

高速列车对站台雨棚的气动效应分析

刘凯麒 闫健 李昂 程少博 任磊

河北工程大学 土木工程学院, 河北邯郸, 056000;

摘要: 高速列车行驶时所产生的列车风是铁路临近结构设计不可忽略的问题, 雨棚作为临近铁路的典型结构, 其跨度大, 结构刚度较小, 所受列车风影响明显。利用 Fluent 软件计算流体动力学分析, 通过应用滑移网格技术, 采用三维、粘性、非定常可压缩的两方程湍流模型进行风场模拟。分析列车在变车速、变轨道、从不同方向驶入雨棚结构时, 雨棚上下表面的风压分布规律。结果表明: 正压极值出现在雨棚入口附近, 负压极值出现在雨棚出口附近, 随着车速的提高, 雨棚上下表面的风压极值也逐渐增大。垂直轨道方向在正线上方风压极值最大, 并向两侧逐渐递减。列车从不同轨道通过雨棚时, 雨棚表面正负压极值分布规律基本一致。

关键词: 高速列车; 列车风压; 数值模拟

DOI: 10.69979/3029-2727.24.12.052

雨棚当高速列车在轨道上快速运行时, 空气的粘性效应导致周围空气随列车一起移动, 与列车表面紧密接触的空气与周围空气之间产生速度差异, 从而产生列车风^[1-2]。这种列车风引起的气流波动对大型、柔性较高的雨棚结构影响显著, 若发生故障可能会威胁到乘客和列车的安全。因此, 对高速铁路雨棚在列车风作用下的响应进行研究具有重要意义。

当前, 针对高速列车对铁路邻近结构影响的主要研究有: 张小刚等^[3]采用 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型和 Johnson-Launder 壁面修正方法对高速列车经过路边建筑物时的非定常湍流绕流进行数值模拟, 得到了列车与铁路邻近结构相会过程中各自表面的压力分布。艾兵海^[4]通过改变列车与桥梁参数, 研究分析了高速列车经过跨线桥梁时, 迎风面、背面与底面的风压分布规律, 并利用非线性拟合的方法, 分析压力幅值与不同变量的相关性。李凌宇^[5]研究了列车通过地下车站时列车车速度与列车车长对屏蔽门上气动效应的影响。米宏广^[6]以京沪段高铁济南西车站无站台柱的张弦梁雨棚为研究模型, 分析了列车在高速通过雨棚时所引起的列车风压得分布规律以及风压对雨棚结构的各种影响。刘伯奇^[7]等采用现场测试和仿真分析的方法对雨棚在高速列车通过时所受气动荷载和振动响应进行分析。结果表明: 雨棚所受气动荷载头波、尾波的负压绝对值均大于正压。冯海龙^[8]仿真计算 CR400AF 型动车组以不同车速在雨棚中交会的气动荷载和轮轨力。结果表明: 随着车速提高气动荷载和轮轨力增大, 且气动荷载与车速的平方成正比。周志勇^[9]等采用动网格数值模拟和风洞测压试验两种方法,

研究列车经过雨棚所受风压的变化规律。杨娜^[10]等采用 Fluent 软件, 模拟分析雨棚表面风压分布规律、脉动特性以及雨棚自身结构对风压值得影响。何连华^[11]等使用 Fluent 有限元软件, 以武汉车站列车过站为例数值模拟了列车风致效应, 分析了列车风的空间分布规律以及列车不同位置的列车风形态, 基本确定了站台上旅客的安全退避距离。梅元贵、余南阳^[12-14]研究提出了高速行驶的列车在隧道之内交会时计算会车压力波大小所需的边界条件, 由可压缩非定常流动理论与广义黎曼变量特征线法, 可以确定高速列车在隧道内会车时完整的压力波模型, 并将其应用于计算不同几何尺寸情况下列车的混行会车和等速会车的压力波值。

1 计算模型及控制方程

1.1 雨棚及列车模型

本文选用复兴号 CR400BF 型高速列车作为列车模型, 车体断面积 13.608m², 车宽 3.36m, 高 4.05m, 全长 211.3m, 复兴号动车组列车如图 1 所示:



图 1 CR400BF 动车组模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CR400BF high-speed train model

根据北京清河站雨棚建立模型, 雨棚模型长度 186m, 雨棚共四跨, 每跨雨棚之间相距 7.24m, 雨棚厚度 0.5m。雨棚距离车顶高度 7m。计算域尺寸为 1356m × 160m × 60m(长 × 宽 × 高)。将计算域进行分块处理, 在列车

