

# 高速列车明线运行流固耦合响应特性研究

刘雯<sup>1</sup> 梁瑜<sup>1</sup> 齐洪峰<sup>1</sup> 纪占玲<sup>2, 通讯作者</sup> 聂雪媛<sup>2</sup> 郭迪龙<sup>2</sup> 杨国伟<sup>2</sup> 毛军<sup>3</sup>

(1 中车工业研究院有限公司 北京 100070; 2 中国科学院力学研究所 北京 100190; 3 北京交通大学 北京 100044)

**摘要:** 针对列车提速后列车与线路、空气等相互作用增强问题, 本文发展了适用于高速列车的空气动力学与车辆动力学紧耦合方法, 建立了耦合计算用的空气动力学模型和车辆动力学模型, 开展了明线运行时空气动力学与车辆动力学耦合计算, 并对比分析了是否耦合时的气动特性、振动特性和运行稳定性等。耦合计算时, 头车气动阻力、尾车气动侧向力、头车气动升力、头车车体垂向位移、头车车体垂向加速度、尾车车体横向加速度、头车垂向稳定性和尾车横向稳定性大幅增加, 表明头车振动和尾摆剧烈, 稳定性更差。

**关键词:** 高速列车; 明线运行; 流固紧耦合; 响应特性; 空气动力学与车辆动力学耦合方法

## 0 引言

铁路是支撑国民经济和社会发展的重要基础设施。而加快发展高速铁路对保障国民经济持续健康发展、提高人民生活水平、促进国土开发和国防建设, 具有重要的现实意义和重大的战略意义。高速铁路是当今世界铁路发展的潮流, 提升列车安全运行速度是世界各国不断追求的目标。但是列车提速后, 气动作用愈加凸显, 各种激扰响应更加敏感, 高速列车与其周围空气之间的相互作用增强。

以往的研究常将环境风、强气流作为随时间变化的外载荷施加, 未考虑列车姿态改变、振动等对周围流场的影响, 不能反映空气动力学与车辆动力学之间的耦合关系, 难以揭示流致振动的规律, 以及反映其本质。因此, 在更高速度下开展高速列车空气动力学与车辆动力学耦合问题研究, 更深层次地认识和掌握高速列车气动效应、列车动态行为和高速列车运行稳定性等, 揭示其影响因素和规律, 对提高高速列车运行速度、确保高速运行稳定性具有

重要的意义和价值。

目前, 关于高速列车的研究, 存在采用交互式联合仿真方法考虑空气动力学与车辆动力学之间耦合效应的研究。张永昌等<sup>[1]</sup>采用松耦合法, 研究了高速列车裙板支架气动载荷响应。Nakade等<sup>[2]</sup>考虑列车与空气动力学耦合, 研究了隧道通过时高速列车的横向振动。崔涛<sup>[3]</sup>采用相同时间步松耦合和不同时间步松耦合方法, 滑移网格和动态网格的联合应用, 研究了高速列车在无风开放空间、侧风、列车交会和列车高速通过站台等工况下的耦合特性。但是研究存在网格重构问题, 有时会造成网格质量降低, 且费时。李田<sup>[4]</sup>借助于 Matlab/Simulink 平台, 利用 Fluent 与 Simpack, 实现了明线横风工况下高速列车气动与多体动力学的耦合联合仿真。后来, 有关研究采用改进算法, 即直至气动计算收敛时, 施加轨道不平顺, 进行明线横风下高速列车多体动力学计算, 网格更新技术采用弹簧近似方法和网格重划分方法<sup>[5,6]</sup>, 然而仍存在网格重构问题, 且列车静止不动, 不适用于含有运动边界或双车交会的非定

基金项目: 北京交通大学, 国家自然科学基金(编号: 52172336), 山区峡谷风作用下高速列车跨桥隧区域运行稳定性控制研究; 北京交通大学, 科技研究开发计划课题(编号: N2022T001), 更高速度条件下环境风对列车运行安全影响机理及安全技术研究。刘雯(1992.07-), 女, 汉族, 山东德州人, 博士研究生, 工程师, 研究方向: 流体力学。

