

探空火箭的发展现状及趋势

姜秀杰, 刘 波, 于世强, 陈 萍, 石 惠

中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190

摘要 探空火箭是临近空间唯一的实地探测工具, 是中高层大气立体剖面探测和微重力科学实验的有效手段和新型有效载荷及其新技术、新器件、新材料的验证平台, 目前已广泛应用于空间天气预报、中高层大气研究、临近空间环境研究、微重力条件下的材料加工、高空生物学研究、地球资源勘探等诸多领域, 具有其他飞行器不可替代的优点和作用。本文综述了探空火箭的科学地位及其在国内外的现状、各个国家的应用情况, 重点阐述了探空火箭在美国、日本、欧洲和中国的研究与使用状况, 分析和总结了火箭探空的发展趋势。并提出了发展中国火箭探空技术的建议: 组织火箭探空发射活动, 开展中高层大气和电离层的直接探测, 进行空间有效载荷和元器件的短期飞行试验, 微重力试验和空间生命科学试验, 以及空间飞行试验。为中国空间科学探测技术的发展提供经济有效的手段。

关键词 探空火箭; 近地空间环境探测; 近地空间资源利用

中图分类号 U664.88

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)23-0101-10

Development Status and Trend of Sounding Rocket

JIANG Xiujie, LIU Bo, YU Shiqiang, CHEN Ping, SHI Hui

Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Sounding rocket is the only method for near space field detection, an effective method for middle and upper atmosphere stereo profile detection and microgravity scientific experiment, and also a verification platform for the new payloads and their new technology, devices and materials. Currently, sounding rocket is widely used in the domain of space weather forecast, middle and upper atmospheric research, near space environment research, materials processing under conditions of microgravity, high-altitude biology and earth resources exploration. Sounding rocket has irreplaceable advantages and functions. This paper gives an overview of the scientific status of the sounding rocket and its development and application situation both at home and abroad, with an emphasis on the research and application status of America, Japan, Europe and China, analyzes and summarizes the development trend of sounding rocket and proposes that Chinese rocket sounding technology must be developed with greater efforts, more rocket sounding activities should be organized, such as direct detection for

the middle and upper atmosphere and ionosphere, short-term flight test for the space payloads and components, microgravity experiments, and space life science experiments, innovative flight tests into space, to improve the capacity and level of rocket sounding, make Chinese rocket sounding career step out of valley, and provide economic and effective methods for the development of Chinese space detection technology.

Keywords sounding rocket; near space environment detection; near space resource utilization

0 引言

火箭探空技术是指利用火箭进行近地空间环境探测和近地空间资源利用的技术, 用于火箭探空的火箭称为探空火箭^[1], 是一种在近地空间进行探测和科学试验的火箭。其飞行高度介于探空气球与卫星之间, 也是临近空间 40~300 km 唯一的、其他飞行器所不能及的实地探测火箭。

探空火箭一般为无控制火箭, 具有结构简单、成本低、研制周期短、发射灵活方便等优点。它不仅可以在高度方向探测大气各层结构、成分和参数, 实现中高层大气立体剖面探测; 更适用于临时观察短时间出现的如极光、日食、太阳爆发等特殊自然现象和持续观察某些随时间、地点变化的自然现象; 而且探空火箭可以提供一个微重力环境, 用于一些特殊问题的试验研究, 如利用探空火箭提供的微重力环境研究生物制药、生物机体的变化和适应性等。此外, 探空火箭还可以进行新材料、新技术和仪器设备的验证性试验等, 为运载火

收稿日期: 2009-11-01

基金项目: 国家大科学工程“子午工程”项目

作者简介: 姜秀杰 (中国科协所属全国学会个人会员登记号: S090200354M), 研究员, 研究方向为火箭探空技术, 电子信箱: jiangxj@cssar.ac.cn

箭、卫星、飞船等飞行器的研制和应用提供必要的环境参数。

世界第一枚探空火箭是 1945 年 9 月 26 日发射的美国高空探测火箭“女兵下士”火箭,其飞行高度 70 km,有效载荷重量 11 kg^[2]。此后,美国和苏联利用缴获的 V2 火箭发射了一批探空火箭。20 世纪 50 年代的国际地球物理年活动极大地推动了探空火箭发展,许多国家陆续开始了探空火箭的研制。80 年代已有 20 多个国家发展或使用了探空火箭。而如今,探空火箭的应用领域不断扩大。探空火箭主要应用于以下方面。

探空火箭最初用于近地空间的大气探测,更多地是用于临近空间探测、探测中高层大气数据以建立中高层大气模式为航天器发射和返回提供安全保障。在空间不同高度运行着不同的飞行器,这些飞行器各有特点和作用,相互补充,但不能相互替代。卫星、飞船等航天器可以在 300 km 以上高度进行科学探测和空间科学研究;气球方便在长距离、长时间内探测 40 km 以下的大气参数;各种地基探测设备可以在固定点对空间进行长期观测,但它属于间接观测,获得的数据是遥感探测数据,无法与探空火箭的实地探测比拟。探空火箭是临近空间探测、建立中高层大气模式的有效途径,同时又是 40~300 km 高度范围内进行空间实地探测的唯一的、有效手段,是其他飞行器所不能替代的。

近 20 年来,探空火箭已经广泛应用于微重力科学实验。利用探空火箭进行微重力科学研究和实验验证是探空火箭逐步发展起来的一种有效和较成熟的空间短时微重力实验方法,是在微重力环境下进行多种空间科学实验研究活动的重要手段之一。中国飞船、卫星等航天器的微重力科学实验机会少且成本高,近期的两次空间微重力科学试验是 2002 年 12 月发射的“神舟”4 号飞船上进行的微重力流体物理试验^[3-4],以及 2006 年 9 月发射成功的“实践”8 号卫星上进行的微重力科学试验。相比之下,气球、落塔的微重力水平低、微重力时间短,气球的微重力时间约为 30 s^[5],而 100 m 落塔的微重力时间仅为 3.5 s。因此,微重力科学实验需要一个比飞船、卫星成本低、机会多、风险小,比气球、落塔微重力水平高、微重力时间长的实验平台。与气球、落塔相比,探空火箭更接近轨道飞行,甚至是亚轨道飞行,通常能提供几到十几分钟的微重力有效时间,是一种较为理想的微重力试验平台。

探空火箭另一重要应用是进行空间科学论证。探空火箭能够提供一个高真空、强振动、大过载等各种空间飞行环境条件,为空间科学论证提供新型有效载荷及其新技术、新器件、新材料飞行验证的机会。国际上,飞行器新型结构、防热材料、卫星和导弹仪器、动力装置高空点火性能等,都曾在探空火箭上进行过试验,且取得了较好的效果。元器件实验验证方面,探空火箭的空间论证作用更为显著。随着中国航天事业的飞速发展,国外一些国家的高技术封锁更为严重,尤其是对航天元器件的出口限制越来越严重^[5]。为此,在航天飞行器中采用国产元器件及商用器件势在必行^[6-7]。这些器件如果能够预先在探空火箭上进行空间适应性飞行验证,获得在一定空间环境条件下的飞行数据,将为其在卫星、飞船上的进一步应用提

