

第四届数学中国数学建模网络挑战赛

地址：内蒙古数学会
电话：0471-5220129

邮编：010021

网址：www.tzmcm.cn
Email：2011@tzmcm.cn

第四届“互动出版杯”数学中国 数学建模网络挑战赛 承 诺 书

我们仔细阅读了第四届“互动出版杯”数学中国数学建模网络挑战赛的竞赛规则。

我们完全明白，在竞赛开始后参赛队员不能以任何方式（包括电话、电子邮件、网上咨询等）与队外的任何人（包括指导教师）研究、讨论与赛题有关的问题。

我们知道，抄袭别人的成果是违反竞赛规则的，如果引用别人的成果或其他公开的资料（包括网上查到的资料），必须按照规定的参考文献的表述方式在正文引用处和参考文献中明确列出。

我们郑重承诺，严格遵守竞赛规则，以保证竞赛的公正、公平性。如有违反竞赛规则的行为，我们将受到严肃处理。

我们允许数学中国网站(www.madio.net)公布论文，以供网友之间学习交流，数学中国网站以非商业目的的论文交流不需要提前取得我们的同意。

我们的参赛队号为：1641

参赛队员（签名）：

队员 1：罗天旺

队员 2：郭翠雯

队员 3：李徘菱

参赛队教练员（签名）：

参赛队伍组别：大学组

第四届数学中国数学建模网络挑战赛

地址：内蒙古数学会
电话：0471-5220129

邮编：010021

网址：www.tzmcm.cn
Email：2011@tzmcm.cn

第四届“互动出版杯”数学中国

数学建模网络挑战赛 编号专用页

参赛队伍的参赛队号：（请各个参赛队提前填写好）：

竞赛统一编号（由竞赛组委会送至评委团前编号）：

竞赛评阅编号（由竞赛评委团评阅前进行编号）：

第四届数学中国数学建模网络挑战赛

地址：内蒙古数学会

电话：0471-5220129

网址：www.tzmcm.cn

邮编：010021

Email：2011@tzmcm.cn

2011 年第四届“互动出版杯”数学中国 数学建模网络挑战赛

题 目 风浪下客机水上迫降姿态的研究关 键 词 水上迫降 微分模型 连续离散化 ANSYS 有限元分析

摘 要：

近年来，随着航空业的不断发展，飞机不断的增多，飞机迫降事件越来越频繁。飞机在有风浪的海面上迫降时，会产生较大的接水速度和冲击力，此情况下飞机结构部件很容易发生不同程度的破坏。由于机体损坏，飞机的漂浮性能将降低，伴随着飞机沉入海底，从而给乘客和机组成员的生命安全带来极大威胁。为此，对客机以何种姿态和航向接触海面有计划迫降的研究就显得尤为重要。

由于客机水上迫降涉及多场耦合，问题十分复杂。且根据相关数据统计表明，飞机水上迫降安全至少需要考虑两方面因素：飞机着水姿态和航向接触方式。本文通过对2009年美国空中客车A320客机起飞90秒后迫降问题的抽象简化，采取有限单元法，用三角形壳单元离散了客机模型的求解域建立有限元模型，利用ANSYS软件模拟飞机迫降海面的模型，并模拟飞机在各个角度的水面冲击力的影响，对结果进行了比对，判断出飞机的最佳入水角及最大水载荷位置，并最终得出飞机在有风浪的海面上的最佳入水姿态和最安全的航向接触海面方式。

本文中，我们的思路主要针对对飞机着水姿态进行纵向逐一比较分析——飞机头部入水、飞机中部入水、飞机尾部入水，另一方面横向比较结构强度和航向接触方式。其中，着重分析飞机分别在顺浪和逆浪时，尾部入水的情形。根据数据显示得出，水对飞机的冲击力为： $F = [f - m_{\text{总}} M^{-1} [F^{\text{ext}} - (Cv_n + Kd_n)]] / \sin \theta$ ，通过分析得出飞机在水面上的应变力和飞机所承受的最大水载荷，进一步得出飞机迫降在有风浪的海面上的最佳姿态和航向接触海面方式。

参赛队号 1641所选题目 A 题参赛密码 _____
(由组委会填写)

第四届数学中国数学建模网络挑战赛

地址：内蒙古数学会
电话：0471-5220129

邮编：010021

网址：www.tzmcm.cn
Email：2011@tzmcm.cn

英文摘要（选填）

Abstract

In recent years, along with the continuous development of aviation, the plane unceasingly increasing, the plane landing in event more frequent. The storm in a plane crash on the sea, will produce larger connect water speed and impact, this case aircraft structure parts are likely to happen at different levels of destruction. Because the body is damaged, plane floating performance will decline, with aircraft, which sank to the seabed to passengers and crew's life safety brings great threat. Therefore, the airliner in what attitude and heading contact the study sea planned landing are particularly important.

Because water landing aircraft involved in a number of field coupling, the problem is very complex. And according to relevant data statistics show that plane crash safety needs at least consider water two sides of factors: the water stance and heading contact method. This article through to 2009 American airbus A320 airliner problems after take-off 90 seconds of abstract simplified, landing with finite element method, take the airliner triangle shell element discrete model domain, a finite element model using ANSYS software simulation model of plane landing in the sea, and in every Angle simulate aircraft, the influence of water impact a plane's initial judgment with water point and most troublesome load position, and the results are the matching, eventually got the plane in the best on the sea waves in the attitude and the most safe water way heading contact the sea.

In this article, we on a plane with water posture longitudinal by comparative analysis - planes enter the water, aircraft head into the water, central the shuttle into the water, on the other hand transverse comparison structure strength and heading contact method. Among them, emphatically analyzed respectively in the plane wave and inverse waves, tail into the water situation. According to the data shows that the impact of the water to aircraft for: $F = [f - m_{\text{总}} M^{-1} [F^{\text{ext}} - (Cv_n + Kd_n)]] / \sin \theta$. That plane, through the analysis on the surface of power of meet an emergency and aircraft under that most troublesome load, further the plane landing in the best on the sea waves in sea posture and heading contact way.

