

临近空间科学技术的发展现状及应用前景

黄宛宁, 张晓军, 李智斌, 王生, 黄旻, 蔡榕

中国科学院光电研究院, 北京 100094

摘要 介绍了临近空间的特殊空间位置以及典型气象特征, 梳理了国内外通过天基、地基、原位平台对临近空间进行科学探索和研究的情况, 针对目前对临近空间认知不足的现状, 提出应该以临近空间飞行器为主要平台对临近空间进行科学探索及应用; 回顾了国内外临近空间飞行器(包括高空气球、平流层飞艇和高空太阳能长航时无人机)的技术发展及其在军用和民用市场中的应用现状, 总结了亟需关注的关键问题, 并提出了中国临近空间科技发展和应用的具体建议。

关键词 临近空间; 浮空器; 平流层通信; 高空超压气球; 高空飞艇; 长航时无人机

临近空间(near-space), 也有“近空间”“亚轨道”“空天过渡区”等称呼。在美国, 有人称其为“横断区”, 而在中国, 则有“中层大气”“亚太空”“超高空”“高高空”等称呼^[1-2]。临近空间处于传统航空器的最高飞行高度和卫星的最低轨道高度之间, 如图1所示, 主要包括平流层大部分、中间层和一部分增温层区域, 纵跨非电离层和电离层, 空气稀薄, 存在臭氧、紫外、辐射等特殊环境, 温度随高度变化呈现出一定规律, 存在重力波、行星波、大气放电等特殊现象^[3]。因为其独特的空间环境, 成为人类认知地球空间的新领域。从地球气候的角度来看, 可侧重从能量、通量、动量、物质交换等方面来认知临近空间与空间天气、临近空间与低层大气之间的相

互作用^[4-5]; 从临近空间环境变化规律来看, 可侧重从临近空间环境的探测、建模和预报等方面来认知临近空间环境的多时空尺度变化特性^[6]; 从利用临近空间的角度来说, 可侧重从飞行器/探测器工程实施来认知临近空间气体动力学规律、工程材料的使用性能以及材料与环境的相互作用(图1)^[7]。

长期以来, 人们对临近空间的科学探索从未停止, 对临近空间的科学认识也是一个逐步深入的过程, 经历了20世纪50年代零星探测、70年代初步认识、90年代机理研究, 再到近十几年来的系统研究阶段。随着人们对临近空间认知的加深, 临近空间飞行器军事应用需求迫切, 临近空间研究进入了科学探测与应用研究并重的新阶段。各国不仅关

收稿日期: 2018-12-06; 修回日期: 2019-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61733017); 中国科学院A类战略先导科技专项(XDA17020203)

作者简介: 黄宛宁, 高级工程师, 研究方向为浮空器测控、组网通信技术, 电子信箱: hwn@aoe.ac.cn; 张晓军(通信作者), 博士, 研究方向为计算机信息技术, 电子信箱: xjz787@aoe.ac.cn

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.21.005

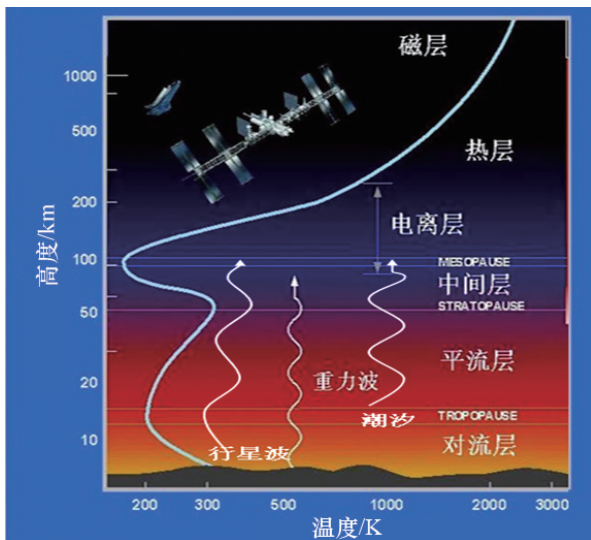


图1 临近空间构成

Fig. 1 Structure of near-space

注临近空间的科学规律认识,也特别关注与其相关的工程和应用技术,尤其是这一区域环境、变化及其对高速飞行器的影响。临近空间的观测和研究迎来了空前的热潮。

1 国内外临近空间科学研究现状

1.1 大气与空间环境研究

20世纪中期,主要关注临近空间成分、密度、电磁和辐射参数,20世纪60、70年代开始探测平流层和中间层的大气温度、成分。1981年美国太阳中间层探索卫星、1991年美国高层大气研究卫星、2001年瑞典等国Odin小卫星、2002年欧空局ENVISAT卫星、2007年美国AIM卫星,开始关注大气与空间天气的相互作用,认为60 km以上的中间层、热层是行星与地球空间相互作用的主要区域^[8]。

1.2 “极地”上空物质能量交换研究

“极地”不仅包括传统意义的南北极,青藏高原也被认为是第三极,具有特殊的研究价值。

南北极极地冷源与赤道热源是地球大气基本驱动力;开放磁力线,两极是空间环境与低层大气耦合的重要窗口。国际上已在南极建立了多个永久观测基地,开展地球物理、大气、冰川及空间环境的观测研究,中国建立了中山站、长城站和泰山站,

并于2008年建成首个内陆综合科考站昆仑站(DOME A)^[8]。

青藏高原被认为是地球对流层大气物质进入全球平流层的重要通道,成为国际上研究热点之一,其中与之相关的亚洲夏季风水汽、臭氧、粒子联合探空实验(SWOP)计划成为国际重要实验计划,中国利用球载探空仪观测了地面至25 km高度的臭氧、水汽、气溶胶垂直分布^[8]。

1.3 临近空间科学探测手段

对临近空间的认知水平取决于探测手段的技术水平,按照探测器所处物理空间位置不同,可分为地基、天基和原位三大类。

1.3.1 地基探测

地基探测手段利用主/被动手段进行观测,但是由于临近空间缺少对雷达信号敏感的示踪物质,地基雷达观测始终存在高度覆盖空白、观测参数不全的问题,典型的地基观测设备包括中频、流星、MST(mesosphere-stratosphere-troposphere)、激光等雷达及气辉FPI和气辉成像仪等被动光学设备^[9-11]。其中,流星、中频、MST等无线电雷达技术较成熟,国际上每种仪器均有10~20个观测站的规模^[10-11]。在国家重大科技基础设施项目——子午工程(东半球空间环境地基综合监测子午链)、中国气象局“十一五”重大项目——气象监测与灾害预警工程及中国科学院的“日地空间环境监测研究网”等支持下,中国研制出中频雷达3部、流星雷达6部、MST雷达2部、VHF相干散射雷达3部^[10]。激光雷达技术是最近十几年快速兴起的新技术,国际上约有10余部较有影响的激光雷达站在运行,中国有5~6部^[10]。此外,中国科学院大气物理研究所和中国科学院地质与地球物理研究所目前正在研究“多波段多大气成分主被动综合探测系统”和“三亚非相干散射雷达”,前者将在青藏高原建立由多台激光雷达组成的中高层大气无缝隙探测系统,后者将在海南岛建设大功率相控阵非相干散射雷达进行电离层和高层大气的众多参量的探测^[10]。

1.3.2 天基探测

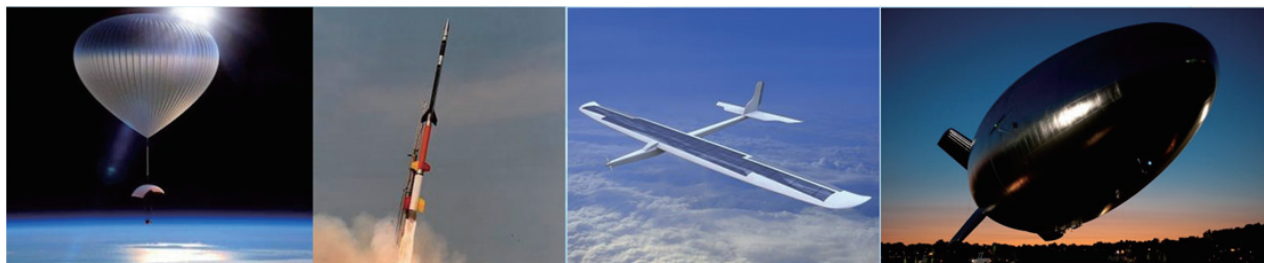
自20世纪中叶起,以美苏为代表的空间技术大国就将临近空间的探测和研究作为重要的研究

