

# 流动控制组合对风力机翼型性能影响的实验研究

张 惠<sup>1</sup>, 周广鑫<sup>2</sup>, 康 顺<sup>2,3</sup>

(1. 华北电力大学可再生能源学院, 北京 102206; 2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206;  
3. 西安现代控制技术研究, 西安 710065)

**摘 要:** 为了研究基于涡发生器和Gurney襟翼流动控制组合的效果,对风力机专用翼型DU93-W-210进行风洞实验。实验工况包括光滑翼型、涡发生器、Gurney襟翼及不同组合方式。实验结果表明:Gurney襟翼与涡发生器组合不仅能获得更高的升力系数,而且能有效抑制流动分离,失速后阻力大幅降低。Gurney襟翼和涡发生器组合将2种装置的优势结合,得到更好的流动控制效果。双排涡发生器组合和单排涡发生器相比能更大程度延迟流动分离,进一步提高最大升力系数。

**关键词:** 流动控制; 气动性能; 风洞实验; 涡发生器; Gurney襟翼; 风力机翼型

**中图分类号:** TK89

**文献标识码:** A

## 0 引 言

风力机叶片运行过程中在内叶展易发生流动分离,从而导致叶片气动性能迅速降低,影响机组出力,降低叶片捕获风能的效率。为了提高叶片气动性能,对风力机叶片进行高效的流动控制显得尤为必要。目前涡发生器<sup>[1]</sup>、Gurney襟翼<sup>[2]</sup>被广泛应用于风力机叶片流动控制。国内外学者对基于涡发生器<sup>[3]</sup>、Gurney襟翼<sup>[4]</sup>的风力机叶片流动控制开展了深入研究,但对于流动控制附件组合的研究相对较少。Godsk<sup>[5]</sup>提出双排涡发生器相比单排涡发生器能够进一步提高翼型的最大升力系数,张 磊等<sup>[6]</sup>对双排涡发生器流动效果进行探讨,未取得满意的效果。Bruce等<sup>[7]</sup>、郝礼书等<sup>[8]</sup>分别对NACA4412和自主设计的WA251翼型进行基于Gurney襟翼和涡发生器的相关实验研究。可见,针对风力机专用翼型开展涡发生器与Gurney襟翼组合流动控制研究、双排涡发生器组合效果仍需进一步深入探讨。为此,本文针对风力机专用翼型DU93-W-210翼型加装涡发生器、Gurney襟翼、涡发生器加Gurney襟翼组合,双排涡流发

生器组合进行详细的风洞实验研究,探讨涡发生器与Gurney襟翼组合、双排涡流发生器组合对风力机专用翼型气动特性的影响,为实现风力机翼型高效流动控制进行有益尝试,并提供相应的数据参考依据。

## 1 实验模型及实验内容

### 1.1 实验模型

实验在华北电力大学大型低速回流式风洞中进行。风洞实验段长4.5 m,宽3.0 m,高1.5 m,最大风速65 m/s,紊流度低于0.03%。实验雷诺数为 $10^6$ 。实验模型采用DU93-W-210翼型,模型为钢架木质结构,展长1.5 m,弦长0.8 m。模型垂直安装于风洞中。在模型50%展长截面处开设98个测压孔,用于测量翼型表面压力分布。翼型的升力系数、力矩系数由压力分布积分和坐标变换求得;阻力系数根据动量法对测得的翼型尾迹总压进行数值积分求得。尾耙排管位于翼型尾缘后尾流区一倍弦长处,与翼型50%展长剖面位于同一水平面。尾耙排管共有110个总压管和5个静压管,测量宽度范围为1500 mm,可根据实验的具体情况进行移

收稿日期: 2019-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(51576065); 中央高校基本科研业务费专项资金(2016MS53)

