

文章编号：1671-6612（2025）06-905-06

西丽高铁站台气流组织模拟分析

郭 辉

(中铁第四勘察设计院集团有限公司 武汉 430064)

【摘要】 借助 Fluent 动网格技术进行了单列进站列车对站台气流组织扰动特性的数值模拟。以西丽高铁站台气流组织为研究对象，探究了单列列车匀速过站和减速进站引起的站台气流压力、风速以及进出口风量变化。结果显示，在列车匀速和减速工况中，站内最大压力变化小于 12Pa，对人员和设备影响很小；列车运行期间各工况最大风速为 1.3m/s，远小于站台允许乘客承受的最高风速 14m/s，对站台人员安全不构成威胁；列车匀速过站时，西侧压力进口累积风量为 186899m³（80s）；列车匀减速进站时，西侧压力进口累积风量为 279900m³（120s）。研究相关结果可为站台环境控制设计提供参考。

【关键词】 气流组织；高铁站台；动网格技术；累计风量

中图分类号 TU834.5 文献标志码 A

Simulation and Analysis of the Air Distribution of the Platform at Xili High-Speed Railway Station

Guo Hui

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd, Wuhan, 430064)

【Abstract】 A numerical simulation was conducted on the disturbance characteristics of the platform air distribution caused by a single incoming train by using Fluent dynamic mesh technology. Taking the air distribution of the platform at Xili high-speed railway Station as the research object, this study explored the resultant changes of air pressure, wind speed, and air volume at inlets and outlets on the platform caused by a single train passing through the station at a constant speed and decelerating into the station. The results show that in both the constant-speed and deceleration conditions of the train, the maximum pressure change in the station is less than 12 Pa with little impact on personnel and equipment. During the train operation, the highest wind speed under various working condition is 1.3 m/s, which is much lower than the allowed maximum wind speed of 14 m/s that passengers on the platform can withstand. The highest wind speed of 1.3 m/s poses no threat to the safety of the platform personnel. When the train passes through the station at a constant speed, the cumulative air volume at the west pressure inlet is 186,899 m³ (within 80 seconds). When the train enters the station at a uniform deceleration, the cumulative air volume at the west pressure inlet is 279,900 m³ (within 120 seconds). The relevant results may provide a reference for the design of the platform environmental control.

【Keywords】 Air distribution; High-speed railway station; Dynamic mesh technology; Cumulative air volume

0 引言

截至2023年底，我国的高铁营业里程已超过4.6万公里^[1]。高铁里程的不断增加，使得多层次的交通互通与连接需求愈加明显。综合交通枢纽作为整合海陆空为一体的枢纽体系正迅速发展，承担着

