DOI: 10. 3969/j. issn. 1674 – 1951. 2020. 02. 012

综合能源背景下风电叶片雷击防护安全研究

Study on wind turbine blade protection against lightening applied in comprehensive energy

李新凯 刘蔚 涨廷军 汪佩明 赵健 孙曼杰 LI Xinkai ,LIU Wei ZHANG Tingjun ,WANG Peiming , ZHAO Jian ,SUN Manjie

(中国华电科工集团有限公司,北京 100070)

(China Huadian Engineering Company Limited, Beijing 100070, China)

摘 要: 雷击是造成风电叶片损坏的重要因素之一 综合能源背景下风电设备安全可靠性更加突出。以提高风电机组雷击安全为目的 设计了一种叶片外敷导体的风电叶片雷击防护方案 ,并从理论及实验角度验证了该方案的雷击防护效果。重点以风力机专用翼型 DU93 - W - 210 翼型为研究对象 ,采用计算流体力学(CFD) 方法 ,研究了翼型外敷导体直径对翼型气动性能的影响规律。研究结果显示 ,随着导体直径的增加 ,翼型升力系数线性减小 ,翼型阻力系数线性增加 ,升阻比下降。0°攻角时 ,带导体翼型升力系数下降最多 ,当导体直径为 10 mm 时 ,升力系数最多下降约 10%。4°~16°攻角时升力系数下降相差不大 ,升力系数平均下降了约 3%。研究结论可用于指导风电叶片新型接闪系统设计 提高风电机组雷击安全可靠性。

关键词: 综合能源; 雷击; 安全; 风电; 叶片; 翼型; 计算流体力学

中图分类号: TE 09: TM 614 文献标志码: A 文章编号: 1674 - 1951(2020) 02 - 0063 - 05

Abstract: Lightning stroke is an important reason for wind turbine blade damage , and the safety and reliability of wind turbine equipment is more prominent in comprehensive energy utilization. To improve the protection against lightning for wind turbines , an anti-lightning scheme that covers wind turbine blades with external conductors is designed. The effect of the scheme has been verified theoretically and experimentally. Taking the DU93 – W – 210 airfoil which is specialized for wind turbines as an research objective , using computational fluid dynamics (CFD) method , the influence of the external conductor diameter on the aerodynamic performance of this airfoil is studied. It is found that with the increase of the conductor diameter , the lift coefficient of the airfoil decreases linearly , and the drag coefficient of the airfoil increases linearly and the lift-drag ratio decreases. At a 0° attack angle , the lift coefficient of the airfoil with conductor drops the most. When the diameter of conductor is 10 mm , the lift coefficient decreases by 10% at the most . At a 4° – 16° attack angle , lift coefficient reduces slight , which is roughly 3% on average. The research conclusion can be used to guide the design of new lightning arresting system for wind turbine blades and improve the safety and reliability of wind turbine units.

Keywords: comprehensive energy; lightning; safety; wind turbine; blade; airfoil; CFD

0 引言

雷击是影响风电机组安全运行的主要因素之一。风电机组的本体结构高耸突出,且常位于旷野或山区地带,是地面上容易受到雷电直击的大型金属性结构体^[1]。同时,由于风电机组叶片叶尖的对地高度随机组单机容量的增大而不断增加,风电机组在空间引雷的效果明显增强。这导致大容量机组的雷击损坏事故率进一步上升^[2]。欧美以及日本等

收稿日期: 2019 - 11 - 04; 修回日期: 2020 - 01 - 16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51806221)

国的运行数据表明^[3] ,风力发电机组所遭受的绝大多数雷击的雷击点位于机组的叶片^[4]。巨大的雷电流通常由风力发电机组的叶片注入机组 ,并常在叶片的内部或表面形成电弧。现代风电机组的叶片都是由复合材料 ,如玻璃纤维增强复合材料(俗称玻璃钢) ,制成的大型中空结构体。这些复合材料耐受高温的性能较差 ,因此电弧会造成叶片的严重损坏。据统计 ,由雷击引起的风电机组叶片损坏的年故障率约 5%。大容量风电机组叶片的雷击防护已成为制约风电机组运行可靠性水平提升的瓶颈问题之一。