通信作者: 张 惠(1977—), 女, 博士、讲师, 主要从事风力机空气动力学方面的研究。zhanghui82@ncepu.edu.cn

动。翼型表面压力及尾靶排管压力均通过 256 通道压力测试系统采集得到。采集速度为 100 Hz/CH, 采集精度为  $\pm 0.05\%$ 。

## 1.2 实验内容

实验采用的涡发生器, Gurney 襟翼由 PVC 材料加工而成。涡发生器的高度用  $H$  表示; 涡发生器在翼型表面的安装角用  $\beta$  表示; 一对涡发生器之间的距离用  $S$  表示; 相邻涡流发生器对之间的距离用  $\lambda$  表示, 其几何参数如图 1 所示。不加涡发生器和 Gurney 襟翼的翼型用“干净翼型”来表示。采用三角型涡发生器, 反向布置, 高度均为 6 mm, 安装角  $\beta$  为  $16^\circ$ , 间距  $S$  为  $6H$ , 节距  $\lambda$  为  $3H$ 。Gurney 襟翼高度为  $1.5\%C$  ( $C$  为弦长), 安装在翼型  $100\%C$ 。

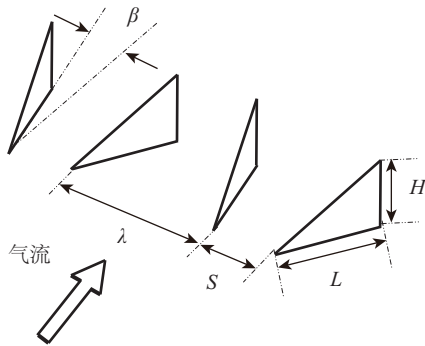


图 1 涡发生器几何参数

Fig. 1 VGs configuration

实验工况包括干净翼型以及干净翼型分别加装涡发生器、Gurney 襟翼、Gurney 襟翼和涡发生器组合、双排涡发生器组合共 6 种状态。双排涡发生器组合中前后两排涡发生器分别安装在  $10\%C$  和  $20\%C$  处; 涡发生器和 Gurney 襟翼组合中涡发生器位于  $20\%C$ 、Gurney 襟翼位于  $100\%C$ 。

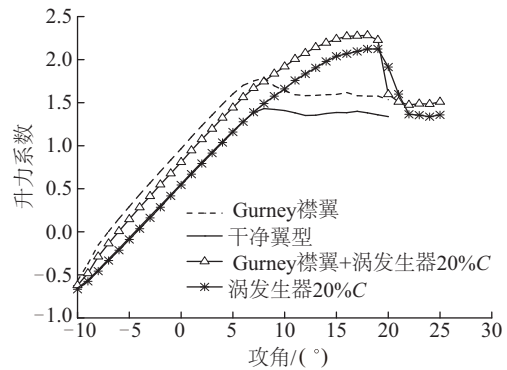
## 2 实验结果及分析

### 2.1 涡发生器和 Gurney 襟翼组合对翼型气动性能影响

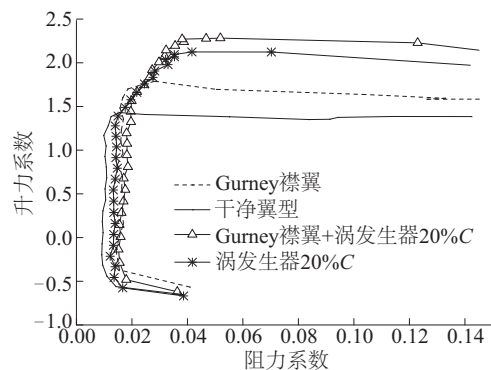
图 2 给出了涡发生器、Gurney 襟翼、涡发生器与 Gurney 襟翼组合作用时翼型气动特性曲线。从图 2a 可看出, 与干净翼型相比, 加装 Gurney 襟翼使翼型升力系数得到明显提高, 最大升力系数提高 24%; 升力系数曲线向左平移, 零升力攻角减小, 失

速攻角几乎不变。加装涡发生器能明显改善翼型的失速特性, 体现为失速攻角的推迟以及最大升力系数的提高。与干净翼型相比, 加装涡发生器失速攻角从  $8^\circ$  推迟到  $19^\circ$ , 失速攻角推迟了  $11^\circ$ ; 最大升力系数提高 48.5%。Gurney 襟翼和涡发生器组合使翼型线性段和失速段升力系数均得到极大提高, 失速特性也得到有效改善。Gurney 襟翼和涡发生器组合使得失速攻角 ( $8^\circ$ ) 后升力系数的提高比单独加装涡发生器的增升效果更加显著, 最大升力系数提高 65.1%, 失速攻角推迟到约  $18^\circ$ 。整个升力特性曲线融合了单独加装 Gurney 襟翼和单独加装涡发生器的优势, 获得了更好的流动控制效果。

