

基于动网格的真空管道 高速列车阻力计算方法研究

米百刚* 詹浩 朱军

(西北工业大学翼型叶栅国防科技重点实验室 西安 710072)

Simulation of Aerodynamic Drag of High-Speed Train in Evacuated Tube Transportation

Mi Baigang* Zhan Hao Zhu Jun

(National Key Laboratory of Aerodynamic Design and Research, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract The aerodynamic drag of the high-speed train in the evacuated tube transportation (ETT) was modeled, approximated, and simulated in the dynamic mesh technique. The influence of the ETT conditions, including the pressure, compressibility of air, speed of a train, and blockage ratio, on the drag was analytically studied. In the simulation, the 2-D unsteady Navier-Stokes equations were solved. The simulated results show that the pressure and blockage ratio significantly affect the aerodynamic drag of the train running at high or super speeds in the evacuated tube. For instance, a small blockage ratio and a low pressure results in a weak drag of the train. Moreover, the impact of the tube diameter on the drag is much stronger at a large blockage ratio than that at a small blockage ratio. As the pressure decreases, the linear dependence of the drag on the blockage ratio weakens, and the drag linearly depends on the square of speed.

Keywords Evacuated tube transportation, Blockage ratio, Dynamic mesh, Aerodynamic drag

摘要 运用流体动力学数值仿真软件 Fluent 结合动网格技术,通过求解二维可压缩非定常 Navier-Stokes 方程,对考虑可压缩性的高速、超高速列车空气阻力与真空管道阻塞比、真空度的关系进行了数值模拟,研究分析了列车运行速度、真空度、阻塞比对列车运行空气阻力影响规律。研究的结果表明,真空管道内,阻塞比越小,真空度越高,列车运行阻力越小。而且阻塞比较大时,管道半径的变化会引起阻力的强烈变化,但是阻塞比较小时,这种变化趋于缓和;低真空度时,列车空气阻力与阻塞比呈很好的线性关系,在真空度比较高时,这种线性关系减弱,且阻力与运行速度的平方呈现的也是近似的线性关系;处理好阻塞比、真空度、阻力的平衡关系是发挥真空管道运输潜力的关键。

关键词 真空管道运输 阻塞比 动网格 空气阻力

中图分类号:TB79 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1672-7126.2013.09.07

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。为了突破空气阻力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^[1-2]。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,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^[3-4]。真空管道运输系统基本设想是: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。

真空管道运输是作为下一代运输方式被提出的,近些年,国内外都作了一些相关方面的研究工作,为真空管道运输的早日实施建造提供了理论基

收稿日期:2012-10-15

* 联系人:Tel:(029)88494043;E-mail:mibaigang@163.com

础。国内例如周晓^[5-6]的“真空管道中阻塞比对列车空气阻力影响的数值研究”,但是文中采用的是空气不可压缩的假设,计算的列车速度也较低,且只研究在同一真空度下的,不同运行速度条件下,列车所受空气阻力与管道直径之间的关系。而国外也只有针对瑞士 Swissmetro^[7-9]系统的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,这些研究针对的都是真空度不高,并且列车运行速度较低的状态。因此,可以说还没有专门针对高真空度,高速甚至超高速的真空管道列车的空气动力数值研究。

基于上述原因,本文结合动网格技术,采用 Fluent 软件求解可压缩 Navier-Stokes 方程,对二维真空管道中列车的空气阻力进行了数值模拟,对高速运行下的列车空气阻力与真空管道的直径关系进行了研究,由于真空管道的直径越大,真空度越高,建造成本越高,而直径越小,真空度越低则列车运行的阻力越大,因此,探索研究这三者之间的相互关系是本文研究的重点,也是为以后真空管道的建造提供管道直径、列车速度、真空度之间的匹配选型的数值依据。为此,本文主要从两个方面进行了研究分析,一是分析在同一运行速度,不同阻塞比条件下,列车所受空气阻力与真空度之间的关系;另一是在同一真空度,不同阻塞比下,列车所受空气阻力与运行速度之间的关系。通过对这些不同状态的空气阻力进行分析,研究探讨列车速度,真空度,环境压强以及阻塞比对真空管道中列车运行的空气阻力的影响。

1 数值模拟方法

1.1 控制方程

文中采用的控制方程为二维积分形式的非定常雷诺平均 N-S 方程。

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_V W dV + \int_{\partial V} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} ds = \frac{1}{Re} \int_{\partial V} \mathbf{F}_v \cdot \mathbf{n} ds \quad (1)$$

