

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.01.001

半转翼的 Weis-Fogh 效应及推力的仿真研究*

张玉华,王孝义,洪 泓,邱支振
(安徽工业大学 机械工程学院,安徽 马鞍山 243002)

摘要:针对仿生飞行研究中具有重要应用前景的新型动力翼一半转翼的推力计算问题,提出了一种半转翼模型,导出了该模型参数的计算方法;基于 XFLOW 建立了两个半转翼 CFD 模型,即无固壁和有固壁半转翼模型,通过选择合理的流场计算区域和边界条件,采用湍流计算模型和刚性翼运动模型,结合半转翼实验模型参数和运动参数对半转翼流场速度、压力分布及推力进行了数值计算,获得了 Weis-Fogh 效应对半转翼运动流场特性和半转翼推力的影响规律,并与一个运动周期的实验推力进行了分析比较。研究表明:有固壁的半转翼流场中速度分布始终受到“急张”和“相拍”的影响,可大大提高半转翼的推力;由半转翼-固壁模型获得的推力计算曲线能真实反映半转翼推力的变化规律,这对计算不同参数的半转翼-固壁模型的推力具有参考价值。

关键词:仿生飞行器;半转翼;Weis-Fogh 效应;数值仿真

中图分类号:V211.8

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)01-0001-05

Numerical simulation of propulsion of half-rotating wing with Weis-Fogh effect

ZHANG Yu-hua, WANG Xiao-yi, HONG Hong, QIU Zhi-zhen

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

Abstract: Aiming at the thrust computation of half-rotating wing as a new power wing to be applied in bionic flying, a model of the half-rotating wing was proposed and the formulas to calculate the model parameter were derived. The two CFD models, wings with fixed wall and no wall, were established based on XFLOW with reasonable computed area and boundary condition of the flow field, turbulent flow model and complex motion of rigid wings. The numerical simulation was made using the same parameters and inputs in a experimental model of the half-rotating wing to obtain the flow field characteristic of the two CFD models and the wing's propulsion affected by Weis-Fogh effect. The computed thrust was compared with experimented thrust in same conditions in all of motion period of the wing. The results indicate that the wing lap and fling always act on the velocity distribution in the flow field around the wing with fixed wall so as to greatly increase the wing thrust. The computed thrust from the models presented above can demonstrate real change of the wing thrust. These provide important reference for the thrust estimation of different parameter models with fixed wall.

Key words: Bio-robot; half-rotating wing; Weis-Fogh effect; numerical simulation

0 引 言

半转翼是仿生飞行研究中发现的一种新型动力翼,它在流体中的不对称运动能产生大小和方向易于控制的推力,因而在仿生飞行机器人研究中具有重要的应用前景。Weis-Fogh 效应是英国生物学家发现的一种能够高效率地产生升力或推力的昆虫飞行机

制^[1],昆虫翅的“急张和相拍”(lap and fling)是 Weis-Fogh 效应的运动特征。半转翼的运动不同于昆虫翅的拍动,是两种简单转动的合成,与现有转动发动机的运动形式一致,具有运动速度连续、无惯性力冲击的特点。因此,半转翼的 Weis-Fogh 效应研究对于揭示半转翼运动与流体作用机制、流场特性和提高半转翼的推力,具有重要的理论意义和实用价值。

收稿日期:2016-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375014)

作者简介:张玉华(1961-),男,江苏海门人,博士,教授,硕士生导师,主要从事仿生学、仿生机器人等方面的研究。E-mail: yhzhang2002@163.com

半转翼既可单独应用,也可组合应用,形成不同性能的设计。例如,单叶片推进器^[2]、双叶片推进器^[3]和类扑翼飞行器^[4]等是不考虑 Weis-Fogh 效应的典型应用示例,而半转翼仿生船舶推进器是半转翼与固壁的组合且能产生 Weis-Fogh 效应的具体应用,仿鸟扑翼飞行器^[5]是两个对称布置的半转翼组合而形成的另一种应用实例。半转翼的 Weis-Fogh 效应对半转翼中流体中运动所产生的推力有重要的影响。文献[6]对半转翼与固壁组合产生的 Weis-Fogh 效应进行了理论分析和实验研究,获得了在定常流、平面流假设下的推力计算公式及其变化规律,实验验证了 Weis-Fogh 效应的存在使半转翼的推力在运动周期内都有明显的增加,且在急张和相拍阶段增加较小,而在平推阶段增加较大的事实。理论计算的结果除急张阶段外都小于实验结果。因此,基于假设的理论计算公式存在明显的计算误差。基于流体动力学理论的数值仿真方法是分析复杂流场特性的有效方法^[7-8]。文献[9]建立了两个相位差为 90° 的半转翼流体动力学仿真计算模型,为类扑翼飞行器的升力计算提供了可行方法,但其没有 Weis-Fogh 效应的影响。

