

空间环境之火箭探测

刘 成 姜秀杰

一、探空火箭介绍

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，在近地空间进行探测和科学试验的火箭称为探空火箭。探空火箭是40~300千米高度范围内进行空间原位探测的唯一手段，是高空气球、人造卫星等航天器所不能及的。利用探空火箭能够进行中高层大气、电离层、磁层的立体剖面探测，以及微重力科学实验、空间生物技术实验、星载有效载荷先期原理性飞行试验等验证。

探空火箭是在第二次世界大战后，伴随现代火箭技术的发展而起步的。二十世纪四五十年代末美国、欧洲各国和前苏联为了发展导弹武器，利用探空火箭研究高层大气参数和近地轨道化学成分和辐射强度等环境参数，其中最著名的就是美国基于V2火箭技术研制试验的“女兵下士”探空火箭。1957年伴随着前苏联发射了第一颗人造卫星，之后人类开始进入了航天时代，发展探空火箭成为各个国家发展航天技术的重要阶段。在20世纪60至70年代，全球每年有几百发的探空火箭试验，这些试验也培养了大批的空间科学领域的科学家和工程技术人员。到70年代后，欧美各国侧重于发展国际空间站和大推力运载工具，探空火箭项目大

幅度缩减。探空火箭与搭载大型运载火箭、航天飞机等航天器相比，具有费用低、周期短、可靠性高、机动灵活等特点，美国、英国、法国、德国、日本、印度、巴西等各国每年都保持着一定的试验频次。

正如美国航空航天局(NASA)在一篇报告中所描述的，探空火箭在20世纪以高频率、低成本的方式为上层大气层和低空科学探测提供了一系列试验，为各种创新技术提供了试验平台；它奠定了NASA探索地球、月球、太阳和行星系统，各种星系及银河系的基础。

二、近地空间环境

近地空间40~300千米的高度范围内，包括中高层大气层、电离层部分(图1)，其空间环境要素主要有大气的气体成分、温度、密度、压力、风和扰动等，以及空间电场、磁场、宇宙射线、流星、空间碎片、等离子体等，是一块非常重要和有利用价值的空域，也是人们了解相对较少的区域。伴随着新一代航空器和亚轨道航天器的发展，该范围内的空间环境正在成为开展高技术应用和国防安全活动的新领域，该领域大气环境性质成为了研究热点。

探空火箭与气球、人造卫星和空间站相比，在进行空间环境监测



子午工程探空火箭蓄势待发

方面拥有它独特的优点：

- (1) 在40~300千米的高度范围内进行原位探测的唯一手段；
- (2) 可直接测量局部区域中高层大气、电离层的立体剖面探测的垂直分布，美国NASA的探空火箭甚至可达到1500千米以上高度，实现磁层探测；
- (3) 可机动、快速发射，便于观测突发性和短暂的大气现象，

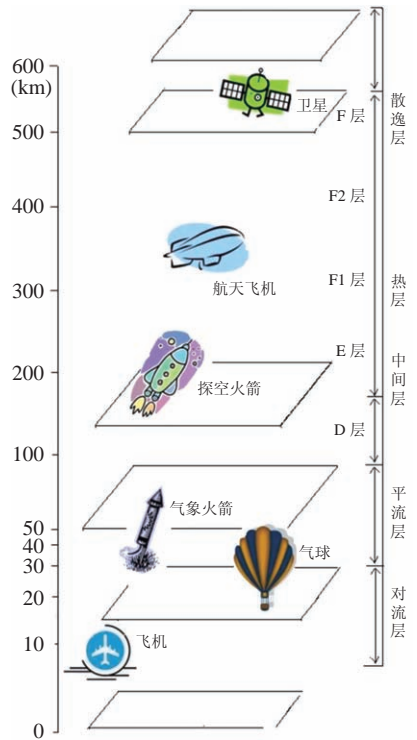


图1 各飞行器典型高度示意图

如日蚀、太阳爆发、极光现象等；

(4) 研制周期短，成本低、风险较低。

因此，当前美国、欧洲、日本、巴西等大国仍然在广泛的利用探空火箭进行空间环境的探测和试验。

三、各国探空火箭空间环境探测的情况

1 美国

美国 NASA 长期利用探空火箭进行着各种临近空间环境的探测活动，积累了丰富的科学数据，其负责探空火箭计划的机构 NSROC 目前共有十种不同类型的探空火箭系列，可以实现不同高度和类别的科学探测和试验。在 1997 ~ 2009 年 20 多年内，美国探空火箭用于地球空间科学探测研究的有 114 枚，用于光学天体物理学的有 27 枚，用于太阳风研究的有 24 枚。