式中, V 为任意控制域, W 是守恒变量, F 为无粘(对流)通矢量项, F_v 为粘性通量, ∂V 为控制域的边界, n 为控制域边界单位外法向矢量, Re 为计算的雷诺数。

1.2 空间离散与时间推进

空间离散采用二阶迎风格式——通量差分裂(Roe-FDS)格式,时间离散采用 LU-SGS 隐式时间推进格式,应用当地时间步长、残值光顺、预处理和多重网格加速收敛。

1.3 湍流模型

对于粘性流动的数值计算,需采用湍流模型来

对 NS 方程进行封闭。本文采用的湍流模型为 $k-\omega$ SST 湍流模型。该模型克服了标准 $k-\omega$ 湍流模型对自由流参数变化比较敏感的缺点,在近壁面附近采用 $k-\omega$ 湍流模型,在远离壁面的流场中采用了目前广为应用的 $k-\epsilon$ 湍流模型。这样充分利用了 $k-\omega$ 湍流模型对逆压梯度流动具有较高模拟精度, $k-\epsilon$ 湍流模型对湍流初始参数不敏感的优点。

两方程 $k-\omega$ SST 模型方程可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + u_i \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_i} &= P_k - \beta_k \rho k \omega + \\ &\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_1 + \frac{\mu_1}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \cdot \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + u_i \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial x_i} \\ &= C_\omega P_\omega - \beta_\omega \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_1 + \frac{\mu_1}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] \\ &+ 2\rho(1 - F_1) \frac{1}{\sigma_{\omega 2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (2)$$

1.4 计算模型、边界条件以及计算网格

由于本文研究对象的是高速列车(马赫数接近或大于1),所以选用的是旋成体的列车外形,其采用的真空管道为圆柱形,为了减少计算量,节约计算时间,本文采用二维的轴对称模型对流场进行数值模拟。图1为本文计算用的模型示意图,列车总长为19 m,车头采用单拱流线外形,长度3 m。入口距车头约为5000 m,出口距车尾为500 m。作为真空管道运输的一个重要参数,阻塞比指的是列车横截面积与管道内截面积的比值,本文的阻塞比表示为 $z = c^2/h^2$, c 为列车主体半径,文中取1 m, h 为管道半径。

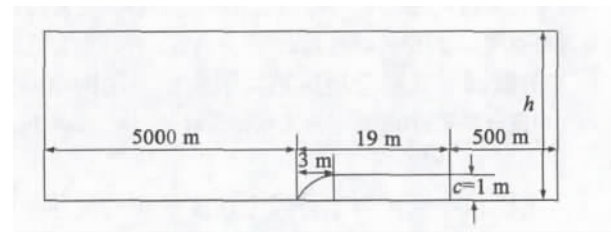


图1 计算模型示意图

Fig. 1 Computation model

本文涉及的边界条件为:管道入口,出口以及管道壁面都设为壁面边界,中间轴线为对称边界。计算时气流静止不动,通过动网格来实现列车的运动,以此来模拟一段封闭的管道中列车运行的状况。图2为计算使用的网格,为了尽可能精确的反映计算过程中的气流干扰,在管道壁面以及物面处都生成附面层,物面 y^+ 约为1.2。

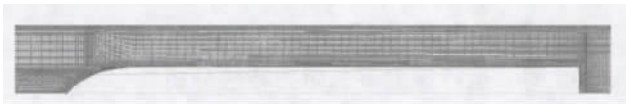


图 2 计算网格图

Fig. 2 Computation grid

2 动网格技术

一般的数值计算多采用物体静止,气流相对运动的方式,这在低速不可压时是可行的,但是对于真空管道中的列车高速运动,这种数值计算得到的结果往往不能很准确的反映真实的物理现象,因为气流在管道内运动时会产生沿程损失,这样流过列车的流场与实际的列车运行流场是不符合的,为此,本文采用动网格模拟列车在管道的真实运动^[10]。由于列车在管道中高速运动,导致相应的计算区域也随之不断的变化,动网格技术就是为了适应计算区域的变化发展出来的新型网格技术。它主要采用网格拉伸,压缩,增加,减少网格或者通过网格的局部重构来实现计算区域的改变。通常的动网格方法有三种:弹簧光滑法(spring-based smoothing),动态分层法(dynamic layering),局部网格重构(local remeshing)。