通讯作者: 纪占玲(1979.11-), 女, 汉族, 河南驻马店人, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向: 多学科耦合。

常流动工况。Ji 等<sup>[7,8]</sup>采用重叠网格方法研究了三节列车车体通过隧道时的振动特性，还探讨了受电弓通过隧道时的振动特性。

综上，在现有研究中，明线高速运行时整车空气动力学和车辆动力学耦合特性研究较少。因此，本文发展了适用于高速列车的空气动力学与车辆动力学大规模耦合方法，开展明线运行时空气动力学与车辆动力学耦合计算，研究明线运行是否耦合对高速列车气动特性、振动特性和运行稳定性的影响。

### 1 空气动力学与车辆动力学耦合方法

空气动力学与车辆动力学耦合计算技术路线图如图 1 所示。在空气动力学中，将明线流场设为背景流场，考虑车辆动力学传递过来的位移，更新组件位置，为研究高速列车车辆姿态的改变对周围流场的影响，加入空气动力学模型，计算气动载荷。将计算的气动载荷传至车辆动力学，计算列车的动力学特性，包括位移。通过高速列车的空气动力学模型和车辆动力学模型之间的数据交换，将轨道不平顺和气动载荷作为激励加入高速列车的车辆动力学模型。该方法可综合考虑高速列车与其周围空气的相互作用和轨道不平顺带来的影响，考虑更加全面，便于研究高速列车提速后与空气、线路等各种激励之间的相互作用。

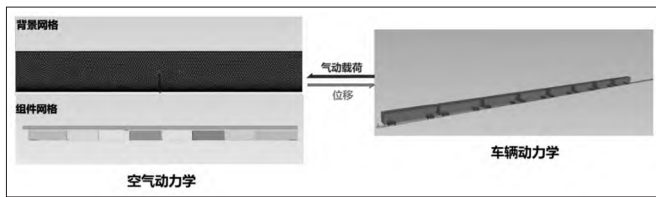


图 1 耦合计算技术路线图

在空气动力学中，假设列车为刚体，采用重叠网格方法考虑其运动。该方法采用多区域网格划分，将复杂几何问题分解为简单的存在重叠网格的系统，更容易控制网格质量，提高了网格划分的质量和效率；在网格运动过程中，每个组件网格仅具有整体的六自由度运动，内部网格没有相对运动，不存在网格重构问题，网格质量不会降低，对于大规模问题优势明显。流场网格质量高，计算时易于收敛，有利于减少计算迭代次数，节约计算时间，进而实现了快速、大规模的耦合计算。

在一个时间步内，执行多次子迭代，直至两个学科都收敛或达到预定迭代次数。此时称之为紧耦合。该方法可以增大时间步长，提高计算稳定性和计算精度等。

## 2 耦合数值计算模型

### 2.1 空气动力学模型

在空气动力学中，整个模型分为背景网格和组件网格，组件网格为运动物体组成的网格，可以有多个。组件网格采用混合网格划分方法，列车周围流场采用棱柱网格对边界层流场划分网格，采用多面体网格对边界层外侧流场划分网格。列车周围棱柱边界层描述边界层运动，考虑表面粘性力，列车周围多面体网格，列车外形复杂，网格划分方便。背景网格采用多面体网格。背景网格和组件网格通过 Overset interface 交换数据。总网格数约 4000 万，如图 2 所示。

