

# 平流层飞艇环境适应性评价模型

张礼学, 王中伟\*

国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073

**摘要:** 阐述了平流层特别是 20 km 高度左右平流层的环境特点, 分析了各种环境因素对长期在此空域中驻留飞行的平流层飞艇性能的影响, 在此基础上, 建立了平流层飞艇环境适应性评价指标体系。并针对其各评价指标的物理意义不同且数量级相差较大的特点提出了基于物理规划和层次分析法相结合的综合评价模型。算例和分析结论表明: 抗风速度余量和产生消耗能量比在平流层飞艇对其飞行环境的适应能力评价中占有重要比重, 应成为飞艇总体方案设计和论证时的重点关注指标。

**关键词:** 平流层飞艇; 环境适应性; 物理规划; 层次分析法; 评价模型; 概念设计

中图分类号: V274 文献标识码: A 文章编号: 1000-6893(2013)04-0719-08

平流层一般指 11~50 km 范围高度的大气层, 其底部为传统的航空层。但在高度范围为 18~50 km 的广大平流层区域, 对于飞机来说, 该区域空气密度太小, 难以维持持续飞行; 对于卫星而言, 该区域空气密度又过大, 无法克服空气阻力产生的影响, 是目前人类飞行活动涉及较少的区域。平流层飞艇是一种依靠主气囊充满轻于空气气体提供的静浮力而在 18~24 km 高空工作的低速临近空间飞行器。其利用上表面铺设的太阳能光伏电池提供能源, 由电动机和螺旋桨为其提供前进的动力, 可携带数百千克甚至数吨的有效载荷, 具有长期驻空和定点巡航能力, 在军事和民用方面, 具有卫星和无人机没有或需要付出高昂代价才能得到的优势, 是目前世界各国热衷研制的一种重要的临近空间飞行器<sup>[1-2]</sup>。

装备的环境适应性是指装备在其寿命期内预计可能遇到的各种环境的作用下能实现其所有功能、性能和(或)不被破坏的能力, 是表征装备性能

的重要质量特性之一<sup>[3]</sup>。关于装备环境适应性的研究在诸如作战飞机<sup>[4]</sup>、舰载武器<sup>[5]</sup>等许多武器装备上都已深入展开并取得了良好的应用效果。而目前, 国内外关于平流层飞艇环境适应性评价的相关文献较少。文献<sup>[6]</sup>从能源产生和消耗角度对飞艇设计方案的可行性进行了评价研究。文献<sup>[7]</sup>分析了放飞时间、放飞经纬度以及飞艇飞行高度对飞艇尺寸等的影响。文献<sup>[8]</sup>分析了风场环境对平流层飞艇飞行性能的影响, 并对利用风场环境进行轨迹优化进行了研究。文献<sup>[9]</sup>考虑了风场和飞行季节对平流层飞艇定点性能的影响。文献<sup>[10]</sup>对平流层飞艇的热环境进行了分析并提出了相应的热设计方法。上述这些文献虽然都隐含了飞艇性能与环境相适应的原则, 但其研究均只是从各自领域出发, 部分考虑平流层环境对平流层飞艇性能影响情况下进行的, 并且由于没有形成与之相对应的性能指标, 使得不同设计方案的对比无法进行。对于平流层飞艇这样的研

收稿日期: 2012-05-28; 退修日期: 2012-07-12; 录用日期: 2012-09-03; 网络出版时间: 2012-10-18 08:34

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20121018.0834.003.html

基金项目: 国防预研项目(GFZX0402XX01)

\* 通讯作者. Tel.: 0731-84576482 E-mail: wang\_zhwei2001@163.com

引用格式: Zhang L X, Wang Z W. Environmental adaptability evaluation model for stratospheric airships. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(4): 719-726. 张礼学, 王中伟. 平流层飞艇环境适应性评价模型. 航空学报, 2013, 34(4): 719-726.