供设计基础,提高器件的空间应用可靠性。

由于探空火箭不仅可以进行兼顾中高层大气立体剖面探测、微重力科学实验、空间生物技术实验、星载有效载荷先期原理性飞行实验验证的综合实验,还能为卫星、飞船等航天器的发射提供高空大气环境保障,为空间链路电磁环境监测预警提供保障,能够有效促进空间探测、微重力科学、空间生命科学与技术、及其有效载荷技术的快速发展,已广泛应用于空间天气预报、中高层大气研究、临近空间环境研究、微重力条件下的材料加工、高空生物学研究^[8]、地球资源勘探^[9]等领域。探空火箭的发展经久不衰,应用领域不断扩大。

1 国外发展现状

自从 1945 年美国喷气推进实验室(JPL)发射第一枚探空火箭以来,火箭探空就得到了世界各国如美国、苏联、日本、德国、英国、印度等的重视。研制并应用于 60 乃至 1 000 km 以上不同高度的探空火箭系列,进行卫星所不能及的空间探测,为航天技术和空间科学研究提供了丰富的资料。即使在空间技术十分发达的美国,探空火箭的发展也持久不衰。

1.1 美国的火箭探空

美国从事火箭探空研究的主要机构有:美国宇航局(NASA)、陆海空军、能源研究与发展委员会(ERDA)和大学等单位。据统计,NASA 1959~1976 年在全球 37 个发射场(国内 24 个)发射探空火箭 30 种 1 912 枚。其中,1968 年发射 175 枚,20 世纪 70 年代中期后,每年发射 70~80 枚,近年来发射数量仍据世界之首,如 2008 年至今已发射 22 次共发射 42 枚,2007 年 48 枚。

对于微重力火箭发展有两次重要的火箭发射任务。1971 年 10 月 NASA 发射了“空蜂”170A,首次利用探空火箭进行了空间材料加工实验尝试;1972 年 1 月再次发射“黑雁”5C 火箭进行金属熔炼实验。这两枚火箭的发射,证实了利用探空火箭进行微重力科学实验是一条可行的技术途径,揭开了微重力火箭研制和应用的序幕。

20 世纪 70 年代初美国开始利用探空火箭进行空间材料加工实验。NASA 1974 年初制定空间材料加工应用火箭(SPAR)计划,这是世界上第一个微重力火箭研究应用计划。从 1975 年 12 月至 1981 年 1 月,NASA 共发射 9 枚 SPAR 火箭,其中 6 枚成功,2 枚失败,1 枚局部成功,共进行了 49 项空间材料科学和加工的实验研究。随着 1989 年 3 月“伙伴”1 号火箭首次成功发射,NASA 决定 20 世纪 90 年代根据需要每年发射 2~4 枚类似火箭,其中大部分为生物技术实验,其他为空间材料科学和加工实验。

NASA 著名的火箭探空项目 NSROC (NASA Sounding Rocket Operations Contract)^[10]从 1999 年开始实施,为其火箭探空研究提供了完整的前期计划、设计、开发、集成、测试、发射和后期分析等工作。NSROC 于 2000 年 8 月达到 ISO 9000 标准,平均每年发射约 20 次。截至 2006 年 10 月 1 日,NSROC 项目已经发射 171 枚探空火箭,发射成功率达 96%^[11]。其发射

场地遍及全球,包括本土的佛吉尼亚、新墨西哥、阿拉斯加、加利福尼亚、佛罗里达、夏威夷发射基地,以及瑞典、挪威、澳大利亚、格陵兰岛、巴西、秘鲁、波多黎各等国的发射基地。NSROC 共有 10 种不同类型的探空火箭^[10](图 1),涵盖了不同的探测高度和科学应用范围。

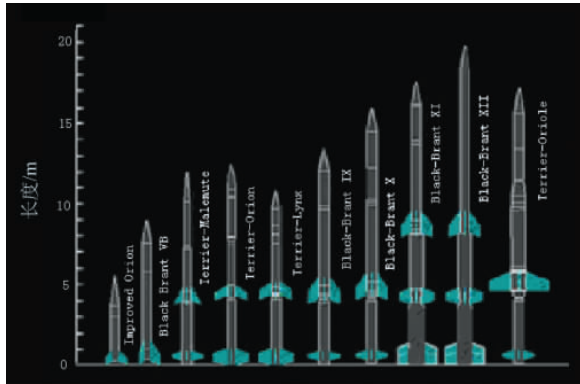


图 1 NSROC 计划中的 10 种探空火箭

Fig. 1 10 kinds of sounding rockets in the NSROC project

NASA 探空火箭计划项目办公室(SRPO)在 2006 年共发射探空火箭 21 次,成功率达 100%。SRPO 于 2007 年 1 月又发起了一个火箭探空计划,其主题是利用火箭探测电离层的扰动现象,将发射 10 枚探空火箭。这项研究包含 4 个独立的科学任务,而每项任务均包含一系列观测活动,先是地面设备观测,确定现象出现后再利用探空火箭进行实地探测。

2007 年 1 月 19 日,NASA 的 Joule-2 项目^[12]发射 4 枚探空火箭:1 枚 Black Brant、1 枚 Terrier-Black Brant 和 2 枚 Terrier Orion 火箭,其科学探测目标是研究 1 月阿拉斯加地区上空极光的焦耳热效应,其中 2 枚火箭的载荷舱如图 2 所示。通过这 4 枚火箭的发射,获得了更多关于 96.6~193 km 稀薄大气电加热的信息,成功地在亚暴事件期间对高纬度地区焦耳加热进行了多尺度研究。



(a) Terrier-Black Brant

(b) Black Brant

图 2 Joule-2 项目发射的探空火箭载荷舱

Fig. 2 Payload cabin for the rockets in the Joule-2 Project

2007 年 2 月 14 日,NASA 在阿拉斯加发射了 HEX-2 探空火箭^[13]。在 HEX-2 任务中,Black Brant X 火箭采用了突破

性“定制飞行轨道技术”,使火箭可以在期望的高度上飞行较长一段距离,突破了以往的弹道限制。如图 3 所示,在右下方框中,白色实线为 Black Brant X 的飞行轨迹,可以看出它在 130~150 km 高度上飞行了超过 300 km 水平距离,大大超过了绿色实线所表示的传统弹道飞行轨迹。

