

主带彗星探测的科学目的及光谱仪设计构想

李碧岑¹, 殷建杰¹, 张昊², 王伟刚¹

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094;

2. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院, 武汉 430074)

摘要: 由于主带彗星富含水冰等挥发分并且位于火星与木星之间的小行星带区域, 因此很可能是给早期地球带来水资源的天体, 自从20世纪初期被发现以来引起了行星科学界的极大兴趣, 是未来绕飞探测的重要候选目标。总结了主带彗星 133P 光谱探测的科学目标, 并根据不同成分光谱特征分析和热特性研究需求, 提出光谱仪的主要指标构想。谱段需覆盖可见至甚长波红外 (0.4~50 μm), 通过可见红外成像光谱仪和热辐射光谱仪两台载荷分别覆盖 0.4~5 μm 和 5~50 μm 的波段范围。可见红外成像光谱仪采用紧凑型光栅分光系统设计, 光谱分辨率在可见光谱段优于 5 nm, 红外谱段优于 10 nm, 5 km 探测距离下空间分辨率优于 0.5 m, 通过低温制冷抑制背景辐射噪声, 保证信噪比优于 100。热辐射光谱仪采用时间调制型干涉分光方案, 由一台双角镜摆臂式干涉仪实现 5~50 μm 的分光, 光谱分辨率 8 cm^{-1} , 5 km 探测距离下空间分辨率优于 10 m, 采用非制冷热释电探测器。通过对两台光谱仪研制过程中涉及的关键技术进行分析, 为后续开展工程研制奠定基础。

关键词: 主带彗星; 反射和热发射光谱; 光栅光谱仪; 傅里叶变换光谱仪

中图分类号: P171.3

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)05-0488-08

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2019.05.010

引用格式: 李碧岑, 殷建杰, 张昊, 等. 主带彗星探测的科学目的及光谱仪设计构想[J]. 深空探测学报, 2019, 6 (5): 488-495.

Reference format: LI B C, YIN J J, ZHANG H, et al. Scientific objectives and design concepts of onboard spectrometers for Main Belt Comets exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6 (5): 488-495.

引言

小天体 133P/Elst-Pizarro (以下简称 133P) 于 1979 年以小行星的形式被发现并命名为 1979OW7 后, 在 1996 年又以彗星 1996O2 的形式被发现^[1], 由于其轨道特征为主带小行星但同时具有彗星的活跃性, 因此被命名为主带彗星或“活跃小行星”^[1-2], 截至 2018 年 4 月, 已有近 20 颗主带彗星及候选天体被发现^[3]。主带彗星当今的轨道特征表明, 这一群体很有可能形成于其目前所在区域, 至今已存在 39~46 亿年, 而非是遥远的柯伊伯带冰冻天体受扰动后移居到当前的位置。这一发现的重要意义在于: ①由于人们之前认为在太阳系原始行星盘的冰冻线之内不可能形成冰, 因此人们目前对盘内温度或物理机制的认识很可能不正确, 或者在早期的太阳系, 星子发生过显著的移居过程^[4]; ②由于海王星外彗星所携带水的同位素与地球海洋的平均值不符, 所以由彗星撞击地球带来水的假设可能不成立, 而地球上的水和有机

物很有可能是由主带彗星等近邻带来的。基于这些对太阳系形成和演化的重要意义, 主带彗星是未来近期人类飞跃和绕飞探测的重要目标天体^[5]。

为了理解主带彗星所携带的包括水冰在内的各类挥发分的特性、来源和分布特征, 就需要对其表面成分及其分布和产率等关键参数进行定量测量。而可见近红外和中远红外(热辐射)光谱仪是进行这些测量的最重要的载荷仪器之一。主带彗星和海外彗星除了轨道特征不同以外, 诸如 133P 主带彗星并不是在每次回归到近日点都会发生活跃性, 它在被发现以来的 6 次回归中, 有 5 次被观察到出现活跃性。目前对这一现象的理解是, 主带彗星的水冰可在距表面 50~150 m 的深度在太阳系寿命长度时间内稳定存在, 而撞击作用可能将次表层的冰暴露在地表或翻动到靠近表面的浅层, 从而在近日点处发生升华导致出现活跃性。这些特点决定了探测主带彗星与探测小行星和彗星的不同之处。本文先对光谱仪的科学目的进行描

述,再针对这些测量目的确定光谱仪主要设计指标,结合小天体探测光谱仪的技术现状,确定光谱仪的技术途径。

1 科学目的

1.1 问题提出

综合近年来国际上诸如“罗赛塔号”(Rosetta)等探测器可见近红外成像光谱仪探测 67P/Churyumov-Gerasimenko 及其它天体^[3-5]的科学目标和载荷科学目的,并针对主带彗星的特点,对开展 133P 光谱探测的主要科学目的归纳如下:

