

文章编号:1674-8190(2014)03-296-06

地效翼船水橇的外形设计及水动力特性的数值模拟

陈燕君, 吴榕, 梁峰, 宋歌

(厦门大学 物理与机电工程学院, 厦门 361005)

摘要: 地效翼船的发展过程中, 必须解决一大技术性难题: 起飞过程中升阻比较小, 使得船身无法快速抬离水面。基于以上问题, 根据船身理论、机翼设计理论和冯·卡门入水冲击理论等, 设计一种应用于地效翼船的水橇, 利用 CATIA 对水橇进行三维建模, 并使用 FLUENT 软件对该水橇进行水动力特性的数值模拟。结果表明: 水橇的升力系数和阻力系数随着攻角的增大而增大, 其升阻比呈抛物线趋势, 在攻角为 5° 左右到达最大值; 相对其他来流速度, 水橇在来流速度 2 m/s 时的升力系数、阻力系数和升阻比更大。

关键词: 地效翼船; 水橇; 水动力特性; 升阻比; FLUENT 软件

中图分类号: V271.5

文献标识码: A

Design of Hydro-ski and Numerical Simulation of the Hydrodynamics of Wing-in-ground Effect Vehicle

Chen Yanjun, Wu Rong, Liang Feng, Song Ge

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In the development course of wing-in-ground effect vehicle, there remains one major technical issue, i. e. in the process of taking off the lift-drag ratio is too small to lift the aircraft body out from the water rapidly. To solve this difficult problem, according to the hull theory, wing design theory and the Theodore Von Karman water impact theory, a new hydro-ski applied in wing-in-ground effect vehicle is designed, and the software CATIA is used to draw 3D model of the hydro-ski, and the FLUENT is used to figure out the vehicle's hydrodynamic characteristics. Results show that lift coefficient and drag coefficient of the hydro-ski increases as the angle of attack increases. In addition, the lift-drag ratio curve is shown as a parabola, peaking at 5° . In the meantime, when the incoming flow velocity is 2 m/s, the lift coefficient, drag coefficient and C_L/C_D is larger than that of the others.

Key words: wing-in-ground effect vehicle; hydro-ski; hydrodynamic characteristics; lift-drag ratio; FLUENT software

0 引言

因具有高升阻比、可贴地飞行、机动性能强、隐蔽性好等特性, 地效飞行器受到人们的关注和重视。从 1897 年法国进行地面效应飞行试验至今, 人类对地效飞行器的理论研究和实践试验已有了上百年的历史^[1]。20 世纪 60 年代, 前苏联研制的

巨型地效飞行器“里海怪物”标志着地效飞行器的大力发展。随后, 德国、美国、意大利和日本等国也相继开展地效飞行器的研究。德国 A. M. Lip-pisch 设计的 Flarecraft 地效飞行器于 1994 年试飞成功, 翼展 6.7 m, 采用 225 马力航空发动机, 时速达 160 km。美国波音公司研制的“鹈鹕”地效飞行器, 海上飞行高度一般不超过 6 m, 陆地上飞行高度可达 6 000 m, 海上航程超过 10^4 km, 作为军事应用可运送 17 辆坦克^[2]。中国船舶科学研究中心研制的第一艘实用型地效翼船“信天翁-5”在 2003 年试航成功, 同年开始装备沈阳军区某部边

收稿日期: 2013-12-16; 修回日期: 2014-02-08

通信作者: 吴榕, wur@xmu.edu.cn

海巡逻艇大队,用于兴凯湖中俄边境的巡逻,这一成果把我国的地效翼船研究事业向实用化、工程化更推进一步。

地效翼船除了利用机翼获得升力之外,还可充分利用地面效应作用来获得升力。在近地面飞行时,地面(或水面)改变了机翼气流的下洗场和流速,机翼下方的空气流速减小,翼面上下的压差变大,使地效翼船的诱导阻力减小,获得了更大的升力^[3],端板能够使飞行阻力降低^[4];同时,在船身底部安装水橇能够使阻力进一步降低,且水橇可提高地效翼船的升力系数。因此,为了解决地效翼船大型化带来水对船体的严重冲击问题,俄罗斯把“救护者”水上飞机的水橇应用到了地效翼船上,主要是为了减小船身和机翼在起飞和降落过程中所受到的波浪冲击力。我国的高霄鹏等^[5]和谭大力等^[6]对支柱式水橇进行了拖曳实验研究,得出相关运动参数(速度、水橇浸深和水橇姿态角)以及支柱形式对地效翼船支柱式水橇空泡性能的影响规律。

