

# 真空管道中阻塞比对列车空气阻力影响的数值研究

周 晓\* 张殿业 张耀平

(西南交通大学 物流学院 四川成都 610031)

## Numerical Simulation of Blockage Rate and Aerodynamic Drag of High-Speed Train in Evacuated Tube Transportation

Zhou Xiao\*, Zhang Dianye, Zhang Yaoping

(College of Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract** The influence of the blockage rate on the aerodynamic drag of a high-speed train in evacuated tube transportation (ETT) was numerically simulated, with a dedicated software package for numerical simulation of fluid dynamics called FLUENT. The turbulent model satisfies the 2D, viscous, stable and incompressible Navier-Stokes equation and the  $k-\epsilon$  two-equation. Six different blockage rates and four specific speeds of the train were calculated in the simulation with finite volume approximation. The simulated results show that the blockage rate significantly affects the aerodynamic drag of the train in an evacuated tube. For example, the larger the blockage rate, the higher the aerodynamic drag. A relative small blockage rate affects the aerodynamic drag only a little, whereas a large blockage rate sharply increases the aerodynamic drag.

**Keywords** Blockage rate, Aerodynamic drag, Numerical simulation, Evacuated tube transportation

**摘要** 本文基于粘性流体的 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 对不同的真空管道阻塞比条件下, 高速列车在不同运行速度下车体所受到的空气阻力进行数值仿真, 得出真空管道内阻塞比对列车空气阻力的影响规律。研究结果表明: 在真空管道内, 阻塞比越大, 列车所受到的空气阻力也越大; 阻塞比较小时, 阻塞比的变化对列车所受到的阻力的影响较小, 但是当阻塞比较大时, 列车所受阻力急剧上升; 真空管道运输具有快速、高效的优越性。

**关键词** 阻塞比 空气阻力 数值仿真 真空管道运输

中图分类号: TB71<sup>+</sup>1 文献标识码: A 文章编号: 1672-7126(2008)06-535-04

飞机和磁悬浮列车是当今速度最快的交通运输工具, 但是, 空气阻力限制了它们速度的进一步提高。为了打破空气阻力这个影响运行速度的瓶颈, 真空管道运输 (Evacuated Tube Transportation, 简称 ETT) 作为下一代高速运载工具的想法便应运而生了<sup>[1-4]</sup>。其基本设想是: 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, 从而实现列车的高速运行; 根据地形和经济条件, 可把真空管道置于地上或者地下, 为避免

迎头对开的列车相遇时产生的气压转变及震荡, 真空管道运输线路由两条不同运行方向的管道组成; 管道的横截面为圆形结构, 且由密封性及力学性能良好的材料制成, 使其能够更好地满足承受管道内外气压差形成的压力、承受列车重力、防止大气渗漏等要求; 真空管道运输沿线每隔一定距离放置一台真空泵, 用以产生和保持管道内一定的真空度; 旅客上车时, 车站以及列车内均处于正常大气压状态, 旅客上车后, 车门关闭, 车内的生命保持系统开始工作, 列车进入与真空管道相连的过渡舱中, 对过渡舱

收稿日期: 2007-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50678152)

\* 联系人: Tel: 13094427554; E-mail: zx8920@gmail.com

抽真空,直至气压降低至与管道中的真空度相同后,打开过渡舱闸门,列车即可进入真空管道中运行,旅客下车过程则与上述过程相反。真空管道运输系统运用各种真空技术,如真空获得技术、防漏技术等<sup>[5-6]</sup>,是一种新型的运输系统,与现有的运输工具相比,它具有快速、高效、环保、安全等优越性。

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<sup>[7-11]</sup>。真空管道运输是作为下一代运输方式被提出的,目前国内还没有真空管道内列车空气动力学问题的专门研究,国外也只有针对瑞士 Swissmetro 系统<sup>[2]</sup>的 1/10 大气压真空管道高速列车的空气动力学的一些相关研究<sup>[12]</sup>。

阻塞比是决定管道内径的主要因素,阻塞比是指列车横截面积与管道内截面积之比,研究真空管道阻塞比和列车运行速度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管道阻塞比、确定真空管道内真空度及列车的运行速度,并使其满足工程实际应用需要有着重要的意义。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 6 种阻塞比条件下以 4 种速度运行的列车的周围流场进行数值仿真。通过对仿真结果的分析,得出真空管道运输条件下,阻塞比和列车运行速度对列车所受空气阻力的影响规律,并将该仿真结果与列车在明线中运行所受空气阻力的情况进行比较,得出真空管道运输具有快速、高效等优点。

## 1 数值模型

### 1.1 基本假设

(1)文中所采用的 4 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大气压力,各种工况的马赫数均不同,因此忽略空气的可压缩性,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,转向架、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<sup>[13]</sup>:

#### (1)连续方程

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

#### (2)动量守恒方程

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}) - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

#### (3)湍流动能 $k$ 方程

$$\nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G - \rho \epsilon \quad (4)$$

#### (4)湍流能耗散率 $\epsilon$ 方程

$$\nabla \cdot (\rho \epsilon \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{U}$  为流场速度矢量/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $u, v$  为流场速度矢量  $\mathbf{U}$  在  $x, y$  方向的分量/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $p$  为流场压力/Pa;  $\rho$  为空气密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\mu$  为动力粘性系数/ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $k$  为湍流动能/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $\epsilon$  为湍流能耗散率/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $G = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ ;  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ ;  $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\epsilon$  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

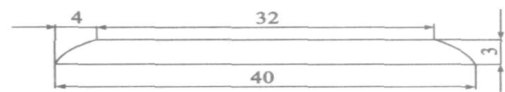


图 1 计算模型(单位: m)

Fig 1 Computation model

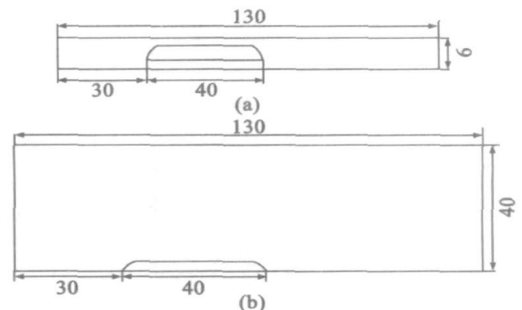


图 2 计算区域(单位: m)

Fig 2 Computation region

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,图 2(a)所示的是管道直径为 6 m,阻塞比为 0.25 的计算区域及其主要尺寸,图 2(b)所示的是研究列车在明线中运行所受空气阻力所使用的计算区域,其阻塞比为 0.0056。

## 2 计算结果及分析

### 2.1 计算工况

对计算区域(a),模拟真空管道中大气压力为 1000 Pa 时,4 种车速工况在 6 种管道阻塞比( $\alpha$ )条件下列车所受空气阻力的情况。4 种车速分别为  $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,6 种阻塞比分别为 0.14、0.18、0.25、0.36、0.56、0.78,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  $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对计算区域(b),模拟在标准大气压下,列车在同样 4 种车速工况条件下所受到的空气阻力。

### 2.2 计算结果

利用基于有限体积法的流场分析软件 FLUENT

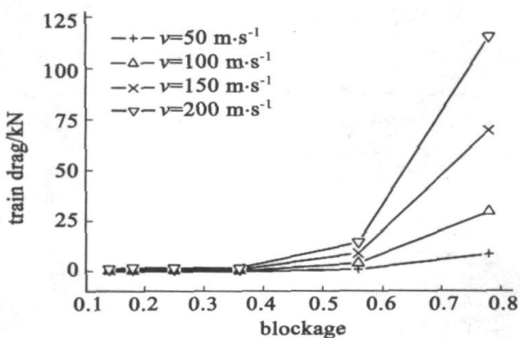


图 3 列车所受阻力随阻塞比的变化

Fig. 3 Changes of train drag at different blockages

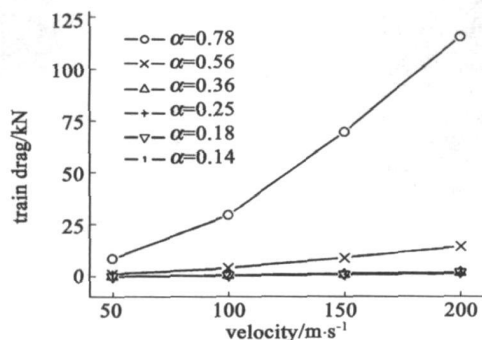


图 4 列车所受阻力随运行速度的变化

Fig. 4 Changes of train drag at different velocity

进行数值仿真。图 3 和图 4 分别给出了真空管道内大气压力为 1000 Pa 时,列车在 4 种运行速度下所受到的空气阻力随阻塞比的变化规律,和不同阻塞比条件下,列车所受到的空气阻力随运行速度的变化规律。表 1 所示的是列车在明线中、大气压力为 101325 Pa 条件下运行与在不同阻塞比、大气压力为 1000 Pa 的真空管道中运行,所受空气阻力的计算结果比较。

表 1 不同大气压力、不同阻塞比情况下列车所受空气阻力的计算结果比较

Tab. 1 Comparison of the aerodynamic drag at different pressures and different blockage rates

列车速度 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	阻塞比( $\alpha$ )			
	101325 Pa		1000 Pa	
	0.0056	0.78	0.56	0.36
50	0.97	8.70	1.14	0.12
100	4.03	29.54	4.19	0.47
150	8.89	69.53	9.05	1.06
200	15.65	115.43	14.46	1.83