发展领域。用于临近空间大气参数探测的卫星主要有美国的高层大气探测卫星(UARS)、逃逸层/低热成层/电离层探测卫星(TIMED), 中国的风云三号和全球二氧化碳监测科学实验卫星也具有临近空间部分关键参数的观测能力^[10]。此外, 中国台湾地区的COSMIC(6颗卫星)等掩星星座也具有临近空间40~50 km高度以下的中性大气密度、温度和

电离层电子浓度的探测功能^[11]。

1.3.3 原位探测

目前, 国内外比较成熟的临近空间原位探测平台主要是高空气球(图2(a))和探空火箭(图2(b)), 临近空间太阳能无人机(图2(c))和平流层飞艇(图2(d))作为有应用前景的临近空间科学探测和实验平台, 处于关键技术突破的阶段。



(a) 高空气球

(b) 探空火箭

(c) 太阳能无人机

(d) 平流层飞艇

图2 临近空间原位探测平台

Fig. 2 In-situ probe using near-space aeronautical platforms

高空气球是人类最早使用的空间探测手段, 具有200多年的历史, 也是目前唯一成熟能够达到临近空间平流层中上部开展各种科学观测和实验的平台, 因此也称为科学气球。美国国家航空航天局(NASA)、日本宇宙航空研究开发署(JAXA)、法国国家空间研究中心(CNES)等设有专门的高空科学研究机构, 建立了包括极地在内的多个高空气球发放基地, 服务于科学实验和探测活动^[12]。据不完全统计, 国内外开展各种高空科学气球飞行试验已达4000多次^[12-13]。

中国科学院在20世纪70年代末开展了高空气球科学工程, 进行了大气探测、天文观测、太阳物理、环境科学、微重力实验、空间育种等各种飞行实验, 累计飞行200次^[13]。

探空火箭也是最早用于临近空间探测的手段, 至今仍是国内外临近空间探测的重要手段, 可将探测仪器带入1000 km高度近地空间(覆盖临近空间)开展探测和试验, 常用于对大气成分、密度、温度、风场等要素进行原位探测, 对研究中高层大气、电离层的复杂物理过程具有重要科学意义^[13]。

在2011—2016年, NASA发射了96枚探空火箭, 其中用于中高层大气、电离层探测研究的有26

枚。同期, 欧洲太空局(ESA)发射了约40枚探空火箭, 其中有约13枚用于中高层大气、电离层探测, 取得了重要的发现和研究成果^[13]。

“十二五”和“十三五”期间, 中国科学院国家空间科学中心在“子午工程”和国家高技术研究发展计划(863计划)支持下, 成功组织实施4发探空火箭发射, 取得了中国海南岛上空电离层和中高层大气参数的一些宝贵数据^[14]。但是与国外相比, 中国临近空间火箭探空探测的区域少、规模小、频次低、积累的数据少, 取得的研究成果还不显著。

1.3.4 原位探测载荷

临近空间特殊的环境和平台, 对原位探测载荷的要求不同于地面和太空, 飞行载荷要求小型化、轻量化、耐低温低气压等。基于高空气球和探空火箭的原位探测载荷主要包括朗缪尔探针、电场仪、磁强计、大气成分仪、风场测量仪、中性密度计、中性大气质谱仪、空间辐射计、高能中子谱仪等, 可实现空间电场、磁场、离子浓度、电子浓度、中高层大气成分、风场、密度、气压、温度、空间气体质谱线、电离层电子浓度总含量(TEC)、辐射量、中子谱线等参数的探测^[14]。目前国内已经开展利用球载探空仪观测地面至25 km高度的臭氧、水汽、气溶胶

垂直分布,主要观测地点包括拉萨、昆明等地^[14]。

尽管对临近空间的科学研究取得了一定的进展,但相对于其他相邻圈层,临近空间探测数据匮乏,原位探测能力尤其不足,科学研究缺乏有效数据支撑,难以满足临近空间飞行器长期驻留与控制的应用需求。

2 国内外临近空间飞行器发展现状

无论是军事应用还是科学探索,临近空间飞行器都是重要的载体和平台,因此它成为各国项目研究关注的热点。临近空间飞行器将是探索开发利用临近空间的主角,按照飞行速度 1 Ma 为界,大于 1 Ma 的为高速飞行器,小于 1 Ma 的为低速飞行器^[15]。高速飞行器中,除了研究热点的再入式滑翔飞行器和高超声速巡航飞行器之外,探空火箭作为一种成熟的临近空间垂直探测平台,往往被人们忽略。低速飞行器中,按照其飞行特点分为超长航时太阳能无人机、平流层飞艇和高空气球,其中高空气球技术成熟度相对较高,已经在通信、空间科学探测、新技术验证等方面有较多应用^[15-16]。高速临近空间飞行器主要包括高超声速飞行器和探空火箭等,前者主要用于远程快速到达、高速精确打击、快速侦查、战略威慑等军事任务,后者主要用于科学探测^[17]。分类如图 3 所示。

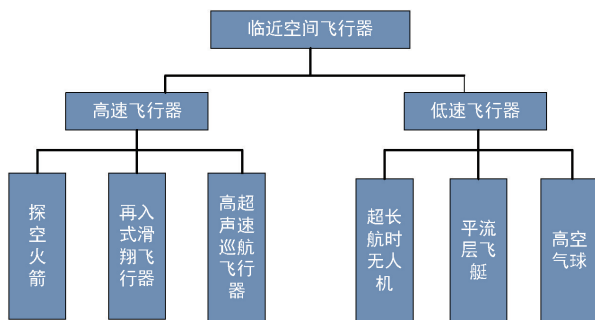


图3 临近空间飞行器分类

Fig. 3 Categories of near-space platforms

2.1 低速飞行器

2.1.1 高空气球

高空科学气球是目前唯一能在平流层较长时

间滞空的运载平台,能够与卫星、载人航天器和其他平台很好地相互配合补充;能够快速实现创新的科学思想,得到有重要科学价值的发现和成果;为实施大型空间计划进行科学思想、仪器原理、技术方法的有效低成本验证。美国国家航空航天局(NASA)、法国空间研究中心(CNES)、日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)、欧洲航天局(ESA)等知名航空航天研究机构都大量使用高空科学气球平台在临近空间进行科学探测活动,都有国家基础科研经费的持续稳定支持,每年的飞行活动在 20 次以上,取得了大量的成果(图 4、表 1)^[18-19]。

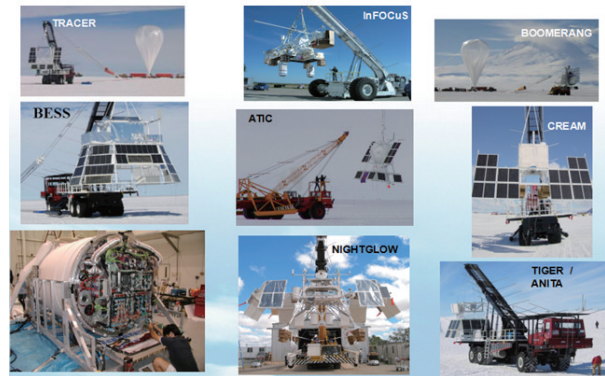


图4 近年来国际著名的高空气球计划

Fig. 4 Some near-space research projects

超压气球是高空科学气球平台的发展方向,美国著名的超长航时气球 ULDB 计划于 1997 年启动,目标是 60 万 m³、载荷 1.5 t,飞行高度 35~38 km,飞行持续时间 100 d^[20]。2008 年创造了飞行 54 d(20 万 m³)的记录,取得很好的科学探测效果^[20]。2016 年在南半球中纬度飞行 46 d,实用性能已经非常接近计划目标^[20]。

中国科学院在 20 世纪 70 年代末即在国内率先开展了高空科学气球的研究,进行的球载硬 X 射线调制望远镜(HXMT)飞行试验(图 5)、球载微重力试验、球载太阳望远镜试验等为空间科学及大气科学探索和技术发展做出了巨大贡献^[21]。中国科学院开展了飞行试验 200 余次,最高高度 42 km,最大载重 1.9 t,最大航时 72 h^[21]。2018 年 3 月中国科学院启动了 A 类战略性先导科技专项——“鸿鹄”专项,旨在发展重载浮空器、持久驻空超压浮空器、可