极光是由于太阳带电粒子进入地球磁场，在地球南北两极附近地区的高空，夜间出现的灿烂美丽的光辉。NASA 利用探空火箭进行了一系列极光的探测活动，多方位的研究极光现象和由极光带来的空间环境的变化等。2007 年 ROPA (Rocket Observations of Pulsating Aurora, 脉动极光观测火箭) 项目发射的探空火箭携带两个 FADS (Fly Away Detectors, 飞行探测器) 探测器，探测器由磁强计、GPS 接收器和一个 HEEPS (Hemispherical Energetic Particle Spectrometer, 半球形高能粒子能谱仪) 电子探测器组成，用于获取极光区域脉动极光的信息，同年 Joule-2 项目利用四枚火

箭研究极光区域的焦耳热；随后，通过探测极光中的高频波特性，解决了地球极光高频波的一些未解决的物理问题，加深了科学研究中对朗缪尔和高层混合波的动态特性的理解。2009 年的 UE-Lynch 任务携带粒子探测器、相机、电场和等离子体探测器探测电离层电场和极光在电离层中的移动等情况，获得北极午夜前离散极光中电子沉淀物的运动和结构信息。2010 年的 RENU (Rocket Experiment for Neutral Upwelling, 中性上升流火箭实验) 项目探测了出现极光时，大气的碰撞以及与极光相关产生焦耳热的加速电子的密度、能量等特性和电场。

在太阳耀斑、日冕物质抛射、磁层亚暴、磁约束核聚变，以及与吸积盘相关的天体喷流等诸多重要科学问题中，磁重联是能量转换和加速带电粒子的基本机制之一。磁重联是方向相反的磁力线因互相靠近而发生的重新联结，引起能量转换和产生异常炽热气体，科学家用于解释太阳耀斑、日冕物质抛射等一些空间天气现象。吸积盘是指白矮星、中子星或黑洞等致密天体周围，由于物质受到引力作用向中心天体落下所形成的盘状结构。当物质落入中心时会损失角动量，因总角动量是守恒的，故角动量会发生转移，因此吸积盘相当于一个角动量传递的机制，另外还会向外辐射能量。目前单一的卫星测量数据不能很好地解释磁重联过程，多个卫星也还没有给出完整的解释，采用探空火箭可以得到高分辨率的等离子体数据，这使得科学家可以更深入地研究磁重联现象。在 2007 年 11 月 10

日，NASA 在安岛发射场发射了两颗 Black Brant XII，通过载荷切割磁力线等活动进行磁重联探测。

近几年 NASA 频繁地进行空间环境探测的活动。在 2009 年 1 月 10 日，NASA 发射了单级 Orion 火箭探测波克尔平地上方高纬度电离层 D 区的等离子体密度结构；2009 年 2 月 18 日，发射了 4 枚 Terrier-Orion 火箭，探测地球大气层中子大气湍流层顶层的电子密度、中子温度、湍流等情况，帮助理解热电离层系统并对其建模；2009 年 11 月 17 日，发射 UE-HAROH 火箭用于收集和位于中间层 50 ~ 90 千米大气区域羟基释放的辐射物质；2010 年 12 月，美国与欧洲国家合作完成 RENU 项目以探究极区的中子上涌现象，探测中性大气、电子温度、电磁场和沉淀颗粒等环境要素；2011 年 10 月 11 日和 23 日，NASA 接连发射两枚 Terrier-Orion 火箭，探测烟雾粒子陨星的数量、密度、电荷、质量分布，以研究上层大气层的陨石尘；2012 年 2 月 19 日，NASA 发射了 MICA 火箭用于研究磁层电离层耦合的 Alfvén 谐振器，探测的要素包括电子和离子的温度、密度、电子沉降、离子上浮、电场和磁场等；2012 年 3 月 18 日，NASA 还在同一发射场连续发射了 5 发探空火箭，使用 3 种系列的火箭携带三甲基铝示踪剂在急流中形成白色乳状示踪云，用于研究临近空间 550 千米水平范围内的 90 ~ 100 千米间一条较窄的高速急流带。