1) 寻找表面受撞击造成的活跃性:通过寻找从次表层挖掘出的挥发分材料,并对其成分和形态进行鉴定,以理解冰的升华、撞击溅射、热断裂和辐射压力等小天体损失材料的各种过程的物理机制。

2) 寻找有机化合物并鉴定其成分:在彗核中,一氧化碳(CO)、甲醇(CH₃OH)、甲醛(H₂CO)与水进行深度混合,在太阳辐射作用下发生聚合反应生成复杂的有机化合物。“罗赛塔号”探测 67P 的光谱数据中,有一个位于 3.5 μm 的有机物吸收特征至今尚未理解是什么成分造成的,因此将光谱范围拓展到 50 μm,以期获得更多位于热发射谱段的化合物光谱特征,更好地确定化合物种类。

3) 确定主带彗星上各类冰的种类和成分及形态特征:由于彗星的“脏雪球”特征,在主带彗星上不太可能存在纯净的冰,在多数情况下应该是冰(水(H₂O)、氨(NH₃)、二氧化碳(CO₂)及硫化氢(H₂S)等)、有机物和硅酸盐的混杂物以及各种次生矿物。通过光谱寻找典型层状硅酸盐的 2.9~3.3 μm 光谱特征,以及矿物中未离解的水或羟基吸收特征(1.4 μm 及 1.9 μm)。例如,如果只有 1.4 μm 而无 1.9 μm 的吸收,则表明只有水溶胶。

4) 确定表面地质和矿物结构及分布信息:主带彗星的表面结构和矿物成分可提供其形成和演化信息,通过比较主带彗星和典型小行星及彗星在地质学和矿物学上的异同,可以更好地理解类小行星和类彗星的演化,以及更好地帮助我们理解太阳系的形成和演化规律。

5) 确定主带彗星表面硅酸盐矿物的成分和本质:气体-固体作用可改变原始的硅酸盐,导致某些次生的层状硅酸盐和铁氧化合物的产生,而只有在冰封的内核区域才可能找到未受改变作用的原始球粒材料。对海尔-波普彗星(长周期彗星)的观测表明,该彗星与一个年轻的恒星(也许包含有正在形成的行

星) HD100546 的光谱具有惊人的相似特征:都具有镁橄榄石的 0.9 μm 吸收特征,而橄榄石是如何进入长周期彗星的,在短周期的主带彗星中是否能探测到橄榄石?

1.2 133P 的光谱特征及光谱仪光谱范围

由于目前 133P 的光谱分类被定位为 F 类^[6]或 B 类^[7],图 1 总结了目前已有的对 133P 的光谱观测结果以及与典型 F 类天体的光谱比较。图 1(a) 比较了 133P 的可见^[8]和近红外^[7]观测以及 419 号和 704 号小行星的观测结果(数据来自 <https://pdssbn.astro.umd.edu/>),图 1(b) 则为基于热发射波段观测并使用小行星热物理模型构建的 133P 的 2~30 μm 的发射光谱^[9]。从图(1)中可见,133P 在 0.4 μm 处有一个显著的吸收,而在这之上到 2.5 μm,与其它 F 类天体相似都缺乏明显的吸收特征。在 2~30 μm 的范围内,从 2~4 μm 区域为反射太阳光和热发射的混合作用结果,而在 4 μm 以上为类似普朗克黑体辐射的发射特征。因此如果要确定 133P 的表面温度,需要光谱范

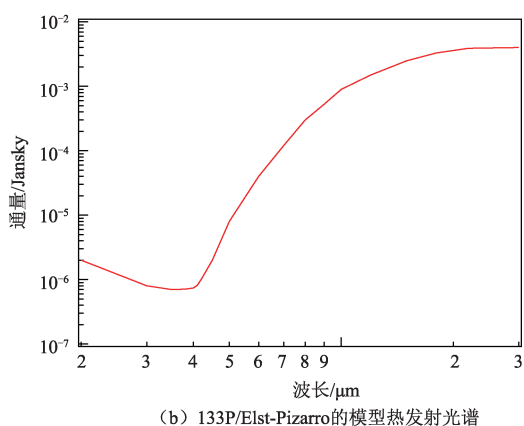
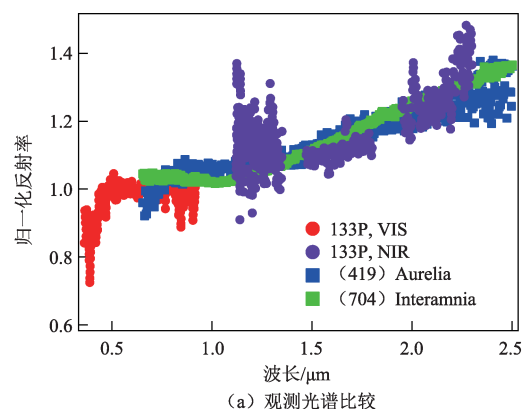


图1 133P/Elst-Pizarro 的可见(VIS)和近红外(NIR)光谱以及 F 类天体 (419) Aurelia 和 (704) Interamnia 的观测光谱比较; 133P/Elst-Pizarro 的模型热发射光谱。

