

## 基于层次分析法的水上飞机抗浪能力评估

蒋 荣<sup>1,2</sup> 史圣哲<sup>1,2</sup> 吴 彬<sup>1,2</sup> 张家旭<sup>1,2</sup>

(1. 中国特种飞行器研究所水动力研究中心, 荆门, 448035;

2. 中国特种飞行器研究所高速水动力航空科学技术重点实验室, 荆门, 448035)

**摘要:**对水上飞机的抗浪能力给出合理评价和分析,是水上飞机飞行试验非常重要的工作。本文提出基于层次分析综合评估方法对水上飞机抗浪性能进行评估,该方法充分考虑抗浪性评估的复杂性,充分利用了专家工程经验,对不同评估参数划分权重,合理给出水上飞机抗浪能力。通过海鸥 300 轻型水陆两栖飞机实例分析,评估认为其在不大于 0.4 m 浪高水面安全起降概率可达 88.5% 以上,试验验证了该方法的可行性、有效性。

**关键词:**水上飞机; 抗浪性; 层次分析法

中图分类号: V271.5

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2017)S-0131-05

## Application of Analytic Hierarchy Process in Seaplane Anti-Waves Ability Evaluation

JIANG Rong<sup>1,2</sup>, SHI Shengzhe<sup>1,2</sup>, WU Bin<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiaxu<sup>1,2</sup>

(1. Hydraulic Research Center, AVIC Special Vehicle Research Institute, Jingmen, 448035, China;

2. Key Aviation Scientific and Technological Laboratory of High Speed Hydrodynamic,  
AVIC Special Vehicle Research Institute, Jingmen, 448035, China)

**Abstract:** Seaplane anti-waves ability evaluation is an important work for seaplane fly test. The analytic hierarchy process is used to evaluate the seaplane anti-waves ability. The method fully considers the complicity of anti-waves ability evaluation, makes full use of expert engineering experience, distinguishes the weight of different evaluation parameters, and evaluates the seaplane anti-waves ability. By the HO 300 light amphibious aircraft example, the evaluation result shows that its safe taking-off and landing probability reaches to 88.5% in 0.3 m wave height. Experimental results validate the feasibility and validity of the method.

**Key words:** seaplane; anti-waves ability; analytic hierarchy process(AHP)

抗浪能力是水上飞机在规定的极限水文条件下完成任务的能力,是水上飞机最重要的水动力性能之一。水上飞机在波浪上滑行、起飞和降落时,由于波浪对船体的干扰,飞机的运动状态<sup>[1-2]</sup>、水动力<sup>[3-5]</sup>、船体喷溅<sup>[6-8]</sup>和机体载荷都会发生很大的变化。影响水上飞机抗浪能力的因素众多,不仅与飞机船体水动外形设计、机体结构设计、动力装置选择和气动设计等内在的因素有关,还与波浪运动,飞机本身运动,乘员的临界状态和驾驶人员的技术

等客观因素以及这些因素之间相互的关联相关,因此水上飞机抗浪能力评估十分复杂。20 世纪 50 年代,国外研究者曾借鉴水面舰船耐波性分析方法评估水上飞机抗浪能力<sup>[9]</sup>,因水上飞机与水面舰船存在巨大的差别,水面舰船耐波性分析方法对水上飞机不适用。目前国内外学者主要根据飞机的过载、纵摇幅值等单一参数评估水上飞机抗浪能力,该方法考虑因素简单,容易出现偏差。通过研究,找到合理评估方法准确给出水上飞机的抗浪能力,

收稿日期: 2017-05-15; 修订日期: 2017-06-20

通信作者: 蒋荣,男,工程师, E-mail: jr020@126.com。

引用格式: 蒋荣, 史圣哲, 吴彬, 等. 基于层次分析法的水上飞机抗浪能力评估[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(S):. JIANG Rong, SHI Shengzhe, WU Bin, et al. Application of analytic hierarchy process in seaplane anti-waves ability evaluation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(S):.