鉴于水橇对地效翼船在近水面飞行的重要影响,本文以地效飞行器“天翼一号 DF-100”为研究对象,以典型亚音速翼型 NACA4412 为设计母体,根据船身设计理论、机翼理论以及冯·卡门入水冲击理论,参照尖拱体和截头尖拱体入水的缓解冲击载荷等研究成果,在 CATIA 的环境下,设计出一种新型水橇模型,使地效翼船能够在水中滑行和空中飞行时产生较高升阻比;利用 FLUENT 软件对水橇的水动力进行数值模拟,研究水橇在不同来流速度下和不同攻角下水橇的升力、阻力特性。

1 水橇外形设计

地效翼船 DF-100^[7]在起降过程中,波浪的扰动严重影响到飞行器的水动力、水动力矩和压力中心,从而影响飞行器的稳定性。因此,加装水橇能够增强飞行器的抗波浪性,使地效翼船在波浪中起飞时产生较高的升阻比,控制船体重心^[5,8]。

1.1 水橇翼型的外形设计

水橇的设计主要从提高水橇在水中滑行时的升力以及减小在水中滑行时的阻力着手。鉴于地效翼船 DF-100 的外形参数限制(机长 16.15 m,机高 4.91 m,宽 10.98 m),将水橇的最大弦长设定为 1.45 m。

最大厚度的相对位置(\bar{X}_c)增大,则翼型的最小压强点后移,从而可以使得转换点后移,层流附面层加长,紊流附面层减小,摩擦阻力减小,这有利于提高亚音速的最大升阻比,有利于改善续航性能;而水橇的设计要求需尽可能将转换点后移,即尽可能提高亚音速下水橇的最大升阻比,故在水橇最大厚度的相对位置由原来的 25% 后移至 34.5%。

地效翼船在亚音速飞行时,其相对厚度(\bar{C})对升力系数(C_L)的影响较大,而且在一般情况下翼型的相对厚度取 12%,因此本文的相对厚度取 12%。

相对弯度(\bar{f})对水橇的阻力性能有较大的影响,在一定范围内,相对弯度越大,升力也越大,阻力也随之增大,且阻力的增大速度更快,所以在水橇的设计中,将水橇的相对弯度根据机翼 NACA4412 减小,并减小最大弯度位置(X_f),减小阻力。修改后的翼型 NACA4412 参数如表 1 所示。

表 1 翼型 NACA4412 修改后的参数

Table 1 Aerofoil NACA4412 revamped parameters

类型	C/mm	$\bar{C}/\%$	$\bar{X}_c/\%$	$\bar{f}/\%$	$X_f/\%$
原型	1 000	12	25.0	4.00	40.00
改型	1 450	10	34.5	1.24	34.69

1.2 水橇平面和尾部设计

水橇首部和尾部形状对水橇水动力性能(尤其是阻力性能)影响最大。在地效翼船起飞过程中,若水橇的首部形状没有达到特定的要求,首部容易产生喷溅,可能打湿发动机和螺旋桨而造成腐蚀部件,能量损失,阻力增大和过度的喷溅冲击载荷作用在地效翼船的脆弱部分。国外通过水池试验对比了几种典型形状,得出以下结论:水橇的首部形状具有长三角形、尖剖面和无(小)首升角时,对减小喷溅的高度和程度最能达到效果^[9]。

