

学校编码: 10384

分类号\_\_密级\_\_

学号: 32020091152446

UDC\_\_

# 厦 门 大 学

## 硕 士 学 位 论 文

### 地效飞行器巡航状态气动特性数值模拟

### **Aerodynamic Characteristics Numerical Simulation of Wing in Ground Effect Aircraft during Cruising**

林文祥

指导教师姓名: 吴榕 副教授

专 业 名 称: 航空宇航制造工程

论文提交日期: 2012 年 月

论文答辩日期: 2012 年 月

学位授予日期: 2012 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2012 年 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

地效飞行器以其速度快，气动效率高，有效载荷大，经济性好，节省燃料，航程远等一系列的优点，占据了超低空和掠海面的飞行空档，具有广阔的市场和应用前景，大型化是地效飞行器进入实用化发展的必然趋势。机翼是提供升力的主要部件，机翼的气动特性直接关系到地效飞行器飞行性能，组合翼布局兼顾了地效区航行和高飞的需要，大大改善了地效飞行器的长时间高飞能力，在地效区和非地效区都具有较高的气动品质，海况适应能力较强，已经在新一代的地效飞行器中得到了应用。本文以某发明专利提出的地效飞行器模型为背景，对主翼为组合翼布局的地效飞行器进行了数值研究，工作内容主要包括以下四个方面：

(1) 在 GAMBIT 和 CATIA 环境下，分别建立二维翼型模型、三维组合翼模型和整机模型。通过网格划分软件，对建立的模型进行网格划分，为数值求解和后处理做准备。

(2) 对地效飞行器常用翼型 NACA4412 的气动特性进行了详细研究，使用 FLUENT 软件对翼型进行数值模拟，并与理论数据进行对比，一方面验证计算模型的准确性和可靠性；一方面熟练对 FLUENT 软件的应用，加深对软件求解方法的理解，为后续对三维组合翼和整机的气动性能模拟打下基础。

(3) 对多种不同工况下的组合翼模型进行数值模拟，主要包括研究内翼为矩形翼和梯形翼两种组合翼方案的流场；组合翼在地效区和非地效区的气动特性表现；端板高度、机翼上下反角、内外翼面积比例对气动特性的影响规律等。

(4) 对地效飞行器的整机模型进行数值模拟，分析地效飞行器巡航过程中的压力分布情况，研究飞行高度、迎角对地效飞行器气动性能的影响，验证组合翼布局形式的地效飞行器掠海高飞的可行性。

本文的研究成果表明组合翼布局适合于掠海高飞型地效飞行器，研究也为地效飞行器布局形式，外形参数选择提供了参考和依据。

**关键词：**地效飞行器；组合翼；气动特性；数值模拟

## Abstract

Wing in ground effect aircraft (WIG craft) with a series of advantages such as high speed, high aerodynamic efficiency, great payload, economical, high fuel efficient and long range, occupy the flight gap of low altitude and sea-skimming, has a broad market prospect, large-scale is the inevitable trend if WIG craft would come into the practical development. As the main component to provide lift, the wing's aerodynamic characteristics are directly related to WIG craft flight performance. The combined wing layout takes into account the need both the ground effect in area navigation and high-altitude flight, has greatly improved the long fly ability of WIG craft. It has a high aerodynamic quality both in ground and non-ground effect area, and has strong adaptability of sea conditions and already has been applied in the new generation of WIG aircraft. In this paper, take an invention patent of WIG craft model as the background, conduct a numerical study on the wing in ground effect aircraft with a combined wing layout, the main work including the following four aspects:

(1) Establishing two-dimensional airfoil model, three-dimensional combined wing model and the whole WIG craft model with the design software GAMBIT and CATIA. Use the meshing software to mesh the model, in preparation for the numerical solution and the post-processing.

(2) The aerodynamic characteristics of airfoil NACA4412 were studied in detail which is commonly used in ground effect aircraft. Using the FLUENT software for a numerical simulation, and compared with available theoretical value, on the one hand to verify the accuracy and reliability of the calculation model; the one hand, skilled application of the FLUENT software, deepen the understanding about the solve method of the software, laying the foundation of numerical simulation for the subsequent three-dimensional combined wing and the whole WIG model's aerodynamic performance.

(3) Conducting a numerical simulation of a variety of different conditions combined wing model. Including research the flow field of combined wing which with two kinds schemes, the inner wing is rectangular wing or trapezoidal wing; the aerodynamic characteristics of combined wing in ground effect zone and non-ground-effect zone; the laws how the end plate height, the anhedral and the inverted dihedral, the area ratio of inner wing and outboard wing affect the

aerodynamic characteristics, etc.

