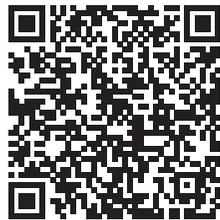


doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0155



Gurney 襟翼对圆弧板翼型气动性能影响的数值模拟

周鑫¹, 郑源², 李东阔¹, 蒋文青¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)



周鑫

摘要: 为了分析 Gurney 襟翼对圆弧板翼型气动性能的影响,采用 Fluent 软件对无襟翼和带有不同高度 Gurney 襟翼的圆弧板翼型进行数值模拟.比较它们在不同攻角下性能的差异,分析其周围流场分布的变化,探究 Gurney 襟翼的增升原理.结果表明:Gurney 襟翼改善了圆弧板翼型附近流场的分布,使其升力得到明显提高,并且襟翼高度越大,升力增加得越多;阻力在小攻角时略有减小,大攻角有所增大.在这两者共同影响下,翼型的升阻比在小攻角时获得较好提升.其中,襟翼高度为 2% 翼型弦长时,增升性能最好.流场中出现的卡门涡街和角涡是 Gurney 襟翼能够增升的关键因素.

关键词: Gurney 襟翼;圆弧板翼型;数值模拟;增升原理;升阻比

中图分类号: S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2017)09-0780-05

周鑫, 郑源, 李东阔, 等. Gurney 襟翼对圆弧板翼型气动性能影响的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(9): 780-784, 797.

ZHOU Xin, ZHENG Yuan, LI Dongkuo, et al. Numerical simulation of effect of Gurney flap on performance of circular arc airfoil

[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2017, 35(9): 780-784, 797. (in Chinese)

Numerical simulation of effect of Gurney flap on performance of circular arc airfoil

ZHOU Xin, ZHENG Yuan², LI Dongkuo¹, JIANG Wenqing¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: To study influences of Gurney flap on aerodynamic behavior of circular arc airfoil, Fluent software was used to simulate air flows around an ordinary airfoil and an airfoil with a Gurney flap in different heights. The principle of lift enhancement of Gurney flap was studied by comparing the difference in their aerodynamic performance at various angles of attack and by analyzing the change in flow field around them. The results demonstrate that Gurney flap improves the distribution of flow field around the circular arc airfoil and its lift has been significantly raised, further the higher the flap height is, the more the lift increases. Its drag decreases a little at small angles of attack and increases at big angles of attack. Under the influence of both lift and drag, the lift-drag ratio of airfoil has been effectively improved at small angles of attack, and the Gurney flap with a height of 2% chord length has the best performance. The appeared Karman vortex and corner vortex in the flow field around the airfoil are the key factors for lift enhancement of Gurney flap.

收稿日期: 2016-07-02; 修回日期: 2017-05-26; 网络出版时间: 2017-09-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20170912.1117.018.html>

作者简介: 周鑫(1992—),男,江苏盐城人,硕士研究生(1367276048@qq.com),主要从事流体机械工程及新能源研究.

郑源(1964—),男,山东日照人,教授,博士生导师(通信作者, zhengyuan@hhu.edu.cn),主要从事水利水电工程及流体机械研究.

Key words: Gurney flap; circular arc airfoil; numerical simulation; principal of lift enhancement; lift - drag ratio

Gurney襟翼是指安装在叶片翼型尾缘处的一块小平板,厚度一般在2~5 mm,高度不超过5%弦长.其最早应用在赛车的设计中,用于增大汽车摩擦力.由于其结构简单,且能有效提高升力,很快引起学者的广泛关注.20世纪70年代,自从LIEBECK^[1]将其引入到航天设计领域作为一种翼型的增升装置以来,一些学者对其进行了大量研究^[2-5].戴丽萍等^[6]讨论了风速和气动攻角等参数对叶片振动变形的影响.崔钊等^[7]通过风洞试验研究了在低雷诺数下加装格尼襟翼的小展弦比机翼气动特性,发现小展弦比机翼的升力系数明显提高.WANG等^[8]研究发现,只有当襟翼安装在翼型的尾缘处,并且和弦线垂直时,才能获得最大的增升效果;在襟翼后面出现的旋转涡流抑制了上表面气流的分离.谭磊等^[9]对添加不同高度襟翼的NACA0015翼型进行了数值模拟,发现襟翼改善了压力面和吸力面的压力分布,翼型的升、阻力系数都有了不同程度的增加.旷海洋^[10]发现襟翼的高度与翼型边界层的尺度相当时拥有最佳的增升效果,偏低或偏高时它的增升性能并不好.

