

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.212

挡风墙尾流作用下导线表面粗糙度对 接触网正馈线气动特性的影响

赵珊鹏^{a,b}, 岳永文^a, 张友鹏^a

(兰州交通大学 a. 自动化与电气工程学院; b. 甘肃省轨道交通电气自动化工程实验室, 兰州 730070)

摘要:大风经过兰新高铁沿线挡风墙后,容易引发接触网正馈线发生舞动现象。为分析挡风墙尾流作用下导线表面粗糙度对正馈线气动特性的影响,基于流体力学建立铁路挡风墙尾流风洞实验装置与 5 种不同表面粗糙度导线模型。由于导线与整体计算域尺寸差距悬殊,对整体计算域的网格采用分块划分。利用流体仿真软件研究不同风速下正馈线的气动特性。结果表明:正馈线表面粗糙度越低,升、阻力增大越明显。在入口风速为 1 m/s 时,不同表面粗糙度正馈线升、阻力系数基本值保持稳定;在入口风速大于 5 m/s 时,随着表面粗糙度降低,正馈线升、阻力系数增大;不同表面粗糙度的正馈线尾部流场产生的漩涡不同,并且在导线凹凸处产生不同的细小漩涡。正馈线近壁面的气体流动特征发生较大变化,对导线气动特性影响较为明显。

关键词:接触网正馈线;挡风墙;表面粗糙度;气动特性

中图分类号:TM 351

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)01-046-11

The influence of wire surface roughness on the aerodynamic characteristics of the catenary positive feeder under the action of the wake flow of the wind-break wall

ZHAO Shanpeng^{a,b}, YUE Yongwen^a, ZHANG Youpeng^a

(a. School of Automatic & Electrical Engineering; b. Rail Transit Electrical Automation Engineering Laboratory of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China)

Abstract: After the strong wind passed through the windshield wall along the Lanzhou-Xinjiang high-speed railway, the catenary positive feeder was galloping. In order to analyze the influence of the surface roughness of the stranded wire on the aerodynamic characteristics of the positive feeder under the action of the wake flow of the wind-break wall, a windshield wake wind tunnel experimental device and five wire models with different degrees of surface roughness were established based on fluid mechanics. Due to the large gap between the size of the wire and the overall computing domain, the fluid grid of the overall computing domain is divided into blocks. The fluid simulation software is used to study the aerodynamic characteristics of the forward feeder under different inlet wind speeds. The results show that the lower the

收稿日期:2021-03-18 网络出版日期:2021-05-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51867013);兰州交通大学天佑创新团队计划(TY202010)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51867013) and Tianyou Innovation Team Plan of Lanzhou Jiaotong University (TY202010).

作者简介:赵珊鹏(1983—),男,副教授,硕士生导师,主要从事接触网线索舞动及防治技术研究,(E-mail) zsp@mail.lzjtu.cn。

通信作者:张友鹏,男,教授,博士生导师,主要从事电气化铁路外绝缘技术研究,(E-mail) zhangyp@mail.lzjtu.cn。

surface roughness of the positive feeder is, the more obvious the lift and drag increase. When the inlet wind speed is 1m/s, the basic values of the lift and resistance coefficients of positive feeders with different degrees of surface roughness remain stable. When the inlet wind speed is greater than 5 m/s, the lift and drag coefficients of the positive feeder increase as the surface roughness of the positive feeder decreases. The vortices generated in the tail flow field of positive feeder with different degrees of surface roughness are different, and different small vortices are generated at the concave-convex of the wire. The air flow characteristics near the wall of the positive feeder have changed greatly, and the influence on the aerodynamic characteristics of the wire is obvious.

Keywords: catenary positive feeder; wind-break wall; surface roughness; aerodynamic characteristics

兰新高铁地处中国西北地区,途经国内五大风区,常年有 7~8 级的大风天气出现,对兰新高铁列车安全运行造成了很大影响^[1-2]。在大风区段为了抵御风沙对兰新高铁高速列车运行的影响,在铁路沿线建设了挡风墙,防止列车运行中发生倾翻、脱轨等事故,挡风墙及接触网结构如图 1 所示。现场运营中发现挡风墙可以有效防止大风对列车运行的影响,但挡风墙“防车不防网”使接触网正馈线周围的气流风速增强,从而导致正馈线发生舞动现象^[3-5]。挡风墙尾流作用下正馈线周围气流会发生剧烈变化,而且导线表面流场具有随机性和短暂性,因此有必要对挡风墙尾流影响下正馈线的气动及流场特性进行深入研究。

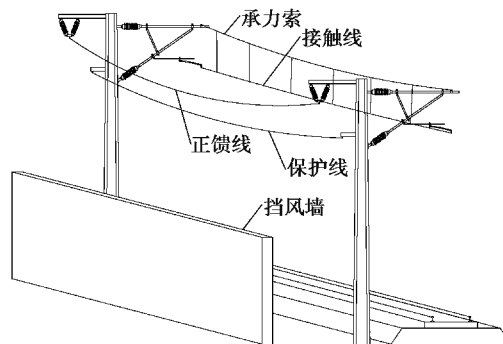


图 1 兰新高铁挡风墙及接触网结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Lanzhou-Xinjiang high-speed railway wind-break wall and catenary structure