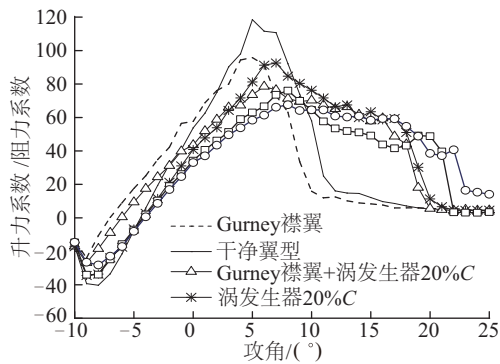
从图 2b 可看出 Gurney 襟翼和涡发生器组合在失速攻角前引起的附加阻力最大; 其次是 Gurney 襟翼, 再次是涡发生器。失速攻角后, Gurney 襟翼和涡发生器的组合能有效降低翼型阻力, 其减阻效果略逊于单独加装涡流发生器。从图 2c 可看出 Gurney 襟翼和涡发生器组合在大攻角时能有效提高翼型升阻比, 且能在较大的攻角范围内保持较高的升阻比, 增升减阻效果较好。



a. 升力系数



b. 阻力特性



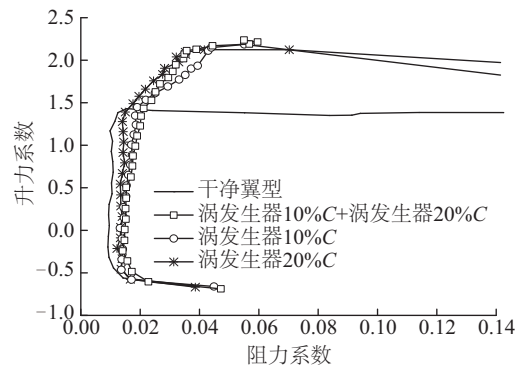
c. 升阻比

图2 涡发生器和Gurney襟翼组合对翼型气动性能影响

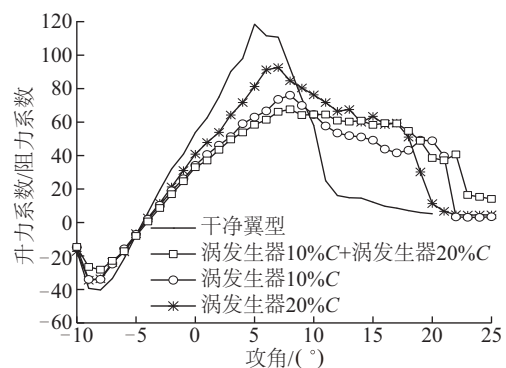
Fig. 2 Effect of VGs and Gurney flap on aerodynamics

## 2.2 双排涡发生器组合对翼型气动性能影响

图3给出了加装双排涡发生器组合时翼型气动特性曲线。从图3a可看出,与干净翼型相比,20%C处加装单排涡发生器使失速攻角从8°推迟到19°,最大升力系数提高48%。10%C处加装单排涡发生器使失速攻角从8°推迟到21°,最大升力系数提高52%。双排涡发生器组合(10%C+20%C)使得失速攻角从8°推迟到24°,最大升力系数提高56%。可见双排涡发生器组合相比单排涡发生器能更大程度延迟流动分离,最大升力系数也更高。从图3b可看出小攻角时,双排涡发生器组合引起的附加阻力要高于单排涡流发生器,在中高攻角下双排涡发生器的减阻效果和前排涡发生器(10%C)效果相当;失速攻角后,双排涡发生器组合减阻效果比单排涡流发生器效果更好,双排涡发生器能更大程度地推迟流动分离,从而减少阻力。图3c给出了不同实验工况下升阻比曲线。从图3c可看出,小攻角时,在翼型表面加装双排涡发生器组合会引起附加阻力,导致升阻比下降。失速攻角后,双排



