

文章编号:1671-6833(2022)06-0057-07

光圆与非光圆绞突覆冰输电导线气动力特性分析

赵桂峰, 魏丹洋, 张 猛

(郑州大学 水利与土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 现有针对覆冰输电导线风致振动的模拟研究大多是将导线简化为理想光圆截面考虑其气动力特性的,对于实际导线绞突的截面特点考虑不足。采用 Fluent 软件研究覆冰光圆与非光圆绞突截面导线的气动力特性,分析二者气动力系数在不同风速、覆冰厚度、覆冰形状和导线直径时的特点和差异。结果表明:两种截面覆冰导线气动力系数差异较大,其中,阻力系数和扭转系数最大相对偏差可达100%,升力系数最大相对偏差可达-175%。采用非光圆绞突截面导线会增加周期内涡脱落的数量,使其波动更加剧烈。覆冰为新月形时,采用光圆截面导线会低估导线顺风向位移,高估横风向位移;覆冰为D形时,采用光圆截面导线比非光圆绞突截面导线下波动较为平缓且更有规律,会高估顺风向位移,低估横风向位移。鉴于两种截面覆冰导线在气动力、涡脱图和位移响应均存在较大差异,覆冰输电线路系统精细化抗风设计时应考虑导线截面绞突特性对其气动力的影响。

关键词: 气动力特性; 光圆与非光圆绞突导线; 覆冰导线; 风攻角; 旋涡脱落

中图分类号: TM726 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2022.06.002

0 引言

架空输电导线是一种大跨、柔性的悬索结构,极易产生风致振动,特别是覆冰导线的振动更易引起闪络、跳闸,甚至断线、倒塔等一系列事故。鉴于导线的气动力特性是研究输电线路结构风振响应的基础,已有研究对输电导线的气动力特性及其影响因素展开了较多的研究。

风洞试验方面,文献[1-5]采用风洞试验对不同分裂数、不同覆冰形状、不同风攻角、不同风速等条件下覆冰与未覆冰输电导线的气动力特性开展了研究。数值模拟方面,文献[6-8]利用不同的湍流模型对输电导线的气动力特性进行了分析,并与试验结果进行对比。

然而,上述研究均将导线简化为理想光圆截面考虑其气动力,对于实际常用的钢芯铝绞线导线因多层绞制形成的绞突截面特征考虑不足。文献[9-12]分析了导线的绞突特征对导线气动力的影响,但未对绞突导线覆冰时的情况进行研究;

Zdero 等^[13]虽然考虑了覆冰对绞线的影响,但囿于试验条件,仅分析了覆冰厚度对导线涡脱频率的影响,对于这两种截面导线气动力特性的差异并未充分研究。

基于上述分析,本文采用 Fluent 软件对比分析不同风速、不同导线直径、不同覆冰厚度和不同覆冰形状对光圆与非光圆绞突导线的气动力特性的影响,意图揭示两种截面覆冰导线气动力特性的差别,为输电线路结构的精细化抗风设计提供理论依据。

1 覆冰导线气动力分析基本理论

输电导线在空气中运动时,空气作用于导线上的力可以分为升力 F_l 、阻力 F_d 和扭转力 F_m 。这三者可统称为三分力。为便于分析,通常将三分力转化为无量纲的系数(升力系数 C_l 、阻力系数 C_d 、扭转系数 C_m)来进行计算分析。当风激励作用在输电导线上时,覆冰导线横截面的受力如图1所示。

收稿日期:2022-03-05;修订日期:2022-05-27

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(222300420549);郑州大学青年教师自然科学基金基础研究培育基金项目(JC21539028)

作者简介:赵桂峰(1978—),女,河南南阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事电网基础设施防灾减灾研究,E-mail:gfzhao@zzu.edu.cn。

通信作者:张猛(1978—),男,河南南阳人,郑州大学教授,博士,主要从事生命线工程电力系统结构防灾减灾研究,E-mail:zhangmeng@zzu.edu.cn。

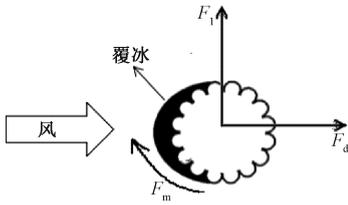


图1 覆冰输电导线的三分力

Figure 1 Three component force of transmission conductor

2 导线模型的建立与验证

2.1 导线计算参数

以实际中常用的 JL/G1A-400/35-48/7 钢芯铝绞线^[14]为例进行计算分析,根据 GB/T 1179—2008《圆线同心绞架空导线》^[15],其截面排布如图 2 所示。