和雨棚附近区域使用非结构化网格，外部流域则采用结构化网格，对于高速列车经过的区域采用滑移网格，并对滑移区结合四面体非结构化网格与六面体结构化混合网格，整个模型的总数约1100万个。计算模型如下图2所示。

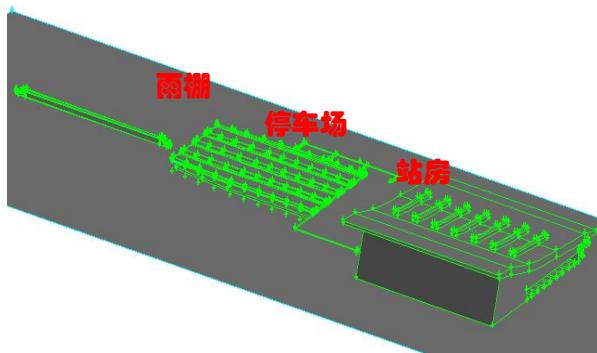


图2 计算模型

Fig. 2 computation model

1.2 计算方法及边界条件

在计算模型中，将流场入口和出口边界条件定义为压力远场，其中工作环境压强被设定为0Pa，相对总压被设定为101325Pa^[15]；最外侧的计算域边界设置为对称边界；地面、雨棚表面为无滑移壁面。在车体表面与计算域之间建立滑移交界面。

数值模拟时，将高速列车与站台雨棚形成的流场假定为三维、黏性、可压缩的湍流流场，并采用Navier-Stoke方程对其进行求解，流场控制方程如下：

(1) 连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho V) = 0$$

(2) 动量方程

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho V v_x - \operatorname{ugrad} v_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div} \mu \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho V v_y - \operatorname{ugrad} v_y) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div} \mu \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho V v_z - \operatorname{ugrad} v_z) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div} \mu \frac{\partial v}{\partial z} \end{cases}$$

(3) 能量方程

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \operatorname{div} \left[\rho V T - \left(\frac{\mu}{P_r} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \operatorname{grad} T \right] = \frac{\partial p}{\partial T}$$

2 雨棚表面列车风压特点与工况设置

2.1 工况设置

研究工况：(1)单辆列车以250km/h、300km/h、350km/h、400km/h和450km/h通过3号轨道时，产生的列车风对站台雨棚的影响。(2)单辆列车以350km/h通过2号轨道、3号轨道、5号轨道时，产生的列车风对站台雨棚的影响。(3)单辆列车以350km/h从有站房侧驶入2号轨道、3号轨道、5号轨道，产生的列车风对站台雨棚的影响。着重研究分析近轨上雨棚的受压情况。

3 变车速列车风对站台雨棚的气动效应影响

高速列车分别以250km/h、300km/h、350km/h、400km/h和450km/h沿3号轨道通过雨棚，研究变车速列车风近轨上雨棚上下表面的风压分布规律。

3.1 变车速通过雨棚垂直轨道方向风压分布规律

设定列车正上方处的横向坐标为0，沿轨道方向在雨棚边缘的上下表面设置测点，测点间隔为12.4m，上下表面一共32个测点。垂直轨道方向上在距离雨棚入口30m处、雨棚中间位置和距离雨棚出口30m处在每跨雨棚的上下表面分别布置四个测点，测点布置如图4所示，并对模拟测点的风压时程数据提取风压极值，得到不同速度通过雨棚垂直轨道方向风压极值分布曲线（如图5所示）。

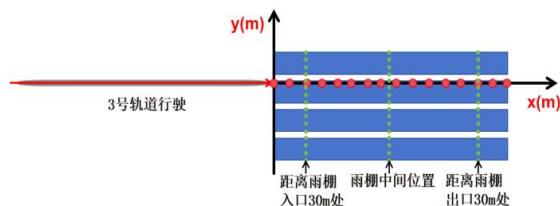
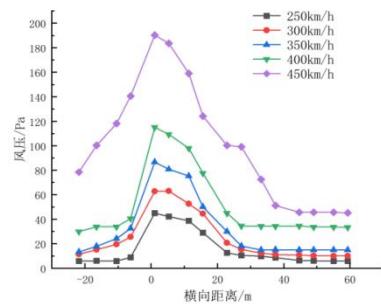


图4 列车在3号轨道通过雨棚测点布置

Fig. 4 The train passes through the rain shelter measuring point layout on track three