早期的水橇模型拖曳水池实验得出结论:使用大展弦比水翼的水上飞机模型不能稳定地完成从水翼浸水到水翼滑行状态的转变。故将水橇的展弦比^[10]设定为

$$\lambda = \frac{l}{s} = \frac{0.5^2}{0.38} = 0.658 \quad (1)$$

式中: l 为水橇的展长; s 为水橇的面积。

在减震方面,尖细水橇尾部优于方尾,但并非

越尖的尾部形状越好,实践表明过于尖细的尾部,特别是点尾,易产生高速喷溅,应避免使用^[6]。

根据以上设计理论,运用 CATIA 软件中的创成式曲面对水橇的外形进行建模设计^[11-14],如图 1~图 2 所示。

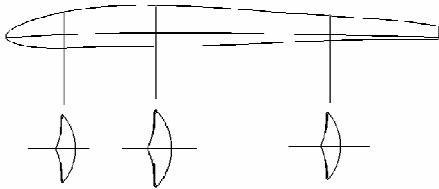


图 1 水橇的主视图以及各个截面的剖面图
Fig.1 Main view and cross-section of hydro-ski

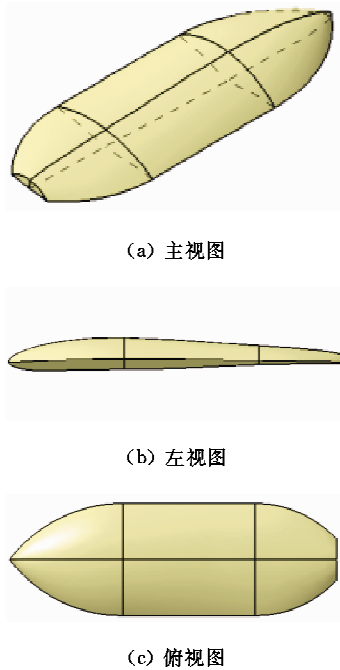


图 2 水橇在 CATIA 下的三维视图
Fig.2 3D view of hydro-ski in CATIA

2 计算区域的网格划分

本文采用自底向上建模方法,即先创建点,然后再生成线、面和体的方式进行网格划分。

根据上文设计的水橇,利用 CATIA 软件建立相应的计算区域(如图 3 所示),采用长方体的计算区域,水橇的长度 $D=1.5\text{ m}$,设定计算区域的尺寸为 $4D \times 4D \times 6D$ (即 $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 9\text{ m}$)。由于水橇前后尖点较多,上下水橇面的厚度有限以及曲面形状较为复杂,故在对水橇网格划分时采用非结

构化网格划分。本文采用 VOF 模型,即有空气入口和水流入口。例如:当选用浸深为 $1D$ 时,即水和空气的交界面离最近的水橇为 $1D$ 的距离。边界条件设置如图 4 所示,水橇的网格划分如图 5 所示。

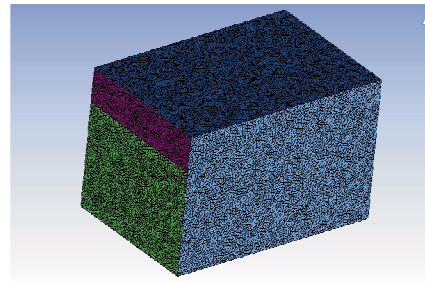


图 3 整体计算域的网格划分
Fig.3 Grid division of whole computational domain

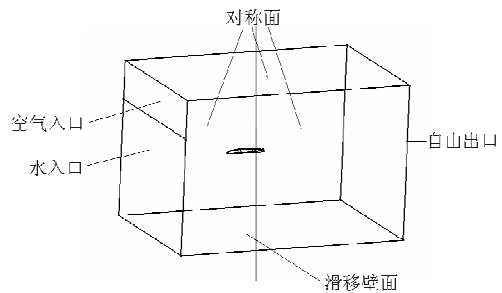


图 4 边界条件的设置
Fig.4 Boundary condition settings

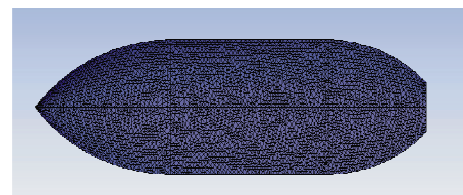


图 5 水橇上表面网格
Fig.5 Surface mesh of hydro-ski

3 三维水橇水动力数值模拟

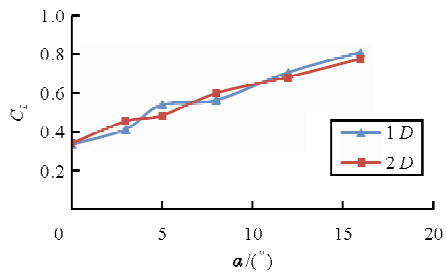
采用商用软件 FLUENT 求解定常不可压 N-S 方程,用于模拟水橇在水中的水动力特性以及周围的流场。在来流速度为 2、10、20 和 40 m/s 时,攻角从 0° 、 3° 、 5° 、 8° 、 12° 、 16° 不断变化,计算求解水橇的水动力。