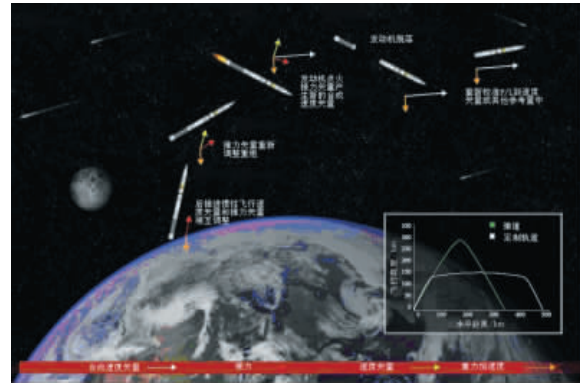


图 3 定制飞行轨道技术示意图

Fig. 3 Tailored sounding rocket trajectory

2008 年 1 月 18 日,美国在挪威安岛发射场成功发射了一枚 SCIFER-2 探空火箭(图 4)^[14]。该火箭的飞行高度创下了安岛发射场的发射记录,达到了 1 460 km。SCIFER-2 火箭的探测要素包括:离子漂移与分布函数、电子温度与密度、电子与离子沉淀、电场矢量和磁场矢量。其科学目标是研究 200~1 400 km 极尖区离子外流,测定电离层流动及流动自由能来源的物理机制,研究在高层空间由卫星观测到的、导致离子流动的一系列过程。这些观测将有助于理解电离层对磁层的质量贡献,以及电离层与磁层的耦合作用。除火箭外,2 个 EISCAT 雷达(Svalbard 和 Tromso)被用于监控火箭远地点的离子流,并与探空火箭数据进行比较,依此确定发射条件。

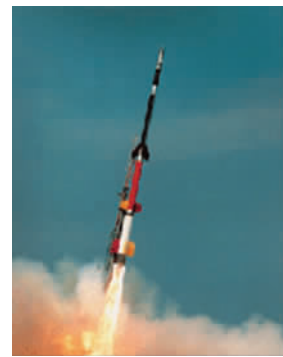


图 4 SCIFER-2 探空火箭

Fig. 4 Sounding rocket SCIFER-2

近年来,NASA 的火箭探空计划每年要完成 40~60 次火箭发射任务,搭载不同的实验设备。这些飞行任务用以支持 NASA 科学任务理事会发起的科学研究,包括生命与微重力科学和应用、地球科学及探测技术研究。例如,2009 年 1 月 29 日发射的 Bounds 的两枚探空火箭,主要用于研究极光内部的电场和电流结构。两枚探空火箭同时穿过极光飞行以搜集北

极顶部和底部边缘的数据。这是首次两枚火箭同时穿过极光。此次飞行提供了观察极光细微结构的条件,寻找到过去探测时遗漏的细节。

2009年8月17日,NASA在瓦勒普斯岛进行了充气返回式飞行器实验 IRVE-II^[15],如图5、图6所示。火箭飞行大约4 min后到达远地点209 km。这次任务的目的是执行一个可充气主体的飞行测试,论证在相应动态压强下的充气性能和生存能力。IRVE-II是此系列的第二次飞行实验,旨在发展和验证一个充气式减速器减速伞的概念。该实验按阶梯状方式进行,并论证实际动态压力和弹道系数下的充气性能和生存能力^[16]。此次成功飞行测试表明,返回地球的航天器在以超音速进入大气层时,可使用挡热板减速并保护自己。NASA戈达德航天中心称此为首次成功进行的充气式返回舱飞行^[17]。



图5 IRVE-II 火箭发射前准备 图6 IRVE-II 火箭发射

Fig. 5 IRVE-II before launched Fig. 6 IRVE-II is launching

1.2 日本的火箭探空

日本在火箭探空方面进行了非常广泛的研究,在大气科学、电离层、太阳物理、天体物理以及大气气候和预报方面取得了许多科学成果,并与美、英、法、西德等合作完成了多种类型的火箭实验,进行了独具特色的赤道区高层大气、电离层和天文学的探测研究。

1977 年日本宇宙开发事业团 (NASDA) 制定了 TT-500A 微重力火箭计划。1980 年 9 月至 1983 年 8 月共发射了 6 枚, 其中 3 枚成功, 2 枚未能回收, 1 枚微重力值仅 $10^{-2}g$ 。它们均用于空间材料加工实验, 有 19 台设备进行了飞行实验, 只有约一半的设备获得实验结果。20 世纪 80 年代后期, NASDA 重新制定了微重力火箭研究计划, 命名为 TR-1A 的微重力火箭于 1991 年 9 月首次发射成功, 搭载了 5 种用于空间材料科学研究和加工的实验装置。之后, 又制定了继续发射 3 枚 TR-1A 微重力火箭计划。

日本宇宙科学研究所 (ISAS) 一直很重视火箭探空技术的研究与应用, 多次与其他国家合作, 通过火箭实验获得了一些科学发现。其中, Wave 2000 型火箭用于研究 85~90 km 高度的气辉发射痕迹, 其有效载荷包括: 原子氧密度测量仪、朗缪尔探针、光度计和风速测量装置等, 地基观测采用 MF 雷达、MU 雷达、钠激光雷达和 CCD 相机。用于与大气电离层中 E 层有关的准周期反射波研究的 SEEK-1 和 SEEK-2 火箭实

验分别于 1996 年和 2002 年完成。

2003 年 10 月,为了提高日本的空间研究水平,新的空间机构——日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)重组完成,所属 ISAS 继续用探空火箭等独特的手段提高空间科学研究水平。JAXA 目前使用的探空火箭系列有 S-310、S-520 和 SS-520,其技术指标比较见表 1^[18],S-520 和 SS-520 如图 7、图 8 所示。

表 1 日本探空火箭系列比较

Table 1 Comparison of sounding rocket series of Japan

火箭 型号	总长/m	直径/m	总重/t	飞行 高度/km	有效 载荷/kg
S-310	7.1	0.31	0.7	150	50
S-520	8.0	0.52	2.1	300	95/150
SS-520	9.65	0.52	2.6	800	140



图 7 S-520 探空火箭

Fig. 7 Sounding rocket
S-520



图 8 SS-520 探空火箭

Fig. 8 Sounding rocket
SS-520

S-310-35 火箭是与挪威合作的国际项目,于 2004 年 11 月 13 日在安岛发射,用于中高层大气探测研究^[19],主要测量中性温度和密度以及极光发射速率,电子密度和温度,得到了分子氮的温度和密度分布、极光输入率以及周围环境等离子体参数。其有效载荷^[20]包括:① 阻抗探头 NEI^[21],对沿着火箭弹道的电子绝对密度进行测量,通过测量空间等离子体导体探针的等效电容,确定周边等离子体的 UHR 频率;② 极光粒子探测器 APD,在 90~140 km 高度,用雪崩光电二极管每 10 ms 测量一次 3.5~56 keV 高能电子能量谱,此高度为相应大气成分中的沉淀电子相互撞击的区域。这是第一次对极光电离层 10 keV 级电子能量谱进行的直接而可靠的测量^[22]。低热层的旋转温度和氮子密度由 N₂ 温度密度测量设备 NTV 测量^[23]。NTV 已两次成功应用于日本探空火箭。NTV 采用电子束荧光技术,由电子枪激发和电离 N₂,并用分光计检测带荧光的 N₂⁺。能量为 1 keV、电流为 10 mA 的电子束连续地从电子枪朝垂直于火箭的轴向射出,同时被激发的 N₂ 和顺序出现的荧光 N₂⁺也将沿电子束产生。NTV 的测量位于电子束交汇点,距有效载荷 0.2 m 的光谱仪探测场内。水平传感器 HOS (Horizon Sensor)的目的是用一个中心 15 μm、2.5 μm 最大值全波 FWHM 的带通滤波器测量 CO₂ 的边界。极光绿线光度计 AGL (Auroral Green Line photometer)由带通滤波器、一个透镜

