

风浪条件下飞机水面迫降最优姿态研究

1 问题分析：

在考虑风速、浪速影响的条件下进行海面迫降时，同时由于飞机失去动力只能在飞行员的控制下做滑行运动。在这一过程中将受到很多因素的影响包括飞机降落的俯仰角、迫降初始速度、风速、浪速以及飞机的航向。如果入水姿势及入水初速选取不正确，在迫降过程将产生过大的冲击力，不严重的情况下使得飞机迫降过程震动剧烈不平稳、更为严重的后果是飞机承受不住这么大的冲击力造成机身破裂从而造成机毁人亡的结局。

因而在相应的风速、浪速的情况下应根据相应的模型选择合适的航向、入水俯仰角及入水初始速度，从而保证迫降过程有较高的安全系数保证人身财产的安全。

首先经过合理化分析结合相关的权威文献，可以确定飞机迫降时必须保证俯仰角为正时入水，且飞机的航向需与风速浪速逆向。因为如果侧身入水，将导致机身失衡造成巨大晃动造成事故，同时侧身入水时也将受到侧风和浪的侧面冲击极易造成倾翻。

综合上述分析，我们可得飞机的迫降姿势应为逆着风速与浪速的方向且保证俯仰角为正值，从而使得飞机在风速、浪速及水面冲力影响下的三维受力转变为二维受力，简化了分析问题的难度近似如下图 1。对风速、浪速对迫降过程的影响将分别从不同方面进行分析，同时浪速和风速之间又具有某种耦合关系，经查阅相关文献资料得到他们之间近似成线性正比的关系。风速、浪速对迫降过程的影响以及对第一阶段模型的影响将在下述模型建立一分析中讨论求得。

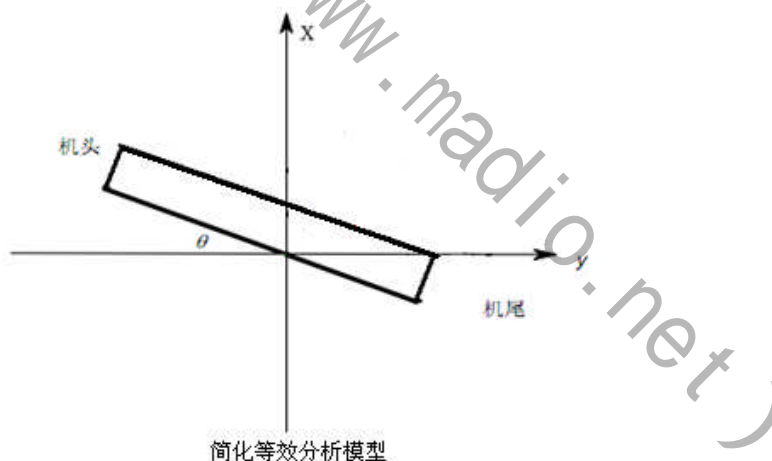


图 1

2 模型假设：

- 1) 假设飞机等效成一实心长方体，且机翼和尾翼的质量可以等效在次长方体内，忽略机体侧向的受力，机体左右摆动。
- 2) 假设飞机平稳着水，并沿直线滑行迫降，且迫降时起落架收起。

参赛队号 # 1727

- 3) 假设迫降水面做够宽阔，且水深足够深。忽略水体粘滞系数的影响，并将飞机是做刚体模型。
- 4) 假设飞机机身各处都可能受力断裂，着重考虑与水接触部分。
- 5) 由于在大风大浪环境迫降极其危险，这里我们重点讨论风浪较小的环境迫降，这时水浪对飞机的作用可认为主要是水平方向相对速度影响，而纵向作用主要是使机体上下较轻抖动，这里假设可以忽略。
- 6) 假设迫降过程中环境中风浪情况相对稳定，不发生剧烈变化。
- 假设飞机逆风迫降，以使迫降时间最短，且此过程机翼不触水，飞机侧向不受风力影响而发生摇摆。

3 符号说明

$\vec{M}_{\text{总}}$	飞机于水的作用力矩
λ	波浪的波长
α	飞机速度与下沉速度夹角
h	飞机假设模型高度
Δt	时间变化量
r	作用点与飞机质心的距离
r_1	飞机接触水的径向长度
$S\rho$	微元的质量
$P_{\text{风}}$	风对飞机身的压强
k_o	空气密度
k	空气重度
$F_{\text{风}}$	风对机身的作用力
φ	飞机俯仰角
$m_{\text{总}}$	飞机总质量
$a_{\text{风}}$	飞机在仅有风力作用情况下的加速度
t_1	接触水面时刻
t_2	冲击过程结束时刻

4 模型建立过程

4.1 逆风直线迫降瞬态模型建立条件选取：

4.1.1 俯仰角 α 的选取：

1) 飞机机头先触水迫降，机俯冲下降（ $\alpha < 0$ ），此时机头撞水手里很大，且机身尾部继续以高速下沉，相当于在极端的时间内机身的全部动量集中作用在机头部位，会使机头严重高手里发生断裂。

2) 水平方式迫降（ $\alpha = 0$ ），为防止机头由于力矩大而被拉入水中，起落架必须收起很可能造成跳跃，同时收起起落架飞机引擎将会比机腹先接触水面。飞机以水平方式着水，会使飞机引擎和航电设备舱先于机身腹部触水，可能致使机身前部先触水舱断断裂，导致机毁人亡。

从而综上所述在下述模型建立过程中，仅在俯仰角 $\alpha > 0$ 情况下讨论，同时有很高的科学性、合理性。

4.1.2 航向的分析与选取：

在飞机起飞、降落和空中飞行的各个阶段都会受到气象条件的影响，风、气温、气压都是影响飞行的重要气象要素。地面风会直接影响飞机的操纵，高空风会影响飞机在航线上的飞行速度和加油量。

考虑到各方面因素飞机在起降时采用逆着风的方向，飞机迎风起降的原因主要有两个：一是可缩短飞机起飞或着陆的滑跑距离。

二是较安全。飞机起飞时，如果有风迎面吹来，在相同速度条件下，其获得的升力就比无风或顺风时大，因而就能较快地离地起飞。迎风降落时，就可以借风的阻力来减小一些飞机的速度，使飞机在着陆后的滑路距离缩小一些。

飞机的起飞和着陆，应尽量选择逆风而行，因为逆风起降可以增加升力或阻力使飞机的离地速度或着陆速度减少，因而能缩短飞机的起飞滑跑距离或着陆距离，同时迎风起降还有利飞机运动中的方向稳定性和操纵性，比较安全。

由于飞机起飞和着陆时的速度比较慢，稳定性差，如遇强劲的侧风就会把飞机吹歪倾斜飞机在起降时速度都较慢，稳定性较差，若此时遭到强劲的侧风袭击，飞机就有可能偏离跑道。为避免这种危险，所以机场的跑道方向要根据当地的主要风向来选择。近年来，由于飞机稳定性的迅速提高，风向对飞机起降影响大大降低了。

同时由于飞机顺风直线迫降，飞机降落瞬间随会有所平稳，但是迫降时间会变长，会加大迫降过程出现事故的可能性，并且这种方案会受水面宽度和水深的制约。所以一般说来，只有在无法选择逆风条件而且跑道长度足够的条件下才可以顺风着陆。不过现在的飞机速度、重量及稳定性都比过去的飞机有很大的改进和提高，风向对飞机的起落影响减小了。侧风对飞机的受力影响如下图2所示。

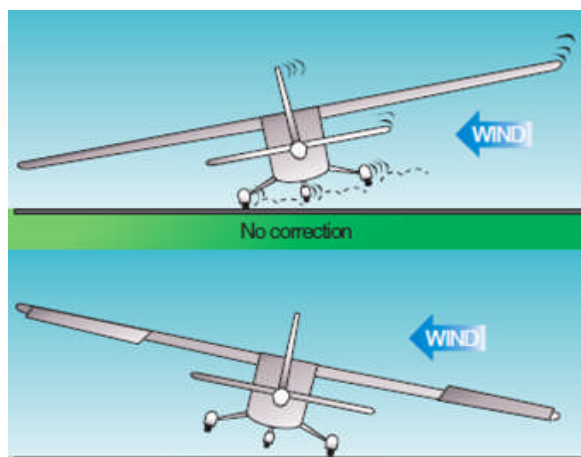


图 2

综上 2.1、2.2 所分析结果，因此这里我们主要讨论飞机逆风沿直线以大于零的仰角迫降模型。

4.2 迫降过程受力模型建立

由上述分析可得飞机在风速、浪速影响条件下迫降过程中最合理的方法是采取与风速相逆的方向为最合理的方向，同时由于浪速和风速的方向是在同一方向上，因此飞机迫降过程中与风速和浪速的方向均相逆，从而在此过程中飞机的受力可有原来的三维 (x, y, z) ，转变为在同一平面内二维模型 (x, y) 从而大大简化了分析的过程，从上述分析可得这种简化也是极为合理的。

