

2020年临近空间科技热点回眸

李智斌^{1,2}, 黄宛宁^{2*}, 张钊³, 刘晓春⁴, 朱殷²

1. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 青岛 266590

2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

3. 北京大学工学院, 北京 100871

4. 海鹰航空通用装备有限责任公司, 北京 100074

摘要 围绕“认得清、留得住、飞得灵、用得好”的发展目标, 概述了2020年临近空间科学技术的研究热点: 中国、日本、法-美联合在临近空间实验探测与科学认识方面取得了一定进展; 以“留得住、用得好”为目标的临近空间低动态飞行器及其应用技术取得显著成绩, 日本软银公司“太阳滑翔机”和韩国 EAV-3 为太阳能无人机的的发展注入了新的活力, 美国谷歌公司 Loon 气球创造了可控驻留区域更精细、持续飞行时间更长、商业应用客户更多的新记录, 航空和电信领域十多个巨头加入成立的 HAPS 联盟有助于推动临近空间长航时平台沿着“用得好”的方向健康发展; 以“飞得灵、用得好”为目标的临近空间高动态飞行器及其应用技术方面, 超声速亚轨道商业旅行再次推迟, 俄罗斯已基本形成陆、海、空基多样化发射与远、中、近程多型号搭配的高超音速打击能力。

关键词 临近空间; 科学探测; 浮空飞行器; 太阳能无人机; 亚轨道飞行器; 高超声速飞行器

临近空间是指传统大气飞行器上不去、而需要保持在大气层外地球轨道飞行的卫星又下不来的稀薄大气空间。临近空间是人类认知地球空间的新领域, 目前少有飞行器能够在此长期稳定运行, 由于缺乏丰富有效的长期原位探测手段, 临近空间有太多的未解之谜有待科学家去揭示: 例如, 临近空间是否有生物, 它们从哪里来, 临近空间神秘发光现象的成因是什么; 临近空间的电磁环境变化对

人类活动的影响等^[1-2]。

临近空间是人类活动新领地, 发展长航时无人机、浮空飞行器、超声速亚轨道飞行器、高超声速飞行器等临近空间飞行器, 已成为先进国家和企业发展的战略必争领域。需求是推动技术发展的牵引力, 图 1 展示了在轨地球卫星、传统航空器及不同临近空间飞行器的供给能力满足典型应用需求的可能性。畅游太空的远期梦想和搭载投放导弹武

收稿日期: 2020-01-05; 修回日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61733017, 91638301); 中国科学院战略性先导专项(XDA17020203)

作者简介: 李智斌, 教授, 研究方向为临近空间飞行器智能无人系统动力学、容错控制及应用, 电子信箱: zhibin.li@sdust.edu.cn; 黄宛宁(通信作者), 高级工程师, 研究方向为临近空间飞行器测控技术, 多浮空器组网通信技术, 电子信箱: hwn@aoe.ac.cn.

引用格式: 李智斌, 黄宛宁, 张钊, 等. 2020年临近空间科技热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 54-68; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.

2021.01.004

供给 \ 需求	遥/通/导	原位探测	天文观测	投放操作	遨游体验
在轨卫星	+++		+		载人航天器
高超声速飞行器				+	+
亚轨道飞行器					+
长航时无人机	/+ /				
浮空飞行器	++ /	+	+	+	+
常规航空器				+	+

图1 不同飞行器供给能力满足典型应用需求的可能性

器的军事需求都是发展高超声速飞行器的基本出发点,而发展超声速亚轨道飞行器有望让更多人以相对廉价的成本得到太空旅行体验。低动态临近空间飞行器由于具有在地面任意热点的上空进行灵活部署和长期驻留的可能性,有望成为持久信息保障平台,提供对地遥感、通信和导航增强服务。其中长航时无人机承载有效载荷能力受限,主要适用于通信服务。浮空飞行器则在信息保障、原位探测、天文观测、投放操作、遨游体验等典型需求方面都具有一定潜力。

图2为临近空间科学技术体系概览。一方面,由于长期主要依靠天基探测和地基探测导致对临近空间“认不清”,还必须依靠在临近空间原位进行实验探测和科学研究,逐步达到“认得清”;另一方面,深入开展临近空间飞行器及其应用技术研究,从“用不好”逐步达到“用得好”,具体包括:长航时无人机及其应用技术、浮空飞行器及其应用技术、高超声速飞行器及其应用技术、超声速亚轨道飞行器及其应用技术。长航时无人机与浮空飞行器都属于低动态飞行器,其发展目标是能够在临近空间任务要求高度持久驻留,并提高区域可控的精细程度。超声速亚轨道飞行器与高超声速飞行器都属于

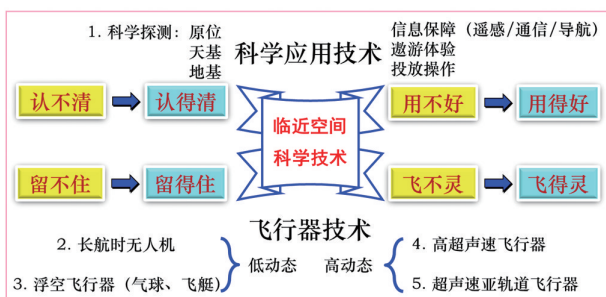


图2 临近空间科学技术体系概览

高动态飞行器,其发展目标是达到飞行过程的灵活机动敏捷性及安全性,更好地满足相应的任务需求。

1 利用临近空间进行实验探测的科学研究进展

1.1 中国科学院揭示青藏高原上空气溶胶层粒径分布

青藏高原北缘亚洲对流层顶存在气溶胶层(ATAL),气溶胶以粒径小于0.25 μm的小粒子为主,最大数浓度出现在对流层顶16~17 km附近。ATAL自2011年被发现以来,其形成机理、气溶胶构成和来源成为科学家关注和争论的热点问题。为研究这些科学问题,中国科学院大气物理研究所与中国科学院空天信息创新研究院等单位合作,于2018—2020年先后在青藏高原格尔木和大柴旦开展5期基于长航时平流层高空气球的原位平飘大气综合观测试验,气溶胶廓线为其重要测量要素之一。研究人员基于数值模拟揭示了气溶胶粒子的2个主要区域来源:一部分来源于边界层的污染物可通过喜马拉雅山南麓的强对流区直接垂直输送;另一部分气溶胶粒子来源于亚洲夏季风区内由对流层上层向平流层下层沿等熵面的螺旋上升运动。