一直以来,大型风电是中国利用风能的主要形式^[11-12],但是随着陆上优质风源的减少,其发展陷入一个瓶颈期,而“小风电”由于对风况、地形要求不高等特点,可以帮助解决广大农村山区、牧区人们供水供电问题.

“小风电”风机的特点是机身较小,工作风速较低,其叶片截面翼型的雷诺数也较小.在这种情况下圆弧板翼型的性能要优于传统的航天翼型,且其结构更为简单,方便加工制造,可以大规模生产^[13].

目前,关于Gurney襟翼的研究主要是针对传统航天翼型,而对圆弧板翼型涉及较少.随着“小风电”的兴起,有必要对其进行研究.文中基于此将Gurney襟翼应用在圆弧板翼型上,利用Fluent软件对圆弧板翼型原型和添加襟翼后的翼型进行数值模拟,研究襟翼的高度对翼型性能造成的影响,并分析其原因,为“小风电”风机的叶片的优化设计作指导.

1 数值计算

1.1 模型建立与网格划分

文中选取的圆弧板翼型来源于当前市场上常

用的一款风力提水机叶片的截面翼型,如图1所示.其主要技术参数弯度与弦长之比 f/c 为0.1.为了方便计算升阻力,建立模型时弦长 $c = 1\ 000$ mm,弯度 $f = 100$ mm,厚度 $\delta = 10$ mm.带有 $0.02c$ 襟翼的翼型示意图如图2所示,其中 h 表示襟翼的高度, $0.02c$ 为Gurney襟翼的高度占翼型弦长长度的2%.

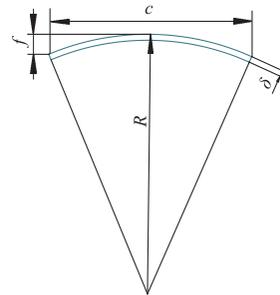


图1 圆弧板翼型基本参数

Fig. 1 Basic parameters of circular arc airfoil

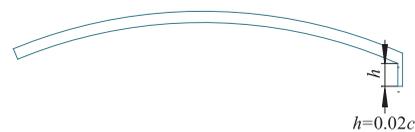


图2 带有 $0.02c$ 的襟翼的翼型

Fig. 2 Airfoil with flap in $0.02c$ height

绘制网格时,计算区域的划分采用C型分区,如图3所示,以翼型前缘点为基点,前面半圆区域的半径为10 m,以便于形成均匀稳定的来流;后方正方形区域长度为20 m,可以使气流充分运动发展,在无穷远处与来流一致.

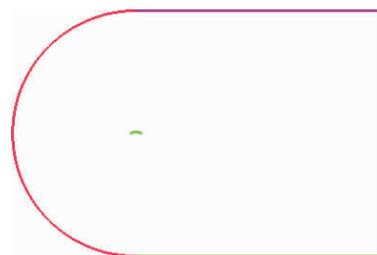


图3 计算域的划分

Fig. 3 Computational domain

采用非结构化绘制网格,为了使计算更加精确,对翼型附近进行加密处理,设置10层边界层,第一层的 Y^+ 值为2.3.然后进行了网格无关性验证,整体网格数量在110 000左右,质量在0.6以上,部分网格如图4所示.

