

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.02.005

侧风作用下不同装载敞车气动性能研究

谢雨江, 武振锋

(兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:针对不同装载情况的敞车,开展敞车在空载、半载、满载3种情况下气动性能的研究。研究表明:单节敞车气动力的变化规律与整车气动力的变化规律一致;空载敞车所受的气动阻力最大,半载敞车次之,满载敞车最小;满载敞车所受的气动升力最大,半载敞车次之,空载敞车最小;3种敞车所受的侧向力非常接近,最大差距仅为1.9%;空载敞车和半载敞车所受的气动力较为接近,而满载敞车与前两种车型有明显差距。

关键词:铁路货运列车;装载;敞车;气动性能;数值模拟

中图分类号:U272 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)02-0025-04

Study on Aerodynamic Performance of Gondola Cars with Different Loadings under Crosswind

XIE Yujiang, WU Zhenfeng

(School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: According to the different loading conditions of gondola car, the aerodynamic performance of the gondola car under three conditions of empty-load, half-load and full-load was studied. The research results show that the change law of the aerodynamic force of a single gondola car is consistent with that of the whole vehicle, the aerodynamic drag of empty-load train is the largest, followed by half-load train, and full-load train is the least. The aerodynamic lift force of full-load train is the largest, half-load train comes to the second, and empty-load train is the least. The lateral forces of the three trains are very close with the biggest difference as merely 1.9%. The aerodynamic force of empty-load and half-load gondola car is relatively close, while full-load gondola car has a significant gap with the former two models.

Keywords: railway freight train; load; gondola car; aerodynamic performance; numerical simulation

0 引言

兰新铁路是我国货物运输的重要通道,由于特殊的地理位置,兰新铁路经过了多个风区,这些风区环境恶劣,常年伴有强烈侧风,对我国货运列车的安全运行带来了威胁。针对侧风作用下货运列车的气动性能,国内外的众多学者主要作了以下研究。梁习锋等^[1]基于二维、非定常 N-S 方程,忽略车辆的转向架,研究了侧风作用下敞车、棚车、罐车和客车的气动性能。周丹等^[2]基于三维、非定常 N-S 方程,研究了侧风作用下不同类型铁路货车在 5 m 路堤上运行时的气动性能。何华等^[3]基于二维、定常 N-S 方程,忽略了车辆的转向架,研究了侧风作用下导流板对敞车气动性能的影响,并对敞车周围的流场进行了分析。金琦、熊小慧等^[4-5]基于三维、定常 N-S 方程,研究了侧风作用下篷布对敞车气动性能的影响。

HASSAN H 等^[6]使用大涡模拟法研究了侧风作用下货运列车的气动性能,得到了机车和集装箱货车周围的压力、流场分布以及相关的气动参数。

敞车是我国目前应用数量最多、范围最广的铁路货车,占总体铁路货车数量的 50% 以上,具有非常高的研究价值。虽然有学者研究了侧风作用下敞车的气动性能,但这些研究或忽略了敞车的转向架,或仅仅基于二维条件,对三维条件下带有完整转向架的敞车研究不足。敞车结构特殊,内部具有巨大的空腔,这就导致了敞车在空载和载物状态下的外形有所不同。敞车在运输煤炭、道碴等物品时存在装不满的情况,由于这些物品呈颗粒状,装在一起时表面缝隙较小,故这种状态下的敞车可以近似看做空腔装满一半物品的半载状态;而敞车在运输钢材、机械设备等畏雨物品时通常会盖篷布,由于本文主要考虑敞车的气动特性,并不涉及流固耦合问题,故这种状态下的敞车可

基金项目:甘肃省科技厅重点研发计划项目(20YF3GA014)

第一作者简介:谢雨江(1998—),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为列车空气动力学,2067382109@qq.com。

以近似看做空腔装满物品的满载状态。因此本文针对侧风条件,对敞车在空载、半载、满载3种情况下的气动性能进行了研究。

1 研究方法

1.1 控制方程

连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程是控制流体流动的基本方程。本文列车的运行速度为120 km/h,侧风速度为24.5 m/s,马赫数小于0.3,空气不可压缩。不可压缩流之间的热量交换很小,故本文不考虑能量守恒方程。对于恒定流,在不考虑流体压缩性情况下的连续性方程为