为了更全面地研究半转翼的 Weis-Fogh 效应,基于 XFlow 建立半转翼-固壁计算模型,笔者对半转翼的运动流场进行仿真分析,获得半转翼流场特性的变化规律,探索提高半转翼推力的途径和计算方法。

1 半转翼-固壁模型

昆虫翅的 Weis-Fogh 效应是由于昆虫翅的运动存在“急张”和“相拍”的现象,半转翼和固壁的组合也能产生类似的现象。半转翼-固壁模型如图 1 所示。

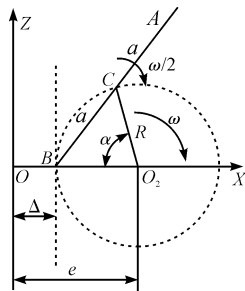


图 1 半转翼-固壁模型

考虑半转翼为矩形平板($2a \times b$),固壁位于固定坐标系 XOZ 的原点且垂直于 X 轴,曲柄 O_2C 的回转中心 O_2 偏离坐标原点的距离为 e ,曲柄半径为 R ,曲柄一端与半转翼的对称中心 C 铰接。

当曲柄转角 α 为 0 时,半转翼垂直于 X 轴,平行于固壁。当曲柄以转速 ω 转动时,半转翼的转速保持为

$\omega/2$ 。因此,半转翼在曲柄转动一周的过程中,半转翼快速接近固壁时产生“相拍”,而离开固壁时形成“急张”。当 $\alpha = 0$ 时,半转翼平行于固壁,此时为半转翼“相拍”和“急张”的分界点。由于半转翼运动是连续的转动且速度没有突变,半转翼在分界点前后的运动不会产生惯性冲击,这是区别于扑翼的重要特征^[10]。设平行固壁时的半转翼与固壁的距离为半转翼的工作间隙,用 Δ 表示:

$$\Delta = e - R \quad (1)$$

研究表明^[11],工作间隙 Δ 与半转翼的 Weis-Fogh 效应的效果密切相关。为了防止半转翼与固壁接触,半转翼的工作间隙 Δ 应满足:

$$\Delta > [\Delta] \quad (2)$$

式中: $[\Delta]$ —许用工作间隙,mm;

根据图 1 可导出半转翼外缘 A 的轨迹方程:

$$\begin{cases} x_A = e - R\cos\alpha + a\sin\frac{\alpha}{2} \\ y_A = e + R\sin\alpha + a\cos\frac{\alpha}{2} \end{cases} \quad (3)$$

由 A 点轨迹在 X 方向的最小值可求得:

$$[\Delta] = \frac{a^2}{8R} \quad (4)$$

显然,许用工作间隙 Δ 决定于曲柄半径 R 和半转翼的半宽 a ,与半宽 a 的平方成正比而与曲柄半径 R 成反比。当 $a = R$ 时, $[\Delta] = 0.125 R$; $a = 2 R$ 时, $[\Delta] = 0.5 R$ 。因此,相同的曲柄半径时,较小的半宽 a 可获得较小的工作间隙。

2 半转翼流场分析建模

为了研究半转翼-固壁模型的 Weis-Fogh 效应的影响规律,本研究建立 2 种不同的分析模型,即无固壁的半转翼模型和有固壁的半转翼模型。笔者基于 Xflow 的计算平台对半转翼周围流场环境进行建模,以获得合理的半转翼流场特性计算模型。