究领域新、技术创新强、研制周期长以及经费投入高的系统工程,本文通过对其总体设计方案的环境适应性建立有效的评价指标体系、应用合适的综合评估方法进行有效评价、选择环境适应能力强设计方案予以优先发展将是减少研制费用、降低设计风险的可行途径。

## 1 影响因素

任何合理存在的事物都是与其生存的环境相适应的,且具有对应的功能结构。平流层是平流层飞艇长期稳定工作的飞行区域,其环境特征影响着平流层飞艇的结构组成和功能发挥。环境对平流层飞艇的影响是多方面的,按其影响形式大致可以将其分为大气环境、太阳辐射环境、表面物理化学效应环境和风场环境。

### 1.1 大气环境及其影响

平流层飞艇的飞行原理不同于传统的升力体飞行器,其主要依靠空气来全部或部分地提供浮升力,这就决定了平流层飞艇与大气环境的紧密联系。对平流层飞艇产生影响的大气环境因素主要包括大气密度、大气压力和大气温度。

20 km 高度左右平流层大气的密度约为  $88.9 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ , 约为海平面的 7%。低的大气密度除了对飞艇有效载荷能力产生直接影响外,对飞艇的动力和推进系统影响也较大。一方面其使得普通燃油发动机无法在此高度正常工作,而只能通过改进发动机或使用电动机来提供动力,此外飞艇螺旋桨在相同转速下能够提供的推力也随着空气密度的减小而迅速降低;另一方面低的大气密度也使得在低空散热性能良好的设备在高空面临着严峻的热环境<sup>[11]</sup>。

这一高度的大气压力约为 5 kPa, 约为海平面的 5%。而低的大气压力除了会使通过蒙皮内外压差产生一定张力来维持外形的飞艇的内压减小之外,低的大气压力也使得长期工作在较低气压下的电子设备包括太阳能电池的放电风险变高。

在平流层飞艇的工作区域,温度随高度和时间的变化不大,基本维持在  $-56.5^\circ\text{C}$  附近。长期的低温条件使得一些材料变脆发硬,增大了发生破坏的可能性。同时较低的温度也使得飞艇上许

多设备的润滑系统无法正常工作,影响系统正常功能的发挥和系统的工作寿命。

### 1.2 太阳辐射环境及其影响

太阳辐射环境对平流层飞艇的影响主要包括能源和热辐射两个方面。对于目标为长时间驻空飞行的平流层飞艇而言,太阳能是目前情况下平流层飞艇飞行和载荷消耗能量的主要来源方式。但平流层飞艇能够接收到的太阳辐射能量受到飞艇飞行姿态、所处方位和飞行日期等的影响而不同,飞艇在飞行过程中对太阳能的捕获能力直接影响其工作时间和能力。

在一部分太阳辐射被转化为电能的同时,有一部分辐射则以热量的形式影响着飞艇的工作。通过蒙皮、太阳能电池和艇内气体对红外和可见光等太阳辐射的吸收,飞艇的艇内温度发生着相应的变化。这时候如果热设计处理不当,就会造成飞艇内部温度过高或过低,从而影响其正常工作<sup>[10-12]</sup>。

### 1.3 表面物理化学效应环境及其影响

平流层飞艇的外表面需要长期工作在充满臭氧、紫外辐射、水汽、气溶胶和污染物等的环境中。这些物质或通过本身所具有的强氧化性、光粒子所携带的高能量等引起飞艇蒙皮和部件发生化学反应来影响其工作性能,或通过覆盖、凝结等物理行为来降低系统的工作效率。前者如臭氧对飞艇蒙皮的氧化,后者如水汽在薄膜太阳能电池表面的凝结。