b. 阻力系数



c. 升阻比

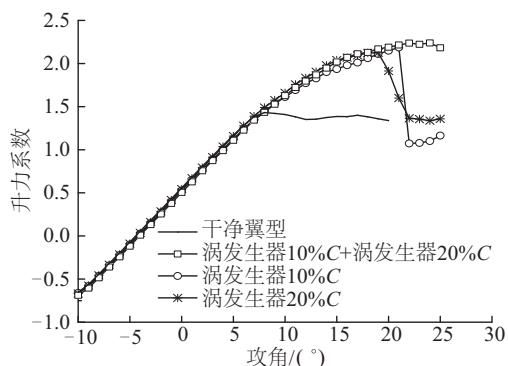
图3 双排涡发生器对翼型气动性能影响

Fig. 3 Effect of two rows of VGs on aerodynamics

涡发生器组合能有效抑制或延迟流动分离,大大降低了翼型的阻力,从而导致升阻比提高。从升阻比的角度看,失速攻角后,20%C处涡发生器对应最大升阻比最高,其次是10%C涡发生器,最后是双排涡发生器组合。双排涡发生器在较大的攻角范围内,能保持较高的升阻比。

## 2.3 不同控制组合方式比较

图4给出了不同流动控制附件对DU93-W-210翼型气动特性影响的曲线。从图4a可看出,与干净翼型相比,加装Gurney襟翼使最大升力系数提高24%;失速攻角几乎不变。20%C处加装涡发生器使失速攻角从8°推迟到19°,最大升力系数提高48.5%。加装Gurney襟翼和涡发生器组合使翼型最大升力系数提高65.1%,失速攻角推迟到约18°。双排涡发生器组合使失速攻角从8°推迟到24°,最大升力系数提高56%。可见Gurney襟翼和涡发生器组合使得最大升力系数提高最多,其次是双排涡流发生器,再次是单排涡流发生器(20%C),最后是Gurney襟翼。在推迟或延缓流动分离方面,



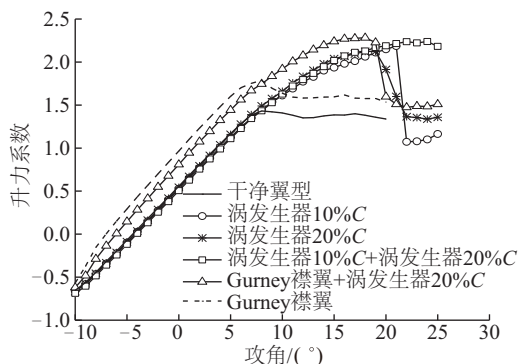
a. 升力系数

效果最佳的是双排涡发生器,20% $C$ 处单排涡发生器延缓流动分离的效果与 Gurney 襟翼和涡发生器组合效果基本相当。从图 4b 可看出在翼型表面加装 Gurney 襟翼、涡发生器、Gurney 襟翼和涡发生器,双排涡发生器在攻角较小时均会引起附加阻力;失速攻角后,除 Gurney 襟翼外,其他流动控制方式均能有效抑制或延迟流动分离,大大降低翼型阻力,提高升阻比。从升阻比的角度看,失速攻角后,20% $C$ 处涡发生器对应最大升阻比最高,其次是 Gurney

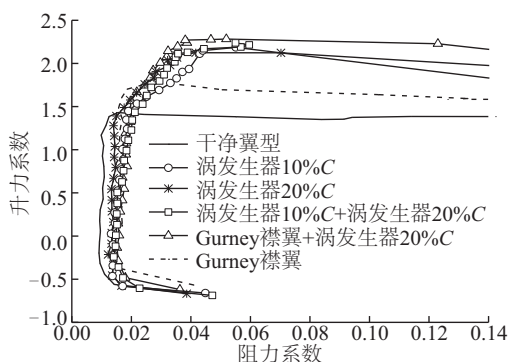
襟翼和涡发生器组合,再次是双排涡发生器组合,最后是 10% $C$  涡发生器。

