

交通运输

真空管道中高速列车空气阻力数值仿真

周 晓 张耀平¹ 姚应峰²

(西南交通大学 物流学院, 交通运输学院¹; 牵引动力国家重点实验室², 成都 610031)

摘 要 基于粘性流体的 Navier-Stokes 方程和 $k\epsilon$ 双方程湍流模型, 运用流体动力学数值仿真软件 FLUENT 对高速列车在真空管道内不同工作压力, 以及不同运行速度条件下车体所受到的空气阻力进行数值仿真, 得出真空管道内工作压力对列车空气阻力的影响规律。研究结果表明: 列车运行速度越大, 随着工作压力的降低, 空气阻力减幅越大; 在同一运行速度下, 随着工作压力不断降低, 空气阻力的减幅也越大。

关键词 工作压力 空气阻力 数值仿真 真空管道运输

中图分类号 U292.914 文献标志码 B

真空管道运输 (Evacuated Tube Transportation, 简称 ETT) 是 21 世纪一种全新的交通运输模式^[1-3]。其基本原理是, 将磁浮系统置于真空管道中, 由于磁悬浮列车和轨道之间没有直接接触而大大减小了机械阻力, 以及空气十分稀薄而大大减小了空气阻力。因此, 在真空管道中可以打破空气阻力这个影响运行速度的瓶颈, 实现列车的高速行驶。

随着列车运行速度的提高, 空气动力学问题日益受到重视。为实现高速列车的安全、舒适, 降低能耗并满足环境保护的要求, 世界各国逐渐开展了对列车空气动力学问题的研究^[3-7]。研究真空管道内列车运行速度和工作压力对列车所受空气阻力的影响规律, 对于设计真空管道运输系统的列车运行速度和管道内真空度, 并使其满足工程实际应用需要有着重要的意义。但是, 由于真空管道现在只是作为下一代运输方式被提出, 目前国内和国外对该问题的专门研究很少, 在某种程度上讲是一片空白。

本文基于粘性流体力学理论, 按二维不可压缩粘性流, 对真空管道内 5 种工作压力 (本文中工作压力

指管道内的大气压力)下以 3 种速度运行的列车周围流场进行数值仿真, 并对仿真结果进行对比分析, 得出真空管道内列车运行速度和工作压力对列车所受空气阻力的影响规律。

1 数值模型

1.1 基本假设

(1) 文中所采用的 3 种列车运行速度都比较高, 由此引起的外部空气流动状态十分复杂, 流场雷诺数大于 10^5 , 故对流场作为湍流流动处理。本文使用 $k\epsilon$ 双方程湍流模型模拟这一湍流流场。

(2) 由于高雷诺数流场计算难于收敛, 而且文中采用不同的列车运行速度和工作压力, 各种工况的马赫数均不同。因此, 不考虑空气的可压缩性, 对各种工况统一按不可压缩的情况处理。

(3) 计算忽略了车体外部复杂结构的细节, 受电弓、转向架及车辆连接部位等均未仔细模拟, 认为车体是一个具有光滑外形的几何体。

1.2 数学模型

二维粘性、定常不可压缩湍流流场采用 $k\epsilon$ 双方程湍流模型模拟时, 其流场计算的数学模型可用下面的控制方程组描述^[8]:

(1) 连续方程

2007 年 12 月 4 日收到 国家自然科学基金项目 (50678152) 资助

第一作者简介: 周 晓 (1978-), 女, 江西樟树人, 硕士研究生。

E-mail: z8920@smail.cnj

$$d\dot{M}(\vec{U}) = 0 \tag{1}$$

(2) 动量守恒方程

$$d\dot{M}(\rho k\vec{U}) = d\dot{M}(\mu \text{grad}(u)) - \frac{\partial p}{\partial x} \tag{2}$$

$$d\dot{M}(\rho k\vec{U}) = d\dot{M}(\mu \text{grad}(v)) - \frac{\partial p}{\partial y} \tag{3}$$