具体研究 Raikoke 火山(48.292°N, 153.25°E)喷发产生的气溶胶传输到观测位置。如图3所示,虽然火山气溶胶排放量较大,但由于南亚高压在水平方向上的传输屏障作用,火山气溶胶并未完全掩盖 ATAL 信号。这项青藏高原上空大气研究的重

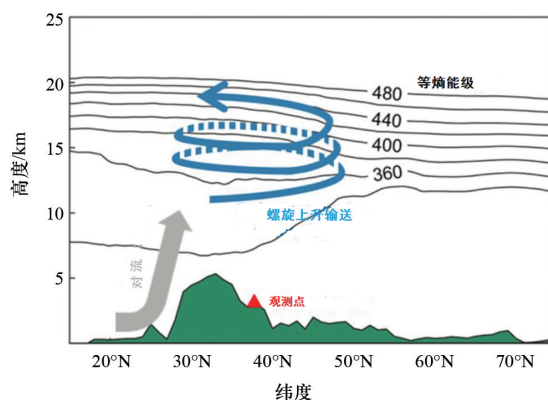


图3 ATAL气溶胶粒子传输通道示意 (红色地点为大柴旦观测点)

要成果于2020年发表在国际专业学术期刊^[9]。

1.2 法-美联合利用超压气球探测研究热带气候过程

Strateole-2是由欧空局支持的一个法国-美国联合项目,它利用法国空间研究中心(CNES)超压气球在全球各地漂流,研究热带对流层上层(TTL)和平流层下层的气候过程,帮助验证风神卫星的观测数据。长达3个月的第一次技术测试活动结束于2020年2月,由8个CNES超压气球组成,飞行高度在18~20 km,飞行轨迹如图4^[4]所示。

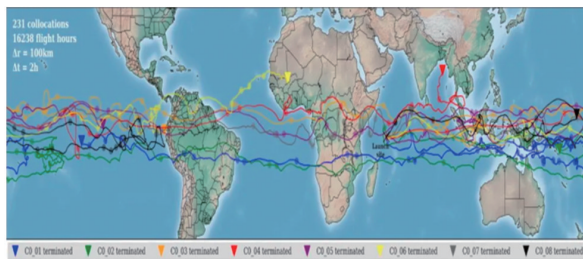


图4 8个CNES超压气球的飞行轨迹

Strateole-2具有以下4个科学目标。

一是研究影响赤道对流层和平流层之间的通道TTL的气候过程。Strateole-2的仪器将测量水蒸气及其他大气示踪剂,并对对流产生的重力波相关的温度变化进行高分辨率观测,目标是更好地了解水蒸气是如何被注入平流层,以及在空气包上升到对流层时使其脱水的机制。Strateole-2仪器还将观测对流层顶部薄卷云的生命周期以及重力波与它们的相互作用。

二是研究赤道平流层下层的动力学,它是由准两年振荡(QBO)控制的,QBO是一种东西向风分量的振荡,高度为18~30 km,与Strateole-2气球飞行的高度相同。风的年际变化主要是由对流产生的重力和行星波驱动的。Strateole-2将通过气球在陆地和海洋上空飞行时对气象变量的高分辨率测量,帮助科学家更好地了解热带大气的动态。

三是通过与气象服务机构共享Strateole-2气象测量数据来改进气象预报,以便全世界的数值天气预报系统能够吸收它们。因此,Strateole-2气球观测将有助于填补热带海洋风测量的空白。

四是使用Strateole-2的高精度的现场风测量来验证风神观测结果。这一验证在热带地区尤其重要,因为在这些地区天气预报主要依赖风神卫星的观测结果。

1.3 日本通过多时钟示踪器实现大气的高精度化测量

作为平流层大气运输的重要指标,大气年代在平流层大气科学中最受关注。随着全球变暖,可以检测到平流层大气力学过程的响应。已有研究一般通过观测被称为“时钟示踪器”的二氧化碳(CO₂)或六氟化硫(SF₆),根据其浓度决定大气年代。但是,这种长期变化的倾向与近年来数值模拟的结果不同,而且分别从CO₂和SF₆浓度决定的年代不一定一致。

因此,日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)于2020年7月25日3:57从大树航空宇宙实验场发射气球B20-04,通过多时钟示踪器实现大气的高精度化测量^[5]。气球在放球2 h 25 min后达到满膨胀体积1000 m³,在大树航空宇宙实验场东方约42 km的太平洋上在35 km高度进入了平飞状态。6:52,根据指令电波被分离出来的气球和载荷吊舱在大树航空宇宙实验场东南约30 km的海上缓慢下降,7:38之前被回收船回收。在该研究中,除了CO₂和SF₆之外,作为新的“时钟示踪器”,通过测量碳同位素(¹³C)、O₂/N₂比和卤素类的浓度,决定大气年代,验证迄今为止的大气年代研究的合理性,同时追求大气年代确定技术的高精度化和多层化。在确定大气年代的同时,在过去30年间对平流层大气的温室效应气体浓度的监测上添加最新的数据,以阐明平流层中物质循环的长期变动。

2 长航时无人机及其载荷研究进展

2.1 多巨头成立面向长航时信息保障需要的HAPS联盟

迄今为止,地球上相当部分陆地区域、绝大部分海域仍然难以得到基本的信息保障服务。为了瞄准这一巨大的市场需求、填补数字鸿沟,国际上先进企业组织竞相实施战略计划,例如以SpaceX

公司“星链”计划为代表的全球卫星互联网、以 Facebook 公司“天网计划”Internet.org 为代表的平流层无人机群、以 Google 公司 Project Loon 为代表的平流层气球组网。比较而言,卫星在满足人类信息保障需求方面存在诸多局限性:高轨道卫星时间分辨率与空间分辨率太低;每颗卫星都有特定的运行轨道,决定了不是每个热点地区上空都有持续服务的信息保障平台,中低轨道遥感卫星的数据更新率最快 90 min 左右,远远满足不了类似汶川地震救援等急切需求;单颗卫星所能承载的载荷效率越大意味着体积重量功耗的增大,完全依靠卫星组网面临着太空垃圾等诸多问题。

正因为此,国内外最近二十多年一直致力于发展临近空间信息保障平台。2020年2月,由世界领先的电信和航空航天领域的行业领导者组建的 HAPS (high altitude platform station) 联盟宣布成立^[6],该联盟将共同致力于在平流层中使用高空飞行器(包括高空太阳能无人机、高空超压气球等)来消除数字鸿沟,并将网络连接带给世界上更多的人群、地方和事物。

