

高速列车仿生型受电弓弓头气动特性研究

蔡博,于松扬,尉良文,王悦东,李永华

(大连交通大学 机车车辆工程学院,辽宁 大连 116028)

摘要:根据仿生学原理,提出了具有仿生流线型截面的受电弓弓头。建立了矩形弓头、长半弧弓头、半圆形弓头、短半弧弓头、圆-尖形弓头、尖-尖形弓头6种弓面结构的CFD数值模型,研究了350 km/h速度下各弓头空气流场的速度分布和压力分布的变化规律,分析弓头截面形状对流场的影响效果。同时,对比分析了各弓头在不同速度条件的气动升力和阻力系数。研究表明,半圆形弓头的气动性能最优,具有很好的减阻效果,3种速度下阻力分别减小了76.03%、76.24%、76.39%,研究结果为受电弓弓头的结构优化提供理论依据。

关键词:受电弓弓头;仿生型弓头;气动特性;减阻

文献标识码:A **DOI:**10.13291/j.cnki.djdxac.2024.01.008

在轨道交通系统建设中,高速铁路技术的不断完善使得高速列车的速度有了飞跃提升。目前国内的CIT500最高试验速度可达605 km/h,是目前世界上最快的高速列车^[1]。高速列车的车头外形结合了仿生学原理和空气动力学理论,使其在高速运行下具有良好的气动特性。

根据试验数据可知,当列车速度由250 km/h提高到300 km/h时,整个高速列车所受到的空气阻力占总阻力的70%左右^[2]。当运行速度达到400 km/h时,列车所受空气阻力占总阻力的90%以上^[3]。当列车速度为200~300 km/h时,由于受气流作用,受电弓在运行时产生的气动阻力占整个列车阻力的8%~14%^[4]。因此,如何降低受电弓在高速运行时所产生的气动阻力成为高速列车优化的主要目标之一。

国内外学者对受电弓的气动性能进行了一定的研究。张业等^[5]基于CFD软件,采用Simple算法对比分析了不同速度条件下受电弓的气动特性。日本主要从受电弓形状结构出发对其进行设计调整,设计研究了菱形、T形以及V形受电弓结构,该研究方法精简了受电弓的结构部件,极大改善了高速下产生的气动阻力^[6]。日本新干线500

系高速动车组的车头使用仿生翠鸟喙形状设计,该措施极大改善了高速列车在行驶时产生的气动阻力^[7]。Hersh等^[8]根据鸮翼前缘锯齿结构设计思路,论证了基于仿生的鸮翼锯齿结构具有良好的减阻降噪作用。Shinichiro^[9]基于流场可视化技术,探究了增加锯齿形前缘的翼型在空气流场中的性能,证实了其能改善涡流的形成和脱落,拥有良好的减阻降噪效果。Lee等^[10]对受电弓的不同杆结构采用风洞试验,对比分析了矩形和流线型受电弓的气动特性。

受电弓是电力轨道列车与弓网接触的关键部件,其在高速下的气动性能是确保弓网稳定、减少磨损、提高弓网寿命、保证列车运行安全的关键因素^[11]。本文对受电弓弓头的结构进行优化,发现半圆形弓头能够有效降低列车高速运行下产生的气动阻力,对提高列车运行稳定性和安全性具有一定的应用价值和学术意义。

1 高速列车仿生型受电弓弓头模型

1.1 受电弓弓头二维模型建立

本文选取CX-NG型受电弓弓头为研究对象,其原有受电弓弓头杆件截面为矩形,尺寸为

收稿日期:2022-10-14

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(2020-BS-209)

第一作者:蔡博(1988—),女,讲师。E-mail:bellacai@126.com

通信作者:于松扬(1997—),男,硕士研究生。E-mail:yusongyang97@163.com

35 mm×25 mm。为了分析不同速度下迎风面受电弓截面的气动特性和抑制尾涡情况,将弓头截面进行优化,在保持宽度不变的情况下,增加原矩形的长度,设计 5 种流线形状的受电弓弓头截面。不同弓头截面模型示意图见图 1, 其中图 1(b)、1(c)、1(d)为弧形截面,弧长分别为 12.5、8、16 mm。图 1(e)为圆-尖形状截面,图 1(f)为尖-尖形截面,弧长均为 12.5 mm。