## 2.4 流动控制机理分析

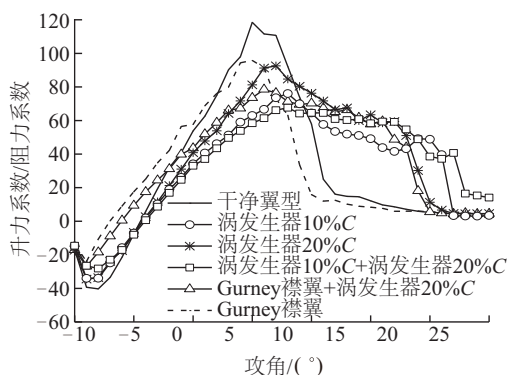
为了探讨流动控制组合的作用机理,图 5 给出了各种流动控制组合在不同攻角下对翼型表面压力分布的影响。从图 5 可看出,和干净翼型相比,小攻角下( $\alpha=0^\circ$ )双排涡发生器组合对翼型表面压力分布影响较小;Gurney 襟翼使得吸力面减压、压力面增压,上下翼面压差增大;涡发生器和 Gurney 襟翼组合对翼型表面压力的影响介于两者单独作用之间。



a. 升力系数



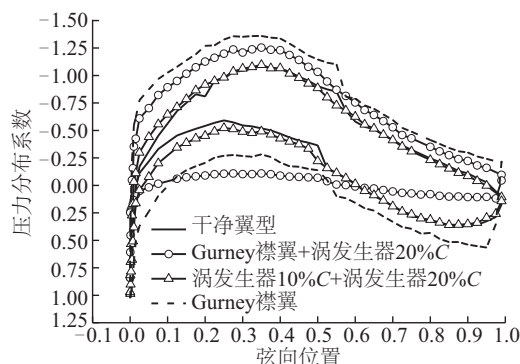
b. 阻力特性



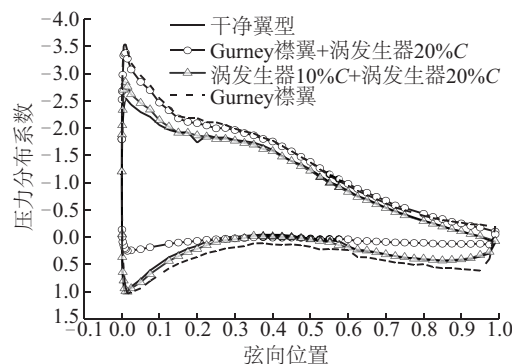
c. 升阻比

图4 不同控制方式对翼型气动性能影响

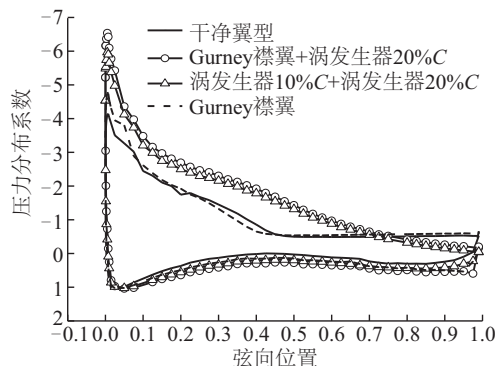
Fig. 4 Effect of different flow control accessory on aerodynamics



a. 0°攻角



b. 8°攻角



c. 15°攻角



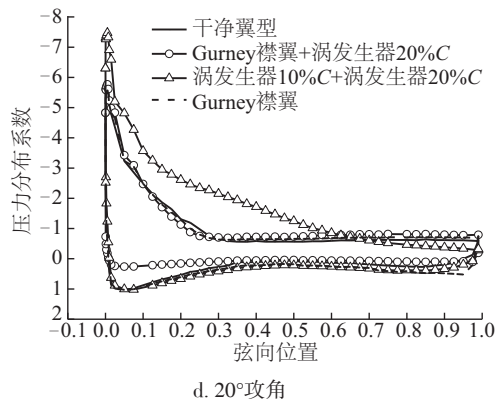


图5 不同控制方式对翼型表面压力分布影响

Fig. 5 Effect of different flow control accessory on airfoil pressure coefficient

在失速攻角 ( $\alpha = 8^\circ$ ) 附近, Gurney 襟翼在吸力面减压和压力面增压的作用降低, 并出现提前分离现象。双排涡发生器对翼型表面压力分布影响仍较小, 仅引起吸力峰的增加。涡发生器和 Gurney 襟翼组合介于两者单独作用之间, 未出现流动分离。