减小水上飞机在风浪中发生危险的可能性,对水上/水陆两栖飞机的发展具有非常重要的意义。层次分析法将评估参数两两互相比,通过引入统一的赋值方法得到判断矩阵,并确定判断矩阵的特征向量作为各个评估参数的权重,因此采用层次分析方法得到的水上飞机抗浪能力具有很高的可信度和科学性。

## 1 抗浪能力综合评价准则

水上飞机抗浪能力评估是非常复杂的综合性问题,从单方面进行评估缺乏科学性和严谨性,需采用综合的评价方法。所谓抗浪能力综合指标评价方法是指将影响飞机抗浪能力评估的参数进行统计和分析,并赋予不同权重值,根据在试飞样本数据建立如下综合评估方程<sup>[6]</sup>为

$$R = \sum_{i=1}^n K_i (1 - \frac{P_i}{P_i'}) \quad (1)$$

式中: $R$ 为水陆两栖飞机抗浪能力评估值,其值越大表明飞机抗浪能力越好,反之其值越小,飞机抗浪能力差; $n$ 为选定对水陆两栖飞机抗浪能力影响较大的参数数量; $K_i$ 为权重系数,其值反映对飞机抗浪能力影响程度; $P_i$ 为水陆两栖飞机在试验浪高条件下,评定参数超过平衡值的概率; $P_i'$ 为水陆两栖飞机在试验浪高条件下,评定参数超过平衡值的允许发生概率。

从上述综合评估方程可以看出,采用综合评价方法评估水陆两栖飞机抗浪能力显然要比通过单一技术指标来评估飞机在预定浪高中起降的安全性更为全面、系统。从评估方程中也可看到,水上飞机抗浪能力评估包括:(1)评估参数体系的建立;(2)评估参数权重分析;(3)评估参数平衡选择;(4)评估参数允许发生超过平衡值的概率分析

## 2 水上飞机抗浪能力评价体系的建立

### 2.1 评估参数的筛选

抗浪能力是水陆两栖飞机性能的综合体现,选择评估参数时主要从以下3个方面进行考虑:(1)人员舒适性;(2)飞机使用安全性;(3)飞机使用性能。

#### 2.1.1 人员舒适性

人员舒适性主要是指飞机在波浪水面运动时,飞机产生的纵摇运动不会影响飞行员、机械师和观察员等空勤人员正常工作,不会超出机上人员的身体承受范围。有关人员舒适性参数主要有:纵摇、横摇、垂荡、垂向过载、脚蹬力和盘/杆力等。

#### 2.1.2 飞机使用安全

飞机在波浪水面的使用安全性主要从飞机结

构强度方面考虑,相关参数主要有:波浪抨击载荷、横滚角、喷溅对螺旋桨、襟翼、空速管以及驾驶员视线的影响。

#### 2.1.3 飞机使用性能

飞机在波浪上使用性能包括起飞距离、起飞时间、纵摇幅值、阻力峰加速度和横摇幅值等。

通过上述分析,水上飞机抗浪能力评估参数体系如图1所示。

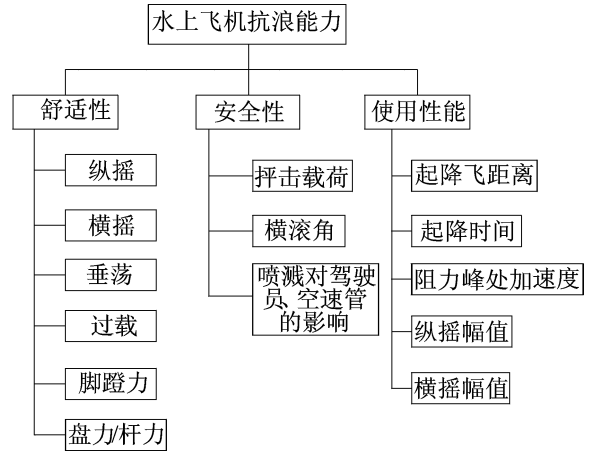


图1 水上飞机抗浪能力评估参数体系

Fig. 1 Evaluation parameter of seaplane anti-waves ability

### 2.2 主要评估参数平衡

由于国内缺乏水上飞机运营经验和试验数据,难以给出水上飞机评估参数的平衡值。结合相关资料分析,初步给出主要评估参数的建议平衡值,详见表1<sup>[6-8]</sup>:

表1 水陆两栖飞机抗浪性评估参数建议平衡值

Tab. 1 Advice values of amphibious aircraft anti-waves ability

评估参数	平衡值
纵摇幅值	不大于 5°
横摇幅值	不大于 4°
垂向过载	不大于 3g
脚蹬力	不大于 68kg
盘/杆力	不大于 34kg
喷溅对螺旋桨、襟翼等结构件的冲刷	程度轻微,可接受
喷溅对驾驶员视线的影响	不影响驾驶员视线
起飞距离	相对静水起飞 不增加 25%
起飞时间	相对静水起飞 不增加 25%
阻力峰加速度	不少于 0.05g

### 2.3 评估参数权重系数定量分析

#### 2.3.1 评估参数权重的确定

水上飞机抗浪性评估考虑因素范围广,任何有经验的专家都难给出令人信服的参数权重系数,利用层次分析方法求取各个评估参数的权重系数,能有效避免因不同而产生的权重系数分配差异。层次分析法就是对每一层次的各个元素的互相重要性给出判断,并将判断结果以数值的形式表达出来,写成判断矩阵形式。水上飞机抗浪性评估参数均处于同一层次,只需要对不同评估参数之间的相对重要性进行评估,构建矩阵  $A$  为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

式中: $a_{ij}$  为参数  $A_i$  对  $A_j$  的重要性,在判断分析时, $a_{ij}$  取 1,3,5,7,9 等数值对评估参数之间的相对关系量化,评估参数之间量化标度准则详见表 2<sup>[10]</sup>。

计算矩阵  $A$  每一行元素的几何平均值  $\omega =$

$$\sqrt[n]{\prod_{j=2}^n a_{ij}}$$

对向量  $\omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n]^T$  进行归一化处理,得

$$\bar{\omega} = [\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \bar{\omega}_3, \dots, \bar{\omega}_n]^T =$$

$$\left[ \frac{\omega_1}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \frac{\omega_2}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \frac{\omega_3}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \dots, \frac{\omega_n}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \right]$$

特征向量  $\bar{\omega}$  为各评估参数的权重。

表 2 评估参数标度准则

Tab. 2 Guide line of evaluation parameter

参数 $A_i$ 与 $A_j$	说明	$f(A_i, A_j)$	$f(A_j, A_i)$
$A_i$ 与 $A_j$ 同等重要	$A_i$ 与 $A_j$ 对总目标有相同的贡献。	1	1
$A_i$ 比 $A_j$ 稍微重要	$A_i$ 的贡献稍大于 $A_j$ ,但不明显。	3	1/3
$A_i$ 比 $A_j$ 明显重要	$A_i$ 的贡献稍大于 $A_j$ ,但不十分明显。	5	1/5
$A_i$ 比 $A_j$ 十分重要	$A_i$ 的贡献明显大于 $A_j$ ,但不特别。	7	1/7
$A_i$ 比 $A_j$ 极其重要	$A_i$ 的贡献以压倒性优势大于 $A_j$ 。	9	1/9
$A_i$ 比 $A_j$ 处于上述两者之间	相邻两判断的折中。	2,4 6,8	1/2,1/4 1/6,1/8

#### 2.3.2 评估参数权重值分配合理性判断

由于系统的复杂性以及判断的主观性,所得的判断矩阵难以完全符合一致性。因此,为了使所得的分析结果合理化,需要对构造的判断矩阵进行一致性检查,以保证评估结果不会出现太大的偏差。通过计算矩阵的最大特征根,代入式(2)计算评估参数权重随机分配一致性 CR,则

$$CR = \frac{\lambda_{max} - n}{(n - 1)RI} \quad (2)$$

当随机一致性比例  $CR < 0.1$  时,则可认为判断矩阵  $A$  具有较好的一致性,否则调整判断矩阵,使其具有满意的一致性。当判断矩阵具有满意的一致性后,归一化后的特征向量即为对应参数的权重值。随机一致性指标 RI 值详见表 3。

表 3 随机性指标 RI

Tab. 3 Values of randomness index (RI)

矩阵阶数 $n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI 值	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52

### 2.4 评估参数允许超过平衡概率分析

由于国内缺少相关的研究基础和数据统计,难以对每个评估参数给出合理的可以允许超过平衡的概率,因而根据判断矩阵  $A$ ,按对水上飞机抗浪性评估所起到的重要性分为关键参数、重要参数和一般参数 3 类。关键参数即为对飞机抗浪性评估起到极其重要的参数;重要参数为那些对飞机抗浪性评估起重要作用,但不特别的参数;一般参数是飞机抗浪性评估起作用不明显的参数。