复用动力浮空器,搭载临近空间中高层科学探测平台、球载临近空间太阳能无人机系统和其他相应载荷,构建临近空间科学实验系统,提升临近空间环境认知水平,在探索地球生命起源、拓展人类活动领域、提升临近空间应用保障水平、支撑临近空间

利用等方面发挥示范带动作用。

2017年9月10日,由中国科学院光电研究院研制的超压气球在内蒙古首飞成功,该球体体积约为7000 m³,平飞高度25 km,载重能力150 kg,总飞行时间8 h,在超压气球研制方面迈出了成功的第一步^[21]。

表1 国内外高空气球进展对比

Table 1 Comparison of research progresses of high altitude balloons at home and abroad

机构	气球类型	最大飞行高度/km	最大续航	最大载荷重量	年均飞行次数
NASA:空间科学	零压	49.4	55 d	3.6 t	15~20
谷歌LooN	超压	22	190 d	<25 kg	>30
NASA:ULDB	超压	35	54 d	2.5 t	1~2
中国科学院	零压	42	3 d	1.9 t	1~5
中国科学院	超压	25	8 h	150 kg	1

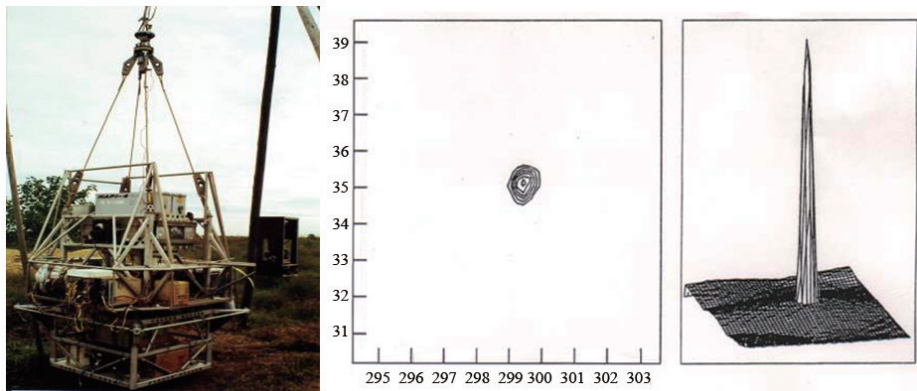


图5 中国科学院球载HXMT对天鹅座候选黑洞的成像效果^[16]

Fig. 5 Black-hole image acquired by HXMT

2.1.2 临近空间太阳能无人机

太阳能无人机是一种利用太阳能作为动力的临近空间高空长航时无人机,在飞行过程中通过敷设在机体表面的太阳能电池将太阳能转化为电能,其中一部分用于维持无人机飞行,另一部分则储存于储能电池中,用于维持太阳能无人机夜间飞行^[22-23]。太阳能无人机具有飞行高度高、飞行航时超长等特点,应用前景十分广阔,已成为临近空间低动态无人机的一个重要发展方向。目前,欧美等发达国家高度关注并竞相发展太阳能无人机,经过40余年的发展,已逐步由技术验证向工程化应用发展(表2)。

NASA“太阳神”(Helios)无人机最高飞行高度29.5 km,2003年飞行中解体^[23]。韩国EVA-3太阳能无人机,2016年进入18.5 km平流层高度,飞行时间90 min^[24]。2018年7月11日,空客西风S(Zephyr S)无人机首飞(图6),在飞行了25 d 23 h 57 min后于2018年8月5日降落于亚利桑那沙漠,打破了西风7原型机2010年的14 d飞行记录,创造了飞行时间和飞行高度的非官方记录^[24]。

2017年5月,中国航天科技集团第十一研究院“彩虹”T4(图7)临近空间太阳能无人机首飞,飞行高度最高20 km,总飞行时间16 h,成为国内首家进入临近空间高度的太阳能无人机^[24]。

表2 国内外太阳能无人机进展对比

Table 2 Comparison of research progresses of near space solar UAV at home and abroad

国家	型号	最大飞行高度/km	续航	载荷重量/kg
美国	太阳神	29.5	18 h	—
英国/法国空客	西风7	22.6	25 d 23 h	<5 kg
韩国	EVA-3	18.5	90 min	—
中国	彩虹T4	20	16 h	—



图6 西风S无人机

Fig. 6 US high-altitude UAV program

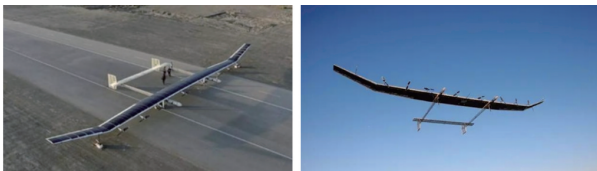


图7 “彩虹”T4 太阳能无人机

Fig. 7 Rainbow T4 Solar-energy UAV

2.1.3 平流层飞艇

平流层飞艇是一种带动力的可控浮空器,使用太阳能电池作为循环能源,预期在平流层高度定点驻空达数月之久,非常适合作为新型信息平台,用来进行区域性的高精度对地观测、通信中继、区域预警和导航等应用^[25]。

国外比较著名的几个计划分别为美国的HISentinel(高空哨兵)系列,洛克希德马丁的高空长航时验证版HALE-D飞艇,以及传感器结构一体化(integrated sensor is structure, ISIS)飞艇^[25]。

HIsentinel80平流层飞艇2010年11月发放,动力出现故障,未能实现最终目标^[25]。洛克希德·马

丁公司的HALE-D飞艇,2011年7月飞行,高度9700 m出现排气阀结冰问题,被迫降落^[26]。美国的ISIS(integrated sensor is structure)飞艇(图8)设计为巨大口径的雷达与艇体结构结合,能够在20 km高空驻留,持续执行预警侦察任务^[26]。该项目因为结构超重问题,首次飞行迟迟未能进行,已经远远落后于计划进度(原计划2013年试飞)^[26]。

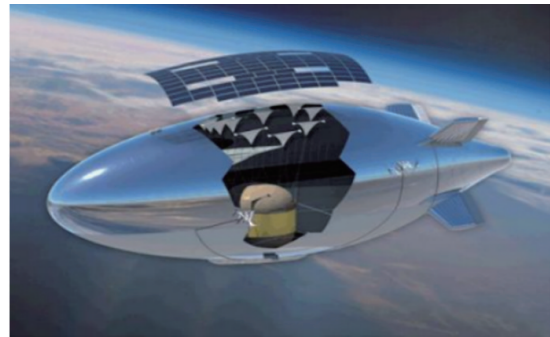


图8 ISIS飞行概念图

Fig. 8 ISIS Airship, Lockheed Martin

中国平流层飞艇研究处于世界领先水平,2012年中国科学院发放成功的KFG79飞艇是当时世界上体积最大(1.8万 m³)、推进功率最大(30 kW),并且是首艘受控飞行的平流层飞艇^[27]。2015年南江空天的“圆梦号”飞艇(图9、表3)成功试飞,进入平流层^[27]。近年来,中国电子科技集团公司第三十八研究所也开展了平流层飞艇关键技术研究,并取得了重要进展^[28-29]。

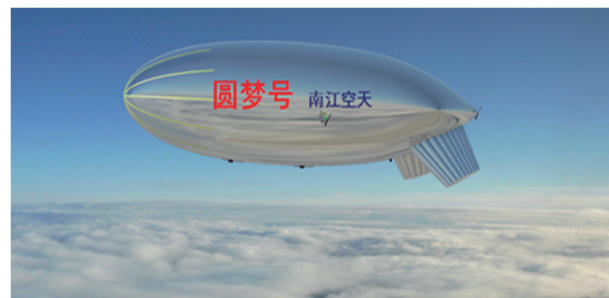


图9 南江空天公司的“圆梦号”飞艇概念图

Fig. 9 Concept of "YuanMeng" Airship

2.2 高速飞行器

临近空间超声速飞行器依托临近空间独特的空间位置,具有飞行距离远、飞行时间长、飞行速度

表3 中国、美国平流层飞艇进展对比

Table 3 Comparison of research progresses of stratosphere airships between China and the United States