目前,风电机组叶片的防护设计主要依据国际电工委员会 IEC 在 2002 年颁布的风力发电机组防雷推荐标准 IEC/TR 61400 – 24^[5] 进行。但依据 IEC/TR 61400 – 24 设计的风电机组雷电接闪防护系统存在失效率高的问题。这是因为 IEC/TR 61400 – 24 仅给出了一般性和经验性的设计原则,未充分考虑风力发电机组雷击过程上行先导产生机理和上、下行先导接闪机理 因此无法给出定量化的设计条款和具体的实施细则。

对雷击过程的机理研究最早可以追溯到 1760 年富兰克林发明了避雷针^[6]。雷击过程的机理研究需以雷击模拟实验获得的雷击过程为基础。近年来,由于高电压实验手段不断建立和完善,雷击过程的机理研究取得了长足进展。特别是 20 世纪 60—70 年代 高压长空气间隙放电实验极大地推动了人类对雷击现象和雷击过程的认识。在此基础上,雷击过程的某个阶段(如上行先导的起始和发展) 也已经被证明可以通过雷击模拟实验利用冲击高压发生器产生的双指数冲击电压波制造空气放电来模拟^[7-14]。

通过对国内外风电机组雷击接闪过程及机理研究现状以及叶片接闪系统研究现状的全面分析,可以得出目前的研究还存在不足[15-16]。需要在明确风力发电机雷击接闪机理的前提下研究新型雷击接闪防护系统。

基于雷击接闪机理,本团队提出了一种在叶片外表面敷设导体的方案^[17],用于屏蔽下引线起始上行先导,从而达到保护叶片本体的目的。本文基于上述研究成果,采用计算流体力学(CFD)方法研究了外敷导体直径对风力机专用翼型 DU93 – W – 210 翼型气动性能的影响规律。

1 几何模型及数值方法

1.1 几何模型

数值计算对象为 DU93 – W – 210 翼型 相对厚度 21.0% ,尾缘厚度 0.5% 。计算几何模型如图 1 所示。

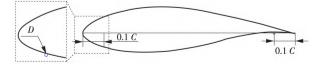


图 1 计算几何模型

Fig. 1 Computational geometry model

外置导体布置于翼型压力面(迎风面);导体距前缘、尾缘为 $0.1\ C(C)$ 为翼型弦长 $C=1\ m$

导体直径用 D 表示 分别研究了 D 为 2 3 A 5 , 6 , 7 8 9 , 10 mm 时对翼型气动特性的影响。

1.2 数值方法

计算网格: 采用 ICEM(网格划分软件) 进行全域结构网格划分,对翼型尾缘及下游部分进行网格加密处理,计算翼型为 2D 网格,翼型周向布置 380 个网格,径向布置 357 个网格,第 1 层网格高度 0.001 mm,保证 $y^+ < 1(y^+)$ 是壁面第 1 层网格高度的 1/3 与当地流体黏度长度的比值)。 计算网格如图 2 所示。

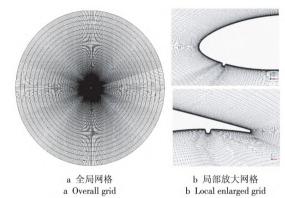


图 2 计算网格

Fig. 2 Computing grid

边界条件: 计算域为 30 C。采用速度进口、压力 出口边界条件, 叶片表面及外置导体设置为无滑移 壁面。边界条件设置如图 3 所示。

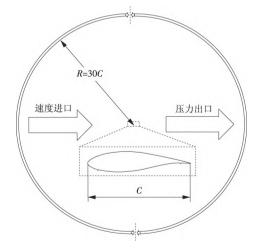


图 3 计算边界条件

Fig. 3 Boundary conditions

求解设置: 基于 Fluent 求解器 ,SA(Spalart Allmaras) 湍流模型 ,二阶精度; 计算攻角: 0° , 4° , 8° , 12° , 16° , 20° ; 计算雷诺数: $Re = 1 \times 10^{7}$ 。

2 计算结果分析

2.1 数值方法验证

以未加外置导体的洁净翼型为例进行数值方法验证,风洞实验在华北电力大学风洞实验台完成,由

于风洞实验数据雷诺数为 1×10^6 ,所以验证时 ,计算雷诺数也为 1×10^6 。图 4 为 DU93 - W - 210 翼型气动特性 ,图 4 中: α 为翼型攻角 ,(°); C_1 为升力系数 ,无量纲值; C_4 为阻力系数 ,无量纲值。从图 4 中可以看出 ,在翼型最大升力系数处(8° 攻角) ,计算值与实验值差别较大。在其余攻角时 ,无论是升力系数还是阻力系数与实验值差别较小 ,从而验证了数值方法的可靠性。