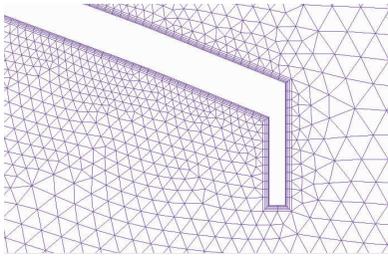


图4 Gurney襟翼附近网格示意图
Fig. 4 Grid around Gurney flap

1.2 湍流模型

目前,工程应用数值模拟中应用最广的是基于雷诺平均 $N-S$ 方程组(RANS)的模型^[14]. 由于文中研究的是小雷诺数、低风速下的翼型绕流运动,因此选用其中的 $SST k-\omega$ 模型,这是因为该模型主要针对的是小雷诺数下的剪切流传播,能够精确地预测自由剪切流传播速率,对处理翼型绕流的问题有一定优势.

1.3 边界条件与离散格式

文中在特定雷诺数下,即低风速小雷诺数时研究翼型的气动性能. 由于风速较低,因此设定流动为不可压缩流. 外部计算域的进口设置为速度进口,考虑到实际应用,设速度 v 为 5 m/s ,出口设定为压力出口,出口处的静压与无穷远处一致,设为 0 . 翼型表面为固定无滑移边界,不考虑粗糙度的影响,计算精度设为 10^{-4} .

压力与速度的耦合采用 SIMPLEC 算法,离散项、扩散项均采用二阶迎风格式.

1.4 可行性验证

为了验证文中算法的可行性,首先对不带襟翼的圆弧板翼型进行数值模拟,选取了文献[15]中的算例,设置来流风速 $v = 5 \text{ m/s}$,以保证雷诺数 $Re \geq 90\,000$,设置翼型的参数弯度与弦长之比 f/c 为 0.1 . 计算不同攻角下翼型的升力系数,将模拟得到的计算值与文献给出的参考值进行比较,其升力系数 Cl 的对比如图5所示.

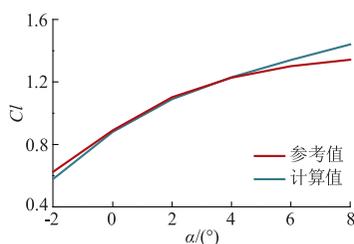


图5 圆弧板翼型升力系数计算值与文献值的对比
Fig. 5 Comparison of Cl between prediction and value in literature

从图5中可以看出,两者吻合得非常好. 在计算范围内,整体误差不超过 8% ,其中攻角 α 在 $0 \sim 6^\circ$ 时的误差不超过 3% ,证明文中算法是可行的.

2 分析与讨论

2.1 整体气动性能的比较

在 $-8^\circ \sim 16^\circ$ 的攻角内,对原型以及装有 $0.01c$, $0.02c$ 及 $0.04c$ 襟翼的圆弧板翼型进行数值模拟,分析 Gurney 襟翼对其气动性能的作用.

2.1.1 升力系数

图6为升力系数随攻角变化示意图. 由图6可以看出,安装 Gurney 襟翼后,圆弧板翼型的升力系数得到普遍提升,且提升的幅度随襟翼高度的增大而增大. 在开始攻角较小时,增升幅度并不大,随着攻角的增大有了明显的提高. 例如在 0° 时, $0.01c$, $0.02c$ 及 $0.04c$ 襟翼分别使升力系数增大了 37.4% , 50.6% 及 81.2% . 随着攻角的进一步增大,襟翼的增升效果逐渐减弱,在攻角等于 16° 时,圆弧板的升力系数几乎没有变化.

