

文章编号:1005-0523(2020)02-0001-06

高速列车受电弓杆件减阻降噪研究分析

徐志龙^{1,2}, 刘海涛¹, 王超文¹, 陈永华¹

(1.华东交通大学机电与车辆工程学院,江西 南昌 330013;2.杭州地铁集团有限公司运营分公司,浙江 杭州 310017)

摘要:高速列车受电弓是列车高速运行时气动阻力和气动噪声的主要来源之一。为探索受电弓杆件的减阻降噪方法,基于仿生学思想将高速列车受电弓光滑表面设计成螺纹型非光滑结构,同时研究在螺距和螺纹直径参数下对气动阻力和气动噪声的影响。选取高速列车受电弓杆件的典型尺寸建立流体仿真分析模型,采用非结构化混合网格,利用 Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型及宽频噪声模型,通过数值方法计算流场的分布特征和气动噪声大小。计算结果表明:螺纹型非光滑结构能更好地影响圆柱体尾涡区的形成,是有效降低高速列车受电弓杆件气动阻力和气动噪声的关键。为了进一步探究螺纹型非光滑结构杆件对高速列车受电弓减阻降噪的影响,设计了凹槽螺纹型和凸陷螺纹型两种不同结构杆件,分别在不同的螺距和螺纹直径参数下进行流场计算结果分析。结果表明,在 350 km/h 的风速下,螺距和螺纹直径参数一定时,凸陷螺纹型杆件的减阻降噪效果要优于凹槽螺纹型结构;其中,螺距 $PPD=60$ mm,螺纹直径 $d=1$ mm 的凹槽螺纹型杆件具有最优减阻降噪效果,单个杆件的减阻率达 3%;而对于凹槽螺纹型杆件类型,螺距 PPD 一定时, d/D 的比值在 0.017~0.067 范围内,随着螺纹直径 d 的增大气动阻力和气动噪声均升高,当 d/D 数值超过 0.067 之后有显著降低气动阻力和气动噪声的趋势。

关键词:高速列车;受电弓;非光滑结构;螺纹型结构;减阻降噪

中图分类号:U270.1+O427.4

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.02.001

近年来随着高速列车的快速发展以及都市化进程的加快,人们对高速列车速度的追求也越来越高。在列车速度达到 250 km/h 时,列车与空气相互作用引起的气动噪声将首次超过轮轨振动噪声,是制约列车速度的重要因素之一^[1]。蔡国华等^[2]发现,当列车速度达到 200 km/h 时,大约有 70% 的功率用于克服空气阻力,并且随着车速的进一步提高,不仅空气阻力急剧增加,受电弓还会与输电导线之间产生极为严重的气动接触压力和气动噪声,影响受电弓质量。列车的气动噪声主要包括列车车头,车体转向架,受电弓等与空气相互作用所产生的脉动压力变化引起的噪声。受电弓作为列车顶部的重要受流装置,其复杂的结构形式对高速列车的空气动力学性能影响很大,因此对高速列车受电弓杆件的优化具有重要意义。

Nishimura 等^[3]在圆柱杆件表面粘贴绒毛织物,结果发现绒毛织物虽然能略微增加气流湍流流动的阻力,但能有效地降低圆柱杆件的气动噪声以及降低杆件表面的脉动压力。King 等^[4]对受电弓杆件的不同截面形状(包括圆形,正方形,矩形和椭圆形)进行了气动噪声测试,得出椭圆截面杆件的气动噪声较其它截面杆件的气动噪声更低。近年来,仿生学的发展为机械结构的减阻降噪研究带来了新的契机,提出一种非光滑结构的减阻降噪新思路,就是把自然界中具备低阻力,低噪声的典型生物的体表形态特征应用到实际工程中来^[5]。Hersh^[6],李典^[7],吕建民^[8]和葛长江^[9]等受到鸮翼前缘锯齿结构的启发,均验证了基于仿生的鸮翼锯齿结构能有效地达到减阻降噪的目的。石磊等^[10]利用仿生学原理设计出了锯齿形,V型凹环型和波浪形这三种结构,与光滑的圆柱杆件相比,这三种非光滑结构的杆件表面的脉动压力均有明显的减弱。汪久根^[11]提出一种雪花表面织构的非光滑结构,通过在雪花织构内部产生二次涡,大大降低了与空气相互作用产生的摩擦噪声,而且进一步研究发现不同尺度的表面织构与圆坑交叉耦合还要优于单一表面织构。NASA 兰利研究中