HAPS 联盟成立的目的在于使各成员公司能够与各国相关部门共同推动高空平台站业务的发展,建立协作式的 HAPS 生态系统,制定共同的产品规范,促进 HAPS 网络互操作性的标准化。所有这些活动对于联盟旨在解决各种社会问题并通过利用高空飞行器在全球范围内提供电信网络连接来创造新价值的目标至关重要。该联盟最初由 HAPSMobile 和 Loon 发起,应邀承诺加盟的航空航天、技术和电信行业的领先企业成员包括 AeroVironment、空中客车防务及航天公司(Airbus Defence and Space)、巴帝电信(Bharti Airtel)、中国电信、德国电信(Deutsche Telekom)、爱立信、Intelsat US、诺基亚、软银和西班牙电信(Telefónica)。高空网络连接平台在平流层中运行,平流层位于地面基础设施之上,但在卫星之下,可以实现几乎无处不在的覆盖,并且避免地面混乱和重大延迟问题。这些优势使这类飞行器成为一种非常有前景的解决方案,可以将移动网络覆盖范围扩大到缺乏网络连接的区域(如山区、偏远岛屿、海洋地区和发展中国

家)以及物联网和第五代通信技术(5G)用例。HAPS 联盟致力于创建一个生态系统,以支持革新世界移动网络所需的下一代全球网络连接。

2.2 美国 Swift 高空太阳能无人机完成首飞

2020年7月7日,由获得美国国家航空航天局(NASA)艾姆斯研究中心支持的 Swift 公司开发的高空太阳能无人机(图5)完成了首飞,无人机翼展 22 m,总重不超过 82 kg,最大载重 7 kg,目标为在 21 km 高度留空一个月,旨在提供观测地球的新手段,可应用于大气研究、水文地貌遥感、森林农业实时监测等^[7]。



图5 Swift 太阳能无人机

2.3 韩国 EVA-3 太阳能无人机完成 22 km 高度的飞行测试

2020年9月10日,由韩国航空航天研究所(KARI)开发的 EAV-3 太阳能无人机(图6)完成了最大飞行高度 22 km 的飞行测试,这是继 2018 年其实现 18.5 km 高度飞行后又一次重要突破。EVA-3 翼展 20 m,采用了 LG 公司开发的最新型锂硫储能电池,能量密度是当前常用锂离子电池的 1.5 倍^[8]。



图6 EAV-3 太阳能无人机

2.4 日-美联合 SunGlider 完成 19 km 高度飞行及新型有效通信载荷测试

日本软银公司公司在平流层太阳能无人机及其应用项目的投入可圈可点,发展模式很有特色:

与美国航空环境公司(AeroVironment)共同成立的HAPSMobile公司开发无人机平台;委托Google母公司Alphabet旗下的Loon LLC开发适合在平流层平台搭载的通信载荷。这不由令人想起另一个模式^[1]:“西风无人机+Facebook的载荷”。

比较而言,Loon在平流层有效载荷方面具有更丰富的经验,在2011年就建造了其第一个平流层有效载荷。在Loon系统上,天线被设计成随着飞行器的移动而旋转。这项技术已经证明能够可靠地保持与地面和附近飞行器的稳定连接。HAPSMobile团队提供了无人机的飞行要求定义、通信技术要求和其他信息,以帮助开发有效载荷。由于其无人机的设计飞行速度超过100 km/h,因此Loon技术团队不得不调整通信系统,以适应明显更高的飞行速度。软件的改进使天线旋转更快,跟踪更快速的移动。此外,研究小组还开发了一种气动外壳,以保护天线免受飞行速度增加带来的力的影响。图7所示为将定向天线装在无人机机翼下部整流罩内。利用了Loon在建立通信有效载荷方面的专业知识,这些有效载荷能够长期承受平流层的恶劣条件,在平流层中风速可以达到100 km/h,温度可以降至-90℃。



图7 将定向天线装在Sunlider机翼下部整流罩内

如图8所示,HAPSMobile公司具有78 m超大翼展的Sunlider无人机原先被称为HAWK30,最多可以承载68 kg有效载荷,在短短的3年内成功地到达了平流层,继2019年^[9]进行2次试飞后,2020年又进行了3次飞行,其中9月21日的飞行持续了



图8 Sunlider无人机

20 h 16 min,在平流层度过了5 h 38 min、达到62500英尺(约19 km)高度。在飞行过程中,经受了极为苛刻的飞行条件考验,风速大于30 m/s,温度降至-73℃,载荷测试系统由Sunlider使用700 MHz频段(LTE28波段)的服务链路和飞机使用的与地面网关之间的毫米波(70~80 GHz)回传链路组成,完成了长期演进(long term evolution,LTE)连接智能手机同地面人员进行视频通话测试^[10],图9为视频通话的图像。该测试标志着世界上第一次在平流层通过固定翼无人机高空平台站(HAPS)成功提供LTE连接,有效载荷使LTE连接能够连续传输约15 h,为其最终利用太阳能无人机开展移动通信业务奠定了重要的基础。



图9 Sunlider视频通话的图像

2.5 英国临近空间无人机进展

1) 空客“西风”(Zephyr)无人机完成向平流层过渡的早期阶段飞行测试。

“西风”是世界领先的平流层太阳能-电力无人机系统(UAS),目前保持着在平流层持续飞行25 d 23 h 57 min的世界纪录^[1]。2020年12月3日,空客防务与航天公司宣布^[11],在美国亚利桑那州完成了“西风”高空伪卫星(HAPS)的新一轮飞行测试。在2020年11月前3周进行的飞行测试,主要是验证“西风”在低空起飞、爬升、巡航、飞行控制、

下降、着陆,以及向平流层过渡的早期阶段的操作灵活性和敏捷性。此外,还验证了新的飞行计划工具套件,使得“西风”距离实际的操作更近了一步。

2) PHASA-35 完成首飞。

2020年2月,由英国BAE和棱镜公司联合开发的持久高空太阳能飞机“PHASA-35”完成了首飞,无人机翼展35 m,设计目标是在21 km高度飞行一年,旨在替代卫星执行持久、低成本侦察以及通信网络覆盖等任务,计划2021年开展进一步高空飞行等测试^[12]。

3) 氢动力无人机计划。

英国平流层平台有限公司(SPL)和剑桥咨询公司(Cambridge Consultants)2020年11月宣布^[13],计划在海平面以上20 km部署一个无人机队。如图10所示,该飞行器将拥有约61 m的机翼空间,并将使用H₂来运行,从而产生更长的续航时间,但零排放。这一设计的秘密武器是绑在无人机上的重达120 kg的天线,据剑桥大学介绍,每个天线能够产生480个独立的、可操纵的波束,这些波束产生的图案可以“涂”在地面上,覆盖公路、铁路或航道等特定区域。一架SPL的无人机可以取代至少200个基站,仅需60架远程控制的无人机就能覆盖整个英国。