和一个光电倍增管组成。带通滤波器的中心波长为 557.7 nm,FWHM 为 6.2 nm^[23]。快速朗缪尔探针 FLP 通过测量极低电离层电子温度研究热结构和等离子体能量平衡。FLP 探测表明,火箭上升过程中,在 106~114 km 高度范围内探测到的电子温度非常高。在这个高温区间的底部,电子温度可能受同样搭载在火箭上的氮气温度仪器产生的人造电子束的影响。另一方面,在火箭下降阶段,探测到 114~119 km 高度范围内的电子温度有所增加。这可能是第一次在箭载设备上探测到由温度升高和密度波动引起的 Farley-Buneman 不稳定性^[24]。

表 2 S-310-35 探空火箭有效载荷配置表
Table 2 List of the rocket-borne payloads

设备	测量对象	放置位置
N ₂ 温度密度测量设备 (NTV)	N ₂ 的温度和密度	子载荷
极光粒子探测器 (APD)	电子能量	
水平传感器 (HOS)	火箭姿态	
恒偏向朗缪尔探针 (CLP)	Ne 的相对变化	主载荷
极光绿线光度计 (AGL)	极光传播速率	
高速朗缪尔探针 (FLP)	电子温度和密度	
阻抗探头 (NEI)	电子密度	
表面搜索 (SFF)	火箭姿态	

日本 S-310-37 探空火箭于 2007 年 1 月 16 日在鹿儿岛航空中心成功发射。其科学目标是探寻电离层下部高电子温度区域产生的机制。实验设置在冬季 11:00 左右,在日本内之浦上空观测。根据各种手段,对高温等离子体整体层(低温等离子体密度、磁场、电场)进行观察。由分布于日本全国的实时监控磁强计确定电离层的当前状况,执行火箭发射。观测结果表明^[25],高电子温度区域位于距地面 99~101 km 高度上;在近 100 km 高度,观察到电场和磁场以及相应设备温度的变化,证实电磁场与电子加热的密切关系,电子密度扰动在高海拔地区的增加,以及等离子体不稳定性的存在。火箭全长 8 m,搭载科学探测有效载荷计 59.4 kg,有效载荷包括超热等离子区分析器、高速朗缪尔探针、电子温度测定器、电场仪、磁强计、固定偏置探针和太阳角计。

2008 年 2 月 6 日,S-310-38 探空火箭(图 9)在日本在鹿儿岛航空中心成功发射。S-310-38 火箭的科学目标是探测该地区 70~150 km 高度电离层等离子体的三维分布,因为该地区的 D 区和 E 区是不平衡的,且 E 区扩散影响无线电波传播。有效载荷包括超长波、中波无线电接收机、镁离子红外热像仪、阻抗探头、高速朗缪尔探针、箔条释放系统、石英摩擦真空计、磁强计和星载成像姿态计。利用 S-310-38 上的镁离子成像仪(MII)观测 E 区的镁离子共振散射。火箭发射 60 s 后整流罩抛开,发射后 62 s 开始实验观测,发射后 196 s 到达最高点 157 km,最后火箭降落至鹿儿岛东南侧海中。S-310-38 的有效载荷详见表 3。



图 9 S-310-37 探空火箭
Fig. 9 Sounding rocket S-310-37

表 3 S-310-38 探空火箭有效载荷配置表
Table 3 List of the S-310-38-borne payloads

有效载荷	探测对象	研发机构
超长波、中波无线电接收机 (VMR)	电子密度分布	富山县立大学
镁离子红外热像仪 (MII)	镁离子密度分布	名古屋大学太阳地球环境研究所、东京大学
阻抗探头 (NEI)	电子密度	东北大学
高速朗缪尔探针 (FLP)	电子温度和密度	宇宙航空研究开发机构
箔条释放系统 (CHAF)	中性大气的风向风速	名古屋大学太阳地球环境研究所
石英摩擦真空计	中性大气密度	名古屋大学太阳地球环境研究所
磁场监测器 (DFG)	磁场	宇宙航空研究开发机构
星载成像姿态计	火箭的姿态	东京大学

日本于 2008 年 8 月 2 日,在鹿儿岛航空中心成功发射了 S-520-24 微重力火箭(图 10)。火箭在发射 274 s 后,最大飞行高度达 293 km。S-520-24 的有效载荷详见表 4。

表 4 S-520-24 探空火箭有效载荷配置表
Table 4 List of the S-520-24-borne payloads

载荷名称	观测项目	研发机构
同光路型显微干涉计	晶体的形状、温度变化	JAXA 宇宙科学研究本部
晶体生长控制、温度控制装置	样品的温度监测	JAXA 宇宙科学研究本部
通电加热式金刚石合成装置	合成金刚石	帝京科技大学
超小型光谱仪	各种气体的光谱	帝京科技大学



图 10 S-520-24 探空火箭
Fig. 10 Sounding rocket S-520-24

2009 年 1 月 26 日,ISAS 和 JAXA 在挪威安岛探空火箭发射场成功发射了一枚 S-310-39 探空火箭,如图 11 所示,表 5 给出了其有效载荷。S-310-39 的目的是研究在较低极热层极光活动影响下的动态和能量。S-310-39 在发射轨迹上释放了三甲基铝(TMA),可以被地面站的 3 个摄像机站点监控到,用来对自然风的风向进行高分辨率识别,包括水平方向和垂直方向^[25-26]。S-310-39 是单级火箭,箭体总长 7.1 m,直径 310 mm,总重 0.7 t,有效载荷 50 kg,发射角 77.5°;有效载荷系统在升空后 56 s 开始工作,飞行高度 150 km^[27]。



图 11 S-310-39 探空火箭
Fig. 11 Sounding rocket S-310-39

表 5 S-310-39 探空火箭有效载荷列配置表
Table 5 List of the S-310-39-borne payloads

载荷名称	观测项目	研发机构
NTV 氮气振动温度的传感器	测量氮气振动下的温度和密度	名古屋大学
IAF 火箭姿态成像器	测量火箭姿态	东京大学
TMA 三甲基综合排放系统	中性大气风	克莱姆森大学(美国)

此外,日本东京大学正在计划一个大型空间项目 Furoshiki Satellite,其设想是利用 4 个卫星做为 4 个角,在天空中织起一张 1 km×1 km 的网,即可在网上放置一个巨大的相控阵天线。这一计划的优势在于可以在没有任何硬质结构的前提下获得巨大的天线面积,而且设备的总质量受设备大小的影响很小。ISAS 计划采用探空火箭进行微重力试验,验证该计划的可行性及相控阵天线的性能。

1.3 欧洲的火箭探空

欧洲空间局(ESA)将微重力科学实验研究作为主要任务之一,制定了全面的发展研究计划,包括用探空火箭进行微重力实验研究,1990-1996 年间,每年发射 1 枚长时间探空火箭,4 枚短时间探空火箭。