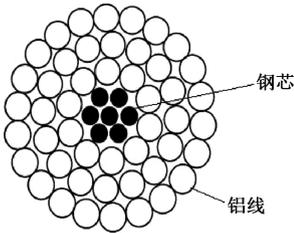


图2 钢芯铝绞线截面示意图

Figure 2 Schematic diagram of steel cored aluminum strand section

2.2 模型的建立

根据文献[13,16],利用 ICFM 软件建立输电导线的二维光圆和非光圆截面模型,如图 3 所示。

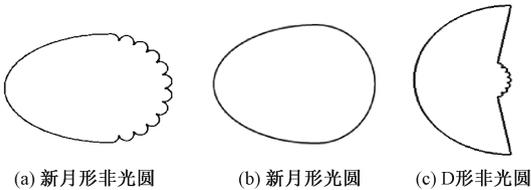


图3 输电导线截面示意图

Figure 3 Schematic diagram of transmission conductor section

模拟过程中要求计算域能够保证湍流充分发展,因此设置计算域如图 4 所示。其中 inlet 为进风口, outlet 为出风口,中间部分为覆冰导线, over-set 为网格加密区, D 为导线直径。加密区采用 interface 连接,进风口根据相应的工况进行设置,出风口采用压力出口边界条件,总压力设置为 0。湍流模型选取非直接模拟法中的 SST $K-\omega$ 模型,求解采用 Coupled 算法。

在 Fluent 求解计算之前,需要划分较为精确的网格以保证计算结果的准确度,本文采用网格衡量参数 y^+ 来确定较为合适的网格尺寸。对非

光圆绞突截面采用混合网格,对光圆截面采用结构网格和混合网格的效果是一致的,鉴于划分网格的简便性,采用结构网格即能满足要求。而采用重叠网格的方式可以更加方便地改变风攻角。以新月形覆冰非光圆截面为例,网格划分后的示意图如图 5 所示。

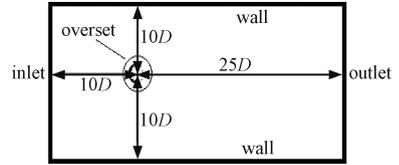


图4 数值模拟计算域

Figure 4 Numerical simulation domain

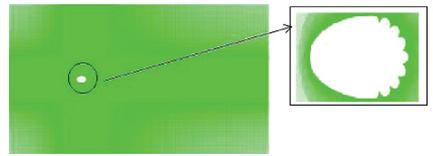


图5 网格划分示意图

Figure 5 Schematic diagram of grid division

2.3 网格无关性及模型验证

为验证本文建模和分析方法的合理性,本文采用与文献[13]相同的建模参数和工况来进行网格无关性验证,同时将本文结果与该文献的风洞试验结果进行对比。与文献[13]对应的工况:导线直径为 30.5 mm,覆冰厚度为 1.1 D 、1.4 D ,风攻角为 0°,风速为 5~20 m/s,每 2.5 m/s 计算一个工况。采用粗网格、中网格和细网格来进行网格无关性的验证,相关网格参数见表 1,分析结果见图 6。

表1 网格参数

Table 1 Grid parameters

网格大小	y^+	第1层网格边长/mm	背景区网格边长/mm	网格总数
粗	2.0	0.05	0.9	175 755
中	1.0	0.04	0.7	331 418
细	0.5	0.02	0.5	547 629

从图 6 可知,当风速不变时,同一覆冰厚度的导线在不同网格尺寸下的涡脱频率基本保持不变。对比可知,粗网格、中网格和细网格下涡脱频率最大偏差值分别为 18%、6%和 7%。综合考虑结果精度和机时成本,选择中网格尺寸进行计算。

3 计算结果与分析

分析不同风速、覆冰厚度、覆冰形状和导线直径对光圆与非光圆绞突截面导线的气动力特性的影响。

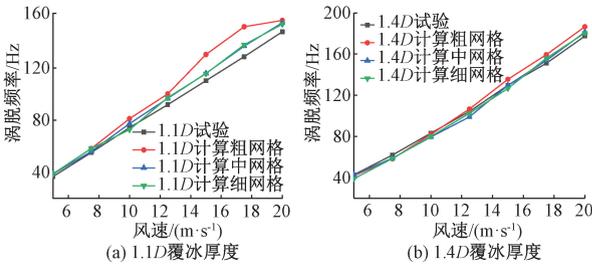


图 6 不同尺寸网格下覆冰导线的涡脱频率

Figure 6 Vortex shedding frequency of ice-coated conductor with different grid sizes