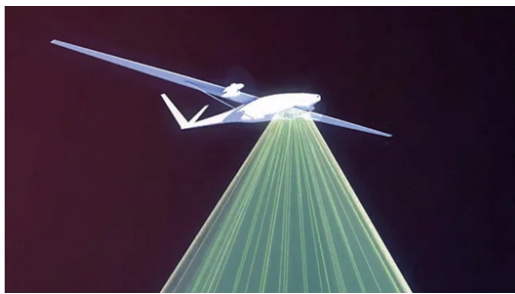


图10 氢动力无人机概念示意

SPL CEO 理查德·迪肯表示,目前已经克服了天线设计中的重大技术挑战:诸如功率有限、稀薄的空气中难以冷却,从而能够在平流层这种独特环境中传输大量数据。2020年9月,SPL与德国电信(Duetsche Telekom)合作,进行了使用4G语音和数据连接的机载网络的首次试验(图11),尽管它仍处于概念验证阶段,但目标是2024年推出商业服



图11 基于机载网络进行首次原理测试

务。在测试中,一部智能手机通过飞机上的天线连接到德国电信的地面移动网络。在平流层测试中,10 MHz的信道带宽下,2.1 GHz范围内的下载速度为70 Mbits/s,上传速度为20 Mbits/s。

纵观2020年整体进展,临近空间无人机受到越来越多“玩家”的加入,亚洲与英美的差距正在逐步减小,行业竞争越来越激烈,不断追求高度、航时、载重能力等更高的飞行能力,同时开始尝试相关领域的应用测试。未来随着新一代能源等技术的应用,临近空间太阳能无人机将真正实现工程应用。

3 临近空间浮空飞行器及其应用研究进展

3.1 平流层飞艇进展

也许出于保密的原因,2020年有关平流层飞艇进展的公开报道极少。

2020年1月8日,泰雷兹阿莱尼亚宇航公司得到法国国防采购局的订单^[14],利用Stratobus平流层客车(图12)^[1]开展情报、监视和侦察应用研究,探究持续运行的平流层平台对提升和拓展法国国防能力的可行性,以满足法国军队的作战需求,预计将



图12 Stratobus平流层客车概念示意

于2023年底前开展飞行演示。具体研究内容包括：(1) 监视和侦察任务的作战概念研究,包括模拟其在战区使用的演习;(2) 研发可在平流层飞行的全尺寸验证机概念,以验证监视和侦察任务的飞行性能。

自从洛马公司平流层缩比验证飞艇 HALE-D 在2011年7月试飞失败之后,公开媒体一直没有该项目后续研究的报道,业内人士一度认为美国可能已经放弃了平流层飞艇的技术路线。然而7年之后的2020年10月,一家名为 Sceye 的民营公司毫无征兆地放出了平流层飞艇制造方面的消息^[15],声称已投资 5000 多万美元在新墨西哥州开发和完善平流层飞艇和建设基础设施。图 13 所示的 Sceye 公司飞艇同 HALE-D 的外形^[16]酷似,飞艇在 65000 英尺的平流层中运行,可为新墨西哥州的乡村提供 100% 的宽带覆盖,同时监测甲烷的排放,包括实时的排放率。



图 13 Sceye 公司飞艇照片

3.2 Google 气球及其应用进展

1) 持久驻空和区域可控能力显著提升。

为了在临近空间信息保障领域独占鳌头, Google 公司创建了独具特色的发展模式,一度在无人机和浮空飞行器两大方向同时发力,经历优胜劣汰的过程后集中力量发展浮空飞行器;而对于浮空飞行器方向,也许是从 2011 年 HALE-D 飞行试验失利得到启示,并没有选择技术难度更大的平流层飞艇,而是实施 Project Loon 气球组网计划;具体实施中,一方面尽管未能成功收购空间数据公司,但最终化解了有关知识产权争议,另一方面从 2013 年开始一直同在“浮空器行业的创新性和专业性知识”具有丰富经验的 Raven Aerostar 公司进行生产超压气球的合作。

在持久驻空方面,谷歌编号 HBAL703 气球在今年创造了持续飞行 312 天的记录(图 14)^[17]。它于 2019 年 5 月从波多黎各出发,然后漂流到秘鲁,在那里花费了 3 个月时间提供 Loon 互联网的测试服务。之后,它被送往南方,横跨南大西洋,印度洋,最后到达南太平洋。到达那里后,气球又花了 7 个月左右的时间在海洋上空来回漂移,参加了 Loon “非常令人兴奋的导航系统实验”。最终,气球被送往北至墨西哥的巴哈,并于 2020 年 3 月在此被回收。

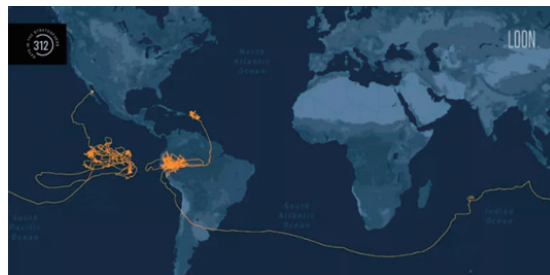


图 14 HBAL703 气球持续 312 天驻空轨迹

在临近空间“留得住”实际上包括两方面含义,能够持久驻空只是一个方面,更重要的是必须区域可控。之所以要实现球下点的区域可控,一是空域管制的基本要求;二是地面测控能力往往是受限的;三是为特定区域用户服务的需要。但气球没有类似飞艇的动力推进能力,长期因为风场扰动难以实现区域可控。Loon 团队之所以采用内部带空气副气囊的超压气球方案,是为了利用气泵吸进或排出空气进行高度调节,寄希望于利用不同高度的不同风向进行水平面内位置调节。在美国国家海洋和大气管理局(NOAA)气象数据支持下,Loon 团队采用机器学习方法预测气球所在位置附近风速变化的趋势,并根据期望可控区域的要求,适当启动气泵进行高度调节。利用机器学习,Loon 团队曾经在 2016 年夏季创造了一个气球持续 98 d 飘浮在秘鲁上空平流层高度的记录,球下点可控区域范围(又称为定点距离 station-keeping range): 东西 2206.76 km@南北 1036.88 km。