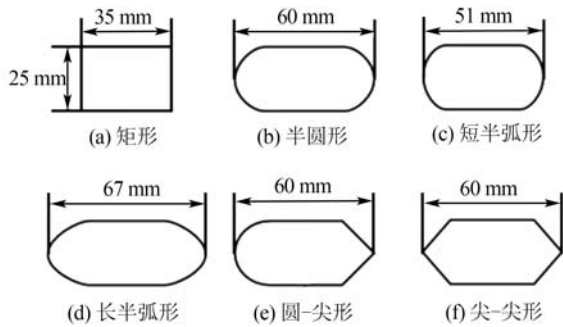


图 1 不同弓头截面模型示意图

1.2 湍流模型选取

受电弓弓头高速运行时,在弓头周围流场发生湍流流动,在尾流处会产生尾涡脱落与分离的现象。因此,在求解弓头周围流场的数值模拟时,需引进湍流模型。本文所研究的弓头运行速度不大于 350 km/h,可判定受电弓弓头所处流场为不可压缩黏性流场。本文采用基于雷诺平均法的 SST $k-\omega$ 模型进行弓头湍流模拟计算。弓头外流场计算域尺寸为 $32D \times 15D$, $D=0.2$ m, 左侧边界为速度入口,弓头截面距入口 $8D$, 右侧边界为压力出口,弓头截面距出口 $22.6D$, 上下边界距弓头 $7D$ 。

弓头计算域边界条件设置见表 1。受电弓高速运行时,其迎风面流场基本没有绕流现象,将弓头计算域入口边界设为速度入口边界。弓头计算域尾部边界设为压力出口边界,上下壁面设为对称边界。

表 1 弓头计算域边界条件设置

边界	边界条件	参考条件及说明
流场入口	速度入口	根据列车运行速度的 3 种工况,速度入口流速分别对应 $V=69.44、83.33、97.22\text{m/s}$
流场出口	压力出口	距离弓头尾部流场出口无扰动影响界面处压强为 0
流体域内边界	Interface 边界	划分网格时为了加密弓头处网格,在流体域内会产生边界区域,在计算域内的边界均设置为 Interface 边界,使除弓头外均为完整计算域

1.3 网格划分及无关性验证

仿真数据的准确性与网格划分有着密切关系,准确的收敛值取决于网格质量是否精确。本文建立了不同截面受电弓弓头二维模型,模型网格数量约为 10 万。选取 Ansys 软件中的 ICEM 网格划分处理器,全流场域采用结构化网格进行划分。对于矩形弓头和仿生型弓头,对表面采取 O 形网格划分,弓头周围进行加密处理,弓头来流和尾流所在区域用十字形区域网格加密,见图 2。

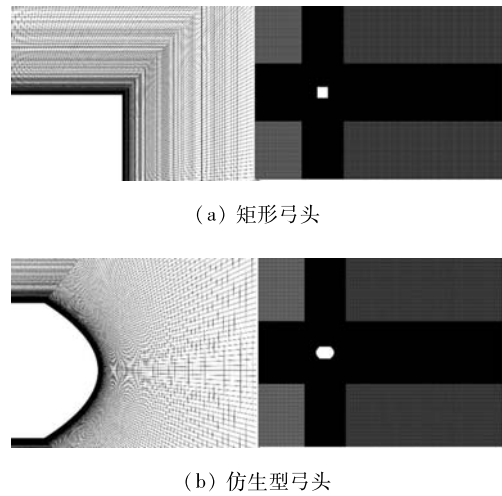
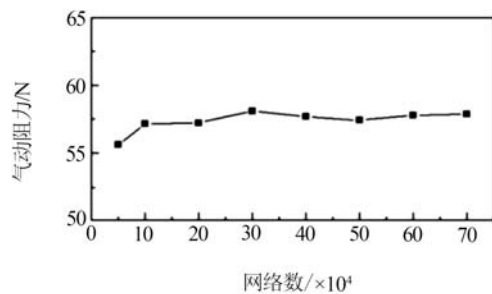
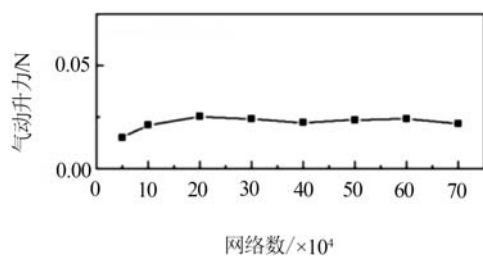