(1) 弹簧光滑法

在弹簧近似光滑模型中,网格的边被理想化为节点间相互连接的弹簧。移动前的网格间距相当于边界移动前由弹簧组成的系统处于平衡状态。在网格边界节点发生位移后,会产生与位移成比例的力,力量的大小根据胡克定律计算。边界节点位移形成的力虽然破坏了弹簧系统原有的平衡,但是在外力作用下,弹簧系统经过调整将达到新的平衡,也就是说由弹簧连接在一起的节点,将在新的位置上重新获得力的平衡。从网格划分的角度说,从边界节点的位移出发,采用胡克定律,经过迭代计算,最终可以得到使各节点上的合力等于零的、新的网格节点位置,图 3 为弹簧近似光滑法变形前后的网格示意图。

使用弹簧近似光滑法网格拓扑始终不变,无需插值,保证了计算精度。但弹簧近似光滑法不适用于大变形情况,当计算区域变形较大时,变形后的网格会产生较大的倾斜变形,从而使网格质量变差,严重影响计算精度。

(2) 动态分层法

对于棱柱型网格区域(六面体和或者楔形),可以应用动态层模型。动态层模型的中心思想是根据

紧邻运动边界网格层高度的变化,添加或者减少动态层,即在边界发生运动时,如果紧邻边界的网格层高度增大到一定程度,就将其划分为两个网格层;如果网格层高度降低到一定程度,就将紧邻边界的两个网格层合并为一个层;如果网格层 j 扩大,单元高度的变化有一临界值

$$h_{\min} > (1 + \alpha_s) \cdot h_0$$

式中 h_{\min} 为单元的最小高度, h_0 为理想单元高度, α_s 为层的分割因子。在满足上述条件的情况下,就可以对网格单元进行分割,分割网格层可以用常值高度法或常值比例法。在使用常值高度法时,单元分割的结果是产生相同高度的网格。在采用常值比例法时,网格单元分割的结果是产生是比例为 α_s 的网格。

若对第 j 层进行压缩,压缩极限为

$$h_{\min} < \alpha_c \cdot h_0$$

式中 α_c 为合并因子。在紧邻动边界的网格层高度满足这个条件时,则将这一层网格与外面一层网格相合并。图 4 为动态分层法的示意图。

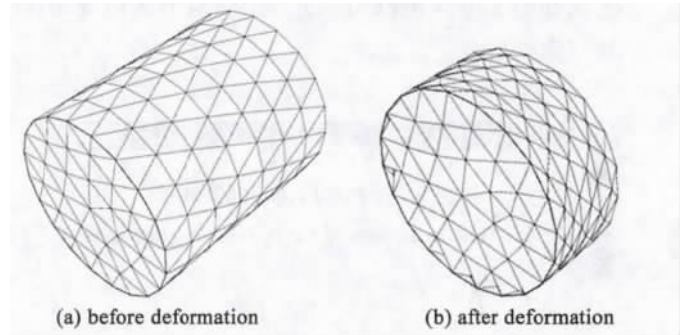


图 3 变形前后的网格

Fig. 3 The grid before and after deformation

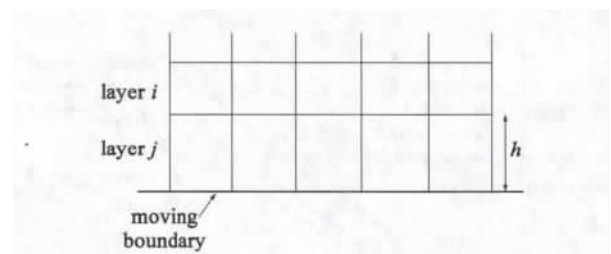


图 4 动态分层法

Fig. 4 The dynamic layering method

动态分层法在生成网格方面具有快速的优势,同时它的应用也受到了一些限制。它要求运动边界附近的网格为四边形、六面体或楔形,这对于复杂外形的流场区域是不适合的。

(3)局部重构

在使用非结构网格的区域上一般采用弹簧光滑模型进行网格划分,但是如果运动边界的位移远远大于网格尺寸,则采用弹簧光滑模型可能导致网格质量下降,甚至出现体积为负值的网格,或因网格畸变过大导致计算不收敛。为了解决这个问题,采用网格的局部重构将在计算过程中将畸变率过大,或尺寸变化过于剧烈的网格集中在一起进行局部网格的重新划分,如果重新划分后的网格可以满足畸变率要求和尺寸要求,则用新的网格代替原来的网格,如果新的网格仍然无法满足要求,则放弃重新划分的结果。

使用局部网格重划法要求网格为三角形(二维)或四面体(三维),这对于适应复杂外形是有好处的,局部网格重划法只会对运动边界附近区域的网格起作用。

本文的计算使用四边形结构网格,且采用UDF来控制网格的运动,由于列车在管道中只进行平动,因此本文的动网格方法采用的是动态分层法。运动区域如图5中深色部分所示,深浅两个区域交界的地方为动边界。