当前，其 NSROC 的探空火箭计划已经安排到 2014 年，每年 20 多发

中均有较多任务用于空间环境探测。

2 欧洲和日本

在临近空间环境探测方面，欧空局各成员国中以德国、瑞典等发展较为先进和活跃。德国的空间环境探测任务主要由德国宇航中心（DLR）开展执行，在临近空间环境探测方面以中间层和电离层的探测为主，其中 ECOMA 项目在 2006 年至 2010 年间共发射探空火箭 9 枚主要用于探究流星烟雾颗粒的特征及其与电离层带电成分的相互作用，统计中层大气中流星烟粒的数量密度和高度分布情况。已取得了重大的原位探测结果，如通过高分辨率的原位测量测得电子密度扰动的施密特数在 -6 到 500 之间，同时还测得了气溶胶的施密特数。

瑞典支持的 PHOCUS 项目主要用于探究大气中间层约 100 千米处的粒子及其与周围中性和带电环境的相互作用。PHOCUS 携带有瑞典、挪威、德国、美国等 8 个国家的 17 种仪器。另外德国、瑞典两国合作组织的学生火箭项目 REXUS 也可探测高度在 100 千米的大气环境，该项目已经使欧洲 10 多个国家的学生积极参与进来，并取得了积极有效的探测结果。

英国于 2008 年 1 月 31 日发射了一枚 HOTPAY-2 型探空火箭，有效载荷包括 9 台科学探测设备，实行了三大科学探测目标：中间层项与热层科学探测、极光科学探测、宇宙线通量探测。具体探测内容包括，地球夜气辉的一种重要组成成分放射 Na D-line，观察 NO 和 O 原子结合时产生的射线，以及探测绝对电子密度和阳离子密度的垂直

分布，测量极光弧的特性和宇宙射线的能量谱等。

日本在 2007 年 9 月发射的 S-520-23 探空火箭搭载了郎缪尔探针等设备，主要探究电离层中性大气与等离子体之间的耦合过程。2008 年 2 月发射的 S-310-38 探空火箭通过使用光学成像、无线电波以及原位探针三种手段从不同角度对电离层等离子体密度结构进行综合分析，主要目标是探测低电离层（如分散 E 层）内非均匀等离子体密度结构。

3 中国探空火箭和子午工程探空火箭

我国于 1958 年开始发展火箭

探空事业，以其作为发展我国航天事业的起步，并在 1960 年 9 月首次试验成功。在 20 世纪我国发射的探空火箭主要用于气象探测，主要用于海拔 20 ~ 80 千米中层大气的大气温度、压力、密度、风速和风向等气象要素的探测，另有一些取样火箭、生物火箭和试验火箭。

1985 ~ 1987 年，由中国科学院国家空间科学中心在海南建立的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。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 月在海南探空

表 1 子午工程探空火箭科学探测载荷和探测参数

探测载荷	探测参数	探测高度
朗缪尔探针	电离层的电子密度、离子密度	60 ~ 200km
双臂探针式电场仪	电离层的电场	60 ~ 200 km
大气微量成分探空仪	大气臭氧和二氧化氮浓度	20 ~ 60 km



