

地铁区间隧道事故工况下列车局部阻力系数的确定

Determination of Local Drag Coefficients of subway trains in tunnel accident conditions

刘磊 王奕然 祝岚

北京城建设计研究总院有限责任公司

LiuLei WangYiran ZhuLan

BEIJING URBAN ENGINEERING DESIGN & RESEARCH INSTITUTE CO.,LTD.

摘 要：本文利用商业计算流体力学软件 STAR-CD，对地铁区间隧道的两种事故工况——即阻塞工况和火灾工况下的列车周围的气流分布进行模拟计算。根据局部阻力产生的原因和定义，核算出两种工况下的列车局部阻力系数。

关键词：局部阻力系数 ζ 、阻塞、火灾、CFD、STAR-CD

Abstract: In this paper, by the commercial CFD software STAR-CD, we simulate the air current distribution around subway trains in the tunnel conditions of jam and fire accidents, and calculate the trains local drag coefficients in both conditions according to analysis on the definition of local drag and the reason of its generation.

Key words: local drag coefficient ζ , jam, fire, CFD, STAR-CD

1 前言

随着城市现代化进程的加速，城市人口密度越来越大，城市公共交通承受的压力也随之加大，轨道交通成为了解决大城市公共交通的重要手段。作为重要的地铁设备系统，通风空调系统除了要满足地铁内部正常的温湿度等舒适性要求外，各种事故工况下的应急通风也是重要的设计内容。

地铁区间隧道的事故通风工况包括以下两种：列车阻塞工况和火灾运行工况。当列车阻塞在区间隧道时，需要向阻塞区间提供一定的通风量，保证列车空调等设备正常工作，维持车厢内乘客在短时间内能接受的环境条件；当列车在区间隧道发生火灾事故且失去动力停在隧道内时，需提供迅速有效的排烟手段，为乘客和消防人员提供足够的新鲜空气，并形成一定

的迎面风速,引导乘客安全迅速地撤离火灾现场。其中阻塞工况指列车因车辆故障或延误等导致列车阻塞于车站或区间,此时列车空调冷凝器发热量会不断散发到隧道中去,由于列车停止运行,隧道内没有活塞风,从而使列车周围空气温度迅速升高,当列车周围空气温度高于40℃,列车空调冷凝器将停止工作,导致空调系统自动停机,列车内温、湿度环境会使乘客难以忍受。因此在阻塞工况期间,通风的主要目的是通过机械通风,对隧道进行冷却,维持列车空调装置连续运转以保证乘客的舒适。

目前,对于地铁区间隧道通风模式的设计一般采用网络法与场模拟相结合的手段来辅助。网络法模拟对各个支路的阻力数据很依赖,对于比较特殊的工况下阻力系数一般都是通过场模拟得到。随着计算机技术的日益发展,计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术也得到了长足进步,已成为地铁通风空调设计的重要工具。特别是事故工况下,一般通过实验比较难测定或者无法开展实验,这时 CFD 模拟计算有着非常大的优势,既能花费较少的代价获得所需数据,又能较全面的反应真实情况,发现问题的本质。在地铁发生阻塞时,列车散热对周围环境影响不大,一般不超过 50℃~60℃,而在列车火灾时列车散热高达 5~10MW,故在火灾时必须考虑热浮生力的影响。本文借助计算流体(CFD)商用软件 STAR-CD 确定了某一盾构隧道区间内阻塞和火灾时列车的局部阻力系数。

2 计算原理

2.1 局部阻力系数的定义

在边壁沿程急剧变化,流速分布急剧调整的局部区段上,集中产生的流动阻力称为局部阻力,随之产生的压力损失称为局部损失,记为 P_m 。

$$P_m = \zeta \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

式中 ζ 为局部阻力系数(Local Drag Coefficient), v 为与 ζ 对应的断面平均流速。

2.2 CFD 技术简介

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称CFD)是基于计算机技术的一种数值计算工具,用于求解流体流动和传热问题。1974年丹麦学者PV Nilsen 首次将CFD技术用于计算室内空气流动,数值模拟技术开始应用于暖通空调(HVAC)工程领域。相比传统的模型实验和经验公式预测流体的流动和传热而言,CFD技术具有成本低、速度快、资料完备等优点,故逐渐受到人们的青睐,尤其是随着计算机技术和数值模拟技术的发展,CFD已被广泛