图5 动态分层法运动区域

Fig. 5 The moving zone of the dynamic layering method

3 计算算例及分析

3.1 同一运行速度下的阻力特性分析

给定列车运行速度为300 m/s,分别计算管内压强为10000,5000,1000,500,100 Pa情况下,管道半径为2,2.5,3,3.5,4 m的条件下,列车气动阻力的大小,对应的阻塞比分别为 $z=0.25, 0.16, 0.11, 0.082, 0.0625$ 。图6为300 m/s速度下,不同阻塞比时管内压强条件与列车阻力关系曲线。可以看出,在列车运行速度为300 m/s时,同一阻塞比下,随着管内压强的增加,列车的气动阻力基本上与压强的变化成线性关系,管道中的气压越高,相应的气动阻力越大,这与实际是符合的。气压的增高不但会增加列车运行的压差阻力,而且由于分子密度的增大,导致摩擦阻力也随之变大,从而引起了总阻力的增大。图7显示了随着阻塞比的减小,也即管道半径的增加,列车运行阻力的变化趋势。可以看出,在同一管道压强下,随着阻塞比的减小,列车运行阻力呈下降的趋势,主要是因为管道半径的增加使得管道内列车运行时车体前后的气压压差减小,并且使得气流在列车与管壁之间的干扰变小,列车壁面的附面层与管道壁面的附面层之间的参混干扰也随之减小,从而导致总的空气阻力的下降。但是,在真空管道半径变化到一定程度时,列车空气阻力变化甚微,比如在真空度为 $p=5000$ Pa时,阻塞比为0.082的列车空气阻力为5791.38 N,而阻塞比为0.0625时为5755.32 N。另外图7还说明了运行速度一定时,随着阻塞比的增加,列车的空气阻力在低真空度时呈现很好的线性关系,但是真空度越高,这种线性关系保持得越不好。

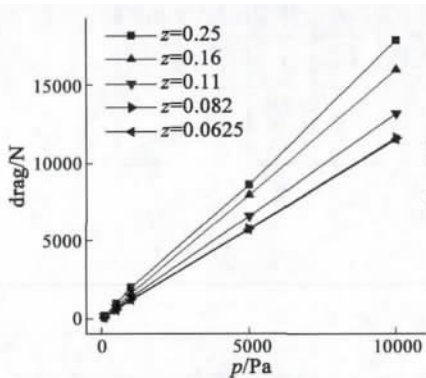


图6 不同阻塞比时管道真空度对列车阻力影响

Fig. 6 The dependence of train drag on blockages

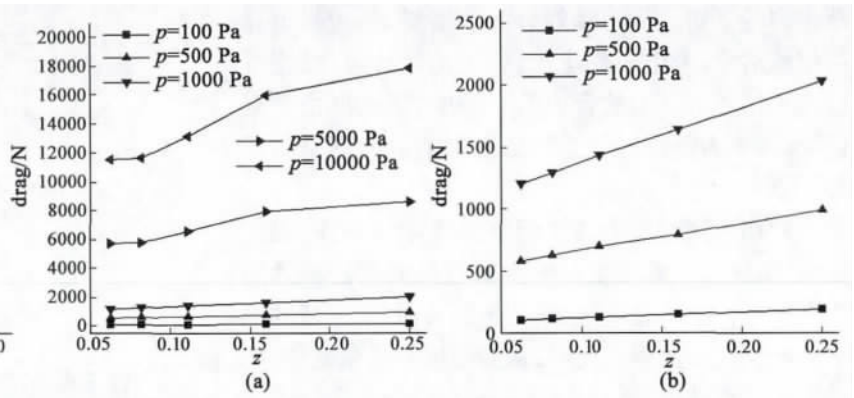


图7 不同真空度时阻塞比对阻力的影响

Fig. 7 The impact of the the blockage ratio on the train drag at different pressures

3.2 同一真空度下的阻力特性分析

给定真空管的压强为 1000 Pa, 分别分析在列车运行速度为 300, 500, 800, 1000 和 1500 m/s 情况下, 管道半径为 2, 2.5, 3, 3.5, 4 m 的条件下, 列车气动阻力的大小, 对应的阻塞比 z 分别为 0.25, 0.16, 0.11, 0.082, 0.0625。