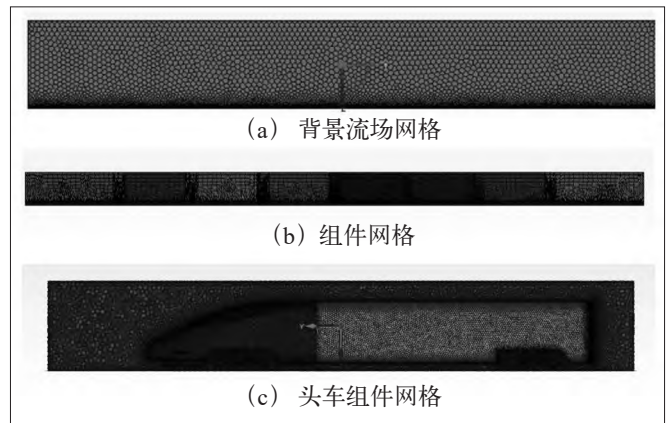


图 2 列车空气动力学模型网格划分

计算工况是明线运行，列车运行速度为 400km/h。高速列车周围的流场为三维、粘性、可压缩、非稳态湍流流场。流场介质设定为空气（理想气体），来流密度：1.225kg/m<sup>3</sup>。湍流模型采用 SST 模型。列车采用重叠网格实现网格运动。

明线运行边界条件如下：

(1) 由于在列车表面存在边界层效应的影响，列车表面设定为有摩擦的固壁边界（无滑移边界），接近于实际情况，可较为精确地计算出列车表面的摩擦阻力，即粘性剪切力，以及表面的压力分布等参数。

(2) 地面边界条件。列车在实际行驶时，空气与地面是相对静止的，设置地面为固定壁面边界条件。

(3) 出口边界条件。由于选择的流场计算区域足够大，可认为外围边界对列车周围的流场的影响甚小，计算区域的外围边界设定为压力出口条件，给定大气压力为 101325Pa。

### 2.2 车辆动力学模型

高速列车车辆包含 8 节列车，每一节列车主要由车体和前后转向架等组成，而转向架主要包括构架、轴箱和前后轮对等。列车的一系悬挂主要由一系钢簧、一系垂向减振器、轴箱悬挂等组成，主要是用来缓冲和衰减来自轮轨间的动力冲击。二系悬挂由空气弹簧、二系垂向减振器、横向止挡、二系横向减振器、牵引拉杆、抗蛇行减振器和抗侧滚扭杆等组成。其中，车体重量通过二系悬挂传递给转向架。空气弹簧连接车体和构架，提供车体和构架之间的刚度和阻尼，进一步缓冲来自轮轨间的动力冲击。横向止挡是为了防止车体相对转向架横向运动量过大。二系横向减振器主要用来用来衰减车体的横向振动。二系抗蛇行减振器主要用来衰减车体与构架之间的纵向运动，抑制车辆蛇行，提高车辆临界速度。建立的动力学模型如图 3 所示。



图 3 8 节车动力学模型

## 3 计算结果分析与讨论

本文主要开展了明线运行时单纯的空气动力学计算、气动载荷作为已知载荷时车辆动力学计算，以及空气动力学与车辆动力学耦合计算、分析和讨论，运行速度均为 400km/h，计算用空气动力学模型和车辆动力学模型相同。

### 3.1 空气动力学特性

明线运行工况下耦合计算、仅气动计算时头车、中车 6 和尾车气动阻力、侧向力和升力随时间的变化曲线如图 4 所示。可以看出，耦合计算和仅气动计算得到的气动载荷变化趋势基本一致，但是总体上，耦合计算结果波动较大，仅气动计算结果变化较为平缓；由于迎风面积变化不大和绝对值较大，耦合计算和仅气动计算得到的气动阻力差异相对较小，与中车 6 和尾车相比，头车气动阻力差异稍大，如

仅气动计算时，头车气动阻力在 -13283 ~ -11849N，耦合计算时，头车气动阻力在 -15698 ~ -11434N；头车、中车 6 和尾车气动侧向力，有一定差异，如在 3s 附近，仅气动计算时，尾车气动侧向力为 -5100 N，耦合计算时，尾车气动侧向力为 -8262N；头车气动升力差异较大，波动幅度大，且有正值有负值，如仅气动计算时，头车气动升力在 688 ~ 3794N，耦合时，头车气动升力在 -12771 ~ 25860N。

