航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Apr. 25 2020 Vol. 31 No.04 14-20

高空长航时太阳能无人机的技术挑战

张健*，王江三，耿延升，郭润兆
航空工业第一飞机设计研究院，陕西 西安 710089

摘 要： 高空长航时太阳能无人机的基本工作原理、使命任务和使用环境等与常规动力飞机不同，具有巡航高度高、续航时间长、外形尺寸大、飞机翼载小、飞行剖面简单和绿色环保等特点，适于执行侦察监视、大气监测和通信中继等军民用任务。本文结合某大型太阳能无人机的工程研制，从太阳能电池转换效率、蓄电池性能、太阳能飞机多学科优化设计、低雷诺数气动力设计与试验、复合材料设计与制造、大展弦比机翼非线性气动弹性设计、高效动力系统集成、大尺寸柔性翼飞机飞行控制系统设计、临近空间环境适应性等多个方面剖析了高空长航时太阳能无人机研制面临的技术挑战。

关键词： 临近空间飞行器；高空长航时太阳能无人机；太阳能电池；蓄电池；关键技术；技术挑战

中图分类号： V272 **文献标识码：** A **DOI：** 10.19452/j.issn1007-5453.2020.04.003

临近空间是指高于普通航空器飞行高度、而低于轨道飞行器运行空间的区域，一般将距地面20～100km的空域视为临近空间。太阳能无人机是以太阳辐射为能源的电动飞行器，为了充分利用太阳能，减小不利的大气流动影响，更好地执行侦察监视等任务，太阳能无人机通常在20km左右的临近空间飞行[1]。高空长航时太阳能无人机具有续航时间长、飞行高度高、使用灵活和无环境污染等特点，因此成为执行情报、侦察、监视、通信中继和大气科学研究等任务的理想空中平台[2]。开展高空长航时太阳能无人机研究，突破各项关键技术，不仅可以带动相关领域技术长足发展，而且有助于快速推出太阳能无人机产品，占领新能源飞机军民用市场。

1 太阳能无人机研究发展现状

1974年11月4日，世界上第一架太阳能飞机Sunrise I在4096块太阳能电池的驱动下缓缓离开地面，持续飞行了20min，标志着太阳能飞行时代的来临。

Helios系列太阳能无人机[3]由美国航空环境公司研制，其发展经历了Pathfinder、Pathfinder Plus、Centurion、Helios等多个阶段。Pathfinder从1983年开始试飞，在1997年创新了21802m的飞行高度纪录。Pathfinder Plus在飞行中携带30.8kg模拟任务载荷续航15h，最大飞行高度达到24475m。Centurion作为太阳能技术验证机，能够携带45kg的遥测传感器和设备飞到24400m高度执行地球环境研究任务。Helios于1999年首飞，2001年在太平洋上空达到25300m飞行高度，2003年在夏威夷上空试飞时因发生严重的俯仰振荡而解体。

Solar Impulse太阳能飞机[4]是目前世界上最成功的有人驾驶太阳能飞机，该项目由Bertrand Piccard和Andre Borschberg等牵头设计开发，2003年在多家公司和欧洲航天局的支持下Solar Impulse正式启动，Solar Impulse 1是早期的验证机，采用大展弦比正常式布局，翼下吊挂4台10hp电机并配套两叶螺旋桨，4个锂聚合物电池组安装在短舱内。Solar Impulse 2于2011年开始研制，翼展72m，起飞重量（质量）2300kg。2013年完成设计生产，2014年6月实现首飞。2015年3月9日从阿联酋首都阿布扎比起飞，2016年7月26日返回并降落在阿布扎比机场，完成人类首次太阳能飞机环球飞行。

Zephyr系列太阳能无人机[5]由英国Qenitiq公司研制，

收稿日期：2019-12-30；退修日期：2020-01-19；录用日期：2020-02-20
*通信作者. Tel.：029-86832389 E-mail：zhangjian_aircraft@163.com
引用格式：Zhang Jian，Wang Jiangsan，Geng Yansheng，et al. Technology challenges for high altitude long endurance solar powered UAV [J]. Aeronautical Science & Technology，2020，31(04)：14-20. 张健，王江三，耿延升，等. 高空长航时太阳能无人机的技术挑战[J]. 航空科学技术，2020，31(04)：14-20.