辐射和连接多种运输形式的功能，同时车站的建设也能促进周边地区发展^[2]。交通枢纽站空间布局集中，使得衔接方式更高效畅通，切实满足了日益增长的出行需求^[3]。

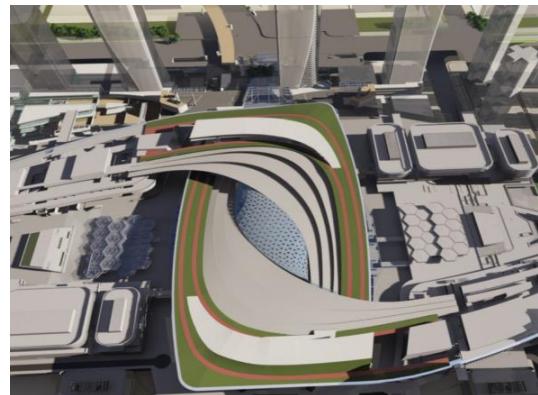
高速引起的噪声、稳定性、阻力、列车风和轨

旁压力变化等问题越来越受到关注^[4-6], 朱淮东^[7]对市域铁路列车以160km/h速度越行时入口段隧道和车站屏蔽门压力变化进行了模拟研究。田栋栋等^[8]模拟了高速列车以约200km/h速度在隧道的交会流场, 探究隧道内流速、压力分布变化规律。熊武标等^[9]对重庆深埋地铁车站公共区环境进行了实测研究。现有研究中, 关注列车运行对站台气流影响的较少。当列车进入站台区域时, 由于空间受限, 列车前后会出现压差, 从而形成列车风, 列车风的分布与高铁站台的空间结构有关。高铁站台根据上方雨棚类型可以分为封闭式和半封闭式两种结构^[10]。吴中和陶帅^[11]对高铁站台内两列车以300km/h速度不同进站和停靠情况下, 列车头部挤压空气造成的空气扰动对雨棚表面产生的风荷载的受力情况进行了研究, 结果表明当两列车同时驶入站台时, 雨棚的受力情况最大。王韦等^[12]建立了适用于非恒定流的空气阻力计算方法, 通过对两个备选方案计算结果的分析, 从降低空气阻力的角度出发, 认为京沪高速铁路以300km/h速度进洞时采用大断面隧道方案更合理。Gilbert等^[13]研究了封闭设施类型对气体流动和气动荷载的影响, 结果表明, 与露天相比, 所有受限情况下的阵风峰值都有所增加。王明年等^[14]采用动网格技术对城际列车着火后以200km/h速度驶向地下车站及城际列车停止着火进行了模拟, 探究了活塞风对地下车站排烟口排烟效率分布的影响。周志勇等^[15]以动网格技术, 研究了列车以200km/h速度过站时对站台雨棚的影响, 研究表明列车与雨棚之间存在空气活塞压缩效应。程建峰等^[16]通过对列车以不同速度高速经过车站及在车站内交会的模拟研究发现, 列车的前后部在穿过雨棚的瞬间, 会导致顶棚处的空气压力发生剧烈变化, 从而产生具有破坏性的瞬时压力波和交会压力波。

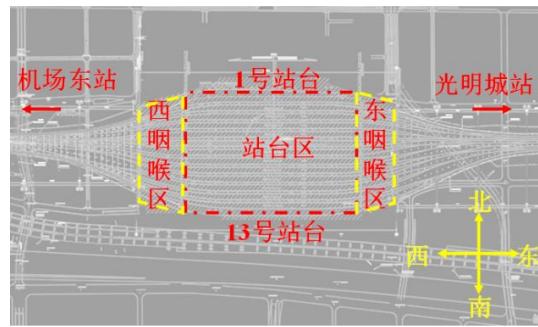
当前研究多基于简化的站台模型与高速列车工况。本研究关注对象为深圳西丽高铁站, 根据其设计文件, 列车过站与进站速度最大为45km/h。本文基于西丽交通枢纽站的高铁站相关物理信息、规划列车运行数据, 以西丽站高铁站台气流为研究对象, 采用动网格技术借助Fluent软件对列车不同速度进站、过站时的站台气流进行数值模拟, 分析不同工况下的压力和风速, 以及西侧进口累积风量, 为后续的站台环境控制设计提供参考。

1 西丽高铁站方案介绍

西丽交通枢纽站同时设有高铁站和地铁站, 高铁站承担着连接深圳与中国其他地区的重要功能。如图1所示, 其站台顶棚是封闭式结构, 但站房表面设有多个直通至站台层用于换气和泄压的开口。高铁站台作为旅客短暂停留的区域, 其热舒适更多地受动态环境的影响, 因此需要考虑列车进站时从外部引入的风量, 从而做好站台环境控制设计。西丽站整体呈“工”字型布局, 站房建筑面积12万m², 属特大型铁路旅客车站。站内共设有13个站台和25条轨道线。西部咽喉口靠近深圳机场东站, 在站台的西侧, 与西部咽喉口相连的是一段断面面积逐渐减小的隧道, 东部咽喉口靠近光明城站在站台的东侧, 东部咽喉口外是敞开的大气。



(a) 西丽站效果图



(b) 站台层

图1 西丽高铁站效果图与站台层

Fig.1 Architectural rendering and platform level schematic of Xili high-speed railway station

2 气流组织模拟模型

2.1 物理模型

简化模型中忽略了咽喉部轨道的交叉和弧线角度, 以及站台和轨道间的高差, 即站台面和轨道

都与地面平齐，站台高10.3m。西丽站中心站台及咽喉区如图2所示，共有10个与大气相连的开口。站台宽10m，单条轨道宽5m，因此中心站台区域宽294m，长450m。西侧咽喉区的咽喉口断面长186m，东部咽喉口断面长228m。各开口中，1#开口位于靠近1号站台北墙的东部咽喉区，面积为553.0m²；2#开口位于东部咽喉区的顶棚，面积为300.0m²；3#开口位于靠近13号站台南墙的东部咽喉区，面积为1811.4m²；4#开口位于靠近1号站台的顶棚，面积为1200.8m²；5#开口位于靠近13号站台的顶棚，面积为680.0m²；6#开口位于靠近1号站台的顶棚，