现在 Google 气球区域可控越来越精细,达到了定点距离 50 km,参见 Loon 团队最近在《Nature》杂志上发表的文章(图 15)^[18]。基于全球风的历史记录、当地观测和预报的风以及预计的未来飞行路

线,以决定上升、下降还是什么都不做,目前已在太平洋赤道附近进行了为期 39 d 保持在定点距离 50 km 以内。如图 15 所示,以某一天的操作为例,6:00 左右在西向风高度开始启动气泵排空气使高度上升,在 11:00 左右达到定点距离边缘的东向风高度,然后停止排空气、但在向上速度作用下于 16:00 左右达到最大高度,于是启动气泵吸进空气使高度下降,21:00 左右在向下速度作用下达最低高度。

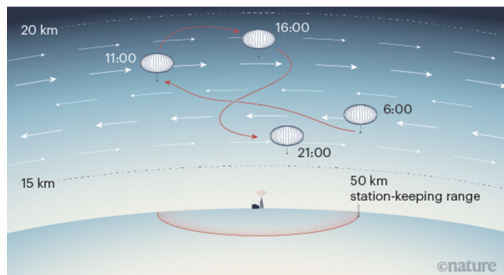


图 15 AI 提升区域可控能力的效果(图片来源:《Nature》)

同 Google AlphaGo 相比,这里的问题是实际环境中风速数据不完整,很难采取最优调整让气球保持在原位。英国国家大气科学中心、牛津大学大气海洋和行星物理学系的科学家 Osprey 评价称^[19], Loon 团队这项研究代表了增强学习在现实世界应用的一次巨大进步。“在不完全了解周边风的情况下,一个人工智能控制器让气球在平流层停留了数周,这为无监督环境监测开辟了前景”,是机器学习在现实世界应用的一次巨大进步。Osprey 认为,有效且自主“超压”气球将为探测地球和其他行星的大气提供一系列商业和科学应用。如果能做到让一个气球在特定位置停留数月,就可以进行长期的环境监测,例如检测城市上空的空气质量、受高温影响的森林和冻土融化地区的碳通量等。其他应用甚至包括监测动物迁徙路线和非法越境的货物与偷渡人员。

然而这仅是在赤道附近某个地区的结果,在其他不同地区一般需要重新学习当地风速变化的特征。

2) Google 气球网络获得商业利益与公益荣誉双丰收。

Google 气球网络在 2020 年度可谓名利双收。尽管在飓风“厄尔玛”和“玛丽亚”袭击后漂浮在波

多黎各上空,并在 2019 年地震后漂浮在秘鲁上空,但进行商业部署并不容易,需要进入一个国家的领空,以及利用频谱、进口和安装地面基础设施的监管批准。在面临新型冠状病毒肺炎大流行时,非洲的肯尼亚和莫桑比克先后同 Loon 团队合作,以便及时得到互联网服务获得医疗信息。肯尼亚政府 2020 年 4 月正式批准 Google 公司联合肯尼亚 Telkom 电信公司推出了 Loon 商用互联网服务项目^[20],采用大约 35 个气球,这些气球从美国放飞,利用大气气流飞往肯尼亚,将高空超压气球充当手机信号塔,通过 Telkom 的网络向包括首都内罗毕在内的约 5 万 km² 的地区提供蜂窝服务。目前 Loon 的几十个气球网络已经在超过 77700 km² 的地方传输 4G 互联网,在肯尼亚中部和西部——使下面的人更容易访问网络浏览、电子邮件和文本(图 16)。接着在 7 月,Loon 和莫桑比克的 Vodacom 电信公司也签署了一份商业合同,开始为 Cabo Delgado 和 Niassa 两个省提供服务,这两个地区在过去由于其广阔和具有挑战性的地理位置而被认为难以覆盖。在接下来的几个月里,Loon 团队将继续安装地面基础设施,并开始试飞,以便 Loon 的自主导航系统可以开始学习莫桑比克上空平流层的风速模式。



图 16 Telkom 员工测试场景

2020 年 11 月,Loon 团队获得《时代周刊》2020 年度 100 项最佳发明的荣誉称号,此榜单每年会有平均 2.5 亿次传播,堪称全球科技发明界的“奥斯卡”,Google 的 4G 气球舰队所在的类别是社会公益类^[21],获奖的原因正是 Loon 团队在 2020 年商业化进程上取得的巨大进展。

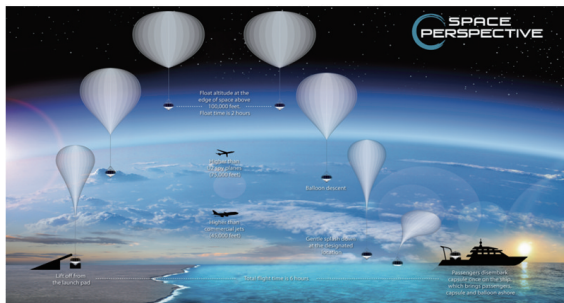
3.3 基于平流层气球的“太空观光”计划

1) 美国初创公司“海王星飞船”项目。

2020年6月,由首席执行官 Jane Poynter 和 Taber MacCallum 联合创立的商业航天企业太空景象(Space Perspective)公司宣布成立,公司计划使用由高空气球和密封舱构成的“海王星飞船”将乘客和科学载荷送至30 km高的平流层^[22]。

载有乘客和科研载荷的密封舱缓慢上升大约2 h才能到达预定轨迹的顶点,然后气球就会沿着太空边缘再随风飘逸2 h,为旅行者提供十分震撼

的风景(图17(a))。Poynter说,“海王星吊舱的底部就像一个旋转的陀螺(图17(b)),这使得太空舱的底部能够轻轻地穿透海洋表面,并在着陆过程中逐渐降低速度。乘客不需要准备应对冲击,整个过程会很舒服。我们的目标是让整个飞行过程从头到尾都非常柔和。”首次不载人试飞计划2021年在美国佛罗里达州肯尼迪航天中心进行。



(a) 飞行任务剖面



(b) 载人吊舱概念示意

图17 球载海王星飞船的飞行任务剖面及载人吊舱概念示意

2) 法国初创公司 Zephalto 平流层观光项目。

法国初创公司 Zephalto 同样致力于使用平流层气球进行商业太空观光^[23],该公司的创业目标是与航空航天业的开发者一起,共同为2~6名顾客建造加压太空舱,并在2024年以前完成携带乘客到25 km 高度飞行的任务。2020年在第一阶段开发测试了可重复使用的气囊外壳以及用于调节高度的副气囊。气球的能量全部由太阳能电池板提供(图18)。所有这些都得到了来自 Occitanie 地区和欧洲的第一轮融资的支持,并得到了 CNES 高空气球团队的技术支持。