名称	飞行时长/min	平流层动力飞行		动力试验科目
		飞行时长/min	时长/min	
中国	KFG79	181	52	零速转向、迎风巡航、推进试验、人工驾驶 持续可控、动力飞行
	圆梦号	—	—	
美国	高空哨兵20	301(至吊舱落地)	53	螺旋桨转速试验,因氦气泄漏试验提前结束 在9753.6 m高度因异常无法继续升空,降落
	HALE-D	163	0	

高等特点,在军事领域通过配装侦察载荷和武器载荷,可实现对空中/陆上/海上目标的“侦打一体”作战,形成上可制天、下可制空、制地、制海的新型武器装备,在民用领域可形成远程、高速、大型运输平台,具有广阔的应用前景。

2.2.1 超高速飞行器

美国在20世纪60年代提出了一系列高超声速

飞行器发展计划,先后建造了一系列用于高超声速飞行试验的飞行器;20世纪90年代制订并实施了即时全球打击计划,以实现在1 h内对全球任何目标实施打击的能力^[30]。

根据飞行特点,超高速飞行器可分为助推滑翔式和主动巡航式两大类,目前最有代表性的型号如表4所示^[30]。

表4 美国主要临近空间超高速飞行器计划

Table 4 Major near space ultra-high speed vehicle programs of US

项目/型号	武器化定位	最大射程/km	最大速度/Ma	最大飞行高度/km	巡航高度/km	飞行时间/s
X51A	区域快响作战	~1500	8	35	18~27	800
AHW	防区外快速打击	~6000	15	100	35~55	2100
HTV-2	全球快速打击	~16000	22	300	30~60	3600
SR-72	ISRK平台	4800~5400	6	24	20~24	—

HTV-2是典型助推-滑翔类弹道飞行器,美军预期目标是搭载5 t重载荷,在1 h内抵达全球任何

地方^[30]。图10给出了HTV-2飞行器的理想飞行弹道示意图,全程飞行弹道可分为以下4个阶段^[30]。

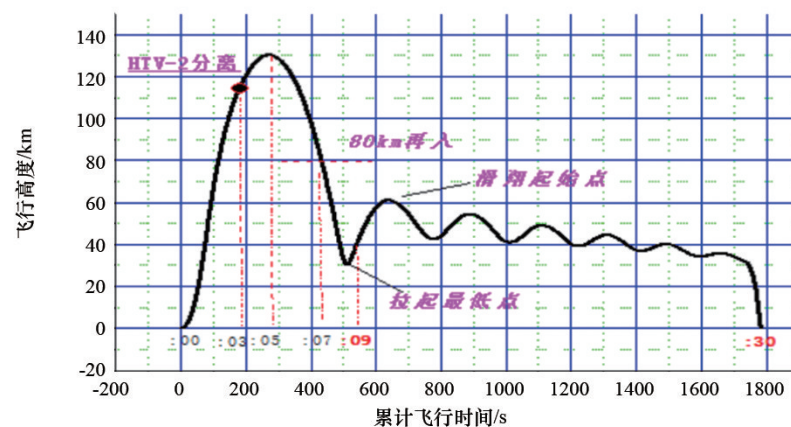
图10 美国HTV-2高超声速飞行器任务剖面^[30]

Fig. 10 Ideal flight trajectory indication of hypersonic vehicle HTV-2

- 1) 初段/发射段:即助推器工作段,至助推器分离止。
- 2) 过渡段/再入拉起段:助推器分离后至拉起进入滑翔状态。
- 3) 中段/再入滑翔段:即再入滑翔状态段。
- 4) 末段:即末端攻击飞行阶段。

HTV-2在2010年和2011年分别进行了两次飞行试验,均在进入滑翔段之后与地面失去联系^[30]。

X-51A是典型的高超声速巡航类临近空间飞行器,通常采用固体助推器发射,当飞行器达到一定高度、速度后,助推和巡航级分离。然后,巡航级利用自身发动机加速爬升到一定高度、速度后,进入巡航飞行模式(图11)。接近目标后,开始下压,实施对目标的攻击。吸气式高超声速巡航飞行器携带的动力装置一般为超燃冲压发动机。受超燃冲压发动机的约束,超声速巡航飞行器的飞行高度

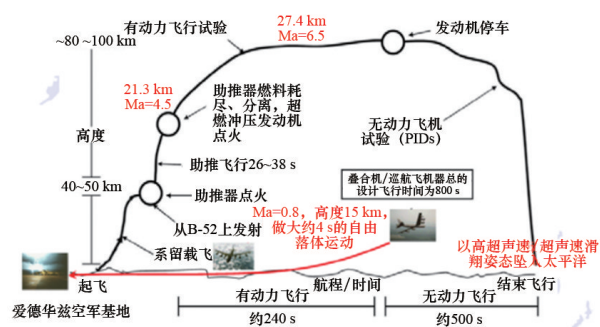


图11 美国X-51A高超声速飞行器任务剖面^[30]

Fig. 11 Ideal flight trajectory indication of hypersonic vehicle X-51A

低于助推-滑翔飞行器,一般在20~40 km,巡航速度通常马赫数小于10^[30]。

除了美国外,俄罗斯、法国、澳大利亚、德国、印度、日本、欧盟等国家或机构均开展了超高速临近空间飞行器的研究计划,各有特色并均取得了可观的进展(表5)^[30]。

2018年12月26日,俄国防部完成了“先锋”(Avangard)高超声速导弹服役前的最后一次发射试验(图12),高超声速弹头通过水平和垂直机动,命中6000 km外的预定目标,各项技术参数全部得到验证^[30]。俄罗斯总统普京表示该导弹将于2019年开始服役,副总理尤里·鲍里索夫称“先锋”导弹在试验中达到速度27 Ma。“先锋”系统由新型Yu-71高超声速滑翔弹头和作为运载器的导弹组成,目前采用的第一种运载器为SS-19导弹,未来还将配装RS-28“萨尔马特”洲际弹道导弹等^[30]。

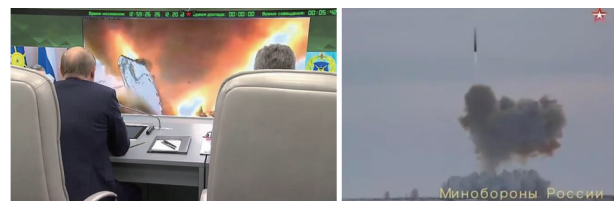


图12 普京观摩试射“先锋”高超音速导弹

Fig. 12 Vladimir Putin watches the tests of "Pioneer" hypersonic missile

出于保密需要,媒体对中国高超声速飞行器的报道很少,2018年8月3日试射的“星空-2”型高超声速乘波体飞行器(图13)是此类飞行器的第一次

表5 各国临近空间超高速飞行器计划对比

Table 5 Comparison of national near space ultra-high speed vehicle programs

国家	计划名称	关键技术	飞行速度/Ma
俄罗斯	冷,针,鹰,彩虹	超燃冲压发动机模型	最高14
俄罗斯	先锋,匕首	助推滑翔弹头技术	最高27
法国	Promethee, LEA 计划	变几何超压冲压发动机;双模态冲压发动机	最高12
澳大利亚	Hyshot, Hycase, Hifie	三维乘波器	3~10
德国	SHEFEX	再入技术	11
印度	HSTDV	—	5~7
欧盟	LARP-CAT	SST超声速运输机	8
中国	星空2号	高超声速乘波体	5~6
中国	东风-17	高超声速飞行器	—
中国	攻击-2	高超声速飞行器	—



图13 星空2号发射图片

Fig. 13 Star-2 launching picture

在主流媒体大幅度公开曝光。该飞行器弹头最大试验飞行速度已经达到5~6 Ma的水准,在实验中完成了主动段转弯、抛罩/级间分离、试飞器释放自主飞行、弹道大机动转弯等动作,并最终按预定弹道进入落区^[31]。“星空2号”被称为中国开始发展第二代高超声速滑翔器的标志。