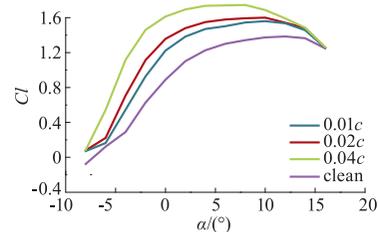


图6 升力系数随攻角变化示意图
Fig. 6 Variation of Cl with angle of attack

2.1.2 阻力系数

加装 Gurney 襟翼后,圆弧板翼型的阻力系数 Cd 也发生变化,在攻角 $\alpha > 2^\circ$ 时,加装 Gurney 襟翼后圆弧板翼型的阻力系数都有所提升,并且襟翼越长,提升越多;在攻角 $\alpha \leq 2^\circ$ 时,非但没有增大,反而降低了很多.

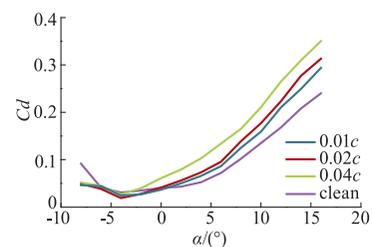


图7 阻力系数随攻角变化示意图
Fig. 7 Variation of Cd with angle of attack

2.1.3 升阻比

加装 Gurney 襟翼后,圆弧板翼型的升、阻力系数的变动决定了其升阻比 ε 的变动:在攻角 $\alpha \leq 2^\circ$ 时,升力系数上升的同时阻力系数下降,因此圆弧板的升阻比与原来相比有了很大的提升,图 8 还反映出 0.02c 和 0.04c 襟翼的增升性能明显优于 0.01c 襟翼.例如在攻角等于 -4° 时,0.02c 和 0.04c 襟翼分别使圆弧板的升阻比从 9.47 升至 31.70 和 41.30.当攻角 $\alpha > 2^\circ$ 时,由于这一范围内阻力系数增加的比较多,因此圆弧板翼型的升阻比略有降低,尤其是带有 0.04c 襟翼的圆弧板,其降幅较大,而带有 0.01c 和 0.02c 襟翼的圆弧板与原型相比相差不多.

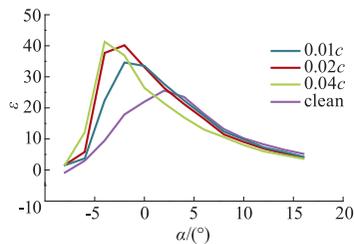


图 8 升阻比随攻角变化示意图

Fig. 8 Variation of the lift - drag ratio with angle of attack

由以上分析可以看出,0.02c 的 Gurney 襟翼能在小攻角时较好地提升圆弧板翼型的升阻比,而在大攻角下虽然减小了一些,但幅度不大.综合考虑,0.02c 的 Gurney 襟翼能较好提升圆弧板翼型的升阻比.

2.2 流场分析

2.2.1 圆弧板翼型附近流线分布

图 9,10 分别为无襟翼和 0.02c 圆弧板翼型在不同攻角下尾缘附近的流线分布图.对于无襟翼的圆弧板,在攻角 α 较小时,整个流场运动很稳定,并没有出现气流的分离,但当攻角 α 变大时,末端的气流逐渐脱离了上表面,从而发生分离,并且随着攻角 α 的变大,气流分离运动愈发强烈.

安装襟翼后,流场图出现了 2 个变动,其一是在圆弧板下表面末端与襟翼相交的地方出现了一个尺度较小的旋涡,称之为角涡.角涡的形成减小了下表面气流的速度,从而抬高了压力面尤其是圆弧板末端附近的压强.另一个变化是在襟翼后方的流场中形成一个卡门涡街,从图中可以看出,小攻角时,卡门涡街对圆弧板上表面气流有吸附作用,使得气流在流动过程中向下偏转,靠近圆弧板吸力面,有效缓解了气流的分离效应,使得失速延迟,增

大圆弧板的升力.但是在攻角大的情况下,如图中 $\alpha = 12^\circ$ 时,由于气流的分离比较剧烈,卡门涡街的尺度远大于襟翼的长度,与襟翼间的相互影响大大减弱,不能有效抑制失速.这也解释了大攻角下襟翼的增升效果并不好.