Fig. 1 Visible (VIS) and near infrared (NIR) reflectance spectra of 133P/Elst-Pizarro and that of two F-bodies (419) Aurelia and (704) Interamnia; data are from PDS Small Body, Thermal emission model spectra of 133P/Elst-Pizarro

围至少到30 μm 。对各类硅酸盐等矿物的中红外实验室光谱测量表明, 如果需要确定矿物的颗粒尺寸分布, 则需要将波长延伸至50 μm ^[10]。

2 深空探测光谱仪国内外现状

国外已发射的深空探测光谱仪的谱段范围越来越宽, 谱段覆盖可见光到甚长波红外谱段, 可见光至中波红外主要探测矿物和大气成分, 中长波至长波红外主要探测热辐射。

2.1 可见红外成像光谱仪国外发展现状

可见红外成像光谱仪光谱范围宽, 并可同时获得高空间分辨率和高光谱分辨率, 已在“卡西尼”(Cassini)土星探测器、“火星快车”(Mars Express)、“罗塞塔号”(Rosetta)彗星探测器、“金星快车”(Venus Express)、“黎明号”(Dawn)小行星探测器等多次深空探测任务中获得成功应用。

2003年6月2日, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)发射了“火星快车”探测器, 其上搭载了红外矿物绘制光谱仪(OMEGA)^[11]。OMEGA是一台可见光近红外成像光谱仪, 工作光谱范围为

0.35~5.1 μm 。通过分析反射太阳光和表面热辐射, 开展小行星大气的分子组成和表面矿物质研究。可见光谱段采用推扫方式, 红外谱段采用摆扫方式, 光谱仪采用被动制冷, 工作温度为190 K。3个谱段光谱分辨率分别为7 nm、14 nm、20 nm。

2004年3月2日, ESA发射了“罗塞塔号”彗星探测器, 其上搭载了一台可见红外成像光谱仪(VIRTIS)^[12], 科学目标为研究固体的性质, 分析气体组成, 测量慧核表面的温度, 分析慧星的物理条件, 帮助寻找最佳着陆点。VIRTIS光谱仪包括两个光谱仪通道, 一个是光谱成像通道(VIRTIS-M), 一个是高光谱通道(VIRTIS-H)。VIRTIS-M光学系统包括可见光和红外两个通道, 将远心Shafer望远镜与Offner光栅光谱仪相匹配。VIRTIS-H采用交叉色散理念, 在2~5 μm 光谱范围内的平均光谱分辨率为 $\lambda/\Delta\lambda=2\ 000$ 。为了减小光谱仪自身热辐射引起的背景噪声, 仪器被制冷到130 K。

国外已用于深空探测的低温光谱仪如表1所示。可以看出, 光谱仪的光谱分辨率越来越高, 仪器普遍采用轻小型化设计。为提高探测灵敏度, 均采用被动制冷。

表1 国外深空探测可见红外光谱仪技术指标比较
Table1 Foreign visible and infrared spectrometer for deep space exploration

年份	光谱仪	光谱范围/ μm	光谱分辨率/nm	角分辨率/mrad	系统工作温度/K	重量/功耗
1989	NIMS (“伽利略号”)	0.7~1, 1~5.2	12.5/25	0.01	130	18 kg/12 W
1996	NIS(“尼尔号”)	0.8~2.6	22/44	13.3	258	14 kg
1997	VIMS (“卡西尼号”)	0.35~1.05, 0.85~5.1	7.3/16.6	0.17×0.17/0.25×0.5	135	37.14 kg/27.2 W
2003	“隼鸟号”	0.764~2.27	23.56	0.1	260	2.6 kg/21.5 W
2003	OMEGA (“火星快车”)	0.35~1.05, 0.93~2.69, 2.52~5.09	7/14/20	1.2/1.4×1.1 /1.4×1.1	19	23.5 kg/47.6 W
2004	VIRTIS (“罗塞塔号”)	0.25~1.0, 0.95~5, 2.03~5.03	2/10/3	0.25/0.25/0.5~1.5	130	30 kg/28 W
2005	VIRTIS (“金星快车”)	0.25~1.0, 1~5, 2~5	2/10/3	0.25/0.25/0.5~1.5	155	30 kg/28 W
2006	LEISA “新视野号”	1.25~2.5	5	0.06	220	10.5 kg/7.1 W
2007	VIR/MS (“黎明号”)	0.25~1, 0.95~5.05	2/10	1.2/1.4×1.1	135	24.2 kg/50 W
2011	JIRAM (“朱诺号”)	2~5	9	0.24	130	13.1 kg/18.4 W
2014	NIRS3 “隼鸟二号”	0.7~2.1	11	1.75	260	4.46 kg/14.9 W
2016	OVIRS (“奥西里斯”)	0.4~4.3	7.5~22	4	160	17.7 kg/13.5 W