导线气动特性研究属于圆柱绕流问题,国内外较多学者进行了相关研究,因导线占整体模型比例较小且便于网格划分,已有研究大多忽略了导线表面粗糙度对导线绕流的影响。Fage 等^[6]认为在流体力学中,当圆柱表面的这些凹凸小到不影响其绕流特性的测试时,可认为圆柱是光滑的。Tabatabai 等^[7]利用风洞试验研究导线的气动力特性时,常采用圆形导线代替真实导线,忽略绞线表面粗糙度的影响。张友鹏等^[8]研究了挡风墙对正馈线气动特性的影响,未考虑正馈线表面粗糙度对正馈线气动特性的影响。同时一些学者也关注到导线表面粗糙度对于导线或圆柱绕流具有一定影响。在常规的输电线体系中,导线截面的形状对其气动力特性产生重要的影响,作用在导线上的风荷载占整个输电线塔体系风荷载的 60%~80%^[9]。Votaw 等^[10]分别对光滑圆柱和多根不同绞线在雷诺数 $Re=200$ 、500 下进行了对比测试,并未发现斯托劳哈尔数发生变化。研究表明,在低雷诺数下导线表面边界层厚度比导线粗糙度大,绞线被埋在边界层内,从而不会因为表面粗糙度的变化引起导线表面流场及相应流体参数发生变化,但没有对雷诺数较大情况进行研究测试。Relf 等^[11]在英国国家实验室,测试雷诺数为 $Re=5 \times 10^4$ 时,不同圆柱表面的气动系数,测试得到多绞线阻力系数 $C_D=1$,而光滑圆柱的阻力系数 $C_D=1.19$,验证了相对于光滑表面绞线表面粗糙度对阻力系数有明显的影 响。刘军^[12]对光滑导线和真实输电导线进行流固耦合数值计算,研究导线表面粗糙度对导线

气动力以及流固耦合响应的影响。党朋等^[13]通过风洞试验装置对常规同心绞线、型线同心绞线和新型同心绞线的风阻力进行测试,新型绞线的风阻力系数随风速的增加而减小,常规绞线和型线绞线的风阻力系数随风速变化规律不同,得出绞线表面粗糙度会对导线风阻力系数产生影响。林影超^[14]利用图像采集与处理的手段获得导线表面的粗糙度,并通过实验分析了导线表面粗糙度随风沙流侵蚀的变化程度,以及不同风速对导线表面粗糙度的影响。Rodrguez 等^[15]对粗糙与光滑圆柱进行绕流研究,结果表明表面粗糙度会触发边界层向湍流过度,相对光滑表面考虑粗糙度会使阻力系数增大。Stringer 等^[16]在研究大范围雷诺数的圆柱绕流非定常 RANS 计算过程中,在雷诺数较大的情况下没有考虑圆柱表面的粗糙度对计算的影响,研究发现随着雷诺数的增大圆柱表面边界层减小,因此当边界层减小的时候圆柱表面的粗糙度就不应该被简单忽略。故在大风环境及挡风墙二次加速作用下研究接触网正馈线的气动特性,不能将具有一定表面粗糙度的正馈线简单地等效为光滑表面的圆柱导线。

笔者建立 5 种不同表面粗糙度的导线模型,在保证不同导线模型周围网格质量不变的情况下,分块划分整体计算域的流体网格。对不同表面粗糙度正馈线进行数值分析,研究挡风墙尾流作用下不同表面粗糙度对正馈线气动系数及导线流场的影响。根据所得的研究结果,可以为大风环境下接触网正馈线的架设及防舞提供一定的理论依据。

1 数值计算及网格优化

1.1 模型及数值计算

为研究大风区兰新高铁沿线挡风墙尾流作用下导线表面粗糙度对接触网正馈线气动特性产生的影响,选取现场架设的钢芯铝绞线(LBGLJ-300/25)建立正馈线模型^[17]。正馈线是由 7 根钢股和 48 根铝股绞合而成,最外层铝股数为 22,实物及截面模型如图 2 所示。

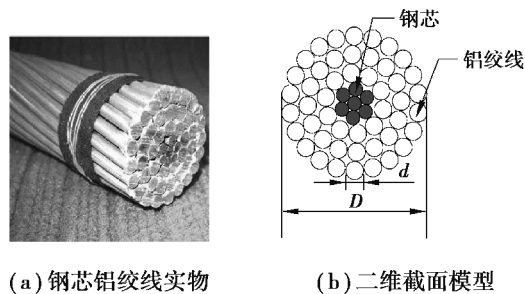


图 2 钢芯铝绞线(LBGLJ-300/25)实物及模型

Fig. 2 Real steel cored aluminum strand wire and its model (LBGLJ-300/25)

导线绕流问题一般采用黏性流体力学模型分析,在黏性流体力学中,流体的运动规律可用 N-S 方程进行描述,其在惯性直角坐标系下的连续性方程以及动量方程可表示为^[18]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + F_i. \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; t 为流动时间; $i, j = 1, 2, 3$; μ 为流体的动力黏性系数; F_i 为流体微元在 i 方向所受到的力。

正馈线的升力系数 C_L 、阻力系数 C_D 、斯托罗哈尔数 St 及雷诺数 Re 定义为

$$\begin{cases} C_D = \frac{1}{2} \frac{F_D}{\rho U^2 D} \\ C_L = \frac{1}{2} \frac{F_L}{\rho U^2 D} \\ St = \frac{fD}{U} \\ Re = \frac{\rho UD}{\mu} \end{cases} \quad (3)$$