(a) 距离雨棚入口30m处正压极值

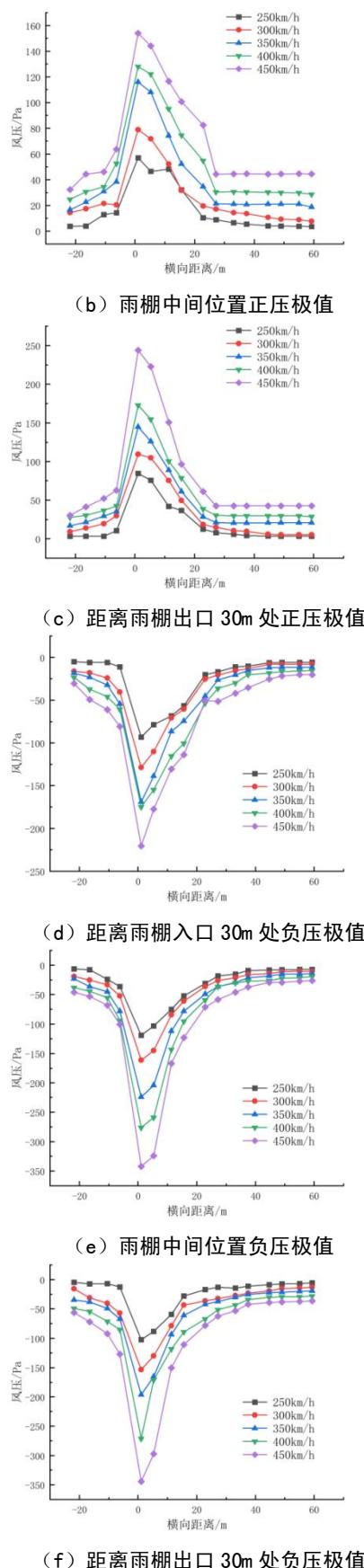


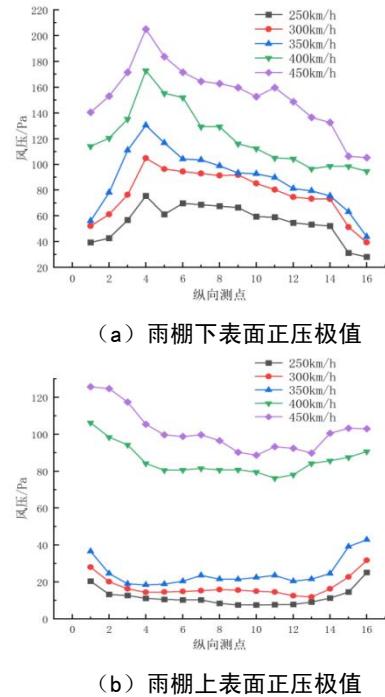
图 5 不同速度通过雨棚垂直轨道方向风压极值分布曲线

线

Fig. 5 Wind pressure extreme distribution curve in the vertical track direction of the canopy at different speeds

由图 5 可以看出, 列车以不同速度通过雨棚时, 沿轨道垂直方向的风压极值分布规律基本一致, 雨棚表面风压极值随着列车速度的增加而增加。当列车以 350km/h 的速度通过雨棚时, 在正线上方距离雨棚入口 30m 处、雨棚中间位置、距离出口 30m 处正压极值分别为 86.87、116、145Pa, 负压极值分别为 -169.05、-224、-196Pa。雨棚中间位置风压极值最高, 距离雨棚入口 30m 处的风压极值最小。这是因为雨棚中间位置持续受到列车风的影响, 导致其风压极值最大。正线上方风压极值最大高, 并随着向两侧延伸而逐渐降低。在远离正线轨道的雨棚边侧, 列车风压极值较小且趋于稳定。当列车以 250km/h、300km/h、350km/h、400km/h、450km/h 的速度通过距离雨棚入口 30m 处时, $X=-10m$ 处的正压极值相对于正线正上方降低了 86%、68%、72%、70%、37%, 负压极值相对于正线正上方降低了 93%、81%、80%、73%、72%。由此可知, 在垂直轨道方向上, 超出正线 10m 以外的区域受列车风致效应的影响相对较小。