收稿日期:2019-07-15

基金项目:国家自然科学基金(51765017);江西省自然科学基金(20161BAB216136)

作者简介:徐志龙(1994—),男,硕士研究生,研究方向为高速列车受电弓减阻降噪。

通讯作者:刘海涛(1986—),男,讲师,硕士生导师,研究方向为振动噪声控制和声源识别及定位。

心的 Walsh 等^[12-14]受到鲨鱼表面微沟槽的启发,设计了多种沟槽结构,通过风洞实验测试,发现 V 型沟槽具有良好的减阻效果,最高减阻率达到 25%。

海螺,贝壳等海洋生物为了抵御海水的冲蚀以保持自身的稳定,其外壳表面进化出凸陷螺旋纹线。基于其外壳表面微结构启示,设计出凹槽螺旋型和凸陷螺旋型两种不同结构的杆件。在速度为 350 km/h 的空气域中,通过定量比较螺距和螺纹参数下非光滑结构杆件的气动阻力和气动噪声,来探求非光滑杆件的减阻降噪机理,为新型受电弓的减阻降噪提供借鉴和指导。

1 计算理论及方法

1.1 空气动力学理论基础

空气动力学为流体力学的一个分支,所以在对高速列车受电弓杆件周围流场进行数值仿真时,数值模拟的控制方程采用三维的 N-S 方程,笛卡尔坐标系 (x_1, x_2, x_3) ,定义速度分量 (u_1, u_2, u_3) ,完整的三维 N-S 方程守恒形式如下

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} = \frac{\partial f_{vi}}{\partial x_i} \quad (1)$$

式(1)中 U, F, f_v 的表达式如下

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho u_3 \\ \rho E \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} \rho u_i \\ \rho u_i u_1 + \rho \delta_{i1} \\ \rho u_i u_2 + \rho \delta_{i2} \\ \rho u_i u_3 + \rho \delta_{i3} \\ \rho u_i H \end{pmatrix}, f_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{ij} \delta_{j1} \\ \tau_{ij} \delta_{j2} \\ \tau_{ij} \delta_{j3} \\ u_j \tau_{ij} + \kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: ρ, E, H, P, T 分别为密度,总能,总焓,压强和温度; δ_{ij} 为克罗内克符号; $\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k}$ 为粘性应力张量; μ, λ, κ 分别为第一,第二粘性系数和热传导系数。 i, j, k 为笛卡尔坐标系中 x, y, z 轴方向上的数值分量。

1.2 气动声学基础

气动噪声是由于气体与固体或者气体与气体介质之间的冲击、碰撞等相互作用而产生的气流压力波动所导致的。根据声学相似理论以及气动声学产生的机制,流场中的声源可以分为:单极子声源、偶极子声源以及四极子声源。其中偶极子声源也称为流体动力声,因为偶极子声源没有质量和热量的变化(两边相互抵消),但需要外加振动力。偶极子声源是流体中存在障碍物时,流体与流体之间出现不稳定的反作用力而形成的。

高速列车受电弓产生的气动噪声属于偶极子声源的范畴,在对高速列车受电弓杆件进行气动噪声计算时,采用基于 Proudman 理论的宽频带噪声模型进行计算机仿真。Proudman 方程由 Proudman 于 1952 年导出,用于求解高雷诺数、低马赫数及各项同性湍流流动中的气动噪声。本研究的计算对象满足该模型的假定条件,模型中声功率计算公式如下

$$P_A = \alpha \rho_0 \left(\frac{u^3}{l} \right) \frac{u^5}{c_0^5} \quad (3)$$

式中: u 为湍流速度; l 为湍流特征尺度; c_0 为声速; α 为模型常数。 ρ_0 对于紊流脉动动能 K 和紊流脉动动能的耗散率 ε ,式(3)可以改写为下式

$$P_A = \alpha_\varepsilon \rho_0 \varepsilon M_i^5 \quad (4)$$

式中: $M_i = \sqrt{\frac{2K}{c_0}}$;模型中设置 $\alpha_\varepsilon = 0.1$ 。

气动噪声声功率级如下

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_A}{P_{ref}} \right) \quad (5)$$