#1641

风浪下客机水上迫降姿态的研究

一、问题的重述

近年来，飞机迫降事件时有发生。在越洋飞行的航班中，曾有个别航班出现过由于重大故障或意外原因，被迫在海面迫降的情况。在有风浪的条件下，飞机在海面的迫降具有更大的难度和危险性，如何在有风浪的海面上进行迫降是一个技术性比较强的问题；建立合理的数学模型，对飞机在有风浪的海面上迫降进行分析，指出飞机在海面上以何种姿态和航向接触海面是相对安全的选择。

二、问题分析

近年来，随着航空业的不断发展，飞机不断的增多，飞机迫降事件越来越频繁。飞机水上迫降时，会产生较大的接水速度和冲击力，此情况下飞机结构部件很容易发生不同程度的破坏。根据相关数据统计表明，飞机水上迫降安全至少需要考虑两方面因素：飞机着水姿态和航向接触面。

若飞机俯冲会给飞机结构造成灾难性破坏；跳跃会使飞机失去操纵，第二次着水也会给飞机结构造成灾难性破坏，着水时向前速度太大也会直接伤害乘员，过大的撞击压力和滑行压力会引起飞机结构的严重破坏。因此，客机合适的着水姿态，可以保证客机着水时不出现剧烈的“跳跃”、“翻转”等情况；而且保证机身下部蒙皮不破裂，从而使得机舱在一定时间内不进水，为乘员安全撤离赢得足够时间和空间。

根据试验和理论分析以及实际水上迫降的情况表明，为使飞机保持着漂浮状态没有立即沉入海底，最大限度的保证人员安全，飞机应要具有良好的漂浮特性，柔和的降落、且没有俯冲或跳跃、向前减速度不太大、撞击压力和滑行压力也不太大，尽可能慢的速度和最佳角度迫降在河面。

由于客机水上迫降涉及多场耦合，问题十分复杂。基于本问题，本文采取有限单元法，用三角形壳单元离散了客机模型的求解域建立有限元模型，利用 ANSYS 软件模拟飞机迫降海面的模型，并模拟飞机在各个角度的水面冲击力的影响，对结果进行了比对，判断出飞机的最佳入水角及最大水载荷位置，最终得出飞机在有风浪的海面上的最佳入水姿态和最安全的航向接触海面方式。

为此，我们认为考虑该问题的出发点有以下几点：

(1) 飞机的入水姿态可以分为三种情况分析：飞机头部入水、飞机中部入水、飞机尾部入水。

(2) 飞机在有风浪的海面上迫降的情况分为顺浪和逆浪这两种情况，在此基础上讨论撞击过程中飞机的动能变化和飞机所承受的最大水载荷。

(3) 分析飞机最合适的着水速度、着水角度和航向接触，尽可能减小水面对客机的冲击力，尽可能保护机身的完整，以延长救援时间。

三、基本假设

- 1、假设海水的流动为理想流体，忽略水的粘滞性对飞机造成的影响。
- 2、假设飞机为密度均匀的圆柱刚体，不考虑飞机的左右转动和翻转，襟翼通常采用最大偏角，起落架必须收起
- 3、不考虑在空气中所受摩擦力等因素，即飞机在与水面接触前，飞机水平方向的速度不会发生改变；

#1641

四、符号及概念说明

符号	说明	符号	说明
K	整体刚度矩阵	a_n, v_n, d_n	当前时间步的加速度、速度与位移
Δ	整体结点位移矩阵	C	结构阻尼矩阵
P	直接结点荷载	K	为结构刚度矩阵
P_e	等效结点荷载	M	为质量矩阵
P_d	整体综合结点荷载矩阵	$m_{\text{总}}$	飞机的总质量
N	当前时间步	[D]	弹性矩阵
F^{ext}	外荷载矢量	S	应力转换矩阵
F^{int}	内力矢量	F^e	单元的结点力
N_i, N_j, N_m	单元 i, j, m 的位移次形态（位移在单元内的变化规律）	A	三角形 ijm 的面积
F^{residual}	剩余力矢量	K	单元劲度列阵

五、模型的建立与求解

一、相关知识

1、有限元法：是近似求解一般连续问题的数值方法。将连续体离散成若干较小的单元，分析单元的力学关系，再综合成整体；是一种将复杂问题变成简单问题综合的方法。它是一种化整为零、集零为整、化未知为已知的方法。不同的学科，所求解的参数不同。

2、有限元法要点：

(1)、离散。将求解域（结构或连续体）离散为若干子域—单元，并通过单元边界上的节点相互联结成为集合体。

(2)、分片插值。在单元内假设近似函数分片表示全域内待求的未知场变量（位移，温度，电位或磁位）。单元内近似函数由未知场函数在节点的值和对应的插值函数表示。节点的值数值求解的未知量，无穷多自由度问题转换为有限自由度问题。

(3)、单元集合体基本方程及求解。利用与原问题数学模型（基本方程，边界或

#1641

初始条件)等效的能量原理,建立待求解未知量(节点场函数值)的基本方程。基本方程为代数方程组或常微分方程组,即有限元求解方程。通常表示为矩阵形式。用数值方法求解方程。

3、有限元模型,ansys 软件求解步骤,流程图如下:

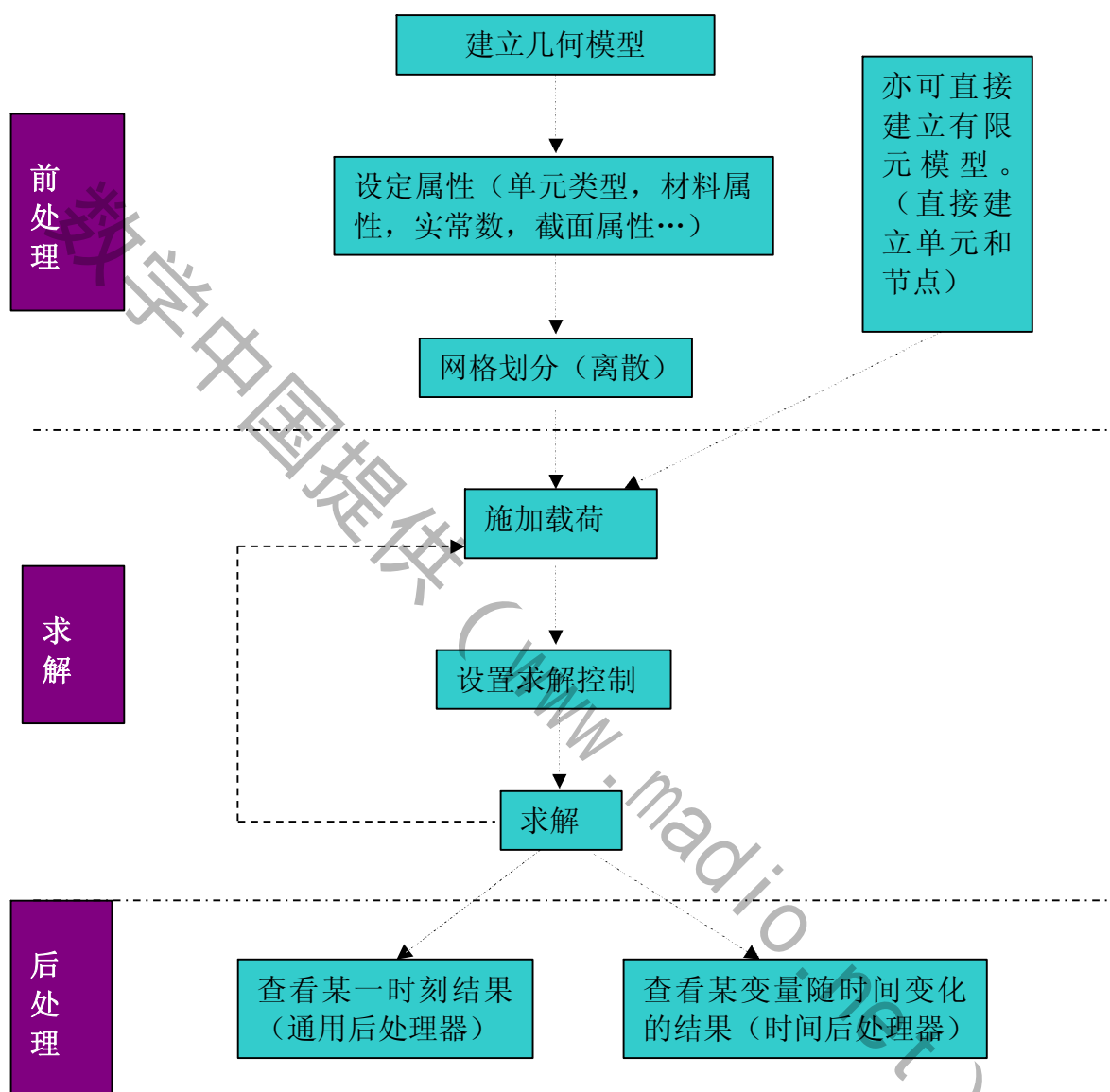


图 1

二、有限元模型的建立

飞机模型由二维壳单元和一个梁单元组成。因此,将飞机模型简化成机身长 4 米,直径 1 米圆筒,水体模型定义为 $20\text{m} \times 12\text{m} \times 3\text{m}$ 的六面体,水的欧拉单元全部采用六面体单元,以便用于快速耦合算法^[1]。欧拉单元的有限元划分采用不均匀划分,在靠近撞击的区域,网格逐渐加密,并且在水体模型的两头分别加上两块钢性板,其中一块板子固定,一块以一定的速度压迫弹性水以激起浪花,其模型如图 2 所示。

#1641

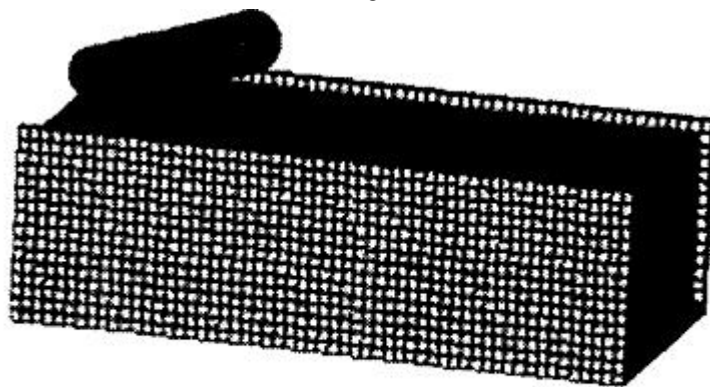


图2 有限元模型

对于飞机模型，我们将飞机连续体离散成有限个三角形单元^[2]。对一个三角形单元进行分析，再整体将这种分析无限接近精确解。

(一) 三角形单元离散化结构分析步骤：

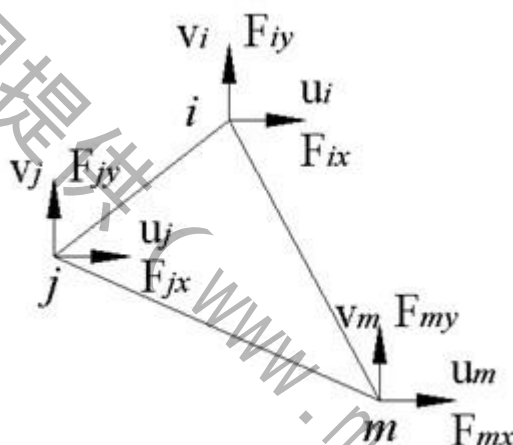


图3

(1) 三角形单元的位移模式

按照解析几何学，在图示的坐标系中，为了得出的面积 A 不致成为负值，节点 i, j, m 的次序必须是逆时针转向的。结点三角形单元结点逆时针编号为 i, j, m ，每个结点有 2 个位移分量如图 3 所示。单元结点位移：

$$\mathbf{a}_i = \begin{Bmatrix} u_i(t) \\ v_i(t) \end{Bmatrix} \quad (i, j, m) \quad (1)$$

