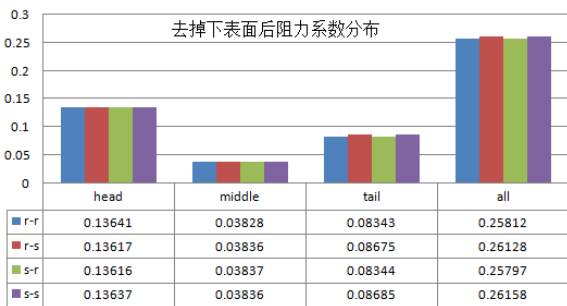


图 6 四种外形去掉下表面后的阻力系数分布

图 5 和图 6 的阻力分布规律一致，即尾车的阻力系数较大的差距引起了整车的阻力系数较大的差距。

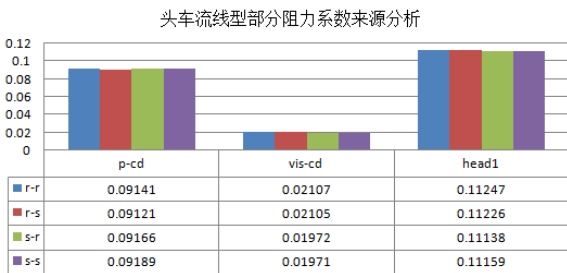


图 7 四种组型的头车流线型部分阻力来源分析

从图 7 可以看出：

1. 头车流线型部分的阻力系数相差不到 0.97%，压阻远大于摩阻（4 倍左右）；
- 2.头车压阻系数相差 0.7%，摩阻系数相差较大，为 6.5%，不过由于摩阻系数较小，这种差异被抹平；
- 3.两种外形作为头车时的阻力系数没有实质性差异。

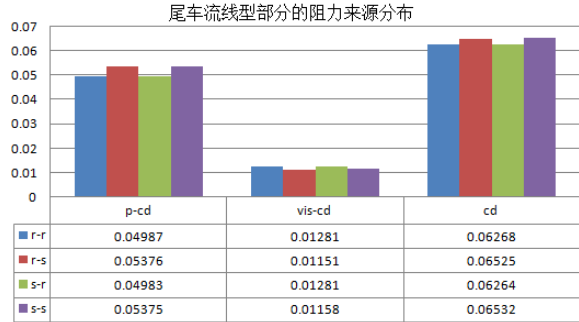


图 8 四种组型的尾车流线型部分阻力来源分析

- 1.尾车流线型部分的阻力系数相差最大达到 4.1%，且压阻系数远大于摩阻系数（4 倍左右）；
- 2.s 尾车总阻力大于 r 尾车，其中压阻系数大于 r 尾车 7.3%，摩阻系数小于 r 尾车 10.1%；
- 3.s 作为尾车的阻力系数较大，r 作为尾车的阻力系数较小，这种差异可以从云图和曲线看出）。

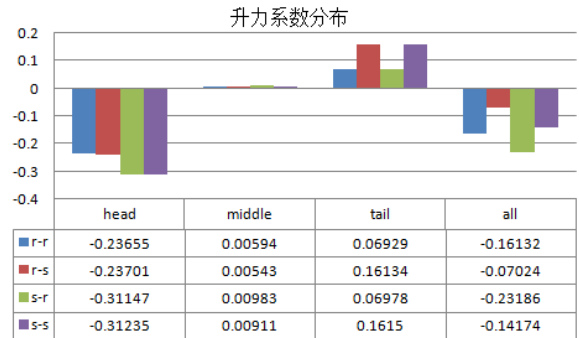


图 9 四种组型的升力系数分布规律

从图 9 可知：

1. 头车升力系数<0，中车升力系数>0，但是数值很小，尾车升力系数>0,总升力系数<0；
2. s 头车升力系数绝对值较大，为负值；s 尾车升力绝对值较大，为正值；
3. r 头型的组合 r-r 同时满足头车和尾车的阻力系数绝对值较小；

### 3 结 论

- 1.四种组型的列车阻力系数相差 1.5%，通过分析，这其中差异的原因在于尾车；
- 2.s 和 r 作为头车阻力系数基本没有区别，r 头车的升力系数小于 sd 头车的升力系数，且都<0；
- 3.r 尾车的阻力系数小于 s 尾车的阻力系数，差别主要是压阻系数上，从云图和曲线图可以看

出, s 尾车上表面有较大面积的压力较小区域, 这是导致 S 尾车的压阻系数较小和正升力系数较大的实质性原因。

### 参考文献

- 1 Jaeho Hwang, Dong-Ho Lee. NUMERICAL SIMULATION OF FLOWFIELD AROUND HIGH SPED TRAINS PASSING BY EACH OTHER. Seoul-National University, Seoul 151-742, Korea. USA: 1999
- 2 梁习锋, 张健, 动车车体表面压力分布实验研究 长沙铁道学院, 2002, 20 (4)
- 3 陈南翼, 张健, 高速列车空气阻力实验研究 铁道学院报, 1998, 20 (5)
- 4 Joseph A Schetz 高速列车空气动力学 力学进展, 2003, 33 (3)
- 5 田红旗 列车空气动力学 中国铁道出版社

## Aerodynamic Performance Evaluation and Optimization of the High-Speed Train

X.P. Wang, K.Cui, S.C.Hu, T.Y.Gao,

(LHD, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China)

**Abstract:** With the train speed becoming faster and faster, the aerodynamic drag turns to be one of the essential factor that restricts the train speed ascent. However, no public literature, home or abroad, has dealt with the flow field and aerodynamic performance of the train with the speed reaching 500km per hour. This paper has studied in the flow field and the aerodynamic performance of the train at 500km per hour with symmetrical and unsymmetrical nose shape. With the given two nose shape modes, the authors composed four kinds train shape and generated grids around the four train models. By computing the numerical solution, the author simulated the flow field around the 500km per hour-train in the steady state. With the gathered and analyzed data, the paper comes to the conclusion that the unsymmetrical nose shape is better than the symmetrical nose shape in the aerodynamic performance. Comparing with the other three train shape, we found that the s-r composition best satisfies the practical demands.

**Key words:** CRH, nose shape, computational fluid mechanics, optimization