式中: P_{ref} 为 10^{-12} W/m³。

2 仿真模型的建立

对受电弓杆件进行仿真分析时,考虑计算机仿真所消耗内存资源较大,故选取受电弓的一段杆件进行三维流体仿真分析,杆件的尺寸与受电弓杆件的常规尺寸相近,直径为 60 mm,高度为 240 mm。为了使仿真结果更加接近实际情况,需建立一个与受电弓杆件模型不产生干涉的空气域模型,所建立的空气域为 900 mm×500 mm×240 mm,如图 1 所示。

计算域模型建立完成并且网格划分质量符合要求之后,在 Fluent 软件中进行三维流体仿真。本研究是基于稳态仿真计算,且流体介质为标准气压下的空气介质,采用 Reynold 平均模拟的标准 $k-\epsilon$ 湍流模型进行稳态计算。在实际的环境中,真实的流体都具有不同程度的压缩性,而空气的压缩性更为明显。在不可压缩流体介质流动中,流动的参数通常只是速度和压强,但是在可压缩流体介质中,另外还增加了密度和温度两个变量,导致流场控制方程的数量增多以及解方程的复杂程度也加大。但是当马赫数比较小的时候,就可以忽略流体密度变化的影响,就可划分到不可压缩流动的范畴。

仿真流体运动中流动速度 350 km/h,其马赫数约为 0.286(小于 0.3),因此不属于可压缩的范畴。而流场中边界条件的设置决定了流场仿真控制方程解的唯一性,又叫做流场的定解条件。对于边界条件设置是假设受电弓模型不动,空气以一定的速度在空气域模型中水平流动,利用这种方法来模拟高速列车所处的实际环境,边界条件设置如表 1 所示。

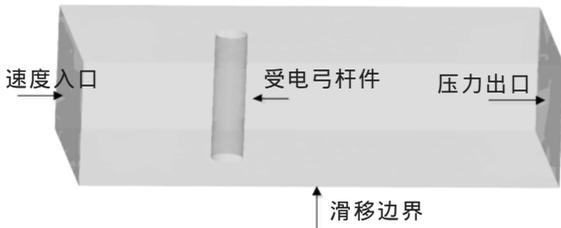


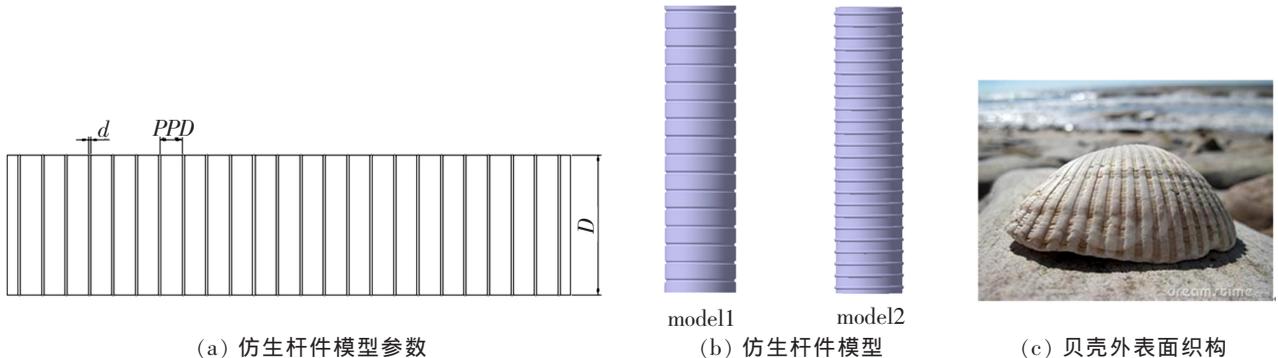
图 1 仿真几何模型
Fig.1 Simulation geometry model

表 1 边界条件
Tab.1 Boundary conditions

名称	边界类型	参数
入口	速度入口	97 m/s
出口	压力出口	0 Pa
杆件	壁面	无滑移
滑移边界	滑移壁面	97 m/s
其余边界	对称边界	-

3 杆件的仿生设计

受到自然界中海螺,贝壳等海洋生物类似螺纹线外壳启发,通过仿生学思想,对高速列车受电弓杆件提出一种非光滑表面结构设计。本设计将高速列车受电弓杆件处理成一种螺纹型非光滑表面结构,即凹槽螺纹型和凸槽螺纹型两种不同类型的杆件,如图 2 所示。