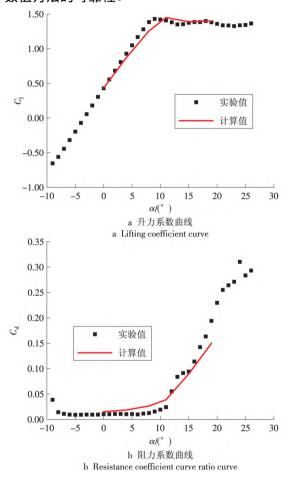


图 4 DU93 - W - 210 翼型气动特性 Fig. 4 Aerodynamic characteristics of the DU93 - W - 210 airfoil

2.2 结果分析

图 5 翼型气动特性随攻角的变化规律,图例中: "无导体"表示未敷导体翼型; 2 mm 3 mm 等表示翼型外敷导体直径。由图 5 可见 ,当翼型雷诺数为 1×10^7 ,无导体翼型失速攻角约 16° 时,最大升力系数可达 1.90 左右。当翼型外敷导体后,在翼型升力系数的线性段,升力系数的绝对值差别较小,只有在 20° 攻角时差别较大。阻力系数在 0° 20° 攻角时差别较大,其余攻角时阻力系数绝对值差别不大。升阻比基本随导体直径线性降低,最大升阻比对应的攻角为 4° 。当 D=10 mm ,在攻角等于 20° 时,翼型升力系数下降,阻力系数增加,升阻比降低;当

 $D=2\sim9\,\mathrm{mm}$ 在攻角等于 20° 时 ,升力系数增加 ,阻力系数变化较小。

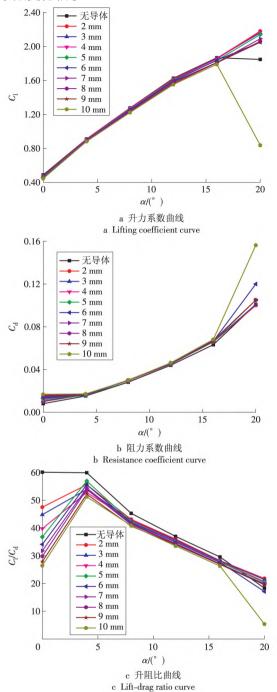


图 5 翼型气动特性随攻角的变化规律 Fig. 5 Aerodynamic characteristics of the airfoil varied with attack angles

图 6 为翼型气动特性随导体直径的变化规律。图中 横坐标为不同导体直径 纵坐标分别为升力系数、阻力系数、升阻比。由图 6 可见,随着导体直径 D 的增加,翼型升力系数总体上呈下降趋势,阻力系数呈上升趋势,升阻比下降;翼型升力系数、升阻比基本与导体直径呈线性变化趋势;0°攻角时,升力系数变化趋势与其余攻角相差不大,阻力系数增加斜率变大,升阻比下降斜率最大。

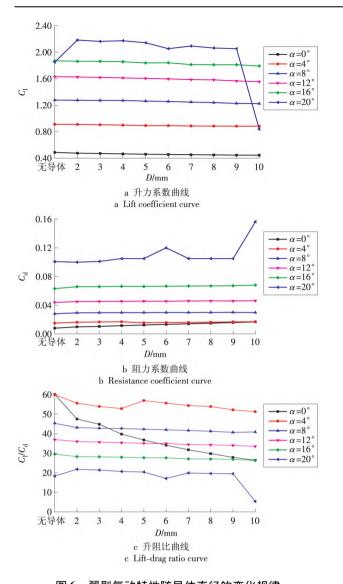


图 6 翼型气动特性随导体直径的变化规律 Fig. 6 Aerodynamic characteristics of the airfoil varied with the conductor diameter