从国外有关统计资料看,一般水上飞机在特定海域出勤率达到 90% 即为抗浪性能非常优秀。因此,认为水陆两栖飞机抗浪性评估关键参数超过平衡值的概率不得超过 0.1。因一般性参数对飞机抗浪性能力影响不太大,此类参数可允许超过平衡概率 0.2,不会对飞机安全性造成危险,重要参数允许超过平衡概率,取关键参数和一般参数的中间值,0.15。

## 3 水上飞机抗浪能力评估案例分析

海鸥 300 轻型水陆两栖飞机是我国自行研制的一款多用途单发轻型水陆两栖飞机,该机设计水上最大起降质量 1 680 kg,最大起降水面浪高不大于 0.4 m,目前该机正处于研发试飞阶段,并进行了 20 多架次飞行试验,如图 2,本文采用上述方法对海鸥 300 飞机在 0.4 m 浪高水面条件下的起降能力进行评估。



图 2 海鸥 300 轻型水陆两栖飞机水上试飞

Fig. 2 Flight-test of HO300 light amphibious aircraft

评估参数选择质心法向过载、平均纵摇幅值、平均横摇幅值和操纵杆力等 9 个参数,评估参数的衡准值  $M$  以及允许发生超过衡准值的概率  $P'$  详见表 4。

表 4 海鸥 300 轻型水陆两栖飞机抗浪性评估参数选择及衡准

Tab. 4 Evaluation parameter choice and guide line of HO300 light amphibious aircraft

评估参数 A	衡准值 $M$	允许超过衡准值的概率 $P'$
纵摇幅值	不大于 $5^\circ$	0.1
横摇幅值	不大于 $4^\circ$	0.15
质心法向过载	不大于 3 g	0.15
脚蹬力	不大于 68 kg	0.15
盘/杆力	不大于 34 kg	0.15
喷溅对驾驶员视线的影 响	不影响驾驶员 视线	0.2
起飞距离	相对静水起飞 不增加 25%	0.2
起飞时间	相对静水起飞 不增加 25%	0.2
阻力峰加速度	不少于 0.05g	0.15

对选定的评估参数,根据参数标度准则建立判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1.0 & 3.0 & 3.0 & 5.0 & 5.0 & 7.0 & 9.0 & 9.0 & 5.0 \\ 1/3 & 1.0 & 2.0 & 3.0 & 5.0 & 3.0 & 5.0 & 5.0 & 3.0 \\ 1/3 & 1/2 & 1.0 & 3.0 & 4.0 & 7.0 & 9.0 & 9.0 & 3.0 \\ 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1.0 & 3.0 & 2.0 & 2.0 & 2.0 & 3.0 \\ 1/7 & 1/3 & 1/7 & 1/2 & 1/2 & 1.0 & 2.0 & 2.0 & 3.0 \\ 1/9 & 1/5 & 1/9 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1.0 & 1.0 & 4.0 \\ 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/5 & 1/3 & 1/4 & 1/4 & 1.0 \end{bmatrix}$$

根据文献[11]求取判断矩阵  $A$  的最大特征

$\lambda_{rmax}$ :

$$A \xrightarrow{\substack{\text{列向量} \\ \text{归一化}}} B \xrightarrow{\substack{\text{换行} \\ \text{求和}}} C \xrightarrow{\text{归一化}} \omega =$$

$$(0.281 \ 0.162 \ 0.162 \ 0.12 \ 0.104 \ 0.075 \ 0.039 \ 0.038 \ 0.02)^T$$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \frac{(A\omega)_i}{\omega_i} = 9.474$$

将  $\lambda_{max}$  代入式(1),求得  $CI = 0.042 < 0.1$ ,表明评估参数权重分配一致性较好。

对海鸥 300 飞机波浪水面 26 架次飞行试验数据处理,结果见表 5:

表 5 海鸥 300 轻型水陆两栖飞机抗浪性能力评估表

Tab. 5 Anti-waves ability evaluation of HO300 light amphibious aircraft

评估参数 A	超过衡准	超过衡准值
	值架次	发生概率 $P$
纵摇幅值	3	0.115
横摇幅值	3	0.115
质心法向过载	1	0.038
脚蹬力	0	0
盘/杆力	0	0
喷溅对驾驶员视线的影 响	3	0.115
起飞距离	0	0
起飞时间	0	0
阻力峰加速度	2	0.077