在没有进行航道合理选择之前飞机迫降过程中受到的三个力，可能不在同一平面上如下图 3，从而三个作用力 F_1 ， F_2 ， F_3 的作用分析及综合作用分析变得很困难。

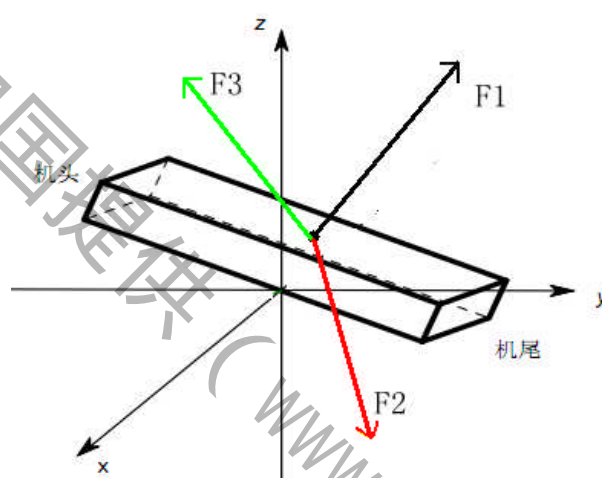


图 3

经过航道合理优化选择之后，飞机的迫降方向和风、浪速均相逆，从而三个力的作用在同一平面上便于作用分析大大同时也简化了分析难度。精简化后的受力分析图如下图 4 所示。

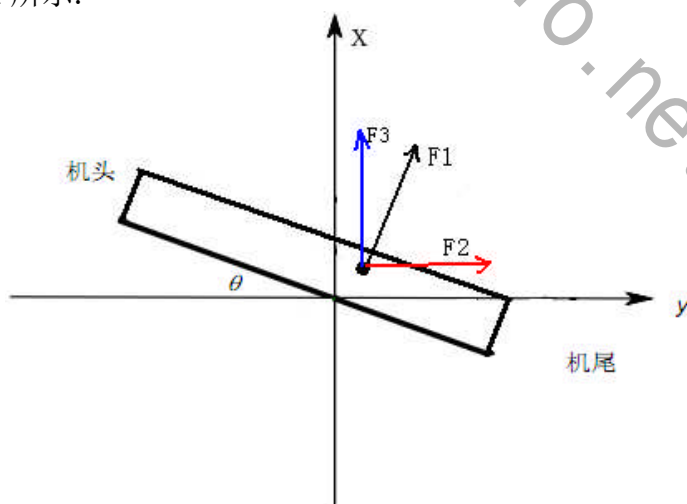


图 4

参赛队号 # 1727

F1：水面对飞机作用力，F2：风速对飞机的力，F3：浪速对飞机的力。
经上述分析后三个作用力作用在同一平面内，便于下述的分析与求解。

4.3、逆风直线迫降瞬态模型建立：

在飞机迫降过程中的受力及加速度如下图 5（1）、5（2）所示，从图示可得在迫降过程中对安全迫降与否起关键影响的是 $t_1 \sim t_2$ 阶段，因为此阶段加速度 a 变化剧烈，从而机身受力也最大。此过程加速度为冲击性加速度，通常冲击性加速度是指突然猛烈的加速或减速运动，其特点是加速度变化率高、峰值高而作用时间很短（通常小于 1 s），如飞机迫降或坠毁、高速飞行中弹射救生及开伞、航母舰载机飞行员弹射起飞和阻拦着舰、汽车碰撞等过程，均涉及单个轴向或复合轴向上的冲击性加速度。冲击性加速度对人员颈部损伤与防护、提高作业功效、维护职业健康、延长职业寿命等都有很大的关系。

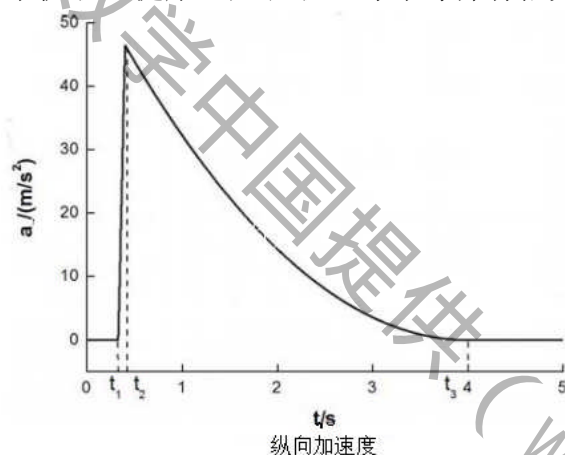


图 5（1）

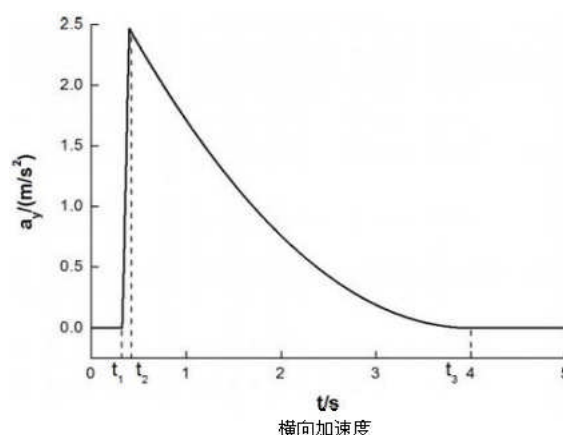


图 5（2）

所以第一阶段和本阶段下述模型的建立和分析均针对在此冲击性加速度阶段过程 $t_1 \sim t_2$ 进行。

在第一阶段的模型建立中，是假设为水面静止的，因此初速度仅为飞机得出速度，并未考虑浪速的影响。浪速对飞机迫降的影响有两个：水平方向、竖直方向。因为飞机选择在海面迫降时是在波浪并不是很强烈的情况下的，因为在波浪很强烈情况下进行迫降成功率低，即使迫降成功被海浪卷走的可能性也非常大，故在考虑波速的影响是主要考虑水平方向，竖直方向将在模型优化中提出改进。波速水平方向的影响主要是在飞机于飞机相对于水面的相对速度方面，因为水面对飞机冲击力作用与速度有很大关系，这一速度机尾飞机相对于水边的速度。

为了简便分析，这里我们首先仅考虑飞机在仅水平风力一个作用力作用下的理想状态下，飞机整体所受风力产生的加速度 $a_{\text{风}}$ 。然后考虑飞机在不考虑空气阻力和风力理想情况下迫降，机身所产生的加速度。而后将这两种理想情况下的加速度叠加就可以得到风浪情况下飞机整体的加速度状况。

下面先分析风速对机身的作用力，风压就是垂直于气流方向的平面所受到的风的压力。同时根据伯努利方程得出风速与风的压关系

$$P_{\text{风}} = 0.5k_o v_{\text{风}}^2 \quad (1)$$

参赛队号 # 1727

其中 $P_{\text{风}}$ 为风压 $[\text{KN}/\text{m}^2]$ ， k_o 为空气密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ， $v_{\text{风}}$ 为风速 $[\text{m}/\text{s}]$ 。

由于空气密度 (k_o) 和重度 (k) 的关系为 $k_o = \frac{k}{g}$ 。在 (1) 中使用这一关系，得到

$$P_{\text{风}} = \frac{0.5kv_{\text{风}}^2}{g} \quad (2)$$

此式为标准风压公式。在标准状态下 (气压为 1013 hPa, 温度为 15° C), 空气重度 $k=0.01225 [\text{kN}/\text{m}^3]$ 。纬度为 45° 处的重力加速度 $g=9.8 [\text{m}/\text{s}^2]$ ，我们得到

$$P_{\text{风}} = \frac{v_{\text{风}}^2}{1600} \quad (3)$$

此式为用风速估计风压的通用公式。应当指出的是，空气重度和重力加速度随纬度和海拔高度而变。一般来说， k/g 在高原上要比在平原地区小，也就是说同样的风速在相同的温度下，其产生的风压在高原上比在平原地区小。