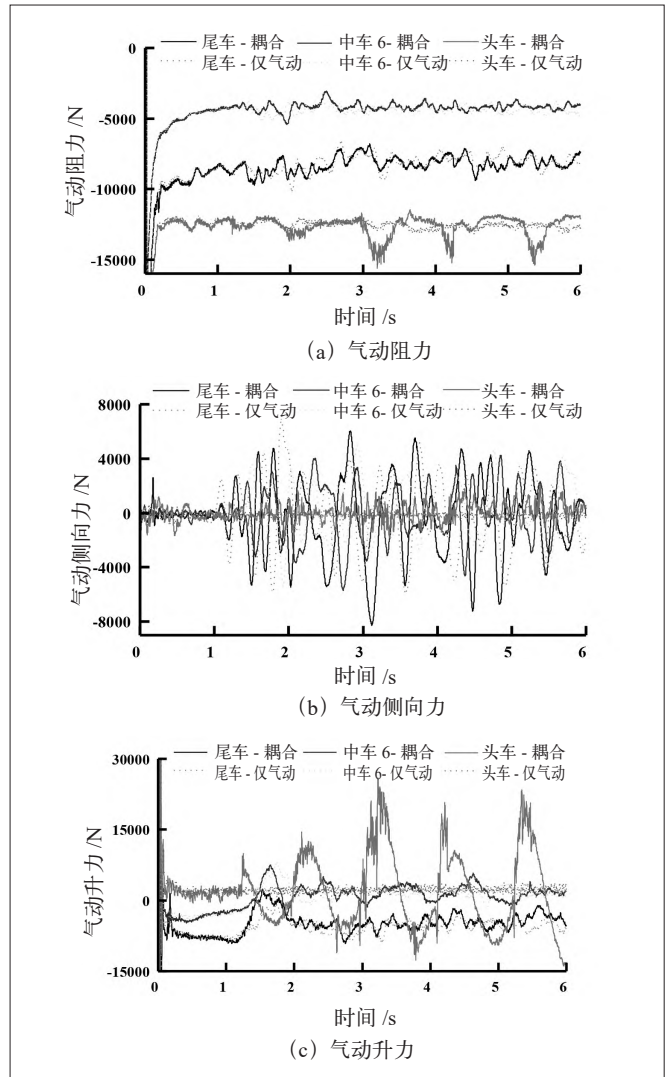


图 4 明线运行耦合计算和仅气动计算时车体气动载荷变化曲线

### 3.2 振动特性

明线运行工况下耦合计算、气动作为已知载荷时列车振动特性随时间的变化曲线如图 5 所示，包括车体垂向位移、车体横向位移、车体垂向加速度和车体横向加速度。从这些曲线中，可以看出：

- (1) 与气动作为已知载荷时相比，耦合计算时，

由于头车车体气动升力改变较大，头车车体垂向位移上下振动幅度大幅增加，例如，耦合计算时，头车车体垂向位移-9.7~5.4mm，气动作为已知载荷时，

(2) 与头车相比，尾车和中车6车体横向位移较大；耦合计算时，尾车和中车6车体横向位移变化规律产生较大变化。

(3) 耦合计算时，头车车体垂向加速度最大值和波动幅度都大幅增加，如最大值由0.05m/s<sup>2</sup>增加到0.6m/s<sup>2</sup>。尾车车体横向加速度有较大差异，例如，在3.6s，耦合计算时，0.266m/s<sup>2</sup>，气动作为已知载荷时，0.205m/s<sup>2</sup>，表明耦合计算头车振动和尾摆剧烈。

### 3.3 运行平稳性

运行平稳性的评价按照 GB/T 5599-2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》进行。频率为  $f_i$  时，运行平稳性指标分量  $W_i$  计算公式如下：