由 ESA 和德国宇航研究院(DLR)共同投资的 TEXUS-EML 探空火箭于 2005 年 12 月 1 日从最重要的世界探空火箭发射场之一的欧洲航天发射场成功点火升空,首次使用巴西火箭发动机 VSB-30。在微重力环境下,飞行持续了 6 min 37 s。火箭搭载的 3 个实验按计划正常运转,迄今科学家对此结果表现得非常乐观。在飞行期间,通过遥控指令实现与样本的实时交互操作,日常管理、科学数据和视频图像都通过下行链路传至欧洲航天发射场的地面站,用以分析样本和飞行数据。此次飞行使用了两个全新技术系统,其服务舱系统与回收系统由 Kaiser Threde 和 DLR-Moraba 联合研制。

目前,欧洲航空防御与航天公司(EADS)的空间运输中心可以提供 MiniTEXUS、TEXUS 和 MAXUS(瑞典与德国合作火箭)3 种微重力探空火箭,微重力水平可达 $10^{-4}g$,微重力时间 4~12 min。

瑞典航天公司(SSC)成立于 1972 年,承担着瑞典探空火箭的研究和发射任务。SSC 具有世界著名的探空火箭发射基地——Esrangle 发射场,它建于 1964 年,1974 年归属 SSC^[28],拥有多个探空火箭发射台、配置有发射控制中心、通信中心、安全控制中心、载荷测试间、装配间等,为多国家发射过探空火箭。

Esrangle 发射场近年来发射的火箭多为提供最长达 15 min 的微重力环境。SSC 的探空火箭项目 MASER^[29]采用的是多国共享发射模式,欧洲空间局、加拿大航天局、日本宇宙事业开发团和荷兰航天局参与共享发射。MASER 提供有效载荷和实验子系统飞行机会,技术成熟可靠,1987 年 3 月至 2005 年 5 月已成功发射 10 次。MASER 的有效载荷系统一般可包括 4~7 个有效载荷,总有效载荷 350~460 kg,射高 200~350 km,微重力时间 6~8 min。该火箭的服务设备可以为有效载荷提供微重力阶段起始和结束的指令,并可采集有效载荷数据,编码后实时发送到地面接收站。另外,也能接收地面发送的遥控信号,解码为遥控指令后传送给有效载荷。箭载视频设备可以在飞行中实时传送图像,以便随时监控。MASER 采用二级固体火箭推进器,亦可选装 S-19 导引系统。MASER-10 微重力火箭于 2005 年 5 月 2 日发射,这是 MASER 的第 10 次飞行实验,箭上装有 5 个有效载荷:生物实验 2 个、流体实验 2 个和热辐射效应测量 1 个,其中的 2 个有效载荷由荷兰航天局提供。MASER-10 的有效载荷为 351 kg,射高 252 km,微重力时间 6 min。

Esrangle 发射场分别在 2006 年 5 月 2 日发射了 MAXUS-7,2006 年 5 月 11 日发射了 TEXUS-43(图 12)。MAXUS-7 的总有效载荷为 777 kg(实验设备为 477 kg),射高 705 km,微重力时间 12 min 27 s;搭载的实验有效载荷包括生物实验 2

个、材料实验 2 个、流体实验 1 个、实时观测用摄像头 6 个和扫描相机 2 个^[30]。TEXUS-43 的总有效载荷为 407 kg,其中实验设备有效载荷为 320 kg,为历次 TEXUS 火箭中有效载荷最大,射高 237 km,微重力时间 5 min 47 s;搭载的实验有效载荷包括生物实验 2 个、燃烧实验 1 个和摄像头 5 个。探空火箭计划 TEXUS 始于 1977 年,由 Esrange、DLR、EADS Astrium 和 SSC 共同研发。此项目由 ESA 资助,计划提供约 6 min 微重力状态^[31],主要的目的是探索在微重力环境下的物质材料、化学和生物成分的存在及活动方式。其中,一项实验是研究 72 条鱼在微重力状态下的习性,旨在研究运动病,科学家们尝试了解某一个体生病而其他个体却不曾感染的现象,特别关注生病动物如何适应该环境并克服疾病;一项搭载实验是喷雾情况下的流体力学和传热研究,旨在发现改善工业过程中的喷雾冷却方法;第三项实验是研究毛细血管的二相流。实验结果将有助于解决流体力学领域的一些基础问题^[32]。



图 12 TEXUS-43 探空火箭示意图
Fig. 12 Sketch map of sounding rocket TEXUS-43

2008 年 5 月 16 日,携带 4 个实验舱的 MASER 11 在瑞典 Esrange 发射基地腾空而起,目的是进行微重力条件下的科学研究^[33]。MASER 11 的 4 个实验舱分别是细胞动力学和仿生系统,微重力和陆地条件下的先进冶金工艺的原位 X 射线检测,沸腾和冷凝的对流以及动力学和传输的局部分析和建模,不同反应溶液界面间的化学-水动力的不稳定性模式和模式。MASER 11 的飞行远地点 258 km,微重力时间 6 min 26 s,有效载荷总重量 382 kg。在飞行的过程中,观察到了一些有趣的液体运动和沸腾效应,由此,燃油箱中液体的建模和设计一个更好的燃油箱可望获得进展。此外,在微重力条件下运用原位 X 射线照相技术,将对陆地上的金属泡沫材料的产生和生长动力学起到重要的补充作用。金属泡沫材料的应用将为航空航天和汽车制造业方面打开一个大的市场。图 13 是 MASER 11 的飞行轨迹示意图。

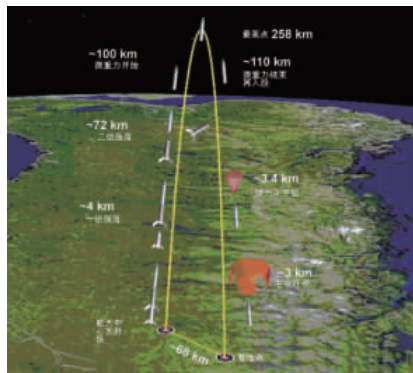


图 13 MASER 11 的飞行轨迹示意图
Fig. 13 Flying track of MASER 11

德国各科研团体和大学从 1972 年开始提出并执行了一系列火箭探测计划。1978-1983 年发射了约 300 枚火箭,其中 MAP/Wine 计划是其国际合作的一部分。这个计划联合了气球、火箭、地面观测设备和卫星遥感等探测手段,研究高纬度区冬季平流层顶至大约 120 km 高度间的大气结构、中层大气的运动、成分、辐射的相互作用。

在德国政府 2001 年 5 月批准的新航天计划中,用于微重力实验的探空火箭为其重要的组成部分。德国的两种朗缪尔探针设备分别于 2002 年和 2003 年搭载 NASA 的探空火箭上天。回首德国过去的 30 多年,600 多件送往太空的微重力实验设备中有 1/4 是由探空火箭完成的。探空火箭是德国空间项目中的重要工具,主要涉及空间科学、对地观测、微重力研究和返回技术。2004 年 10 月 23 日,DLR 研制的 VSB-30 型火箭试飞成功,它标志着欧洲微重力探空火箭计划的复兴。