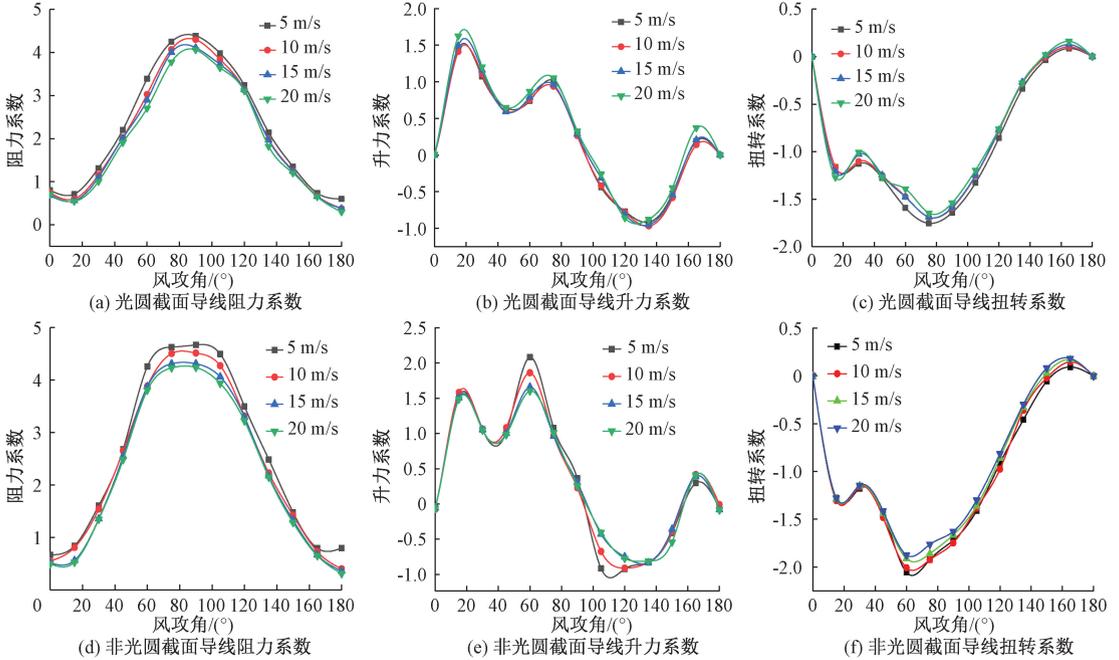


图 7 不同风速下两种截面导线三分力系数对比

Figure 7 Comparison of three component coefficients of two section conductors of different wind speeds

由图 7 可知,两种截面导线的三分力系数随风速的变化趋势基本一致,但是局部有所不同。导线表面的突起会增大导线升力系数峰值点所对应的风攻角,减小导线阻力系数和扭转系数最小值点出现所对应的风攻角。当风速不小于 20 m/s、风攻角为 80°~88°和 178°~180°时,两种截面导线的三分力系数相对偏差均在 ±5% 以内。在其余的风速和风攻角下,两种截面导线的三分力系数均相差较大,其中,阻力系数最大相对偏差可达 -45%,升力系数最大相对偏差可达 100%,扭转系数最大相对偏差可达 75%。

提取两种截面导线气动力系数相对误差最大工况下的涡量云图以及顺风向、横风向位移时程曲线进行分析对比,如图 8、9 所示。

由图 8 可知,非光圆截面导线会增加周期内涡脱落的数量,由于导线的突起会导致流体分离点提前,从而产生更多的小旋涡,同时使其受力更

3.1 风速的影响

导线直径为 26.8 mm,风攻角为 0°~180°,冰形为新月形,覆冰厚度为 20 mm,风速为 5、10、15、20 m/s,两种截面导线的三分力系数如图 7 所示。本文中 G 代表光圆,F 代表非光圆;相对偏差=(非光圆截面三分力系数-光圆截面三分力系数)/非光圆截面三分力系数×100%;阻力系数、升力系数、扭转系数均取其均值;X 代表顺风向位移,Y 代表横风向位移。

加的不均匀,波动更加的复杂。由图 9 可知,非光圆截面的顺风向位移时程曲线相对于光圆截面导线波动更剧烈,其横风向位移反而相对较小并且光圆截面导线位移峰值总是早于非光圆截面出现。

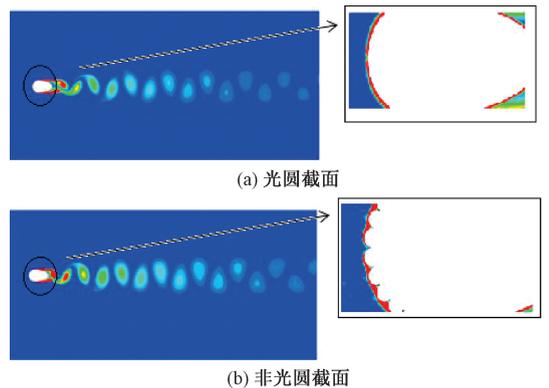


图 8 风速因素下覆冰导线的涡量图

Figure 8 Vorticity diagram of ice-coated conductor with wind speed factor

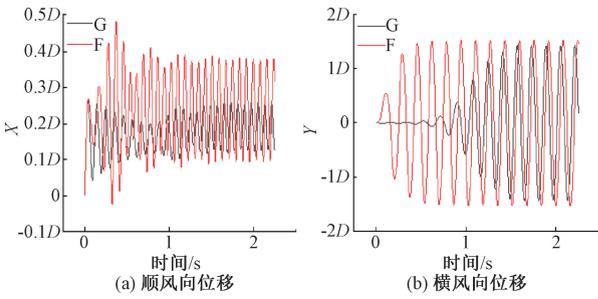


图9 风速因素下覆冰导线的位移时程图

Figure 9 Displacement time history of ice-coated conductor with wind speed

3.2 覆冰厚度的影响

导线直径为 26.8 mm, 风速为 15 m/s, 风攻角为 0° ~ 180°, 冰形为新月形, 覆冰厚度为 5 ~ 30 mm, 计算结果如图 10 所示。