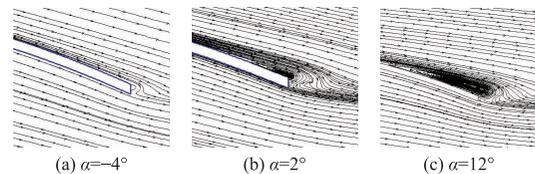


图 9 无 Gurney 襟翼翼型尾缘附近的流线分布

Fig. 9 Streamlines near trailing edge of ordinary airfoil

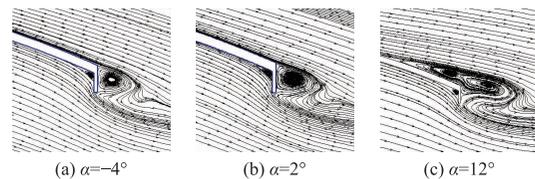


图 10 带有 2% 弦长高度 Gurney 襟翼的圆弧板尾缘附近的流线分布

Fig. 10 Streamlines near trailing edge of airfoil with Gurney flap in height of 2% chord length

2.2.2 压力分布

图 11 为攻角为 2° 时,无襟翼和 0.02c 的 Gurney 襟翼的圆弧板表面的压力系数 C_p 值的分布图.通过两者的比较可以看出,吸力面的压力系数 C_p 值整体减小了大约 0.5,表明卡门涡街的存在有效抑制了失速,使上表面的气体流动趋于稳定.压力面特别是在末端附近,带襟翼的圆弧板的压力系数明显比原型的大,这反映了角涡的影响,它抬高了下表面的压强,在尾缘尤为显著,这与前文流线图分析的结论一致.

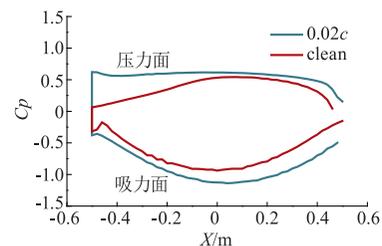


图 11 圆弧板翼型表面压力分布

Fig. 11 Pressure distribution on two airfoils

翼型的升力是通过上下表面压力系数的积分求得^[16],即图中上下表面围成的面积大小,包含的面积越大,翼型获得的升力就越大.从压力分布图可以看出,加装 Gurney 襟翼后,圆弧板翼型获得的升力提升了很多.

图12为有无襟翼的圆弧板翼型在攻角为 2° 时,其附近流场的压力分布对比图.从图中可以看出,与原型相比,带有襟翼的圆弧板翼型压力面的压强值更大,特别是在尾缘处.而吸力面的压强更低,且压强升高的趋势向尾缘处推移,表明上表面气流的分离向后推迟;在襟翼的后面出现了一个低压区,说明此处出现旋涡,即卡门涡街.从两者的对比分析中可以看出,Gurney襟翼有效改善了圆弧板翼型周围流场的分布,通过降低吸力面压强、增大压力面压强,提高了翼型的升力.

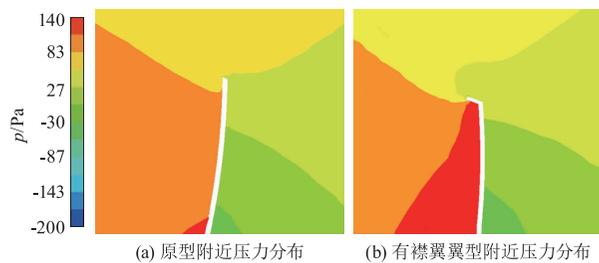


图12 有无襟翼圆弧板翼型附近压力分布对比图
Fig. 12 Comparison of pressure distribution around trailing edge of two airfoils

3 结论

文中在圆弧板翼型的尾缘处加装不同高度的Gurney襟翼,并对其进行数值模拟研究,结果表明:

1) 在攻角为 $-6^\circ \sim 14^\circ$ 时,Gurney襟翼均可以提升圆弧板翼型的升力系数,且襟翼越长,增升性能越好.在 0° 攻角时,4%弦长高度的襟翼使圆弧板的升力系数从0.890增至1.613,提高了81.2%.攻角大于 16° 时,襟翼不能起到太大的增升作用.