$$W_i = 3.57 \sqrt{\frac{A_i^3}{f_i}} F(f_i) \tag{1}$$

式中： $i = 1, 2, 3 \dots$ ；

$A_i$  - 振动加速度 ( $m/s^2$ )；

$f_i$  - 振动频率 (Hz)；

$F(f_i)$  - 频率修正系数。

运行平稳性指标计算公式如下：

$$X_1 = \sqrt[10]{\sum_{i=1}^n W_i^{10}} \tag{2}$$

根据运行平稳性的评价标准，计算得到的垂向稳定性指标和横向稳定性指标分别如下：空气动力学与车辆动力学耦合时，头车垂向稳定性指标是2.045，尾车垂向稳定性指标是1.393；气动载荷作为已知载荷施加在车辆动力学时，头车垂向稳定性指标是1.302，尾车垂向稳定性指标是1.364。空气动力学与车辆动力学耦合时，头车横向稳定性指标是1.157，尾车横向稳定性指标是1.815；气动载荷作为已知载荷施加在车辆动力学时，头车横向稳定性指标是1.069，尾车横向稳定性指标是1.784。

空气动力学与车辆动力学耦合计算和气动载荷作为已知载荷计算，得到的头车、尾车垂向稳定性指标和横向稳定性指标，都低于2.5，平稳性等级为1级，评定优级。空气动力学与车辆动力学耦合计算得到的头车和尾车的垂向稳定性指标和横向稳定性指标，都高于气动载荷作为已知载荷计算的结果，表明耦合计算时，头车和尾车稳