### 1.4 风场环境及其影响

平流层风场与对流层风场相比风速较小,风向比较稳定,但对于体积巨大的平流层飞艇其影响仍是巨大的。首先,其影响飞艇的飞行性能和有效载重能力。飞艇抗风所需的能源消耗功率与风速的三次方成正比,大的风速意味着飞艇需要携带更大的能源产生设备,这也使得其只能携带更少的有效载荷。其次,风场环境影响飞艇的对流换热,风速越大,飞艇表面的对流换热越强。此外,由于平流层飞艇一般为椭圆旋成体,这也使得飞艇对横侧向风的抵抗能力较弱。

## 2 评价指标

目前,平流层飞艇环境适应性的综合评价工作尚未形成评价指标体系,综合第1节中几种环境对平流层飞艇的影响特点,本文将平流层飞艇的环境适应性评价指标划分为“最大驻空时间”、“抗风速度余量”、“产生消耗能量比”、“高度保持精度”和“水平横向保持精度”等5个评价指标。

### 2.1 最大驻空时间

最大驻空时间是指从平流层飞艇放飞并首次到达高度稳态值开始,到平流层飞艇因为结构破坏等强制性原因而被迫降落的总时间。主要考察平流层飞艇在臭氧、紫外线的老化作用,蒙皮的气密性,能源系统的性能衰退等影响下正常工作的能力。其大小由能源系统工作寿命、臭氧老化寿命和紫外老化寿命等影响因素中的时间最短者决定。

### 2.2 抗风速度余量

抗风速度余量是指平流层飞艇最大飞行速度与飞艇所处环境中最大风速之比。其中平流层飞艇的最大飞行速度受能源系统的最大功率和飞艇的结构强度和刚度的限制<sup>[12]</sup>,而环境最大风速则通过历史统计数据来得到。该指标主要用来衡量平流层飞艇在其生存环境中的飞行性能。抗风速度余量越大,飞艇的抗风能力越强,其适应该环境风场的能力越强。

### 2.3 产生消耗能量比

产生消耗能量比是指飞艇在昼夜工作循环中,飞艇通过能源获取系统所能产生的能量总和与飞艇推进、载荷等系统所消耗的总能量之比。产生消耗能量比越大表明飞艇在飞行过程中所剩余的能量越多,其具有更大的负载能力和更强的应对环境突发事件能力。

### 2.4 高度保持精度

高度保持精度主要用来衡量飞艇对太阳热辐射、地表反射辐射和云层反射辐射等变化引起飞艇艇内热环境变化的适应能力,可用一段时间内实际高度与理论高度之间差距的最大值表示,该值越小说明精度越高。

### 2.5 水平横向保持精度

水平横向保持精度用于衡量平流层飞艇在横侧向风的影响下,通过控制系统调整后实际位置与定点目标值之间差距能力,可用不同横侧向风场条件下实际位置与目标位置之间差距的标准误差表示,该值越小说明精度越高。

综上所述,平流层飞艇环境适应性综合评价指标体系可归纳如图1所示。

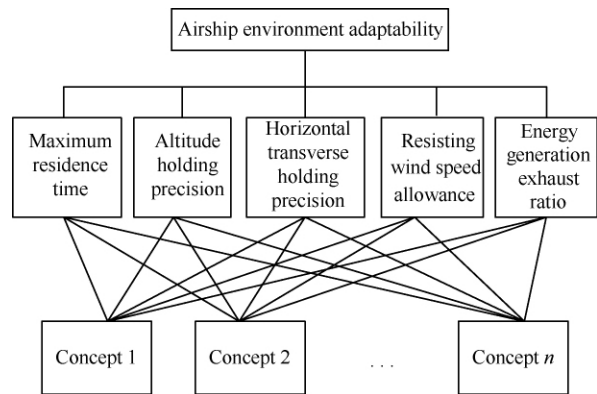


图1 平流层飞艇环境适应性指标体系

Fig. 1 Stratospheric airship environmental adaptability index system

## 3 评价模型

鉴于平流层飞艇环境适应性的各评价指标的物理意义不同且数量级相差较大,需要选择一种较适合平流层飞艇环境适应性评价的综合评价模型。

层次分析法<sup>[13-14]</sup>通过建立多级递阶层次结构,构造判断矩阵来分析各评价指标与最终目标之间的关系,其过程遵循人思维过程的层次化、数量化的特点,是现在应用最为广泛的系统分析工具之一,应用该方法能根据实际问题给出各评价指标的相对权重系数。