用于解决工程中的实际问题。

2.3 求解方法

由式(1)可知,在指定流速下求解出局阻产生前后区域中的全压差,就可以计算出对应流速的局部阻力系数 ζ 。根据局阻产生的原因,应选取局阻部件前后流动平稳,没有漩涡的区域来计算全压差。

3 计算模型

3.1 数学模型

本文采用被广泛使用的标准 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型进行求解。速度-压力耦合采用 SIMPLE 算法, STAR-CD 软件自身采用有限体积法 (Finite Volume Method, FVM) 推导离散方程。在计算火灾工况时, 计算能量方程, 考虑空气浮升力的影响。

描述空气运动过程的控制方程包括连续方程、动量方程、能量方程、湍能方程、湍能耗散率方程。上述方程均满足如下形式的通用方程^[1]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \langle u_i \rangle \varphi - \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) = S_\varphi \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

其中 φ 、 Γ_φ 和 S_φ 分别表示通用变量、广义扩散系数和广义源项。所有控制方程的 φ 、 Γ_φ 和 S_φ 见表1。

表1 场模型的控制方程

	φ	Γ_φ	S_φ
连续性方程	1	0	0
x 方向动量方程	u	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x} \right) + g_x (\rho - \rho_{ref})$
y 方向动量方程	v	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial y} \right) + g_y (\rho - \rho_{ref})$
z 方向动量方程	w	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) + g_z (\rho - \rho_{ref})$
能量方程	h	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h}$	0
湍能方程	k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_k + G_b - \rho\varepsilon$

$$\text{湍能耗散率方程} \quad \varepsilon = \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \quad \frac{\varepsilon}{k} \left[(G_k + G_b) C_1 - C_2 \rho \varepsilon \right]$$

$$\mu_{eff} = \mu_l + \mu_t \quad \mu_t = C_D \rho k^2 / \varepsilon$$

$$G_k = 0.5 \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad G_b = \mu_t \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y}$$

3.2 物理模型

由于STAR-CD采用贴体网格，具有良好的适应性，因此可以建立非常精致的几何模型可与实际结构基本一致。结合某工程实例，列车采用B1型车限界图，6节编组，共长120m。选取一盾构隧道区间，直径为5.1m，隧道长600m，坡度为3%，阻塞比0.5。计算火灾时，选取最不利情况，在列车高程低的一端着火，上游送风风速2m/s。根据工程经验，火灾强度取7.5MW平均分布在一节车厢上。模型如下：

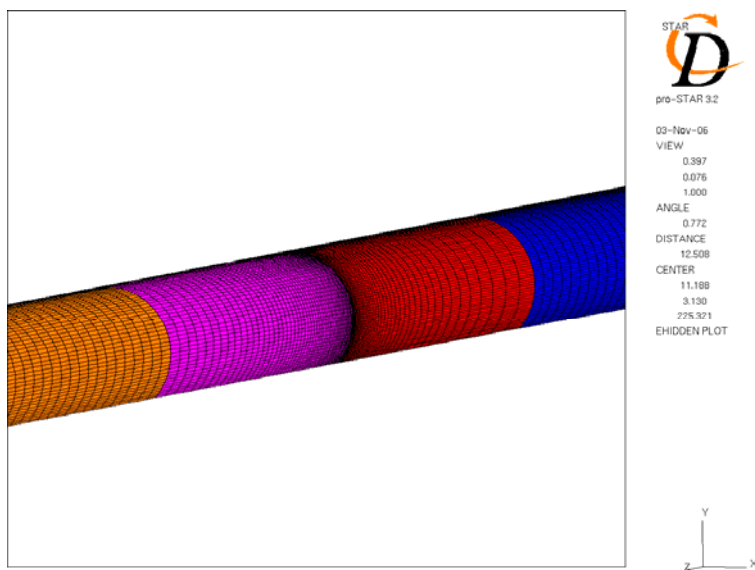


图1 计算模型示意图

模型中的网格采用多面体非结构化网格，列车周围由于结构变化会产生强烈的漩涡，因此加密附近的网格密度，网格总数约140万。网格密度经过无关性检验，可以满足精度要求。隧道里的管线影响，可以在模拟时以提高壁面绝对粗糙度值的方法来处理，而且一般管线穿越区间隧道，对列车事故工况时的局部阻力影响很小，可以做简化处理。