采用线性插值，即假定单元上的位移分量是坐标的线性函数：

$$u = a_1 + a_2x + a_3y \quad v = a_4 + a_5x + a_6y \quad (2)$$

它们可以由结点位移确定如下：

$$\begin{aligned} u_i &= a_1 + a_2x_i + a_3y_i \\ u_j &= a_1 + a_2x_j + a_3y_j \\ u_m &= a_1 + a_2x_m + a_3y_m \end{aligned} \quad (3)$$

联立 (1) (2) (3) 求解上述方程，可得：

#1641

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{1}{2\Delta}(a_i u_i + a_j u_j + a_m u_m) \\
 a_2 &= \frac{1}{2\Delta}(b_i u_i + b_j u_j + b_m u_m) \\
 a_3 &= \frac{1}{2\Delta}(c_i u_i + c_j u_j + c_m u_m)
 \end{aligned} \quad (4)$$

其中：

$$\begin{aligned}
 a_i &= x_i y_m - x_m y_j \\
 b_i &= y_i - y_m \quad (i, j, m) \\
 c_i &= -x_j + x_m
 \end{aligned} \quad (5)$$

而

$$\Delta = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \end{vmatrix} = \frac{1}{2}(b_i c_j - b_j c_i) \quad (6)$$

其中 Δ 就等于三角形 ijm 的面积：

于是由(3) (4) (6)可以得到：

$$u = \frac{1}{2\Delta}[(a_i + b_i x + c_i y)u_i + (a_j + b_j x + c_j y)u_j + (a_m + b_m x + c_m y)u_m] \quad (7)$$

其中：

$$N_i = \frac{(a_i + b_i x + c_i y)}{2\Delta} \quad (i, j, m) \quad (8)$$

N_i, N_j, N_m 这三个函数，表明单元 i, j, m 的位移次形态（也就是位移在单元内的变化规律），称为形态函数，简称形函数。

同理得到单元的位移函数：

$$\begin{aligned}
 u &= N_i u_i + N_j u_j + N_m u_m \\
 v &= N_i v_i + N_j v_j + N_m v_m
 \end{aligned} \quad (9)$$

可将位移模式（位移函数）改写为矩阵模式：

$$f = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_m & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_m \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{Bmatrix} = [N_I I \quad N_J I \quad N_m I] \{\delta\}^e = [N] \{\delta\}^e \quad (10)$$

其中，

$$N = \begin{pmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_m & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_m \end{pmatrix} \quad (11)$$

为单元的节点位移列阵

(2) 单元中的应变和应力。

#1641

现有了单元的位移模式，就可以借助平面问题的几何和物理方程，导出用单于的结点位移表示单元中的应变和应力分量的公式。由

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

得到

$$\{\varepsilon\} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_m & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_m \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_m & b_m \end{bmatrix} \{\delta\}^e \quad (13)$$

$$\text{简写为: } \{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}^e$$

公式(13)是用结点位移表示单元应变。其中，B是表示 ε 与 δ^e 之间关系的矩阵；应用物理方程，由单元的结点位移求出单元的应力有：

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [D]\{\varepsilon\} \quad (14)$$

$$\text{可得 } \{\sigma\} = [D][B]\{\delta\}^e, \text{ 简写为: } \sigma = S\delta^e \quad (15)$$

即为用单元中的结点位移表示单元中应力的关系式，式中[D]为弹性矩阵，S称为应力转换矩阵

(3) 单元的结点力

应用虚功方程。假设把单元和节点切开，对于图中的*i*节点：节点对单元的作用力为节点力， $F_i = (F_{ix} \ F_{iy})^T$ 作用于单元上。

对三角形板单元，节点力为：

$$F^e = (F_i \ F_j \ F_m)^T = (F_{ix} \ F_{iy} \ F_{jx} \ F_{jy} \ F_{mx} \ F_{my})^T \quad (16)$$

F^e 是作用于单元的外力，此外，单元内部还作用有应力。根据虚功方程，可以将单元的节点力 F^e 用应力来表示，从而得到节点力的公式： $F^e = k\delta^e$ (17)

其中， F^e 是单元的结点力， k 称为单元劲度列阵；

(4) 整个结构结点平衡的方程组

$$\text{这里: } K\Delta = P_d + P_e = P \quad (18)$$

K —整体刚度矩阵

Δ —整体结点位移矩阵

P —直接结点荷载

P_e —等效结点荷载

P_d —整体综合结点荷载矩阵

三、模型的求解及结果分析

判定飞机是否安全迫降在有风浪的海面上的标准假定为：飞机所受的最大应力变化及飞机所承受的最大水载荷小于临界值，这时就尽可能保证飞机机身不破裂，也就保证

#1641

其在一定时间内不会进水而下沉。

在有风浪的情况下，我们考虑飞机的入水姿态可以分为三种情况分析：飞机头部入水、飞机中部入水、飞机尾部入水。

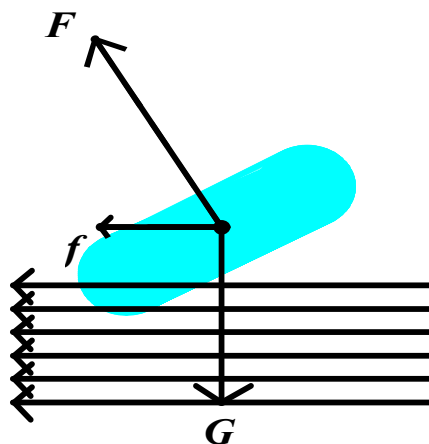


图 1（风浪情况下飞机头部入水情形）

我们首先分析飞机头部入水的情况(如图 1)，也就是飞机俯冲式迫降，会造成机头先着水，动量急剧变化，而尾部继续高速下沉，此时飞机机头受到浮力向水面运动，会发生强烈的弯折，并且此时的受力不平衡，沿着速度的方向有向前倾的趋势，容易造成机身的断裂，存在的威胁很大，因此在有风浪的情况下飞机头部入水不适宜采取。