由图 10 可知, 在风攻角为 25° ~ 165° 时, 非光圆截面导线的阻力系数基本上大于光圆截面导线, 且其升力系数随覆冰厚度的增加更加容易产

生尖峰值。当覆冰厚度为 25 ~ 30 mm、风攻角为 107° ~ 122° 和覆冰厚度 > 25 mm、风攻角为 0° ~ 5°、178° ~ 180° 时, 三分力系数的相对偏差均在 ±5% 之内。而在其他覆冰厚度和风攻角下, 两种截面导线三分力系数相差较大, 其中, 阻力系数最大相对偏差可达 -31%, 升力系数最大相对偏差可达 -175%, 扭转系数最大相对偏差可达 100%。当考虑覆冰厚度影响时, 随着覆冰厚度的增加, 两种截面导线的三分力系数差别逐渐增大, 特别是对升力系数影响最大。

图 11 给出了两种截面导线气动力相对偏差最大工况处导线的涡量云图。可以看出, 非光圆导线的涡脱图波动更加剧烈, 涡脱数量明显增多, 说明其受力波动更大。图 12 为覆冰厚度因素下的位移时程图。可以看出, 光圆截面导线的顺风向位移小于非光圆截面导线, 而其横风向位移反而大于非光圆截面导线。

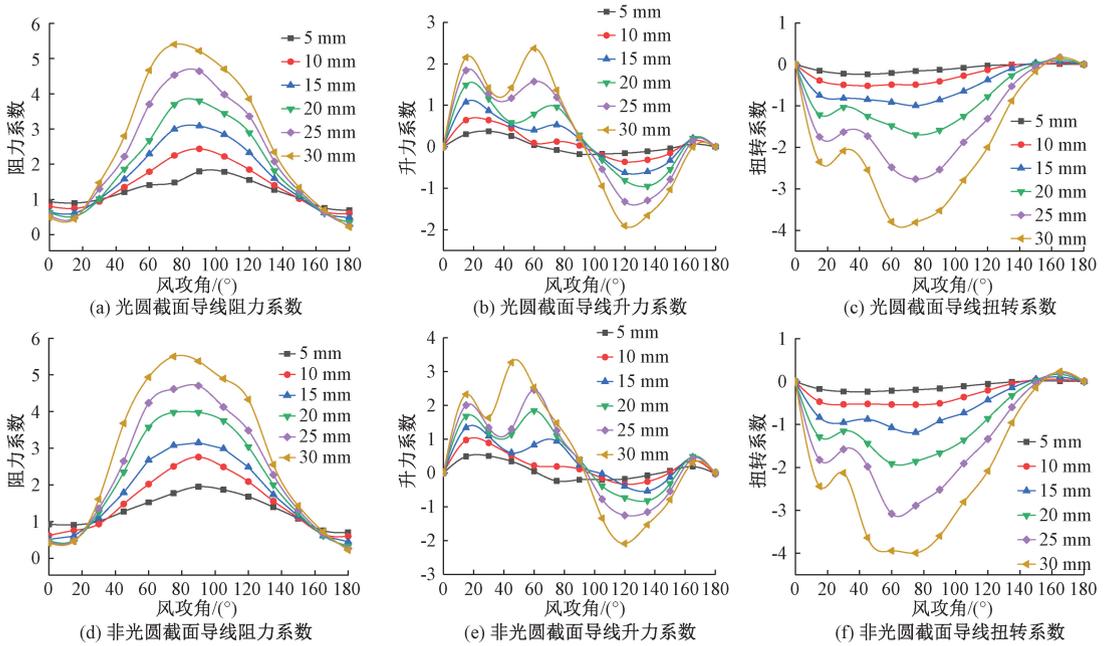


图 10 不同覆冰厚度下两种截面导线三分力系数对比

Figure 10 Comparison of three component coefficients of two section conductors with different icing thickness