面积为852.5m²；7#开口位于靠近13号站台的顶棚，面积为1040.0m²；8#开口位于靠近1号站台北墙的西部咽喉区，面积为780.7m²；9#开口位于西部咽喉区的顶棚，面积为540.0m²；10#开口位于靠近13号站台南墙的西部咽喉区，面积为780.7m²。西部隧道自西部咽喉口向外延伸了580m，前290m的隧道断面从294m缩小至54m，后290m隧道断面面积基本不变化，隧道断面面积为556.2m²。东部咽喉区外连接的是敞开的轨道（敞开空气域）。为充分展示室外流场的作用，在东咽喉口外建立500m×500m×100m的外流场域，如图3所示。

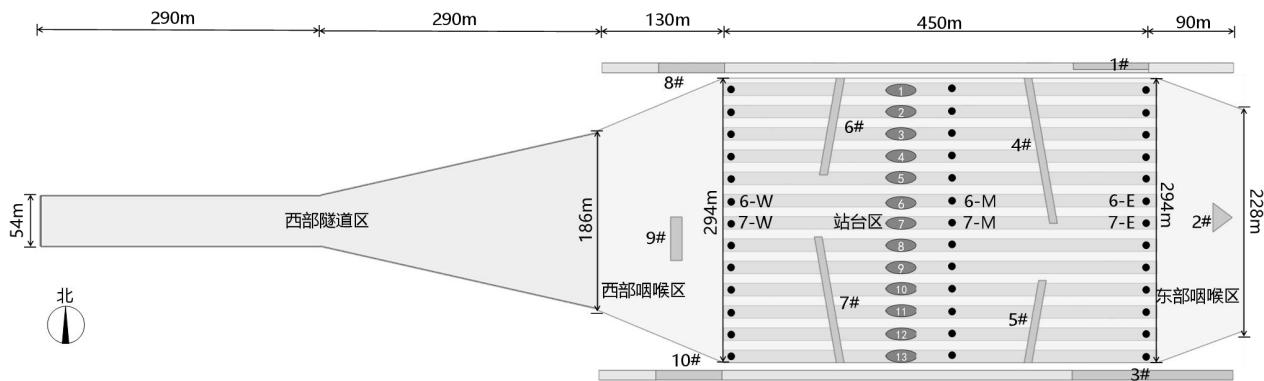


图2 西丽高铁站站台及西部隧道模型

Fig.2 Model of Xili high-speed station platform and the western tunnel portal

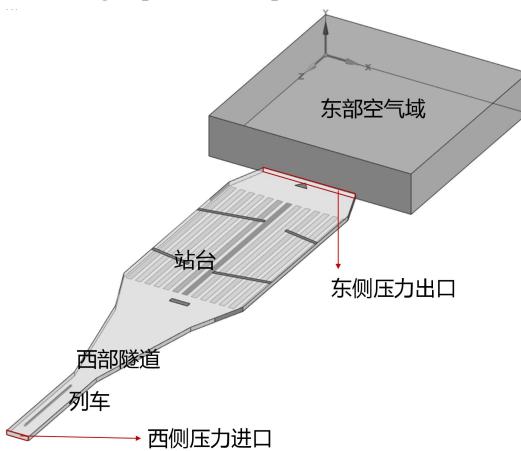


图3 西丽高铁站气流组织模型

Fig.3 Air distribution model of Xili high-speed railway station

列车模型参考复兴号CR400AF，忽略了列车受电弓导流罩、转向架以及列车内桌椅等。将列车进一步简化成长方体，列车长400m，宽3.36m，高3.9m。将列车头部形状设为钝形，进行最不利工况的模拟。初始时刻列车尾部距西部隧道口50m，列车在12号轨道直线行驶，如图3所示。12号轨道旁

两侧分别是6号站台和7号站台，各站台距地面2m处设置监测点三个，分别位于站台西侧、中间和东侧。监测点编号规则为P-X，其中P表示监测点所在站台编号，X表示监测点在站台的相对位置。