2.2 热辐射光谱仪国外发展现状

光谱仪在深空探测领域的应用十分广泛，日本是最早进行小行星探测并采样返回的国家，在探测“小行星“糸川”的“隼鸟号”上日本宇宙研究开发机构（Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA）搭载一台近红外光谱仪，随后美国“黎明号”开展了对灶神星和谷神星的探测，后续美国又研制了“起源、光谱释义、资源识别、安全、风化层”探测器“奥西里斯”（OSIRIS-Rex），开展对“贝努”（Bennu）小行星的探测，该任务搭载了一台热辐射光谱仪。除小行星探测任务外，在深空探测的火星探测领域，“火星巡视探测器”和“火星快车”上也搭载了相同研究目的的“微型热辐射光谱仪”和“行星傅里叶光谱仪”。纵观深空探测的发展过程，需求光谱仪的谱段范围不断扩大，深空探测任务中不仅设置近红外和短波红外光谱仪，同样注重远红外谱段的探测。国外热辐射光谱仪具体信息如表2所示。

表2 国外热辐射光谱仪研究现状
Table 2 Abroad thermal emission spectrometer

设备名称	行星傅里叶光谱仪	微型热辐射光谱仪	热辐射光谱仪
搭载卫星	火星快车	火星巡视探测器	奥西里斯
所属单位	ESA	NASA	NASA
发射日期	2003.6.3	2004.1.24	2016.9.8
探测目标	火星	火星	小行星贝努
光谱仪类型	干涉	干涉	干涉
焦面特性	单元	单元	单元
光谱分辨率	1.3 cm^{-1}	10 cm^{-1}	8.6 cm^{-1}
波段范围	$1.2\sim 45\text{ }\mu\text{m}$	$5\sim 25\text{ }\mu\text{m}$	$5.71\sim 50\text{ }\mu\text{m}$
重量	30.9 kg	2.5 kg	6.27 kg
功耗	35 W	5.4 W	15.9 W

“火星快车”上的“行星傅里叶光谱仪”^[13]目的是测量火星表面温度和压力的垂直分布，研究火星表面风的运动特点，开展水、CO、气溶胶和矿物质的研究。因其任务包含对气体成分的分析，“行星傅里叶光谱仪”的光谱分辨率较探测无大气环境的小行星类的光谱仪的光谱分辨率高，达到 1.3 cm^{-1} ，其探测谱段分为 $1.2\sim 5.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $5.5\sim 45\text{ }\mu\text{m}$ 两个通道，通过两套独立的具有不同视场角的傅里叶变换干涉系统分别实现两个通道的探测，该载荷的质量和功耗相对较大。

“火星巡视探测器”上搭载的“微型热辐射光谱仪”^[14]用于获取火星表面矿物质温度和辐射率分布图像，有助于为着陆器寻找更好的着陆地点，并收集关

于火星地理环境的大量数据。基于对火星的长期研究，NASA针对火星的各种特性设置不同任务的探测载荷，“微型热辐射光谱仪”工作谱段设置在 $5\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ ，采用轻小型化设计，重量仅为2.5 kg。

OSIRIS-Rex上搭载的“热辐射光谱仪”^[15]的科学目标为：①记录采样位置的光谱特性、矿物质特性和地球化学特性；②Bennu表面材料的全球分布；③通过每天的温度测试确定风化特性（例如颗粒的尺寸和土层）；④通过热发射判断对亚尔科夫斯基效应的影响；⑤研究空间风化特性。较“黎明号”中的矿物质分析探测载荷，这次任务的谱段范围扩展到远红外谱段（ $50\text{ }\mu\text{m}$ ）。科学家们越来越关注小行星的热特性研究，意在预测小行星撞击地球的风险。

2.3 国内深空探测光谱仪发展现状

我国开展深空探测活动起步较晚。2012年12月13日，“嫦娥2号”对小行星4179实现了飞越探测，是我国首次进行小行星探测，获取了4179的宝贵图像资料^[16]。目前，我国尚未开展过小行星光谱探测。“嫦娥1号”月球探测任务中搭载了一台干涉式成像光谱仪^[17]，工作谱段 $0.48\sim 0.96\text{ }\mu\text{m}$ ，设置了32个通道，光谱分辨率 325 cm^{-1} （ $7\sim 30\text{ nm}$ ），空间分辨率200 m。“嫦娥3号”巡视器“玉兔号”月球车上配置了基于声光可调谐滤波器的红外成像光谱仪^[18]，具备可见近红外谱段（ $0.45\sim 0.95\text{ }\mu\text{m}$ ）的光谱成像及短波红外谱段（ $0.9\sim 2.4\text{ }\mu\text{m}$ ）的光谱探测功能，为月面巡视区矿物组成分析提供科学探测数据。与国外先进水平相比，我国的深空探测光谱载荷在空间分辨率、光谱范围和光谱分辨率等各方面均存在较大差距。