在水橇的浸入深度为 $1D$ 和 $2D$ 的条件下,其中 D 为水橇的最大弦长,即 1.5 m 。利用 FLUENT 求解分析,研究来流速度 2、10、20 和 40 m/s

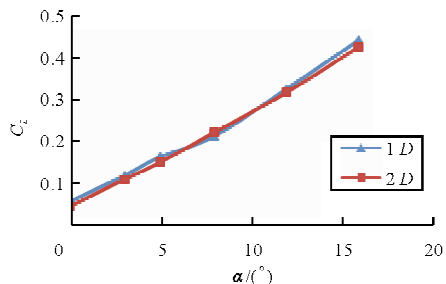
对地效翼船的升力系数、阻力系数和升阻比的影响。

(1) 升力系数

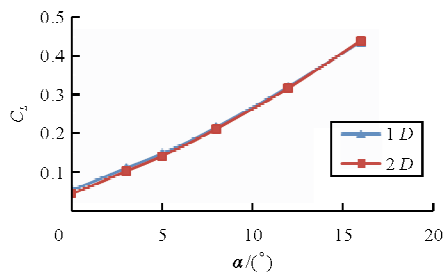
不同来流速度下,水橇升力系数与攻角的关系如图 6 所示。



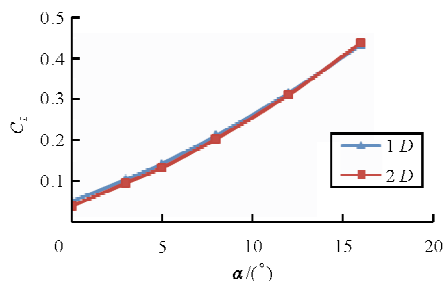
(a) $U_{\infty}=2 \text{ m/s}$



(b) $U_{\infty}=10 \text{ m/s}$



(c) $U_{\infty}=20 \text{ m/s}$



(d) $U_{\infty}=40 \text{ m/s}$

图 6 不同来流速度下水橇升力系数与攻角的关系

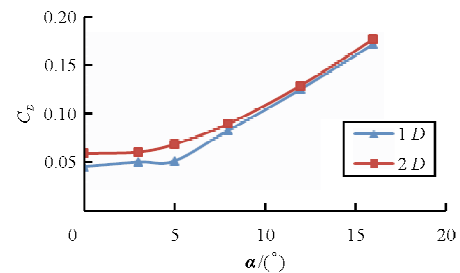
Fig. 6 Relationship between lift coefficient and angle of attack at different approaching velocity