2.2 数学模型

判断气体压缩性时，通常以流速大小为依据且

以音速为界，当气流速度小于音速时，流体的密度变化可以忽略，此时可视流体为不可压缩流体。高速列车实际运行速度最高不超过350km/h（97.2m/s），高速列车在隧道中形成的活塞风速显然远远小于音速（340m/s），可将活塞风视为不可压缩流体，因此所研究的高铁站台气流组织属于三维非定常的不可压缩湍流流动。

借助CFD软件Fluent完成模拟计算，流动模型采用标准k- ϵ 湍流模型，求解方法采用速度和压力耦合方法，选择SIMPLE算法，压力、动量和湍流设置为二阶迎风格式，时间倒数采用一阶隐式方程方法进行离散。各变量的松弛因子取为0.8~1.0，其他压力的松弛因子取0.3~0.4。

2.3 边界条件与工况设置

西丽高铁站位于深圳，属夏热冬暖气候区，夏季平均风速是2.2m/s，夏季通风计算干球温度为31.2℃^[17]。按照此条件分别将东、西部空气域按照列车进入方向由西向东设置压力进口（pressure-inlet）和压力出口（pressure-outlet），其余10个开口设置为压力出口，压力进口将风速转化成动压，动压为2.96Pa，其他均设置为壁面（wall）。

对模型进行非结构化网格划分，采用弹簧光顺法和局部重构法对网格进行重构，模拟列车的运动。时间步长的设置需要参考速度与时间步长的乘积，该数值不能大于单个网格的长度，否则会出现计算错误。本研究中网格最小运动尺寸大小约为0.5m，最大运动速度为12.5m/s。为了使网格重构顺利计算步长应小于0.04s，设置时间步长为0.02s，每计算0.1s保存一次数据，每个时间步长迭代20次。

本研究模拟列车由西向东匀速过站和减速进站两个工况。匀速过站工况中，列车以45km/h（12.5m/s）的速度匀速行驶80s通过站台，列车行驶了1000m后到达最终位置，此时车头位于东部咽喉口；减速进站工况中，列车以45km/h（12.5m/s）的初速度进入站内，匀减速行驶120s，最终停于站内中间位置，车尾距隧道口800m，减速工况下列车行驶了750m。

2.4 网格无关性与动网格模型

为验证网格无关性，取65.1万，162.5万和254.8万三个不同非结构网格数模型进行模拟，对比匀速过站工况中监测点6-W的风速。如图4所示，三个

不同网格数模型的风速结果变化规律基本一致，但65.1万网格模型与其他两个模型数值差距较大，而254.8万网格的结果与162.5万的结果比较相近。为保证模型精度，同时减少动网格过程中的重新划分网格导致的网格数量增加，采用162.5万的网格数模型进行后续分析研究。

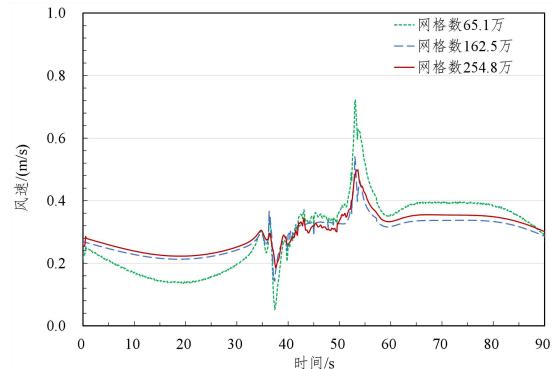


图4 网格无关性验证

Fig.4 Verification of the grid independence

目前西丽高铁站处于规划设计阶段，建设尚未完成，因此无法获得该站房的气流组织相关数据。CFD方法提供了动网格模型用于实现列车运动的动态模拟过程，朱欣^[18]采用了缩尺实验进行了动态层铺法、重构法、基于光顺的重构法等的动网格模拟验证，验证结果表明动态层铺法方法的动网格模型能最准确模拟列车进站的活塞风速随时间的动态变化，重构法的动网格模型也能很好模拟列车进站的活塞风速随时间的动态变化。本文采用重构法的动网格模型进行西丽高铁站进站动态过程分析。