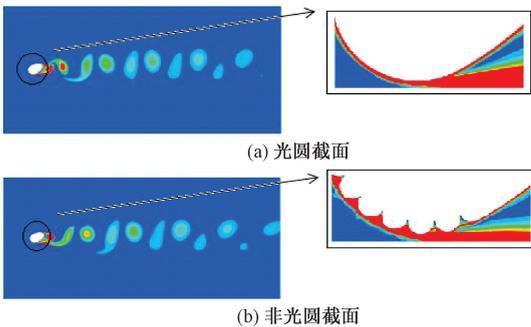


图 11 覆冰厚度因素下导线的涡量图

Figure 11 Vorticity diagram with of conductor icing thickness factor

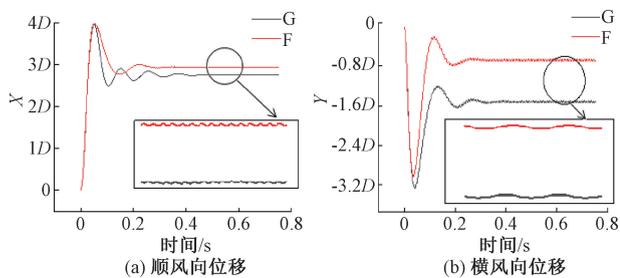


图 12 覆冰厚度因素下导线的位移时程图

Figure 12 Displacement time history of conductor with icing thickness factor

3.3 覆冰形状的影响

导线直径为 26.8 mm,风速为 15 m/s,风攻角为 0°~180°,覆冰厚度为 20 mm,冰形为 D 形和新月形,两种截面导线的三分力系数如图 13 所示。

从图 13 可知,覆冰导线在不同覆冰形状下的三分力系数有较大的不同。两种截面导线在 D 形覆冰下阻力系数在风攻角为 0°和 180°处较大,原因是其在这两处风攻角对应的迎风面较大,与新月形覆冰情况正好相反。

D 形覆冰下,非光圆截面导线的升力系数均大于光圆截面,且波动更明显,而阻力系数基本上小于光圆截面。两种截面导线在 D 形覆冰下的

升力、扭转系数随风攻角的波动比新月形覆冰大,由此可知 D 形覆冰下的迎风面随风攻角的变化更大,新月形覆冰截面具有良好的流线型,气动力系数随风攻角的变化相对平滑。当覆冰形状为新月形、风攻角为 156°~174°时,三分力系数的相对偏差在±5%之内。当覆冰形状为 D 形,风攻角为 50°~55°、85°~95°、115°~134°时,三分力系数的相对偏差在±5%之内。在其他风攻角处,三分力系数相差均较大。当考虑覆冰形状影响时,不论覆冰形状为新月形还是 D 形,两种截面导线的三分力系数均存在较大差异,最大相对偏差达到 172%。

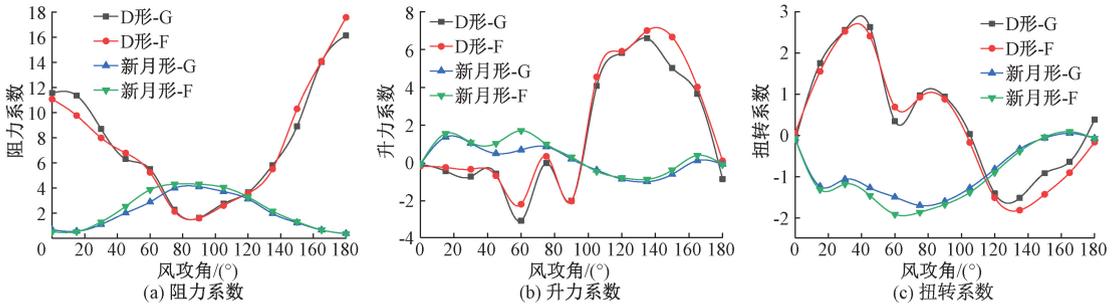


图 13 不同冰形下两种截面导线三分力系数对比

Figure 13 Comparison of three component coefficients of two section conductors in different ice types

图 14、15 分别为 D 形覆冰时三分力系数存在最大相对偏差时的流量图和位移时程图。从图 14 可知,在 D 形覆冰下,在绞线处出现多个小涡,致使两种截面导线的涡脱的方向出现些许不同,并且增大了涡的大小。由图 15 可以看出,非光圆截面导线的顺风向和横风向位移波动较剧烈,光圆截面导线的顺风向位移大于非光圆截面,达到了 14D,而横风向位移反而小于非光圆截面。

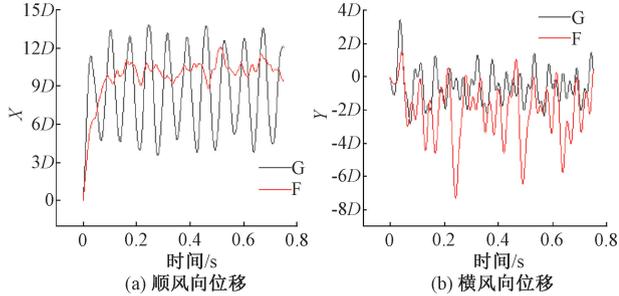


图 15 D 形覆冰时导线的位移时程图

Figure 15 Displacement time history of D-shaped ice-coated conductor

为 20 mm,覆冰形状为新月形,导线直径为 23.9、26.8、33.8 mm 时,两种截面导线的三分力系数如图 16 所示。

由图 16 可知,非光圆截面导线三分力系数随着导线直径的变化波动更大,由此可知非光圆截面导线三分力系数受导线直径影响更大,不同直径导线在流场中所受气动力波动更加明显。当 26.8 mm ≤ 导线直径 < 33.8 mm、风攻角为 175°~180°,导线直径 ≥ 33.8 mm、风攻角为 38°~44°时,三分力系数的相对偏差均在±5%以内。在其他导线直径和风攻角处,三分力系数相差较大,阻力系数的最大相对偏差可达 100%,升力系数的最大相对偏差可达-136%,扭转系数的最大相对偏