式中: F_D 、 F_L 为导线所受气动升力和阻力; ρ 为空气密度; U 为入口风速; D 为正馈线外围直径; f 为旋涡脱落频率; μ 为流体动力黏度。

1.2 计算域网格优化

文章旨在研究挡风墙尾流作用下,导线表面粗糙度对正馈线气动特性的影响。因挡风墙的高度为 3.5 m,为避免流体计算域边界对挡风墙周围气流产生干扰,结合现场环境选取整体计算域大小为 23.8 m×15 m。计算域整体尺寸较大,而正馈线尺寸较小,两者相差悬殊,为提高导线气动特性计算结果的准确性,须保证导线周围网格质量。为节省计算资源,对整体计算域进行分区域划分,各区域之间通过 Interface 交界面进行流体交换与传递。对导线周围的流体计算域网格进行加密处理,在保证导线周围计算域网格高质量要求的前提下,减少远离导线的无关网格数量,可以大幅节省计算资源,提高计算效率,流体计算域网格如图 3 所示。

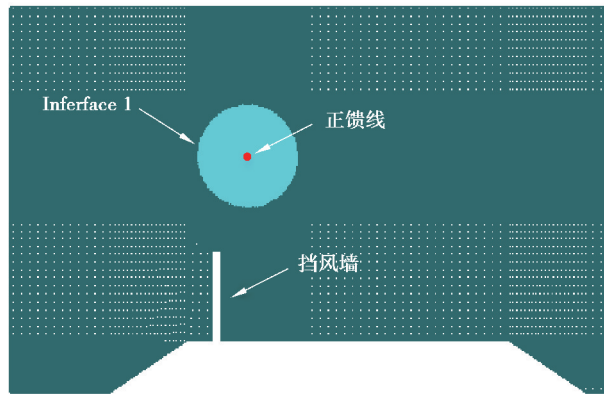


图 3 流体计算域网格示意图

Fig. 3 Schematic grids of computational domain

流体计算域是 CFD 数值计算的载体,导线周围网格的质量直接影响计算的效率及精确性。为了确保网格的高度独立性,采用低雷诺数的网格划分方法。 y^+ 值表示首层节点到无滑移壁面的无量纲距离,通常对流体的密度和黏度特性进行无量纲化,将首层节点距离与剪切应力 τ_w 相关联。保证网格在确定的约束条件下,采用基于平板理论的经验公式^[18],为

$$y_1 = Dy^+ \times \sqrt{74} Re^{-\frac{13}{14}}, \quad (4)$$

式中: y_1 为网格径向高度; y^+ 为首层节点到壁面的无量纲距离; τ_w 为剪切应力; ρ 流体密度; ν 流体黏度; D 导线直径; Re 为雷诺数。

通过对导线周围网格进行圆形分块加密可以较好地起到过渡作用,如图 4(a)所示。为确保正馈线周围网格质量,在导线周围取 0.5D 的加密层,确保不因网格差异引起流场变化,并对不同分块之间的网格进行精确匹配,如图 4(b)所示。 Re 较高时,对近壁面网格要求极高,壁面网格的法向增长率取 1.02,确保边界层中至少有 5 层网格单元,壁面网格周向宽度与径向高度 y_1 的长宽比保持在 20:1 以下。

为提高模型对速度较大和压强较高气流的敏感度,选取 Transition SST 模型进行流体仿真,是因为 Transition SST 模型对速度较大和压强较高的气流较为敏感,可以很好地处理正馈线表面的压力变化及高雷诺数的圆柱绕流问题,所得结果与试验结果更加吻合^[19]。计算域边界条件设置:气流从左向右垂直进入模型的流场,左侧边界为速度入口边界,在流体软件中设置不同的入口风速进行仿真计算,导线表面采用无

滑移壁面边界,右侧边界为压力出口边界。速度压力耦合采用 SIMPLEC 算法,压力方程用二阶离散精度,动量用二阶迎风模式。迭代收敛残差值为 1×10^{-5} ,计算时间步长取 0.01 s。