其他边界条件设置如下：

- (1) 简化壁面条件为绝热壁面。阻塞工况时，不计算能量方程；火灾工况时，由于火灾

强度很大，壁面的换热可以忽略不计。

(2) 区间隧道上游断面设置为进口型边界，即给定速度值。速度为2m/s，为阻塞工况与火灾工况规范要求的风速下限临界值。

(3) 区间隧道下游断面设置为出口型边界，即给定压力值，近似为大气压。

(4) 隧道壁面绝对粗糙度取 $K=0.2\text{米}^{[2]}$ 。列车外轮廓按照实际情况建模，因此列车表面简化为理想壁面，按软件默认值给定。

4 模拟结果

模拟结果截图以火灾工况为例，阻塞工况的计算与之类似。

车头处通过列车中心断面的压力等高图（静压）如下：

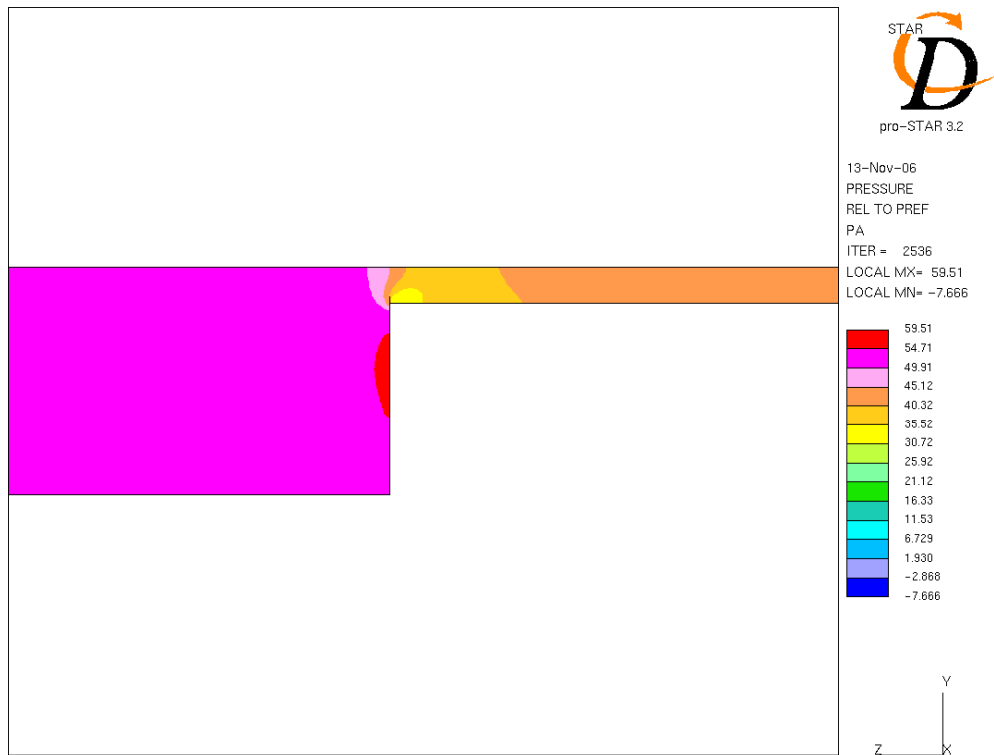


图2 列车车头纵剖面压力等高云图

车头处通过列车中心断面的速度矢量图如下：

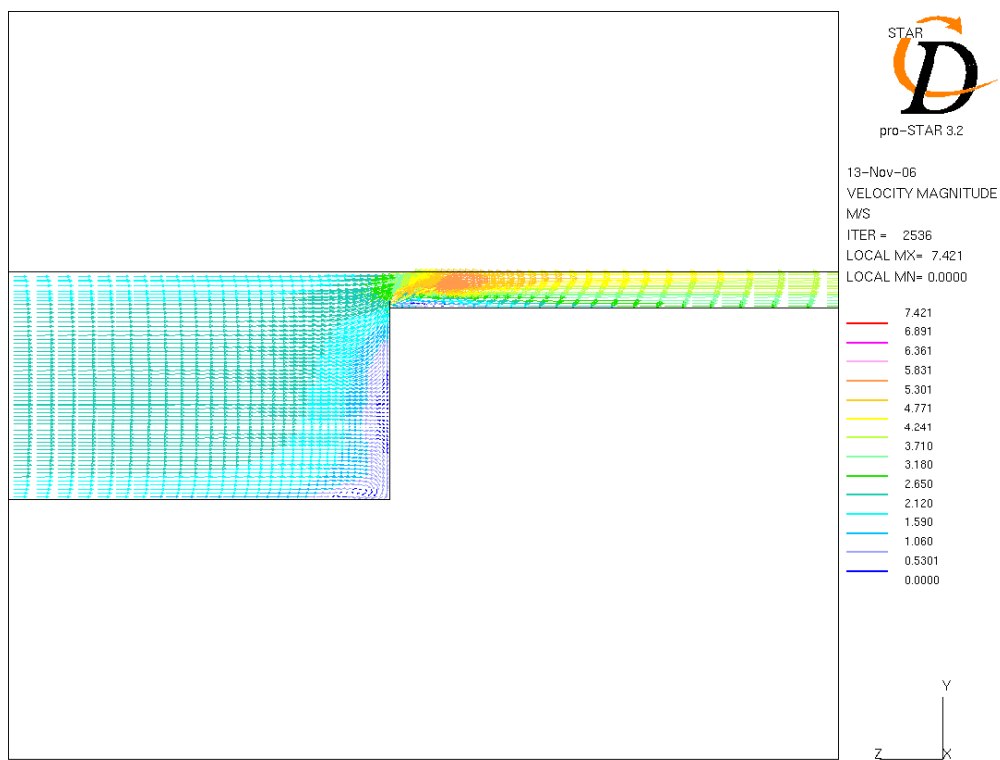


