

环境及其效应

高空长航时无人机工作环境特性

李德勇, 甘建, 甘学东, 张庆茂

(中国航空工业集团公司 成都飞机设计研究所, 成都 610091)

摘要: 对世界上具有代表性的长航时无人机的升限和续航时间两个主要性能进行整理和归纳, 并对其中两种典型飞机进行了简单介绍。建立在标准大气模型的基础上, 忽略地区性、昼行性、季节性的波动和纬度的影响, 以海拔高度作为变量, 整理了气温、气压、太阳辐射三个环境参数的计算方法。在国内选出涵盖沿海、高原、沙漠、平原等多种地形地貌, 以及不同海拔高度的五个地区。对这个五个地区的大气环境和太阳辐射进行调研, 以获取具有代表性的典型地面-高空环境特点, 并对这五个地区的温度、湿度、辐射在不同高度的数据进行了分析, 各环境参数均表现出了明显的周期性和地区差异。

关键词: 长航时无人机; 不同高度; 气温; 湿度; 太阳辐射

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.12.016

中图分类号: TG142.71 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)12-0099-05

Work Environmental Characteristics of High Altitude Long Endurance UAV

LI De-yong, GAN Jian, GAN Xue-dong, ZHANG Qing-mao

(Chengdu Aircraft Design Institute of China Aviation Industry Group Corporation, Chengdu 610091, China)

ABSTRACT: In this paper, the lift and endurance of the world's representative long-endurance UAV were sorted out and summarized, and two typical aircraft were briefly introduced. Based on the standard atmospheric model, neglecting the influence of regional, diurnal, seasonal fluctuations and latitude, and taking altitude as a variable, the calculation methods of three environmental parameters, namely temperature, air pressure and solar radiation, were sorted out. Five areas covering coast, plateau, desert, plain and other topographic features, as well as different altitudes, have been selected in china. The atmospheric environment and solar radiation in these five regions were investigated to obtain representative surface-altitude environmental characteristics. The data on temperature, humidity and radiation at different heights in these five regions were analyzed. The environmental parameters show obvious periodicity and regional differences.

KEY WORDS: long-endurance UAV; different heights; air temperature; humidity; solar radiation

1 高空长航时无人机

长航时无人机有“大气层人造卫星”之称, 可执行巡逻搜救、情报侦察、军事打击等多项任务, 同时规避了卫星易被气候干扰的缺点, 在性能上具有无可替代的优势, 位列国家重点研发计划^[1]。目前, 世界上正在进行无人机研发的国家有 40 多个, 我国自 20

世纪 60 年代踏入无人机领域以来, 虽然已经具备了自主研发能力, 但在性能指标上仍然不及美国、英国、以色列等国家。

高空长航时无人机一般具有很大的展弦比和较大的机翼面积, 其中具有代表性的有美国的“全球观察者”、“全球鹰”、“复仇者”等, 英国的“螳螂”和“西风”系列等, 以及中国的“翔龙”、“翼龙”无人

收稿日期: 2019-06-01; 修订日期: 2019-07-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51201157); 国防科技工业技术基础科研项目(JSHS2015205C002)

作者简介: 李德勇(1985—), 男, 安徽人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为飞行器结构设计、复合材料设计等。

机^[2]等。各国无人机的续航时间和升限如图1所示。高空大气环境和太阳辐射直接影响无人机的气动结构设计。高空大气环境包括：温度、湿度以及大气对流等。温度、湿度以及太阳辐射影响无人机结构选材，直接决定材料的使用环境、耐温耐湿性能以及腐蚀环境等。大气对流影响无人机气动设计，无人机初步气动设计时，应考虑其所处的飞行高度带来的影响因素。建立和完善相关基础数据，对于我国高空长航时无人机的设计具有重大意义^[3]。

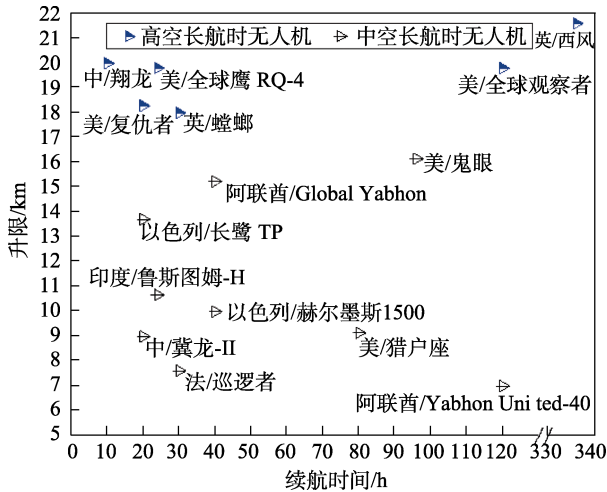


图1 国内外先进无人机

1.1 美国“全球鹰”无人机

“全球鹰”无人机系统是目前世界上技术最先进、应用最成熟的高空长航时无人侦察机系统。“全球鹰”是由诺斯洛普 格鲁门生产制造的无人飞机(如图2所示)，其巡航高度可达19 800 m，可以在5500 km外的目标区滞空24 h，实行全天候的侦察任务。为了满足这样的性能指标，飞机起飞质量达到了11 635 kg，其中燃料约6600 kg，载油系数相当高。飞机采用大展弦比的直机翼(翼展达35.4 m)，为了兼顾低可探测性的要求，飞机采用了V型尾翼和背负式进气道^[4]。



机身长	13.51 m
翼展	35.4 m
空重	3850 kg
全重	11635 kg
最大速度	650 km/h
实用升限	20 km

图2 “全球鹰”无人机

1.2 英国“蜻蜓”无人机

“蜻蜓”无人机项目主要由英国宇航系统公司、通用航空公司、梅洁特公司、劳斯莱斯公司和赛莱克斯伽利略公司等联合研制的，如图3所示。其机身长

约19.8 m，翼展21.34 m，具有大展弦比平直机翼和T型尾翼，2009年10月首次试飞，执行任务时预期主要在18 km以上的高空飞行，续航时间为30 h。蜻蜓的所有设备都安装在机体内，隐形能力极强，其研发重点被放在了情报、监视、侦察和军事打击等方面^[5]。



机身长	19.8 m
翼展	21.34 m
空重	1000 kg
全重	9000 kg
巡航速度	370 km/h
最大速度	556 km/h
实用升限	18 km

图3 “蜻蜓”无人机

2 高空环境特性

2.1 环境参数计算

长航时无人机多采用复合材料，质量轻，力学性能和抗疲劳性能好，但考虑到其特殊的工作环境，在应用中仍存在一些不足。包括环境湿度变化引起的材料吸湿膨胀、温度变化引起的界面结合力下降、以及辐射作用下材料分解失效等^[6]。因此，对湿度、温度、辐照等无人机工作的环境特性进行综合分析，对于考核机体复合材料的性能是很有必要的。

标准大气模型是校准飞行仪表和分析飞行器性能的基础，模型假设大气层中各种成分均匀混合，同一高度的大气分子浓度和大气层密度相同，并忽略地区性、昼行性、季节性的波动和纬度的影响^[7]。由此可得到部分参数的垂直分布经验公式^[8]：

$$T(z) = \begin{cases} 288.15 - 6.5z & 0 \leq z \leq 11 \\ 216.65 & 11 \leq z \leq 20 \\ 216.65 + (z - 20) & 20 \leq z \leq 32 \\ 250.35 \times \frac{z + 49.6608}{89.4107} & 32 \leq z \leq 100 \end{cases}$$

式中：T(z)为大气温度，K；z为海拔高度，km。

$$P(z) = \begin{cases} P_0 \left(1 - \frac{a}{T_0} z \right)^{\frac{mg}{aR}} & z < 11 \\ P_{11} e^{-\frac{mg}{RT_{11}}(z-11)} & 11 \leq z \leq 20 \end{cases}$$

式中：P(z)为大气压力，Pa；P₀为海平面大气压力，P₀=1.013×10⁵ Pa；P₁₁为海拔11 km处的大气压力，P₁₁=22631.8 Pa；m为空气平均分子质量，m=28.97 g/mol；R为气体常数，R=8.3144 J/(K·mol)；g为重力加速度，g=9.81 m/s²；a=0.06 K/km。

$$S_{\varphi,h} = S_0 f_e \frac{CD(h)}{\cos \varphi}$$

式中：S_{φ,h}为天顶角φ、海拔高度h处的太阳辐

射强度； S_0 为太阳常数，取 $S_0=1353 \text{ W/m}^2$ ； f 为距离修正系数，与日地距离有关，计算中取 1； C 为波长影响吸收系数； $D(h)$ 为海拔高度影响吸收系数， $D(h)=\rho_h/\rho_0$ 。其中，太阳辐射的计算采用曾理^[9]论文中的方法，利用大气透明度确定波长影响吸收系数 C 。

2.2 实测数据分析

在全国范围内选出涵盖沿海、高原、沙漠、平原等多种地形地貌，海拔高度各不相同，且跨越多个气候区的五个地区——新疆库车、西藏拉萨、陕西西安、贵州贵阳、海南海口。对大气和辐射环境特点进行调研，以获取具有代表性的典型地面-高空环境特点分析结果。

通过计算可知，70、50 hPa 对应海拔高度分别为 18.438、20.570 km，对应温度分别为 -56.50 、 $-55.93 \text{ }^\circ\text{C}$ 。检索气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 可以获得某地区地面湿度和辐射、温度、等压面位势高度等气象数据，分别就各选定地区的地面、70、50 hPa 高空数据进行分析。对于资料不完整的年份不作统计，由于站址迁移、人工观测、仪器观测以及仪器本身质量问题引起的误差均未得到处理。对于没有设立气象观测站的地区，就近选用其他站点数据替代。若忽略观测站点与选定地区之间经纬度和海拔高度的差异，可近似用其代替选定站点的环境特性。

五个地区月平均温度在一年中均先增后减，月平均温度在 7 月份左右达到最高值，1 月份左右最低，如图 1 所示。库车、西安和贵阳地区月平均气温最高值均在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右，而最低值略有差异，西安最低气温在 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右，库车可达到 $-7 \text{ }^\circ\text{C}$ ，而贵阳月平均气温始终不低于 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。拉萨和海口两地气温变化较为和缓，拉萨月平均气温最高不超过 $14 \text{ }^\circ\text{C}$ ，最低约 $-3 \text{ }^\circ\text{C}$ ，而海口最低气温都在 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上，一年中月均值最大仅相差 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。

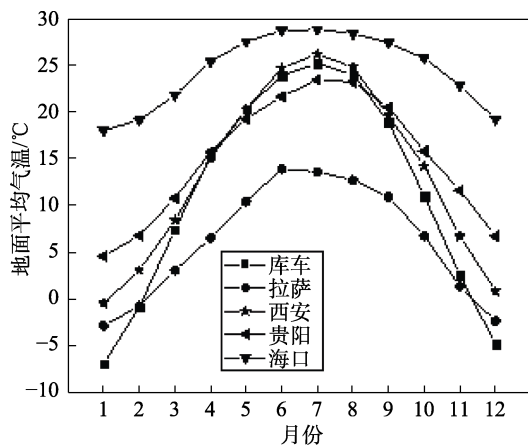


图 4 五个地区地面平均气温

相对湿度变化趋势则呈现出明显差异 (如图 5 所示)，贵阳、海口两地始终维持在较高水平，一年中变化不明显，海口相对湿度年均值约 83%，贵阳约 77%。库车相对湿度在 12 月份达到最高值 72%，随

后从 1 月份开始几乎呈直线型下降，下降速率较快，4 月份达到最低值 38%，之后再逐步上升。拉萨的相对湿度在冬季相对稳定，且维持在 30% 左右的较低值，但 3—7 月份骤升，在 8 月份达到最高值 69%，随后 9—11 月骤降，4 月份达到最低值 24%。西安相对湿度则在冬季和春季一直维持在较稳定的状态，在 65% 左右波动，6—9 月份可上升至 81%，再大幅度降低，到 12 月份恢复稳定水平。

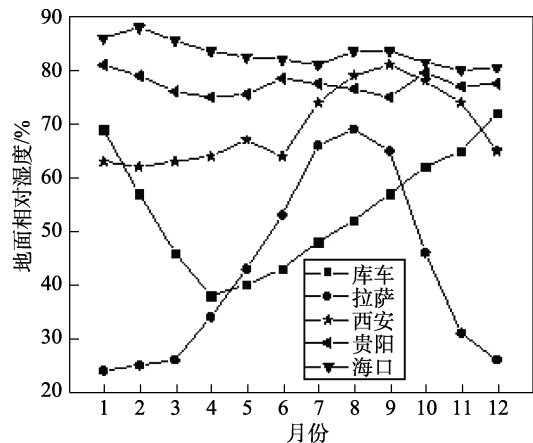


图 5 五个地区地面相对湿度

由于 20 km 左右的平流层臭氧浓度高，大量吸收太阳辐射而使空气升温，导致各地 50 hPa 高度层月平均气温始终高于 70 hPa 高度层，如图 6 所示。50 hPa 高度层气温变化幅度较小，更为稳定。同一地区高空月平均气温在一年中变化不大，最高相差 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右，但不同地区之间有较大差异。

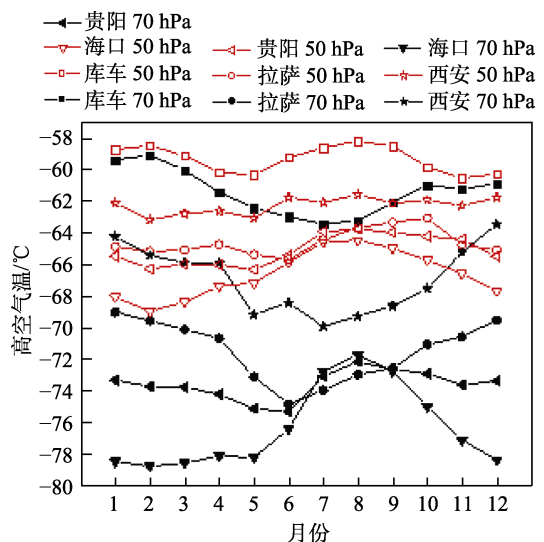


图 6 五个地区高空平均气温

总辐射看作仅由直接辐射和散射辐射两部分组成，库车站数据为 1971—1990 年统计值，其余四站点均取 1971—2000 年数据，如图 7 所示。拉萨地区全年辐射均处于较高水平，5 月份达到最高值 761.67 MJ/m^2 ，最低值也在 450 MJ/m^2 左右，直接辐射远大于散射辐射。库车地区一年中辐射变化范围在五个地区中最

大, 差值可达近 500 MJ/m^2 , 散射辐射和直接辐射大小相当。贵阳地区辐射在五个地区中最低, 最高月仅 456.26 MJ/m^2 , 且散射辐射占比更大。

五个地区各站点观测的地面气温、相对湿度、月总辐射和高空 70、50 hPa 温度的累年月值范围如图 8 所示, 可更直观地表现地区差异。拉萨地区地面气温和湿度都相对较低, 但辐射却最强, 平均月辐射达 600 MJ/m^2 。贵阳恰好相反, 平均气温和湿度处在较高水平, 尤其相对湿度值, 在一年中波动幅度很小, 始终在 77% 上下, 平均月辐射仅有拉萨的 1/2。海口地面气温和湿度都是五个地区中最高的, 平均月辐射约 400 MJ/m^2 , 且相对来说较为稳定。库车地区在一年中气温变化幅度最大, 最低气温在 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下, 最高超过 $30 \text{ }^\circ\text{C}$, 而且相对湿度平均仅约 52%。西安地

区无论是气温、湿度、还是辐射, 均处于中间水平。

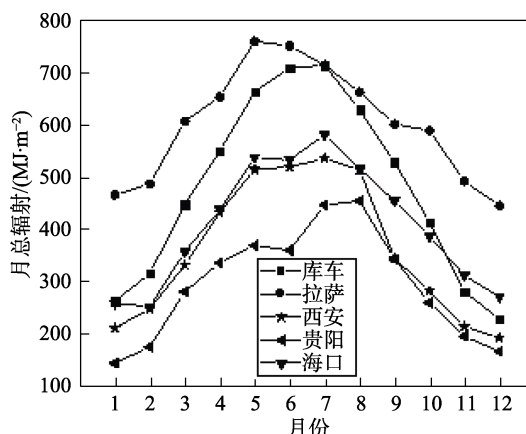


图 7 五个地区月总辐射

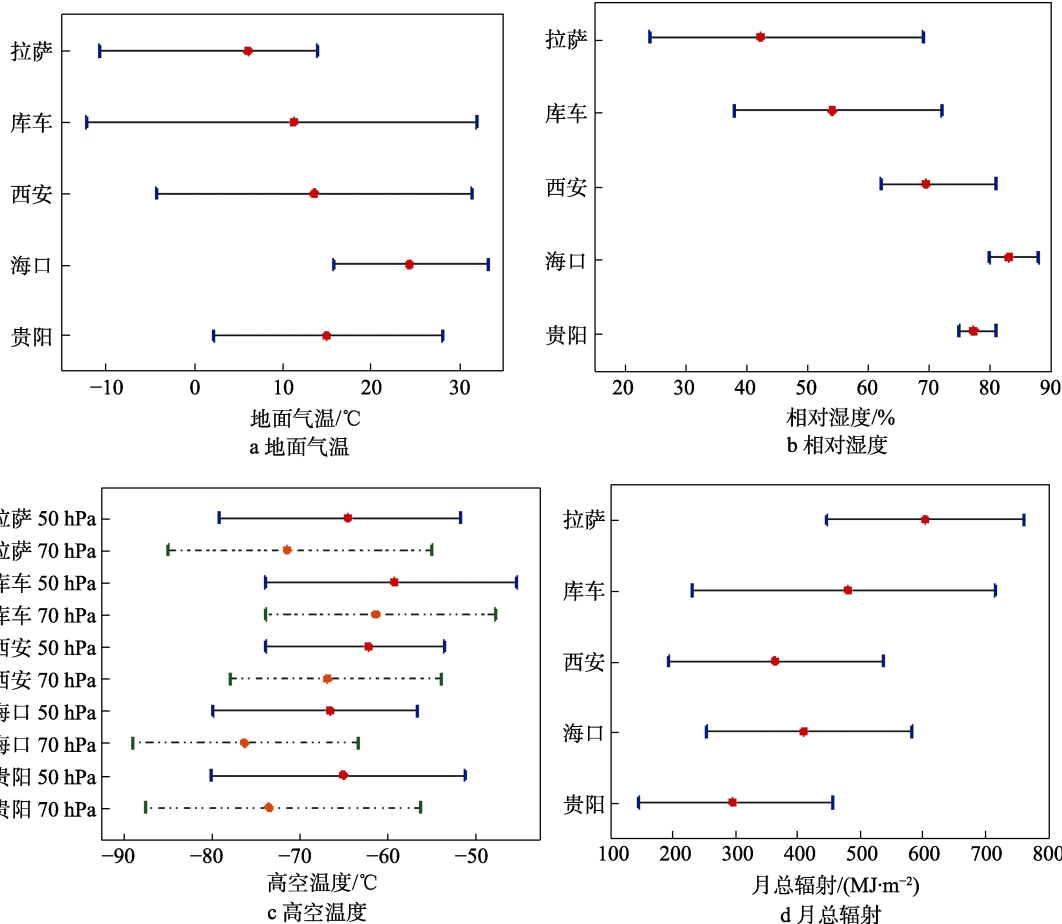


图 8 地面气温、相对湿度、月总辐射和高空 70、50 hPa 温度分布

对于高空环境, 各地区 70 hPa 高度气温始终低于 50 hPa, 差值因地区而异。在库车, 两高度层的气温差异几乎可以忽略, 而海口地区平均可相差 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。50 hPa 高度层气温平均值大致在 $-65 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 各地区相差不多, 70 hPa 高度气温的地区差异更明显。

至于无法直接测定的高空湿度和辐射, 前人已给出了研究成果或方法, 文中不再深入探讨。高慧^[10]利用露点温度计算了中国不同区域高空相对湿度, 发

现海拔高度越高, 相对湿度变化幅度越小, 且随季节和区域不同而呈现不同的变化趋势。我国中部和北部地区相对湿度随高度增加一直缓步下降, 而华南、西南地区在 500 hPa 以上高空会出现增长的情况。总体来看, 一年中的大部分时间, 各区域在 50~70 hPa 的高空相对湿度几乎均在 10% 到 20% 范围内。高空辐射目前还缺少权威性的计算方法, 可利用曾理整理的基于布格-朗伯定律的积分法, 或者经验模型的回归系

数法^[11-12]进行计算。

3 结论

将世界上代表性的长航时无人机的升限和续航时间两个主要性能进行了对比,并简单介绍了美国的“全球鹰”、英国的“螳螂”两种型号。除了无人机结构、材料等内部因素外,高空环境也是影响气动性能的重要外因。

整理了在标准大气模型的假设条件下,以海拔高度作为变量时,气温、气压、太阳辐射三个环境参数的计算方法。

选取新疆库车、西藏拉萨、陕西西安、贵州贵阳、海南海口五个地区数据进行分析。地面月平均温度在一年中均先增后减,月平均温度在 7 月份左右达到最高值,1 月份左右最低。贵阳、海口两靠南的地区相对湿度较高,且变化幅度很小,而其余三个地区湿度皆随时间表现出明显的波动。新疆地区的相对湿度在一年中先减后增,在 4 月达到最低值(不足 40%)。西藏和陕西地区的相对湿度在一年中先增后减,其中西藏的相对湿度在一年中变化较大,1 月份约为 24%,8 月份达到 69%。各地 50 hPa 高度层月平均气温始终高于 70 hPa 高度层,50 hPa 高度层气温更为稳定。同一地区高空月平均气温在一年中变化不大,但不同地区之间有较大差异。各地均在 5—8 月份辐射较强,地区差异明显,尤其拉萨全年辐射均处于较高水平,贵阳的辐射相对较低。

参考文献:

- [1] 姜坤. 无人机[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [2] 王强. 世界军用无人机图鉴[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- [3] 祝彬, 陈笑南, 范桃英. 国外超高空长航时无人机发展分析[J]. 中国航天, 2013(11): 28-32.
- [4] 季晓光, 李屹东. 美国高空长航时无人机[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
- [5] 阿雯, 魏国福. BAE 系统公司展示螳螂无人机[J]. 飞航导弹, 2009(5): 26.
- [6] 骆晨, 刘明, 张艺莹, 等. 环境因素对长航时无人机机体结构复合材料的影响[J]. 装备环境工程, 2017, 14(11): 33-36.
- [7] 迪斯頓. 飞机及其环境的建模与仿真[M]. 北京: 航空工业出版社, 2015. 4: 219-229.
- [8] 张敏. 平流层飞艇温度及红外辐射特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [9] 曾理. 关于不同海拔的太阳辐射计算[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [10] 高慧, 翁宁泉, 孙刚, 等. 我国不同区域高空温度和相对湿度的分布特征[J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(2): 101-107.
- [11] ELAGIB N, MANSELL M G. New Approaches for Estimating Global Solarradiation Across Sudan[J]. Energy Conversion and Management, 2000, 41: 419-434.
- [12] ANNANDALE J G, JOVANIC N Z, BENADE N, et al. Software Formissing Data Error Analysis of Penman-Monteith Reference Evapotranspiration[J]. Irrigation Science, 2002, 21: 57-67.