图 8 显示的是不同阻塞比的速度平方-阻力关系图。可以看出, 同一真空度下, 随着阻塞比的减小, 管道半径增加, 同一速度的阻力呈现减小的趋势, 并且这种减小的趋势越来越缓和。在阻塞比较大时, 真空管半径的变化会引起阻力的剧烈波动, 但是当半径增加到一定程度时, 这种效应趋于减弱。理论上, 在同一真空度下, 阻塞比越小阻力越小, 但是这也意味着真空管道设施的造价费用越高, 本文的计算说明, 选择合理的管道半径可以达到减小阻力同时也减小了建设费用的目的。图 8 还说明, 同一真空度, 同一阻塞比时, 阻力随着速度的平方的变化并不严格呈现理论上的线性变化关系, 这种现象除了数值误差的因素外, 可能的原因是在 1000 Pa 的真空度时, 空气比较稀薄, 列车的运行速度又很大, 使得空气相对可压缩性变大, 导致管道内的气流干扰变得十分复杂, 既有列车物面附面层与洞壁附面层之间的相互诱导掺混, 又存在激波等在物面洞壁之间的反射干扰, 还有管道内一些诱导的二次流的混杂, 使得流场的性质与理想的流场截然不同, 因此, 阻力与速度的平方呈现近似的线性关系。虽然如此, 但是整个趋势还是与理论分析一致。这个原因也是引起图 7 所示的阻力与阻塞比的线性关系随真空度增大而减弱的主要诱因。

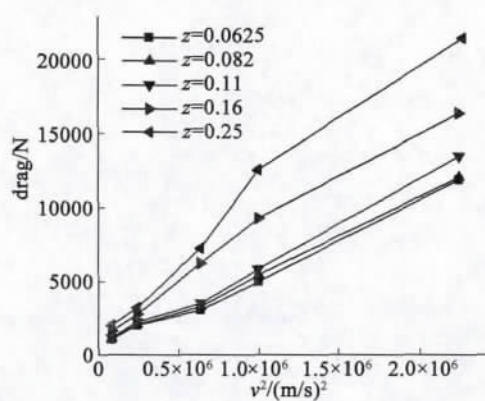


图 8 不同阻塞比下运行速度对阻力影响

Fig. 8 The influence of speed on the drag at different blockage ratios

4 结论

本文结合动网格技术, 在考虑可压缩性的前提下, 对二维高速、超高速真空管道列车的阻力特性进行了数值模拟, 得到的结论有:

(1) 在同一运行速度下, 管道的阻塞比一定时, 列车空气阻力随着真空管内气压的增加呈线性增加关系。同一真空度下, 运行速度一定时, 列车的空气阻力随着阻塞比的减小而减小。

(2) 在运行速度一定时, 真空度较低时, 列车空气阻力与阻塞比呈线性关系, 随着真空度的增大, 线性关系减弱。

(3) 在同一真空度, 阻塞比一定时, 列车的气动阻力随着运行速度的增加而增大, 但是在真空度比较高时, 因为流场的复杂性, 阻力与速度的平方呈现不严格的线性关系。

(4) 同一真空度下, 速度一定时, 列车的空气阻力在阻塞比较大时, 对管道半径的变化很敏感, 但是在阻塞比较小时, 这种趋势减弱。

真空管道列车相比明线运行列车具有阻力小, 运行速度快的特点, 代表了今后铁路运输的方向。减小管道运输的阻力, 进一步提高运输效率并不是一味的降低阻塞比, 减小管道内压强, 而是要找到管道半径、压强以及建设费用的平衡关系, 综合考虑各种因素, 才能既经济又高效的发挥真空管道运输的潜力。本文基于动网格的真空管道列车计算方法具有快速准确的特点, 能够研究考虑压缩性以及高真空度、高速甚至超高速等工况, 具有一定的工程实用价值。

参 考 文 献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 周晓, 张殿业, 张耀平. 真空管道中阻塞比对列车空气阻力影响的数值研究[J]. 真空科学与技术学报, 2008, 28(6): 535-538
- [6] 周晓. 真空管道运输高速列车空气动力数值仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2008

- [7] Michele Mossi ,Pierre Rossel. Swissmetro: A Revolution in the High-Speed Passenger Transport Systems [C]. Swiss Transport Research Conference ,Ascona 2001:1 - 16
- [8] Raghathan S ,Kim H D ,Setoguchi T. Aerodynamics of High-Speed Railway Train [J]. Progress in Aerospace Sciences 2002 ,38(6) :469 - 514
- [9] Cai Y G ,Chen S S. Dynamic Characteristics of Magnetically Levitated Vehicle Systems [J]. Applied Mechanics Reviews ,ASME ,1997 ,50(11) :647 - 670
- [10] 翟晓超 陈亚军 ,姜 毅. 动网格在仿真发射装置内弹道中的作用 [J]. 现代防御技术 2006 ,34(2) :24 - 28