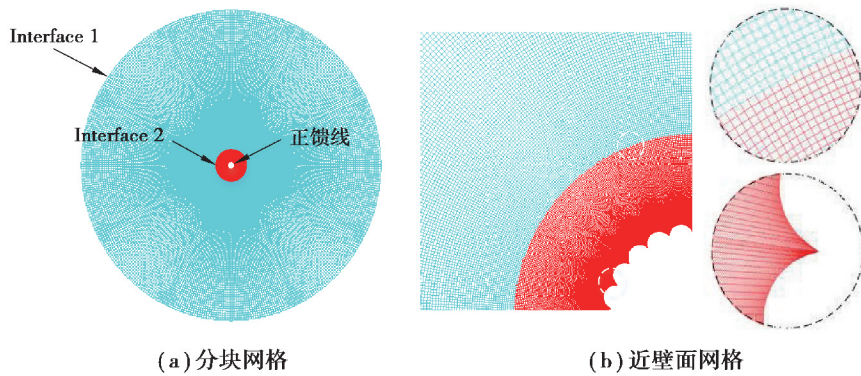


图 4 分块网格及近壁面网格

Fig. 4 Block grid and near-wall grid

2 仿真验证

为研究挡风墙对来流风的汇聚加速作用,建立了风洞试验装置,由风机、大开角段、稳定段、收缩段、试验段和扩散段组成,如图 5 所示。

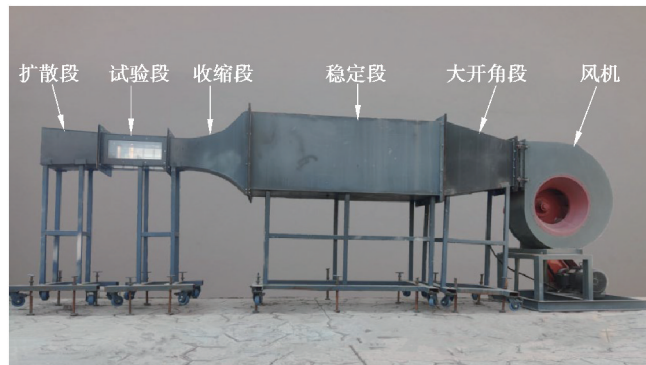


图 5 风洞试验装置

Fig. 5 Wind tunnel test device

在试验段中搭建缩尺挡风墙模型,在试验段中搭建缩尺挡风墙模型,通过风机调频控制,模拟不同入口风速,利用风速测量仪监测挡风墙后方正佛线位置处气流的增速情况。并建立相同的试验段仿真模型进行仿真计算,试验段模型流体计算域网格如图 6 所示。

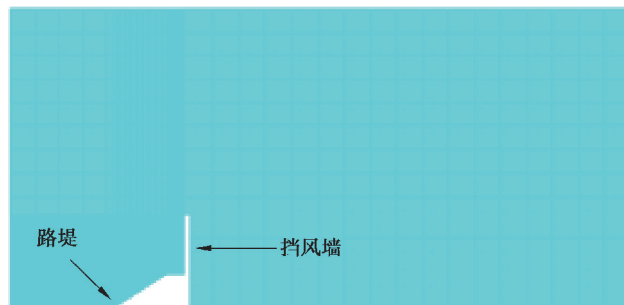


图 6 试验段流体计算域网格

Fig. 6 Fluid calculation domain grid of test section

对比不同入口风速下试验测量与仿真计算结果,如表 1 所示。

表 1 不同风速入口下风速试验测量与仿真计算对比

Table 1 Comparison of test measurement and simulation calculation results under different inlet wind speeds m/s

入口风速	测量值	仿真计算
5.26	9.89	9.91
7.55	13.76	14.05
10.14	18.29	18.70
13.03	24.17	23.87
16.75	31.71	30.50
20.40	38.50	37.00
22.13	42.80	40.08
27.40	52.94	49.45

对比表 1 中试验测量与仿真计算的数据,可知在入口风速低于 10.14 m/s 时,仿真监测风速略大于试验测量风速;入口风速大于 13.03 m/s 时,仿真监测风速略小于试验测量风速。考虑到试验装置的制作工艺及测量误差,产生的误差在合理范围内,从而验证了挡风墙对来流风的增速效果以及所采用仿真计算方法的正确性。

在研究过程中发现挡风墙会对正馈线处气流速度及周围流场产生重要影响,挡风墙后方产生的不规则大涡流也会一定程度上影响导线周围流场,如图 7 所示。

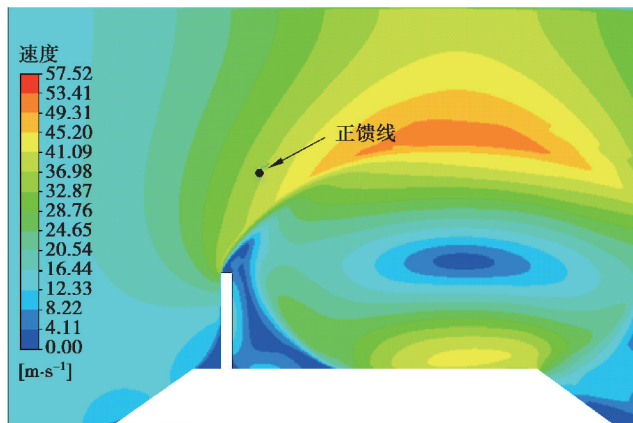


图 7 入口风速 $U=15$ m/s 时整体计算域速度云图

Fig. 7 Cloud chart of computational domain velocity with $U=15$ m/s

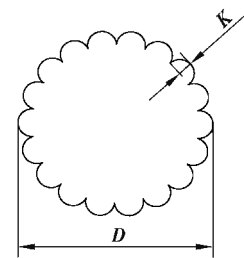


图 8 导线表面粗糙度

Fig. 8 Wire surface roughness

3 正馈线不同表面粗糙度的影响

3.1 不同截面模型及近壁面网格

根据导线的结构特征,导线表面的粗糙度可以量化为表面凸起的平均尺寸 K 与导线外径 D 之比^[6],如图 8 所示。

根据绞线表面粗糙度的计算方法,正馈线表面不同绞凸数对应导线表面粗糙度如表 2 所示。

表 2 正馈线的表面粗糙度与绞凸数

表面绞凸数 n	10	14	18	22	0
表面粗糙度/%	11.62	9.18	7.40	5.64	0.00

钢芯铝绞线的表面结构具有一定的绞凸特性,在风速较大环境下导线表面边界层的厚度会减小,导线表面凸起的部分暴露在边界层外部,从而会影响导线的气动特性^[20]。在保证外径相同(23.76 mm)的前提下,建立 5 种不同表面粗糙度的导线模型如图 9 所示。