图18 Zephalto 平流层气球观光及其公司及其“大白豆”载人舱核心技术概念示意

3.4 临近空间公司 NSC 实施高空投放测试

高空投放测试(high altitude drop test),一般是使用高空气球平台把被测载荷(或人员)带到临近空间高度(20~50 km)投放,利用势能使被测载荷加速,可用于模拟火星大气再入、载人飞船再入地球大气后的降落伞测试、超音速飞行器自由落体加速、高空极限超音速跳伞、微重力试验等,是高空气球的一种典型应用模式。

2020年11月3日,临近空间公司 NSC(Near Space Corporation)为欧空局和俄罗斯宇宙科学研究所联合开展的 EXOMARS2022 项目进行了一次临近空间投放的降落伞测试^[24]。高空气球将模拟平台带到29 km 的高度以模拟火星的大气密度,降落伞抽出和减速按预期进行,试验平台安全着陆,试验降落伞被回收。但也出现了一些顶部伞盖破损现象,指出前期充气展开过程为进一步改善的重点。

2020年12月7日,由 NSC 提供的高空气球将波音公司的 starliner 飞船试验品升空到新墨西哥沙漠上空,装备有可复用降落伞的 starliner 飞船着陆系统成功模拟了2个独立故障同时发生的大气再入场景(图19)。NSC公司和波音公司一共使用高



图22 AGM-183A“空射快速响应武器”(ARRW)导弹

4.2 俄罗斯率先拥有三种高超声速武器列装三军

2020年10月7日,俄罗斯武装部队总参谋长宣布,俄北方舰队“戈尔什科夫海军元帅”号护卫舰10月6日上午从白海方向朝450 km处试射了“锆石”号高超音速导弹,成功击中目标。俄罗斯总参谋长瓦拉里·杰拉西莫夫称,本次导弹射程为450 km,最高高度为2.8万 m,飞行时间为4.5 min,达到了8 Ma以上的高超音速。

至此,俄罗斯已基本形成陆、海、空基多样化发射与远、中、近程多型号搭配的高超音速打击能力。俄罗斯也是目前世界上唯一拥有3种高超武器的国家,这3种武器分别装备于空军(匕首)、战略火箭军(先锋)和海军(锆石)^[29]。“锆石”(图23)是继“匕首”和“先锋”之后,俄罗斯第3种进入试射阶段的高超音速武器,其实是一种高超音速反舰导弹^[30],可以装备在巡洋舰、护卫舰和潜艇上。据西方军事观察员此前预计,“锆石”使用高超音速冲压式喷气发动机,巡航速度4~6 Ma,最大速度8 Ma,采用高空弹道时最大射程500 km,陆海空3种平台均可发射,专门用于打击海面大型舰艇,具有令人难以置信的破坏力,一枚或两枚导弹可以摧毁航空母舰。



图23 俄罗斯“锆石”导弹模型

同时,俄罗斯将拦截高超音速巡航导弹、滑翔弹头等任务作为新一代空天防御系统规划的发展重点^[31]。2020年9月,S-500防空导弹系统在莫斯科郊外“爱国者”公园开幕的“军队-2020”防务展上首次亮相。S-500作为俄罗斯最先进的防空反导一体化综合武器系统,在射程、发射时间、兼容性上都得到极大的提升,具备拦截洲际导弹能力甚至反卫星能力。S-500系统与美国的反导系统不同,同时兼顾了陆基版和海基版。因此,S-500系统列装后无疑能让俄罗斯海军迅速拥有一大批新型军舰,凭借其超强的作战半径和打击效率,可以让以美国为首的北约国家的大量空军战机及巡航导弹受到一定程度上的威胁,另外,据俄罗斯高官索兹诺夫称,即便是目前最先进的五代隐身战机F-35同样难以逃过S-500的锁定和打击,可见S-500打击能力非同一般。

4.3 印度进行HSTVD飞行测试

2020年9月7日,印度国防发展组织(DRDO)对外宣布成功在奥里萨邦巴拉索尔的阿卜杜尔·卡拉姆测试场进行了“高超声速试验验证飞行器”(HSTVD)飞行测试(图24)^[32],这标志着印度成为继美国、俄罗斯和中国之后第4个开发并成功测试高超声速技术的国家,并将为印度开发6倍音速导弹铺平道路。根据DRDO发布的详细信息显示,火箭将飞行器送到了30 km的高度,然后两者脱离,随后飞行器的超燃冲压发动机成功点火,将飞行器加速到了6 Ma的速度(6倍音速),并最终持续了20 s时间,达到了原本的设计预期。



图24 印度HSTVD飞行测试

4.4 其他国家的高超声速飞行器研发项目

日本政府2020年3月13日表示^[33],未来将逐步开发和部署高超音速巡航导弹(HCM)和超高速滑

翔弹(HVGP)2种防区外高超声速打击武器系统。日本政府计划2024—2028年间推出2种武器的早期型别,2030年代初期实现列装。

德国国防部发言人2020年10月24日表示^[34],在法国的推动下,德国加入了一项欧盟支持的名为“天基战区监视及时预警与拦截”(TWISTER)的项目,旨在拦截新一代高超声速导弹。欧洲导弹设计局(MBDA)称,该项目旨在2030年左右部署一个天基预警传感器网络,并开发一种新的大气层内拦截器,用于应对包括机动中程弹道导弹、高超声速巡航导弹、高超声速滑翔武器、反舰导弹和下一代战机等目标威胁。

澳大利亚国防部长琳达·雷诺兹(Linda Reynolds)2020年12月3日对外宣布^[35],澳大利亚将与美国共同开发高超音速巡航导弹,媒体指出澳大利亚今年已拨出高达93亿澳元(合68亿美元)的资金,用于高速和远程导弹防御系统的研究。此外,昆士兰州的Hypersonix公司将获95万美元用于开发氢燃料超燃冲压发动机^[36]。

5 超声速亚轨道飞行器研究进展

5.1 维珍银河尝试首次动力测试飞行

2020年12月13日,英国理查德·布兰森(Richard Branson)旗下的太空旅游公司维珍银河(Virgin Galactic)进行第3次载人飞行测试,这也是其在新墨西哥州总部的首次动力测试飞行。在飞行过程中,由于太空飞机的发动机过早熄火,不得不终止飞行,2名飞行员提前以滑翔的方式返回地面^[37]。