3 光谱仪设计

结合主带彗星133P光谱特性分析，同时借鉴国外小天体探测光谱仪的技术经验，分别提出了可见红外成像光谱仪和热辐射光谱仪的技术方案。

3.1 可见红外成像光谱仪

可见红外成像光谱仪拟在探测轨道高度 $5\sim 20\text{ km}$ 处开展悬停探测，由目标天体的自转进行推扫成像，实现覆盖整个天体的物质成分探测，提供可见至中波红外谱段的辐射强度图像及光谱信息。来自目标的光谱辐射信息经过遮光罩进入光谱仪光学系统，经过色散分光后到达焦面电路，最后经数据处理单元处理后传输到卫星平台。整机采用辐冷器被动制冷，红外探测器采用制冷机主动制冷。光谱仪整机系统主要包括光学子系统、电子学子系统和热控子系统。光谱仪系统组成如图2所示。

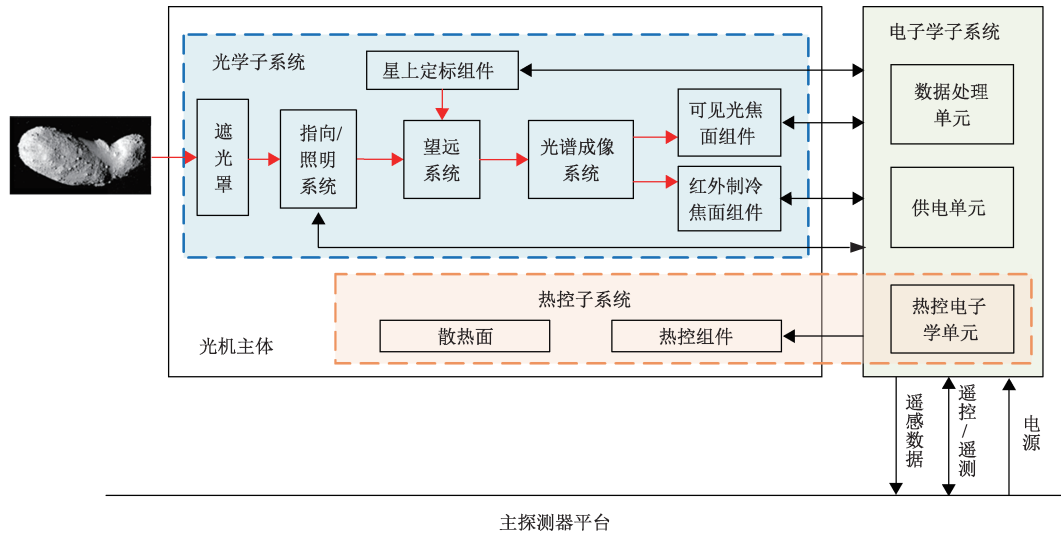


图2 可见红外成像光谱仪系统组成
Fig. 2 Block diagram of visible and infrared imaging spectrometer

光谱仪的光学系统采用全反射式，由前置望远镜系统和光谱成像系统两部分组成。采用 Shafer 望远镜+Offner 光栅光谱仪型式。通过一个光学系统来覆盖全谱段，没有校正镜、分光镜、物镜等元件，可大大减小系统的体积和重量。光学系统构型如图3所示。可见光和红外两个谱段的分光通过同一个光栅基底上的不同区域刻蚀不同密度的凹槽来实现，光栅设计示意图如图4所示。

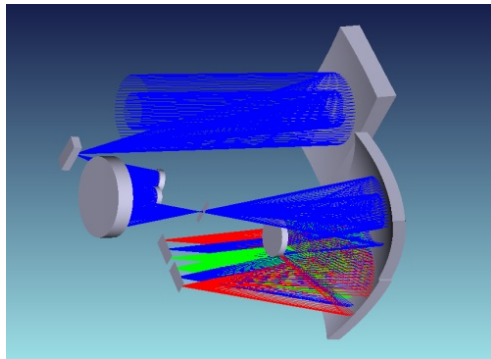


图3 可见红外成像光谱仪光学系统构型图
Fig. 3 Optical system of visible and infrared imaging spectrometer

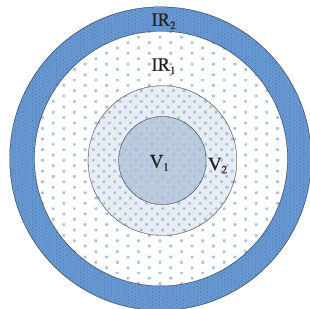


图4 光栅刻蚀示意图
Fig. 4 Schematic diagram of grating

可见红外成像光谱仪的主要技术指标如表3所示。

表3 可见红外成像光谱仪技术指标 Table 3 Specifications of visible and infrared imaging spectrometer	
项目	技术指标
谱段范围	0.4~5 μm
光谱分辨率	≤ 5 nm(0.4~1 μm), ≤ 10 nm(1~5 μm)
空间分辨率	≤ 0.5 m@5 km
信噪比	≥ 100