2.1 流场计算区域及边界条件

根据半转翼-固壁模型,固壁静止,曲柄和半转翼同时转动,两者的转动轴线为铅垂方向(Y 轴),半转翼浸没于流体中,半转翼的运动使固壁一侧的流体产生复杂的流动,流体对半转翼的推力是流体动力在 Z 方向的分力。以固壁一侧的半转翼和流体为建模对象,因此,流场计算区域设为一边有固壁(wall)虚拟流体隧道(Virtual Wind Tunnel),考虑到边界对计算结果的影响, Z 和 X 方向的隧道边长更大一些。固壁垂直于 x 轴且运动速度为 0,隧道的边界条件(Boundary

Conditions) 采用速度为零的边界。无固壁的半转翼模型则将半转翼布置在隧道的中央。

流场计算区域与半转翼布置如图 2 所示。

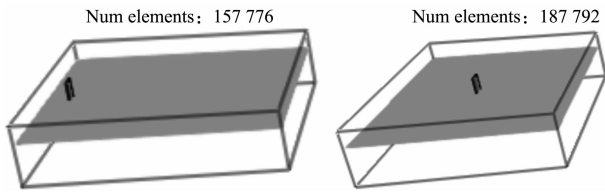


图2 流场计算区域与半转翼布置

2.2 计算模型

在计算区域,半转翼的运动使流体作不规则的运动,流体的速度会随半转翼转角的变化而变化,每一时刻的速度和加速度有所不同,尤其是半转翼接近或离开固壁时存在 Weis-Fogh 效应。因此,模拟分析半转翼流场特性时需要采用瞬态湍流计算模型。考虑到半转翼的轴向长度 b 接近径向宽度 $2a$,上、下翼缘的流体对半转翼的推力有一定的影响,若将半转翼的流场分析模型简化为平面模型将为产生较大的计算误差。本研究采用 Xflow 的 3D 单相外部流动模型,不考虑温度的影响,但能自动考虑湍流的影响。

2.3 半转翼及其运动模型

该模型研究的半转翼刚性较大,运动速度和流体动力较小,因而可将半转翼简化为刚体,不考虑流固运动耦合的影响。半转翼在流体中作平面运动,采用 Enforced 行为方式,其质心平动的运动规律为:

$$\begin{cases} x = e - R\cos(\omega t) \\ y = b/2 \\ z = R\sin(\omega t) \end{cases} \quad (5)$$

绕质心的转动用欧拉角表示为 $[0, \omega t, 0]$,半转翼的边界条件选择 wall roughness 为 0 的 Enhanced wall-function 模型。

3 半转翼 Weis-Fogh 效应数值计算

为了与现有实验结果^[2]比较,计算模型的流体为水,半转翼的参数与实验模型的相同。半转翼为矩形叶片,宽度 $2a = 230$ mm,高度 $b = 250$ mm, $\Delta = 110$ mm,设曲柄角转速 $\omega = 2\pi$ rad/s,半转翼的转动角速度为 π rad/s。有固壁和无固壁分析模型的流场计算区域分别为 $2.0 \times 0.6 \times 4$ m³ 和 $2.5 \times 0.6 \times 4$ m³,对应的计算单元数分别为 157 776 和 187 792;初始条件采用流体隧道缺省值,参考速度为 2 m/s。计算时间设为 1 s 使半转翼转动半周,完成一个运动周期的流场特性计算。为了使数值计算稳定收敛,笔者通过调整分析模型参数使稳

定性参数(stability parameter)小于 0.3。该计算过程中两种模型稳定性参数的最大值分别是 0.296 和 0.104。笔者采集经过 convolution 插值的瞬态数据,选择垂直于 y 轴的切平面显示速度矢量场和压力分布等值线。曲柄从半转翼平行于固壁的位置顺时针转动,输出半转翼不同方位时的周围流场速度和压力分布。