我们先考虑飞机在仅受此水平风力作用下，飞机整体所受风力产生的加速度。

设飞机机身有风作用部分面积为 $S_{\text{飞机}}$ ，飞机迫降接触水面时的仰角为 φ ，则飞机的有效受风面积 $S_{\text{飞机}} \sin \varphi$ ，可得机身受得风力作用：

$$F_{\text{风}} = P_{\text{风}} S_{\text{飞机}} \sin \varphi \quad (4)$$

则只考虑飞机整体在受此力作用的理想状态下所产生的加速度：

$$a_{\text{风}} = \frac{F_{\text{风}}}{M_{\text{总}}} = \frac{P_{\text{风}} S_{\text{飞机}} \sin \varphi}{M_{\text{总}}} \quad (5)$$

下面，我们再来考虑飞机模型在不受空气阻力和风力影响情况下迫降过程的加速度 a' 。飞机的迫降初速度是 $v_{\text{初}}$ ，水浪的速度是 $v_{\text{浪}}$ ，飞机速度与下沉速度夹角为 α ，设作用时间 Δt ：

$$a' = \frac{2(v_{\text{初}} + v_{\text{浪}}) \cos \alpha}{\Delta t \cos \varphi} + \frac{2(v_{\text{初}} + v_{\text{浪}}) \sin \alpha}{\Delta t \sin \varphi} \quad (6)$$

其中 $v_{\text{浪}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$ ， λ 是水浪的波长。(推导过程详见参考文献[3])

则飞机在考虑空气阻力和风力作用时的加速度：

参赛队号 # 1727

$$a = \frac{2(v_{\text{初}} + v_{\text{浪}})\cos\alpha}{\Delta t \cos\varphi} + \frac{2(v_{\text{初}} + v_{\text{浪}})\sin\alpha}{\Delta t \sin\varphi} + \frac{P_{\text{风}} S_{\text{飞机}} \sin\varphi}{M_{\text{总}}} \quad (7)$$

建立以质心为参考系的转轴坐标系如下图 6；

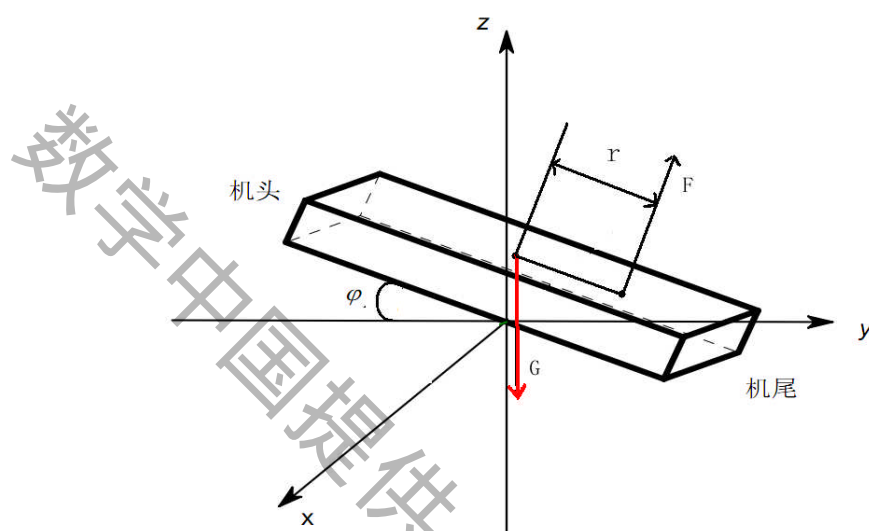


图 6

飞机迫降过程中的总力矩 $\vec{M}_{\text{总}}$ ：

$$\vec{M}_{\text{总}} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad (8)$$

由于在此过程中重力浮力的作用可抵消，同时自身重力 G 在质心坐标系下的合力矩也为零，从而模型可得以简化并与分析同时也符合客观规律。在产生力矩的过程中主要是受水的反向冲击力产生同时也有风力的作用。在接触水的瞬间过程中，冲击力的作用方向垂直于机身向上与初速度方向平行。影响 F 大小的主要变量为：初速度的大小 $v_{\text{初}}$ 、波速 $v_{\text{波}}$ 、贴于水面的面积（可用 r 根据飞机机

尾的函数表示出来）、飞机的俯仰角 φ 的大小、时间 t 的变化等。

结合受力分析图 4，可得 F 与多种参量有关，而且随时间变化。分析 F 的特性对模型的分析与建立起着决定性的作用。飞机在落水过程中，全部的力的作用可分解为竖直方向水平反向，从而迫降过程可理想的看成水平与竖直两种高速轰击水面运动的叠加。

$$F(v_{\text{初}}, v_{\text{浪}}, \varphi, t, r)_{\text{max}} = F_x \sin\varphi + F_y \cos\varphi = \left(\frac{2(v_{\text{初}} + v_{\text{浪}})\cos\alpha}{\Delta t \cos\varphi} + \frac{2(v_{\text{初}} + v_{\text{浪}})\sin\alpha}{\Delta t \sin\varphi} + a_{\text{风}} \right) m_{\text{总}}$$

参赛队号 # 1727

(9)

则水对飞机的合力矩: $M_{\text{水}} = \int_r^{\frac{1}{2}h} F(v_{\text{初}}, v_{\text{浪}}, \varphi, t, r) dr$

即

$$M_{\text{水}} = \int_{\frac{1}{2}h-r_1}^{\frac{1}{2}h} \frac{F(v_{\text{初}}, v_{\text{浪}}, \varphi, t, r)_{\text{max}}}{r_1} r_F dr_F \quad (10)$$

$$= \int_{\frac{1}{2}h-r_1}^{\frac{1}{2}h} \frac{\left(\frac{2(v_{\text{初}} + v_{\text{浪}}) \cos \alpha}{\Delta t \cos \varphi} + \frac{2(v_{\text{初}} + v_{\text{浪}}) \sin \alpha}{\Delta t \sin \varphi} + a_{\text{风}} \right) m_{\text{总}}}{r_1} r_F dr_F$$

其中 r_F 为积分变量。从另一边来看由角动量定理, 我们得知 F 的力矩是角动量的变化率, 即是对每一个微元 $s\rho dr$ 的都有一个相同的角动量变化率。对距质心 r 的单个微元分析, 用 $s\rho$ 表示每个小微元的质量, v 表示该微元的法向速度,

$$\frac{dL}{dt} = r^2 S \rho \frac{dw}{dt} \quad (11)$$

由于我们将碰撞瞬间飞机看成刚体, 因此角速度对时间的微商应守恒。故针对不同处的微元, 有

$$\frac{dw}{dt} = \frac{M_{\text{总}}}{r_F m_{\text{总}}} = \frac{M_{\text{微元}}}{r^2 S \rho} \quad (12)$$

$$M_{\text{微元}} = r^2 S \rho \int_{\frac{1}{2}h-r_1}^{\frac{1}{2}h} \frac{\left(\frac{2(v_{\text{初}} + v_{\text{浪}}) \cos \alpha}{\Delta t \cos \varphi} + \frac{2(v_{\text{初}} + v_{\text{浪}}) \sin \alpha}{\Delta t \sin \varphi} + a_{\text{风}} \right) m_{\text{总}}}{r_1 r_F^2 m_{\text{总}}} r_F dr_F \quad (13)$$

进而得所选的微元受力

$$f_{\text{微元水}} = \frac{M_{\text{微元}}}{r} = \int_{\frac{1}{2}h}^r r S \rho \frac{\left(\frac{2(v_{\text{初}} + v_{\text{浪}}) \cos \alpha}{\cos \varphi} + \frac{2(v_{\text{初}} + v_{\text{浪}}) \sin \alpha}{\sin \varphi} + a_{\text{风}} \right) m_{\text{总}}}{\Delta t r_1} \ln \frac{\frac{1}{2}h}{\frac{1}{2}h-r_1} dr \quad (14)$$