3 结果与分析

3.1 压力

图5（a）是自西向东匀速12.5m/s过站时站台6和站台7监测点的压力变化，最大正压值为5.1Pa，最大负压值为-5.6Pa，当车头经过测点时会引起压力短暂上升，然后迅速产生最大负压。不同站台位置的压力变化趋势基本一致，随着列车运行，压力呈现波浪式变化，列车经过监测点后压力逐渐衰减。列车两侧的监测点中，由于站台6比站台7距离列车更近，因此6-W压力波动幅度和峰值更大。另外，站台西侧监测点压力最大，站台中间监测点的压力其次，站台东侧监测点的压力最小。这是由于在列车运动过程中，一方面设置在顶棚和侧墙的开口起到了泄压的作用，另一方面由于壁面摩擦压力

损失，测点的峰值压力降低，这也说明站内的压力场越来越稳定。模拟过程中其余站台的监测点压力变化很小，基本没有变化。

图5(b)是自西向东减速进站时站台6和站台7监测点的压力变化，最大正压值为1.5Pa，最大负压值为-1.6Pa。与匀速工况压力结果类似，监测点压力依然表现为波浪式变化，但由于列车自西向东

减速行驶，到达站台中间时速度为0，所以只有站台西侧监测点6-W和7-W压力变化比较明显，同时由于站台6比站台7距离列车更近，6-W压力波动幅度和峰值更大。站台中间监测点6-M和7-M受列车影响有微小压力变化，波动幅度很小，站台东侧监测点6-E和7-E基本无明显变化。模拟过程中其余站台的监测点压力基本没有变化。

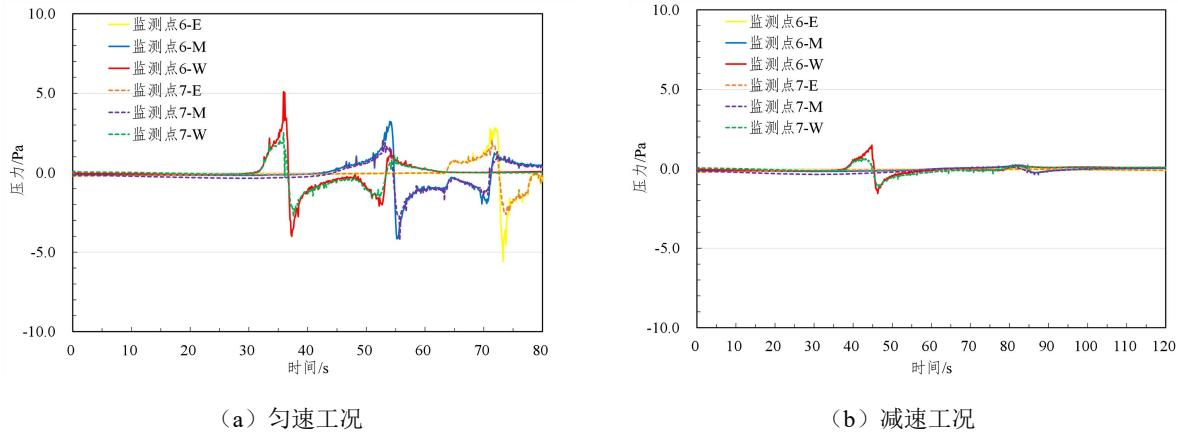


图5 监测点压力变化

Fig.5 Pressure variation at monitoring points

3.2 风速

表1为列车运行期间各测点风速极值和均值统计表，匀速工况各测点中最大风速为1.3m/s，最小风速为0.1m/s，站台7的风速整体上大于站台6的风速，风速最大值出现在7-W测点。最大风速远小于站台乘客允许承受的最高风速14m/s^[19]，对站台人

员安全不构成威胁。减速工况各测点中最大风速为1.2m/s，最小风速为0.1m/s。站台7的风速整体上大于站台6的风速，风速最大值出现在7-W测点。最大风速远小于站台乘客允许承受的最高风速14m/s，对站台人员安全不构成威胁。

表1 监测点风速

Table 1 Wind speed at monitoring points

	风速	6-E	6-M	6-W	7-E	7-M	7-W
匀速工况	最大风速/(m/s)	1.0	0.6	0.5	0.9	0.9	1.3
	最小风速/(m/s)	0.4	0.1	0.1	0.4	0.4	0.6
	平均风速/(m/s)	0.5	0.3	0.3	0.6	0.5	1.1
减速工况	最大风速/(m/s)	0.5	0.4	0.4	0.7	0.7	1.2
	最小风速/(m/s)	0.4	0.1	0.2	0.5	0.4	0.6
	平均风速/(m/s)	0.5	0.2	0.3	0.6	0.6	1.0