3.1 半转翼周围流场速度矢量分布

半转翼在不同方位时周围流场速度矢量分布图(固壁:水平方向布置)如图 3 所示,其中半转翼转角依次为 18° 、 72° 、 90° 、 144° 、 162° 、 180° 的无固壁流场速度分布如图 3(a) 所示,对应转角的有固壁流场速度分布如图 3(b) 所示。半转翼“急张”过程中,翼前端 A 点流速较大且形成了靠近翼前端的涡流(简称前端涡流),翼后端 B 点产生速度较小的涡流(简称后端涡流);随着翼转角的增大,翼两端的涡流位置和大小都在发生变化,前端涡流远离 A 点且强度减弱,而后端涡流接近 B 点并不断加强;半转翼转过 90° 后,后端涡流成为围绕半转翼的涡流;半转翼进入“相拍”阶段,后端涡流的中心由翼端 B 移向翼的中央。因此,半转翼在一个运动周期中,其周围的流场会形成两个涡流,涡流的位置和强度随半转翼的位置而变化,这与实验观察的结果是一致的。比较两种计算模型的流场速度可以发现:虽然半转翼的转速相同,但流场速度与有、无固壁密切相关,“急张”和“相拍”阶段的无固壁流场速度较大,而有固壁流场速度较小;半转翼在平推阶段(翼转角位于 $72^\circ \sim 126^\circ$ 之间)时有固壁的流场速度明显大于无固壁的流场速度。这反映了固壁-半转翼模型的 Weis-Fogh 效应特征。

3.2 半转翼周围压力分布

半转翼在不同方位时周围压力分布图如图 4 所示,其中半转翼转角依次为 18° 、 72° 、 90° 、 144° 、 162° 、 180° 的无固壁流场压力分布如图 4(a) 所示,对应转角的有固壁流场压力分布如图 4(b) 所示。半转翼前后表面与流体相互作用,由于涡流的作用使得前表面压力小于后表面的压力,半转翼前后的压力差产生了推力。与流场速度矢量图对应,在“急张”阶段,半转翼前端 A 运动速度较大,迎流面压力较大,与涡流接触的面形成负压区,但作用区域很小。随着半转翼的转动,迎流面的高压区不断扩大,而负压区随着涡流的位置和强度变化而不断扩大。在“相拍”阶段,由于后端涡流位于半转翼的附近,负压区最大且压力最小。因此,流场压力云图验证了固壁半转翼模型的 Weis-Fogh 效应特征。