由考虑到微元所受的重力:

$$G_{\text{微元}} = \int_{-\frac{1}{2}h}^r S \rho \cos \varphi dr \quad (15)$$

综合 (14)、(15) 和之前取的正方向, 我们得出微元切应力方向所实际受力:

$$f_{\text{微元}} = \frac{1}{2} \left(r^2 - \frac{h^2}{4} \right) S \rho \frac{\left(\frac{2(v_{\text{初}} + v_{\text{浪}}) \cos \alpha}{\cos \varphi} + \frac{2(v_{\text{初}} + v_{\text{浪}}) \sin \alpha}{\sin \varphi} + \frac{P S_{\text{机}} \sin \varphi}{M_{\text{总}}} \right)}{\Delta t r_1} \ln \frac{\frac{1}{2}h}{\frac{1}{2}h-r_1} - S \rho \cos \varphi \left(r + \frac{1}{2}h \right) \quad (16)$$

参赛队号 # 1727

这样，便 3 得到了微元关于参数 θ ， $v_{\text{初}}$ ， $v_{\text{浪}}$ ， $v_{\text{风}}$ ，在不同处的切应力方向受力的模型。其中风速 $v_{\text{风}}$ 和浪速 $v_{\text{浪}}$ 有一定的理论和实际观测的联系，这点将在下一步的模型仿真中得到应用和体现。

5、模型的分析与求解

5.1 模型的分析

从上述分析我们可得到各微元的等效受力模型，下面将针对上述模型在相应选取的风速浪速下进行模型的仿真，并结合飞机各点的受力极限值，得到在具体的风速浪速下应选取迫降俯仰角和初始速度，从而得到相对于具体的风速浪速条件下安全系数最高的可控变量俯仰角 φ 、初始速度的值 $v_{\text{初}}$ 。

5.2 飞机外形参数、基本方针参数的选取

经查阅相关资料可得本模型所需的飞机外形参数及仿真参数如下表：

l 机身长度	33.84m
$S\rho$ 微元质量	2.0686kg/m
Δt 时间变化量	0.05s
β	88°
g 重力加速度	9.8 m/s^2

选取风速 $v_{\text{风}}$ 为 4.5m/s、10m/s 两种情况，为突出风速的影响特别选取风速 $v_{\text{风}}$ 为 100m/s 时作为对比。（风速的选取依据见附表二）

在不同的风速下分别选取俯仰角 φ 为分别为 4° 8° 12° 15° 通过比较可得俯仰角为 12° 时 效果最好。因此再在不同风速 $v_{\text{风}}$ 为 4.5m/s、10m/s 两种情况和 12° 俯仰角前提下选取初速度分别为 50m/s、100m/s、150m/s、200m/s 进行比较。从而得到最优的迫降姿势和初始速度。