(4) Numerical simulating the whole WIG craft model, analysis the pressure distribution of WIG craft in the process of cruise, research flight altitude and angle of attack on the efficiency of the aerodynamic performance. Verify the feasibility if the WIG craft with combined wing layout can do a sea-skimming and high-altitude flight.

The study shows that the combined wings are fit for sea-skimming and high-flying WIG craft. The study also provides the basis for the selection of layout and geometric parameters of wings for WIG craft.

**Keywords:** wing in ground effect aircraft; combined wing; aerodynamic characteristics; numerical simulation

## 符号说明

$\rho$ : 密度

$\mathbf{u}$ : 速度矢量

$\mu$ : 动力粘度

$S_u$ 、 $S_v$ 、 $S_w$ : 守恒方程的广义源项

$i$ : 内能

$K$ : 动能

$P$ : 势能

$T$ : 温度

$C_p$ : 比热容

$S_T$ : 粘性耗散项

$R$ : 摩尔气体常数

$\Gamma$ : 广义扩散函数

$Re$ : 雷诺数

$N-S$ : Navier-Stokes 方程

$u_i$ : 时均速度

$\mu_t$ : 湍动粘度

$\delta_{ij}$ : “Kronecker delta”符号

$k$ : 湍动能

$\varepsilon$ : 耗散率

$C_\mu$ : 经验常数

$G_k$ : 平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项

$C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ : 经验常数

$\sigma_k$ : 与  $k$  对应的 Prandtl 数

- $\sigma_\varepsilon$ : 与  $\varepsilon$  对应的 Prandtl 数
- $S_k$ 、 $S_\varepsilon$ : 用户定义的源项
- c: 翼型弦长
- $c_A$ : 机翼平均气动弦长
- t: 翼型厚度
- f: 翼型弯度
- Xf: 翼型最大弯度位置
- h/c: 翼型离地相对高度
- CL: 升力系数
- CD: 阻力系数
- Cp: 压力系数
- CL/CD: 升阻比
- L: 升力
- D: 阻力
- $b_{av}$ : 机翼平均几何弦长
- h: 飞行高度
- $h/c_A$ : 组合翼和整机相对离地高度
- S: 机翼面积
- l: 机翼展长
- $h_B$ : 端板高度
- $l_B$ : 端板长度
- $t_B$ : 端板厚度
- $\lambda$ : 展弦比
- $\chi$ : 后掠角
- $l_1$ : 外翼翼根前缘距内翼前缘的距离
- $\alpha$ : 迎角



目 录

厦门大学学位论文原创性声明

厦门大学学位论文著作权使用声明

摘 要.....	I
Abstract.....	II
符号说明.....	IV
目录.....	VI
Catalogue.....	IX
第一章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.1.1 地效飞行器简介.....	1
1.1.2 组合翼的特点及应用.....	2
1.2 地效飞行器发展现状及前景.....	3
1.2.1 国内外地效飞行器发展历程及现状.....	3
1.2.2 地效飞行器的特点及应用前景.....	7
1.3 本文研究内容.....	8
第二章 地效翼船流场数值仿真方法.....	9
2.1 计算流体动力学简介.....	9
2.2 流体动力学控制方程.....	10
2.2.1 质量守恒方程.....	11
2.2.2 动量守恒方程.....	11
2.2.3 能量守恒方程.....	12
2.3 湍流模型.....	13
2.3.1 湍流模型的基本方程.....	13
2.3.2 湍流数值模拟方法.....	14
2.3.3 标准 k- $\epsilon$ 模型.....	17

2.4 CFD 软件介绍 .....	18
2.4.1 ICEM CFD 简介 .....	19
2.4.2 FLUENT 软件简介 .....	20
本章小结.....	22
<b>第三章 数值模拟方案的设定与建模.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 本文数值模拟方案概述 .....</b>	<b>23</b>
3.1.1 二维翼型 NACA4412 数值模拟 .....	25
3.1.2 三维组合翼地面巡航气动特性数值模拟.....	25
3.1.3 地效飞行器整机数值模拟.....	29
<b>3.2 计算模型的建立与网格生成 .....</b>	<b>30</b>
3.2.1 计算模型的建立.....	30
3.2.2 分块策略及网格的生成.....	33
3.2.3 网格质量检查.....	38
3.2.4 边界条件及求解参数设置.....	39
本章小结.....	40
<b>第四章 地效翼型 NACA4412 气动力分析.....</b>	<b>41</b>
<b>4.1 数值方法.....</b>	<b>41</b>
<b>4.2 计算结果与分析 .....</b>	<b>42</b>
4.2.1 计算模型验证.....	42
4.2.2 地面效应下翼型表面的压力系数分布.....	43
4.2.3 NACA4412 翼型在地面效应下的气动特性 .....	43
4.2.4 流场观察.....	45
本章小结.....	45
<b>第五章 组合翼巡航状态下气动力分析 .....</b>	<b>47</b>
<b>5.1 计算模型及数值方法 .....</b>	<b>47</b>
<b>5.2 计算结果及分析 .....</b>	<b>48</b>
5.2.1 两种组合翼方案巡航状态下的气动特性.....	48
5.2.2 组合翼在地效区和非地效区气动特性比较.....	56