(3) 湍流动能 k 方程

$$d\dot{M}(\rho k\vec{U}) = d\dot{M}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \text{grad}(k)\right] + G - \rho\epsilon \tag{4}$$

(4) 湍流动能耗散率 ε 方程

$$d\dot{M}(\rho k\vec{U}) = d\dot{M}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right) \text{grad}(\epsilon)\right] + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho\epsilon) \tag{5}$$

式中, U 为流场速度矢量 $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$; u 为流场速度矢量 U 在 x y 方向的分量 $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$; p 为流场压力 (Pa) ; ρ 为空气密度 $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$; μ 为动力粘性系数 $(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2})$; k 为湍流动能 $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$; ϵ 为湍流能耗散率 $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$; $G = \mu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right]$; $\frac{\partial U_i}{\partial x_j}$; $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k}{\epsilon}$; C_1 、 C_2 、 C_μ 、 σ_k 、 σ_ϵ 是常数, 它们分别为 1.44 1.92 0.09 1.0 1.3

1.3 几何模型

所使用的计算模型及其主要尺寸如图 1 所示, 列车长 40 m 宽 3 m 车头、车尾采用相同的单拱流线外形。计算区域参考了以往轮轨列车流场的计算经验, 车头距边界入口距离为车宽的 10 倍, 尾流区域长度取车宽的 20 倍, 管道直径为 6 m 模型阻塞比为 0.25 计算区域及其主要尺寸如图 2 所示。

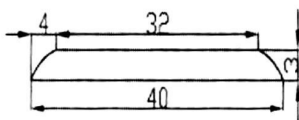


图 1 计算模型(单位:m)

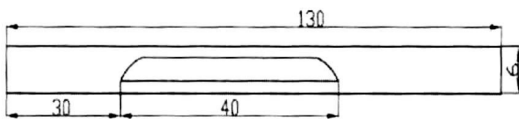


图 2 计算区域(单位:m)

2 计算结果及分析

2.1 计算工况

对该模型分别计算 3 种车速工况在 5 种工作压力条件下列车所受空气阻力的情况。3 种车速分别为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 5 种工作压力分别为 101 325 Pa 7 000 Pa 5 000 Pa 3 000 Pa 1 000 Pa 并且采用以下方式来计算车体所受阻力: 车体和管道静止、空气流速分别为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2 计算结果

利用基于有限体积法的流场分析软件 FLUENT 进行数值仿真。图 3 和图 4 分别给出了真空管道内, 不同工作压力条件下, 列车所受到的空气阻力随运行速度的变化规律, 和不同运行速度下, 列车所受到的空气阻力随工作压力的变化规律。

从仿真结果可以看到, 在真空管道内, 对于同一工作压力, 列车运行速度越快, 其所受到的空气阻力也越大; 对于同一运行速度, 工作压力越大, 列车所受到的空气阻力也越大; 阻力和工作压力之间近似呈线性变化关系。由图 3、图 4 的 a 图可知, 与在标准大气压下运行相比, 列车在抽成一定真空度的管道中运行将大大减小空气阻力。

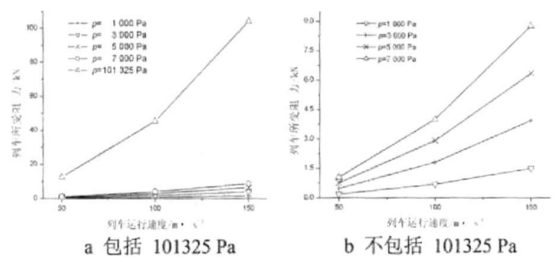


图 3 列车所受阻力随运行速度的变化

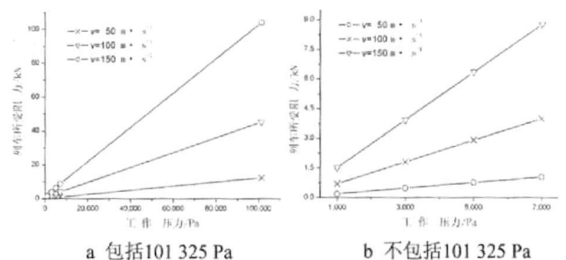


图 4 列车所受阻力随大气压力的变化

表 1 真空管道内列车所受空气阻力随工作压力减小而减小的幅度

车速 / m·s ⁻¹	空气阻力的减幅 /%			
	101 325 Pa- 7 000 Pa	7 000 Pa- 5 000 Pa	5 000 Pa- 3 000 Pa	3 000 Pa- 1 000 Pa
50	91.2	26.8	37.7	61.4
100	91.5	27.2	38.0	61.7
150	91.6	27.7	38.1	61.9