可见红外成像光谱仪的设计涉及以下关键技术：

1) 宽谱段紧凑型光谱分光技术

小天体物质成分探测存在很多未知因素，矿物类型及其光谱曲线通常不具备经验数据，光谱仪的谱段越宽、光谱分辨率越高，越有利于获取尽可能丰富的科学数据，满足物质成分的探测和识别。可见红外成像光谱仪覆盖可见至中波红外波段，对通道的划分、光谱分光元件的设计和加工等均提出了很高要求，光学系统设计在保证性能要求的前提下，需采用十分紧凑的光路布局，以满足深空探测载荷的轻小型化要求。本仪器通过采用复用型光栅分光元件、折叠光路布局等方法，使用尽可能少的光学元件，系统结构紧凑，并可实现光栅衍射效率、光谱畸变校正等指标的最优化，同时保证高成像质量。

2) 高灵敏度光谱成像技术

通常深空探测目标的反射率和亮温均较低，同时具备高空间分辨率和高光谱分辨率的光谱仪由于瞬时视场小和色散分光的特点，每个光谱通道的能量十分微弱，这就对系统的探测灵敏度提出了很高要求。可

见红外成像光谱仪工作至 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的中波红外谱段，除了进行探测器暗电流及其噪声的有效抑制，需将系统自身产生的红外背景辐射噪声降低至可忽略的量级。需对全探测链路进行背景辐射噪声影响的仿真分析，采用低温光学设计方法和中波红外探测器制冷技术实现背景辐射和暗电流噪声的有效抑制。

3.2 热辐射光谱仪

热辐射光谱仪采用 RC 系统前光学压束+时间调

制型傅里叶干涉分光+非制冷热释电探测的技术方案，实现宽光谱范围、高光谱分辨率、高信噪比和定标精度的系统要求。热辐射光谱仪系统组成如图5所示，被测目标光辐射信号经光学组件引入干涉仪，干涉仪对输入光束进行干涉调制，经输出光学组件汇聚引入探测器并被转换为干涉图信号。干涉图信号经信号处理器和数据处理单元处理可获得探测目标的光谱信息。

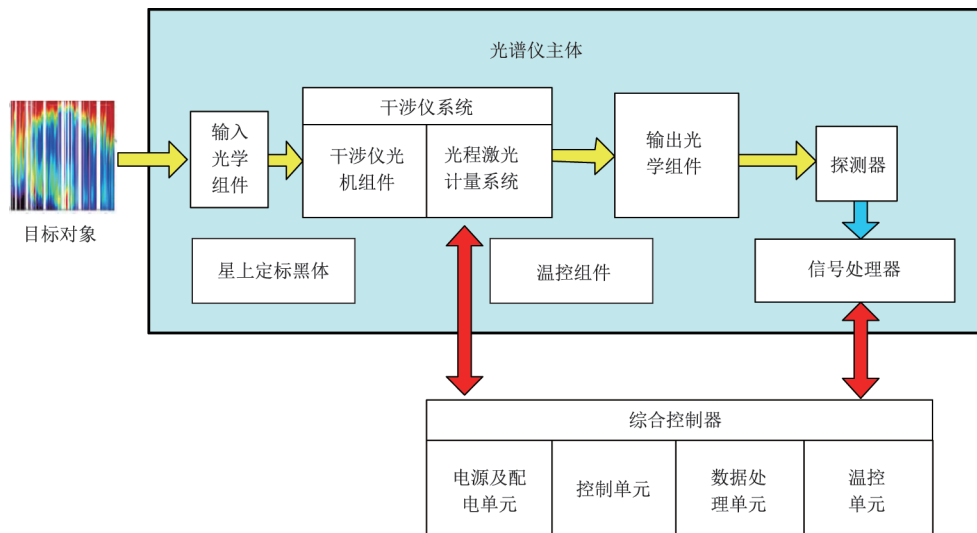


图5 热辐射光谱仪系统框图

Fig. 5 Composing of thermal emission spectrometer

热辐射光谱仪的光学系统包括前光学系统、干涉仪系统、输出光学系统，光路示意图如图6所示。前光学采用卡塞格林望远镜系统，满足大口径光学输入的同时，通过光学压束，使输出光路口径适应干涉系统要求，有效增加输入辐射能量。光谱仪的核心是一台时间调制型双角镜摆臂式干涉仪，干涉仪机构具有结构简单、刚度大、对振动不敏感等优点，尤其适用于红外谱段；采用自补偿分束器，即一块平行平板，无楔角设计且不需镀膜，有效避免了传统分束器+补偿器方案镀膜难度大、红外膜系材料稳定性差、楔角带来的宽谱段色散难以有效补偿等问题；配置高稳定性的计量激光用于实现动镜的运动控制和干涉信号采样。输出光学系统采用汇聚光路将干涉仪输出的干涉光汇聚至焦面探测器。