德国的 TEXUS 45 探空火箭于 2008 年 2 月 21 日由瑞典 Esrange 发射场发射升空。在火箭持续 6 min 的失重飞行期间,进行了 3 项搭载实验。TEXUS 45 由 DLR 筹资,与 EADS Astrium 公司、瑞典航天公司等联合建造。

德国于 2009 年 5 月 22 日在位于瑞典 Esrange 航天中心完成一枚微重力材料物理实验火箭发射任务 MAPHEUS(图 14)。MAPHEUS 实验火箭由两级固体燃料火箭发动机发送到 140 km 的高度,实验仪器 ARTEX-X 主要目的是确定和控制熔铸过程中影响微观结构的流体流动模型,以便分析研发和进一步为流体流动的熔铸结构建立数值化模型。有效载荷 AERO-GET 旨在合成新功能的带有非线性光学性质的混合气凝胶,通过从纳米到微米尺度的具有透明基质、铁、光折变特性的粒子综合在一个纳米结构的硅气凝胶组成的透明模具中,期望在微重力条件下实现粒子(从几纳米到几微米)的空间均匀分布,目的在于准备混合气凝胶。



图 14 德国微重力材料物理实验火箭 MAPHEUS
Fig. 14 German micro-gravity materials physics experiment rocket MAPHEUS

英国于 2008 年 1 月 31 日在挪威安岛发射场成功发射了一枚 HOTPAY-2 探空火箭^[34],如图 15 所示。HOTPAY-2 项目是欧盟资助的科学计划的一部分,其有效载荷为 9 台科学探测设备,完成了 3 大类科学探测项目:中间层顶与热层科学探测、极光科学探测和宇宙线通量探测。中间层顶与热层科

学探测的目标是探测地球夜气辉的一种重要组成成分——放射 Na D-line。该实验通过一个钠光度计在 80~105 km 空间范围内进行。3 个 NEMI 光度计提供氧原子密度曲线图并允许用于极光影响的校正, 同时还可以对 Na 原子的密度和温度曲线图进行测定。NEMI 光度计同时将观察 NO 和 O 原子在 70 km 以上空间范围内结合产生 NO₂ 后发出的射线。绝对电子密度和阳离子垂直高分辨率曲线将由法拉第旋转系统和离子探测器测量。极光科学探测主要探测极光弧的电气力学特性, 而宇宙线通量探测仪器可以测量主要宇宙射线的能量谱和空气分子撞击产生的次级粒子。这次飞行可以计算出大气层外辐射源吸收量, 从而对安岛的成像宇宙噪声测量器进行直接的校准。



图 15 英国 HOTPAY-2 探空火箭

Fig. 15 British sounding rocket HOTPAY-2

2 中国的火箭探空

火箭探空是中国发展航天事业的起步项目之一。中国于 1958 年开始发展火箭探空事业, 在著名科学家钱学森、赵九章、杨南生、王希季等倡导和领导下创建了火箭探空事业^[35]。在研制发射了多种型号的试验研究、试验性探空火箭的基础上, 中国的第一枚探空火箭于 1960 年 9 月首次飞上蓝天^[36]。

1958 年 7 月, 中国科学院党组向聂荣臻副总理呈送了一份卫星研制工作分三步走的计划: 第一步发射探空火箭, 第二步发射卫星(一百公斤到数千公斤), 第三步发射更大的卫星^[37]。

中国最早开展研究和利用的探空火箭是用于气象探测的气象火箭, 研制并发射了多种气象火箭, 在 20 世纪发射的约 260 枚探空火箭中有半数以上为气象火箭, 用于中层大气(海拔 20~80 km)的大气温度、压力、密度、风速和风向等气象要素的探测^[36], 在气象火箭的研究和应用中取得了丰硕的成果。另有一些取样火箭、生物火箭和试验火箭。

中国的探空火箭按采用的动力装置的不同, 可以将它们分成三代。第一代探空火箭主要采用液体推进剂火箭发动机, 研制、使用时间为 1958~1969 年; 第二代探空火箭为采用双基推进剂的固体火箭, 研制、使用时间为 1965~1987 年; 第三代探空火箭为采用复合推进剂的固体火箭, 1970 年研制, 包括: “和平”6 号(HP-6)和“织女”1 号(ZN-1)气象火箭, “挺进”1 号甲(TL-LA)和“挺进”2 号(TJ-2)取样火箭, “织女”3 号

(ZN-3)高空探测火箭, 这几种火箭的技术指标或使用性能均已达到国外同类产品的水平^[38]。

1985~1987 年, 由中国科学院空间科学与应用研究中心在海南建立了海南火箭发射场, 是目前世界上为数极少的几个靠近赤道的低纬度火箭发射试验基地之一, 为中国火箭事业发展提供了基础。中国在海南建成了探空火箭发射场后, 于 1988 年 12 月成功地发射了 4 枚“织女”1 号火箭。1991 年 1 月 22 日和 1 月 26 日, 在海南探空火箭发射基地成功地发射了 2 枚“织女”3 号探空火箭, 由中国科学院空间科学与应用研究中心(简称空间中心)、国防科技大学、江西 620 单位所属长征机器厂、经纬化工厂联合研制。空间中心负责箭载有效载荷研制, 以及地面跟踪定位系统、遥测设备、地面数据处理设备研制; 国防科技大学负责运载火箭和地面发射支持设备的研制工作^[39]。两枚火箭载着空间中心的科学箭头分别达到 147 和 127 km 的高度^[40], 用于海拔 120 km 以下空域的大气探测和高空物理探测^[41]。然而, 中国的火箭探空在 20 世纪 80 年代已经滑向低谷、到 90 年代跌至谷底^[36]。

2008 年开始的国家大科学工程“子午工程”的建设由中国科学院牵头, 其中由空间中心负责建设实施的探空火箭系统的建设目标是进行海南火箭发射场的改造建设, 以适应新的体制和新的探空技术要求, 将为火箭探空事业的发展提供有利支撑, 是重振中国火箭探空事业的重要一步。

“子午工程”——东半球空间环境地基综合监测子午链, 是建造一条目前世界上跨度最长(南北陆地跨度约 4 000 km)、功能最全(采用地磁地电、无线电、光学、探空火箭等多种综合监测手段)、综合性最高(多学科交叉)的空间环境地基监测子午链, 监测和了解中国上空空间环境的区域性特征和空间环境的全球变化规律, 为中国各类用户提供完整、连续、可靠的多学科、多空间层次的空间环境地基综合监测数据, 全面提升中国在日地关系这一重大基础科学领域的创新能力和提高中国空间天气预报能力和服务水平, 为取得原创性的重大科研成果和减少、避免空间和地面技术系统以及人类健康遭受灾害性空间天气的损伤和破坏做出重要贡献。

为了解和进行中国低纬地区上空“子午工程”地基观测手段不能实现的 20~200 km 的中高层大气参数就地探测, 为各种遥感观测提供定标基准和卫星、载人飞船的安全服务, 需要在中国低纬地区进行气象和探空火箭的探测, 并与地基监测仪器共同进行低纬地区中高层大气和电离层探测与研究的综合性空间环境监测。