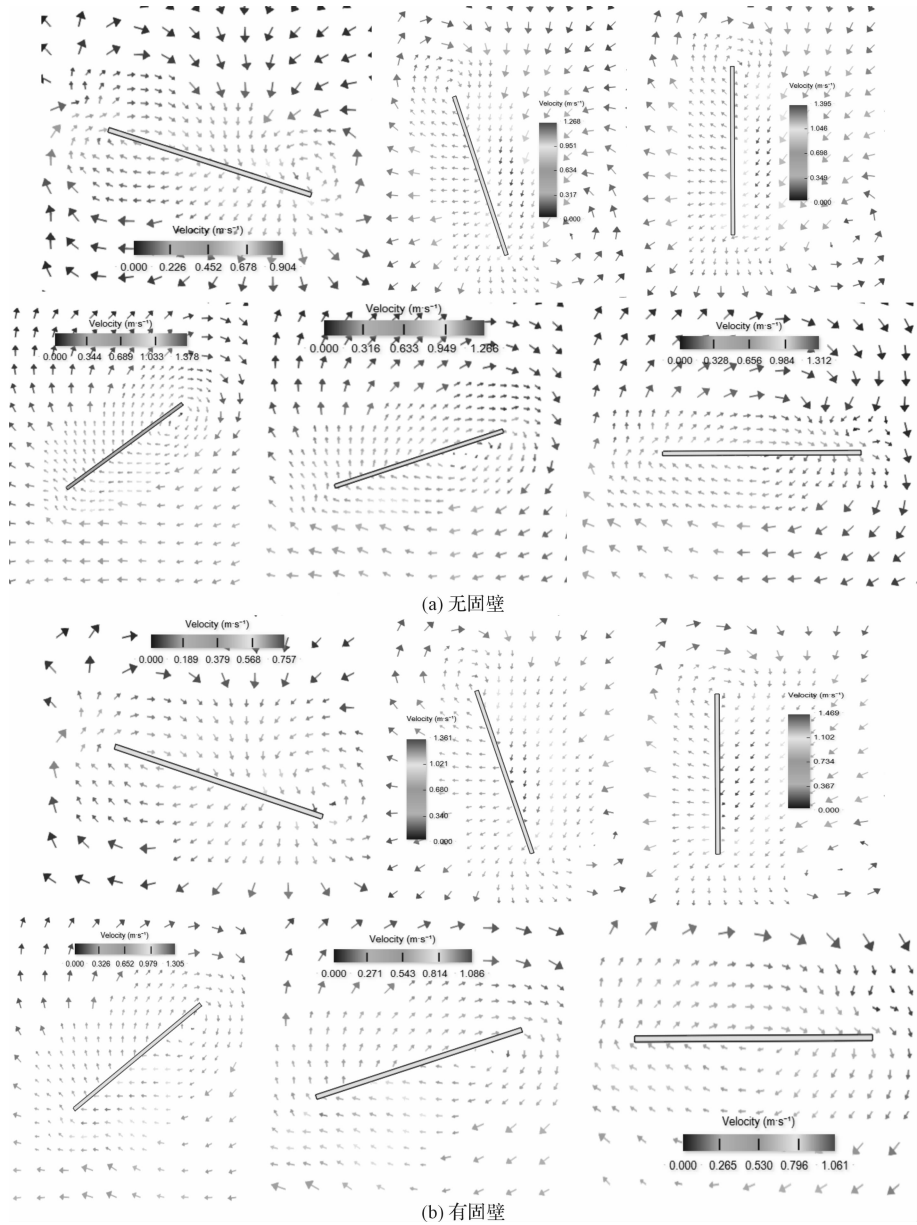


图 3 半转翼周围速度矢量分布

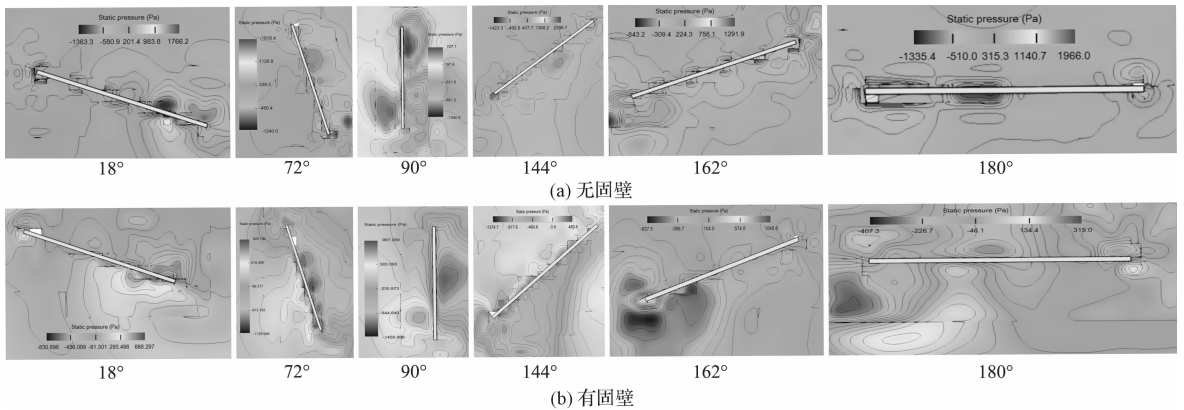


图 4 半转翼周围压力分布

3.3 仿真结果与实验结果的比较

半转翼运动过程中,其表面的分布压力可合成为升力或推力,当半转翼的结构尺寸和转速相同时,不同

模型计算的推力反映了 Weis-Fogh 效应影响的效果。根据上述两种模型的计算结果,整理出半转翼不同转角的计算推力,曲线如图 5 所示。

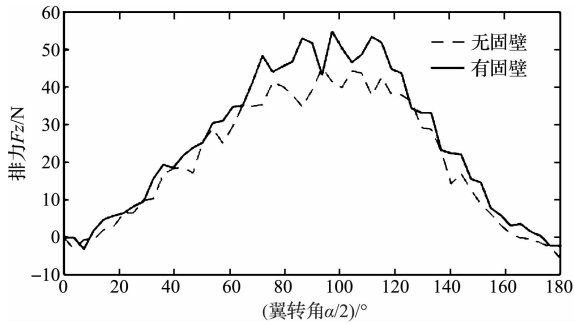


图5 计算推力曲线

同时引用相同条件下的实测推力,曲线如图6所示。

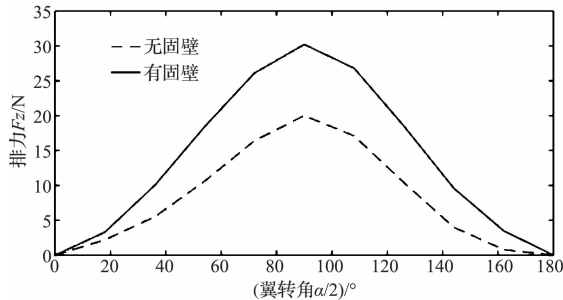


图6 实测推力曲线

在一个运动周期内半转翼的推力无论是计算结果还是实测结果都表明:有固壁时的推力明显大于无固壁时的推力,它们的变化规律在计算模型和实测模型中高度一致,这充分反映了 Weis-Fogh 效应对半转翼作用的真实效果。