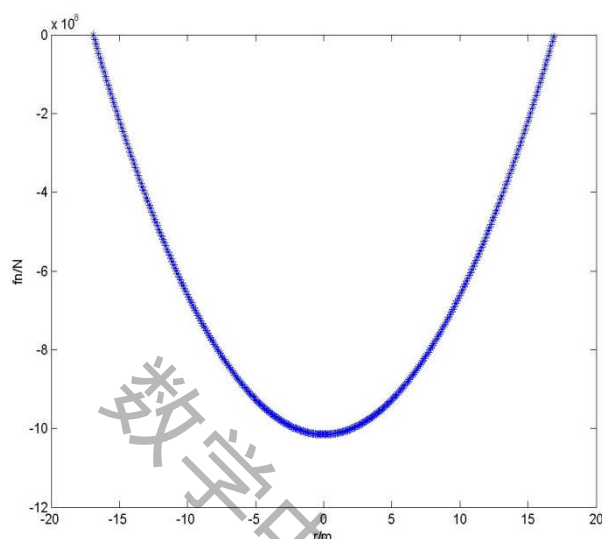
5.3 控制变量法下仿真图形的比较

结合所建立的模型和上述相关参数并结合控制变量法，通过 matlab 仿真可得仿真图形如下（相应 matlab 程序见附表一）：

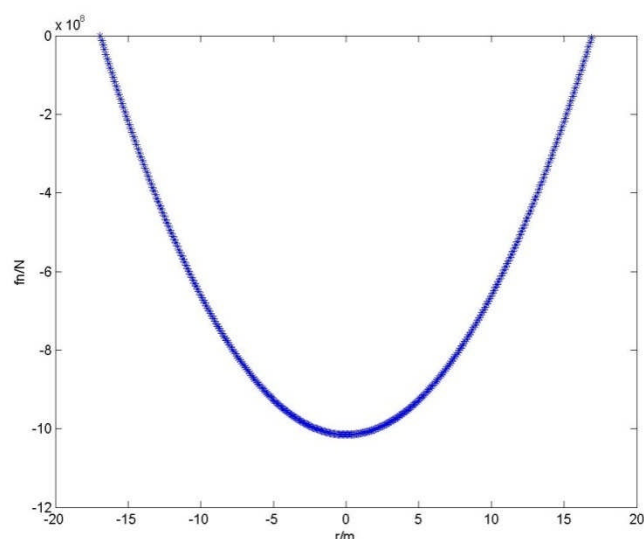
1、风速 4.5m/s

1) 初速度 140m/s，分别取俯仰角 4, 8, 12, 15

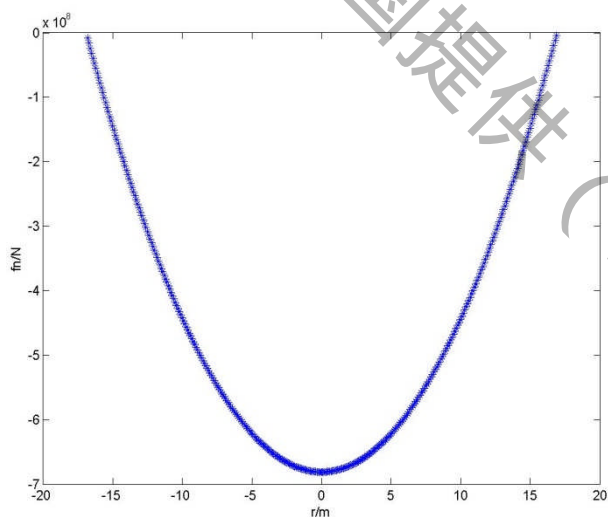
$$\varphi = 4^\circ$$



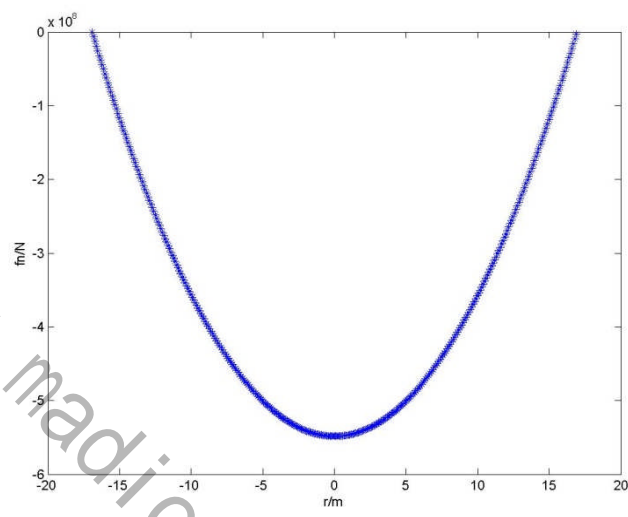
$$\varphi = 8^\circ$$



$$\varphi = 12^\circ$$

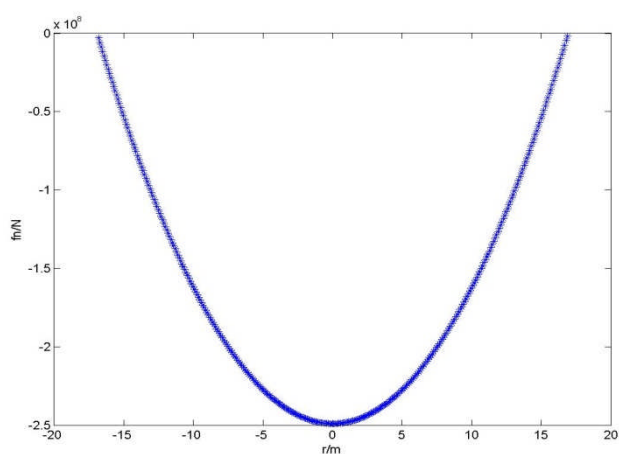


$$\varphi = 15^\circ$$

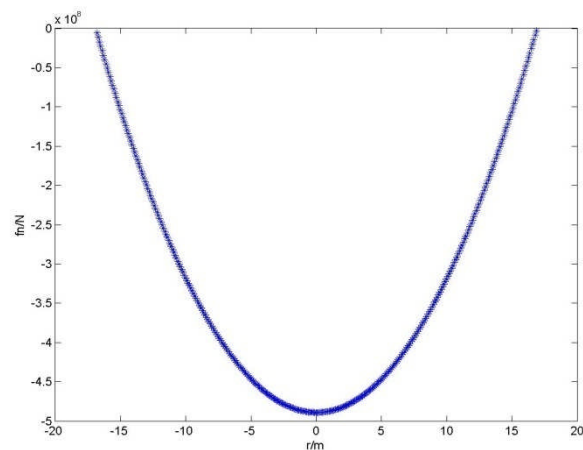


2) 设俯仰角 12, 分别取初速度 50, 100, 150, 200m/s

$$v_{\text{初}} = 50 \text{ m/s}$$

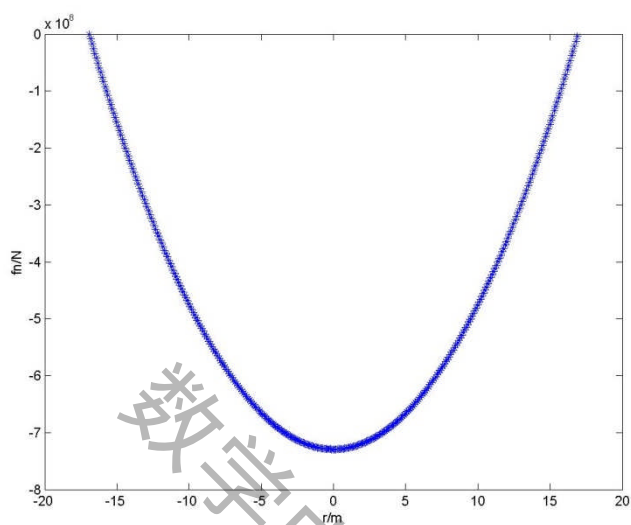


$$v_{\text{初}} = 100 \text{ m/s}$$

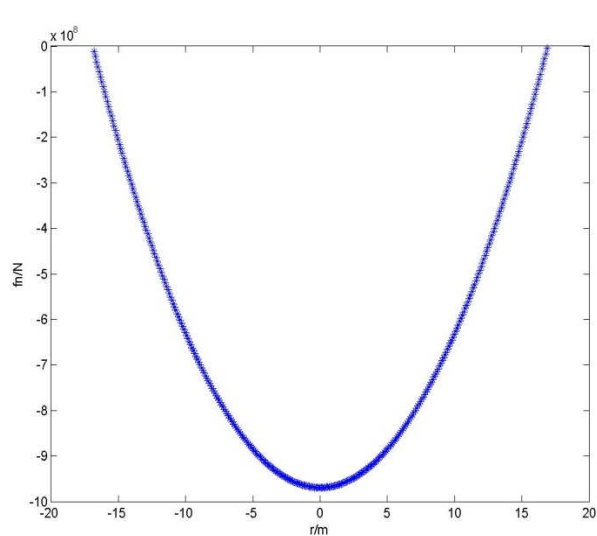


参赛队号 # 1727

$$v_{\text{初}} = 150 \text{ m/s}$$



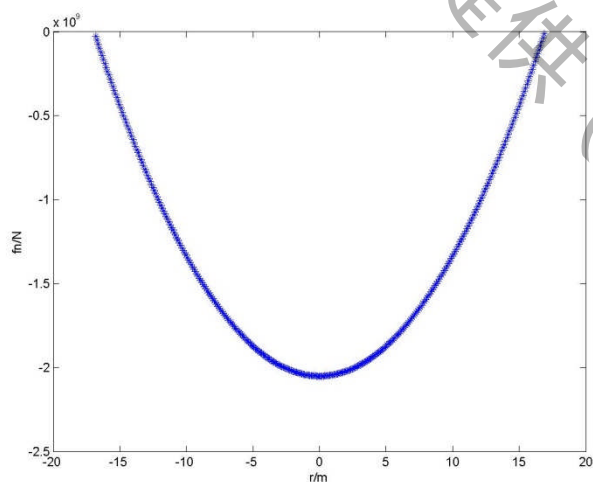
$$v_{\text{初}} = 200 \text{ m/s}$$



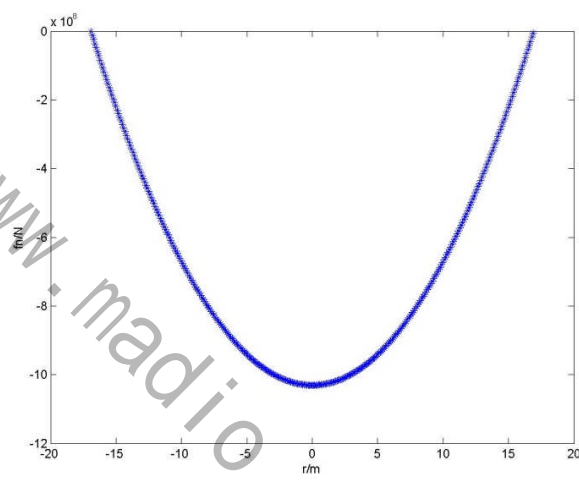
2 风速 10m/s

1) 初速度 140m/s, 分别取俯仰角 4, 8, 12, 15

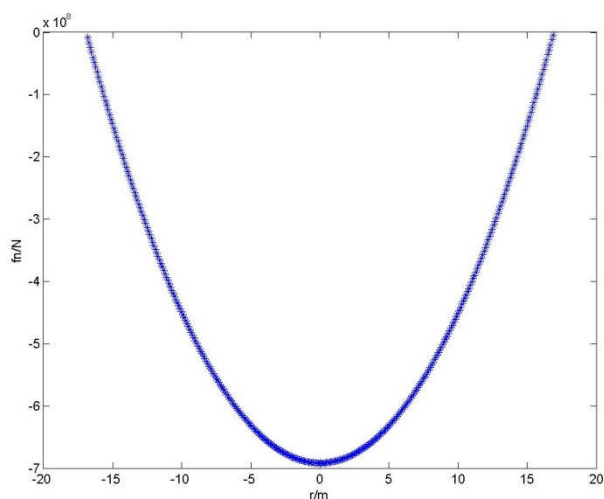
$$\varphi = 4^\circ$$



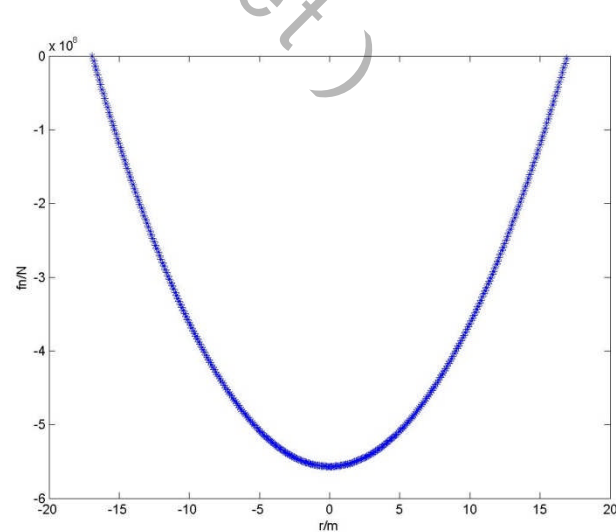
$$\varphi = 8^\circ$$



$$\varphi = 12^\circ$$

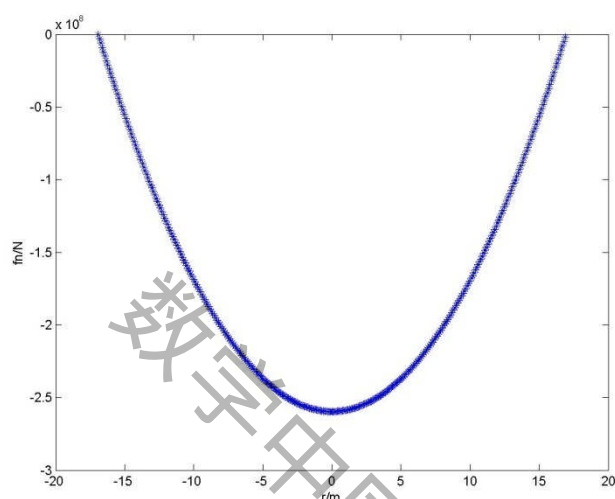


$$\varphi = 15^\circ$$