5.2.3 内翼和外翼面积比例对气动性能的影响.....	60
5.2.4 端板高度对组合翼气动性能的影响.....	62
5.2.5 组合翼上、下反角对气动性能的影响.....	65
本章小结.....	66
<b>第六章 地效翼船整机数值模拟.....</b>	<b>67</b>
<b>6.1 计算模型与数值方法.....</b>	<b>67</b>
<b>6.2 地效飞行器气动特性随离地高度的变化情况.....</b>	<b>67</b>
<b>6.3 地效区外地效飞行器气动特性随迎角变化情况.....</b>	<b>72</b>
本章小结.....	74
<b>第七章 总结与展望.....</b>	<b>75</b>
7.1 总结.....	75
7.2 展望.....	76
参考文献.....	78
硕士期间发表的学术论文和申请的专利.....	81
致 谢.....	82

## Catalogue

### Originality Statement of Academic Thesis

### Copyright Assertion of Academic Thesis

**Chinese Abstract**..... I

**English Abstract**..... II

**Nomenclature** ..... IV

**Catalogue** ..... VI

**Chapter 1 Introduction**..... 1

**1.1 Research background** ..... 1

1.1.1 Wing in ground aircraft Profile ..... 1

1.1.2 Characteristics and application of the combined wing ..... 2

**1.2 Wing in ground aircraft development status and prospects** ..... 3

1.2.1 The course of development and current situation of Wing in ground aircraft at home and abroad ..... 3

1.2.2 The characteristic and prospect of Wing in ground aircraft ..... 7

**1.3 Contents of this paper** ..... 8

**Chapter 2 Numerical simulation method of Wing in ground aircraft** 9

**2.1 Computational fluid dynamics introduction** ..... 9

**2.2 Fluid dynamics equations** ..... 10

2.2.1 Mass conservation equation ..... 11

2.2.2 Momentum conservation equation ..... 11

2.2.3 Energy conservation equation ..... 12

**2.3 Turbulence model** ..... 13

2.3.1 The basic equations of the turbulence model ..... 13

2.3.2 Turbulence numerical simulation method ..... 14

2.3.3 Standard k- $\epsilon$  model ..... 17

<b>2.4 CFD software introduction</b> .....	18
2.4.1 ICEM CFD introduction .....	19
2.4.2 FLUENT introduction.....	20
<b>Chapter Summary</b> .....	22
<b>Chapter 3 Setting the numerical simulation program and modeling</b> .....	23
<b>3.1 Overview of the numerical simulation program</b> .....	23
3.1.1 Two-dimensional airfoil NACA4412 numerical simulation.....	25
3.1.2 Aerodynamic characteristics numerical simulation of the three-dimensional combined wing during cruise over ground .....	25
3.1.3 The whole wing in ground aircraft numerical simulation.....	29
<b>3.2 Geometric modeling and mesh generation</b> .....	30
3.2.1 Model building.....	30
3.2.2 Sub-block strategy and mesh generation .....	33
3.2.3 Mesh quality check .....	38
3.2.4 Boundary conditions and solution parameters set .....	39
<b>Chapter Summary</b> .....	40
<b>Chapter 4 NACA4412 airfoil aerodynamic analysis</b> .....	41
<b>4.1 Numerical Methods</b> .....	41
<b>4.2 Results and analysis</b> .....	42
4.2.1 The calculation model validation.....	42
4.2.2 Surface pressure distribution of ground effect airfoil .....	43
4.2.3 Aerodynamics of NACA4412 airfoil in ground effect.....	43
4.2.4 Flow field observation .....	45
<b>Chapter Summary</b> .....	45
<b>Chapter 5 Aerodynamic analysis of combined wing during cruise</b> .....	47
<b>5.1 Numerical Methods</b> .....	47
<b>5.2 Results and Analysis</b> .....	48
5.2.1 The aerodynamic characteristics of two kinds of combined wing program during cruise .....	48