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 表示流体密度; $x_j(j=1,2,3)$ 表示直角坐标系的坐标分量; $u_j(j=1,2,3)$ 表示直角坐标系中速度矢量 \mathbf{u} 沿 x_j 方向的分量。动量方程为

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: p 表示作用在流体微元体上的压强; τ_{ij} 表示因分子黏性而产生的作用在微元体的黏性应力张量。

计算流体力学可以较为准确地模拟湍流流动,本文利用软件Fluent进行数值模拟。湍流模型选用SST $k-\omega$ 模型,其优点是内存消耗低、精度较高、容易收敛,比较适合近壁自由流动问题。为保证计算结果的准确性,采用SIMPLE算法求解雷诺平均N-S方程,并用二阶迎风格式对其进行离散。

1.2 几何模型和网格划分

选取国内某型电力机车分别牵引空载敞车、半载敞车、满载敞车作为研究对象,对机车的车窗、车灯、转向架进行了适当的简化;忽略了受电弓、雨刮器、门把手。参照车钩的基本信息,用长宽高分别为40 cm、20 cm、16 cm的长方体代替车钩^[7]。敞车转向架模型如图1所示,机车模型和敞车模型如图2所示,机车和敞车的基本尺寸如表1所示。

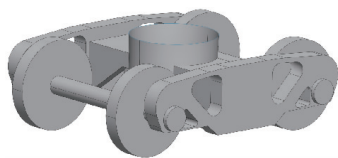


图1 敞车转向架模型

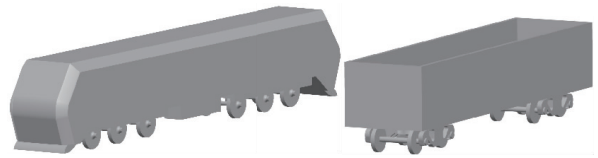


图2 机车模型和敞车模型

表1 机车和敞车的基本尺寸 单位:cm

车型	长度	宽度	高度
机车	2 200	310	408
敞车	1 250	290	312

网格质量对仿真计算收敛性及结果准确性至关重要^[8]。由于货运列车外形复杂,故利用Workbench-meshing进行非结构网格划分,然后用Fluent-meshing将非结构网格转化为多面体网格。计算域共设有2层加密区,对车体表面、转向架等区域进行了局部加密,边界层共设有12层,第1层边界层网格厚度的 y^+ 值控制在30~100,计算域的非结构网格数量在2 000万左右,转化为多面体网格后在400万左右。列车及地面网格如图3所示。

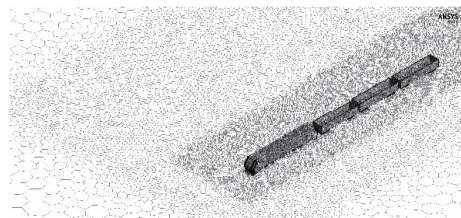


图3 列车及地面网格

1.3 计算工况

目前有两种方式可以模拟侧风作用下货运列车的运行,一种是动网格法,另一种是合成风法^[9]。本文选用合成风法,列车运行速度 V_1 设置为120 km/h,侧风速度 V_2 设置为24.5 m/s(10级风),侧风角 β 设置为 60° ,运行工况示意图如图4所示。

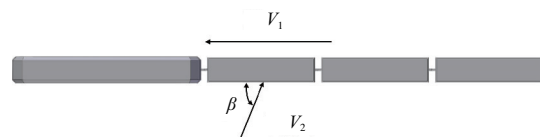


图4 运行工况示意图

1.4 计算域和边界条件

计算域和边界条件的设置是数值模拟的关

键,参照列车空气动力学性能数值仿真规范,对计算域的大小和边界条件进行了合理的设置^[10]。列车计算域为长方体,地面设置为与列车运行速度大小相等,方向相反的滑移壁面;顶面设置为对称边界;车体表面设置为无滑移壁面,计算域入口条件为速度入口,出口条件为压力出口,远场压力为标准大气压。模型计算域的大小如图5所示,其中 L 表示列车长度。