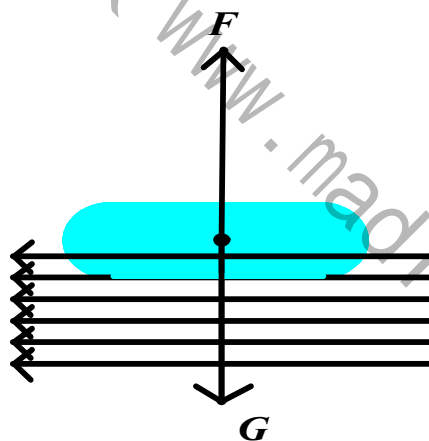


图 2（风浪情况下飞机中部入水情形）

接着分析飞机中部入水的情况（如图 2），也就是飞机水平的降落在海面上，此时飞机受到流体阻力是最小的，但若是飞机的着水速度过大，飞机很可能产生跳跃式的前进，不能平稳的降落在海面上，这种降落模式的危险性很大，因此在有风浪的情况下飞机中部入水这种模式也不适宜采取。

#1641

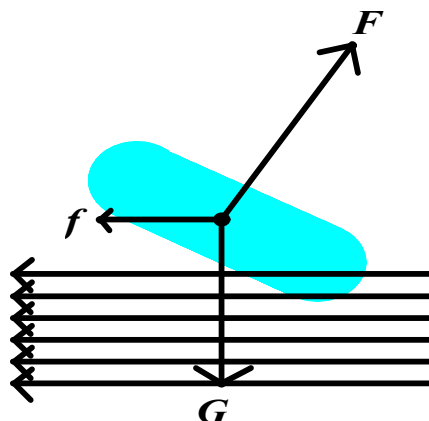


图3（风浪情况下飞机尾部入水情形）

现在我们着重分析在有风浪的情况下飞机尾部入水的情况（如图3），此时又可分为顺浪降落和逆浪降落这两种情况来讨论，我们在不同的入水角度和不同的入水速度下来研究飞机的最大应力变化及飞机所承受的最大水载荷。



图4 顺浪情况下飞机水上迫降过程

模型分析求解：将运动微分方程 $Ma_n + Cv_n + Kd_n = F_n^{ext}$ (19)

改写为： $Ma_n = F_n^{ext} - F_n^{int}$ (20)

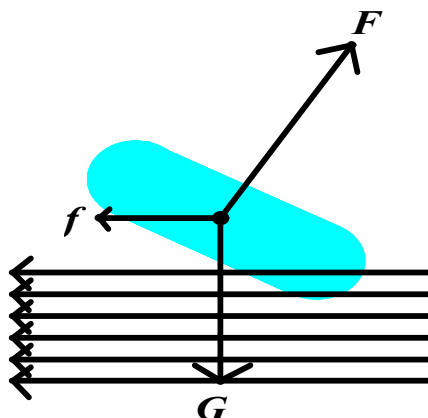
对式(20) 中质量矩阵求逆并乘以剩余矢量： $F^{residual} = F^{ext} - F^{int}$ 就可以求出加速度：

$$a_n = M^{-1} F_n^{residual} \quad (21)$$

#1641

在时间推进上采用中心差分法：

$$\begin{aligned} v_{n+1/2} &= v_{n-1/2} + a_n (\Delta t_{n+1/2} + \Delta t_{n-1/2}) / 2 \\ d_{n+1} &= d_n + v_{n+1/2} \Delta t_{n+1/2} \end{aligned} \quad (22)$$



我们对飞机在有风浪的海面上的情况进行受力分析，有： $f - F \sin \theta = m_{\text{总}} a_n$ ， (24)

把 (21) 式代入 (24) 式得：

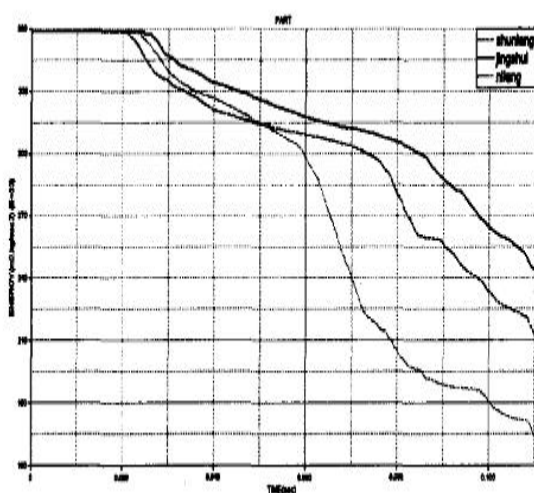
$$f - F \sin \theta = m_{\text{总}} M^{-1} F_n^{\text{residual}} \quad (25)$$