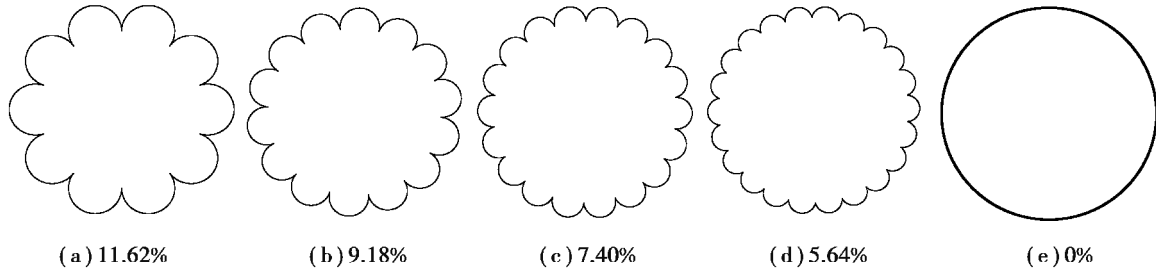


图 9 不同表面粗糙度的正馈线模型

Fig. 9 Positive feeder models with different degrees of surface roughness

为更好地分析导线表面粗糙度对正馈线气动特性产生的影响,在确保正馈线外域流场网格不变的情况下,仅更新不同导线表面粗糙度模型周围的网格,以提高仿真效率和准确度,不同表面粗糙度导线周围网格如图 10 所示。

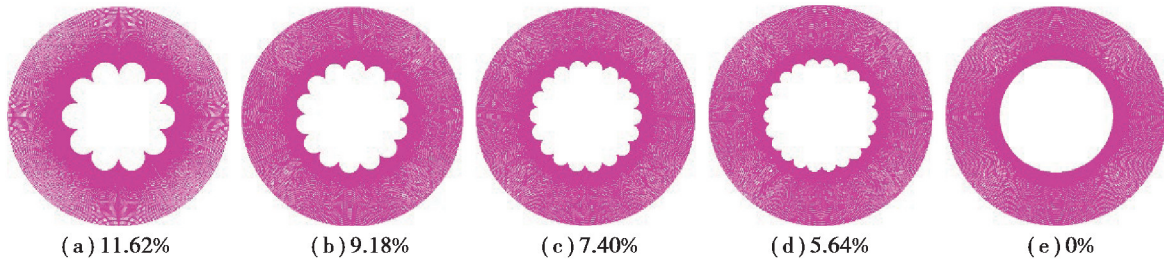
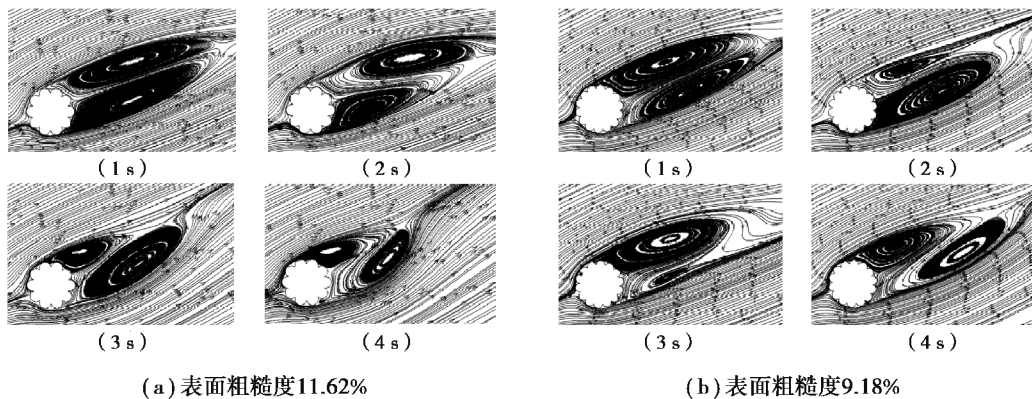


图 10 不同表面粗糙度的正馈线近壁面网格

Fig. 10 Near-wall grids of positive feeders with different degrees of surface roughness

3.2 不同表面粗糙度对导线周围流场的影响

对不同表面粗糙度正馈线周围流场进行可视化分析,可以得到不同表面粗糙度导线尾部流场的变化规律。入口风速为 15 m/s 时 1~4 s 时刻正馈线周围流场分布如图 11 所示。