“子午工程”的探空火箭系统主要由探空运载火箭、有效载荷舱、地面遥测系统、地面数据处理系统和地面发射支持保障系统组成, 如图 16 所示, 其目标是在海南建成探空火箭探测和地面联合监测大气和电离层参数的综合探测系统。联合观测时, 探空火箭上的探测设备、电离层观测设备和大气观测设备等同步工作, 其目的是获取全面的 200 km 以下的空间环境资料, 同时进行各个空间层次的耦合效应及应用研究, 以期发现新的物理机制和规律。

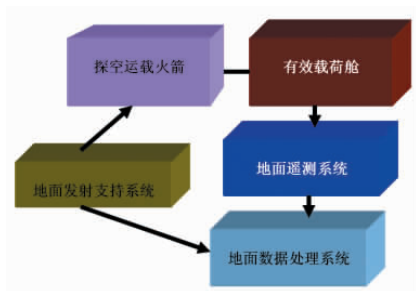


图 16 “子午工程”探空火箭系统的组成
Fig. 16 Sounding rocket system form of the Meridian Project

“子午工程”计划于 2010 年发射 2 枚探空火箭,其中 1 枚为 70 km 气象火箭,1 枚为 200 km 探空火箭。气象火箭用来探测 20~60 km 高度内空中温度、气压、密度、风速、风向等气象要素的垂直剖面分布,获取的资料可用于气候监测、天气预报、地球和天文物理研究,为运载火箭、卫星、载人飞船等飞行器的研制提供必要的环境参数;探空火箭可综合探测中高层大气微量成分(臭氧、二氧化氮等)、电场、电子温度、电子密度和离子浓度等诸多环境参数,研究高层大气和电离层中的动力学过程及其对地磁活动和太阳活动的响应,探索大气和电离层中的奥秘,建立高层大气和电离层的物理和经验模型,为航天航空事业服务。其中的有效载荷,如箭载电场仪^[42]、郎缪尔探针、微量成分探空仪以及箭上公用服务系统全部由空间中心研制,运载火箭采用中国航天科技集团公司四院研制的“天鹰”3 号火箭和“天鹰”4 号火箭。

3 火箭探空领域发展趋势

近年来,各国的火箭探空事业不断发展,探空火箭的发展趋势呈现出许多特点。

1) 在探空火箭种类和用途上各不相同。美国和日本多数的火箭用于空间探测,而欧洲超过半数以上的火箭是用于微重力科学实验,包括微重力物理实验、微重力生命科学和生物技术实验。

2) 搭载的有效载荷重量不断提高。趋向能够搭载更大重量、更多的有效载荷,由搭载有效载荷重量 50 kg,已经发展到 800 kg 以上,这样可以降低相对发射成本,提高性价比。

3) 可达到的发射高度提高。传统的火箭发射高度为 200 km 以上,目前可达到的发射高度已经超过 1 000 km。一般来讲,发射高度由任务目标来确定,发射高度高,微重力时间长,因此微重力试验火箭往往要求较高的火箭发射高度。

4) 各国的探空火箭发射数量持续不减。各国日益重视探空火箭项目,设有多个研究机构和研究项目,发射各种用途的探空火箭,如美国于 2006 年发射 42 枚,2007 年发射 48 枚。

5) 有效载荷舱的设计趋向于标准化设计。传统探空火箭的发射成本和复杂性在不断地增加,为了缩短研制周期、缩

减费用、提高性价比,许多国家逐步采用了标准化的设计思想,即将箭载的机械设备结构、电子设备、数据采集与管理设备、数据传送设备标准化,同时提供宽敞的设备空间。这样一个完整的、装备好各种基础设备的火箭提供给各学科领域的科学家,为各种有效载荷提供设施齐全、服务成套的集成、测试和综合验证平台。

6) 国际合作不断增多。发射场的地理位置不同,可以涵盖不同纬度、不同气候条件的中高层大气探测,通过国际合作,可以获得不同区域的探测结果,从而研究空间天气与全球气候变化的关系,联合发布空间天气预报。如美国的探空火箭发射地点遍布世界各地。为了实现其空间目标,国际合作也是欧洲空间政策的中心内容之一。

4 结论

火箭探空具有重要的作用和价值,各国正在积极开展火箭探空技术及试验的研究。中国的火箭探空事业虽然取得了一定的成果,但相对美国等先进国家还有很大的差距。为使中国火箭探空能够走出低谷,应该积极开展火箭探空技术研究,组织火箭探空发射活动,开展中高层大气和电离层的直接探测,空间有效载荷和元器件的短期飞行试验、微重力试验和空间生命科学试验以及创新的进入空间的飞行试验,努力提升中国火箭探空的能力和水平,为中国空间科学探测技术的发展提供经济有效的手段。

参考文献 (References)

- [1] 李大耀. 中国第一代探空火箭发展概况 [J]. 运载火箭与返回技术, 1992, 13(3): 61-76.
Li Dayao. *Launch Vehicle and the Return Technology*, 1992, 13 (3): 61-76.
- [2] 李大耀. 火箭探空活动的领域和价值[J]. 中国航天, 1992(12): 11-12.
Li Dayao. *Aerospace China*, 1992(12): 11-12.
- [3] Jiang Xiujie, Sun Huixian, Chen Xiaomin, et al. Electric control system for microgravity fluid experiment on SZ-4 spaceship [J]. *Acta Astronautica*, 2006, 58: 38-43.
- [4] Jiang Xiujie, Sun Huixian, Chen Xiaomin, et al. Utilization of a COTS component in temperature measurement system for microgravity fluid experiment on SZ-4 spaceship [J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2006, 78: 45-49.
- [5] 姜秀杰, 孙辉先, 王志华, 等. 航天电子系统中电子元器件选用的途径分析[J]. 电子器件, 2005, 28(1): 38-43.
Jiang Xiujie, Sun Huixian, Wang Zhihua, et al. *Electronics*, 2005, 28(1): 38-43.
- [6] 姜秀杰, 王志华, 孙辉先, 等. 星载商用塑封器件存在的问题及其对策 [J]. 电子器件, 2006, 29(4): 1363-1366.
Jiang Xiujie, Wang Zhihua, Sun Huixian, et al. *Electronics*, 2006, 29(4): 1363-1366.
- [7] 姜秀杰, 孙辉先, 王志华, 等. 商用器件的空间应用需求现状及发展前景[J]. 空间科学学报, 2005, 25(1): 76-80.
Jiang Xiujie, Sun Huixian, Wang Zhihua, et al. *Chinese Journal of Space Science*, 2005, 25(1): 76-80.
- [8] 李大耀. 中国火箭探空事业成绩斐然[J]. 航天返回与遥感, 1993, 14(3):