(a) 仿生杆件模型参数

(b) 仿生杆件模型

(c) 贝壳外表面积构

图 2 仿生杆件模型

Fig.2 Bionic bar model

其中 model1 带有凹槽螺纹型非光滑表面, model2 带有凸陷螺纹型非光滑表面。为了更深层地探求螺纹型非光滑表面结构气动阻力和气动噪声的影响, 分别对这两种类型杆件的螺距 PPD 与螺纹直径 D 进行不同规格参数化分析, 具体参数如表 2。

4 仿真结果分析

采用 ANSYS Fluent 进行三维流体仿真, 基于标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和宽频带噪声模型, 在速度为 350 km/h 的环境下, 所得到的螺纹型各类型杆件不同参数下的气动阻力和气动噪声值如图 3 所示。

表 2 螺纹型杆件各参数
Tab.2 Parameters of threaded bar

model	D/mm	d/mm	PPD/mm
Model1	60	1	10/15/60
	60	2	10/15/60
	60	3	10/15/60
	60	4	10/15/60
	60	5	10/15/60
Model2	60	1	10/15/60
	60	2	10/15/60
	60	3	10/15/60
	60	4	10/15/60
	60	5	10/15/60

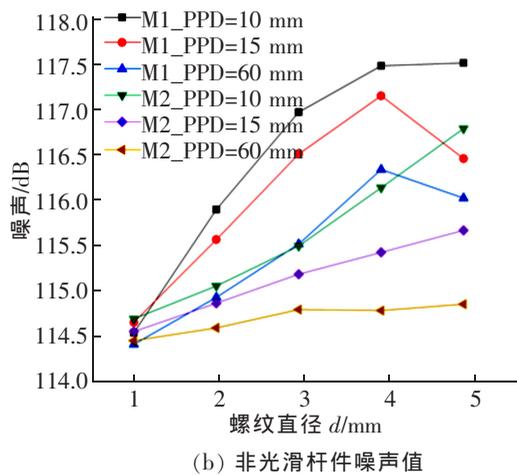
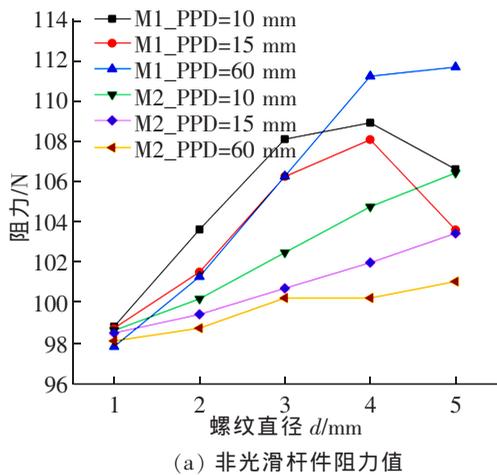


图 3 非光滑杆件阻力和噪声值

Fig.3 Drag and noise of non-smooth bars

其中 M1_PPD=10 表示螺距 $PPD=10$ mm 不同螺纹直径的凹槽螺纹型杆件, M2_PPD=10 表示螺距 $PPD=10$ mm 不同螺纹直径的凸陷螺纹型杆件。从图中可以看出, 螺距 $PPD=60$ mm, 螺纹直径 $d=1$ mm 的凹槽螺纹型杆件 (M1_PPD=60) 所产生的气动阻力和气动噪声均最小, 而且凸陷螺纹型杆件普遍要比凹槽螺纹型杆件的气动阻力和气动噪声要明显小很多。为了研究其内部机理, 将 $PPD=10$ mm, $d=1$ mm 的凹槽螺纹型杆件与同尺寸的传统光滑受电弓杆件所仿真的速度流场云图和声功率云图绘制出来进行比较如图 4 和图 5 所示。