3.2 变车速通过雨棚沿轨道方向风压分布规律



(b) 雨棚上表面正压极值

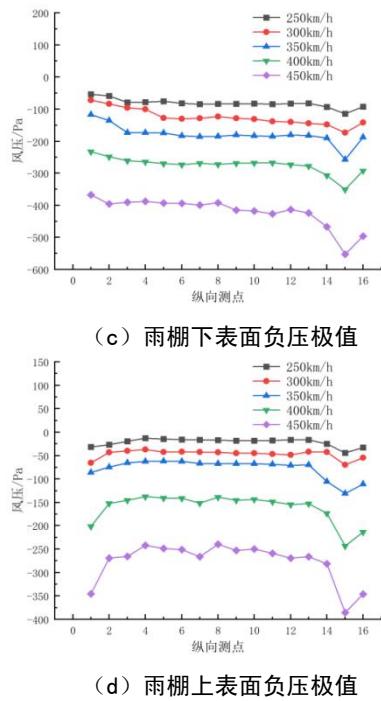


图 6 不同速度通过雨棚沿轨道方向风压极值分布曲线

Fig. 6 Wind pressure extreme distribution curve along the track direction through a canopy at different speeds

由图6可以看出高速列车在通过雨棚结构的过程中,下表面正压极大值出现在顺轨道方向上会在雨棚入口大约30m处,上表面正压极大值出现在雨棚入口和雨棚出口处,其原因主要是因为列车在高速驶入雨棚结构时挤压雨棚周围空气产生的。下表面负压极小值在距离雨棚出口10m处出现,而上表面负压极大值在雨棚出口30m处出现,这主要是因为列车尾部高速离开雨棚时,带动空气形成瞬时脉冲气流所致。雨棚中部由于持续受列车风的作用,风压极值大致维持稳定。且上表面正负压极值相对于下表面较小。

4 结论

(1) 高速列车通过雨棚结构时会对雨棚表面风压产生影响,雨棚表面压力时程曲线有两个明显的变化:车头经过时造成先正压后负压的变化,车尾经过时造成先负压后正压的变化。

(2) 高速列车通过雨棚结构时,雨棚下表面正压极大值出现在雨棚入口大约30m处,上表面正压极大值出现在雨棚入口和雨棚出口处。下表面负压极小值出现在距离雨棚出口10m处,上表面负压极大值出现在雨棚出口30m处。

(3) 列车以不同速度通过雨棚时,雨棚表面风压极值分布规律基本一致,雨棚表面风压极值随着列车速度的提高而增大。沿垂直轨道方向,在正线上方的风压达到最大值,并向两侧逐渐降低。在远离正线轨道的雨棚边侧,列车风压极值较小且趋于稳定。

参考文献

- [1] 郑修凯. 铁路邻近结构高速列车风致效应研究[D]. 北京交通大学, 2015.
- [2] 檀海波. 高速列车风对雨棚振动影响研究[D]. 石家庄铁道大学, 2019.
- [3] 张小刚, 刘应清, 赵海恒. 高速列车经过路边建筑物时的非定常湍流绕流数值模拟研究[J]. 铁道学报, 1998(2): 87-92.
- [4] 艾兵海. 高速列车通过跨线桥梁时的气动效应分析[D]. 河北工程大学, 2017.
- [5] 李凌宇. 地下高铁站台屏蔽门气动效应研究[D]. 河北工程大学, 2020. DOI: 10.27104/d.cnki. ghbjy. 2020. 000205.
- [6] 米宏广. 列车风引起的张弦梁雨棚振动分析[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(12): 77-82.
- [7] 刘伯奇, 冯海龙, 王博等. 列车风激励下高速铁路客站钢架结构雨棚的振动响应[J]. 铁道建筑, 2020, 62(6): 87-92.
- [8] 冯海龙, 王博, 李红梅, 王域辰, 史伟华, 张骞. 高速列车交会激励下雨棚振动响应[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(03): 121-130.
- [9] 周志勇, 郑修凯, 张建等. 高速列车过站空气动力学效应数值模拟研究[J]. 力学季刊, 2010, 31(4): 126-134.
- [10] 杨娜, 郑修凯, 张建, 等. 高速列车经过雨棚时的列车风致响应研究[J]. 铁道学报, 2017(4): 126-134.
- [11] 何连华, 符文彪, 陈凯等. 武汉火车站高速列车列车风数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2009(1): 23-24.
- [12] 梅元贵, 余南阳. 隧道内会车压力波的边界条件[J]. 兰州铁道学院学报, 1999(1): 61-65.
- [13] 梅元贵, 赵海恒, 刘应清. 隧道内高速列车会车压力波的数值模拟方法[J]. 兰州铁道学院学报, 1996(1): 1-6.
- [14] 梅元贵, 余南阳. 高速列车隧道会车压力波的数值模拟[J]. 兰州铁道学院学报, 1998(4): 49-53.
- [15] Yan Y. G. Yang Q. S, Zhang J. Aerodynamic Comfort Analysis of High-Speed Trains passing each other at the Same Speed through a Tunnel [J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 1446.