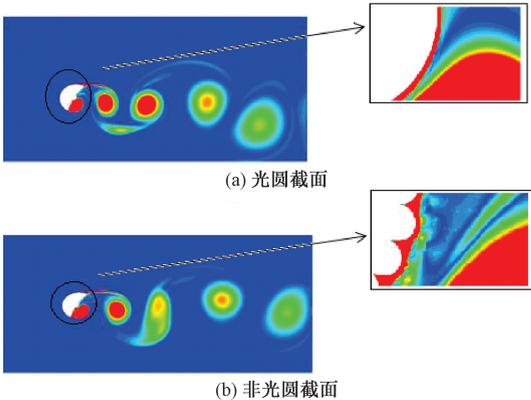


图 14 D 形覆冰时导线的涡量图

Figure 14 Vorticity diagram of D-shaped ice-coated conductor

3.4 导线直径的影响

风速为 15 m/s,风攻角为 0°~180°,覆冰厚度

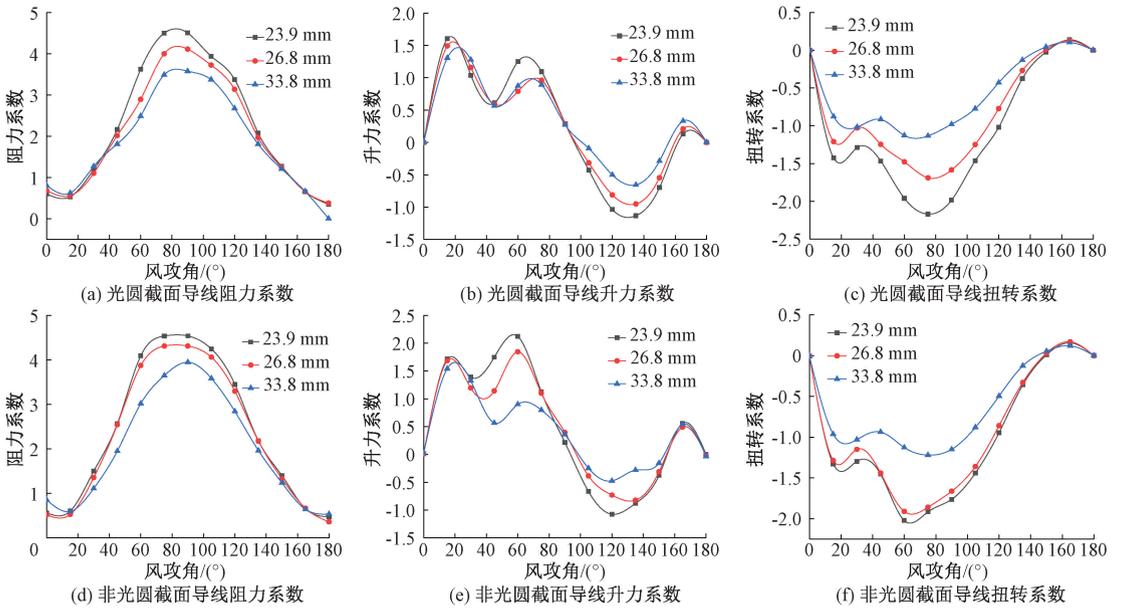


图 16 不同导线直径下两种截面导线三分力系数对比

Figure 16 Comparison of three component coefficients of two section conductors under different conductor diameters

差可达 100%。随着导线直径的变化,两种截面导线的气动力系数值存在明显的不同,特别是对升力系数和扭转系数来说,非光圆截面导线升力系数的波动更大。

图 17、18 分别为考虑导线直径影响时三分力系数存在最大相对偏差时导线的涡量图和位移时程图。

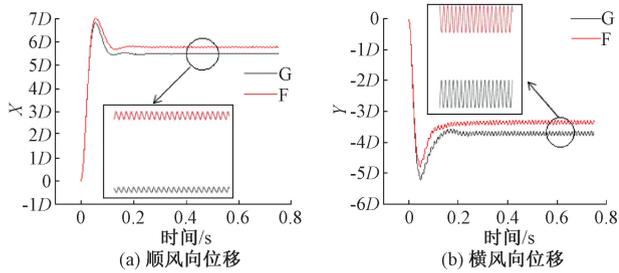


图 18 考虑导线直径影响时导线的位移时程图

Figure 18 Displacement time history of conductor when considering the influence of wire diameter