2019年10月1日,东风-17正式在国庆阅兵中亮相,标志着高超声速武器已经正式列装,同时展示的攻击-2无人机也属于高超声速飞行器。

2.2.2 探空火箭

探空火箭的初始最大速度可以超过4 Ma,可以归为高速临近空间飞行器^[32]。探空火箭也是最早用于临近空间探测的手段,至今仍是国内外临近空间探测的重要手段,可将探测仪器带至1000 km高度近地空间(覆盖临近空间)开展探测和试验,常用于对大气成分、密度、温度、风场等要素进行原位探测,对研究中高层大气、电离层的复杂物理过程具有重要科学意义^[32]。

2011—2016年,美国NASA发射了96枚探空火箭,其中用于中高层大气、电离层探测研究的有26枚(图14)^[32];同期,ESA发射了约40枚探空火箭,其中有约13枚用于中高层大气、电离层探测,取得了重要的发现和研究成果^[32]。

中国主要开展探空火箭科学研究的单位是中国科学院国家空间科学中心。1986年中国科学院海南探空火箭发射场开始建设;1988年“织女一号”气象火箭,1989年“织女三号”探空火箭;2010年子午工程气象火箭,气象探空仪“海燕1A”;2011年子午工程探空火箭“鲲鹏1”携带了郎缪尔探针、



图14 探空火箭上安装的传感器

Fig. 14 Sensors on sounding rocket

电场仪、大气成分仪等探测设备,2013年空间环境垂直探测“鲲鹏1A”携带了郎缪尔探针、电场仪、钽释放装置,2016年空间环境垂直探测“鲲鹏1B”(图15)携带了郎缪尔探针、电场(磁场)仪、高空落球^[32]等设备。

图15 2016年“鲲鹏1B”探空火箭发射场景^[17]

Fig. 15 "KunPeng" sounding rocket

与NASA和ESA相比,中国的探空火箭应用水平,无论从数量上,还是载荷能力、载荷水平、经费支持力度方面均存在较大差距。

目前除了高空科学气球,还缺乏能在20 km以上高度长期可靠飞行的航空器,目前国际上缺乏高国界的行为规则,新的规范是未来国际规则制定的新焦点。开发利用临近空间是中国实现航空航天超越的切入点。

3 临近空间应用需求与现状

3.1 临近空间应用需求

临近空间以其独特的地理位置优势,在民用和军事领域都有着广泛的应用需求和场景。民用的应用需求主要有科学探测与实验、通信、城市综合服务、对地观测等;军用需求包括快速突防、预警监测、侦察监视、电子干扰和通信导航等。

3.1.1 科学探测与实验

利用高空气球、探空火箭等科学实验平台,可以开展以下科学和技术试验:空间天文(红外、X/γ射线、粒子天体物理等)、大气科学、太阳物理、电离层、地球物理、环境科学。可进行空间和地球观测仪器,行星探测试验、空间飞行器及再入试验等。

3.1.2 平流层通信

宽带无线接入、大数据收集、推送和无线网络(Wi-Fi)覆盖等服务^[33-39];为偏远地区、海洋用户提供低成本快速网络接入服务、通信中继^[40-42];自然灾害、突防事件的快速响应、移动电话网络和无线网络灾后重建^[43-45]。

3.1.3 城市综合服务

长时间停留在城市上空,对城市建筑、交通、排放等进行实时监测^[46];建立城市和相关行业大数据资源库,服务于城市精细化管理、环境与污染管理、气象监测与精细预报等领域^[46];可用于反恐维稳持久监视等需求^[46]。

3.1.4 对地观测

临近空间飞行器平台搭载可见光、微波、激光雷达等遥感器载荷,获取高分辨率遥感影像数据,实现国土资源的精细化普查^[46];实时对农作物、草原和森林等提供长势、病虫害、火警预警等观测的需求^[46]。

3.1.5 快速突防

2小时内打击全球任何目标,“外科手术”式打击、战略快速侦察、新质作战能力需求^[47];高超声速飞行器、有效遏制敌方防空系统、干扰对方探测雷达的需求^[47];空天一体化、反卫星、夺取“制天权”的需求。

3.1.6 预警探测

为来袭弹道导弹、巡航导弹、飞机等提供预警,

服务于导弹防御系统中的预警功能需求^[48-49];陆、海、空、天信息系统通过组网和联合方式,实现战场信息立体感知、持久感知和精确感知、远、近预警探测的能力需求^[48-49]。

3.1.7 侦察监视

大范围实时侦察和长时间连续监视、对战区进行“凝视”侦察监视的需求^[50];对多目标、移动目标的连续侦察、标识、特征描述和定位的需求^[50];实时获取打击前后的目标图像、快速完成打击效果评估的需求^[50]。

3.1.8 电子对抗

对敏感地区进行常态化电磁频谱的监测分析的需求,为应对复杂电磁环境下作战奠定基础;向对方地面和海上警戒、搜索引导、目标指示雷达等进行长时间、不间断干扰的需求^[50];播发增强的卫星导航信号,压制对方对卫星导航信号的干扰;攻击对方重点的C⁴ISR系统的需求^[50]。

3.1.9 通信导航

“平流层卫星”、不受地形的限制实现大容量、大范围的超视距宽带通信的需求;地面、海上、空中和太空的通信中继;“高空中继路由器”需求;导航增强、通导遥一体化、战区导航定位系统、提高卫星导航系统的抗干扰能力和定位精度的需求^[51]。

3.2 国内外临近空间应用现状

基于高空科学气球较高的技术成熟度,临近空间应用已有案例以高空气球为主,主要应用方向为空间科学和大气科学的探索,除此之外还包括临空投放与发射、通信服务、新技术验证试验、临近空间载人观光等。

3.2.1 临近空间投放与发射

火星大气密度仅有地球表面的约1%,地球上32~33 km高度的大气密度是地面空气密度的1%。可以利用地球高空大气稀薄的条件模拟火星大气。NASA的低密度超音速减速器(LDSD)计划就是利用高空气球将推进器带入36 km高度,投放后加速到4 Ma,然后使用减速器及减伞降速,以此检验火星着陆用大载荷减速器及降落伞的性能^[52]。图16是该计划的飞行任务剖面。

中国也有类似的应用,例如利用临近空间的高

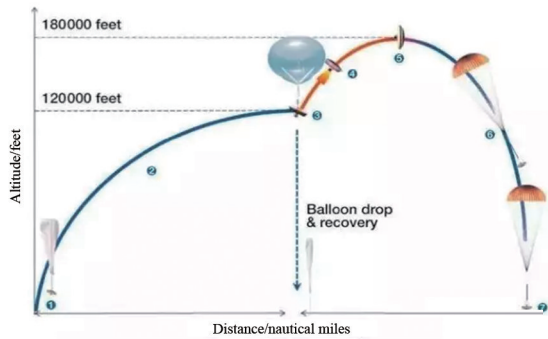


图 16 美国的LDS任务剖面

Fig. 16 LDS Mission profile

度,高空气球发放的便捷性、经济性,2003年中国科学院高能物理研究所与德国研究机构合作开展了高空气球投放微重力试验舱的试验(图17),投放高度40 km,持续60 s达到 $1 \times 10^{-4} g$ (g 为重力加速度),微重力燃烧和微重力细胞电融合试验取得圆满成功。2015年中国科学院光电研究院与国内某高校合作开展了高空翼伞飞行器的临空投放试验^[53],翼伞宽度超过15 m,投放高度20 km,飞行器投放后工作正常,试验取得圆满成功。



图 17 中国科学院开展临近空间投放试验

Fig. 17 High-altitude platform release experiment

3.2.2 临近空间通信服务

临近空间飞行器平台进行微波无线通信相比卫星平台来说,传输路径短,延时小。相对于航空

平台来说覆盖范围大、滞空时间长,具有明显的优势。美国的Google公司率先开展了利用临近空间超压气球平台进行通信服务应用方面的研究^[54]。

Google在2013年6月公布的Project Loon项目采用超压气球技术(图18),气球计划运行高度距离地面20 km,预期持续飞行时间大于100 d^[54]。每一个Google气球通信所覆盖的地面范围直径40 km(相当于2个纽约市面积),通过无线射频链路与48 km以内的气球连接,构成无线网状网络^[54]。球载导航设备可通过高度控制追踪不同的平流层风向,以保证气球覆盖的区域恰恰是那些需要通信服务的方