- 13-15.
- Li Dayao. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 1993, 14(3): 13-15.
- [9] 雷宁, 单建胜. 深空探测火箭的发展及应用 [J]. 固体火箭技术, 1999, 22(3): 1-5.
- Lei Ning, Shan Jiansheng. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1999, 22(3): 1-5.
- [10] Sounding Rockets Program Office. NASA sounding rocket program handbook[M]. 2005.
- [11] NASA NSROC Team[R/OL]. 2008-12. <http://www.nsroc.com/front/html/mmframe.html>.
- [12] Goddard Space Flight Center [R/OL]. 2009-05. <http://sites.wff.nasa.gov/code810/missions.html>.
- [13] Goddard Space Flight Center [R/OL]. 2009-05. <http://sites.wff.nasa.gov/code810/news/hex.html>.
- [14] Sounding Rockets Program Office. NSROC & SRPO Rocket Report of the Third Quarter[R]. NASA Report, 2007.
- [15] Goddard Space Flight Center [R/OL]. 2009-05. http://sites.wff.nasa.gov/code810/files/Rocket_Report_2nd_qt_2009.
- [16] Goddard Space Flight Center [R/OL]. 2009-05. <http://sites.wff.nasa.gov/code810/>.
- [17] NASA Launches New Technology: An Inflatable Heat Shield[R/OL]. 2009-05. <http://www.nasa.gov/centers/wallops/irve.html>.
- [18] Japan Aerospace Exploration Agency. Sounding Rockets [R/OL]. 2009-05. <http://www.isas.jaxa.jp/e/enterp/rockets/sounding/>.
- [19] Kurihara J, Abe T, Oyama KI, *et al.* Observations of the lower thermospheric neutral temperature and density in the DELTA campaign[J]. *Earth, Planets and Space*, 2006, 58: 1123-1130.
- [20] Abe T, Kurihara J, Iwagami N, *et al.* Dynamics and energetics of the lower thermosphere in Aurora (DELTA)[J]. *Earth, Planets and Space*, 2006, 58: 1165-1171.
- [21] Wakabayashi M, Ono T. Electron density measurement under the influence of auroral precipitation and electron beam injection during the DELTA campaign[J]. *Earth, Planets and Space*, 2006, 58: 1147-1154.
- [22] Ogasawara K, Asamura K, Takashima T, *et al.* Rocket observation of energetic electrons in the low-altitude auroral ionosphere during the DELTA campaign[J]. *Earth, Planets and Space*, 2006, 58: 1155-1164.
- [23] Iwagami N, Komada S, Takahashi T. Preliminary results of rocket attitude and auroral green line emission rate in the DELTA campaign[J]. *Earth, Planets and Space*, 2006, 58: 1107-1111.
- [24] Abe T, Oyama KI, Kadohata A. Electron temperature variation associated with the auroral energy input during the DELTA campaign[J]. *Earth, Planets and Space*, 2006, 58: 1139-1146.
- [25] Andoya Rocket Range. DELTA-2 sounding rocket campaign[R/OL]. 2009-05. <http://www.rocketrangle.no/campaigns/delta-2/>.
- [26] Solar-Terrestrial Environment Laboratory Nagoya University[OL]. 2009-05. <http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp>.
- [27] Japan Aerospace Exploration Agency. Launch vehicles and space transportation systems S-310/S-520/SS-520 (sounding rockets) [R/OL]. 2009-05. http://www.jaxa.jp/projects/rockets/s_rockets/index_e.html.
- [28] 张德雄, 叶定友. 瑞典的探空火箭综述 [J]. 固体火箭技术, 1995, 18(1): 1-8.
- Zhang Dexiong, Ye Dingyou. *Solid Rocket Technology*, Volume 18 No.1, 1-8, 1995.
- [29] Löth K, Larsson B, Schneider H, *et al.* IAC-02-J.3.07 ITTEL experiment module and its flight on MASER 9, Swedish Space Corporation[C]/53rd International Astronautical Congress, The World Space Congress -10-19 Oct 2002/Houston, Texas, 2002.
- [30] European Space Agency. Maxus 7 [R/OL]. 2009-06. <http://www.spaceflight.esa.int/users/index.cfm?act=default.page&level=11&page=2175>.
- [31] European Space Agency. Texus 43 [R/OL]. 2009-06. <http://www.spaceflight.esa.int/users/index.cfm?act=default.page&level=11&page=2177>.
- [32] European Space Agency. SOUNDING ROCKETS TEXUS 43 (2006)[R/OL]. 2009-06. <http://eea.spaceflight.esa.int/?pg=expl&ms=448>.
- [33] Swedish Space Corporation. MASER 11 [R/OL]. 2009-07. <http://www.ssc.se/?id=13203>.
- [34] Andoya Rocket Range. HotPay2 [R/OL]. 2009-07. <http://www.rocketrangle.no/campaigns/hotpay2/>.
- [35] 李大耀. 从探空七号气象火箭到织女三号高空研究火箭 [J]. 中国空间科学技术, 1999(5): 51-55.
- Li Dayao. *Chinese Space Science and Technology*, 1999(5): 51-55.
- [36] 李大耀, 李林藩. 20 世纪的中国火箭探空[J]. 中国航天, 2001(4): 55-59.
- Li Dayao, Li Linpan. *Chinese Space*, 2001(4): 55-59.
- [37] 胡海棠. 共圆航天梦: 人类伟大的壮举[M]. 北京: 金盾出版社, 1998.
- Hu Haitang. *The spaceflight dream comes true: The great feat of mankind*[M]. Beijing: Jindun Publishing House, 1998.
- [38] 李大耀. 我国几种新型探空火箭[R/OL]. 2009-10. <http://210.31.75.22/jysk/jstd/kong/08.html>.
- [39] 李大耀. 中国第三代探空火箭的发展概况[J]. 航天返回与遥感, 1997, 18(2): 46-58.
- Li Dayao. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 1997, 18 (2): 46-58.
- [40] 肖光全, 杨俊文. 织女三号探空火箭发射试验 [J]. 世界导弹与航天, 1991(4): 16-17.
- Xiao Guangquan, Yang Junwen. *World Missiles and Space*, 1991 (4): 16-17.
- [41] 伍科. 中国探空火箭的发展历程 [J]. 航天返回与遥感, 1998, 19(3): 41-43.
- Wu Ke. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 1998, 19(3): 41-43.
- [42] 于世强, 姜秀杰, 罗福山, 等. 箭载式空间电场探测系统[C]/中国空间科学学会空间探测专业委员会第二十次学术会议论文集. 北京: 中国空间科学学会, 2007.
- Yu Shiqiang, Jiang Xiujie, Luo Fushan, *et al.* Rocket-borne space electric field detection system [C]/Essays of the 20th Conference of Chinese Space Science Institute Space exploration Professional Committee. Beijing: Chinese Society of Space Research, 2007.

(责任编辑 朱宇)

《科技导报》“书评”栏目征稿

“书评”栏目由《中华读书报》“书评周刊”主编王洪波先生主持,发表图书评论文章,被评论的图书以高级科普、学术专著及科学文化图书为主,兼顾科学精神、科学方法、科技哲学、科学人文、科学家传记、经典科学著作、科学通俗读物、科学道德等内容的图书。欢迎投稿,择优刊登。每篇书评以 2 100 字左右为宜,需配书影,并含书名、作者、出版单位、出版年份、定价等信息。栏目责任编辑:陈广仁;投稿信箱:chenguangren@cast.org.cn。