图3 列车车头纵剖面速度矢量图

车尾处通过列车中心断面的压力等高图（静压）如下：

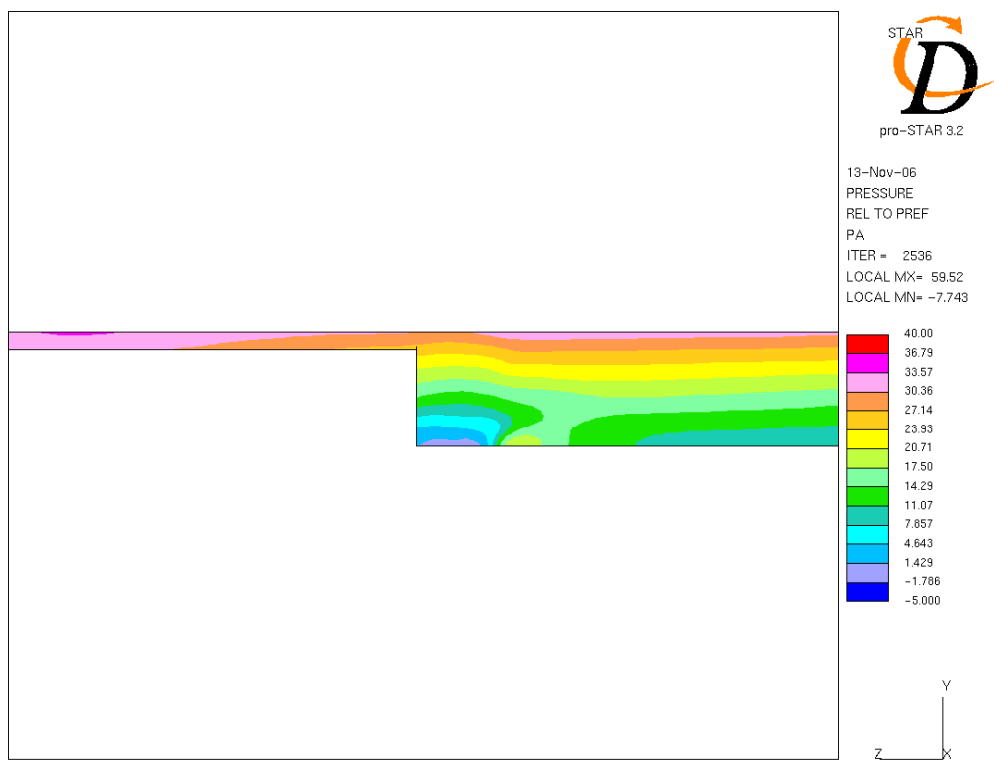


图4 列车车尾纵剖面压力等高云图

车尾处通过列车中心断面的速度矢量图如下：

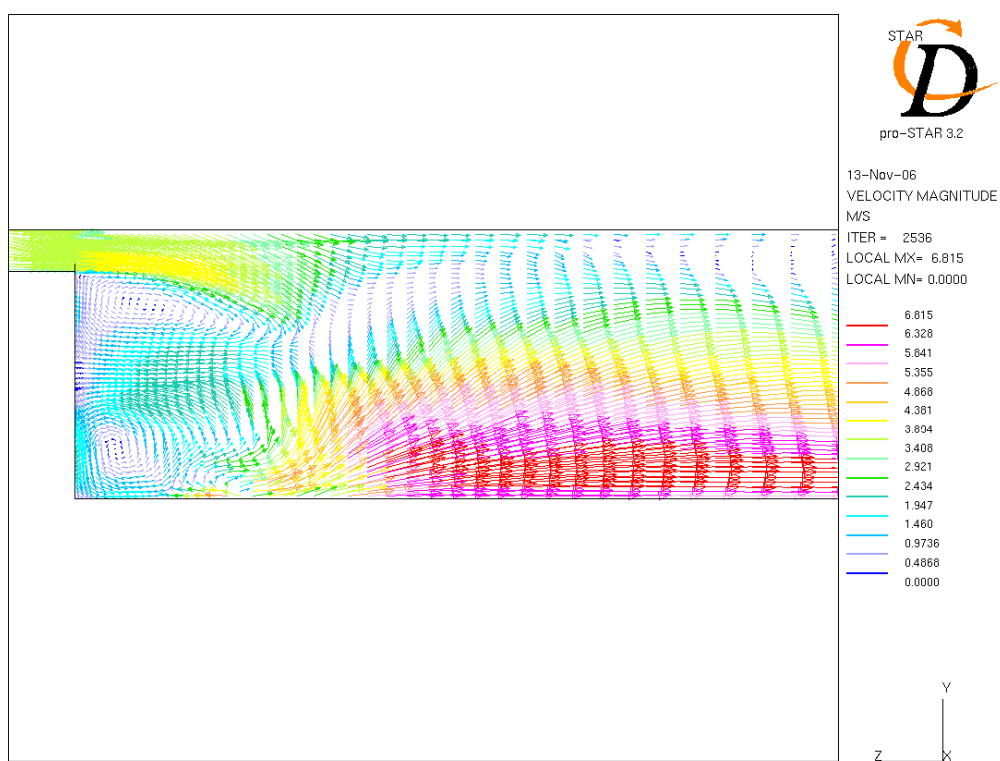


图5 列车车尾纵剖面速度矢量图

列车阻塞横断面的压力等高图（静压）如下：

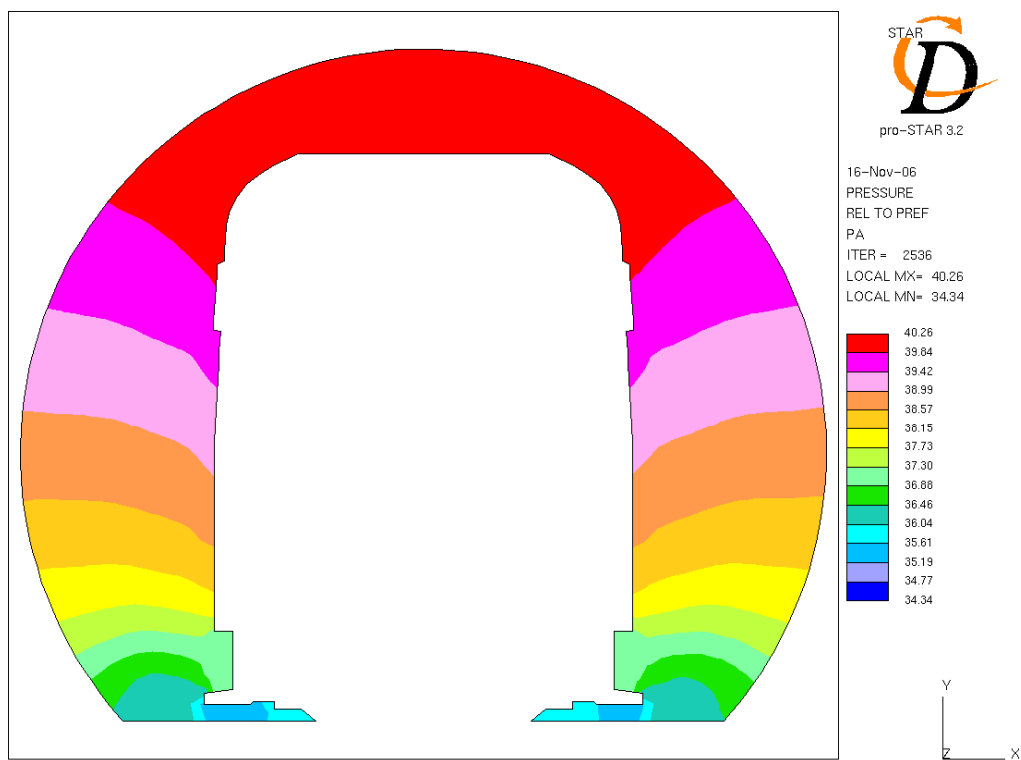


图6 列车阻塞横剖面压力等高云图

列车头部俯视平面的速度矢量图如下：

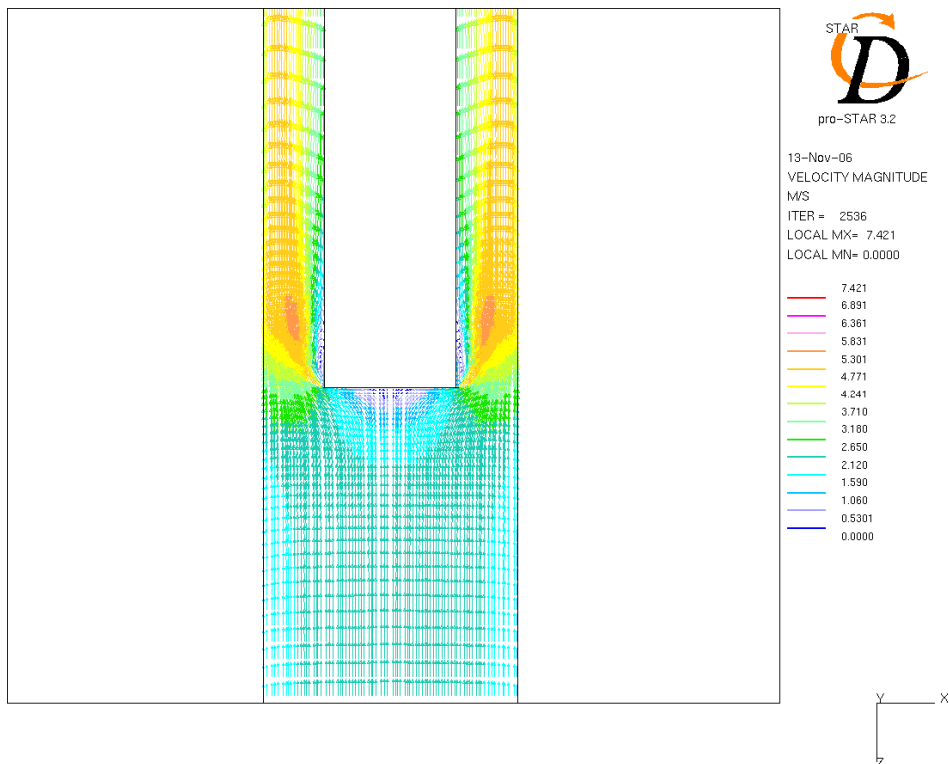


图7 列车车头俯视平面速度矢量图

列车尾部俯视平面的速度矢量图如下：

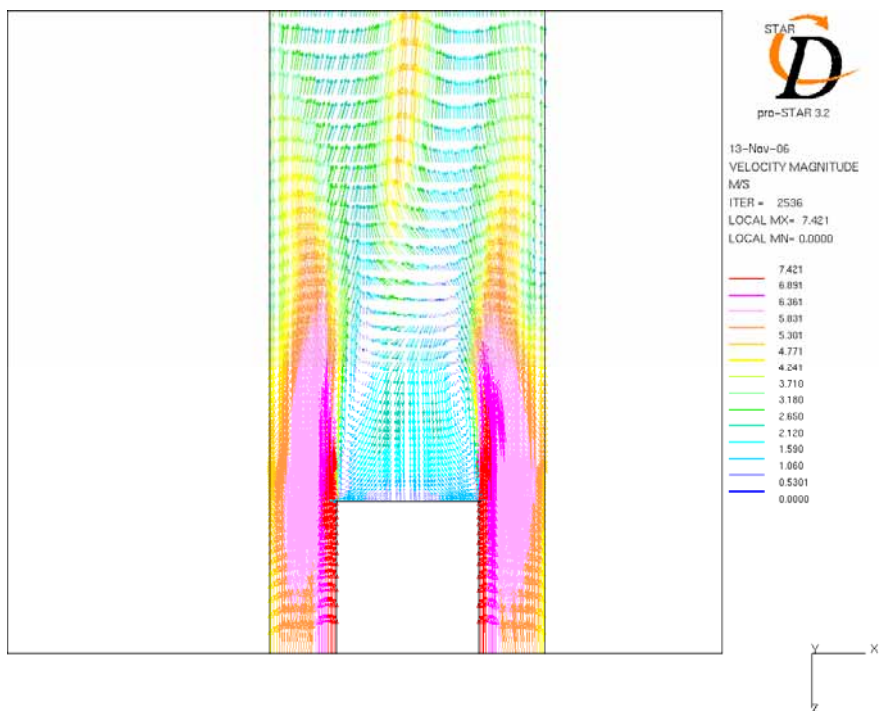