图 7 是不同导体直径的翼型气动特性较洁净翼 型的变化率。横坐标是导体直径、纵坐标是变化率。 由图可见 ,0°攻角时 ,带导体翼型升力系数下降最 多 当导体直径为 10 mm 时 ,升力系数最多下降 10% 左右。4°~16°攻角时升力系数下降相差不多, 升力系数平均下降了3%左右。20°攻角时,除了 D = 10 mm 时 其余导体直径对应的升力系数较洁净 翼型有所增加 究其原因是因为此时洁净翼型已经 失速,而带导体翼型类似于转捩带作用,一定程度上 抑制了翼型失速。对于阻力系数 ,当翼型攻角为 0° 时 带导体翼型阻力系数增加最大 斜率也最大。除 了20°攻角 其余攻角时阻力系数变化斜率基本一 致 阻力系数增加的平均值在 7% 左右。对于升阻 比 除了20°攻角 其余攻角带导体翼型升阻比均有 所下降。0°攻角时,升阻比下降斜率最大,最大升阻 比在 D = 10 mm 时,下降约 $56\% \cdot 4^{\circ} \sim 16^{\circ}$ 攻角时升 阻比平均下降7%左右。

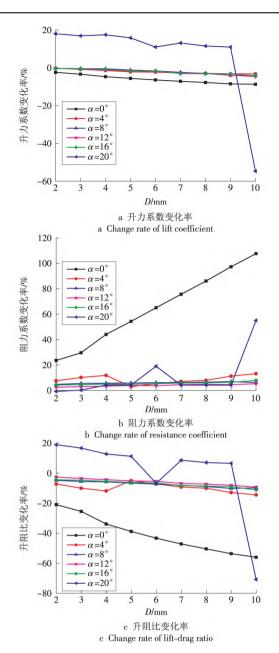


图 7 不同导体直径的翼型气动特性 较洁净翼型的变化率

Fig. 7 Comparison of change rates of the airfoil covered with different-diameter conductor and the airfoil without conductor

图 8 为不同导体直径的翼型截面速度云图。由图可见,导体对翼型绕流场的影响主要集中在导体下游速度场。随着导体直径的增加,导体下游的低速区范围逐渐扩大。

图 9 为 4° 攻角时,不同导体直径的翼型表面压力系数分布(图中 横坐标为当地位置 x 与翼型弦长 C 之比; 纵坐标 C_p 为翼型表面压力系数)。导体对翼型一周压力系数的影响主要集中在导体上、下游。由于导体存在 在导体上游翼型表面压力变高,导体下游翼型表面压力变低。这是由于外置导体,在翼型压力面导体下游产生了不同程度的分离旋涡,旋

涡尺度大小与导体直径成正比; 在翼型压力系数曲线上, 导体前由于流体集聚, 压力增加, 导体下游形成的涡核为低压区。不同导体高度之间的压差变化也较小。

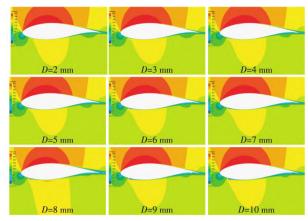


图 8 不同导体直径的翼型截面速度云图 Fig. 8 Section velocity clouds of the airfoil with different-diameter conductor

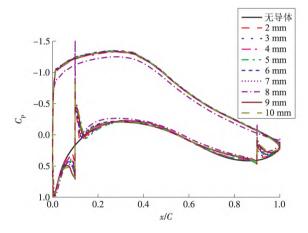


图 9 4°攻角时不同导体直径翼型表面压力系数分布 Fig. 9 Pressure coefficient distribution of the airfoil with different-diameter conductor at a 4° attack angle

3 结束语

针对目前大型风电机组叶片雷击损伤事故率高,叶片现有雷击防护系统失效率高等问题,本文提出了叶片外敷导体防雷方案,研究了外敷导体直径对风力机专用翼型气动性能的影响规律,得出以下结论:

- (1)随着导体直径 D 的增加 翼型升力系数总体上呈下降趋势 阻力系数呈上升趋势 升阻比下降;翼型升力系数、升阻比基本与导体直径呈线性变化趋势;0°攻角时 ,升力系数变化趋势与其余攻角时相差不大 阻力系数增加斜率变大 ,升阻比下降斜率最大。
- (2) 0° 攻角时,带导体翼型升力系数下降最多,当导体直径为 $10~\rm mm$ 时,升力系数最多下降约 10%。 4° ~ 16° 攻角时升力系数下降相差不大,升力系数平均下降约 3%。 20° 攻角时,除了 $D=10~\rm mm$