由此可得到水对飞机的冲击力为：

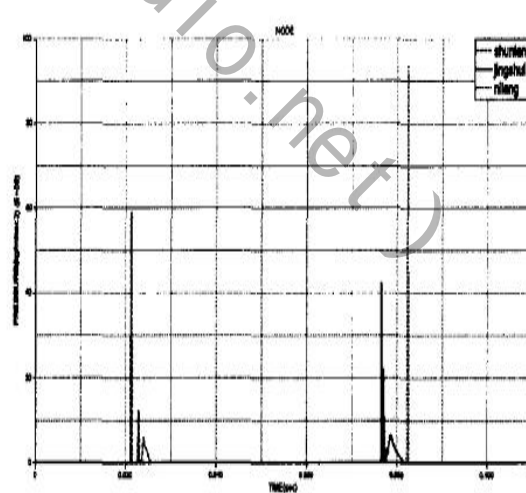
$$F = [f - m_{\text{总}} M^{-1} [F^{\text{ext}} - (Cv_n + Kd_n)]] / \sin \theta \quad (26)$$

式中：n 为当前时间步； F^{ext} 为外载荷矢量； F^{int} 为内力矢量； $F^{\text{int}} = Cv_n + Kd_n$ ； F^{residual} 为剩余力矢量； a_n, v_n, d_n 为当前时间步的加速度、速度与位移； C 为结构阻尼矩阵； K 为结构刚度矩阵； M 为质量矩阵。

计算分析在顺浪下飞机迫降撞击过程中飞机的动能变化、飞机与弹性水之间的接触力、飞机的最大应力变化及飞机所承受的最大水载荷曲线如下图：



图五 飞机动能变化



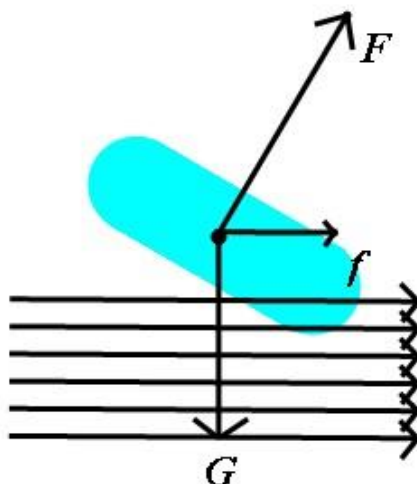
图六 飞机所示承受的最大水载荷

通过对计算结果的比较可以发现：着水速度要尽可能的低，着水时飞机应保持一定的抬头姿态，一般抬头角度为 $0^\circ - 14^\circ$ ，且客机以 12° 姿态角在有风浪的海面上迫降时，所

#1641

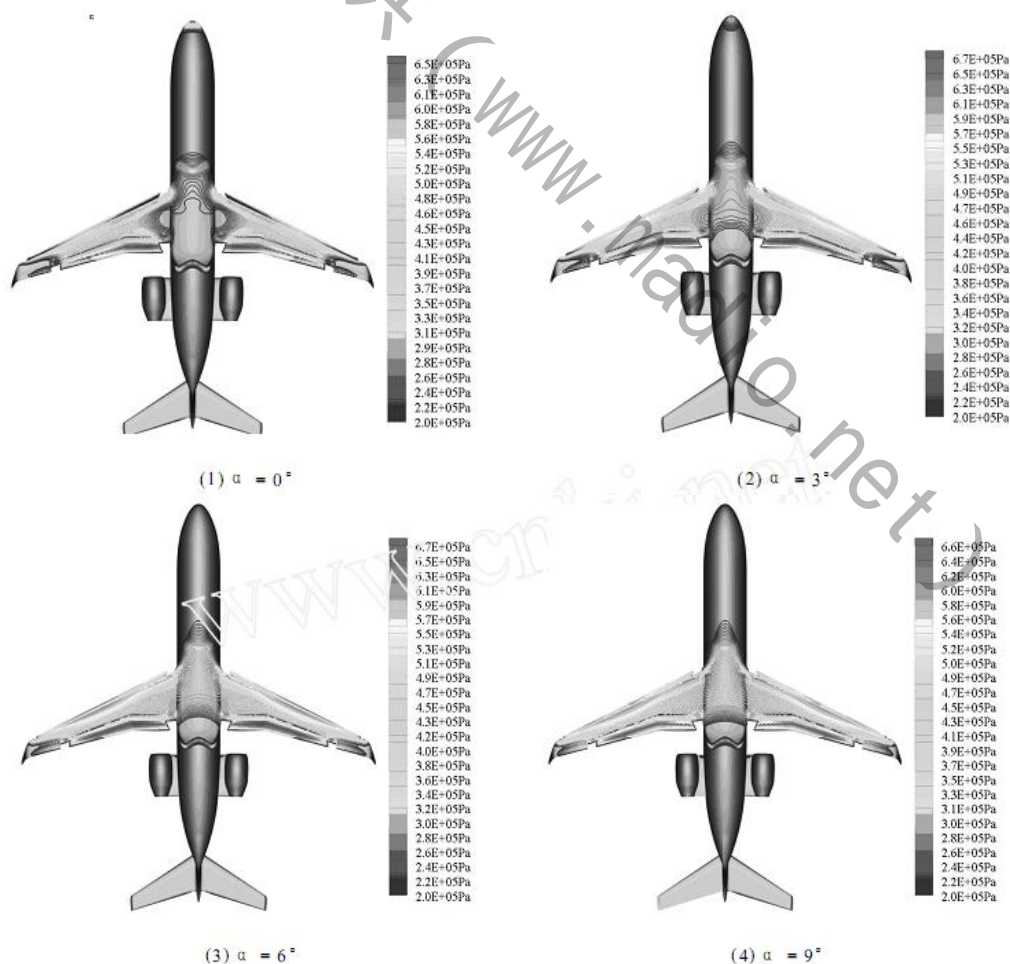
产生的飞机表面最大应力和破坏比较小；所以以此角度迫降相对有利，飞机最后的着水姿态应平直，为水上迫降程序的制定提供必要的技术支持。