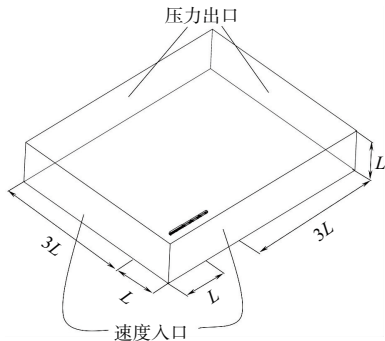


图5 模型计算域

1.5 方法可行性验证

为验证本文所采用方法的正确性,参考中南大学团队利用风洞试验所测得的数据进行可行性验证。风洞试验的列车为1节机车牵引3节棚车,路堤高度为5m,来流速度为60m/s,侧滑角分别为30°、45°、60°、75°、90°。计算数据与文献中风洞实验的数据对比如图6所示。

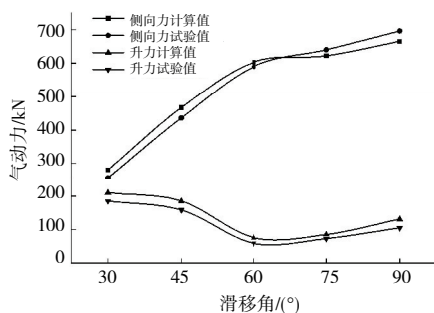


图6 计算数据与文献数据对比

从图6可以看出,计算所得到的侧向力及升力和文献试验结果规律一致,吻合性较好,因此认为本文所采用的模型和数值计算方法是合理的。

2 计算结果与讨论

2.1 气动力分析

侧风作用下,机车牵引3节空载敞车、半载敞

车、满载敞车所受的气动力如表2所示。

表2 气动力数据

单位:kN

车载状况	受力部位	阻力	升力	侧向力
空载	整车	38.14	46.65	94.62
	第1节	9.83	8.39	21.77
	第2节	6.25	8.75	17.35
	第3节	6.42	6.69	14.70
半载	整车	37.81	47.68	96.46
	第1节	9.77	8.64	20.60
	第2节	6.36	8.85	17.84
	第3节	6.82	6.43	15.03
满载	整车	29.44	55.02	95.93
	第1节	5.92	11.02	18.73
	第2节	3.49	13.27	18.07
	第3节	5.06	7.15	15.81

从表2可以看出,空载敞车所受的气动阻力最大,半载敞车次之,满载敞车所受的气动阻力最小。其中空载敞车和半载敞车差距较小,差距仅为0.8%;空载敞车和满载敞车差距较大,差距可达29.6%。满载敞车所受的气动升力最大,半载敞车次之,空载敞车最小。其中空载敞车和半载敞车差距较小,差距仅为2.2%;空载敞车和满载敞车差距较大,差距可达17.9%。3种敞车所受的侧向力非常接近,最大差距仅为1.9%。无论是空载、半载还是满载,每节敞车气动力的变化规律一致。对于同一种敞车而言,第1节车所受的气动阻力最大,第3节车次之,第2节车最小;第2节车所受的气动升力最大,第1节车次之,第3节车最小;第1节车所受的侧向力最大,第2节车次之,第3节车最小。值得注意的是,单节敞车气动力的变化规律与整车气动力的变化规律一致,空载敞车和半载敞车所受的气动力较为接近,而满载敞车与前两种车型有明显差距。

2.2 压力流场分析

为分析3种敞车的阻力变化情况,选择前后都是相同车型的第2节车进行研究,第2节敞车的头尾部表面压力如图7所示。

从图7可以看出,空载敞车和半载敞车的头尾部压力分布非常相似,这是空载敞车和半载敞车所受气动阻力非常接近的原因。虽然满载敞车与前2种车的头部压力分布较为相似,但满载敞车尾部所受的负压明显小于前2种车,因此满载敞车的压差小于前两种车。这是满载敞车所受气