图 2 不同弓头周围及流场域网格

选取仿生型弓头截面弧形尺寸为 12.5 mm 的半圆形模型,在 350 km/h 的速度下进行验证。取 8 套划分方法相同而数量不同的网格,分别为 5 万、10 万、20 万、30 万、40 万、50 万、60 万、70 万。采取 SST $k-\omega$ 湍流模型进行非定常计算,弓头在同一速度下气动力随网格数变化情况见图 3。从图 3 可以看出,弓头气动升力和气动阻力均呈现先增大后趋于平缓的变化趋势,其在网格数量为 10 万之后气动升力与气动阻力变化较为平稳。此次验证说明网格数量为 10 万时达到分界点,随着网格数量的增加,仿真数值趋于稳定。因此二维仿真计算网格数量确定为 10 万。



(a) 气动阻力



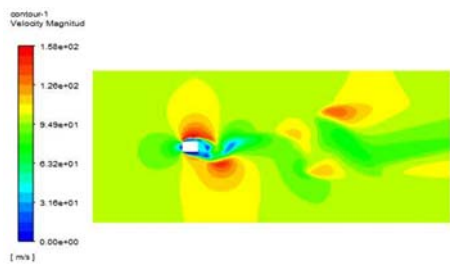
(b) 气动升力

图3 二维弓头气动随网格数变化情况

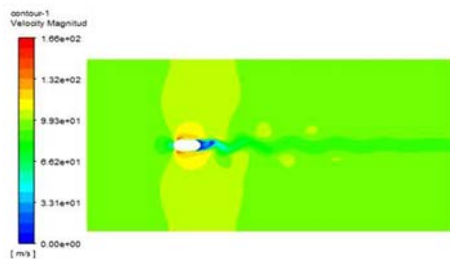
2 二维仿生弓头气动特性分析研究

2.1 不同弓头截面速度场分析

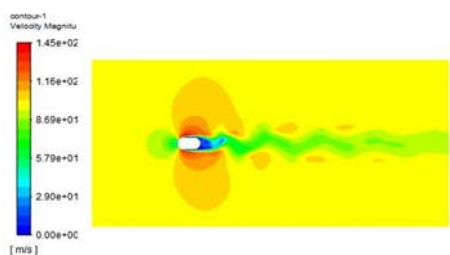
不同弓头截面在 350 km/h 速度下周围空气场的速度分布云图见图 4。



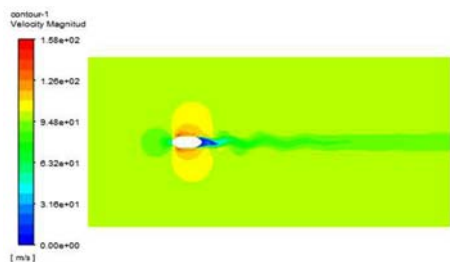
(a) 矩形弓头



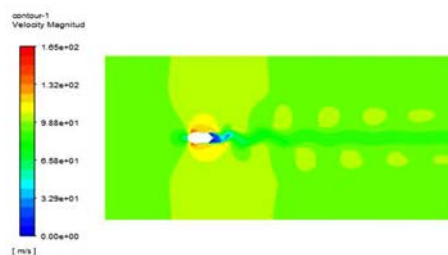
(b) 半圆形弓头



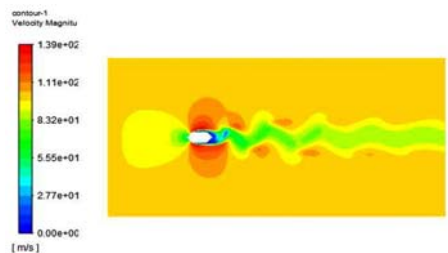
(c) 短半弧形弓头



(d) 长半弧形弓头



(e) 圆-尖形弓头



(f) 尖-尖形弓头

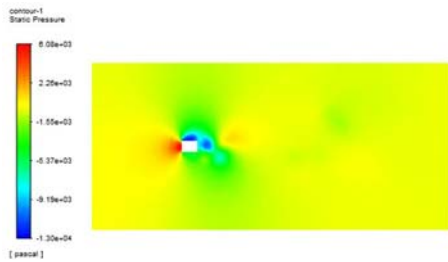
图4 350 km/h 下不同弓头截面空气场速度云图