从图 3、图 4 可以看到,在真空管道运输条件下,对于同一运行速度,阻塞比越大,列车所受到的空气阻力也越大;对于同一阻塞比,列车运行速度越大,其所受到的空气阻力也越大;阻塞比较小时,阻塞比的变化对列车所受到的阻力的影响较小,但是当阻塞比较大时,列车所受阻力急剧上升。以列车运行速度是  $200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  为例,当阻塞比由 0.78 减小至 0.56 时,车体所受的空气阻力减小了 87.47%;当阻塞比由 0.56 减小至 0.36 时,车体所受的空气阻力减小了 87.35%;而当阻塞比由 0.18 减小至 0.14 时,车体所受的空气阻力只减小了 32.71%。由表 1 可见,列车在大气压力为 1000 Pa、阻塞比小于 0.56 的真空管道中运行时,所受到的空气阻力比它在标准大气压的明线中所受到的空气阻力小。

## 3 结论

真空管道运输条件下,阻塞比、列车运行速度、管道内大气压力等因素都会对列车所受空气阻力产生影响。通过对一定真空度管道内不同阻塞比条件下的高速列车周围流场进行数值仿真以及对仿真结果进行分析,在真空管道中可以得到:

(1)对于同一运行速度,阻塞比越大,列车所受到的空气阻力也越大;对于同一阻塞比,列车运行速度越大,其所受到的空气阻力也越大。

(2)阻塞比较小时,阻塞比的变化对列车所受到

的阻力的影响较小,但是当阻塞比较大时,列车所受阻力急剧上升。

(3)在相同运行速度下,列车在一定阻塞比的真空管道中所受空气阻力比在标准大气压的明线中所受空气阻力小,前者的运输能耗比后者的少,反之,在相同运输能耗下,列车在真空管道中可以获得比在标准大气压的明线中更大的运行速度。因此,真空管道运输具有快速、高效的优点。

通过改变阻塞比、列车运行速度和管道内大气压力可以改变列车的空气阻力。管道内大气密度一定时,可以通过增大管道横截面积(即减小阻塞比)来降低空气阻力;而在低压管道中,即使列车高速行驶,仍然可以采用较大的阻塞比;相同大气压力条件下,管道内行车阻力肯定比在敞开的大气中大,这是由管壁效应引起的,要减小管壁阻力,就必须减小阻塞比。由此可见,大气压力、列车运行速度以及管壁阻力是影响阻塞比的主要因素。随着阻塞比的减小,即随着真空管道横截面的增大,工程建设成本将急剧上升,而减阻的效果却越来越不明显。所以,为了达到减阻效果而在设计时一味扩大真空管道横截面积的做法并不经济,应该在综合考虑建设成本、管道内真空度、列车运行速度等因素的基础上确定阻塞比及管道的横截面积。

#### 参 考 文 献

[ 1 ] <http://www.et3.com>, [ 2004, 05]

- [ 2 ] <http://www.swissmetro.com>, [ 2004, 11]
- [ 3 ] 沈志云. 关于我国发展真空管道高速交通的思考[ J ]. 西南交通大学学报, 2005, 40(2): 133-137
- [ 4 ] 张耀平, 梅绍祖, 曾学贵. ETT- 引领 21 世纪的高速运输[ J ]. 世界科技研究与发展, 2002, 24(2): 60-64
- [ 5 ] 曹文钢, 赵浩杰, 李志远. 滑阀真空泵振动平衡的优化设计研究[ J ]. 真空科学与技术学报, 2007, 27(1): 67-71
- [ 6 ] 刘 阳, 于建平, 孙 冲. 多级串联密封系统泄露仿真与实验研究[ J ]. 真空科学与技术学报, 2005, 25(2): 127-133
- [ 7 ] Raghathan S, Kim H D, Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed railway train[ J ]. Progress in Aerospace Sciences 2002, 38(6): 469-514
- [ 8 ] Cai Y G, Chen S S. Dynamic characteristics of magnetically levitated vehicle systems[ J ]. Applied Mechanics Reviews, ASME, 1997, 50(11): 647-670
- [ 9 ] 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[ J ]. 铁道机车车辆, 2004, 24(2): 18-20
- [ 10 ] 许唯临, 廖华胜, 王 韦. 隧道中列车空气阻力数值模拟研究[ J ]. 铁道学报, 1998, 20(2): 93-98
- [ 11 ] 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[ J ]. 上海交通大学学报, 2006, 40(6): 1034-1037
- [ 12 ] Mossi M, Sybilla S. Swissmetro: aerodynamic drag and wave effects in tunnels under partial vacuum[ A ]. Proc. Maglev 2002, Lausanne, 2002: 156-163
- [ 13 ] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[ M ]. 北京: 清华大学出版社, 2004