动阻力最小的原因。为分析同种敞车所受升力和侧向力的变化情况,选择敞车的3种典型横截面进行研究,第2节空载敞车的前轮、中间、后轮横截面压力流线图如图8所示。

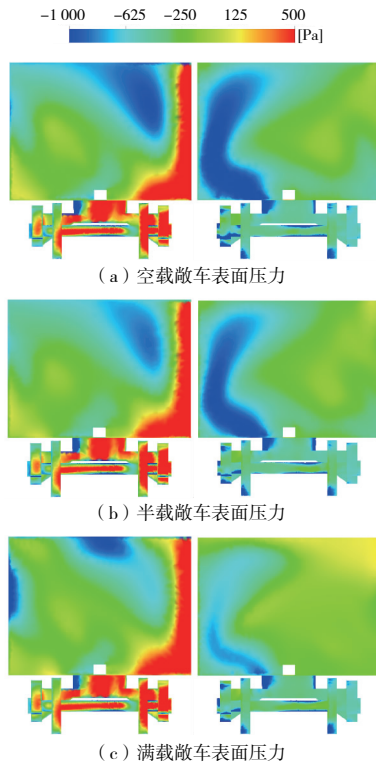


图7 第2节敞车头尾部表面压力

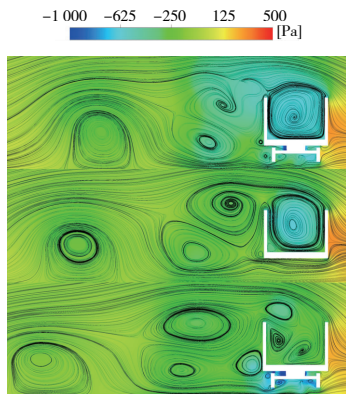


图8 第2节空载敞车横截面压力流线图

从图8可以看出,3种位置下的空载敞车左侧都有一个较大的漩涡,且此漩涡随着截面位置向后移动而向敞车左侧移动。前轮截面和中间截面的漩涡分布非常类似,敞车空腔内都有一个较大的漩涡,而后轮截面的漩涡分布则有所不同,敞车空腔内较大的漩涡分离成3个较小的漩涡。产生这种现象的原因是空气流速的不同,空气流速快的地方压力小,这也是前轮和中间截面空腔内

的负压明显大于后轮截面的原因。为进一步分析同种敞车所受升力和侧向力的变化情况,选择流场变化最为稳定的敞车中间横截面进行分析,每节空载敞车中间截面压力流线图如图9所示。

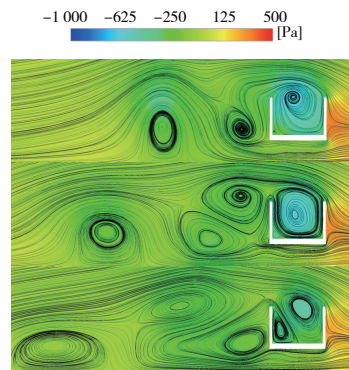


图9 每节空载敞车横截面压力流线图

从图9可以看出,随着位置向后移动,敞车迎风侧的正压会减小,最左侧的漩涡也会向左移动,这是第1节车侧向力最大,第2节车次之,第3节车最小的原因。第3节敞车空腔内的负压明显小于前2节车,这是第3节车升力最小的原因。与图8对比可知,第3节敞车空腔内的漩涡也发生了分离。为进一步分析不同类型敞车所受升力和侧向力的变化情况,选择流场变化最为明显的敞车后轮横截面进行分析,3种敞车的第2节敞车后轮横截面压力流线图如图10所示。

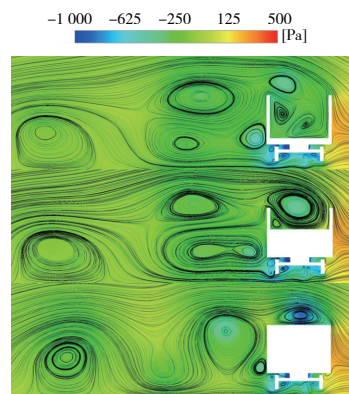


图10 3种敞车横截面压力流线图

从图10可以看出,3种敞车的流场差异非常大。3种敞车顶部漩涡的大小和数量都有所不同,这也导致了顶部压力有所不同,满载敞车顶部的负压明显较大,而半载和空载敞车的顶部压力则较为接近,这也是满载列车所受的升力最大,半载和空载列车所受的升力差距仅为2.2%的原因。值得注意的是,靠近3种敞车左侧的漩涡数量都

(下转第55页)