从图 6 可以看出:水橇的升力系数随着攻角的增大基本呈线性增长;但是在来流速度 2 m/s 时,

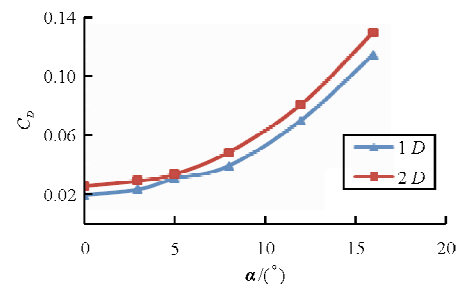
升力系数更大,而且升力系数随着攻角增长的速率更快。

(2) 阻力系数

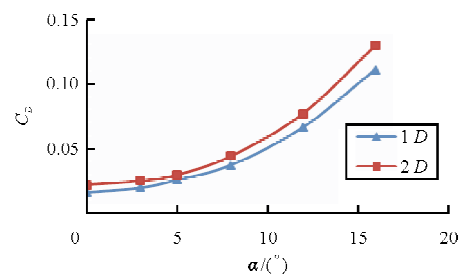
不同来流速度下,水橇阻力系数与攻角的关系如图 7 所示。



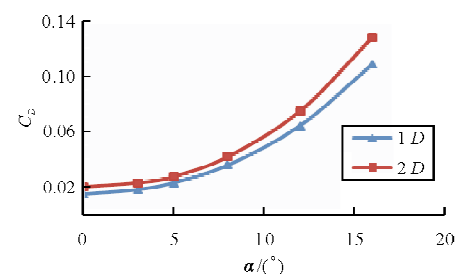
(a) $U_{\infty}=2 \text{ m/s}$



(b) $U_{\infty}=10 \text{ m/s}$



(c) $U_{\infty}=20 \text{ m/s}$



(d) $U_{\infty}=40 \text{ m/s}$

图 7 不同来流速度下水橇阻力系数与攻角的关系

Fig. 7 Relationship between drag coefficient and angle of attack at different approaching velocity

从图 7 可以看出:在来流速度为 2、10、20 和

40 m/s 时,水橇的阻力系数趋势相似,攻角为 $0^\circ \sim 5^\circ$ 时,阻力系数基本保持不变,之后随着攻角的增大阻力系数基本呈线性增长;但是在来流速度 2 m/s 时,阻力系数更大。

(3) 升阻比

不同来流速度下,水橇升阻比与攻角的关系如图 8 所示。

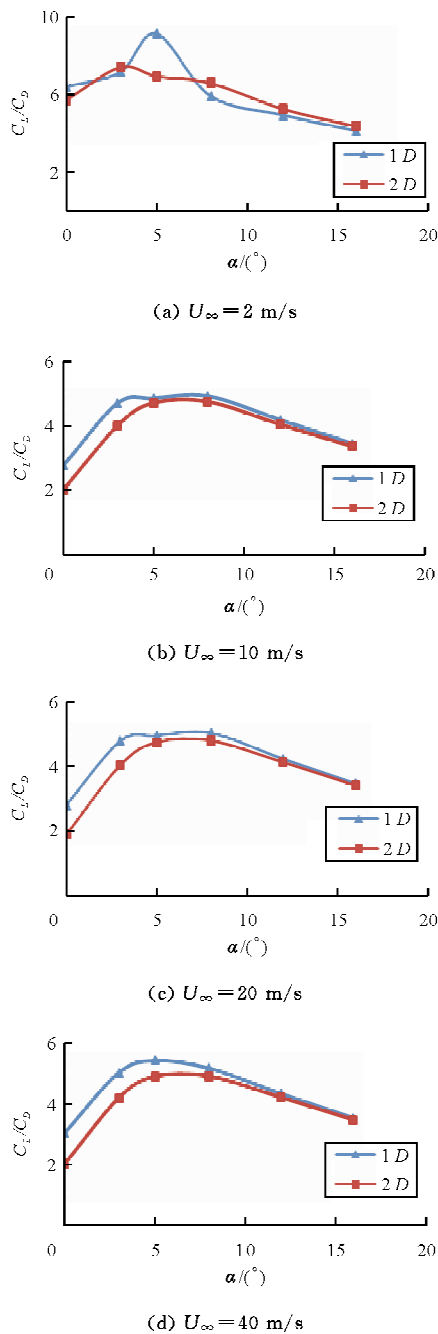


图 8 不同来流速度下水橇升阻比与攻角的关系
Fig. 8 Relationship between L/D ratio and angle of attack at different approaching velocity

从图 8 可以看出:水橇升阻比随攻角的变化轨迹呈抛物线,在攻角 5° 左右有最大值,并且在来流速度 2 m/s 的情况下,其升阻比更大。

4 结 论

(1) 随着来流速度的增大,水橇的升力系数和阻力系数均有不同程度的减小,而升阻比在 2 m/s 时相比其他速度条件下更大。同时,在不同攻角条件下,升力系数和阻力系数均随着攻角的增大而增大;但是升阻比呈抛物线,且在攻角 5° 左右达到最大值。