逆浪中，飞机的简单受力分析如下图七：

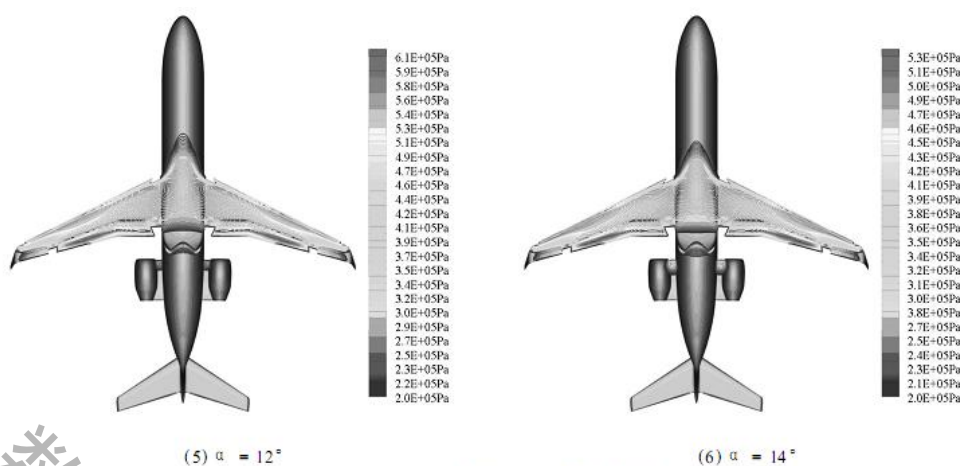


图七

其它初始条件相同的情况下，飞机以不同的入水角度 0° 、 3° 、 6° 、 9° （飞机入水角定为飞机轴线与水面的夹角）撞击水面，迫降过程中飞机下表面的等压线分布见下图。



#1641



图八：t=0.5s 时刻飞机下表面的等压线分布

四、结果分析：

飞机着水时，应保持一定的抬头姿态，一般抬头角度为 $10^{\circ}-14^{\circ}$ 。在水面有浪的情况下，由于飞机受到更大外来载荷的作用，撞击过程中飞机的能量损失率明显变大，其中逆浪下飞机能量消耗已经超过初始的一半以上，飞机与水面间的接触力增大，飞机所承受的水载荷也变大，通过比较可以发现飞机水上迫降过程中，逆浪情况下飞机的飞行方向与浪花运动方向相反，受到更大阻力致使其所受载荷、应力值都大于顺浪，因此飞机接水应与波峰线保持平行，并尽可能使着水点在波峰或波浪的背面，襟翼全部打开以便将着水速度减至最小。

五、模型评价与分析及推广

模型的建立合理、明了，思路清晰，利用有限元模型分析求解。在本模型分析中，我们利用了 ANSYS 有限元分析飞机在有风浪的情形下的模型，将飞机连续体离散成有限个三角形单元，对一个三角形单元进行分析，再整体将这种分析无限接近精确解。针对飞机下表面的等压线可以清晰看出飞机在有风浪的海面上迫降时，最佳入水姿态为 12° 左右。通过飞机在顺浪和逆浪中所受的最大应力变化及飞机所承受的最大水载荷的对比得出飞机接水应与波峰保持平行。

本模型没有考虑飞机的左右转动和翻转的情形，忽略了其他次要的因素的影响，会使得误差累计下来，最终影响结果的精确性。

参考文献：

- 【1】王亚锋 牟让科，基于 SPH 法的民用飞机水上迫降载荷计算方法研究，结构强度研究，第二期：p30-p35，2009.
- 【2】孟祥众，西安工业大学 光电学院，ANSYS 有限元分析，p41-p47，2010.
- 【3】张应迁 张洪才，ANSYS 有限元分析（从入门到精通），人民邮电出版社，p251-p258，2010.
- 【4】孙为民，民机机身结构稳定性和水上迫降分析与应用研究，南京航空航天大学博士学位论文，p76-p91，20090301

#1641

附件 1:

表一 飞机材料的极限负荷

材料牌号	E/MPa	μ	δ_{cy} / MPa	δ_b / MPa
进口 2024-T3	73780	0.33	276	453
进口 7075-T62	72400	0.33	468	
国产 2024-T4	73780	0.33	320	448
国产 7075-T62	72400	0.33	468	531
国产 7075-T6	72400	0.33	468	531