2) 与原型相比,添加Gurney襟翼后,圆弧板翼型的阻力系数在 $\alpha > 2^\circ$ 时提升了;但在 $\alpha \leq 2^\circ$ 时,并没有上升,还略有减小;在升阻力系数共同影响下,安装Gurney襟翼后,圆弧板翼型的升阻比在 $\alpha \leq 2^\circ$ 时获得较大提升,而在 $\alpha > 2^\circ$ 时则略有降低.

3) 由于0.02c的Gurney襟翼能在攻角较小时有效地提升圆弧板翼型升阻比,在攻角较大时虽然使圆弧板的升阻比变小了,但不明显,因此综合考虑认为0.02c的襟翼对圆弧板翼型能起到较好的增升作用.

4) Gurney襟翼的增升原理在于改善了圆弧板翼型附近流场的流动,尾缘处出现的卡门涡街有效缓解了吸力面的失速现象,襟翼前方的角涡提高了压力面尤其是尾缘附近的压强.

参考文献(References)

- [1] LIEBECK R H. Design of subsonic airfoils for high lift [J]. Journal of aircraft, 1978, 15(9):547-561.
- [2] TRAUB L W, MILLER A, REDINIOTIS O. Preliminary parametric study of Gurney flap dependencies [J]. Journal of aircraft, 2006, 43(4):1242-1244.
- [3] LI Y, WANG J, ZHANG P. Effect of Gurney flaps on a NACA0012 airfoil [J]. Flow turbulence & combustion, 2002, 68(1):27-39.
- [4] XIAO Tao, Daichin. The experimental study of aerodynamics and flow structures of a wing with Gurney flaps in ground effect [J]. ACTA aerodynamica sinica, 2013, 31(5):572-578.
- [5] MYOSE R, PAPADAKIS M, HERON I. Gurney flap experiments on airfoils, wings, and reflection plane model [J]. Journal of aircraft, 1998, 35(2):206-211.
- [6] 周丹. 大功率风力机叶片模态及气动特性分析 [J]. 流体机械, 2015, 43(12):33-36.
ZHOU Dan. Analysis of modal and aerodynamic of high-power wind turbine blade [J]. Fluid machinery, 2015, 43(12):33-36. (in Chinese)
- [7] 崔钊, 李建波, 赵洪. 小展弦比机翼加装 Gurney 襟翼的低雷诺数试验 [J]. 航空动力学报, 2014, 29(3):637-644.
CUI Zhao, LI Jianbo, ZHAO Hong. Test of low aspect ratio wing equipped with Gurney flaps at low Reynolds numbers [J]. Journal of aerospace power, 2014, 29(3):637-644. (in Chinese)
- [8] WANG J J, LI Y C, CHOI K S. Gurney flap—lift enhancement, mechanisms and applications [J]. Progress in aerospace sciences, 2008, 44(1):22-47.
- [9] 谭磊, 曹树良. 基于滤波器湍流模型的水翼空化数值模拟 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2010, 31(6):683-686.
TAN Lei, CAO Shuliang. Numerical simulation of hydrofoil cavitation based on filter-based model [J]. Journal of Jiangsu University (natural science edition), 2010, 31(6):683-686. (in Chinese)
- [10] 旷海洋. Gurney襟翼对风力机叶片气动性能影响的数值模拟研究 [D]. 兰州:兰州理工大学, 2012.
- [11] 张艳, 何伟军. 我国小型风力发电产业发展现状及前景研究 [J]. 科技和产业, 2013, 13(1):1-4.
ZHANG Yan, HE Weijun. Research on the development present situation and prospect of small wind power industry in China [J]. Science technology and industry, 2013, 13(1):1-4. (in Chinese) (下转第797页)