在高速下弓头尾流区会形成涡脱落现象,且形成的涡会随着主流继续向后方运动发展,形成一个从涡生成到涡发展脱落,再到被耗散消失这样完整的涡流变化过程,在此过程中弓头尾部会形成面积较大的低速区。由于气流在弓头前端分离时速度较小,弓头上下表面速度较大,形成相反的漩涡状态,导致尾部区域产生严重的漩涡分离流动,并且随着速度的提高,弓头后方尾涡脱离现象更加明显,低速区面积逐渐增大,所以矩形弓头的尾涡脱落现象较其他 5 种弓头截面更为明显。尖-尖形弓头的涡脱落现象与矩形弓头相似,其后方的回流现象较为明显,不能很好地抑制尾涡脱落。而迎风面为弧形结构的弓头其速度场涡街现象较好,可以有效抑制尾涡脱落。半圆形弓头与长半弧弓头的涡街现象相似,都能较好地抑制弓头边界层分离,但长半弧弓头在上下壁面处产生了较大的中高速区域,使得整体所受阻力增大,产生回流现象大于半圆形弓头。因此,半圆形弓头在高速流体作用下所产生的尾涡脱落面积小,受到的气动阻力最小。

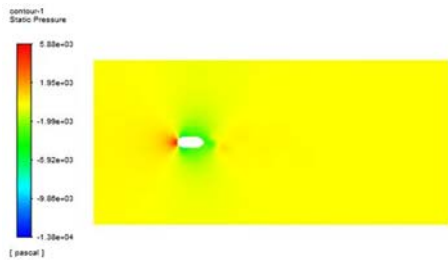
2.2 不同弓头截面压力场分析

不同弓头截面在 350 km/h 速度下弓头周围空气场的压力分布云图见图 5。对矩形弓头来说,其最大压力位于弓头与气流最先接触的尖点位置,最低压力一般位于弓头上下壁面的近端,低压区域最大,其具有明显的漩涡形成现象。其余弓头截面,最大压力存在于弓头迎风尖点上,范围较小,最低压力处于上下壁面迎风点处,低压范围

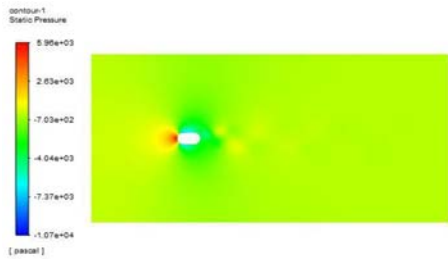
较小,整个流场域压力处于较为平稳的范围。弓头流场中的低压区是由于气流流经弓头尖端时,在上下壁面处产生了气流回旋,导致上下两端产生压力差,增加了压差阻力,加剧了尾部涡流现象而形成的。对于半圆形弓头,其整个流场域压力范围较其余弓头较为平稳,能形成较为稳定的压差阻力。对比可知,半圆形弓头在尾部的低压区明显小于其他弓头,流场域压力变化平稳。