图8 列车车尾俯视平面速度矢量图

从计算结果可以看出,两种事故工况下气流经过列车头、尾部时产生了明显漩涡,从而产生局部损失。在火灾工况下,车尾着火处由于空气的浮升力作用,气流非常紊乱,能量耗散明显高于阻塞工况。详见下表:

表2.两种事故工况下的局部阻力对比

	断面面积(m ²)	断面速度(m/s)	局部阻力损失(Pa)	阻力系数
阻塞工况	20.4	2.0	16.2	6.8
火灾工况	20.4	2.0	33.3	14.1

注:断面面积指标准断面的面积,阻力系数也与此对应。

由于坡度产生了垂直方向的高程差,受热压影响,此时沿程阻力损失比正常情况下的沿程阻力损失大,详见下表:

表3.火灾工况下沿程阻力增加情况

	断面面积(m ²)	断面速度(m/s)	沿程阻力损失差 (Pa/100m)	阻力系数 (1/100m)
上游区间	20.4	2.0	3.1	1.3
下游区间	20.4	2.0	15.0	6.3

注:断面面积指标准断面的面积,阻力系数也与此对应。

可以把这部分沿程阻力损失差当作正常情况下的局部阻力损失,根据局部阻力系数的定义核算出对应的阻力系数。这样在网络法模拟计算时,可以在火灾工况时,方便地输入阻力系数反映实际情况。

应当指出的是,事故工况下列车阻力系数与区间隧道面积、列车类型、阻塞比以及列车停靠的相对位置有关,不同情况下的差异较大,另外火灾工况下的阻力系数还与火灾强度、区间隧道坡度、着火位置等有关。计算具体工程时应该结合实际情况核算出所需阻力系数。

5 小结

利用CFD软件,可以解决许多与流体有关的问题,并得到非常好的结果。但在工程设计中,问题往往复杂而又重复,完全依靠CFD模拟代价较大。目前大多数地铁项目中,都采用网络法软件(如SES、STESS等)与CFD软件(star-CD等)相结合的方法指导设计工作。网络法计算地铁事故工况下通风时,经常遇到的难题就是列车局部阻力系数的确定,取值的结果直接影响区间通风设计,进而影响土建投资和应急运行策略。

本文通过CFD计算,结合某地铁工程实例,介绍了其边界条件设置和物理模型简化的原则,分别得到了阻塞和火灾工况下列车周围的压力、气流分布,并给出了特定条件下的阻力系数 ζ 值,通过对比火灾和正常工况下沿程阻力损失差,又核算出火灾带来的沿程阻力附加值对

应的 ζ 值。

在网络法计算时，应当注意输入支路的断面条件应与CFD模拟时的断面相对应，以上得到的 ζ 值都是对应标准断面下风速得到的，若在网络法中需要输入阻塞断面的 ζ 值，则需要重新核算。

6 参考文献

- [1] Xianting Li, Qisen Yan, Field model of fires in subway tunnels, 2nd International symposium on HVAC, Beijing 1995, p392-399
- [2] STESS 3.0 计算程序原理介绍，清华大学建筑学院建筑技术科学系