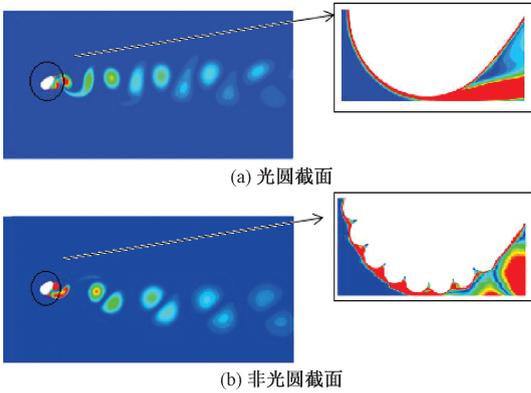


图 17 考虑导线直径影响时导线的涡量图

Figure 17 Vorticity diagram of conductor when considering the influence of wire diameter

由图 17 可知,非光圆截面导线涡结构基本呈现为 2P 模式,而光圆截面导线基本呈现为 2S 模式,非光圆截面导线的小涡明显增多。由图 18 可知,导线已经开始发生大幅振动,其顺风向位移最大达到 7D,横风向位移最大值达到 8D,仍然呈现出光圆截面的顺风向位移小于非光圆截面导线,而其横风向位移反而大于非光圆截面导线的特征。

4 结论

(1) 两种截面导线三分力系数随不同影响因素的变化趋势基本一致,但是在数值上存在较大差异,且对导线升力系数影响最大。

(2) 采用非光圆截面导线会增加周期内涡脱落的数量,由于导线的突起会致使流体分离点提前从而产生更多小的旋涡,同时使其受力更加不均匀,波动更加剧烈,甚至会改变涡的结构。

(3) 新月形覆冰下,采用光圆截面导线会低估导线的顺风向位移,高估横风向位移;D 形覆冰下,采用光圆截面导线得到的位移时程比非光圆截面导线下的较为平缓且更有规律,会高估导线顺风向位移,低估横风向位移。

(4) 两种截面覆冰导线在气动力、涡脱图和位移响应均存在较大差异,最大相对偏差可达 175%。阻力系数最大相对偏差达到 100%,升力系数最大相对偏差达到 175%,扭转系数最大相

对偏差达到100%。因此覆冰输电线路结构精细化抗风设计时应考虑到导线截面绞突特征对其气动力的影响。

参考文献:

- [1] 谢强,孙启刚,管政.多分裂导线整体阻力系数风洞试验研究[J].电网技术,2013,37(4):1106-1112.
XIE Q, SUN Q G, GUAN Z, et al. Wind tunnel test on global drag coefficients of multi-bundled conductors [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2013, 120: 9-18.
- [2] PRICE S J. Wake induced flutter of power transmission conductors [J]. Journal of sound and vibration, 1975, 38(1): 125-147.
- [3] 李万平.覆冰导线群的动态气动力特性[J].空气动力学学报,2000,18(4):413-420.
LI W P. Dynamic aerodynamic characteristics of the galloping of bundled iced power transmission lines[J]. Acta aerodynamica sinica, 2000, 18(4): 413-420.
- [4] 顾明,马文勇,全涌,等.两种典型覆冰导线气动力特性及稳定性分析[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37(10):1328-1332.
GU M, MA W Y, QUAN Y, et al. Aerodynamic force characteristics and stabilities of two typical iced conductors[J]. Journal of tongji university (natural science), 2009, 37(10): 1328-1332.
- [5] 严波,蔡萌琦,吕欣,等.四分分裂导线尾流驰振数值模拟研究[J].振动与冲击,2015,34(1):182-189.
YAN B, CAI M Q, LYU X, et al. Numerical simulation on wake galloping of quad bundle conductor[J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(1): 182-189.
- [6] BRAUN A L, AWRUCH A M. Aerodynamic and aeroelastic analysis of bundled cables by numerical simulation[J]. Journal of sound and vibration, 2005, 284(1/2): 51-73.
- [7] 何小宝,严波,伍川,等.双分裂导线尾流诱发振荡数值模拟研究[J].振动与冲击,2017,36(4):59-65,98.
HE X B, YAN B, WU C, et al. A numerical simulation on wake-induced oscillation of twin bundle conductor lines [J]. Journal of vibration and shock, 2017, 36(4): 59-65, 98.
- [8] 王少华.基于Fluent的覆冰导线气动特性分析[J].高压电器,2012,48(1):64-69.
WANG S H. Analysis of aerodynamic characteristics of iced conductor based on fluent[J]. High voltage apparatus, 2012, 48(1): 64-69.
- [9] 刘成,刘慕广,邹云峰.考虑绞凸特征的输电导线气动力CFD模拟[J].铁道科学与工程学报,2020,17(1):215-223.
LIU C, LIU M G, ZOU Y F. CFD simulation of transmission lines aerodynamics considering the twisted convex characteristics [J]. Journal of railway science and engineering, 2020, 17(1): 215-223.
- [10] ZDERO R, TURAN Ö, HAVARD D G. Toward understanding galloping: near-wake study of oscillating smooth and stranded circular cylinders in forced motion [J]. Experimental thermal and fluid science, 1995, 10(1): 28-43.
- [11] KEYHAN H, MCCLURE G, HABASHI W G. Dynamic analysis of an overhead transmission line subject to gusty wind loading predicted by wind-conductor interaction [J]. Computers & structures, 2013, 122: 135-144.
- [12] 晏致涛,王灵芝,刘军,等.表面粗糙度对导线风荷载及涡激振动的影响[J].振动与冲击,2018,37(7):146-151.
YAN Z T, WANG L Z, LIU J, et al. Effects of surface roughness of conductors on their wind loads and vortex-induced vibration [J]. Journal of vibration and shock, 2018, 37(7): 146-151.
- [13] ZDERO R, TURAN O F. The effect of surface strands, angle of attack, and ice accretion on the flow field around electrical power cables [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2010, 98(10/11): 672-678.
- [14] 张猛,梁任,赵桂峰.架空导线径向温差及允许载流量研究[J].郑州大学学报(工学版),2020,41(1):1-7.
ZHANG M, LIANG R, ZHAO G F. Study on radial temperature distribution and maximum ampacity of overhead conductors [J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2020, 41(1): 1-7.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.圆线同心绞架空导线:GB/T 1179—2008[S].北京:中国标准出版社,2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Round wire concentric lay overhead electrical stranded conductors: GB/T 1179—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [16] 杨晓辉,余江,楼文娟.基于子导线气动力参数的D形覆冰八分裂导线舞动研究[J].科技通报,2019,35(1):224-231.
YANG X H, YU J, LOU W J. Study on galloping of D-shaped iced eight-bundled conductors based on sub-conductor aerodynamic coefficient [J]. Bulletin of science and technology, 2019, 35(1): 224-231.