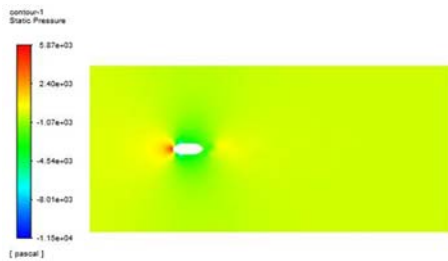
(a) 矩形弓头



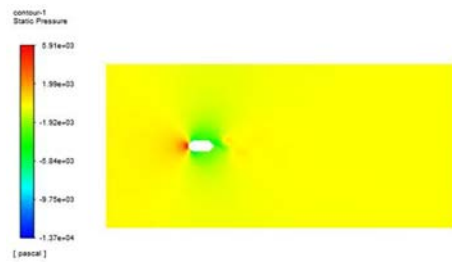
(b) 半圆形弓头



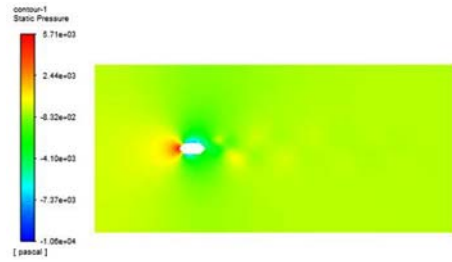
(c) 短半弧形弓头



(d) 长半弧形弓头



(e) 圆-尖形弓头



(f) 尖-尖形弓头

图 5 350 km/h 下不同弓头截面空气场压力云图

3 二维仿生弓头阻力特性对比分析

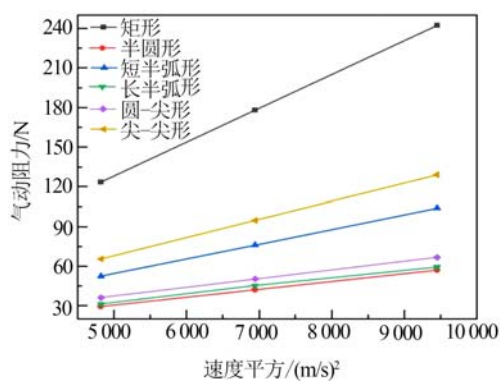
本文分别选取 250、300、350 km/h 不同速度工况下 6 种二维弓头气动力的数值进行对比研究。经过仿真分析得出受电弓弓头在 3 种速度工况下的气动阻力和气动升力,见表 2。

表 2 各种模型的气动阻力和气动升力数据

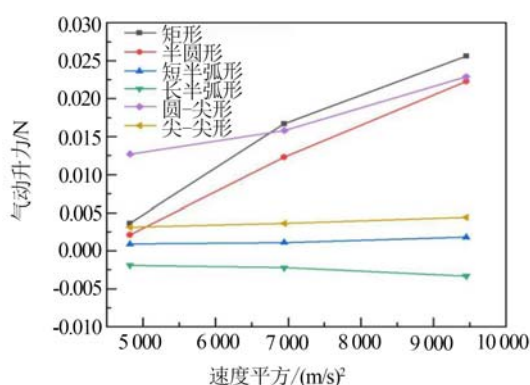
弓头模型	气动力/N	速度/(km/h)		
		250	300	350
矩形	阻力	123.428	177.927	242.369
	升力	0.004	0.017	0.026
半圆形	阻力	29.582	42.306	57.233
	升力	0.002	0.012	0.022
短半弧形	阻力	52.473	75.963	103.956
	升力	0.001	0.002	0.003
长半弧形	阻力	31.293	45.251	59.366
	升力	-0.002	-0.003	-0.004
圆-尖形	阻力	36.269	50.280	66.771
	升力	0.013	0.016	0.023
尖-尖形	阻力	65.435	94.587	129.099
	升力	0.003	0.004	0.005

为探究各弓头模型在不同速度下气动阻力的变化情况,将速度平方与气动阻力和气动升力数值制成折线图,见图 6。从图 6(a)可以看出,各模型的气动阻力随速度平方的增大而增大,说明

气动阻力与速度平方呈一定的正比关系,其中矩形模型的气动阻力变化最大,半圆形模型气动阻力变化最小。结合上述流场分析,这是由于矩形弓头上下近壁面产生明显的低速涡流,在尾流后方涡街不断发生脱落,且摆动幅度大,形成明显的低速区域,导致气动阻力升高。而半圆形弓头尾涡摆动幅度明显减小,这说明流线型弓头结构能较好地抑制尾涡的脱落,降低气动阻力。从图6(b)可以看出,各模型气动升力的变化呈现多样性的特征,矩形、半圆形、圆-尖形模型的气动升力在高速下变化较大,短半弧、尖-尖形模型气动升力呈缓慢上升趋势,而长半弧模型气动升力呈下降趋势,结合上述流场分析,可能是由于其截面尺寸流线型过长,导致气流流经弓头表面时产生较为明显的压力波动,弓头下方气流回流过大,产生较大低压区,造成向下的气动升力。



(a) 气动阻力



(b) 气动升力

图6 弓头气动阻力、升力与速度平方的变化曲线

4 结论

(1) 对比矩形截面弓头的升力和阻力,半圆形弓头能够起到很好的减阻效果。在3种不同速度的工况下,与矩形截面弓头相比,使用半圆形弓

头时气动阻力分别减小了76.03%、76.24%、76.39%,气动升力分别减小了41.67%、26.35%、12.89%,说明半圆形弓头在高速下有良好的减阻效果,其升力在数值上接近于矩形变化趋势,但数值较小,能在高速行驶中提供较好的受流效果。