维珍银河公司证实,“VSS团结号”飞行器(图25)在中止飞行后安全降落在跑道上,两名飞行员C·J·斯特克夫(C. J. Sturckow)和戴夫·麦凯(Dave Mackay)平安返回。维珍银河表示将更换发动机,在2021年开始首次搭载商业乘客飞行。一旦商业运营开始,维珍银河的飞行将包括两名试飞员,最终将搭载6名乘客。在飞行之前,乘客将在美国太空港进行为期3 d的训练。首批600名乘客每人支付了25万美元的机票费用,但维珍银河公司声称该价格会随着时间的推移而改变。



图25 维珍银河“团结号”飞行器

5.2 蓝色起源创造可复用箭舱组合体第7次飞行纪录

2020年10月13日,德克萨斯州西部范·霍恩发射场,前世界首富贝索斯旗下的蓝色起源(Blue Origin)公司,将自己的可重复使用型新谢泼德(New Shepard)3号单级火箭及太空舱发射升空。发射升空2 min 45 s后,在时速高达3600 km/h时释放顶部的太空舱。这艘太空舱设计有6个舱位,这次测试仍然只载有用于假人模型(官方称天行者Skywalker),能够持续5 min左右的失重状态——这就是最值钱的时段,蓝色起源商业太空之旅的核心卖点。这次测试中火箭最高达到105 km高度,在发射7 min 25 s后,顺利着陆在范·霍恩着陆场(图26(a))。在火箭发射10 min 15 s后,同火箭分离的太空舱在3个降落伞帮助下触地着陆(图26(b))^[38]。



(a) 新谢泼德火箭着陆 (b) 太空舱着陆

图26 蓝色起源火箭及太空舱着陆

这也是第7次试飞同一枚火箭(新谢泼德火箭3号)+同一艘太空舱(CC2.0),这恐怕就是蓝色起源追求的极致——箭船系统多次复用能力,包括回

收、翻新能力以及所有发射间隔最小程度的翻新技术。

蓝色起源原计划 2020 年进行亚轨道商业首飞推迟到 2021 年,太空舱设计搭载 6 人,太空之旅票价 20 万 ~ 25 万美元。

6 结论

回顾极不平凡的 2020 年,临近空间科学技术领域取得了一系列可圈可点的成就。

基于高空气球探测的青藏高原上空气溶胶层粒径分布研究、热带气候过程研究和大气的高精度化测量,临近空间的科学探索进一步揭开了地球空间的神秘面纱。

在临近空间低动态飞行器及其应用技术方面: Sunlider 完成平流层飞行及新型有效通信载荷测试,更多“玩家”加入发展长航时无人机;借助风速大数据强化学习,Loon 气球在平流层“留得住”的能力得到进一步提升,持久驻空时间更长,定点可控区域更加精细,在肯尼亚和莫桑比克得到商业应用许可,以便让更多的人通过互联网获得医疗信息,应对新冠肺炎疫情;航空航天及电信领域多巨头成立 HAPS 联盟,有助于推动浮空飞行器和无人机在持久信息保障服务方面发挥作用。

在临近空间低动态飞行器及其应用技术方面: 高超声速武器竞争更加白热化,俄罗斯率先拥有 3 种高超声速武器列装三军,美国加大投入 3 种高超声速武器研发与测试,印度成为第 4 个开发并成功测试高超声速技术的国家;亚轨道飞行器双雄争霸中,维珍银河“VSS 团结号”飞行器尝试首次动力测试飞行暂时遇挫,蓝色起源创造可复用箭舱组合体第 7 次飞行纪录,吊足了人们口胃的亚轨道商业首飞能否在 2021 年成为现实值得人们拭目以待。

参考文献(References)

- [1] 李智斌, 黄宛宁, 张钊. 2018 年临近空间科学热点回眸[J]. 科技导报, 2019, 37(1): 44-51.
- [2] 黄宛宁, 张晓军, 李智斌, 等. 临近空间科学技术的发展现状及应用前景[J]. 科技导报, 2019, 37(21): 46-62.
- [3] Zhang J, Wu X, Liu S, et al. In situ measurements and backward-trajectory analysis of high-concentration, fine-mode aerosols in the UTLS over the Tibetan Plateau[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(12):124068.
- [4] CNES. Around the world in eight balloons with Strateole-2[EB/OL]. (2020-05-26)[2020-12-21]. <https://earth.esa.int/eogateway/news/around-the-world-in-eight-balloons-with-strateole-2>
- [5] ISAS. 大気球実験 B20-04 の実施終了について [EB/OL]. (2020-07-25)[2020-12-21]. <http://www.isas.jaxa.jp/topics/002408.html>
- [6] Loon for all, HAPS alliance members outline commercial opportunity in earth's stratosphere[EB/OL]. (2020-04-29)[2020-12-21]. <https://medium.com/loon-for-all/haps-alliance-members-outline-commercial-opportunity-in-earths-stratosphere-7eb85f459fee>.
- [7] NASA. Nasa small business partnership prepares drone for 30 day science flights[EB/OL]. (2020-08-06)[2020-12-17]. <https://www.nasa.gov/feature/ames/nasa-small-business-partnership-prepares-drone-for-30-day-science-flights>.
- [8] Pixabay. KARI's UAV breaks flight altitude record in South Korea[EB/OL]. (2020-09-27)[2020-12-17]. <https://www.intelligentliving.co/amp/karis-uav-flight-altitude-record>.
- [9] 黄宛宁, 李智斌, 张钊, 等. 2019 年临近空间科学技术热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 38-46.
- [10] HAPSMobile Inc. HAPSMobile's sunlider succeeds in stratospheric test flight[EB/OL]. (2020-10-08)[2020-12-17]. https://www.hapsmobile.com/en/news/press/2020/20201008_01/.
- [11] 空客“西风”太阳能无人机完成新一轮飞行测试[EB/OL]. [2020-12-21]. <https://www.aerospacepower.cn/article/912>.
- [12] BAE System. Ground breaking solar powered unmanned aircraft makes first flight[EB/OL]. (2020-02-17)[2020-12-17]. <https://www.baesystems.com/en/article/ground-breaking-solar-powered-unmanned-aircraft-makes-first-flight>.
- [13] World's largest drone is set to transmit 5G connectivity from the stratosphere using an antenna capable producing 480 steerable beams to blanket the UK with the network[EB/OL]. (2020-11-03)[2020-12-21]. <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-8911237/Worlds-largest-drone-set-transmit-5G-connectivity-stratosphere-using-antenna.html>.