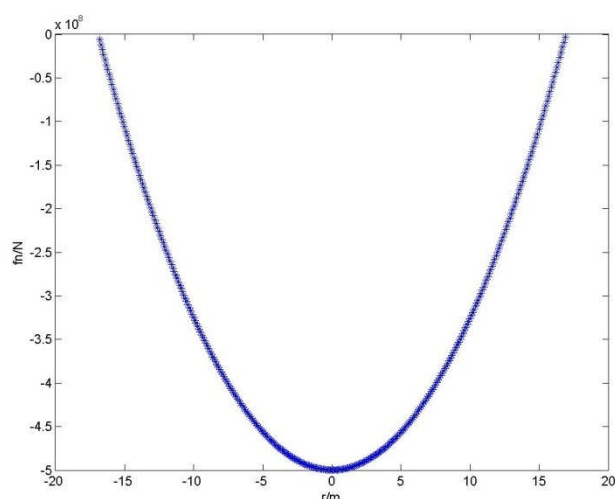


2) 设俯仰角 12° ，分别取初速度 50, 100, 150, 200m/s

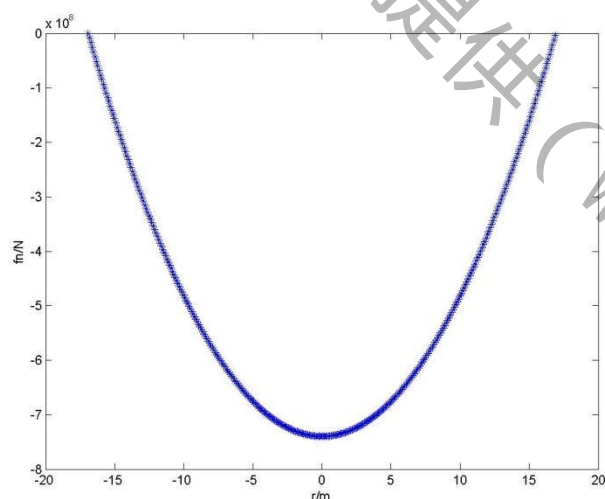
$$v_{\text{初}} = 50 \text{ m/s}$$



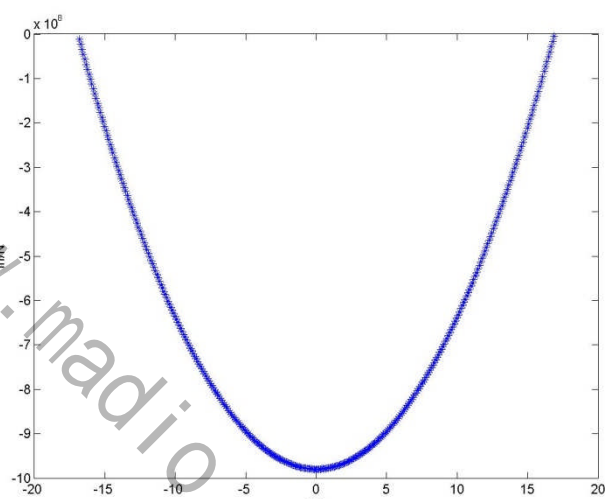
$$v_{\text{初}} = 100 \text{ m/s}$$



$$v_{\text{初}} = 150 \text{ m/s}$$

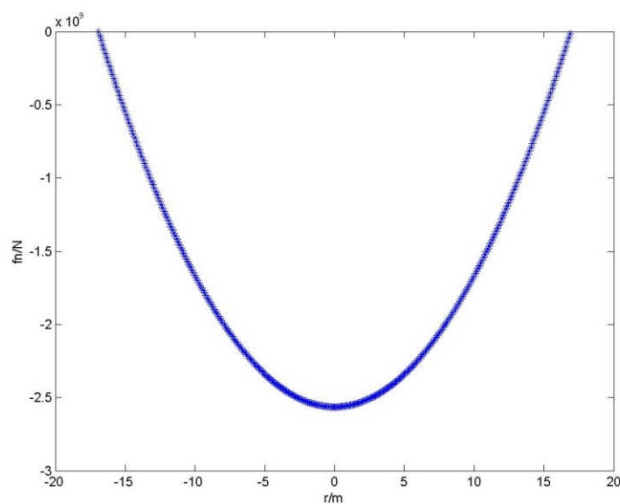


$$v_{\text{初}} = 200 \text{ m/s}$$

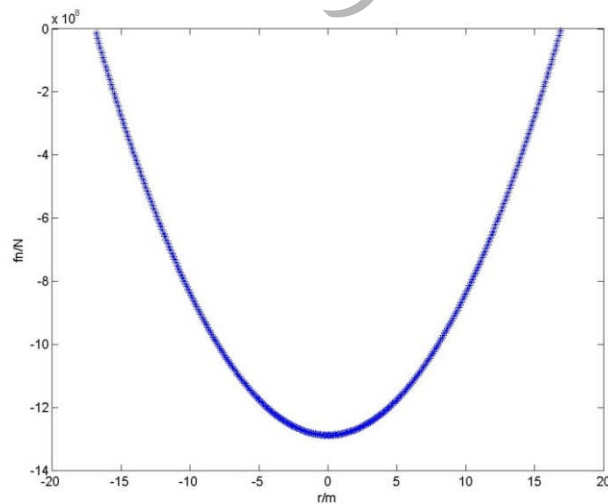


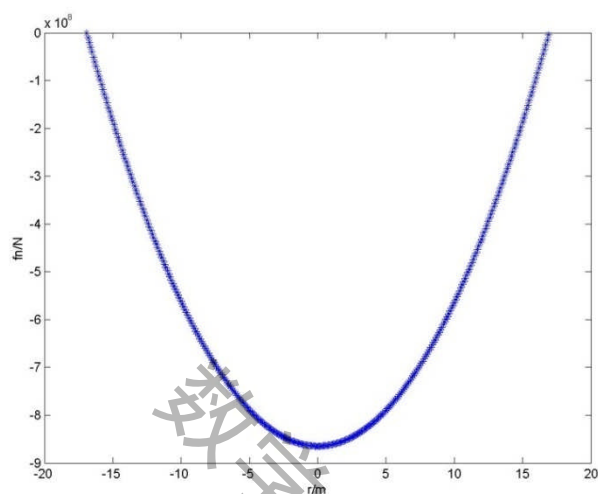
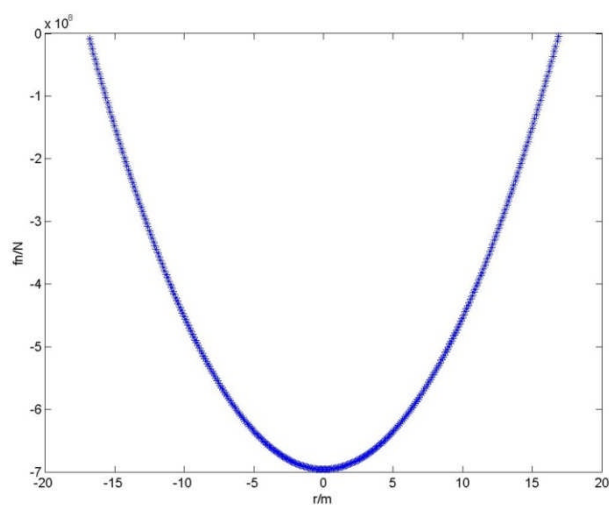
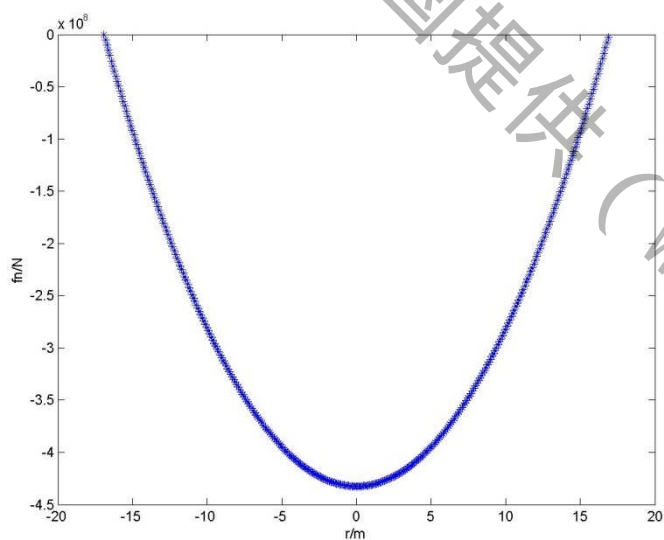
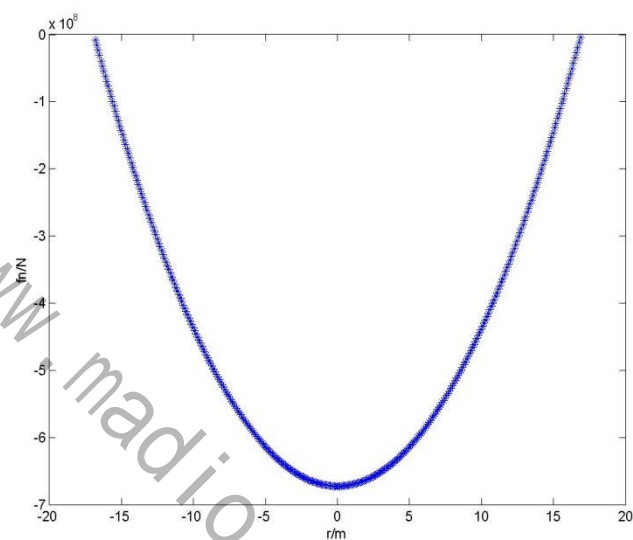
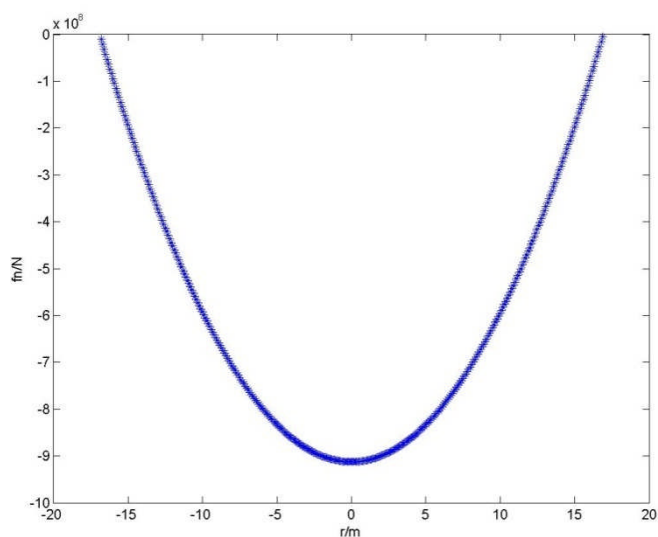
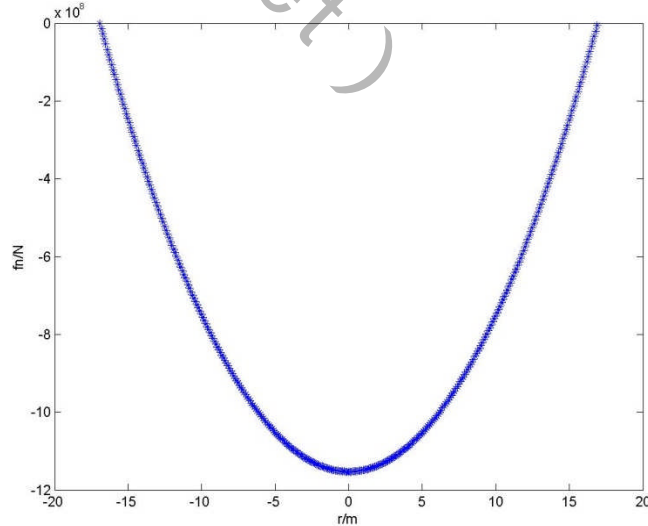
1) 初速度 140m/s，分别取俯仰角 4° , 8° , 12° , 15°

$$\varphi = 4^\circ$$



$$\varphi = 8^\circ$$



$\varphi = 12^\circ$  $\varphi = 15^\circ$ 2) 设俯仰角 12° , 分别取初速度 50, 100, 150, 200m/s $v_{\text{初}} = 50 \text{ m/s}$  $v_{\text{初}} = 100 \text{ m/s}$  $v_{\text{初}} = 150 \text{ m/s}$  $v_{\text{初}} = 200 \text{ m/s}$ 

6模型仿真总结：

这里我们就风浪不是很剧烈条件下建立飞机迫降模型，飞机迫降的安全性主要取决于姿态角、初始速度，风速和浪速等，以上我们将这两给因素，并忽略浪高对飞机迫降的影响，结合风速和浪速统一在建立起来的数学模型当中，并据风速和浪速成线性关系假设了其二者之间的一个具体的线性系数关系（这里取0.4，这种速度差异主要受空气和海水的粘滞系数以及风的持续时间影响）。而后利用MATLAB做了模型仿真，分别取 $\theta=4^\circ$ 、 8° 、 12° 、 15° 和 $v=50\text{m/s}$ 、 100m/s 、 150m/s 、 200m/s 这几种情况进行模型仿真。