图 18 Google气球升空机器组网效果

Fig. 18 Google's project Loon-Stratospheric balloon network

Project Loon项目进展迅速,2016年底,单个气球的最长飞行时间已经超过190 d,并且谷歌曾控制单个气球在秘鲁上空驻留了98 d^[54]。2017年5月,谷歌气球与西班牙电信运营商Telefonica进行合作,为遭遇强降雨侵袭的秘鲁提供快速重建通信服务^[54]。仅在72 h内就为4万 km²的地区提供了基础互联网连接,提供了超过160 GB的数据流量,2017年9月,Loon气球还为遭遇飓风袭击的波多黎各提供了应急通信服务^[54]。

3.2.3 临近空间新技术验证试验

1) NASA的Flight Opportunity计划。

NASA对由私营公司提供的飞行平台进行飞行试验提供部分经费支持,鼓励科学家使用这些技术成熟的低成本平台进行空间科学的新技术验证,以提高其技术成熟度。NASA提供的平台包括临近空间的亚轨道可回收火箭、高空科学气球和高速飞行器(图19)等^[55]。

2) 中国临近空间技术验证试验。

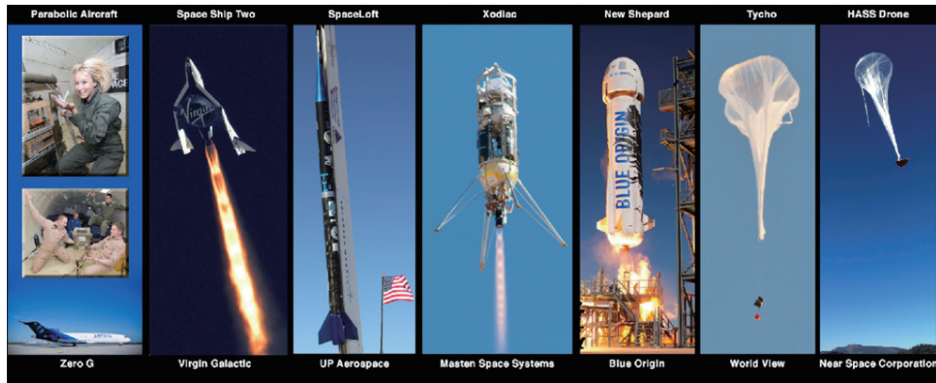


图19 NASA的Flight Opportunity计划示意

Fig. 19 Concept of Flight Opportunity

中国科学院高能物理研究所在2000年以后利用高空科学气球平台,陆续开展了10余次新技术新装备(图20)的飞行验证工作,取得了100%的成功率,获得丰硕成果^[56]。

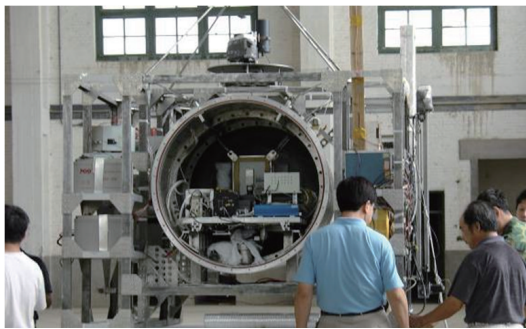


图20 空间科学仪器在高空气球平台上进行技术验证

Fig. 20 Instruments which used in space were demonstrated on high altitude science balloon firstly

3.2.4 临近空间载人观光旅行

美国的worldview、西班牙的infinity、中国深圳光启技术有限公司(图21)3家民用公司近几年均



图21 光启公司旅行者载人舱原型

Fig. 21 Prototype of "Space Traveller", KuangChi Science

提出了利用高空科学气球进行载人临近空间观光的商业运作概念,并开展了一系列无人太空舱的高空气球飞行测试,但到目前为止还没有一家进行过载人的飞行测试。

4 需要关注的问题

人类在临近空间的认知深度、抵达和驻留临近空间的能力、对临近空间的有效利用等方面,相比临近空间相邻的大气圈层还有很大差距,总体上存在“认不清、留不住、用不好”现象,主要表现在以下方面:(1) 对临近空间环境认知不足,不能有效支撑对临近空间的开发与利用;(2) 临近空间飞行器技术发展不成熟,高速飞行与区域长期驻留困难;(3) 应用系统技术发展不成熟,面向重大需求的应用潜力挖掘不足。因此,在临近空间的研究与开发应用上,需要重点关注如下问题。

1) 临近空间特殊现象认识与环境演变、物质能量交换规律。

临近空间环境关键参数时空演变规律——基础科学问题,临近空间金属层和等离子不均匀体机理——热点问题,“极地”上空物质能量垂直运输与水平扩散机理——热点区域,与相邻低层大气层/电离层的耦合作用——重要科学问题^[57]。

2) 临近空间燃烧与新型动力。

临近空间燃烧与新型动力研究是临近空间飞行器发展的工程基础。临近空间环境下稀薄气体

效应,极低雷诺数流动机理,高效燃烧、超高效能换热、高空低雷诺数下发动机性能衰减特性和抑制方法等^[57]。

3) 临近空间飞行器材料工程问题。

临近空间飞行器材料工程与应用研究是临近空间飞行器设计研发的应用基础。高比强长寿命的高分子柔性薄膜复合材料,高效轻质柔性薄膜太阳能电池,高比强碳纤维复合材料^[57]。

4) 解决临近空间飞行与应用基础问题:(1) 基于多源环境信息感知的浮空器动力学控制与持久驻空问题^[58];(2) 高超声速飞行与环境多物理效应耦合作用规律和先进动力问题^[58];(3) 临近空间导航通信遥感学科交叉与体系化深度融合模式^[58]。

5) 新的应用模式问题:(1) 临近空间技术的发展为临近空间的开发利用提供了支撑,根据应用需求的不同,采用不同临近空间平台和技术,实现应用效益的最大化^[59];(2) 探讨临近空间临近空间开发和飞行器的发展对未来战争的影响,开展军事应用理论和技术的研究,完善空天一体的新型军事应用模式^[59]。

5 结论

临近空间因其独特的地理位置优势,成为当前科学研究的热点、大国博弈的战略要地,国内外均已开展了基于各个圈层、多种平台的临近空间科学探测和研究,但由于其环境的复杂性,探测手段的匮乏,对其认知存在很多不足,临近空间的应用目前还是以高空科学气球为主要平台,多数临近空间飞行器还存在上不去、留不住的问题,应用需求和工程实施能力之间矛盾突出,建议从以下2个方面着手,提高中国临近空间开发和应用水平。

1) 加强顶层规划,明确发展路线图。

临近空间在整个太空安全中的战略地位越来越重要,已经成为大国战略博弈的重要领地,为此,首先要对未来科技和战争的需求和关键技术做出正确的评估,明确临近空间功能定位,与航天、航空等其他圈层活动充分互动,发挥各自优势,扬长避短,加强顶层设计,坚持创新驱动,明确发展路线。

2) 突出核心关键,科学布局,加强基础研究。

前瞻布局、坚定推进基础前沿、重大科学问题的研究,充分发挥各方面优势力量,加强基础研究和共性关键技术的研发。

基础领域研究的原始创新是引领经济社会发展的第一动力,是国家兴衰的决定性因素之一。纵观世界历史,美、英、德、法等西方发达国家,无一不是抓住了历次科技革命的机遇,依靠基础研究领域的原始创新引领技术变革和产业发展,步入了世界强国之列。唯有坚持创新驱动发展,以科技创新引领全面创新,才能走出一条科技强、产业强、国家强的发展新路径。临近空间科学技术领域对中国来说是一个绝好的发展契机,一些基本科学问题孕育重大突破,可望催生新的重大科学思想和科学理论,产生颠覆性技术,进而引发世界军事,经济格局和产业分工的重大深刻调整。

参考文献 (References)