(a) 表面粗糙度11.62%

(b) 表面粗糙度9.18%

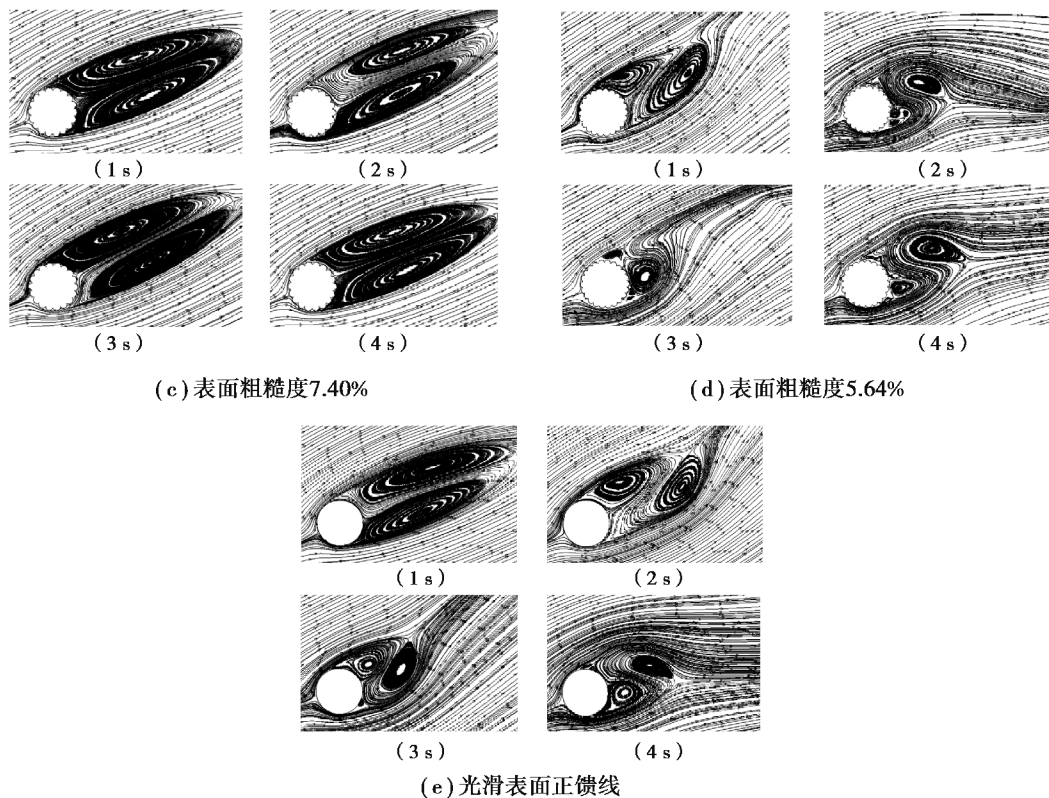


图 11 入口风速 15 m/s 时不同表面粗糙度正馈线尾部流场图

Fig. 11 Flow field diagram at the tail of positive feeders with different degrees of surface roughness at an inlet wind speed of 15 m/s

图 11(a) 为正馈线表面粗糙度为 11.62% 时尾迹区流场特征。从图中可以看出, 在一个周期内导线上表面附近的旋涡最先出现流场分离, 随后在导线后方逐渐拉伸变小形成 2 个交替变化的旋涡, 并且在导线最下方凹凸处会产生一小一大逆时针旋转的微型旋涡。图 11(b) 为正馈线表面粗糙度为 9.18% 时尾迹区流场特征, 在一个周期内导线下表面附近的旋涡最先出现流场分离, 其尾迹区流场特性与表面粗糙度为 11.62% 时的流场特性相似, 凹陷处产生的微型旋涡有所减小。图 11(c) 为正馈线表面粗糙度为 7.40% 时尾迹区流场特征, 导线上表面和下表面流场分离产生的旋涡较大且呈对称分布, 凹陷处产生的微型旋涡相比前 2 种粗糙度模型明显变小。图 11(d) 为正馈线表面粗糙度为 5.61% 时尾迹区流场特征, 相比前几种表面粗糙度较大的模型, 该模型尾迹处流场特性最为复杂。由于受来流角度的影响, 在一个周期内导线下表面会产生多个逆时针旋转的旋涡并逐渐合并, 不断发展为一个大的旋涡, 随后导线上、下表面分离旋涡发生交替脱落, 并且导线凹凸处产生的旋涡更小。

综上所述, 不同表面粗糙度的正馈线尾迹区产生的流场旋涡会发生明显差异, 不同粗糙度导线尾部流场旋涡的脱落方式也不同。粗糙导线的表面流场会出现提前分离现象, 并且会在导线凹凸处产生微型旋涡, 但是光滑导线表面的流场不会出现提前分离的现象。随着表面粗糙度的降低, 导线凹凸的部分产生的微型旋涡也越小, 表面粗糙度为 7.4% 的导线尾迹区旋涡脱落不明显, 粗糙度为 5.64% 导线尾迹区产生的旋涡最小。改变正馈线表面粗糙度, 导线尾部产生的旋涡会发生明显变化, 而且对导线表面的微型旋涡也会产生明显的影响。

3.3 正馈线气动系数分析

针对 5 种不同表面粗糙度的正馈线模型, 分别进行入口风速 $U=1, 5, 10, 15, 20, 25, 30$ m/s 的流体仿真计算。在数值计算过程中, 不同导线模型采用的外围流体计算域网格、流体参数设置、计算模型均相同, 不同表面粗糙度正馈线气动阻力系数如图 12 所示。

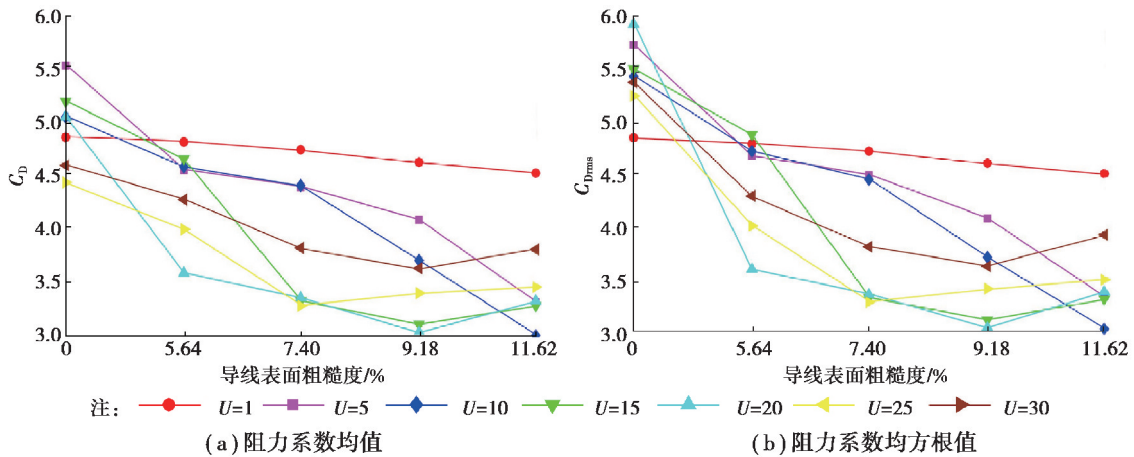


图 12 不同表面粗糙度正馈线气动阻力系数

Fig. 12 The aerodynamic drag coefficients of positive feeders with different degrees of surface roughness