由仿真的结果可知， θ 从 4° 到 15° 的变化中，机身各处所受压力减小，所以当我们选择比较合适的俯仰角，大概在12度左右较合适，太大的话，会加大驾驶员的操纵难度，印象飞机的稳定性。

在初速度从 50m/s 到 200m/s 的变化下，机身各处所受压力增大，但实际上不是速度越小越好，因为速度太小的话，飞机也很难控制。当然飞机的初速度也不能太大，否则迫降瞬间巨大的接触作用力很可能使飞机机体断裂。由于此时的 θ 我们取的是 12° ，是比较合适的，在这种情况下，初速度最好能是 140m/s 左右。

另外在风速比较大的情况下，如上面采用的当风速达到 100m/s 时的仿真结果可以知道，飞机机身各处应力较风力不是太大时已经相当大了，而且在如此大的风速下，飞机迫降的操纵难度以及是相当困难甚至是难以想象的了，所以我们不建议飞机在大风浪情况下迫降，因为这样成功几率是相当小的。我们上面所建立的模型也是针对风浪不是很剧烈情况下的。在这种情况下，浪对飞机的影响主要表现在水平相对速度上，而由于浪高较小，主要是使飞机上下轻微波动，可以忽略其对飞机迫降模型建立工程中的影响。这个因素可以在进一步的模型的优化中加以考虑和修正。

7 模型优化

上述模型在建立过程中只考虑了波速的水平方向的影响，因为考虑在海面迫降时风浪不能过大否则迫降的成功几率将降低，把波速水平方向的影响做为主要影响因素而未考虑波速对竖直方向上的影响，但其对竖直方向上的影响还是存在的，可以通过建立浪高与浪速的关系进而可以得到波速竖直方向的分量对飞机迫降过程的影响。在附表二中有相应的浪高与波速之间的关系。

参赛队号 # 1727

参考文献:

- [1] 贺谦, 陈效鹏, 李磊等. 《飞机水面降落的机身载荷研究》. 强度与环境. 2009. 8
- [2] 陈占晖, 卢永锦. 《高速运动物体砰击水面后的动力学特性研究》. 船舶工程. 2009. 3
- [3] 赵国强, 孙明丽. 《波速理论》, 中国海洋出版社, 2006. 8
- [4] 孙宏. 《影响民航客机着陆性能的因素分析》. 飞行力学. 1999. 12
- [5] 韩维, 阎永举, 刘超. 《飞机起飞静平衡状态计算》. 海军航空工程学院学报. 2008. 1
- [6] 胡大勇, 杨嘉陵, 王赞平. 《某型飞机水上迫降数值化模型》. 北京航空航天大学学报. 2008. 12