在“急张”的初始点和“相拍”的终点,半转翼平行于固壁,此时半转翼上各点的 x 方向速度为 0,因此,此时的实测推力为 0,计算推力接近为 0,这是符合实际的。无固壁时的计算推力最大值为 44.33 N,而有固壁时,计算推力的最大值为 54.88 N,推力提高 23.8%。无固壁时的实测推力最大值为 20.0 N,而有固壁的实测推力最大值为 30.2 N,实测推力提高 51%。

无论有、无固壁,实测推力的大小都小于数值计算的推力,且实测推力的峰值出现的半转翼转角在 90° 左右,而计算推力的峰值出现的半转翼转角滞后于实测推力出现时的转角。这说明计算模型与实测模型存在一定的差距,需要进一步研究以提高计算模型的精度。

4 结束语

本研究提出了一种半转翼模型,给出了该模型参

数的计算方法,基于 Xflow 建立了半转翼的流场特性计算模型,为半转翼的流体动力计算提供了一种新方法。通过对无固壁和有固壁的半转翼模型进行了流场特性的仿真计算与分析,获得了半转翼运动时流场的速度矢量和压力分布,揭示了半转翼-固壁模型的 Weis-Fogh 效应影响机理。

研究表明,在一个运动周期中,有固壁的半转翼流场中速度矢量分布始终受到“急张”和“相拍”的影响,可大大提高半转翼的推力。由半转翼-固壁模型及其流场特性计算模型获得的推力计算曲线真实反映了半转翼推力的变化规律,对计算不同参数的半转翼-固壁模型的流场特性和推力具有参考价值。

计算实例中,计算模型的最大推力提高 23.8%,与实测推力提高 51% 差距较大,因此在今后的研究中其计算精度还有待于提高。

参考文献 (References):

- [1] DICKINSON M H. Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight[J]. *Science*, 1999, 284(5422): 1954-1960.
- [2] 张玉华,邱支振.单叶片推进器及其运动特性[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(3): 193-196.
- [3] 张玉华,邱支振,徐培民,等.双叶片推进器及其性能分析[J]. *机械传动*, 2008, 32(5): 10-13.
- [4] 张玉华,代强.一种扑翼飞行器. [P]. 中国: ZL20120057939.2, 2012-03-07.
- [5] 张玉华,王孝义,李彪,等.一种仿鸟扑翼机构. [P]. 中国: ZL201410446598.7, 2014-09-03.
- [6] 邱支振.半转机构[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2011.
- [7] RAMAMURTI R, SANDBERG W, LOHNER R. Simulation of flow about flapping airfoils using a finite element incompressible flow solver[J]. *Aiaa Journal*, 2001, 39(2): 253-258.
- [8] WANG Z J, BIRCH J M, DICKINSON M H. Unsteady forces and flows in low reynolds number hovering flight: two-dimensional computations vs robotic wing experiments[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2004, 207(Pt3): 449-460.
- [9] 张玉华,代强,周进.类扑翼飞行器及其叶片流场特性研究[J]. *机电工程*, 2013, 30(4): 403-406.
- [10] 简耀保,张丽,贾萍,等.飞行器姿态控制用拉瓦尔喷管的流场分析[J]. *液压气动与密封*, 2013(1): 32-36.
- [11] 陈富强,邱支振.有间隙翼片的 Weis-Fogh 效应[J]. *安徽工业大学学报*, 2005, 22(5): 121-123.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

张玉华,王孝义,洪泓,等.半转翼的 Weis-Fogh 效应及推力的仿真研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(1): 1-5.

ZHANG Yu-hua, WANG Xiao-yi, HONG Hong, et al. Numerical simulation of propulsion of half-rotating wing with Weis-Fogh effect[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(1): 1-5.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>