investigated in the conditions of influent carbon-phosphorus ratios of 330/8, 330/12, 330/16, 330/20. The results showed that the decrease of carbon-phosphorus ratios could enhance the activity of phosphorus accumulating bacteria, could improve the sludge settleability, and could significantly improve the system's nitrogen and phosphorus removal performance. When the influent carbon-phosphorus ratios changed from 330/8 to 330/20, the specific phosphorus uptake in the aerobic stage increased from 9.502 mg/g to 17.764 mg/g, increasing by 86.95%. With the impact of increasing phosphorus concentration, the phosphorus accumulating bacteria would absorb more organic matter by anaerobic phosphorus releasing, and the experimental effluent quality will be improved. During the anaerobic period, the pH decreasing rate was significantly correlated with the phosphorus release rate ($R^2=0.667$), and the pH curve reflected the characteristics of anaerobic respiration in the system. ORP decreased continuously in the anaerobic stage, and two platform appeared in the aerobic stage. The change process of PO_4^{3-} -P concentration could be indicated by online monitoring of ORP changes, and the time point of the end of anaerobic phosphorus release could be determined. When the influent COD remained unchanged, increasing the influent phosphorus concentration could enhance the microbial activity, improve the sludge sedimentation performance and the system's nitrogen and phosphorus removal performance, which would have a favorable impact on the activated sludge system.

Keywords: phosphorus shock loading; activated sludge; SBR reactor; nitrogen and phosphorus removal; sludge settleability

(上接第 63 页)

Aerodynamic Characteristics Analysis of Smooth Circular and Non Smooth Circular Ice-coated Conductors

ZHAO Guifeng, WEI Danyang, ZHANG Meng

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Most of the existing simulation studies on the wind-induced vibration of ice-coated conductors simplify the conductor to an ideal smooth circular section and accept its aerodynamic characteristics, but the section characteristics of the actual conductor twist are not considered enough. In this study, Fluent software is used to study the aerodynamic characteristics of ice-coated smooth circular and non smooth circular twisted section conductors, and to analyze the characteristics and differences of their aerodynamic coefficients at different wind speeds, icing thickness, icing shape and conductor diameter. The results showed that the aerodynamic coefficients of ice-coated conductors with two sections were quite different, among which the maximum relative deviation of drag coefficient and torsion coefficient could reach 100%, and the maximum relative deviation of lift coefficient could reach -175%. The use of non smooth circular twisted section conductor could increase the number of vortex shedding in the cycle and made its fluctuation more violent. When the icing was crescent shaped, the smooth circular section conductor could underestimate the downwind displacement and overestimate the crosswind displacement of the conductor. When the icing was D-shaped, the fluctuation of smooth circular section conductor was smoother and more regular than that of non smooth circular twisted section, which could overestimate the downwind displacement and underestimate the crosswind displacement. In view of the large differences in aerodynamic force, vortex shedding diagram and displacement response between the two types of coated ice conductors, the influence of conductor cross-section stranded characteristics on aerodynamic force should be considered in the fine wind resistance design of coated ice transmission line system.

Keywords: aerodynamic characteristics; smooth and non smooth fine conductor; ice-coated conductors; wind attack angle; vortex shedding