图 2 探空火箭于 2011 年 5 月 7 日成功发射

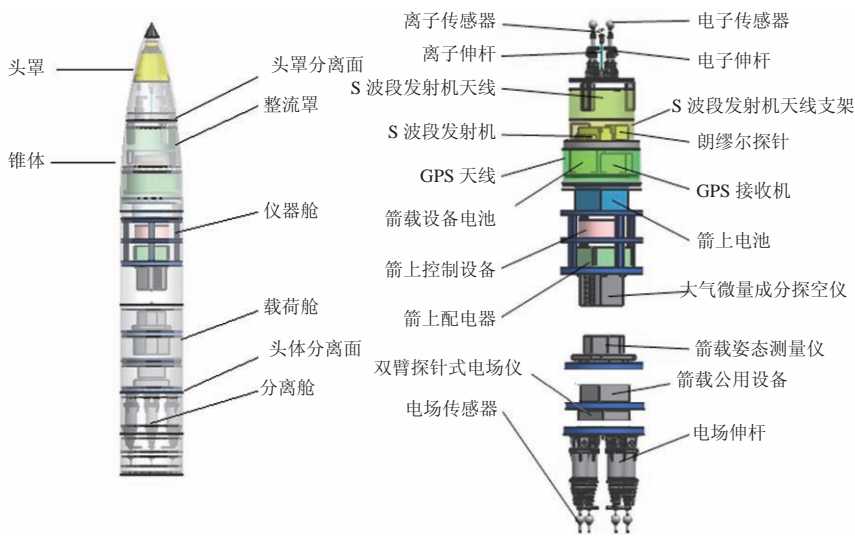


图3 子午探空火箭箭头和载荷

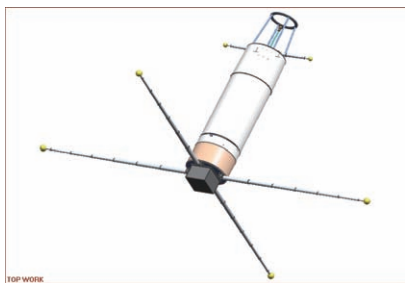


图4 箭头伸杆展开后探测状态时的示意图

火箭发射基地成功地发射了2枚织女3号探空火箭。两枚火箭载着中国科学院国家空间科学中心的科学箭头分别达到147和127千米的高度，用于海拔120千米以下空域的大气探测和高空物理探测。之后中国的火箭探空在20世纪80年代开始进入一段停滞期。

2008年1月，国家重大科技基础设施——东半球空间环境地基综合监测子午链(简称“子午工程”)启动建设，以中国科学院国家空间科学中心牵头进行1发探空火箭和1发气象火箭的研制和试验，并对中科院海南火箭发射场地进行改造建设，为火箭探空事业的发展提供了有利支撑，是重振中国火箭探空事业的重要契机。

2010年6月3日子午工程气象火箭试验成功，获得了20~60千米高度范围的温度、气压、密度、风速、风向等气象要素垂直剖面分布。中国科学院国家空间科学中心研制的海燕A型探空仪为我国首次利用GPS技术进行高空风场测量，运载火箭为航天科技集团公司所属航天动力技术研究院定型的天鹰4号A型运载火箭。

2011年5月7日子午工程探空火箭试验成功(图2)，试验搭载的鲲鹏一号探空仪包括朗缪尔探针、双臂探针式电场仪、大气微量成分探空仪三个科学探测载荷(表1)，首次获得了我国海南附近区域临近空间的大气臭氧和二氧化氮的探测数据，以及电离层的电子密度、离子密度和电场的垂直分布曲线。离子密度的精细探测数据为我们展现了海南岛上空电离层Es层。

子午工程探空火箭飞行顶点高度近200千米，有效载荷质量达到了50千克，运载能力与飞行高度均在国内探空火箭领域获得了突破。箭上鲲鹏一号探空仪配备了箭载公

用设备、GPS接收机、S波段发射机、箭载姿态测量仪、伸杆展开机构和电池等载荷(图3，图4)，集成了供配电、数据管理、传输、跟踪定位、姿态测量等功能，采用新型嵌入式操作系统和总线技术，简化了载荷的设计，提高了可靠性和通用性。在国内探空火箭上，首次利用自跟踪遥测设备，自动捕获和自主推演弹道，实现全程跟踪和数据获取。该探空火箭的运载火箭为航天科技集团公司四院研制的“天鹰”3号火箭，鲲鹏一号探空仪由中科院中国科学院国家空间科学中心负责研制。

子午工程探空火箭项目，分为运载火箭、有效载荷、遥测接收、地面数据处理、发射场五个系统，借鉴了当前国外探空火箭的新机制和新技术。子午工程探空火箭研制和试验积累下来的技术和经验，为我国形成成熟的探空火箭平台，研制新型空间环境探测载荷和技术，开展更为广泛和深入的空间探测打下基础。并有利于促进利用探空火箭开展微重力科学实验、空间生物技术实验，进行星载有效载荷先期原理性飞行试验验证等项目。子午工程探空火箭研制试验的成功，标志着中国探空火箭事业再次起航，为国家空间科学研究、环境探测和技术试验等提供经济有效的手段。

(北京中国科学院国家科学中心 100190)

作者简介

刘成，工学博士，中国科学院国家空间科学中心副研究员，子午工程主管设计师，目前从事探空火箭相关技术研究工作。