小行星探测中远红外热辐射光谱仪技术指标如表4所示。

基于上述指标需求和工作原理，热辐射光谱仪的设计需突破如下关键技术：

1) 高效率热辐射干涉分光技术

干涉仪的功能是对被测光束进行干涉调制，其关

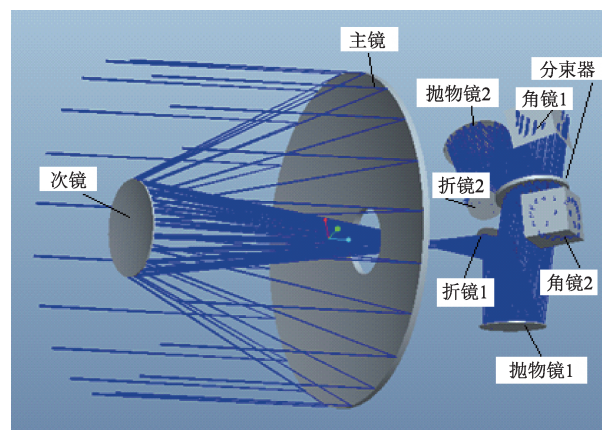


图6 热辐射光谱仪光学系统构型图

Fig. 6 Optical system of thermal emission spectrometer

表4 热辐射光谱仪技术指标

Table 4 Specifications of thermal emission spectrometer

项目	技术指标
谱段范围	$5\sim 50\text{ }\mu\text{m}$
光谱分辨率	不低于 8 cm^{-1} (无切趾)
空间分辨率	优于 $10\text{ m}@5\text{ km}$

键性能指标是透过率、调制效率和扫描稳定度,它们影响着系统的信噪比指标。需进行干涉仪构型和光路优化配置,保证干涉仪的高透过率和高调制效率;优化干涉仪控制和激光计量方案,提高控制的鲁棒性和速度稳定度;干涉仪的装调方案需确保不引入额外的光程差。

2) 非制冷热释电弱干涉信号采集与处理技术

针对红外干涉信号弱、热释电探测器时间常数较大并伴有各类噪声和多种干扰的探测条件,热辐射光谱仪需通过对微弱的红外干涉信号进行检测和调理,降低电路系统噪声,提高信号抗干扰能力,同时采用高分辨率ADC来满足大动态范围干涉信号的探测需求。同时,采用基于算法的延时匹配技术解决干涉信号的同步问题。该技术不依赖于硬件电路,仅通过数据采集和处理标定出需要补偿的延时量,再经算法计算即可实现信号的同步,可有效提高系统信噪比。

5 结 论

基于主带彗星133P已有的可见-近红外反射光谱和热发射观测数据以及光谱探测主带彗星的科学目标,提出光谱仪的谱段需覆盖 $0.4\sim 50\mu\text{m}$,仪器包括一台可见近红外成像光谱仪($0.4\sim 5\mu\text{m}$)和一台傅立叶变换热发射光谱仪($5\sim 50\mu\text{m}$)。通过借鉴国外已开展的深空探测任务中的光谱仪设计和其应用需求,提出了适用于小行星和彗星探测的可见红外成像光谱仪的技术方案和关键技术,可为后续我国相关任务的规划提供技术参考。