物理规划模型<sup>[15-16]</sup>能同等对待具有不同物理意义和不同数量级的属性值,其将设计准则映射到正实数空间,能很好地将设计者的工程经验综合到决策过程中,以较低的计算代价获得反映决策者偏好的折中解。

因此本文将层次分析法和物理规划相结合,利用所构建的评价体系,对平流层飞艇的环境适应性进行综合评价。具体过程如下:

1) 根据设计目标确定偏好函数类型

物理规划用偏好函数类型描述决策者对评价目标的价值倾向判断,分软(S)、硬(H)两种大的类型。其中软类型偏好函数在可行域内可以随设计指标变化,设计指标取不同值时对应不同偏好程度。硬类型偏好函数在可行域内一直保持最小值,表示只要设计指标值在可行域内就行。软硬类型偏好函数按设计指标的偏好变化趋势不同又可再分为以下4种类型:Class 1——设计指标越小越好;Class 2——设计指标越大越好;Class 3——设计指标趋于某值最好;Class 4——设计指标在某取值范围内最好。但无论哪种偏好函数,其偏好函数值越小,表示决策者对设计目标值越满意。8种基本偏好函数类型如图2所示。在工程实际中一般用软偏好函数描述设计目标,用硬偏好函数来描述约束。在本文的5个评估指标中,最大驻空时间、抗风速度余量和产生消耗能量比为类型Class 2,数值越大越好。高度保持精度和水平横向保持精度为类型Class 1,设计指标越小越好。

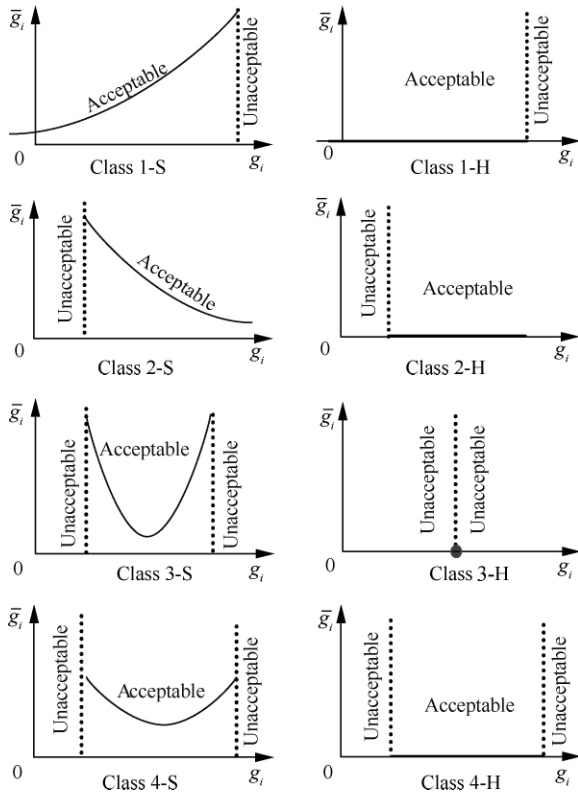


图2 偏好函数的8种基本类型

Fig. 2 Eight basic preference function types

2) 定义设计目标的满意程度区间

决策者对设计目标的满意程度偏好是通过对偏好函数的区间划分来描述的。以本文的任务为例,决策者对于每个评价指标可以聘请相关领域专家根据现行的经济、技术等因素综合评定该指标的极好、较好、一般、较差和极差的区间边界值。这些区间边界值是具有实际物理含义的设计目标值,反应了决策者对该设计目标的满意偏好程度,如图3所示。