- [3] 苏万斌,江叶锋,陈启锐,等. 基于Abaqus的电梯制动器制动轮热应力分析[J]. 新技术新工艺, 2021, 404(8):43-48.
- [4] 邓林,吴晓军. 电梯制动器温度与制动力的影响因素分析[J]. 起重运输机械, 2020(9):51-54.
- [5] 郝家琦,徐金海,鲍超超,等. 基于VMD与SVM的电梯鼓式制动器故障诊断研究[J]. 机电工程, 2022, 39(1):112-119.
- [6] 梁庆海,贾希胜,白云杰. 基于Gamma过程的制动器磨损退化建模与剩余寿命预测[J]. 公路与汽运, 2021(5):1-5.
- [7] 季景方,张建辉,范佳能,等. 基于回归分析理论的盘式制动器制动温度预测研究[J]. 汽车实用技术, 2019(18):75-77.
- [8] 顾昕雨,肖志刚. ARIMA-SVR组合模型在卫星遥测参数预测中的应用[J]. 空间科学学报, 2022, 42(2):306-312.
- [9] 琚垚,祁林,刘帅. 基于改进乌鸦算法和ESN神经网络的短期风电功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4):58-64.
- [10] 孟海宁,童新宇,石月开,等. 基于ARIMA-RNN组合模型的云服务器老化预测方法[J]. 通信学报, 2021, 42(1):163-171.
- [11] 杨芮,徐虹,文武. 基于EEMD-GRU网络模型的短期风速预测[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(6):231-237.
- [12] 窦勇敢,袁晓彤. 基于隐式随机梯度下降优化的联邦学习[J]. 智能系统学报, 2022, 17(3):488-495.
- [13] 徐硕,侯贵生. 基于VAE-D2GAN的涡扇发动机剩余使用寿命预测[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(2):417-425.
- [14] 张忠林,张艳. 改进FA优化LSTM的时序预测模型[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(11):125-132.
- [15] 陈可嘉,刘惠. 基于改进BiGRU-CNN的中文文本分类方法[J]. 计算机工程, 2022, 48(5):59-66, 73.
- [16] 江涛,刘鑫容,朱耀琴,等. 基于GAN-CNN联合网络的复杂产品费用预测[J]. 电子设计工程, 2020, 28(17):174-179, 184.

收稿日期:2022-09-09

(上接第28页)

是3个,只是大小和位置的不同,3种敞车两侧的压力分布非常相似,这是3种类型列车侧向力都非常接近的原因。

3 结语

本文针对不同装载情况下的敞车,开展了敞车在空载、半载、满载3种情况下气动性能的研究。采用SIMPLE算法求解雷诺平均N-S方程,湍流模型采用SST $k-\omega$ 模型。研究结果表明:空载敞车所受的气动阻力最大,半载敞车次之,满载敞车所受的气动阻力最小;满载敞车所受的气动升力最大,半载敞车次之,空载敞车最小;3种敞车所受的侧向力非常接近,最大差距仅为1.9%;对于同一种车型而言,每节车所受的气动力也有所不同;单节敞车气动力的变化规律与整车气动力的变化规律一致,空载敞车和半载敞车所受的气动力较为接近,而满载敞车所受的气动力与前2种车型有明显差距。此研究结果可为货运列车的安全运行提供参考。

参考文献:

- [1] 梁习锋,熊小慧. 4种车型横向气动性能分析与比较[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(3):607-612.
- [2] 周丹,田红旗,杨明智,等. 强侧风作用下不同类型铁

路货车在青藏线路堤上运行时的气动性能比较[J]. 铁道学报, 2007, 29(5):32-36.

- [3] 何华,田红旗,熊小慧,等. 横风作用下敞车的气动性能研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(3):73-78.
- [4] 金琦,梁习锋,熊小慧. 横风对篷布气动升力的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(4):96-100.
- [5] 熊小慧,梁习锋,金琦. 横风作用下铁路货车篷布气动力数值模拟计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(2):728-735.
- [6] HASSAN H, CHRIS B. Large-eddy simulation of the flow around a freight wagon subjected to a crosswind[J]. Computers & Fluids, 2010, 39(10):1944-1956.
- [7] 赵怀瑞. 车辆工程导论[M]. 北京:中国铁道出版社, 2015.
- [8] 李田,秦登,安超,等. 计算网格对列车空气动力学不确定性的影响[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(4):816-822.
- [9] PREMOLI A, ROCCHI D, SCHITO P, et al. Comparison between steady and moving railway vehicles subjected to crosswind by CFD analysis [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 156:29-40.
- [10] TB/T 3503.4—2018 铁路应用空气动力学 第4部分:列车空气动力学性能数值仿真规范[S].

收稿日期:2022-10-10