- [1] 吕达仁, 陈泽宇, 郭霞, 等. 临近空间大气环境研究现状[J]. 力学进展, 2009, 39(6): 674-682.
Lü Daren, Chen Zeyu, Guo Xia, et al. Recent progress in near space atmospheric environment study[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(6): 674-682.
- [2] Widiawan A K, Tafazolli R. High altitude platform station (HAPS): A review of new infrastructure development for future wireless communications[J]. Wireless Personal Communications, 2007, 42 (3): 387-404.
- [3] Stephens H. Near-sPACE[J]. Air Force Magazine, 2005, 88(7): 36-40.
- [4] Allen E H. The case for near space[J]. Aerospace America, 2006, 4(2): 31-34.
- [5] 童靖宇, 向树红. 临近空间环境及环境试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 1-4.
Tong Jingyu, Xiang Shuhong. Near space environment and environment tests[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 1-4.
- [6] 康士峰. 临近空间大气环境特性监测与研究[J]. 2008, 5 (1): 20-23.
Kang Shifeng. Monitoring and study of atmospheric environment in near space[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(1): 20-23.
- [7] 韩丁, 盛夏, 尹珊建, 等. 临近空间大气参数误差特性分

- 析[J]. 遥感学报, 2017, 21(1): 149-158.
- Han Ding, Sheng Xia, Yin Shanjian, et al. Deviation characteristics for atmospheric parameters in near space[J]. Journal Remote Sensing, 2017, 21(1): 149-158.
- [8] 陈闽慷, 杜涛, 胡雄, 等. 北半球高空大气参数波动对临近空间飞行热环境的影响[J]. 科学通报, 2017, 62(13): 1402-1409.
- Chen MinKang, Du Tao, Hu Xiong, et al. Effect of atmosphere parameter oscillation at high altitude in the northern hemisphere for near space hypersonic flight aerothermodynamic prediction[J]. Science China Press, 2017, 62(13): 1402-1409.
- [9] 鲁宇, 蔡巧言, 王飞. 临近空间与重复使用技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2018(3), doi: 10.7654/j.issn.1004-7182.20180301.
- Lu Yu, Cai Qiaoyan, Wang Fei. Research on nearby space and reuse technology[J]. Missile and Space Delivery Technology, 2018(3), doi: 10.7654/j.issn.1004-7182.20180301.
- [10] 柴霖. 临近空间测控系统技术特征分析[J]. 宇航学报, 2010, 31(7): 1697-1705.
- Chai Lin. Technical characteristics analysis of the TT&C communication system for near space vehicle[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(7): 1697-1705.
- [11] 汪连栋, 曾勇虎, 高磊, 等. 临近空间高超声速目标雷达探测技术现状与趋势[J]. 信号处理, 2014, 30(1): 72-85.
- Wang Liandong, Zeng Yonghu, Gao Lei, et al. Technology status and development trend for radar detection of hypersonic target in near space[J]. Signal Processing, 2014, 30(1): 72-85.
- [12] Kim D. A survey of balloon networking applications and technologies[M]//Destructive Myths in Family Therapy: How to Overcome Barriers to Communication by Seeing and Saying—A Humanistic Perspective. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2012.
- [13] 兰顺正. 物美价廉的临近空间长航时平台[J]. 太空探索, 2018(1): 54-56.
- Lan Shunzheng. Cheap proximity to space long voyage platform[J]. Space Exploration, 2018(1): 54-56
- [14] 冯超, 邵胜利, 王芳栋, 等. 探空火箭在临近空间气象保障中的应用研究[J]. 测控技术, 2018, 37(5): 21-24.
- Feng Chao, Shao Shengli, Wang Fangdong, et al. Research on the application of sounding rocket in near space meteorological support[J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(5): 21-24.
- [15] U. S. Government Accountability Office. Future aerostat and airship investment decisions drive oversight and coordination needs[R]. Washington D C: U. S. Government Accountability Office, 2012.
- [16] 兰顺正. 临近空间高超声速飞行器的军事应用[J]. 太空探索, 2018(1): 57-61.
- Lan Shunzheng. Military application of hypersonic vehicle near space[J]. Space Discovery, 2018(1): 57-61.
- [17] 吴潜. 临近空间飞行器武器装备建设发展思考[J]. 电讯技术, 2009, 49(8): 98-102.
- Wu Qian. Development thought for weapon equipment construction based on near space aerocrafts[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(8): 98-102.
- [18] Yajima N, Izutsu N, Imamura T, et al. Scientific ballooning: Technology and applications of exploration balloons floating in the stratosphere and the atmospheres of other planets[M]. New York: Springer, 2009.
- [19] Young M, Keith S, Pancotti A. An overview of advanced concepts for near-space systems[C]//45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. New York: AIAA, 2005.
- [20] Cathey H M. The NASA super pressure balloon—A path to flight[J]. Advances in Space Research, 2009, 44(1): 23-38.
- [21] 祝榕辰, 王生. 超压气球研究与发展现状[C]//第二十四届全国空间探测学术交流会议论文集. 北京: 中国空间科学学会, 2011: 3-4.
- Zhu Rongchen, Wang Sheng. Research and development status of super pressure balloon[C]//24th National Academic Exchange on Space Exploration. Beijing: Chinese Society of Space Science, 2011: 3-4.
- [22] 袁立群, 黄良平. 国外临近空间超长航时无人机发展及应用情况综述[J]. 战术导弹技术, 2018(2): 26-30.
- Yuan Liqun, Huang Lianping. A summary of the development and application of uavs in near-space spaces in foreign countries[J]. Tactical Missile Technology, 2018(2): 26-30.
- [23] Noll T E, Ishmael D, Henwood B, et al. Technical findings, lessons learned, and recommendations resulting from the helios prototypevehicle mishap[R/OL]. [2019-01-31]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20070022260.pdf>.
- [24] 李晨飞, 姜鲁华. 临近空间长航时太阳能无人机研究现状及关键技术[J]. 中国基础科学, 2018(2): 22-31.
- Li Chenfei, Jiang Luhua. Research status and key techniques of solar UAV in near space long voyae[J]. Ba-

- sic Science of China, 2018(2): 22–31.
- [25] Smith S, Fortenberry M, Michael L, et al. HiSentinel80: Flight of a high altitude airship[C]//Proceedings of the 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. New York: AIAA, 2011, doi: 10.2514/6.2011-6973.
- [26] Department of Defense. Summary report of DoD funded lighter-than-air vehicles[R]. Washington D C: Office of the Assistant Secretary of Defense for Research and Engineering, 2012.
- [27] 肖益军. 复合式临近空间新概念飞艇总体技术研究[J]. 新型工业化, 2017, 7(2): 54–59.
Xiao Yijun. Study on general techniques of novel compound airship in near space[J]. The Journal of New Industrialization, 2017, 7(2): 54–59.
- [28] 赵亮, 董鹏署, 李宗亭, 等. 平流层飞艇载SIAR雷达系统探测能力分析[J]. 舰船电子对抗, 2017, 40(3): 32–34.
Zhao Liang, Dong Pengshu, Li Zongting, et al. Analysis of detection capability of stratospheric airship-based siar radar system[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2017, 40(3): 32–34.
- [29] 董宇辉, 王红, 程杨, 等. 平流层飞艇载雷达电磁波的衰减问题建模及分析[J]. 空军预警学院学报, 2018, 32(2): 34–39.
Dong Yuhui, Wang Hong, Cheng Yang, et al. Modeling and analysis of attenuation of electromagnetic waves in stratospheric airship radar[J]. Journal of Air Force Early Warning College, 2018, 32(2): 34–39.
- [30] 黄伟, 罗世彬, 王振国. 临近空间高超声速飞行器关键技术及展望[J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1259–1265.
Huang Wei, Luo Shibin, Wang Zhenguo. Key technologies and prospect of near-space hypersonic vehicle[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(5): 1259–1265.
- [31] 郭劲. 临近空间飞行器军事应用价值分析[J]. 光机电信息, 2010, 27(8): 22–27.
Guo Jin. Military application value of near space vehicle [J]. OME Information, 2010, 27(8): 22–27.
- [32] 姜秀杰, 刘波, 于世强, 等. 探空火箭的发展现状及趋势[J]. 科技导报, 2010, 27(23): 101–110.
Jiang Xiujie, Liu Bo, Yu Shiqiang, et al. Development status and trend of sounding rocket[J]. Science and Technology Review, 2009, 27(23): 101–110.
- [33] Khandelwal N. Google Loons—Balloon Powered internet access via stratosphere[J]. SSRG International Journal of Computer Science and Engineering, 2016, 3(8): 92–94.
- [34] Li C L, Luo R Y, Chen T X. New idea for stratospheric communications—Google Loon[J]. Communications Technology, 2015, 48(2): 125–129.
- [35] Araniti G, Iera A, Molinaro A. The role of HAPs in supporting multimedia broadcast and multicast services in terrestrial-satellite integrated systems[J]. Wireless Personal Communications, 2005, 32(3/4): 195–213.
- [36] 杨虹, 张雅声, 丁文哲, 等. 探测临近空间高声速目标的飞艇组网方法研究[J]. 现代防御技术, 2017, 45(2): 40–48.
Yang Hong, Zhang Yasheng, Ding Wenzhe, et al. Networking design of airship for detecting high dynamic target in near space[J]. Modern Defence Technology, 2017, 45(2): 40–48.
- [37] Lee Y C, Ye H. Sky Station Stratospheric Telecommunications System, a high speed low latency switched wireless network[C]//17th AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit. New York: AIAA, 1998: 2–31.
- [38] 刘志峰, 孙振明, 贾越普. 基于天地一体化网络架构的临近空间接入网协议设计与研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2018, 54(3): 80–88.
Liu Zhifeng, Sun Zhenming, Jia Yuepu. Design and research of near space access network protocol based on heaven and earth integration network architecture[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2018, 54(3): 80–88.
- [39] 黄宛宁, 李智斌, 张晓军, 等. 基于浮空器平台的临近空间骨干网络构想[C]//第四届高分辨率对地观测学术年会论文集. 北京: 中国科学院高分重大专项管理办公室, 2017.
Huang Wanneng, Li Zhibin, Zhang Xiaojun, et al. The conceive of near space backbone network based on aerostat platform[C]//Papers of the 4th Annual Meeting of High Resolution Earth Observation. Beijing: Office of High Score and Major Special Management, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [40] Mo S, Li B X. Study on the application of stratosphere emergency communication according to communication problems during wenchun eqrthquake[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(5): 29–32.
- [41] 张雅丽, 喻忠义, 刘心, 等. 重大突发事件处置的应急通信响应机制研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2013, 19(3): 47–51.
Zhang Yali, Yu Zhongyi, Liu Xin, et al. Research on emergency communication response mechanism for ma-