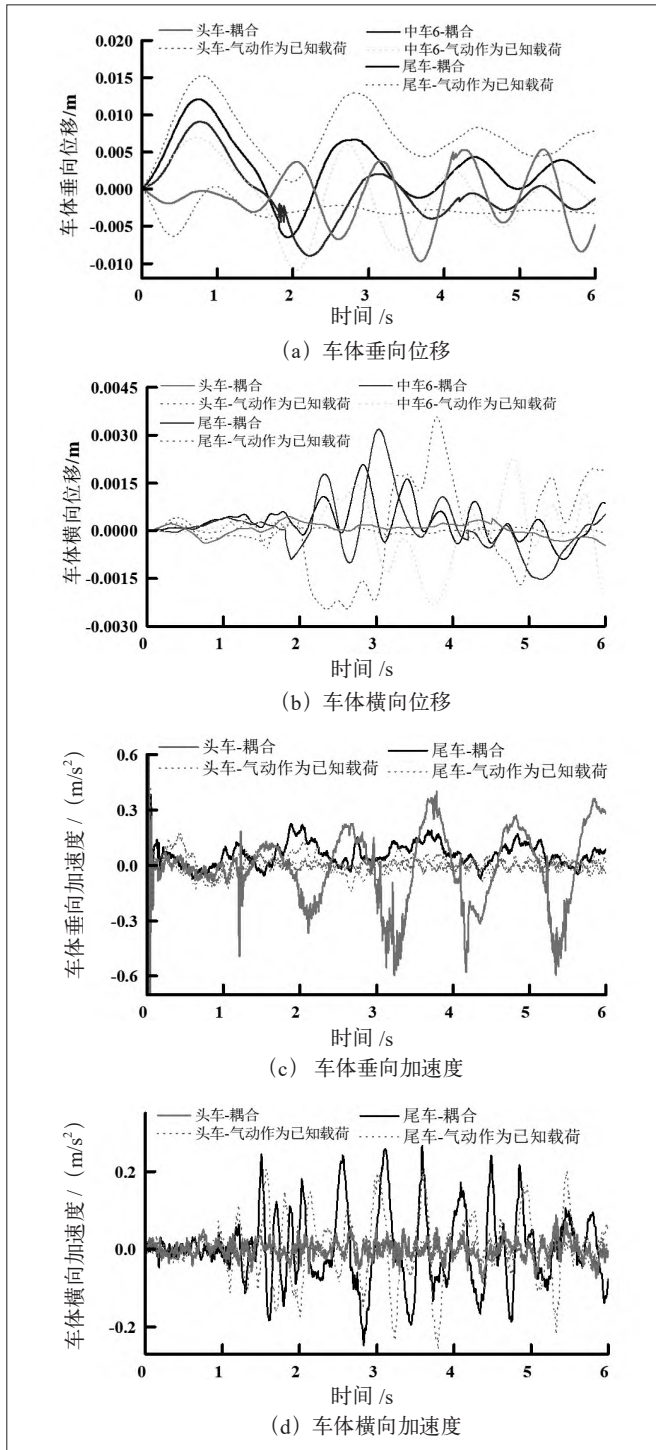


图5 明线运行耦合和气动作为已知载荷时车体振动特性

头车车体垂向位移-6.3~0.23mm；尾车车体垂向位移波动幅度差异不大，但是发生平移。

定性更差,尤其是头车垂向稳定性和尾车横向稳定性。

#### 4 结语

本文建立了耦合计算用的高速列车空气动力学模型和车辆动力学模型,采用发展的空气动力学和车辆动力学耦合方法,开展了明线运行时单纯的空气动力学计算、气动载荷作为已知载荷的车辆动力学计算、空气动力学与车辆动力学耦合计算,并进行了对比分析,得到的结论如下:

(1) 耦合计算和仅气动计算得到的气动载荷变化趋势基本一致。仅气动计算时,头车气动阻力在 $-13283 \sim -11849\text{N}$ ,耦合计算时,头车气动阻力在 $-15698 \sim -11434\text{N}$ ;在3s附近,仅气动计算时,尾车气动侧向力为 $-5100\text{N}$ ,耦合计算时,尾车气动侧向力为 $-8262\text{N}$ ;仅气动计算时,头车气动升力在 $688 \sim 3794\text{N}$ ,耦合时,头车气动升力在 $-12771 \sim 25860\text{N}$ 。

(2) 耦合计算时,头车车体垂向位移 $-9.7 \sim 5.4\text{mm}$ ,气动作为已知载荷时,头车车体垂向位移 $-6.3 \sim 0.23\text{mm}$ ;尾车车体垂向位移波动幅度差异不大,但是发生平移。

(3) 与气动作为已知载荷时,耦合计算时,头车车体垂向加速度最大值由 $0.05\text{m/s}^2$ 增加到 $0.6\text{m/s}^2$ ,在3.6s,尾车车体横向加速度由 $0.205\text{m/s}^2$ 增加到 $0.266\text{m/s}^2$ ,表明头车振动和尾摆剧烈。

(4) 明线运行耦合计算得到的稳定性指标,都大于气动载荷作为已知载荷计算的结果。空气动力学与车辆动力学耦合时,头车垂向稳定性指标是2.045,尾车横向稳定性指标是1.815;气动载荷作为已知载荷施加在车辆动力学时,头车垂向稳定性指标是

1.302,尾车横向稳定性指标是1.784。

#### 参考文献

- [1] 张永昌,徐宇工,张乐乐.基于流固耦合的高速列车裙板支架气动载荷响应分析[J].铁道学报,2016,38(6):15-22.
- [2] Nakade K,Masahiro S,Hiroshi F.Interaction between vehicle vibration and aerodynamic force on high-speed train running in tunnel[J].Vehicle system dynamics,2004(41)(Sup):717-723.
- [3] 崔涛.高速列车流固耦合振动及运行安全性研究[D].成都:西南交通大学,2011.
- [4] 李田,张继业,李忠继,等.基于Fluent与Simpack的高速列车流固耦合联合仿真[J].计算力学学报,2012,29(5):675-680.
- [5] Li T,Zhang J Y,Zhang W H.An improved algorithm for fluid-structure interaction of high-speed trains under crosswind[J].Journal of Modern Transportation,2011,19(2):75-81.
- [6] 李田,张继业,张卫华.高速列车流固耦合的平衡状态方法[J].机械工程学报,2013,49(2):95-101.
- [7] Zhanling Ji,Wen Liu,Dilong Guo,et al.Analysis of the Fluid-Structure Coupling Characteristics of a High-Speed Train Passing through a Tunnel[J].International Journal of Structural Stability and Dynamics,2022,22(16):2250185.
- [8] Zhanling Ji,Yi Guo,Dilong Guo,et al.Prediction of coupling effect between pantograph and tunnel resulting from car body vibration.Vehicle System Dynamics,2024,1(62):114-128.