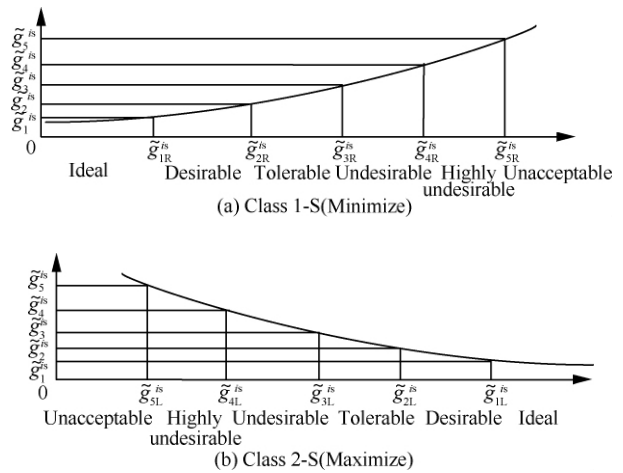


图3 设计目标偏好函数的区间划分

Fig. 3 Section division of design object preference function

3) 指标权重的确定

评价指标权重是反应各评价指标相对于评价目标的重要性系数,是指标综合效果的重要影响因素。应用层次分析法进行评价指标权重分析的主要步骤如下:

步骤1 根据专家判断对同一层次各元素关于上一层次中某一准则的重要性进行两两比较,构造比较判断矩阵,即

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

式中:  $a_{ij}$  为评价指标  $i$  对评价指标  $j$  关于评价目标的相对重要性。根据大多数人对事物分辨能力的心理习惯,一般采用 1~9 级标度来表述相对重要性,1 表示相等,9 表示绝对强,其余等级介于之间。显然,  $A$  矩阵是正互反矩阵,且其元素满足

$$\begin{cases} a_{ii} = 1 & (i = j) \\ a_{ij} = 1/a_{ji} & (i \neq j) \end{cases}$$

步骤2 特征根法计算权重系数。求解矩阵A的最大特征值及其对应的特征向量,特征向量即为各指标权重比较值。

步骤3 一致性检验。在用特征根法求解权重系数时要求判断矩阵为一致性矩阵,即矩阵元素  $a_{ij}$  对于任意的  $i(j = 1, 2, \dots, n)$ , 有  $a_{ik}a_{kj} = a_{ij}$ 。但在实际操作中,由于客观事物的复杂性以及人们对事物判断比较的模糊性,构造的判断矩阵很难完全符合。因此,对构造的矩阵要进行一致性检验。衡量矩阵一致性的数量指标包括一致性指标 C. I. 和一致性比率 CR,其计算方程如下:

$$\begin{cases} C. I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \\ CR = \frac{C. I.}{R. I.} \end{cases}$$

式中:R. I. 为随机一致性指标,其仅与矩阵阶数相关,可通过查表获得。当  $CR < 0.1$  时,即认为判断矩阵符合满意一致性。当其不满足条件,需要重新调整判断矩阵直到取到满意的一致性。

步骤4 方案环境适应性总得分计算。

将各设计目标的偏好函数加权综合起来,便可得到综合偏好函数  $g(x)$ 。将各设计目标的偏好函数综合成综合偏好函数有多种方式,这里取各设计目标偏好函数平均值的常用对数作为综合偏好函数。基于物理规划的方案环境适应性的最终数学模型为

$$\min_x g(x) = \lg\left(\sum_{i=1}^{n_s} w_i \bar{g}_i[g_i(x)]\right)$$

s. t.  $g_i(x) \leq g_{i5}$

$$\bar{g}_i^s = \exp[\alpha_i(g_i - g_{i,1R}^s)] \quad \alpha_i > 0(\text{Class 1-S})$$

$$g_i(x) \geq g_{i5}$$

$$\bar{g}_i^s = \exp[\alpha_i(g_i - g_{i,1L}^s)] \quad \alpha_i < 0(\text{Class 2-S})$$