附录一:

1、风速 4.5m/s

(1) 初速度 140m/s, 分别取俯仰角 4, 8, 12, 15

% $\varphi = 4^\circ$

v1=4.5;

v2=0.4*v1;

m=70000;

s=250;

t=0.05;

h=33.84;

R=8.865;

r=-h/2:0.1:h/2;

o=4*pi/180;b=88*pi/180;

sp=m/h;

g=9.8;

v=140;

f=1/2*(r.^2-h^2/4)*sp*((2*(v+v2)*cos(b))/cos(o)+(2*(v+v2)*sin(b))/sin(o)+(v1^2*s*sin(b))/(1600*m))/(R*t))*log(h/(2*(h/2-R)))-sp*g*(r+h/2)*cos(o);

plot(r,f,'*')

xlabel('r/m')

ylabel('fn/N')

% $\varphi = 8^\circ$

v1=4.5;

v2=0.4*v1;

m=70000;

s=250;

t=0.05;

h=33.84;

R=8.865;

r=-h/2:0.1:h/2;

参赛队号 # 1727

```

o=8*pi/180;b=88*pi/180;
sp=m/h;
g=9.8;
v=140;
f=1/2*(r.^2-h^2/4)*sp*((2*(v+v2)*cos(b))/cos(o)+(2*(v+v2)*sin(b))/sin(o)+(v1^2*s*sin(b))/(1600*m))/(R*t))*log(h/(2*(h/2-R)))-sp*g*(r+h/2)*cos(o);
plot(r,f,'*')
xlabel('r/m')
ylabel('fn/N')

```

```

%  $\varphi = 12^\circ$ 
v1=4.5;
v2=0.4*v1;
m=70000;
s=250;
t=0.05;
h=33.84;
R=8.865;
r=-h/2:0.1:h/2;
o=12*pi/180;b=88*pi/180;
sp=m/h;
g=9.8;
v=140;
f=1/2*(r.^2-h^2/4)*sp*((2*(v+v2)*cos(b))/cos(o)+(2*(v+v2)*sin(b))/sin(o)+(v1^2*s*sin(b))/(1600*m))/(R*t))*log(h/(2*(h/2-R)))-sp*g*(r+h/2)*cos(o);
plot(r,f,'*')
xlabel('r/m')
ylabel('fn/N')

```

```

%  $\varphi = 15^\circ$ 
v1=4.5;
v2=0.4*v1;
m=70000;
s=250;
t=0.05;
h=33.84;
R=8.865;
r=-h/2:0.1:h/2;
o=15*pi/180;b=88*pi/180;

```

参赛队号 # 1727

```

sp=m/h;
g=9.8;
v=140;
f=1/2*(r.^2-h^2/4)*sp*((2*(v+v2)*cos(b))/cos(o)+(2*(v+v2)*sin(b))/sin(o)+(v1^2*s*sin(b))/(1600*m))/(R*t))*log(h/(2*(h/2-R)))-sp*g*(r+h/2)*cos(o);
plot(r,f,'*')
xlabel('r/m')
ylabel('fn/N')

```

(2) 设俯仰角 12，分别取初速度 50, 100, 150, 200m/s

```

% v_初 = 50m/s
v1=4.5;
v2=0.4*v1;
m=70000;
s=250;
t=0.05;
h=33.84;
R=8.865;
r=-h/2:0.1:h/2;
o=12*pi/180;b=88*pi/180;
sp=m/h;
g=9.8;
v=50;
f=1/2*(r.^2-h^2/4)*sp*((2*(v+v2)*cos(b))/cos(o)+(2*(v+v2)*sin(b))/sin(o)+(v1^2*s*sin(b))/(1600*m))/(R*t))*log(h/(2*(h/2-R)))-sp*g*(r+h/2)*cos(o);
plot(r,f,'*')
xlabel('r/m')
ylabel('fn/N')

```

```

% v_初 = 100m/s

```

```

v1=4.5;
v2=0.4*v1;
m=70000;
s=250;
t=0.05;
h=33.84;
R=8.865;
r=-h/2:0.1:h/2;

```

参赛队号 # 1727

```

o=12*pi/180;b=88*pi/180;
sp=m/h;
g=9.8;
v=100;
f=1/2*(r.^2-h^2/4)*sp*((2*(v+v2)*cos(b))/cos(o)+(2*(v+v2)*sin(b))/sin(o)+(v1^2*s*sin(b))/(1600*m))/(R*t))*log(h/(2*(h/2-R)))-sp*g*(r+h/2)*cos(o);
plot(r,f,'*')
xlabel('r/m')
ylabel('fn/N')

```

```


$$v_{初} = 150m/s$$

%
v1=4.5;
v2=0.4*v1;
m=70000;
s=250;
t=0.05;
h=33.84;
R=8.865;
r=-h/2:0.1:h/2;
o=12*pi/180;b=88*pi/180;
sp=m/h;
g=9.8;
v=150;
f=1/2*(r.^2-h^2/4)*sp*((2*(v+v2)*cos(b))/cos(o)+(2*(v+v2)*sin(b))/sin(o)+(v1^2*s*sin(b))/(1600*m))/(R*t))*log(h/(2*(h/2-R)))-sp*g*(r+h/2)*cos(o);
plot(r,f,'*')
xlabel('r/m')
ylabel('fn/N')

```

```


$$v_{初} = 200m/s$$

%
v1=4.5;
v2=0.4*v1;
m=70000;
s=250;
t=0.05;
h=33.84;
R=8.865;
r=-h/2:0.1:h/2;
o=12*pi/180;b=88*pi/180;
sp=m/h;

```

参赛队号 # 1727

```

g=9.8;
v=200;
f=1/2*(r.^2-h^2/4)*sp*((2*(v+v2)*cos(b))/cos(o)+(2*(v+v2)*sin(b))/sin(o)+(v1^2*s*sin(b))/(1600*m))/(R*t))*log(h/(2*(h/2-R)))-sp*g*(r+h/2)*cos(o);
plot(r,f,'*')
xlabel('r/m')
ylabel('fn/N')

```

注：风速为 10 100 时只需将以上程序中的变量 v1 相应的改成 10 或 100 即可，由于篇幅原因在此不再赘述

附录二：

风力等级	陆地地面物体征象	海面波浪/浪高(米)	相当风速	
			公里 / 时	米 / 秒
0	静，烟直上。	平静/0.0	小于 1	0~0.2
1	烟能表示风向。	微波峰无飞沫/0.1	1—5	0.3~1.5
2	人面感觉有风，树叶微动。	小波峰未破碎/0.2	6~11	1.6~3.3
3	树叶及微枝摇动不息，旌旗展开。	小波峰顶破裂/0.6	12~19	3.4~5.4
4	能吹起地面灰尘和纸张，树的小枝摇动	小浪白沫波峰/1.0	20~28	5.5~7.9
5	有叶的小树摇摆，内陆的水面有小波。	中浪折沫峰群/2.0	29~38	8.0~10.7
6	大树枝摇动，电线呼呼有声，举伞困难。	大浪到个飞沫/3.0	39~49	10.8~13.8
7	全树动摇，迎风步行感觉不便。	破峰白沫成条/4.0	50~61	13.9~17.1
8	微枝折毁，人向前行感觉阻力甚大。	浪长高有浪花/5.5	62~74	17.2~20.7
9	草房遭受破坏，大树枝可折断。	浪峰倒卷/7.0	75~88	20.8~24.4

参赛队号 # 1727

10	树木可被吹倒，，一般建筑物遭破坏。	海浪翻滚咆哮/9.0	89~102	24.5~28.4
11	陆上少见，大树可被吹倒，一般建筑物遭严重破坏	波峰全呈飞沫/11.5	103~117	28.5~32.6
12	陆上绝少，其催毁力极大。	海浪滔天/14.0	118~133	32.7~36.9
13			134~149	37.0~41.4
14			150~166	41.5~46.1
15			167~183	46.2~50.9
16			184~201	51.0~56.0
17			202~220	56.1~61.2

注：针对附表二在模型模拟中选择合适的风速，利于迫降