从表 5 可知,超过衡准值发生的概率均小于 0.115,即安全起降概率大于 88.5%。将表 5 所有数据分别代入式(1)中得  $R = 0.158$ 。从评估参数分配权重看,影响海鸥 300 飞机抗浪能力评价的主要参数是飞机在波浪上的运动纵摇幅值,若能降低飞机在波浪上的运动响应,则能很大提高飞机的抗浪能力和出勤概率。虽然目前海鸥 300 飞机抗浪性飞行试验架次有限,且选择评估参数不全,导致纵摇幅值所占权重过大,降低了飞机的抗浪能力综合值,但从目前评估结果  $R = 0.158 > 0$  可以看出,海鸥 300 飞机在不大于 0.4 m 水面安全起降概率至少可达 88.5%上,飞机的抗浪性能较好。

## 4 结论

(1)影响海鸥 300 飞机抗浪能力评价的主要参数是飞机在波浪上运动俯仰角度的变化,若能降低飞机在波浪上运动响应,则能很大提高飞机的抗浪能力和出勤概率。

(2)海鸥 300 飞机在不大于 0.4 m 浪高水面安全起降概率至少可达 88.5%以上,抗浪能力较好。

### 参考文献:

[1] 黄森,吴彬,蒋荣,等. 水上飞机在波浪上运动响应特性试验研究[J]. 实验流体力学, 2015,29(3):41-46.  
HUANG M, WU B, JIANG J, et al. Experimental study on motion response of a seaplane on waves[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015,29(3):41-46.

[2] 江婷,蒋荣,吴彬. 水上飞机纵向稳定性判别方法研究[J]. 航空计算技术,2014,44(6):75-77,83.

- JIANG T, JIANG R, WU B. Method of distinguish longitudinal motion stability of seaplane[J], *Aeronautical Computing Technique*, 2014, 44(6):75-77, 83.
- [3] 黄淼, 廉滋鼎, 左仔滨, 等. 水陆两栖飞机模型水池模型试验研究[J]. *航空科学技术*, 2016, 27(1):74-78.
- HUANG M, LIAN Z D, ZUO Z B, et al. Study of scaled model Tank tests in waves of an amphibian [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2016, 27(1):74-78.
- [4] 黄淼, 张家旭, 李成华, 等. 水陆两栖飞机船体水动力矩特性研究[J]. *科学技术与工程*, 2015, 33(15):215-218, 222.
- HUANG M, ZHANG J X, LI C H, et al. The hydrodynamic moment performance study of an amphibian [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 33(15):215-218, 222.
- [5] U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Flight Standards Service, FAA-H-8083-23, *Seaplane, Skiplane, and Float/Ski Equipped Helicopter Operations Handbook*[S]. 2004.
- [6] 熊文海, 毛筱菲, 李敏江. 船舶耐波性衡准及其评价方法浅析[J]. *Ship of Ocean Engineering, 船海工程*, 2007, 36(4):42-45.
- XIONG Wenhai, MAO Xiaofei, LI Yumin. Review on evaluation methods and criteria for Sea-keeping of ship [J]. 2007, 36(4):42-45.
- [7] 中国民用航空局. CCAR-25R4 中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标准[S]. 2011:15, 26, 54.
- [8] 国防科学技术工业委员会. GJB185-1986 有人驾驶飞机(固定翼)飞行品质[s]. 1986, 58.
- [9] ABDERABI Mohammed. 水面舰船耐波性综合评估方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2012.
- YE Y P, WANG S J, WEI L. Approximate computation on the maximum eigenvalue of matrixs [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2001, 35(9):69-71.
- [10] 王莉. 应用层次分析法进行建设工程评估[J]. *天津职业院校联合学报*, 2015, 17(2):39-43.
- WANG Li. An analysis of the application of the analytic hierarchy process(AHP) for the bid assessment of construction projects[J]. *Journal of Tianjin Vocational Institute*, 2015, 17(2):39-43
- [11] 叶耀军, 王首军, 魏磊, 等. 矩阵最大特征值的近似求法[J]. *河南农业大学学报*, 2001, 35(9):69-71
- YE Y P, WANG S J, WEI L. Approximate computation on the maximum eigenvalue of matrixs [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2001, 35(9):69-71.