式中:  $n_s$  为评价指标的个数;  $w_i$  为第  $i$  个指标的权重值;  $\bar{g}_i[g_i(x)]$  为指标  $i$  的偏好函数值;  $\alpha_i$  为偏好函数系数,需根据  $g_i$  的取值范围确定。

### 4 算例

现有 A、B、C 和 D 4 个不同的用于风暴气流高分辨率监测的平流层飞艇概念设计方案,其在

最大驻空时间(I1)、高度保持精度(I2)、水平横向保持精度(I3)、抗风速度余量(I4)和产生消耗能量比(I5)等 5 个评价指标方面的数据如表 1 所示。

表 1 概念设计方案的评价指标数据

Table 1 Basal index data of concept design

Index	Concept A	Concept B	Concept C	Concept D
I1/d	35	30	20	25
I2/m	800	1 100	1 000	600
I3/m	400	600	500	800
I4	1.5	2.0	2.5	1.8
I5	1.6	2.0	1.8	1.6

由表 1 各指标的数量和单位可以发现,各评价指标均可量化,且不同指标的物理意义和属性值量级存在较大差异,可以应用本文提出的飞艇环境适应性综合评价模型。在本算例中,最大驻空时间、抗风速度余量、产生消耗能量比的偏好函数类型为 2-S 类型,其值越大越好;高度保持精度和水平横向保持精度的偏好函数类型为 1-S 类型,其值越小越好。此外考虑当前技术、经济等多方面影响情况后,经过专家的问卷调查得出目前比较合适的各设计目标偏好结构区间如表 2 所示。

表 2 设计目标偏好结构

Table 2 Design object preference configuration

Index	Preferred type	Preferred boundary				
		$g_{i1}$	$g_{i2}$	$g_{i3}$	$g_{i4}$	$g_{i5}$
I1/d	2-S	30	25	20	15	10
I2/m	1-S	400	600	800	1 000	1 200
I3/m	1-S	300	500	700	900	1 100
I4	2-S	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5
I5	2-S	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2

经过多名专家综合分析后给出的 5 个评价指标(I1、I2、I3、I4、I5)相对于评价目标(A)的判断矩阵如下:

A	I1	I2	I3	I4	I5
I1	1	3	3	1/3	1/2
I2	1/3	1	1	1/6	1/5
I3	1/3	1	1	1/6	1/5
I4	3	6	6	1	2
I5	2	5	5	1/2	1

计算得上述判断矩阵最大特征值  $\lambda = 5.04$ , 特征向量  $x = [0.16 \quad 0.06 \quad 0.06 \quad 0.44 \quad 0.28]$ , 其一致性比率  $CR = 0.0089 \ll 0.1$ 。由此得最大驻空时间、高度保持精度、水平横向保持精度、抗风速度余量、产生消耗能量比在环境适应性评价这一目标下权重为  $W = [0.16 \quad 0.06 \quad 0.06 \quad 0.44 \quad 0.28]$ 。

在满意程度区间和评价指标权值确定后,应用平流层飞艇设计方案综合评价模型的计算结果如图 4 所示。

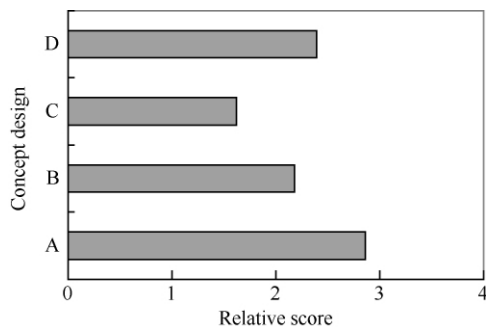


图 4 概念设计方案评价结果

Fig 4 Concept design evaluation result

从评价结果可以看出,4 个平流层飞艇设计方案的环境适应性总得分排序为:方案 C<方案 B<方案 D<方案 A。方案 C 为 4 个设计方案中综合环境适应性能的最佳方案,可以先将有限的预研资金投给该方案。这与实际情况也是符合的,该设计方案的抗风速度余量评价指标明显优于其他几个方案,而该项指标在平流层飞艇环境适应性能力中占有重要比重。此外该方案的其他几项评价指标比较平衡,均处于各项评价指标偏好的中上等水平。