由图 12 可知,在入口风速 $U=1$ m/s 时,光滑表面与不同表面粗糙度正馈线的气动阻力系数的均值及均方根均相差不大,没有随着导线表面粗糙度的变化而发生明显变化。这是因为在低风速环境下,导线表面层流的边界层比较厚,导线表面凸起的部分完全浸没在层流边界层中。因此在低风速环境下,导线表面粗糙度对正馈线的气动升力系数不会产生较大的影响,该仿真结果与 Votaw 和 Griffin 对低风速下光滑圆柱和多根不同绞线的研究结果相吻合^[6]。入口风速 $U=5, 10$ m/s 时,正馈线气动阻力系数随着正馈线表面粗糙度的降低呈明显上升趋势,这与 Relf 和 Powell 测试表面光滑圆柱和粗糙圆柱的阻力系数结果相似^[7]。入口风速大于 15 m/s 时,正馈线气动阻力系数在表面粗糙度小于 9.18% 之后,随着导线表面粗糙度的减小正馈线的气动阻力系数反而发生明显上升趋势,出现一个转折点,验证了相对于光滑表面导线,粗糙表面导线对阻力系数有明显的影 响。正馈线表面的粗糙度越大,流体对导线的作用力越小,故在较大风速环境下研究正馈线气动系数过程中不可简单地将导线近似等效为光滑圆柱。

在不同入口来流风速环境下针对 5 种不同表面粗糙度正馈线模型进行的数值仿真计算,正馈线气动升力系数如图 13 所示。

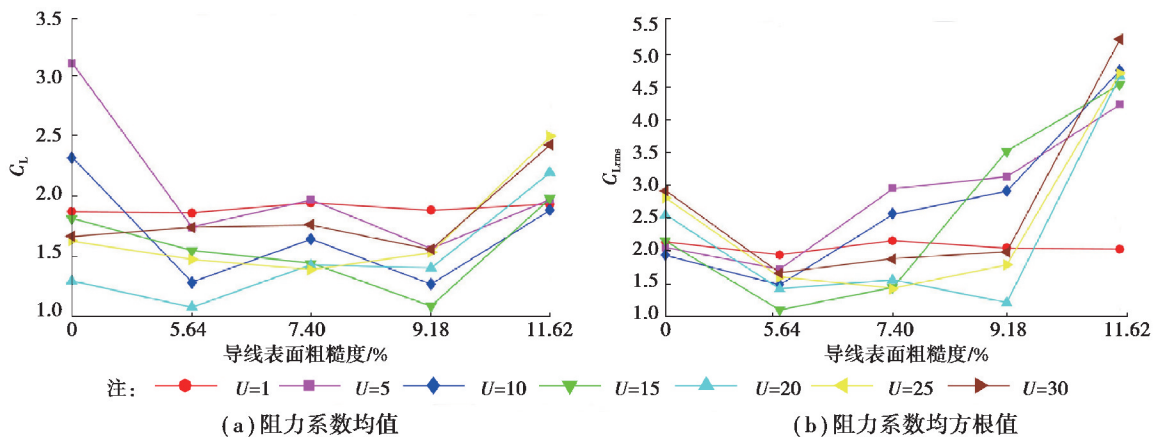


图 13 不同表面粗糙度正馈线气动升力系数

Fig. 13 The aerodynamic lift coefficients of positive feeders with different degrees of surface roughness

由图 13 可知,在入口风速为 $U=1$ m/s 时,光滑表面与粗糙表面正馈线气动升力系数的均值及均方根均相差不大,并没有随着表面的粗糙度的变化发生明显的变化。这是因为在低风速环境下,导线表面的边界层比较厚,导线表面的凹凸部分浸没在边界层中。因此,在低风速环境下导线表面粗糙度不会对正馈线的升力系数产生较大的影响。由图 13(a)可知,在入口风速大于 5 m/s 时,正馈线的气动升力系数没有随着导线表

面粗糙度的变化呈现一定的规律;在风速为 20 m/s 时,正馈线的气动升力系数随表面粗糙度的减小逐渐呈递减趋势,可知导线表面粗糙度的变化对正馈线的升力系数均值产生较大的影响。由图 13(b)可知,入口风速大于 25 m/s 时,表面粗糙度为 9.18%、7.4%、5.64%的正馈线升力系数变化不大且趋于稳定;在入口风速比较大的情况下,正馈线表面粗糙度的变化对导线气动升力系数影响较小。在较低风速环境下,关于导线的气动特性研究可以近似地将导线的凹凸表面等效为光滑的圆柱表面,以提高计算效率。

4 结 论

1) 挡风墙会对正馈线周围气流产生汇聚加速的作用,在低风速环境下的气动分析中,可以将正馈线等效为光滑导线。但在大风环境下的气动分析中,不可简单地将粗糙表面正馈线近似地等效为光滑表面导线。