后来该公司被空中客车公司收购。2010年7月9日，Zephyr-7从美国亚利桑那州起飞，创造了太阳能动力飞行高度21561m并持续留空14天的无人机飞行纪录。2018年7月11日，Zephyr-S连续飞行25天23h57min，白天的飞行高度达22500m，夜晚飞行高度超过15200m，创造了飞行时间和飞行高度的新纪录。英国国防部成为首个防务客户并订购了三架Zephyr-S，两架于2016年2月订购，总价值为1060万英镑，8月份又增加了一架，使合同总价值达到了1300万英镑。它们将成为运营概念演示的一部分，由英国军方和其他政府部门评估Zephyr的能力和潜力。

在美国DARPA的领导下，波音和Qenitiq公司负责飞机方案设计的团队赢得了Vulture计划的第二阶段合同，开展翼展达122m的Solar Eagle无人机研制。根据合同要求，Solar Eagle的巡航高度指标为19810～27432m，可携带454kg任务载荷，并且能够为任务载荷提供5kW的电能，实现5年的持续留空。

Google收购了美国Titan Aerospace公司，使用Solara系列无人机实施其网络覆盖计划。Solara 50太阳能无人机的飞行重量为158.9kg，可携带约32kg的载荷，翼展为50m，机长15.5m，飞行高度目标是达到65000ft以上。2015年5月1日Solara 50在试飞时坠毁，整个飞行过程仅仅持续了4min。

Facebook提出使用太阳能无人机在全球范围内提供互联网高速连接的Aquila项目，用1000架左右的无人机实现全球间的高速互联网连接。Facebook为此收购了Ascenta无人机公司，进行18000～27000m高度可持续飞行三个月的太阳能无人机研制。Aquila翼展43m，装载4个电机，重量454kg，在工作的时候需要先由氦气球带到平流层，白天飞行高度27432m以吸收和储存太阳能，夜晚则降到18288m以节省功耗。Aquila首飞时间超过90min，但飞机在着陆时发生严重事故，导致机体出现结构性故障。后来Facebook发布声明停止设计制造太阳能无人机，声称以后只和合作伙伴开发类似技术。

极光飞行科学公司正在波音的支持下建造大型太阳能无人机Odysseus，其翼展达74m，设计续航时间三个月，该机目前正在进行地面测试。Odysseus采用了更为简洁的设计：有三个尾翼和6个螺旋桨；全动垂直和水平尾翼安装在三个机身上，分别提供俯仰和偏航控制；机翼上没有滚转控制面，外侧的两个尾翼会使机翼弯曲以控制滚转；采用锂–聚合物电池和薄膜砷化镓光伏电池。

国内航天科技集团公司第十一研究院从事太阳能无人机研究10余年，其间成功突破了总体、气动、结构、飞行控制、能源和推进系统等关键技术，通过技术验证及大量试验，验证了系统设计和集成技术，掌握了剧烈垂直气流变化、大强度水平风等多种风场条件下的自主稳定飞行技术。据报道其翼展45m的验证机已经飞到20000m高度。该无人机采用大展弦比常规布局，双垂尾，翼吊8台电机驱动的螺旋桨。

2 高空长航时太阳能无人机的特点

高空长航时太阳能无人机完全依赖太阳能飞行和执行任务，其工作原理完全不同于常规动力无人机，而且由于其临近空间的使用环境也不同于普通的航空器，因此在技术和使用上呈现出多种独有的特点。

(1) 飞行高度高

高空长航时太阳能无人机主要在临近空间飞行，原因首先是高空太阳辐射受地球大气影响小，其次是平流层有利于飞机稳定飞行，最后高空有利于侦察监视等任务设备发挥作用。

(2) 续航时间长

理论上讲，如果太阳能无人机白天存储的能量超过夜晚全机能量使用需求，那么就可以持续不断地长时间飞行，其工作时间的长短仅受限于结构、设备和电池等的寿命和可靠性。也就是说太阳能无人机一旦实现了跨昼夜飞行，随着机载设备可靠性水平的提高，太阳能无人机的工作时间会越来越长。

(3) 机体尺寸大

高空长航时太阳能无人机一般用于执行侦察监视等任务，为了满足飞机飞行和任务系统越来越高的功率需求，需要在飞机表面铺设大面积的太阳能电池，导致飞机的尺寸越来越大。以Zephyr系列[5]无人机为例，Zephyr-4翼展12m；Zephyr-6翼展18m；Zephyr-7翼展22.5m，Zephyr-8翼展25m，机体尺寸越来越大。

(4) 翼载小

统计数据表明，滑翔机的起飞翼载通常在30kg/m^{2}左右，通用航空飞机的起飞翼载在100kg/m^{2}左右，双发涡桨飞机的起飞翼载在200kg/m^{2}左右，喷气式战斗机的起飞翼载在350kg/m^{2}以上，轰炸机的起飞翼载在500kg/m^{2}以上[6]。相比之下，太阳能无人机的翼载非常小。表1为几种太阳能无人机的翼载，可以看出飞机的起飞翼载均在10kg/m^{2}以下。这是因为只有翼载非常小，才能确保获得的太阳能足以支持飞机飞行和任务载荷使用。

(5) 飞行剖面简单

表1 几种太阳能无人机的翼载[7]

Table 1 Wing load of several solar powered UAV

无人机型号	Zephyr	Pathfinder	Centurion	Helios
翼载/(kg/m²)	0.6	3.4	5.3	4.9

高空长航时太阳能无人机飞行典型剖面如图1所示。白天爬升到较高的高度平飞巡航,以便充分地利用太阳光,同时增加飞机的势能。到了午后太阳辐射强度不能维持高空平飞时,巡航高度逐渐下降,下滑过程中动力系统基本不消耗或消耗很少的能量。到了晚上没有太阳光时,飞机在较低高度巡航平飞,以便节省能量。理想情况下,高空长航时太阳能无人机白天和晚上都可在同一高度巡航,因此与常规飞机可适应多个巡航高度的飞行剖面相比,其飞行剖面相对简单。

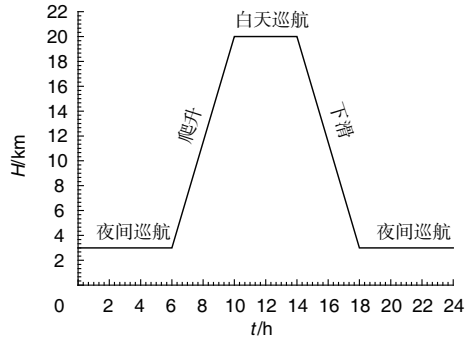

图1 太阳能无人机典型飞行剖面

Fig.1 Typical flight profile of solar-powered UAV

(6) 使用灵活方便

卫星只能在特定的轨道上运行,因此一颗卫星仅能监视覆盖特定运行轨道所能覆盖的区域。高空长航时太阳能无人机的使用不受区域、地形、气候和时间等因素的限制,随时可以起飞,到指定区域上空长时间执行任务,特别适用于在交通不发达地区构建通信网络,或在海洋上空执行长期监视和侦察任务。

(7) 绿色环保

太阳能是可持续使用的清洁能源,取之不尽,用之不竭,而且太阳能无人机在飞行中不消耗燃料,没有可造成大气污染的排放物,因而其环保特性优异,符合绿色航空发展方向。

3 多专业领域的技术挑战

尽管高空长航时太阳能无人机已历经半个世纪的发展,但是到目前为止仍未实现工程应用。主要原因在于高空长航时太阳能无人机的研制覆盖太阳能电池、蓄电池、飞行器设计、气动力设计和试验、结构强度、复合材料设计与制造、动力系统、航电系统、飞行控制系统、电气系统、能源综合管理系统、环境适应性、飞行试验和任务载荷等多个领域,其研制技术复杂,难度大,面临方方面面的技术挑战。

3.1 太阳能光伏电池转换效率

太阳能光伏电池的性能,尤其是转换效率,是决定太阳能无人机性能的决定性因素之一[8]。太阳能光伏电池按基体材料的不同分为硅太阳能电池、化合物太阳能电池和有机太阳能电池。美国国家可再生能源实验室统计得到的各种不同类型太阳能电池转换效率的技术进步历程如图2所示,可以看出近20年来太阳能电池的效率快速提升。

硅太阳能电池是目前应用最多的太阳能电池,包括单晶硅、多晶硅、非晶硅电池等。单晶硅太阳能电池的性能稳定,目前规模化生产的商品电池转换效率达16%~18%。多晶硅的转换效率比单晶硅电池略低,可达15%~17%。非晶硅太阳能电池效率低,规模化生产的商品电池转换效率多在5%~8%。

化合物太阳能电池是指以化合物半导体材料制成的太阳能电池,主要有单晶和多晶化合物太阳能电池。单晶化合物太阳能电池主要有砷化镓太阳能电池,转换效率最高超过30%,但价格昂贵。多晶化合物太阳能电池的类型很多,目前应用的主要有碲化镉太阳能电池、铜铟镓硒太阳能电池等。碲化镉太阳能电池转换效率已经超过16%,铜铟镓硒太阳能电池的实验室效率已接近20%。

有机太阳能电池包括有机半导体系和染料敏化系太阳能电池。用有机半导体材料制成的太阳能电池成本低,但光电转换效率低,稳定性差,还未进入实际应用。染料敏化系太阳能电池同样处于研究阶段。

高空长航时太阳能无人机对太阳能光伏电池的要求不仅是高的转化效率,还要求电池具有良好的物理特性,如耐高低温、耐辐射、耐腐蚀和可靠性高等。同时为了保证铺贴后不影响机翼的气动效率,太阳能电池不仅要保证与飞机蒙皮共形,而且要保证在机翼受力变形后与蒙皮紧密贴合,所以太阳能电池的柔韧性也至关重要。

3.2 蓄电池能量密度

储能电池的性能是影响太阳能无人机技术水平的另一个决定性因素。为了满足太阳能无人机夜间飞行和任务系统工作需求,提高储能电池的能量密度是一直以来追求的目标。

虽然蓄电池的种类多种多样,其性能也各有千秋,见表2,但目前在太阳能飞机上应用最成熟的主要是锂电池。根

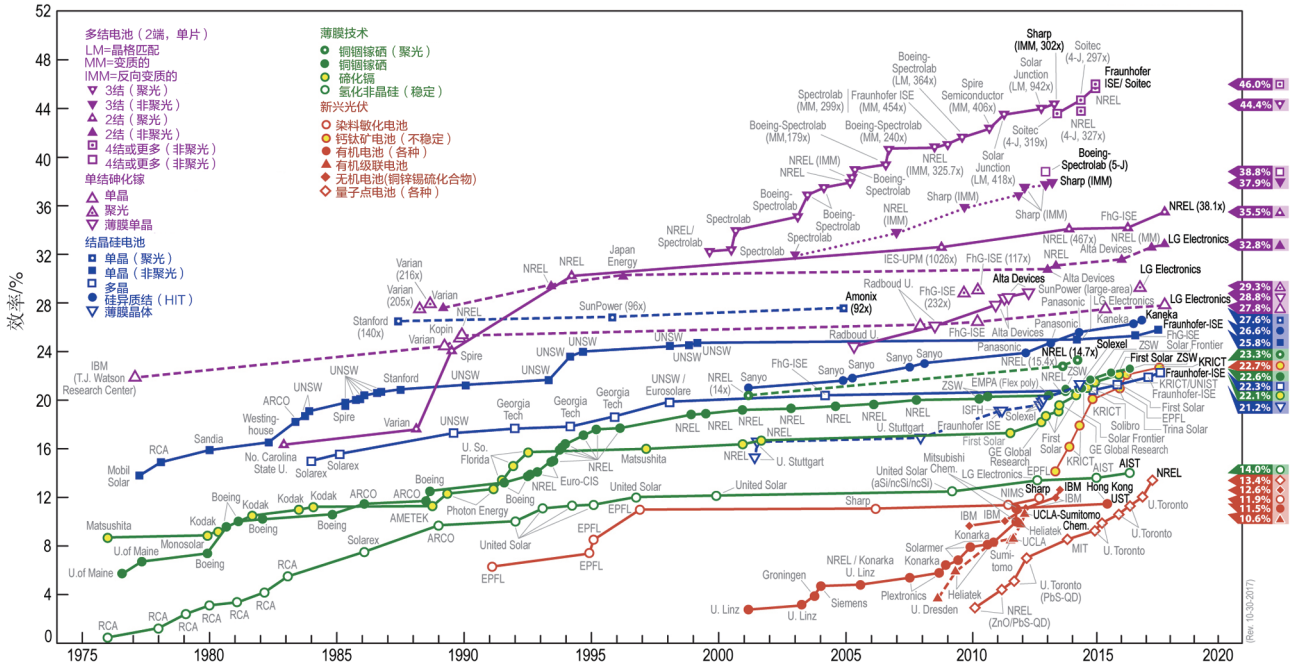

图2 光伏电池效率研究进展

Fig.2 Best research of cell efficiencies

据所使用的电解质材料的不同，锂电池可以分为液态锂离子电池和聚合物锂离子电池两大类。由于用固体电解质代替了液体电解质，与液态锂离子电池相比，聚合物锂离子电池不会产生漏液、燃烧爆炸等安全问题，而且具有形状可任意塑造的优点。另外，聚合物锂离子电池在工作电压、充放电循环寿命等方面都比液态锂离子电池更好。

表2 不同类型的蓄电池性能对比[9]

Table 2 Comparison between various types of energy storage systems

电池类型	钠硫电池	锂硫电池	锂离子电池	锂-钒电池
工作电压/V	2.1	2.5 ~ 1.7	3.7	3.7
能重比/(Wh/kg)	120 ~ 250	350 ~ 600	100 ~ 250	130 ~ 200
循环寿命/次	>2500	>100	400 ~ 1200	>1000
工作温度/℃	300 ~ 350	−60 ~ 60	−20~60	−20~60
自放电率/(%/月)	无	<15%	8% ~ 31%	5%

尽管目前锂电池的能量密度已经很高，但也只能满足太阳能无人机的基本要求，要得到高性能的高空长航时太阳能无人机，还需要大幅度提高锂电池的能量密度，同时还要解决循环次数和电池在临近空间使用的环境适应性问题。

3.3 太阳能无人机多学科综合优化设计

高空长航时太阳能无人机的研制涵盖了飞机总体设计、气动力设计和试验、结构设计、重量平衡与控制、全机及部件载荷计算、气动弹性设计与试验、新材料开发与应用、飞行控制、能源和动力技术以及任务载荷等多个学科，同时各个学科之间存在紧密的耦合关系，任何一个环节的变化都可能对飞机的整体性能产生影响。

例如，任务载荷重量(质量)和功耗影响总体设计参数，太阳能电池和蓄电池的性能影响全机的重量(质量)和性能，气动力设计和动力系统的效率关系到全机的能量需求，飞机的续航能力对重量(质量)又很敏感，材料性能影响飞机的重量(质量)和变形，大的结构变形又反过来影响到气动力，并可能产生严重的非线性气动弹性问题，变形和气动弹性问题又与飞控系统设计密切相关。因此，在高空长航时太阳能无人机研制过程中需要针对各学科之间较强的耦合关系，综合开展多学科优化设计，通过开发综合化的集成设计平台，提高设计质量。图3为典型太阳能无人机多学科优化设计流程图[10]，综合考虑了太阳能无人机的能量获取和使用、气动力、结构和动力系统等的综合影响。

3.4 低雷诺数气动力设计

根据高空长航时太阳能无人机巡航状态的平衡关系：

$$\frac{1}{2}\rho V^2 C_L S = W \tag{1}$$

$$\frac{1}{2}\rho V^2 C_D S = D \tag{2}$$

式中：ρ 为空气密度，V 为飞行速度，C_L 为升力系数，C_D 为阻

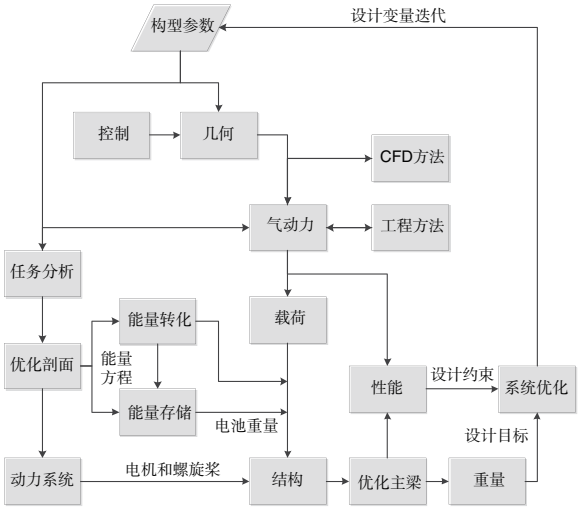

图3 多学科优化设计流程图

Fig.3 Multi-disciplinary optimization design chart

力系数，W为飞机重力，D为飞行阻力。

考虑巡航平飞状态动力系统的效率，有：

$$P=\frac{TV}{\eta}=\frac{DV}{\eta} \tag{3}$$

式中：P为电机功率；T为螺旋桨拉力，η为动力系统的效率。

通过式(1)~式(3)，可以得到太阳能无人机单位面积平飞需用功率：

$$\frac{P}{S}=\frac{C_D}{\sqrt{C_L^3}}\sqrt{\left(\frac{W}{S}\right)^3}\sqrt{\frac{2}{\rho}}/\eta \tag{4}$$

通过式(4)可以看出，为了降低高空长航时太阳能无人机在特定高度的平飞需用功率，一方面需要降低飞机的翼载，另一方面需要提高飞机的气动效率。如果全机气动效率降低，会导致平飞需用功率增大。因此高空长航时太阳能无人机气动力设计不仅需要解决低雷诺数下翼型绕流的转捩和层流分离等问题，而且需要采用综合优化设计技术。

高空长航时太阳能无人机飞行高度高、飞行速度低，飞行雷诺数很小[11]。小雷诺数情况下，气流边界层扰动小，机翼表面以层流为主。但这种低雷诺数下的层流是一种不稳定的流态，各种因素(如流动速度、流场波动、压强波动、物面粗糙度、逆压梯度和机体振动等)都可能产生翼面分离气泡堆积，导致流动分离。这种流动分离导致翼型前缘吸力峰减小，升力和升阻比降低，全机气动效率降低。导致飞行需用功率增大，因此气动力设计需要解决低雷诺数下翼型绕流的转捩和层流分离等问题，因此高空长航时太阳能无人机气动力设计需要采用优化设计技术，使翼面上维持更多的层流区域，并避免后缘可能产生的流动分离。

3.5 复合材料机体结构设计及制造技术

为了减轻重量并充分发挥材料的性能，高空超长航时太阳能无人机大量使用新型碳纤维、凯芙拉等高比强度和高比刚度的先进复合材料[12]。目前高空长航时太阳能无人机翼梁结构普遍采用管状/盒状复合材料梁、桁架肋，机身采用桁架结构(见图4)，表面覆盖由单层复合材料或高强度超薄聚碳酸酯薄膜封装的透明太阳能薄膜电池。

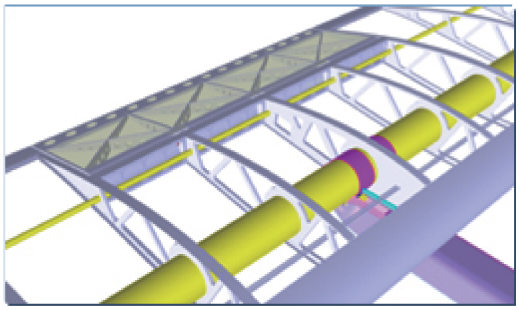

图4 复合材料圆管梁、桁架肋、蒙皮和短舱结构

Fig.4 Composite structure of spar, truss lib, skin and pylon

由于使用高性能的复合材料，工艺复杂，加之临近空间恶劣的使用环境和批量小，导致高空长航时太阳能无人机的制造成本非常高，因此面临降低成本的迫切需求。为此需要从选材、设计、工艺、制造等方面开展进一步研究。

3.6 大展弦比机翼非线性气动弹性

太阳能无人机一般采用大展弦比机翼，由于翼展较长，机翼结构柔性较大，容易出现气动弹性问题。静气动弹性的主要问题是弹性变形对升力分布影响大，会引起载荷的重新分布以及机翼的扭转发散等[13]。

大展弦比柔性机翼具有刚度低、变形大、颤振频率低、颤振速度低、结构模态耦合严重等特点。轻质大展弦比柔性机翼的气动特性和结构变形均呈现很强的非线性，建模和稳定性分析方法都与线性问题有着很大的不同。因此需要开展大展弦比柔性机翼非线性颤振分析和试验研究工作，避免Helios太阳能无人机在非线性气动力、弹性力和惯性力耦合作用下发生颤振而破坏的现象(见图5)。

3.7 大展弦比柔性机体飞控系统设计

大尺寸高空长航时太阳能无人机机体受力后变形很大，尤其是机翼的非线性变形产生的气动弹性效应显著减弱操纵面的操纵效率，甚至出现反效现象，威胁飞机安全。在飞控系统设计过程中，必须针对太阳能无人机的飞行速度低等特点开展控制律的设计，结合柔性飞机的本体特征开展新型控制策略研究，制定柔性飞机的控制准则，明确飞机的飞行边界，并利用多操纵面控制率重构技术等手段对

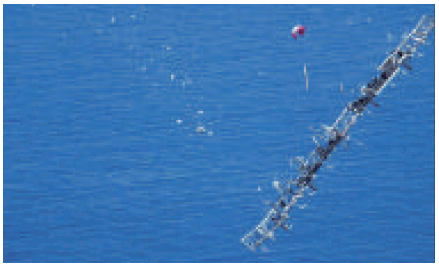

图5 Helios飞行中发生空中解体

Fig.5 Helios was destroyed in flight

飞行过程中可能遇到的问题进行考虑。

为了避免大功率电机的研制、减小动力装置的重量，并使之适合在轻质太阳能无人机体上安装，大型高空长航时太阳能无人机大多采用分布式动力装置，动力装置的数量最多可达10个以上。采用分布式动力装置需要从全机的气动布局、飞机的稳定性和控制等方面开展研究，使飞控系统、飞机构型以及动力装置实现一体化设计，例如，一定程度上实现主动控制技术在现代飞机设计上应用的目的。

3.8 轻质高效动力系统集成设计

高空长航时太阳能无人机的动力系统一般由电动机、减速器、螺旋桨和控制装置等组成。近年来出现的永磁直流无刷电机具有速度控制精度高、可靠性好、噪声小、寿命长等特点，在太阳能无人机上得到广泛应用。根据高空长航时太阳能无人机的使用特点，螺旋桨仍然是适合高空低速飞行的合适的动力系统配套装置。但随着飞行高度的增加，空气密度减小，导致螺旋桨效率变化较大，因此提高太阳能无人机巡航点的螺旋桨效率至关重要。

轻质高效的动力系统是太阳能无人机实现持续跨昼夜飞行的先决条件。太阳能无人机飞行高度高、速度慢，动力系统需要同时满足低转速、大扭矩、轻重量和高效率等设计条件，这要求在系统层面对电机、螺旋桨、电调和减速器等部件进行综合集成设计，使各部件之间合理匹配，整体最优。

3.9 临近空间环境适应性

临近空间的显著特点包括：空气相对稀薄；环境压力低；环境温度变化大；臭氧和太阳辐射强；20～40km高度平均风速较小。高空长航时太阳能无人机在平流层底部长时间巡航飞行，高空低气压、低温、太阳辐射、臭氧、宇宙射线等特殊使用环境，对高空长航时无人机提出新要求。随高度增加，大气压力逐渐降低，密度逐渐减小。低气压会对机体结构和机载设备产生一定影响。温度随飞行高度的增加而降低，低温几乎对所有的基体材料都有不利的影响。高空太阳辐射的热效应会产生热梯度并会产生不利影响，太阳辐射还会产生光化学效应，对装备造成一定的破坏，受影响最大的材料是非金属复合材料，包括塑料、橡胶、纺织品纤维等。臭氧含量在22～25km处达到极大值，臭氧有很强的氧化性，有可能导致无人机的部件和蒙皮材料变脆和加速老化，严重影响寿命，因此在设计时就必须充分考虑对臭氧的防护。高空的宇宙辐射强烈，这些高能中子穿透力强，会造成机载电子设备安全等级降级，影响无人机的使用，因此需要采取防护措施。

4 结束语

随着世界各国对环境保护的重视和新能源技术的发展，高空长航时太阳能无人机面临前所未有的发展机遇，但同时也面临着严峻的技术挑战。相信随着太阳能电池和蓄电池技术的发展，以及总体、气动、结构、强度和飞控等领域关键技术的突破，高空长航时太阳能无人机终将实现工程化。 AST

参考文献

[1] 张健，张德虎．高空长航时太阳能无人机总体设计要点分析[J]．航空学报，2016，37(S1):1-7.
Zhang Jian, Zhang Dehu. Essentials of configuration design of HALE solar powered UAVs[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2016,37(S1): 1-7. (in Chinese)

[2] 张德虎，张健，李军府．太阳能飞机能量平衡建模[J]．航空学报，2016，37(S1):16-23.
Zhang Dehu, Zhang Jian, Li Junfu. Energy balance modeling for solar powered aircrafts[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2016,37(S1): 16-23.(in Chinese)

[3] Noth A. Design of solar powered airplanes for continuous flight [D]. Suisse：Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne，2008.

[4] Najafi Y. Design of a high altitude long endurance solar powered UAV[D]. California：San Jose State University，2011.

[5] Rapinett A. Zephyr：A high altitude long endurance unmanned air vehicle[D]. England：University of Surrey，2009.

[6] Raymer D P. Aircraft design：a conceptual approach，fourth edition[M]. Virginia：AIAA Inc.，2006.

[7] Romeo G，Frulla G. HELIPLAT：Aerodynamic and structural analysis of HAVE solar powered platform[C]// AIAA's 1st Technical Conference and Workshop on Unmanned Aerospace

Vehicles. Virginia，2002：1-11.

[8] Camacho N. Improving operational effectiveness of tactical long endurance unmanned aerial systems by utilizing solar power[D].California：Naval Postgraduate School，2014.

[9] Chin K C. Extending the endurance，missions and capabilities of most UAVs using advanced flexible/rigid solar cells and new high power density batteries technology[D]. California：Naval Postgraduate School，2011.

[10] Morrisey B J. Multidisciplinary design optimization of an extreme aspect ratio HALE UAV[D]. California：California Polytechnic State University，2009.

[11] Montgomery S A. Design of a 5 kilogram solar powered unmanned airplane for perpetual solar endurance flight[D]. California：San Jose State University，2013.

[12] Symolon W E. High altitude，long endurance UAVs vs. satellites：potential benefits for U. S. army applications[D]. Massachusetts：Massachusetts Institute of Technology，2009.

[13] Kaszynski A A. X-HALE：the development of research platform for the validation of a research platform for the validation of nonlinear aeroelastic codes[D]. Ohio：Air Force Institute of Technology，2011. （责任编辑 陈东晓）

作者简介

张健（1970－ ）男，博士，研究员。主要研究方向：飞行器总体、气动力和无人机系统设计。

Tel: 029-86832389 E-mail：zhangjian_aircraft@163.com

王江三（1985－ ）男，硕士，高级工程师。主要研究方向：飞行器总体设计。

Tel:029-86832056

E-mail：wjs4292@163.com

Technology Challenges for High Altitude Long Endurance Solar Powered UAV

Zhang Jian*，Wang Jiangsan，Geng Yansheng，Guo Runzhao

AVIC The First Aircraft Institute，Xi'an 710089，China

Abstract: HALE solar powered UAV is different from other air vehicles in basic working principle, mission and operational environment. It has many advantages such as high altitude, long endurance, large size, low wing load, compact flight profile, and environment-friendliness, etc. HALE solar powered UAV may be used to execute surveillance and reconnaissance, the atmospheric science researches and telecommunication relay missions. Combined with the development of a certain solar powered aircraft, the technology challenges are analyzed in detail in terms of efficiency of solar cell, property of battery, multi-disciplinary optimization design, low Reynolds number aerodynamic design and test, light composite material structure design and fabrication, nonlinear aero-elastic analysis of flexible wing with high aspect ratio, propulsive efficiency improvement, flight control system design of solar powered UAV with large flexible wing and near-space environmental suitability.

Key Words: near-space air vehicle; HALE solar powered UAV; solar cell; battery; key technology; technology challenges

Received: 2019-12-30； **Revised:** 2020-01-19； **Accepted:** 2020-02-20

***Corresponding author.Tel.**：029-86832389 **E-mail**：zhangjian_aircraft@163.com