时,其余导体直径对应的升力系数较洁净翼型有所增加。对于阻力系数,当翼型攻角为 0° 时,带导体翼型的阻力系数增加最大,增加斜率也最大。除了 20° 攻角,其余攻角对应的阻力系数变化斜率基本一致,阻力系数增加的平均值在 7% 左右。对于升阻比 除了 20° 攻角,其余攻角对应的带导体翼型的升阻比均有所下降。 0° 攻角时,升阻比下降斜率最大,最大升阻比在 D=10 mm 时,下降约 56%; $4^{\circ}\sim16^{\circ}$ 攻角对应的升阻比平均下降约 7%。

(3) 导体对翼型绕流场的影响主要集中在导体下游速度场。随着导体直径的增加,导体下游的低速区范围逐渐扩大。

参考文献:

- [1]赵江. 风电机的直接雷击及其防护 [J]. 科技资讯 2019, 17(19):43-44.
- [2]梅迪斯. 风力发电机组的综合防雷技术措施研究[J]. 科技风 2019(18):180.
- [3] CUMMINS K L ,QUICK M G ,RISON W ,et al. Overview of the Kansas Windfarm 2013 Field Program [C]. International Lightning Detection Conference 2014.
- [4]施广全 涨义军 陈绍东 ,等. 风力发电机组防雷技术进展综述 [J]. 电网技术 2019 A3(7): 2477 2487.

 SHI Guangquan ZHANG Yijun ,CHEN Shaodong ,et al. Review of lightning protection technique progress of wind turbines [J]. Power System Technology 2019 A3(7): 2477 2487.
- [5] IEC TR 61400 24. Wind turbine generator systems ,part 24: lightning protect [S]. 2002.
- [6] Golde R H. Lightning [M]. New York: Academic Press, 1977: 44 – 45.
- [7] WAGNER C F ,MCCANN G D ,MACLANE G L. Shielding of transmission lines [J]. IEEE Trans on Pas ,1963 ,60(6): 313 328.
- [8] SUZUKI T "MIYAKE K "KISHIZIMA I. Study on experimental simulation of lightning strokes [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems "1981 "100(4):1703 –1711.
- [9] SUZUKI T ,MIYAKE K ,SHINDO T. Discharge path model in model test of lightning strokes to tall mast [J]. Power Engineering Review ,IEEE ,1981 ,PER - 1(7): 54 - 54.
- [10] 王晓瑜. 雷电屏蔽性能的模拟试验和分析模型的研究 [J]. 高电压技术 ,1994 20(2):48-54. WANG Xiaoyu. Simulation test and analysis model of lightning shielding [J]. High Voltage Technique ,1994 20(2):48-54.
- [11]钱冠军, 王晓瑜, 汪雁. 雷电屏蔽模拟理论与试验技术的研究[J]. 高电压技术, 1998, 24(2):26-28, 31. QIAN Guanjun, WANG Xiaoyu, WANG Yan, The lightning shielding simulation theory and test technology [J]. High Voltage Technique, 1998, 24(2):26-28, 31. (下转第71页)

- [5]王永强. 考虑环境影响的电容型设备绝缘监测与故障诊断研究[D]. 保定: 华北电力大学 2009.
- [6]刘希志 高开健 贾辉 等. 基于温度变化的油 SF₆ 型套管介损值变化的研究[J]. 变压器 2018 55(1):42 44. LIU Xizhi ,GAO Kaijian ,JIA Hui ,et al. Study on the change of dielectric loss of oil - SF₆ bushing based on temperature change [J]. Transformer , 2018 55(1):42 - 44.
- [7]陈利念. 110 kV 变压器套管介损偏大的原因分析[J]. 变压器 2003(2):41-42.
 CHEN Linian. Analysis of causes of large dielectric loss of 110 kV transformer bushing [J]. Transformer ,2003 (2):
- [8] 张鹏、侯睿 濯国柱. 对主变套管介损偏大故障现有理论解释的讨论[J]. 变压器 2016 53(8):68-72. ZHANG Peng, HOU Rui ZHAI Guozhu. Discussion on exist-

ZHANG Peng ,HOU Rui ZHAI Guozhu. Discussion on existing theoretical explanation of large dielectric loss failure of main transformer casing [J]. Transformer ,2016 ,53 (8): 68 – 72.

[9]田成凤. 变压器电容式套管电容量及介损的正确测量 [J]. 电力自动化设备 2010 30(4):147-149.