## 5 结 论

1) 对平流层特别是 20 km 高度附近的平流层环境对长期在此驻留飞行的平流层飞艇产生的多方面影响进行了分析总结,建立了一种平流层飞艇环境适应性评价指标体系,该体系用最大驻空时间等 5 个评价指标清晰地表达了环境对平流层飞艇的影响。

2) 物理规划方法能较好地将决策者的工程经验综合到决策过程中,以较低的计算代价获得

反映决策者偏好的折中解,而层次分析法的加入改进了物理规划法忽略各评价指标相对评价目标权重不同的缺点。这为指标可量化情况下的综合评估提供了一种新方法,与其他方法相比,该方法综合了决策者的偏好信息,使评价结论更直观可信。

3) 本文仅从平流层飞艇平台角度考虑了飞艇的环境适应性,当其携带的载荷有特殊要求时还需考虑载荷的环境适应性,如雷达需要考虑电磁环境对其产生的影响。此外,层次分析法在进行评价指标权重计算时存在一定的主观性,通过仿真获取各评价指标对评价目标的比重是增进评估客观性的可行途径之一。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao Z L, Wang X Q, Du S Y. Review of research on gas retention layer material for stratospheric airship envelope and helium permeation in polymers. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(9): 1761-1767. (in Chinese)
- [2] 赵臻璐, 王小群, 杜善义. 平流层飞艇囊体气密层材料及氦气透过聚合物研究现状. *航空学报*, 2009, 30(9): 1761-1767.
- [3] Khoury G A, Gillett J D. *Airship technology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 1-10.
- [4] Zhu Y C, Chang W J, Fu Y. Environmental suitability of weapons and environmental engineering. *Equipment Environmental Engineering*, 2005, 2(1): 14-19. (in Chinese)
- [5] 祝耀昌, 常文君, 傅耘. 武器装备环境适应性与环境工程. *装备环境工程*, 2005, 2(1): 14-19.
- [6] Li S L, Yang S, Sun D. Evaluation model of environmental worthiness for military aircraft. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(6): 1053-1057. (in Chinese)
- [7] 李曙林, 杨森, 孙冬. 军用飞机环境适应性评价模型. *航空学报*, 2009, 30(6): 1053-1057.
- [8] Qu X Y, Deng L. Analysis of the environmental worthiness of shipborne weapons in marine environment. *Ship Electronic Engineering*, 2011, 31(4): 138-146. (in Chinese)
- [9] 曲晓燕, 邓力. 舰载武器海洋环境适应性分析. *舰船电子工程*, 2011, 31(4): 138-146.
- [10] Anthony C. Initial feasibility assessment of a high altitude long endurance airship. NASA CR-212724, 2003.
- [11] Chen Q, Zhu M, Sun K W. Analysis to effects on conceptual parameters of stratospheric airship with specified factors. *Journal of Computers*, 2011, 6(5): 1055-1062.

- [8] Joseph B M, Zhao Y Y, William L G. Optimal ascent trajectories for stratospheric airships using wind energy. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2009, 32(9): 1232-1245.
- [9] David K S, James S, Jason R. Near-space station keeping performance of a large high-altitude notional airship. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(2): 611-615.
- [10] Ma W, Xuan Y M, Han Y G. Thermal environment analysis and thermal design principle of stratospheric vehicles. *Journal of Astronautic*, 2010, 31(5): 1272-1277. (in Chinese)  
马伟, 宣益民, 韩玉阁. 临近空间热环境分析及低速飞行器的热设计方法. *宇航学报*, 2010, 31(5): 1272-1277.
- [11] Yang B, Yang J. Analysis of the operating environment of near-space airship and its effects. 2008 Aerostat Conference Proceeding. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2008: 395-398. (in Chinese)  
杨秉, 杨健. 临近空间飞艇运行环境及其影响分析. 2008年中国浮空器大会论文集. 北京: 中国科学电子学研究所, 2008: 395-398.
- [12] Yao W, Li Y, Zheng W, et al. Analysis of flight temperature limits and flight velocity limits for stratospheric airship. *Journal of Astronautic*, 2011, 32(6): 1239-1243. (in Chinese)  
姚伟, 李勇, 郑威, 等. 平流层飞艇飞行温度限和飞行速度限分析. *宇航学报*, 2011, 32(6): 1239-1243.
- [13] Zhang Z Q, Xu B, He Y L, et al. Engine performance evaluation based on analytic hierarchy process. *Acta Armamentari*, 2008, 29(5): 625-628. (in Chinese)  
张志强, 徐斌, 何勇灵, 等. 基于 AHP 评价方法的发动机性能评价. *兵工学报*, 2008, 29(5): 625-628.
- [14] Chen Y, Chen X K, Lin Y. Application of improved radar chart evaluation method on evaluation of automobile comprehensive performances. *Journal of Jilin University*, 2011, 41(6): 1522-1526. (in Chinese)  
陈勇, 陈潇凯, 林逸. 改进雷达图评价方法在汽车综合性能评价中的应用. *吉林大学学报*, 2011, 41(6): 1522-1526.
- [15] Xue L H, Huang H Z, Zhang X, et al. Study of model for linear physical programming-based evaluation and decision-making of conceptual design schemes. *Journal of Dalian University of Technology*, 2005, 45(4): 562-567. (in Chinese)  
薛立华, 黄洪钟, 张旭, 等. 概念设计方案评价和决策线性物理规划模型研究. *大连理工大学学报*, 2005, 45(4): 562-567.  
王允良, 李为吉. 物理规划方法及其在飞机方案设计中的应用. *航空学报*, 2005, 26(5): 562-566.
- [16] Wang Y L, Li W J. Physical programming and its application in aircraft concept design. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, 26(5): 562-566. (in Chinese)

#### 作者简介:

张礼学 男, 博士研究生. 主要研究方向: 临近空间飞行器性能评估。

Tel: 0731-84576482

E-mail: zhanglixue1014@163.com

王中伟 男, 博士, 教授, 博士生导师. 主要研究方向: 飞行器总体设计与论证评估。

Tel: 0731-84576482

E-mail: wang\_zhwei2001@163.com

## Environmental Adaptability Evaluation Model for Stratospheric Airships

ZHANG Lixue, WANG Zhongwei <sup>\*</sup>

*College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*

**Abstract:** In this paper, the environmental characteristics of the stratosphere, especially the 20 km height stratosphere, is described, and the influence of diversified environmental factor to performance of stratospheric airships which should have the ability that reside there for a long time is analyzed. On this basis, a stratospheric airship environmental adaptability evaluation index system is developed. In view of the large differences existing in the magnitude and physical meaning of the attribute indices about stratospheric airships' conceptual design performance evaluation, a comprehensive evaluation model which combines physical programming and analytic hierarchy process is proposed. Finally, a real example is provided. The example and analysis of the results show that resisting wind speed allowance and energy generation exhaust ratio play a crucial role in the environmental adaptability capacity evaluation of stratospheric airships. They should receive more attention during airship conceptual design and argumentation.

**Key words:** stratospheric airship; environmental adaptability; physical programming; analytic hierarchy process; evaluation model; concept design