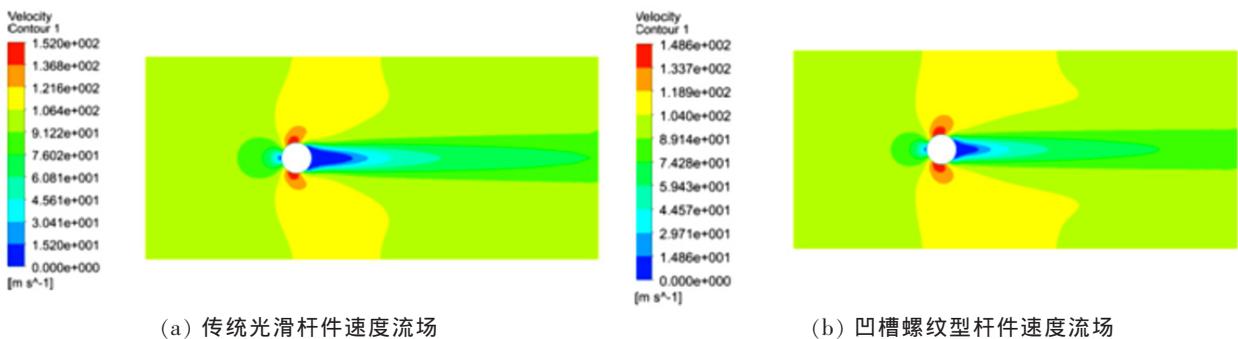
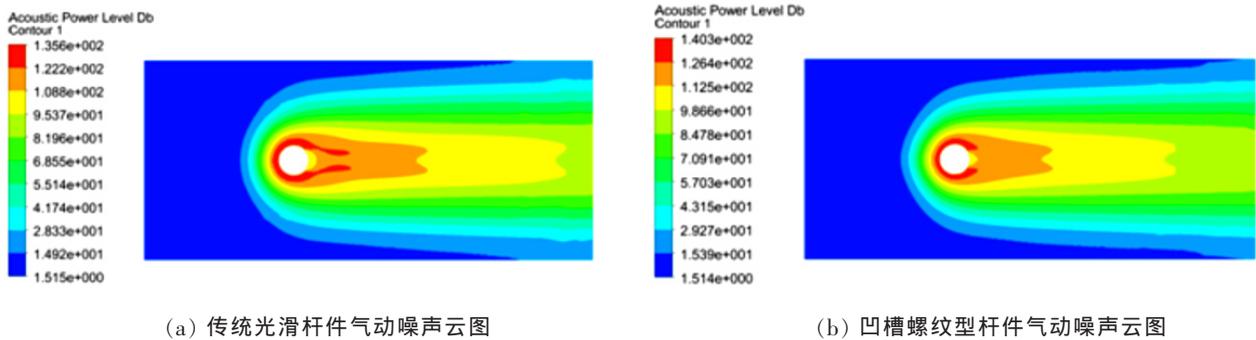


图 4 速度流场分布

Fig.4 Velocity flow distributions



(a) 传统光滑杆件气动噪声云图

(b) 凹槽螺纹型杆件气动噪声云图

图 5 声动噪声云图

Fig.5 Sound-power contour

从图 4 中可以看出,传统的光滑杆件 A 相对于螺距 $PPD=60$ mm, 螺纹直径 $d=1$ mm 的凹槽螺纹型杆件尾部区域具有更大的涡流区,并且涡流在圆柱杆件的边界层上发生分离,分离时形成的漩涡被主流带走,在物体后部形成尾流区,边界层分离后的流动很复杂,由于尾流中含有大量紊乱的漩涡,消耗大量的动能,这对流动来说是一种阻力作用,这也是模型 B 中的螺纹型非光滑表面结构破坏了尾流漩涡的发展导致阻力减小的关键原因之一。结合图 5 所示,模型 B 中的凹槽螺纹型非光滑表面使得边界层的分离点更延后,根据涡声理论,涡流是气动噪声产生的直接原因,模型 B 中尾流区域的减小使得气动噪声的范围和幅值都要显著低于传统的光滑杆件模型 A,这也是仿生结构减阻降噪的关键机理所在。

5 结论

本研究通过建立受电弓杆件的三维流场仿真分析模型,来计算高速列车受电弓杆件在 350 km/h 的速度下流场分布以及气动性能参数。设计出的两类螺纹型非光滑杆件与传统光滑杆件模型进行数值计算结果对比分析,从而获得了以下结论:

- 1) 相对于传统光滑圆柱杆件,螺纹型非光滑表面可以有效地控制尾流区域的大小,且和螺纹直径与圆柱尺寸 d/D 的比值有关,比值 d/D 在 0.017 时,凹槽螺纹型杆件具有最优的减阻降噪效果;
- 2) 在螺距和螺纹直径参数相同时,凸陷螺纹型杆件的减阻降噪效果要优于凹槽螺纹型结构;
- 3) 对于凹槽螺纹型杆件类型,螺距 PPD 一定时, d/D 的比值在 0.017~0.067 范围内,气动阻力和气动噪声随着螺纹直径 d 的增加而增加,当超过数值 0.067 之后有显著降低气动阻力和气动噪声的趋势;
- 4) 对于凸陷螺纹型杆件类型,在螺距 PPD 一定时,随着螺纹直径 d 的增加,气动阻力和气动噪声也均增加。