TIAN Chengfeng. Correct measurement of capacitance and dielectric loss of capacitor casing of transformer [J]. Electric Power Automation Equipment 2010 30(4):147 – 149.

[10]吴鑫杰. 充氮气油浸式变压器取油样技术探讨 [J]. 华电技术 2018 40(2):46-47.

WU Xinjie. Discussion on oil sampling technology of nitrogen filled oil immersed transformer [J]. Huadian Technology 2018 40(2):46-47.

[11]于文涛,黄文峰,马欣. 500 kV 主变压器套管末屏漏油

原因分析与处理[J]. 华电技术 2018 40(2):25-28.

YU Wentao ,HUANG Wenfeng ,MA Xin. Causes analysis and treatment of end shield oil leak in 500 kV main transformer bushing [J]. Huadian Technology ,2018 ,40 (2): 25 – 28.

[12]马金平. 变压器油中含气量超标检查与处理 [J]. 华电技术 2018 40(7):35-37.

MA Jinping. Inspection and processing of excessive gas content in transformer oil [J]. Huadian Technology 2018, 40(7):35-37.

[13]康振华. 大型电力变压器油色谱在线监测技术与案例 分析[J]. 华电技术 2018 40(3):17 - 20.

KANG Zhenhua. On-line monitoring technology and case analysis of large power transformer oil chromatography [J]. Huadian Technology 2018 40(3):17-20.

[14] 吴冬文 胡道明. 变压器高压套管介损现场试验的分析 与探讨[J]. 江西电力 2011 35(4):5-7.

WU Dongwen ,HU Daoming. Analysis and discussion on dielectric loss field test of transformer HV bushing [J]. Jiangxi Electric Power 2011 35(4):5-7.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

贾辉(1977—) 男 洁林松原人 高级工程师 从事变压器检修及试验方面的工作(E-mail: jiahui291@163.com)。

曹浩(1996—) 男 山东泰安人 在读硕士研究生 从事 供热管网仿真方面的研究工作(E-mail: 1979780899@ qq. com)。

(上接第67页)

[12]钱冠军 ,王晓瑜 徐先芝 ,等. 输电线路绕击分散性的试验研究 [J]. 高电压技术 ,1998 24(3):17-20.

QIAN Guanjun "WANG Xiaoyu "XU Xianzhi et al. Study of scatter of shielding failure on transmission line [J]. High Voltage Technique "1998 24(3):17 – 20.

[13]陈维江 贺恒鑫 栈冠军 ,等. 基于长间隙放电研究雷电 屏蔽问题的进展 [J]. 中国电机工程学报 ,2012 ,32 (10):1-13.

CHEN Weijiang ,HE Hengxin ,QIAN Guanjun ,et al. Review of the lightning shielding against direct lightning strokes based on laboratory long air gap discharges [J]. Proceedings of the CSEE 2012 32(10):1-13.

[14] 陈维江 陈家宏 钱冠军 ,等. 正极性上行先导特性的模拟试验方法 [J]. 中国电机工程学报 ,2012 ,32 (10): 22-31.

CHEN Weijiang ,CHEN Jianhong ,QIAN Guanjun ,et al. A simulation test method for positive upward leaders [J]. Proceedings of the CSEE 2012 32(10):22-31.

[15] 谭启德,潘超,陈铁,等. 风机桨叶雷击灾害问题研究 [J]. 电瓷避雷器 2019(1):44-49.

0101010101010101010101010101010101010

TAN Qide PAN Chao CHEN Tie et al. Study on the problems of lightning disaster faced by wind turbine blades [J]. Insulators and Surge Arresters 2019(1):44-49.

- [16] GLUSHAKOW B. 风电机组叶片、电子器件及人员防雷研究[J]. 风能 2018(12):60-65.
- [17]李新凯 石可重 李苏威 ,等. 风电叶片新型雷击防护系 统的实验与模拟研究 [J]. 工程热物理学报 ,2019 ,40 (3):529-536.
 - LI Xinkai "SHI Kezhong "LI Suwei "et al. Experimental and simulation study on a new lightning protection system for wind turbine blades [J]. Journal of engineering thermophysics 2019 40(3):529 –536.

(本文责编:张帆)

作者简介:

李新凯(1984—) ,男 ,河北保定人 ,博士 ,工程师 ,从事 风电雷击防护安全工作(E-mail: lixinkai@ chec. com. cn) 。