- for emergency disposal[J]. Journal of People's Public Security University of China (Science & Technology), 2013, 19(3): 47-51.
- [42] 王海涛. 应急通信的发展现状和技术手段分析[J]. 中国无线电, 2011(11): 49-51.
Wang Haitao. Analysis on the development status and technical means of emergency communication[J]. China Radio, 2011(11): 49-51.
- [43] 中国电信系留式无人机高空基站 应急通信抗震救灾应用市场化[EB/OL]. [2019-01-31]. <http://www.c114.com.cn/news/117/a1020597.html>.
Marketization of earthquake relief application of emergency communication in high-altitude base station of china telecom tethered UAV[EB/OL]. [2019-01-31]. <http://www.c114.com.cn/news/117/a1020597.html>.
- [44] 李政. 我国应急通信技术发展现状与展望[J]. 现代电信科技, 2011(1): 44-47.
Li Zheng. Emergency communication technology in China[J]. Modern Science & Technology of Telecommunications, 2011(1): 44-47
- [45] 郝昱文, 李晓雪, 赵喆, 等. 突发公共事件应急通信技术探讨[J]. 信息技术, 2016(4): 84-87.
Hao Yuwen, Li Xiaoxue, Zhao Zhe, et al. Summary of public incident emergency integrated space-ground command communication technology[J]. Information Technology, 2016(4): 84-87.
- [46] 李怡勇, 李智, 沈怀荣. 临近空间飞行器发展与应用分析[J]. 装备学院学报, 2008, 19(2): 61-65.
Li Yiyong, Li Zhi, Shen Huairong. Analysis on development and application of near space vehicle[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008, 19(2): 61-65.
- [47] 何彦峰. 浅析临近空间平台的军事应用[J]. 国防科技, 2007(6): 32-35.
He Yanfeng. The military applications of the near-space platform[J]. National Defense Science & Technology, 2007(6): 32-35.
- [48] 赵亮, 董鹏署, 李宗亭, 等. 平流层飞艇载SIAR系统作战能力分析[J]. 舰船电子对抗, 2018, 41(1): 42-44.
Zhao Liang, Dong Pengshu, Li Zongting, et al. Analysis of operational capability of siar system in stratospheric airship[J]. Ship Electronic Countermeasure, 2008, 41(1): 42-44.
- [49] 杨维东, 杨凡德. 临近空间飞行器预警能力分析[J]. 装备学院学报, 2008, 19(2): 57-60.
Yang Weidong, Yang Fande. Early warning ability analysis for near space vehicle[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008, 19(2): 57-60.
- [50] 赵敏, 岳韶华, 贺正洪, 等. 未来临近空间防御作战研究[J]. 飞航导弹, 2017(2): 10-14.
Zhao Min, Yue Shaohua, He Zhenghong, et al. Research on the future near space defense warfare[J]. Flying Missiles, 2017(2): 10-14.
- [51] 舒首衡, 陈乐, 郑铮, 等. 临近空间激光通信信道特性及系统分析[J]. 电光与控制, 2008, 15(2): 19-22.
Shu Shouheng, Chen Le, Zheng Zheng, et al. Near space laser communication channel characteristics and system analysis[J]. Electric and Control, 2008, 15(2): 19-22.
- [52] 郭建国, 周军. 临近空间低动态飞行器控制研究综述[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 320-331.
Guo Jianguo, Zhou Jun. A summary of research on control of low dynamic vehicle in nearby space[J]. Journal of Aeronautics, 2017, 35(2): 320-331.
- [53] 徐凯, 姚志刚, 韩志刚, 等. 临近空间重力波强扰动的卫星观测研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(1): 66-74.
Xu Kai, Yao Zhigang, Han Zhigang, et al. Recent process in near-space gravity wave analysis based on satellite measurements[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(1): 66-74.
- [54] 黄宛宁. 看谷歌怎样一步步玩票做气球[J]. 金融博览, 2017(15): 76-79.
Huang Wanning. See how google play ticket make balloons step by step[J]. Financial View, 2017(15): 76-79.
- [55] Cathey H M. The NASA super pressure balloon—A path to flight[J]. Advances in Space Research, 2009, 44(1): 23-38.
- [56] 程旋, 肖存英, 胡雄. 临近空间大气环境对高超声速飞行器气动特性的影响研究进展[J]. 飞航导弹, 2018(5): 22-28.
Chen Xuan, Xiao cunying, Hu Xiong. Research progress on aerodynamic characteristics of hypersonic vehicle under near space atmospheric environment[J]. Aerodynamic Missile, 2018(5): 22-28.
- [57] 王益平, 周飞, 徐明. 临近空间浮空器区域驻留控制策略研究[J]. 中国空间科学技术, 2018, 38(1): 63-39.
Wang Yiping, Zhou Fei, Xu Ming. Study on regional residence control strategy of nearby space floats[J]. China Space Science and Technology, 2018, 38(1): 63-39.
- [58] 薛永江, 李体方. 临近空间飞行器发展及关键技术分

析[J]. 飞航导弹, 2011(2): 32-36.

Xue Yonghong, Li Tifang. Development and key technology analysis of nearby space vehicle[J]. Flying Missile, 2011(2): 32-36.

[59] 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.

Li Zhibin, Huang Wanning, Zhang Zhao. Retrospect on the scientific hotspot of the 2018 years near space[J]. Scienc & Technology Review, 2019, 37(1): 44-51.

Development status and application prospect of near space science and technology

HUANG Wanning, ZHANG Xiaojun*, LI Zhibin, WANG Sheng, HUANG Min, CAI Rong

Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract This paper introduces the special space location and typical meteorological characteristics of the near space, combs the situation of scientific exploration and research on the near space through space-based, ground-based and in-situ platforms at home and abroad. To aim at the current situation of insufficient understanding of the near space, the paper argues that the scientific exploration and application of the near space should take the near space vehicle as the main platform, whose technological development and application status are reviewed including high-altitude balloons, stratospheric airships and solar long-range UAVs in military and civil markets. Finally the condenses some key issues that need attention and puts forward some concrete suggestions for the near space development and application of our country.

Keywords near-space; aerostat; stratosphere communication; airship; high-altitude balloon; unmanned aircraft ●



(责任编辑 刘志远)