本次研究只是选取了螺纹型的两种不同类型非光滑杆件进行部分参数优化分析,要想获得更优的气动性能结构,还需开展多参数优化以及多元耦合的非光滑表面研究。

参考文献:

- [1] 董继蕾,沈火明. 高速列车车顶受电弓气动噪声仿真研究[J]. 四川理工学院学报(自然科学版),2016,29(2):56-60.
- [2] 蔡国华. 高速列车受电弓气动力特性测量[J]. 实验流体力学,2004,18(1):53-56.
- [3] NISHIMURA M, GOTO T. Invited PAPER: Aerodynamic noise reduction by pile fabrics[J]. Fluid Dynamics Research, 2010, 42(5) 154-168.
- [4] KING W F, PFIZENMAIER E. An experimental study of sound generated by flows around cylinders of different cross-section[J]. Journal of Sound & Vibration, 2009, 328(3): 318-337.
- [5] 汤勇,周明,韩志武. 表面功能结构制造研究进展[J]. 机械工程学报,2010,46(23):93-105.
- [6] HERSH A S, SODERMAN P T, HAYDEN R E. Investigation of acoustic effects of leading-edge serrations on airfoils[J]. Journal of Aircraft, 2012, 41(4): 197-202.

- [7] 李典,刘小民. 几种仿生翼型气动性能及噪声特性研究[J]. 工程热物理学报,2015,36(12):2629-2633.
- [8] 吕建民,徐成宇,于洪文. 基于鸚翼羽表面结构的风机叶片仿生降噪研究[J]. 机械研究与应用,2017,30(6):96-99.
- [9] 葛长江,叶辉,胡兴军,等. 鸚翼后缘噪声的预测及控制[J]. 吉林大学学报(工学版),46(6):1981-1986.
- [10] 石磊. 圆柱杆件气动噪声仿生控制研究[D]. 长春:吉林大学,2013.
- [11] 汪久根,陈仕洪. Koch雪花表面织构设计与高铁空气摩擦噪声分析[J]. 机械工程学报,2014,50(7):78-83.
- [12] WALSH M J. Riblets as viscous drag reduction technique[J]. Aiaa Journal,1983,21(4):485-486.
- [13] WALSH M J, M LINDEMANN. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction[J]. Aiaa Journal,1984,22(4):1-10.
- [14] WALSH M J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets[J]. Aiaa Journal,1982,20(4):1-8.

Study on Drag and Noise Reduction of Pantograph Rods in High Speed Train

Xu Zhilong, Liu Haitao, Wang Chaowen, Chen Yonghua

(1.School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Operation Branch of Hangzhou Metro Group Co., Ltd., Hangzhou 310017, China)

Abstract: The pantograph of high-speed train is one of the main sources of aerodynamic drag and noise. To explore the method for reducing noise and drag of the pantograph in the high-speed train, the whorl structure of pantograph rods was designed based on bionics, and the influence under the parameters of pitch and diameter of the thread on noise and drag was studied. The typical size of pantograph rods was selected to establish fluid simulation analysis model. Furthermore, based on unstructured hybrid grid, the Standard $k-\epsilon$ turbulence model and the broadband noise model were both used to calculate the flow field distributions and the values of aerodynamic noise and drag. The results show that the pantograph rods with whorls structure can better influence the formation of cylinder wake vortex zone, which is the main reason for reducing aerodynamic noise and drag effectively. In order to further explore the pantograph rods with whorl surfaces, two different types of whorl structure were designed, including grooved thread rods and convex thread rods. And the flow field calculation results were analyzed under different pitch and thread diameter parameters respectively. The results demonstrate that the drag reduction and noise reduction effect of convex threaded members is better than that of the grooved ones, when the parameters of pitch and thread diameter are fixed and the wind speed is at 350 km/h. Besides, the grooved thread rod with pitch $PPD=60$ mm and the diameter $d=1$ mm can achieve obvious effect of drag and noise, and the drag reduction rate of only single rod reaches 3%. However, for the type of grooved thread rod, the ratio of the thread diameter and cylinder diameter d/D is in the range of 0.017~0.067 when the pitch PPD is fixed. With the increase of thread diameter d , the aerodynamic noise and drag both increase, while the aerodynamic noise and drag decrease significantly when the value of d/D exceeds 0.067.

Key words: high-speed train; pantograph; bionic non-smooth structure; whorl structure; drag and noise reduction