(2) 在地效翼船低速飞行时,安装水橇有助于提高升阻比,在飞行器起飞时使机身快速抬离水面。

参考文献

- [1] 林文祥, 吴榕, 唐雯. 地效飞行器发展回顾及前景展望[J]. 航空科学技术, 2011(1): 8-10.
Lin Wenxiang, Wu Rong, Tang Wen. Development review and prospect of wing-in-ground effect craft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2011(1): 8-10. (in Chinese)
- [2] 马世强. 地效飞行器前瞻[J]. 海空力量, 2008: 78-87.
Ma Shiqiang. Development perspective of ground-effect vehicle[J]. Naval Air Force, 2008: 78-87. (in Chinese)
- [3] 傅前哨. 地效飞行器的空气动力学原理[J]. 现代军事, 2005(3): 12.
Fu Qianshao. Aerodynamics principle of ground-effect vehicle[J]. Contemporary Military, 2005(3): 12. (in Chinese)
- [4] Kirill V Rozhdestvesky. Wing-in-ground effect vehicles[J]. Aerospace Sciences, 2006: 211-283.
- [5] 高霄鹏, 董祖舜, 朱建良. 空泡对地效翼船支柱式水橇性能的影响[J]. 船舶力学, 2005, 9(2): 18-25.
Gao Xiaopeng, Dong Zushun, Zhu Jianliang. Influence of cavitations on the performance of wing-in-ground-effect craft strut ski[J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(2): 18-25. (in Chinese)
- [6] 谭大力, 董祖舜. 水橇在地效翼船上的应用前景及设计思想[J]. 海军工程大学学报, 2000(2): 32-36.
Tan Dali, Dong Zushun. Application prospects and design concept of hydro-ski in wing-in-ground-effect craft [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2000(2): 32-36. (in Chinese)
- [7] 韩石. 破译里海怪物之谜[J]. 太空探索, 2009(5): 52-53.
Han Shi. Deciphering the riddle of "the caspian sea monster"[J]. Space Exploration, 2009(5): 52-53. (in Chinese)
- [8] 李先达. 实用地效飞行器技术发展述评[J]. 前沿科学, 2011, 19(5): 22-31.
Li Xianda. Review on key technologies to develop practical

- WIG craft[J]. *Frontier Science*, 2011, 19(5): 22-31. (in Chinese)
- [9] 王永虎, 石秀华, 李文哲, 等. 斜入水高速冲击的理论建模与缓冲分析[J]. *机械科学与技术*, 2008, 27(6): 766-769. Wang Yonghu, Shi Xiuhua, Li Wenzhe, et al. Modeling and cushioning analysis of oblique water entry with high velocity[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2008, 27(6): 766-769. (in Chinese)
- [10] 王细洋. 航空概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006: 46-47. Wang Xiyang. *Conspectus of aeronautics*[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006: 46-47. (in Chinese)
- [11] IBM/DASSULT. CATIA V5 创成式外形设计实例(1)[J]. *CAD/CAM与制造业信息化*, 2003, 7: 120-121. IBM/DASSULT. Generative shape design examples of CATIA V5(1)[J]. *CAD/CAM and Manufacturing Information*, 2003, 7: 120-121. (in Chinese)
- [12] IBM/DASSULT. CATIA V5 创成式外形设计实例(2)[J]. *CAD/CAM与制造业信息化*, 2003, 8: 106-109. IBM/DASSULT. Generative shape design examples of CATIA V5(2)[J]. *CAD/CAM and Manufacturing Information*, 2003, 8: 106-109. (in Chinese)
- [13] IBM/DASSULT. CATIA V5 创成式外形设计实例(3)[J]. *CAD/CAM与制造业信息化*, 2003, 9: 101-103. IBM/DASSULT. Generative shape design examples of CATIA V5(2)[J]. *CAD/CAM and Manufacturing Information*, 2003, 9: 101-103. (in Chinese)
- [14] 齐从谦, 王士兰. CATIA V5 R21 三维数字化建模与动态仿真基础教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013. Qi Congqian, Wang Shilan. *The basic tutorial of 3D digital modeling and dynamic simulation with CATIA V5 R21* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)

作者简介:

陈燕君(1989—),女,硕士研究生。主要研究方向:CAD/CAM、地效飞行器。

吴榕(1961—),男,副教授。主要研究方向:飞机系统、流体传动与控制、机械设计、机电一体化、地效飞行器。

梁峰(1988—),男,硕士研究生。主要研究方向:CAD/CAM、地效飞行器、流体实验模拟。

宋歌(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器设计。

(编辑:赵毓梅)