致 谢

感谢李荐扬博士对133P光学特性的有益讨论。

参 考 文 献

- [1] HSIEH H H, JEWITT D C. A population of comets in the main asteroid belt [J]. *Science*, 2006, 312 (5773): 561-563.
- [2] HSIEH H H, JEWITT D C, LACERDA P, et al. The return of activity in main-belt comet 133P/Elst-Pizarro [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, 403(1): 363-377.
- [3] SNODGRASS C, JONES G H, BOEHNHARDT H, et al. The Castalia mission to Main Belt Comet 133P/Elst-Pizarro [J]. *Advances in Space Research*, 2018, 62(8): 1947-1976.
- [4] Main-belt comet [EB/OL]. [2018-06-20] https://en.wikipedia.org/wiki/Main-belt_comet#Members.
- [5] CORADINI A, CAPACCIONI F, DROSSARI P et al. VIRTIS: The imaging spectrometer of the ROSETTA mission[J]. *Advances in Space Research*, 1999, 24(9), 1095-1104.
- [6] BANULO S, TOZZI, G P, BEOHNHARDT H, et al. Polarimetry and photometry of the peculiar main-belt object 7968 133P/Elst-Pizarro [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2010, 514: a99-1-13.
- [7] LICANDRO J, CAMPINS H, TOZZI G P, et al. Testing the comet nature of main belt comets, the spectra of 133P/Elst-Pizarro and 176P/LINEAR [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2011, 532: A65-1-7.
- [8] ROUSSELOT P, DUMAS C, MERLIN F. Near-infrared spectroscopy of 133P/Elst-Pizarro [J]. *Icarus*, 2011, 211: 553-558.
- [9] BAUER J M, MAINZER A K, GRAV T, et al. WISE/NEOWISE observations of active bodies in the main belt [J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, 747 (1): 49-1-9.
- [10] BARUCCI M A, DOTTO E, BRUCATO J R, et al. 10 Hygiea: ISO infrared observations [J]. *Icarus*, 2002, 156: 202-210.
- [11] BELLUCCI G, ALTIERI F, BIBRING J P, et al. OMEGA/Mars Express: Visual channel performances and data reduction techniques [J]. *Planetary and Space Science*, 2006, 54: 675-684.
- [12] CORADINI A, CAPACCIONI F, DROSSART P, et al. VIRTIS: an imaging spectrometer for the ROSETTA mission [J]. *Space Science Reviews*, 2007, 128: 529-559.
- [13] CHRISTENSEN P R, BANDFIELD J L, HAMILTON V E, et al. The Mars Global Surveyor Thermal emission spectrometer experiment: investigation description and surface science results [J]. *Geophys. Res.*, 2001, E10(106): 23823-23871.
- [14] CHRISTENSEN P R, JAKOSKY B M, KIEFFER H H, The thermal emission imaging system for the Mars 2001 Odyssey mission [J]. *Space Sci. Rev.*, 2004, 110: 85-130.
- [15] BANDFIELD J L, ROGERS D, SMITH M D, et al. Atmospheric correction and surface spectral unit mapping using Thermal Emission Imaging System data [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109: E10008-1-17.
- [16] 欧阳自远. 嫦娥二号的初步成果[J]. *自然杂志*, 2013, 35(6): 391-395.
- OU-YANG Z Y. Chang'E-2 preliminary results [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(6): 391-395.
- [17] 赵葆常, 杨建峰, 常凌颖, 等. 嫦娥一号卫星成像光谱仪光学系统设计及在轨评估[J]. *光子学报*, 2009, 38(3): 479-483.
- ZHAO B C, YANG J F, CHANG L Y, et al. Optical design and on-orbit performance evaluation of the imaging spectrometer for Chang'E-1 lunar satellite [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 479-483.
- [18] 代树武, 吴季, 孙辉先, 等. 嫦娥三号巡视器有效载荷[J]. *空间科学学报*, 2014, 34(3): 332-340.
- DAI S W, WU J, SUN H X, et al. Chang'E-3 lunar rover's scientific payloads [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, 34(3): 332-340.

作者简介:

李碧岑(1985-),女,高级工程师,主要研究方向:空间光谱载荷总体设计。

通讯地址:北京5142信箱246分箱(100094)

电话:(010)68114875

E-mail: libicen_bisme@163.com

Scientific Objectives and Design Concepts of Onboard Spectrometers for Main Belt Comets Exploration

LI Bicen¹, YIN Jianjie¹, ZHANG Hao², WANG Weigang¹

(1. Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China;

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: The discoveries of main belt comets (MBC) in early twentieth century have attracted great interests of the planetary society, as the water ice and other volatile rich MBCs are located in the main belt and thus may have played a fundamental role in supplying water to the early Earth. Therefore, MBCs are very interesting and important candidate objects for the near future space missions. The scientific objectives of optical and infrared spectrometers for a flyby mission are summarized. Then the major technical specifications for the spectrometers are proposed based on the optical and thermal properties of the main belt comet 133P/Elst-Pizarro, one of the major targets. The spectral coverage of the proposed spectrometer is from 0.4 to 50 μm , which is realized by two spectrometers covering 0.4~5 μm and 5~50 μm , respectively. The visible and infrared imaging spectrometer (VIIS) is a very compact grating spectrometer covering 0.4 to 5 μm with a spectral resolution of 5 nm in the visible and 10 nm in the infrared. The spatial resolution of the VIIS is 0.5 m at an observational distance of 5 km. The signal to noise ratio of the spectrometer is better than 100 using cryogenic optics technology. Thermal emission spectrometer (TES) is a time modulated Fourier transform spectrometer. The core component of TES is one interferometer with two cube corners and swing arms which covers 5~50 μm . The spectral resolution of TES is 8 cm^{-1} . The spatial resolution of TES is 10 m at an observational distance of 5 km. A pyro-electric detector is used for the TES, working at ambient temperature. The key technologies and specifications for the two instruments are described and analyzed. The current results provide important information for engineering development in the future.

Keywords: Main Belt Comets; reflectance and emittance spectroscopy; grating spectrometer; Fourier transform spectrometer

Highlights:

- The observational reflectance spectra, thermal emission spectra and the scientific objectives of the optical spectrometers for main belt comet 133P/Elst-Pizarro detection are summarized.
- The spectrometer covering from visible to middle wave infrared with high spectral resolution of 5~10 nm is designed to be very compact.
- The spatial resolution of imaging spectrometer is 0.5 m@5 km.
- Thermal emission spectrometer has very wide wavelength coverage of 5~50 μm and high spectral resolution of 8 cm^{-1} .

[责任编辑：高莎，英文审校：朱恬]