3.3 风量

表2统计了模拟时长内各开口累积风量和单位时间风量，正值表示进风，负值表示出风。匀速工况西侧压力进口平均风量为2336.2m³/s，模拟时长80s（从列车起始位置行驶1000m至东部咽喉口）内的累积风量为186899m³，开口1、开口2、开口4、开

口6和开口8净进风，开口3、开口5、开口7、开口9和开口10净出风。减速工况西侧压力进口平均风量2332.5m³/s，模拟时长120s内（从列车起始位置行驶750m至站台中间停止）的累积风量为279900m³，开口1、开口2、开口4、开口6和开口8净进风，开口3、开口5、开口7、开口9和开口10净出风。

表2 各开口累积风量和单位时间风量

Table 2 Cumulative and instantaneous airflow rates of platform openings

风量	匀速工况		减速工况	
	累积风量/m ³	单位时间风量/(m ³ /s)	累积风量/m ³	单位时间风/(m ³ /s)
开口 1	19466	243.3	29961	249.7
开口 2	5440	68.0	10861	90.5
开口 3	-35474	-443.4	-53716	-447.6
开口 4	20335	254.2	31058	258.8
开口 5	-2372	-29.6	-2223	-18.5
开口 6	9725	121.6	12744	106.2
开口 7	-9781	-122.3	-16116	-134.3
开口 8	6170	77.1	7933	66.1
开口 9	-2160	-27.0	-3509	-29.2
开口 10	-10585	-132.3	-16540	-137.8
西侧压力进口 (隧道入口)	186899	2336.2	279900	2332.5
东侧压力出口	-187664	-2345.8	-280347	-2336.2

4 总结

本文采用Fluent动网格技术进行了西丽高铁站列车从西往东运行匀速过站及减速进站时站台气流组织的数值模拟,探究了列车匀速过站和减速进站引起的站台气流压力、风速以及进出口风量变化。研究结论表明:在列车匀速和减速工况中,站内最大压力变化小于12Pa,对人员和设备影响很小;匀速工况各测点中最大风速为1.3m/s,最小风速为0.1m/s,减速工况各测点中最大风速为1.2m/s,最小风速为0.1m/s,对站台人员安全不构成威胁;列车匀速过站时,西侧压力进口平均风量为2336.2m³/s,累积风量为186899m³(80s);列车匀减速进站时,西侧压力进口平均风量2332.5m³/s,累积风量为279900m³(120s)。本研究评估了西丽高铁站单列列车由西往东匀速过站和减速进站工况中站台气流压力和风速的安全性,获得了列车进站时从隧道引入的风量。研究结果可为西丽高铁站的站台环境控制设计提供参考。

参考文献:

- [1] 我国高铁运营里程达到4.5万km[J].铁道技术监督,2024,1(52):38.
- [2] ERTOLINI L, SPIT T. Cities on rails: The redevelopment of railway stations and their surroundings [M]. Routledge, 2005.
- [3] 高思琪.站城融合视角下高铁枢纽慢行接驳空间设计研究[D].西安:西安建筑科技大学,2023.
- [4] 冉春雨,任浩,邓保顺,等.深埋岛式高铁车站站台火灾烟气蔓延特性及防控研究[J].制冷与空调,2022,36(1):98-104.
- [5] ZHOU M M, LIU T H, XIA Y T, et al. Comparative investigations of pressure waves induced by trains passing through a tunnel with different speed modes[J]. Journal of Central South University, 2022,29(5):1717-1734.
- [6] XIA Y T, LIU T H, GU H Y, et al. Aerodynamic effects of the gap spacing between adjacent vehicles on wind tunnel train models[J]. Engineering Application of Computational Fluid Mechanics, 2020,14(1):835-852.
- [7] 朱淮东.市域铁路列车高速越行时入口段隧道和车站屏蔽门压力变化研究[J].制冷与空调,2023,37(3):344-348,386.
- [8] 田栋栋,王文.高速列车隧道交会流场模拟[J].制冷与空调,2021,35(2):169-174.
- [9] 熊武标,冯炼,刘江,等.重庆深埋地铁车站公共区环境实测研究[J].制冷与空调,2019,33(1):82-86.
- [10] 冯瑞龙.高速列车过站空气动力学仿真及试验研究[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2021.(下转第926页)