表二 模型参数比例关系

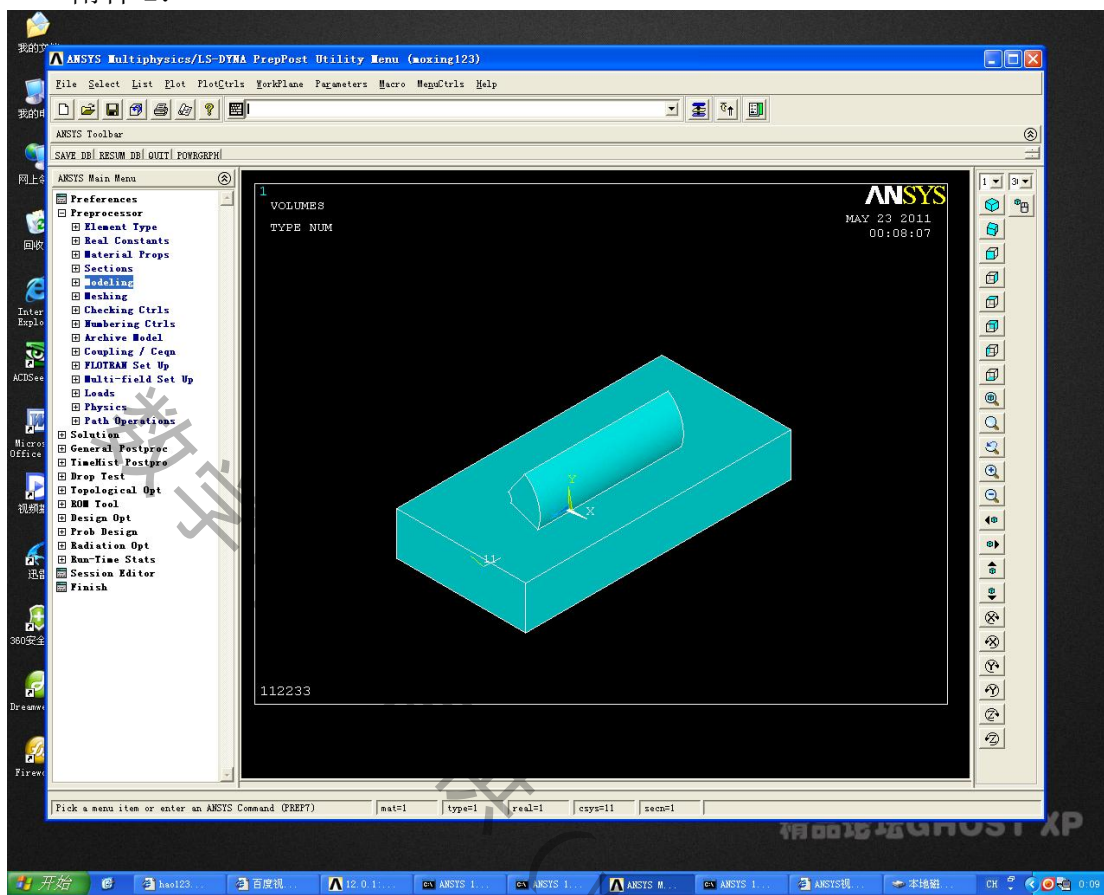
名称	实际参数	比率	模型值
长	l	λ	λl
力	F	λ^3	$\lambda^3 F$
惯性矩	I	λ^5	$\lambda^5 I$
质量	m	λ^3	$\lambda^3 m$
时间	t	$\lambda^{1/2}$	$(\lambda t)^{1/2}$
速度	V	$\lambda^{1/2}$	$(\lambda t)^{1/2}$
线加速度	a	1	a
角加速度	a	λ^{-1}	$\lambda^{-1} a$
压力	P	λ	λp

表三 飞机实际状态与模型状态比较

名称	飞机实际参数	模型参数
质量/Kg	337095	12.5
总长/m	75	2.5
翼展/m	67.9	2.26

#1641

附件 2:



TWO-DIMENSIONAL MODEL

THREE-DIMENSIONAL MODEL

CURRENT NODAL DOF SET IS UX UY UZ

THREE-DIMENSIONAL MODEL

GENERATE NODES AND ELEMENTS IN ALL PICKED VOLUMES

*** ERROR *** CP = 27.234 TIME= 23:58:40

Element type 1 is PLANE183, which cannot be used with the VMES
command. Meshing of volume 1 aborted.

MATERIAL NUMBER SET TO 1

REAL CONSTANT NUMBER= 1

ELEMENT COORDINATE SYSTEM IS AS DEFINED FOR THE ELEMENTS.

(NOTE- FOR GLOBAL SYSTEM 0 (CARTESIAN), DEFINE
LOCAL CARTESIAN SYSTEM (LOCAL,N,0) AND USE ESYS,N.)

SECTION ID NUMBER= 1

*** WARNING *** CP = 27.438 TIME= 23:59:13

Mesh areas by order of size can not be on at the same time as smartsize
- Mesh area by order of size will be disabled.

#1641

GENERATE NODES AND ELEMENTS IN ALL PICKED VOLUMES

*** ERROR *** CP = 27.609 TIME= 23:59:31
Element type 1 is PLANE183, which cannot be used with the VMES
command. Meshing of volume 1 aborted.

*** NOTE *** CP = 27.672 TIME= 23:59:37
No volumes were meshed by the VMESH operation.

DELETE ELEMENT TYPES FROM 2 TO 2 BY 1

CURRENT NODAL DOF SET IS UX UY
AXISYMMETRIC MODELCURRENT NODAL DOF SET IS UX UY UZ ROTX ROTY ROTZ
THREE-DIMENSIONAL MODEL

ELEMENT COORDINATE SYSTEM IS AS DEFINED FOR THE ELEMENTS.
(NOTE- FOR GLOBAL SYSTEM 0 (CARTESIAN), DEFINE
LOCAL CARTESIAN SYSTEM (LOCAL,N,0) AND USE ESYS,N.)

CREATE A CYLINDRICAL VOLUME WITH
INNER RADIUS = 0.5000000000E-01
OUTER RADIUS = 0.2500000000
STARTING THETA ANGLE = 340.0000000
ENDING THETA ANGLE = 415.0000000
END Z-DISTANCES FROM -1.000000000 TO 0.000000000

OUTPUT VOLUME = 2
AUTOMATIC SCALING FOR WINDOW 1
DISTANCE AND FOCUS POINT AUTOMATICALLY CALCULATED

view point for window 1 1.0000 1.0000 1.0000

ROTATION ANGLE FOR WINDOW 1 IS 0.00 ABOUT AXIS ZS

PLOT VOLUMES FROM 1 TO 2 BY 1

WRITE IGES FILE= E:\1122

*** NOTE *** CP = 33.000 TIME= 00:07:43
File E:\1122 already exists. Executing the PREP7 IGES command will
cause this file to be overwritten.

ATTRIBUTES WILL BE WRITTEN TO E:\1122.

783 RECORDS WRITTEN TO FILE= E:\1122

PLOT VOLUMES FROM 1 TO 2 BY 1

GENERATE NODES AND ELEMENTS IN ALL PICKED VOLUMES

*** ERROR *** CP = 34.016 TIME= 00:08:35
Element type 1 is BEAM189, which cannot be used with the VMES command.
Meshing of volume 1 aborted.

*** NOTE *** CP = 34.109 TIME= 00:08:42
No volumes were meshed by the VMESH operation: