

临近空间超长航时太阳能无人机 发展及关键技术

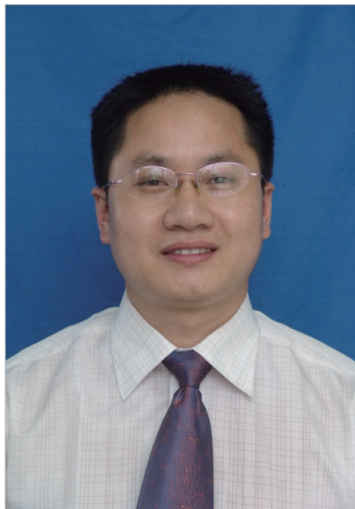
陶于金

(西北工业大学无人机研究所,西安 710065)

[摘要] 临近空间超长航时太阳能无人机是目前国际上研究的前沿方向,简述了目前国外临近空间太阳能无人机发展概况,梳理并分析了发展临近空间太阳能无人机亟待解决的关键技术,并对临近空间太阳能无人机的发展趋势进行了展望。

关键词: 临近空间; 超长航时; 太阳能无人机

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.18.026



陶于金

西北工业大学无人机所高级工程师,长期从事无人机发展规划、前瞻性无人机系统总体论证、无人机平台总体气动设计、无人机飞行仿真与飞行品质研究。

临近空间太阳能无人机(Near Space Solar Unmanned Aerial Vehicle)是以太阳能为能量来源、飞行高度20000m以上的电动无人飞行器。其

主要特点是:飞行高度高,位于大气平流层顶端,巡航作业不受天气和大气上下对流的影响;留空时间长,可进行长达数天甚至于数月、数年不间断飞行,作业覆盖区域广;可重复使用,可根据需要随时降落进行维修或更换有效载荷;效费比高,但其费用远低于在轨卫星;作业使用灵活,既可在指定区域长时间盘桓飞行作业,也可根据需要改变飞行航线以调整作业区域或远程自主航线作业;生存能力较强,其飞行高度超过一般战斗机和一般地面防空导弹的攻击范围,不易受到攻击。

临近空间太阳能无人机因其突出的优势而应用前景十分广阔。在民用领域,可进行临近空间大气研究、天气预测、环境及灾害监测、交通管制监测、互联网服务和电视服务等;在军用领域,可用于国界巡逻、战区侦察监视、通信中继、电子对抗等。不管是在军用领域还是在民用领域,临近空间太阳能无人机都有广阔的应用前景,被誉为“大气层卫星”^[1-2]。

太阳能飞机 / 临近空间超长航时太阳能无人机研究情况

从事太阳能飞机、临近空间太阳能无人机研究最早的国家是美国。美国在太阳能飞机方面的探索可追溯到20世纪70年代初,1974年11月4日世界上第一架用太阳能驱动的“Sunrise 1”在加州试飞成功,随后于1977年又发展了“Gossamer Condor”,1979年研制成功了“Gossamer Albatross”,1980年推出了“Gossamer Penguin”和“Solar Challenger”等。近年来,瑞士著名探险家皮卡德联合洛桑联邦理工学院(EPFL)招募90多名各领域顶尖专家成立了阳光动力核心技术团队,历时13年耗资1.6亿瑞士法郎(约1.6亿美元)建成了具备环球飞行能力的“阳光动力2号”太阳能飞机,其飞行高度为1500~8500m。因该飞机只能在中空飞行,受大气紊流影响较大,飞行安全性低,而且不具备真正意义上的长时间昼夜飞行能力,因此发展应用前景有限。

太阳能飞行器最有发展前景的应是临近空间超长航时无人机方向。在美国国家航空航天局(NASA)“环境研究与传感器技术 ERAST (Environmental Research Aircraft and Sensor Technology)”研究计划的推动下,美国国家航空航天局(NASA)和航空环境公司(Aero Vironment)开启了临近空间太阳能无人机的探索。当前,已经发展了四代^[1,3](如图1所示^[2]),其中第一代为“探路者(Pathfinder)”,第二代为“探路者+(Pathfinder plus)”,第三代为“百人队长(Centurion)”,第四代为“太阳神(Helios)”。“Helios”无人机翼展75.3m,弦长2.4384m,机翼面积183.576m²,空重599.6kg,总重928.973kg,载荷329.3kg,任务设备为45.36kg(30480m高空巡航4天)和272.16kg(21336m高空),推进系统为14台永磁无刷直流电机,每台电机额定输出功率1.47kW,驱动2叶直径为2.0m的宽弦层流定距高空螺旋桨。“Helios”无人机飞行高度已达到了30000m高空,远期目标是长达6个月的昼夜飞行^[2,4]。

鉴于临近空间超长航时太阳能无人机所具备的显著优势,世界著名信息领域企业高度重视其发展应用前景,其大力投入促进了太阳能无人机从探索走向实用化的进程。Facebook与谷歌公司目前正致力于设计巡航高度为20000m、设计巡航

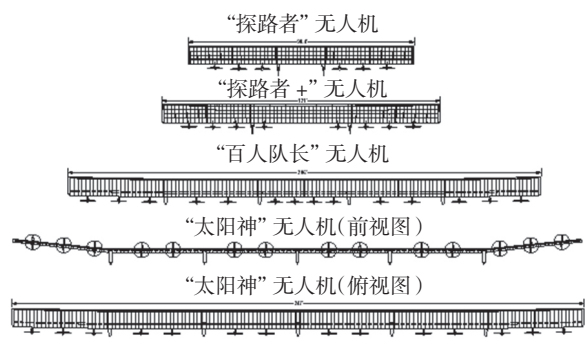


图1 NASA临近空间太阳能无人机系列示意图

Fig.1 Near space long voyage solar unmanned aerial vehicles of NASA

时间达数月之久的 Solara 系列无人机(如图2所示)发展,拟通过搭载通信设备,从天空向用户发射无线信号,从而构建覆盖全球的无线网络。欧洲空中客车防务与航天公司正在发展 Zephyr 系列太阳能无人机,在20000m高空连续飞行14天,创造了新的世界纪录。

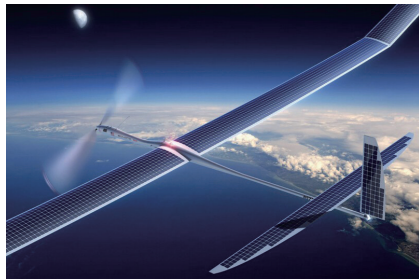


图2 谷歌公司Solara太阳能无人机
Fig.2 Solara solar unmanned aerial vehicles of Google company

早在20世纪90年代,北航、西工大、南航等高校就开始了太阳能无人机的持续探索。近年来,航天空气动力研究院大翼展、大展弦比“彩虹T4”太阳能无人机研究的持续进步,标志着我国临近空间超长航时太阳能无人机的研究取得实质性进展。

临近空间超长航时太阳能无人机关键技术与技术途径分析

从临近空间超长航时太阳能无人机的研究现状来看,虽然目前已经取得了相当的技术成果,积累了一定的经验,但总的来说,技术成熟度不够高,离真正实用化还有较大的距离,一些重大关键技术问题有待进一步突破与验证。

1 基于昼夜能量平衡的飞机总体设计技术

化石能源动力飞行器总体设计是气动、结构、动力、控制等要

素的综合设计。临近空间太阳能无人机的总体设计需综合的要素更多,且要深度耦合。如机翼面积不仅取决于气动性能要求,而且与需获取的太阳能密切相关,因此总体设计还必须综合太阳能能源、太阳能电池/储能系统重量与效率等因素。另外,为实现昼夜不间断长续航飞行,昼间太阳能电池所转换能量的一部分需储存起来,以满足夜间飞行能量的需要。能量平衡的定义如图3所示,其中 P_{sc}/S 表示单位面积太阳能电池输出的功率, P_{tot}/S 表示昼夜作业飞行需用功率平均到单位面积太阳能电池的功率, A_a 为单位面积太阳能电池昼间用于储存的能量, A_b 为夜间以及太阳能不足时无人机需用能量平均到单位面积太阳能电池的能量。

能量平衡需满足 $\eta_c A_a = 2A_b$ ^[5],其中, η_c 为储能系统储存能量与释放能量全流程的效率。能量平衡方程将吸收可用能量与昼夜需用能量关联起来,是气动、结构、动力、太阳能能源、太阳能电池、储能系统进行综合设计的基础。

基于昼夜能量平衡的飞机总体设计需建立气动、结构、动力、太阳能能源、储能等多学科优化软件平台,包括气动快速计算模块、结构重量计算模块、电机-螺旋桨匹配特性计算模块、各纬度/各高度/各季节太阳能计算模块、储能效率/重量计算模块、飞行性能快速评估模块、多参数优化软件模块以及各类基础数据库等,基于目前各专业领域近、中、远期可达的性能发展水平,根据载荷装载需要、飞行性能指标要求,应分解各学科设计要求,优化总体设计参数及飞行策略。

2 低湍流大气环境低雷诺数空气动力设计与试验技术

由于飞行高度高、速度低,临近空间太阳能无人机巡航飞行雷诺数约为 2.0×10^5 ,比普通飞行器低了约1~2个数量级,正好处于气

动力敏感雷诺数区域(如图4)。螺旋桨剖面当地雷诺数更低,只有 $2.0 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^4$,同时当地 Ma 达0.7以上,已临近跨音速区,气动压缩性效应较强。临近空间大气湍流速度很低,虽然对保持翼面层流有利,但翼面附面层稳定性较差,在较大升力系数巡航状态易发生急剧层流分离。

低湍流条件下高升力/高续航因子/失速特性和缓的低雷诺数翼型/机翼气动设计是传统气动领域的一个空白点和难点。传统的空气动力学研究主要集中在高速/高雷诺数区域,对低雷诺数的研究严重不足,目前在低雷诺数空气动力学领域还没有成熟的理论和工程经验可供使用或借鉴。针对常规飞行器所采用的气动计算方法与计算软件不适应低雷诺数翼型、机翼、螺

旋桨附面层转捩与分离的计算与预测,因此必须有针对性地发展、完善新的理论与方法。

低雷诺数气动理论设计与评估手段不足,风洞试验条件更加缺乏。为获取足够的气动升力与尽可能大的升阻比,临近空间太阳能无人机须采用超大翼展、超大展弦比机翼布局,因此通过缩比模型进行地面风洞试验模拟十分困难。另外,目前的常压风洞、增压风洞均以提高试验雷诺数为努力目标,然而,临近空间太阳能无人机对风洞试验的要求则正相反,需要模拟测试的是低湍流度、低雷诺数条件下的气动特性。对于超低雷诺数、高亚音速条件螺旋桨特性的测试,目前全世界尚没有一座风洞能满足此模拟条件要求,因而临近空间太阳能无人机及螺旋桨的空气动力特性验证需要发展新的思路与方法。为此,美国NASA积极探索利用气球升空的方式(如图5所示),研究、模拟、测试临近空间低湍流条件下的低雷诺数气动特性。

3 高效高可靠动力系统技术

临近空间太阳能无人机对动力系统设计要求高、难度大,为适应超长航时飞行的需要,动力系统必须具有很高的可靠性和效率。临近空间空气稀薄,动力电机散热将是一个十分棘手的问题,解决的办法主要有两个途径,一是采取多余度技术,即临近空间太阳能无人机一般采用多台电机分布式配置,以便在部分电机失效的情况下依然能维持飞机的动力及操纵与平衡的需求;二是最大限度地减少动力系统活动部件,如电机采用低转速/大扭矩稀土永磁无刷直流电机,电机与螺旋桨直接相连,而不用减速器及复杂的变距机构。

临近空间太阳能无人机飞行高度跨度大,在整个飞行过程中要经历爬升、加速飞行、巡航、下滑等多种状态,定距螺旋桨与各种飞行状态的电机输出功率、飞行速度匹配十分困难。解决这一问题的技术途径是,根据飞行速度的大小以及螺旋桨效率与螺旋桨功率匹配要求调节动力电机转速,动力电机采用多绕组设计以实现各种飞行状态螺旋桨功率与效率的匹配。

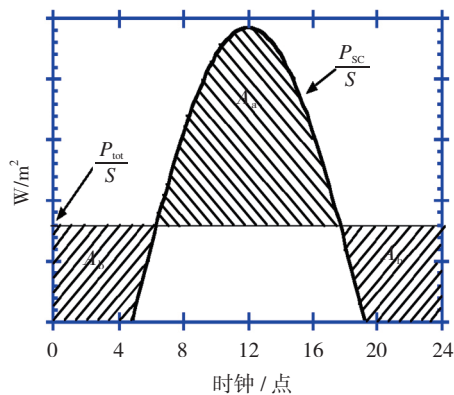


图3 昼夜能量平衡示意图

Fig.3 Energy balance diagram at day and night

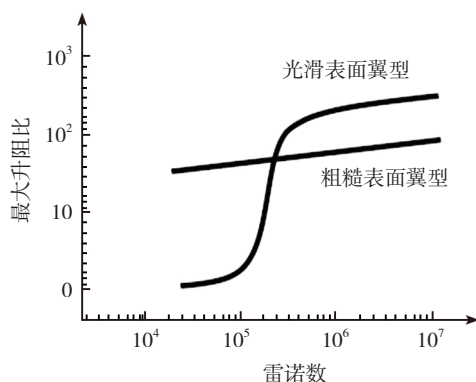


图4 升阻比随雷诺数变化的敏感区域示意图

Fig.4 Sensitive areas schematic of lift-to-drag ratio with Reynolds Number

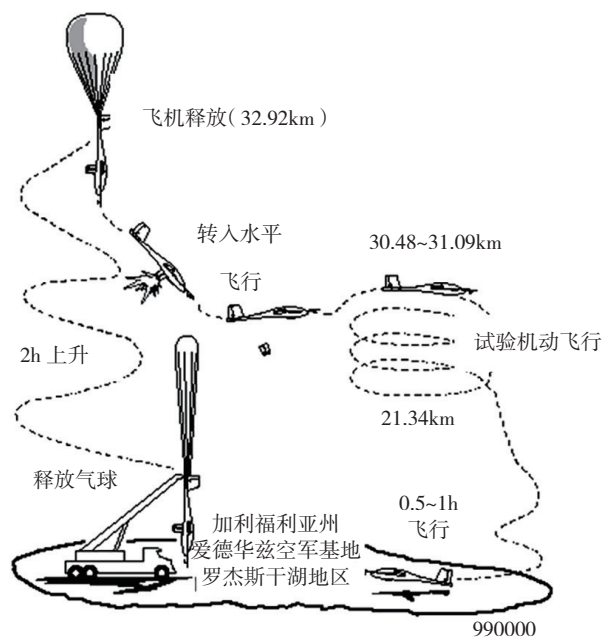


图5 低雷诺数气动特性空中验证示意图

Fig.5 Flight demonstration for aerodynamic characteristics at low Reynolds Number

4 高效率高密度高可靠能源系统技术

临近空间太阳能无人机的能源系统由太阳能电池阵列、储能系统、能源管理与分配系统组成,能量流程如图6所示^[6]。

飞机总体参数与太阳能电池阵列能源接收/转换效率密切相关,如机翼翼载、飞机功重比等参数。为了提高太阳能无人机性能水平,一方面作为基础性的太阳能电池单元性能(包括重量、转换效率等)是关键性因素,另一方面太阳能电池阵列封装是实现太阳能电池航空工程化应用的关键性环节。太阳能电池封装须考虑电池的易脆性、透光性、抗冲击、可拆卸等要求,太阳能电池阵列的布置应与大挠度变形的弯曲翼面相适应,翼面弯曲、机翼挠度变形、机动飞行等导致太阳能电池阵列各区域太阳光线入射角存在较大差异,各电池单元输出电压高低不均,因此太阳能电池输出电能管理是一项必须解决的技术难题。

储能系统储存/释放能量过程的能量转化效率、能量密度在很大程度上决定了无人机的性能。如“Helios”无人机储能系统重量达420kg左右,约占全机重量的45%,是全机重量系数最大的系统,这反应出储能系统性能是决定临近空间太

阳能无人机能否实现超长航时性能的关键。

能量管理与分配系统(PMAD)根据太阳能电池能量转换功率变化和系统负载的变化,对电能进行实时分配和管理。当由太阳能电池产生的电能满足飞行能量需要有富裕时,储能系统储存能量;当由太阳能电池产生的电能不足以满足系统负载需求时,储能系统输出能量。科学合理地进行能量管理与分配是实现昼夜飞行的重要保障。

5 超大展弦比柔性体结构设计与气动弹性剪裁技术

一方面,临近空间太阳能无人机的翼载很小(是普通低速无人机的十几分之一),高空超长航时的总体性能要求结构系数尽可能低;另一方面,轻薄翼面及超大展弦比结构在飞行过程中不可避免发生大挠度变形(见图7),气动弹性问题十分突出,因此结构设计在保证强度要求和尽可能提高结构刚度的要求方面存在严重矛盾。轻质高强度结构材料选型、合理的结构布局设计、轻薄结构件的精细化加工是临近空间太阳能无人机须解决的重大结构技术问题。

目前,航空领域的气动弹性计算、分析方法主要解决线性领域的气动弹性问题,不适应于临近空间太阳能无人机柔性体机翼非线性几何变形的的气动弹性问题^[7-10],因此,必须发展新的气动弹性理论与方法。

6 超大展弦比柔性体飞行器飞行控制技术

临近空间太阳能无人机飞行控制技术的挑战主要来源于两个方面,一是低速大跨度飞行高度带来的飞机本体刚体运动模态奇异特性问题。以“Helios”无人机为例,30000m高空气动阻尼仅为海平面的



图7 “Helios”(太阳神)太阳能无人机大挠度气动弹性变形

Fig.7 High wing dihedral of “Helios” solar unmanned aerial vehicle

12%,刚体运动螺旋模态与滚转模态发生蜕化,并重新耦合成为一对复根($\zeta = -0.6430 \pm j0.2234$)。二是柔性机翼气动弹性控制问题。由于机体刚性/结构自振频率低,不仅大挠度气动弹性变形导致气动特性剧烈变化,而且飞机本体刚体运动自振频率与结构自振频率存在强烈耦合。“Helios”无人机机翼结构一阶模态、二阶模态、三阶模态自振频率分别只有0.097、0.552、1.407Hz。当在对流层飞行或穿越对流层过程中,当遭遇外界突风、大气紊流易诱发结构剧烈振动以至于振动发散,这是2003年6月26日“Helios”无人机空中解体的重要原因^[11]。另外,2015年5月1日谷歌公司Solara 50无人机也因类似的原因发生坠机。

临近空间太阳能无人机需要解决的控制技术包括:适应大范围高度范围的飞行控制技术、超大展弦比柔性体弹性自由度建模技术、超大展弦比柔性体控制律设计技术、超大展弦比柔性体传感器布置技术等。

发展展望

目前,临近空间超长航时太阳能无人机离真正商业化还有一段距离,太阳能电池效率、储能系统效率/能量密度有待进一步提高,低雷诺数、超低雷诺数/高亚音速气动设计与试验、超大翼展/展弦比机翼气动弹性与飞行控制等技术问题尚未彻底解决。从临近空间太阳能无人机研

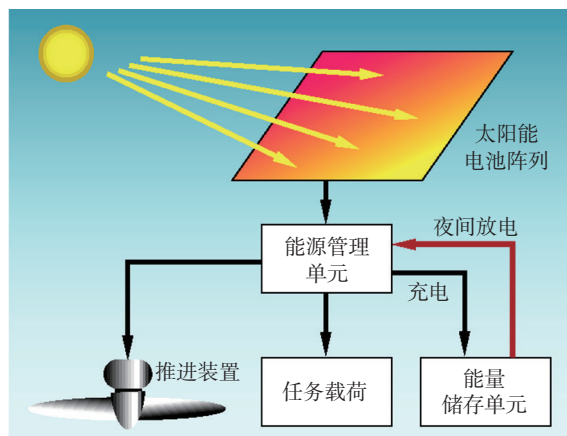


图6 太阳能无人机昼夜能量流程图

Fig.6 Energy-flow schematic balance diagram of solar unmanned aerial vehicles round-the-clock flight

究现状和新技术发展来看,临近空间太阳能无人机将有良好的发展前景。

(1) 随着太阳能电池效率、储能系统能量密度与效率、新型结构材料高强度/轻质化等性能水平的不断提升,将促进临近空间太阳能无人机整体性能水平的持续发展。目前,信息领域国际大公司高度重视临近空间超长航时太阳能无人机的发展应用前景,各公司自主大力投入研究,改变了之前政府主导的发展模式,极大地推动了临近空间超长航时太阳能无人机的研究进程。按照目前的发展,可以预测未来5~10年内,临近空间太阳能无人机可以在30000m高空进行长达数月的昼夜飞行。

(2) 太阳能电池正向高效单晶硅电池、重量轻且易与机翼蒙皮融合的薄膜电池及聚光三结化合物^[3,5,12]、高效结构化吸能等方向发展。新型太阳能电池实验室状态效率达到了40%以上,是当前工程化成品效率的2倍,这将大大促进临近空间太阳能无人机的技术进步。一旦成熟并应用于临近空间太阳能无人机,不仅可以增加可用能量来源,而且可以为临近空间太阳能无人机规模小型化、降低结构设计/气动弹性与飞行控制难度带来可能。

(3) 在临近空间太阳能无人机需求牵引下,在未来5~10年可再生燃料电池能量密度将从450Wh/kg提高到600Wh/kg的水平,从而达到临

近空间太阳能无人机商业化的基本要求,科学家认为远期可达到的水平是800Wh/kg^[4]。随着石墨烯电池技术的发展,将为临近空间太阳能无人机储能系统提供新的选择。

(4) 爬高储能以动能—势能转化方式进行昼夜能量转换,没有重量代价,采用混合储能方式(爬高储能+物理储能)将是解决储能问题的重要发展方向。

结束语

临近空间超长航时太阳能无人机作为一种新概念飞行器,性能优势显著,发展前景广阔。其工程化发展涉及气动、结构、材料、机电、控制、太阳能电池、储能电池等多个技术领域,关键技术大多是目前航空领域的空白点,工程化研制的技术难度很大。但现代科学技术发展突飞猛进,随着高强度轻质石墨烯结构新材料、新型太阳能电池、新型储能手段等应用于临近空间太阳能无人机,临近空间太阳能无人机必将迎来灿烂的明天。

参考文献

- [1] NASA. ERAST: environmental research aircraft and sensor technology[R]. Washington D.C.: NASA, 2002.
- [2] NASA. Helios prototype: the forerunner of 21st century solar-powered "atmospheric satellites" [R]. Washington D.C.: NASA, 2002.
- [3] COLOZZA A J, SCHEIMAN D A, Brinker D J. GaAs/Ge solar powered aircraft[R].

Washington D.C.: NASA, 1998.

[4] CURTIN B. Solar-powered UAV development for NASA[C]. International Technical Conference on "Unmanned Aerial Vehicles", Paris, 2000.

[5] COLOZZA A J, SCHEIMAN D A. Effect of power system technology and mission requirements on high altitude long endurance aircraft[R]. Washington D.C.: NASA, 1993.

[6] HALL D W, WATSON D A, TUTTLE R P, et al. Mission analysis of solar powered aircraft[R]. Washington D.C.: NASA, 1985.

[7] ROMEO G, FRULLA G, FATTORE L. Heliplat: high altitude very-long endurance solar powered UAV for telecommunication applications. fem analysis, manufacturing and testing of 21m long cfrp wing box[C]. Applied Vehicle Technology Panel Symposium on Unmanned Vehicles for Aerial, Ground and Naval Military Operations, Ankara, 2000.

[8] ROMEO G, FRULLA G. Analysis of an advanced composite wing structure for a solarpowered airplane[C]. XIII AIDAA Congress, Roma, 1995, 2: 965-976.

[9] ROMEO G. Numerical analysis, manufacturing and testing of advanced composite structures for a solarpowered airplane[C]// DIMEAS-Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale. Proceedings of XV AIDAA Congress, Torino, 1999, 2:1001-1012.

[10] HALL D W, HALL S A. Structural sizing of a solar powered aircraft[R]. Washington D.C.: NASA, 1984.

[11] NOLL T E, BROWN J M, PEREZ-DAVIS M E, et al. Investigation of the helios prototype aircraft mishap: Vol. I, Mishap Report [R]. Washington D.C.: NASA, 2004

[12] SCOTT W B. Cuts endanger airborne research[J]. Aviation Week and Space Technology, 1994, 140(19): 28.

Development and Key Technology on Near Space Long Voyage Solar Unmanned Aerial Vehicle

TAO Yujin

(Research Institute of Unmanned Aerial Vehicle, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

[ABSTRACT] Near space long voyage solar unmanned aerial vehicle is a front direction of aircraft investigation all over the world. The development of the NSSOL UAV is introduced briefly, and the key technology to research and develop such aircraft is proposed and analyzed. Then the development tendency of the near space solar UAV is prospected.

Keywords: Near space; Long voyage; Solar unmanned aerial vehicle

(责编 谷雨)