表 1 所示的是真空管道内, 列车在 3 种运行速度下, 随着工作压力的减小, 车体所受空气阻力减小的幅度。由该表可见, 列车运行速度越大, 随着工作压力的降低, 列车所受空气阻力的减幅越大、减阻效果越明显; 在同一运行速度下, 随着工作压力不断降低, 列车所受空气阻力的减幅越来越大、减阻效果越来越明显。

3 结论

(1) 真空管道内, 对于同一工作压力, 列车运行速度越快, 其所受到的空气阻力也越大; 对于同一运行速度, 工作压力越大, 列车所受到的空气阻力也越大; 阻力和工作压力之间近似呈线性变化关系。

(2) 真空管道内, 列车运行速度越大, 空气阻力随工作压力的降低减幅越大; 在同一运行速度下, 随着工作压力不断地降低, 空气阻力的减幅也越大。

(3) 与在标准大气压下运行相比, 列车在抽成

一定真空度的管道中运行将大大减小空气阻力, 可以实现列车的高速运行以及达到节约能耗的目的。但是由于真空管道运输系统是靠真空泵等真空获得设备来维持管道内一定的真空度的, 空气密度越低、大气压力越小, 所需的设备成本就越高, 所以应该综合考虑设备成本、列车运行速度、空气阻力, 以及现实需要等因素的基础上确定管道内的真空度。

参 考 文 献

- 1 张耀平, 梅绍祖, 曾学贵. ETT引领 21 世纪的高速运输. 世界科技研究与发展, 2002, 24(2): 60-64
- 2 张耀平. 真空管道运输——真空产业发展的新机遇. 真空, 2006, 43(2): 56-59
- 3 Raghathan S, Kim H D, Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed railway train. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(6): 469-514
- 4 Cai Y G, Chen S S. Dynamic characteristics of magnetically levitated vehicle systems. APPLIED Mechanics Reviews, ASME, 1997, 50(11): 647-670
- 5 武青海, 俞翰斌, 李和平. 磁悬浮列车空气动力学仿真计算探讨. 铁道机车车辆, 2004, 24(2): 18-20
- 6 许唯临, 廖华胜, 王 韦. 隧道中列车空气阻力数值模拟研究. 铁道学报, 1998, 20(2): 93-98
- 7 舒信伟, 谷传纲, 梁习锋, 等. 具有流线型头部的高速磁浮列车气动性能数值模拟. 上海交通大学学报, 2006, 40(6): 1035-1037
- 8 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用. 北京: 清华大学出版社, 2004

Numerical Simulation on the Aerodynamic Drag of High-speed Train in Evacuated Tube

ZHOU Xiaoj, ZHANG Yao-ping, YAO Ying-feng

(College of Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; College of Traffic and Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

[Abstract] The aerodynamic drag of high-speed train in evacuated tube is studied by numerical simulation. Based on the 2D viscosity stable and incompressible Navier-Stokes equations and two equation k-ε turbulent model, the aerodynamic drag of high-speed train in 5 working pressure conditions at 3 different running speeds are calculated with finite volume method. The influence of different working pressure in evacuated tube on the aerodynamic drag is analyzed. The simulation result shows that the faster the running speed is, the larger decrease the aerodynamic drag of train have gotten as the working pressure continuously reduces; at certain running speed, the lower the working pressure is, the larger decrease the aerodynamic drag of train have gotten.

[Key words] working pressure, aerodynamic drag, numerical simulation, evacuated tube transportation