2) 在入口风速为 1 m/s 时,不同表面粗糙度正馈线阻力系数和升力系数的基本值保持稳定;入口风速大于 5 m/s 时,随着导线表面粗糙度的降低,正馈线气动阻力系数逐渐增大,说明表面粗糙度对正馈线阻力系数产生较大影响。

3) 不同表面粗糙度正馈线尾部流场会产生不同的漩涡,气流会在粗糙的导线表面提前分离,并且在导线凹凸处产生细小的漩涡。随表面粗糙度的降低,导线表面漩涡变小,在光滑表面不会产生小漩涡。

参考文献:

- [1] 韩佳栋. 大风区高速铁路接触网附加导线舞动机理及防护措施研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(12): 125-129.
Han J D. Study on mechanism of high-speed railway OCS additional wire dancing in strong wind area and protective measures[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(12): 125-129. (in Chinese)
- [2] 黄双林. 兰新高铁防风标准研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(6): 14-17,73.
Huang S L. Research on the wind break standard of Lanzhou-Urumqi high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(6): 14-17,73.(in Chinese)
- [3] 肖建华, 姚正毅, 屈建军, 等. 兰新铁路百里风区极端风况特征及形成机制[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 130-137.
Xiao J H, Yao Z Y, Qu J J, et al. Characteristics and formation mechanism of extreme wind in hundred-Li wind zone along lanxin railway[J]. China Railway Science, 2016, 37(3): 130-137.(in Chinese)
- [4] 孟祥连, 李鲲, 谢胜波, 等. 兰新高铁大风区风况特征及防风工程设计分区[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 972-977.
Meng X L, Li K, Xie S B, et al. Strong wind environmental characteristics and countermeasures according to engineering divisions along a high-speed railway[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(5): 972-977.(in Chinese)
- [5] 孔化蓉. 强风区接触网附加悬挂零件适应性及安装方式探讨[J]. 电气化铁道, 2018, 29(S1): 131-135.
Kong H R. Investigation of adaptability and installation mode for additional suspension fittings of overhead contact line in strong wind area[J]. Electric Railway, 2018, 29(S1): 131-135. (in Chinese)
- [6] Fage A, Warsap G H. The effects of turbulence and surface roughness on the drag of a circular cylinder[J]. Aeronautical Research Committee, Rep and Memo, 1929:14-22.
- [7] Tabatabai M, Krishnasamy S G, Meale J, et al. Response of smooth body, trapezoidal wire overhead (compact) conductors to wind loading[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41(1/2/3): 825-834.
- [8] 张友鹏, 王彤, 赵珊鹏, 等. 兰新高铁大风区段挡风墙对接触网正馈线气动特性的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(7): 1628-1636.
Zhang Y P, Wang T, Zhao S P, et al. Influence of wind-break wall on aerodynamic characteristics of positive feeder of overhead contact line of Lanzhou-Xinjiang high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(7): 1628-1636.(in Chinese)
- [9] Japanese E C. Design standard on structures for transmissions[Z]. JEC-127-1979, Denkishoin, Japan, 1979.
- [10] Votaw C W, Griffin O M. Vortex shedding from smooth cylinders and stranded cables[J]. Journal of Basic Engineering, 1971, 93(3): 457-460.
- [11] Relf E F, Powell C H. Tests on smooth and stranded wires inclined to the wind direction and a comparison of result on stranded wires in air and water[J]. Aeronautical Research Committee, Rep and Memo, 1917:8-14.
- [12] 刘军. 高雷诺数下输电导线流固耦合数值模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Liu J. Numerical simulation of transmission lines fluid-structure interaction at high reynolds number[D]. Chongqing:

- Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [13] 党朋, 吴细毛, 刘斌, 等. 新型同心绞导线风阻力系数风洞试验[J]. 电线电缆, 2014(4): 30-33.
Dang P, Wu X M, Liu B, et al. Wind tunnel test on drag coefficient of new type concentric-lay-stranded conductors [J]. Electric Wire & Cable, 2014(4): 30-33.(in Chinese)
- [14] 林影超. 风沙环境对 LGJ-400/50 架空导线表面的侵蚀规律研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
Lin Y C. Research on LGJ-400/50 ACSR surface erosion characteristics in wind sand environment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015. (in Chinese)
- [15] Rodriguez I, Lehmkuhl O, Piomelli U, et al. Numerical simulation of roughness effects on the flow past a circular cylinder [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016(745):1-8.
- [16] Stringer R M, Zang J, Hillis A J. Unsteady RANS computations of flow around a circular cylinder for a wide range of Reynolds numbers[J]. Ocean Engineering, 2014(87):1-9.
- [17] 王玉环. 兰新高铁大风区接触网正馈线悬挂结构适应性分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(3): 124-127, 134.
Wang Y H. Adaptability analysis of suspended structure of overhead contact line in wind areas along Lanzhou-Urumqi high speed railway[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(3): 124-127, 134.(in Chinese)
- [18] Trias F X, Lehmkuhl O, Oliva A, et al. Symmetry-preserving discretization of Navier-Stokes equations on collocated unstructured grids[J]. Journal of Computational Physics, 2014(258):246-267.
- [19] 雷娟棉, 谭朝明. 基于 Transition SST 模型的高雷诺数圆柱绕流数值研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(2): 207-217.
Lei J M, Tan Z M. Numerical simulation for flow around circular cylinder at high Reynolds number based on Transition SST model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(2): 207-217.(in Chinese)
- [20] Zdravkovich M M. Flow around circular cylinders Vol.2: Applications[M]. Oxford: Oxford Science Publications, 2003.

(编辑 詹燕平)