攻角  $\alpha$  增加到  $15^\circ$  时, 和干净翼型相比, Gurney 襟翼仅引起翼型前缘吸力峰的增加。 $15^\circ$  攻角时, 干净翼型和加装 Gurney 襟翼翼型均出现较大范围流动分离, 分离区位于吸力面尾缘至距尾缘 45% 弦长的区域。 $10\%C$ 、 $20\%C$  涡发生器位于分离区之前, 均能起到较好的流动控制效果。Gurney 襟翼和涡发生器组合、双排涡发生器组合均未出现明显流动分离。

大攻角下 ( $\alpha = 20^\circ$ ), 干净翼型分离区大幅向前缘移动,  $20\%C$  处涡发生器靠近分离区, 完全失去流动控制作用。除了双排涡流发生器外, 其余流动控制方式均失去作用。

### 3 结论

对风力机专用翼型 DU93-W-210 翼型进行 6 种不同工况的风洞实验。实验工况包括干净翼型,  $100\%C$  处加装 Gurney 襟翼,  $10\%C$ 、 $20\%C$  处分别加装单排涡发生器, Gurney 襟翼 ( $100\%C$ ) 和涡发生器 ( $20\%C$ ) 组合, 双排涡发生器 ( $10\%C + 20\%C$ ) 组合。对比实验结果表明:

1) Gurney 襟翼和涡发生器组合不仅能全面提高翼型的升力, 同时能有效抑制流动分离。升力系数在线性段和失速段均能得到提高, 与干净翼型相比, 最大升力系数提高 65.1%; 失速攻角推迟了近  $11^\circ$ 。Gurney 襟翼和涡发生器组合将 2 种装置的优势结合起来, 可获得比单独一种装置更好的流动控制效果。

2) 双排涡发生器组合 ( $10\%C + 20\%C$ ) 和单排涡发生器相比能更大程度延迟流动分离, 最大升力系数也进一步提高。大攻角下减阻效果与单排涡流发生器基本相当。

### [参考文献]

- [1] Fernandez-Gamiz U, Zulueta E, Boyano A, et al. Five megawatt wind turbine power output improvements by passive flow control devices[J]. Energies, 2017, 10 (6): 742—748.
- [2] Wang J J, Li Y C, Choi K S. Gurney flap- Lift enhancement, mechanisms and applications[J]. Progress in Aerospace Science, 2008, 44(1): 22—47.
- [3] Baldacchino D, Ferreira C, Tavernier D D, et al. Experimental parameter study for passive vortex generators on a 30% thick airfoil[J]. Wind Energy, 2018, 21(9): 745—765.
- [4] Brown L, Filippone A. Aerofoil at low speeds with Gurney flap[J]. The Aeronautical Journal, 2003, 107 (1075): 539—546.
- [5] Godsk K B. Wind turbine blade with vortex generators [P]. US 0008787, 2010.
- [6] Zhang Lei, Li Xingxing, Yang Ke, et al. Effects of vortex generators on aerodynamics performance of thick wind turbine airfoils[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 156: 84—92.
- [7] Storms B L, Jang C S. Lift enhancement of an airfoil using a gurney flap and vortex generators[J]. Journal of Aircraft, 1994, 31(3): 542—547.
- [8] Hao Lishu, Gao Chao, Song Wenping, et al. Airfoil flow control using vortex generators and gurney flap[J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2013, 227(12): 2701—2706.

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON EFFECTS OF COMBINED FLOW CONTROL ACCESSORY OVER WIND TURBINE AIRFOIL AERODYNAMIC PERFORMANCE

Zhang Hui<sup>1</sup>, Zhou Guangxin<sup>2</sup>, Kang Shun<sup>2,3</sup>

(1. School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Energy Power & Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to study the effects of combined flow control methods based on vortex generators and Gurney flap, wind tunnel experiments were carried out for wind turbine dedicated airfoil DU93-W-210. The test matrix involved clean airfoil, Vortex Generators and Gurney flaps in different combinations. Results show that combined flow control approach using VGs and Gurney flap can not only obtain higher lift enhancement than each device individually but also effectively delays flow separation and reduces drag significantly after stall. The combined approach combines the advantages of both units and achieves better flow control effects than the individual one. Compared with one row VGs, proper two rows layout of VGs can further improve the airfoil aerodynamic performance, which delay flow separation more and cause the maximum lift higher.

**Keywords:** flow control; aerodynamic performance; wind tunnel experiment; vortex generators; Gurney flap; wind turbine airfoil