5.2.2 The aerodynamic characteristics of the combined wing in ground effect area and unbounded flow field.....	56
5.2.3 The area ratio of inner wing and outboard wing influences on the aerodynamic performance.....	60
5.2.4 The end plate height of the combined wing influences on the aerodynamic performance.....	62
5.2.5 The anhedral and the inverted dihedral of the combined wing influences on the aerodynamic performance.....	65
<b>Chapter Summary</b> .....	66
<b>Chapter 6 The whole wing in ground aircraft numerical simulation.</b>	67
6.1 Computational model and numerical method.....	67
6.2 The aerodynamic situations of wing in ground aircraft change with the terrain clearance.....	67
6.3 The aerodynamic situations of wing in ground aircraft change with the attack angle in unbounded flow field.....	72
<b>Chapter Summary</b> .....	74
<b>Chapter 7 Summary and prospects</b> .....	75
7.1 Summary.....	75
7.2 Prospects.....	76
<b>References</b> .....	78
<b>Publications</b> .....	81
<b>Acknowledgements</b> .....	82

# 第一章 绪论

## 1.1 课题研究背景

### 1.1.1 地效飞行器简介

地效飞行器，也称作地效翼艇、飞翼船，它利用地（水）面效应和动力增升原理在地效区里飞行，使机翼升阻比增加，气动效率大大提高，是介于飞机、舰船和气垫船之间的一种新型的高速飞行器<sup>[1]</sup>。人类发现了地面效应现象，转而考虑如何应用这种附加升力。从 1897 年开始，法国人就进行了地面效应飞行试验，至今，人类对地效飞行器的理论研究和实践试验已经有了上百年的历史。不过因种种因素的制约，目前人类在该领域所取得的成就远不如在水上和空中运载工具方面那么明显。20 世纪 50 年代末苏联水翼船之父阿列克谢耶夫受命领导地效飞行器研发项目<sup>[2]</sup>，经过俄罗斯的专家们几十年艰苦不断的努力，攻克了许多关键的技术难题，成功地研制出不少最近几年才被逐渐披露的具有各种用途的地效飞行器，使世人对地效飞行器的性能特点有了更加全面的了解，同时也引起许多经济发达国家的广泛兴趣。在刚结束不久的第八届珠海航展上，国内首架具有完全自主知识产权的轻型水陆两栖飞机“海鸥 300”的亮相，成为本届航展亮点之一，受到观众持续关注。时至今日，已有多种型号的地效飞行器登上历史舞台<sup>[3]</sup>。

与普通飞机（包括水上飞机）相比，地效飞行器具有升力大，有效载荷多，节省燃料和航程远等特点；与高速海上交通工具气垫船相比，其远航性能和巡航速度都更为优越<sup>[4]</sup>。因而地效飞行器将飞机空中飞行的高速性和海上舰船的高承载性的优点完美地结合到一起，在水天之际占据了超低空和掠海面的飞行空档。

地效飞行器按照飞行高度划分，一般可以分为 A 类、B 类和 C 类。A 类通常只能在地效区内飞行。B 类为了越过障碍物或其他原因，可短暂地飞出地效区。C 类在地效区内外均能够长时间稳定地飞行，飞高可以超过 150m，常采用小展弦比的内翼加大展弦比的外翼组成组合翼布局，设有横向操纵副翼<sup>[5]</sup>。

### 1.1.2 组合翼的特点及应用

C类地效飞行器为了兼顾地效区和非地效区的气动和操稳特性,气动布局上常采用独特的内翼、端板加外翼的组合翼布局型式。这是由于飞行器在地效区内某一高度飞行时,机翼局部弦长越大,地面效应产生的附加升力就越大。在机翼面积一定时,增加机翼弦长,展长必然降低,也就是展弦比降低了。展弦比降低,机翼的固有升力也就降低了。既要提供较大的地面效应附加升力,又要使机翼的固有升力下降得少一些,是地效飞行器机翼设计必须要解决的问题之一。所以,以大部分面积(组合翼总面积的70%-80%)构成弦长大的小展弦比内翼,以小部分面积(组合翼总面积的20%-30%)构成单独展弦比大的外翼。二者结合起来的组合翼展弦比较大,大部分机翼面弦长也大,就能保证该机翼既有较大的固有升力、又能提供较大的地面效应附加升力<sup>[6][7]</sup>。在地效区飞行时,主要由内翼和端板的组合在较强的地效作用下提供大部分升力,外翼也产生小部分升力,同时可以改善机翼气流绕流特性和气动品质,起到横侧稳定作用<sup>[8]</sup>。当超出地效区时,小展弦比内翼产生的固有升力下降,无法满足长时间高飞的需求,这时大展弦比的外翼对总升力的贡献变大,保证了地效飞行器能够长时间的高飞。组合翼布局兼顾了地效区航行和高飞的需要,大大改善了地效飞行器的长时间高飞能力,在地效区和非地效区都具有较高的气动品质,海况适应能力较强,已经在新一代的地效飞行器中得到了应用,如我国的“天使鸟”号AB-606地效飞行器<sup>[9]</sup>;我国与俄罗斯联合发展地效飞行器也采用这种布局形式<sup>[10]</sup>。



图 1.1 “天使鸟”地效飞行器



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库