- [14] Thales alenia space and thales sign concept study contract with french defense procurement agency for a stratospheric type platform[EB/OL]. (2020-08-01) [2020-12-21]. <https://satelliteprome.com/news/alphabets-loon-launches-balloon-powered-internet-service-in-kenya>.
- [15] Sceye to build stratospheric airships in NM[EB/OL]. (2020-10-13) [2020-12-21]. <http://border-now.com/sc-eye-to-build-stratospheric-airships-in-nm/>.
- [16] Androulakakis S P, Judy R A. Status and plans of high altitude airship program[C]. AIAA Lighter-Than-Air Systems Technology (LTA) Conference, Daytona Beach, Florida, 25-28 March 2013.
- [17] ternet balloon spends record-breaking 312 days in the stratosphere[EB/OL]. (2020-10-29) [2020-12-21]. <https://newatlas.com/telecommunications/loon-balloon-flight-record-312-days/>.
- [18] Bellemare M G, Candido S, Castro P S, et al.. Autonomous navigation of stratospheric balloons using reinforcement learning[J]. Nature, 2020, 588: 77-82.
- [19] Autonomous balloons take flight with artificial intelligence[EB/OL]. (2020-12-02) [2020-12-25] <https://www.nature.com/articles/d41586-020-03313-1>.
- [20] lphabet's Loon launches balloon-powered internet service in Kenya[EB/OL]. (2020-07-10) [2020-12-21]. <https://satelliteprome.com/news/alphabets-loon-launches-balloon-powered-internet-service-in-kenya>
- [21] The best inventions of 2020[EB/OL]. (2020-11-19) [2020-12-21]. <https://time.com/collection/best-inventions-2020/>.
- [22] Up, up, and away: A cosmic balloon ride to the edge of space[EB/OL]. (2020-07-11) [2020-12-21]. <https://worldbestnews.info/up-up-and-away-a-cosmic-balloon-ride-to-the-edge-of-space>.
- [23] Des croisières en ballons stratosphériques en 2025[EB/OL]. (2020-10-09) [2020-12-21]. <https://spacegate.cnes.fr/fr/des-croisieres-en-ballons-stratospheriques-en-2025>.
- [24] ExoMars parachute testing moves forward[EB/OL]. (2020-11-18) [2020-12-26]. https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/ExoMars/ExoMars_parachute_testing_moves_forward.
- [25] The army wants to launch drone swarms behind enemy lines from high-altitude balloons[EB/OL]. (2020-11-30) [2020-12-21]. <https://www.thedrive.com/the-war-zone/37868/the-army-wants-to-launch-drone-swarms-behind-enemy-lines-from-high-altitude-balloons>.
- [26] 中国国防科技信息中心. 美国国防高级研究计划局完成“吸气式高超声速武器”原型系留飞行试验[EB/OL]. (2020-09-02) [2020-12-21]. https://www.sohu.com/a/416096206_313834.
- [27] 美国空军X-60A进行综合飞行器推进系统地面验证测试[EB/OL]. (2020-02-10) [2020-12-21]. <https://new.qq.com/rain/a/20200210a0bp2q00>.
- [28] 美国空军高超声速导弹准备首次试射[EB/OL]. (2020-08-13) [2020-12-22]. https://www.guancha.cn/military-affairs/2020_08_13_561301.shtml.
- [29] 丰松江. 美国VS俄国, 防御高超音速武器谁更胜一筹[EB/OL]. (2020-03-26) [2020-12-21]. http://appapi.81.cn/v3/public/jfbshare/?itemid=244_159737&type=3.
- [30] 号称世界最先进! 俄“匕首”和“锆石”高超音速导弹到底何水准? [EB/OL]. (2020-01-13) [2020-12-21]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1655590812650106836&wfr=spider&for=pc>.
- [31] 俄天空之盾S-500问世意义几何[EB/OL]. (2020-09-09) [2020-12-21]. https://www.sohu.com/a/417190991_114731.
- [32] 印度宣布高超音速飞行测试成功! 速度达到6马赫, 持续时间20秒[EB/OL]. (2020-09-07) [2020-12-22]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1677168794842616112&wfr=spider&for=pc>.
- [33] 日本政府发布高超声速武器研发路线图[EB/OL]. (2020-03-17) [2020-12-21]. <https://new.qq.com/omn/20200317/20200317A0EITH00.html>.
- [34] 中国国防科技信息中心. 德国加入欧盟“天基战区监视及时预警与拦截”高超声速导弹防御项目[EB/OL]. (2020-12-01) [2020-12-21]. https://www.sohu.com/a/435544732_313834.
- [35] 澳大利亚也要搞高超! 高调加入美国高超计划[EB/OL]. (2020-12-05) [2020-12-21]. <https://new.qq.com/rain/a/20201204A0205X00>.
- [36] 中国国防科技信息中心. 澳大利亚高超声速发动机与电池制造业获政府支持[EB/OL]. (2020-11-24) [2020-12-21]. https://www.sohu.com/a/433917670_313834.
- [37] 发动机过早熄火 维珍银河终止第三次载人飞行尝试[EB/OL]. (2020-12-13) [2020-12-21]. https://xw.qq.com/partner/aoyoubrowser/20201213A023JB/20201213A023JB00?ADTAG=aoyoubrowser&pgv_ref=aoyoubrowser.
- [38] 三体引力波, 蓝色起源自己刷纪录: 一箭第七飞! 为何远比不上SpaceX拉风[EB/OL]. (2020-12-13) [2020-12-21]. https://www.sohu.com/a/424440255_735420.

Summary of the hot spots of near space science and technology in 2020

LI Zhibin^{1,2}, HUANG Wanning^{2*}, ZHANG Zhao³, LIU Xiaochun⁴, ZHU Yin²

1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China
2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China
3. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China
4. HIWING General Aviation Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China

Abstract This paper summarizes the research hotspots of near space science and technology in 2020. China, Japan and France-US joint team made some progress in near space experimental exploration and scientific understanding. Near space low dynamic aircraft and its application technology also made remarkable achievements. Softbank's "sunglider" and South Korea's eav-3 injected new vitality into the development of solar powered UAVs. Google's project Loon created a new record of controllable staying area, flight duration and commercial application customers. The HAPS alliance established by more than 10 tycoons in the aviation and telecommunication fields helped to promote the healthy development of near space long endurance platform. In terms of near space high dynamic aircraft and its application technology, the commercial travel of suborbital vehicle was delayed again, and Russia basically formed hypersonic strike capability with land, sea and air-based diversified launches and long, medium and short-range multiple models.

Keywords near space; scientific exploration; lighter-than-air vehicle; solar UAV; suborbital vehicle; hypersonic vehicle ●



(责任编辑 刘志远)