(2) 半圆形弓头在高速流体作用下所产生的尾涡脱落面积小,并且其整个流场域压力范围较其余弓头较为平稳,能形成较为稳定的压差阻力。因此采用半圆形弓头截面形状的设计可以有效降低高速行驶时产生的空气阻力。

(3) 将弓头模型简化为二维模型,在弓头实际运行时,气动性能可能会产生少许误差,但二维弓头空气流场模型减少了流场运算时间,并为今后三维弓头模型的优化提供了思路,可提升列车高速运行的稳定性和效率。

参考文献:

- [1]董继蕾. 高速动车组受电弓气动噪声产生机理及分布特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [2]康熊. 高速动车组列车牵引仿真计算技术研究[J]. 中国工程科学,2011,13(1):62-68.
- [3]李田,戴志远,刘加利,等. 中国高速列车气动减阻优化综述[J]. 交通运输工程学报,2021,21(1):59-80.
- [4]赵光伟. 高速受电弓结构特性仿真分析[D]. 大连:大连交通大学,2017.
- [5]张业,孙振旭,姚永芳,等. 典型路基结构对高速列车横风气动特性影响分析[J]. 机械工程学报,2018,54(4):186-195.
- [6]池田充,刘阳春. 最近的受电弓降噪技术[J]. 国外铁道车辆,2011,48(3):20-23.
- [7]SERNA J G, PÉREZ B L, COCERO M J. New trends for design towards sustainability in chemical engineering: green engineering[J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 133(1):7-30.
- [8]HERSH A S, SODERMANT P T, HAYDEN R E. Investigation of acoustic effects of leading-edge serrations on airfoils[J]. Journal of Aircraft, 2012, 11(4):197-202.
- [9]SHINICHIRO I. Aerodynamic influence of leading-edge serrations on an airfoil in a low Reynolds number[J]. Journal of Biomechanical Science and Engineering, 2009, 4(1):117-123.
- [10]LEE Y, RHO J, KIM K H, et al. Experimental studies on the aerodynamic characteristics of a pantograph suitable for a high-speed train[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail & Rapid Transit, 2015, 229(2):136-149.
- [11]张弘,常百达. 高速受流专著[M]. 北京:中国铁道出版社,1991.

Research on Aerodynamic Characteristics of Bionic Pantograph Head of High-Speed Train

CAI Bo, YU Songyang, WEI Liangwen, WANG Yuedong, LI Yonghua

(School of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: According to the principle of bionics, a pantograph head with bionic streamline section is proposed. The CFD numerical models of six bow surface structures, namely, rectangular bow, long half arc bow, semi-circular bow, short half arc bow, round pointed bow, and pointed bow, are established. The variation rules of air flow field velocity distribution and pressure distribution of each bow head are studied at 350 km/h, and the effect of the bow head section shape on the flow field is analyzed. The aerodynamic lift and drag coefficients of each bow at different speeds are compared and analyzed, and it is found that the semicircular bow has the best aerodynamic performance. The results show that the semi-circular pantograph head can achieve good drag reduction effect, and the drag at three speeds is reduced by 76.03%, 76.24% and 76.39% respectively. This study can provide a theoretical basis for the structure optimization of the pantograph head.

Keywords: pantograph head; bionic bow head; aerodynamic characteristics; drag reduction



(上接第 37 页)

Research on Prediction Method of Airport Surface Traffic Flow

LIAN Guan^{1,2}, YU Jiaxin³, ZHANG Xiaoyue³, GUO Xuesong³

(1. Guangxi Key Laboratory of Intelligent Transportation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541010, China; 2. Nanning Research Institute, Guilin University of Electronic Technology, Nanning 530000, China; 3. College of Architecture and Traffic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Under the limitation of the available data of airport surface traffic, it was of great significance for civil aviation transportation system to accurately extract the spatial and temporal characteristics of airport traffic data and predict the surface traffic flow. Firstly, based on the pushback control theory, a numerical simulation model of airport surface operation was established to obtain predictive indicators that couldn't be obtained due to data limitations. Secondly, a combined prediction model of convolutional neural network (CNN) and long short-term memory network (LSTM) was built to extract spatio-temporal features. Finally, taking Henan Zhengzhou Airport as an example, the prediction performance and error index of the model under different training data were compared. The results showed that the prediction model based on simulation index had high accuracy and stable performance.

Keywords: traffic flow prediction; airport scene traffic simulation; pushback control; convolutional neural network; long short-term memory network