

文章编号: 1672-8785(2017)09-0001-07

光学微小卫星参数统计分析

何 嘉 王成良 张松芝 李文杰

(空军预警学院, 武汉 430019)

摘 要: 简述了国内外光学微小卫星的发展现状, 对近二十年来国内外光学微小卫星的轨道、尺寸、质量等主要参数进行了统计和分析。由此发现, 现代光学微小卫星普遍采用太阳同步轨道, 其质量、尺寸以及功耗呈逐年下降的趋势。数据表明, 光学微纳卫星已经进入了高速发展阶段, 即将成为光学微小卫星的中坚力量。但综合考虑成本、功耗和关键效能等因素, 光学微小卫星的尺寸和质量并不是越小越好, 最终将稳定在一个合适的尺寸。现代光学微小卫星的谱段设置灵活且针对性强, 拥有较强的综合探测能力, 一星多用、一星多能将会成为未来光学微小卫星的普遍特点。另外, 相比于 CCD, CMOS 具有成本优势, 且新型 CMOS 的研制取得了重大进展, 预计 CMOS 器件将会被更多地应用到光学微小卫星之中。

关键词: 微小卫星; 光学; 有效载荷; 卫星参数

中图分类号: TP7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.09.001

Statistical Analysis of Parameters of Optical Micro-satellites

HE Jia, WANG Cheng-liang, ZHANG Song-zhi, LI Wen-jie

(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: The current status of the optical micro-satellites at home and abroad is presented in brief. The main parameters of the optical micro-satellites at home and abroad over the past two decades are summarized and analyzed. It is found that the modern optical micro-satellites are commonly in sun-synchronous orbits. Their mass, size and power consumption decrease year by year. The data show that the optical micro-nano satellites have entered a rapid development stage and will occupy the dominant position in optical micro-satellites soon. However, in view of the factors such as cost, power consumption and key performance, the optical micro-satellites will eventually have a proper size other than the smaller the better. Modern optical micro-satellites are flexible in spectral band setting. Strong comprehensive detection capability, multi-use and multi-capability will become the common features for future optical micro-satellites. In addition, compared with CCD, CMOS is superior in cost. The development of new CMOS has achieved significant progress. It is expected that CMOS devices will be more used in optical micro-satellites.

Key words: micro-satellites; optical; payloads; satellite parameter

收稿日期: 2017-05-03

作者简介: 何嘉 (1992-), 男, 四川成都人, 硕士生, 主要研究方向为光电信息技术。

E-mail: 309855234@qq.com

0 引言

为解决传统卫星可靠性和平台资源利用率低等问题,提出了结构一体化、质量轻量化、电路集成化的微小卫星设计理念。按照国际通用的分类方法^[1],通常把质量在100~1000 kg的卫星称为小卫星,把质量为10~100 kg的卫星称为微小卫星。微小卫星拥有体积小、重量轻、生产周期短、研制和发射成本低、设计功能密度高、机动性强等特点。

近年来,光学微小卫星在军事、气象以及空间科学等领域得到了广泛应用,与大型空间光学载荷相比,此类星载一体载荷在综合低成本对地观测及商业开发等方面具有更大的应用前景。

1 国内外光学微小卫星的发展现状

小卫星技术始于上个世纪80年代中期。目前,美国是微小卫星技术最先进、发射数量最多的国家,欧洲、加拿大、中国、日本走在世界前列,许多小国家也开始借助微小卫星项目开展本国的航天业务^[2],推动了航天技术的普及,扩大了航天技术在全球的影响。

由于微小卫星在机动性和成本上的巨大优势,这项技术很快在军事领域得到了应用。从上世纪90年代开始,美军率先开展了“强力星”(MightySat)、“21世纪技术卫星”(TechSat-2)等一系列小卫星军事应用验证^[3]。2013年,时任美空军太空司令部彼得森空军基地司令 Gen William L. Shelton 将军指出^[4]:“美军需要更科学、更经济的预算来解决目前所面临的财政危机。为了尽可能降低卫星的造价和发射成本,必须通过紧密的封装技术和高集成度技术尽可能多地增加卫星平台的功能载荷密度,美军将在小卫星的研制中投入大量经费”。

在民用领域,微小卫星同样发展迅猛。在“新航天经济”的大力驱动下,大量科技企业进军航天领域,较典型的有 Terra Bella 公司(原 Sky Box Imaging 公司)、行星实验室公司(Planet)、萨瑞卫星技术公司(Saari Satellite Technology Company, SSTL)等。为了缩减卫星的研制成本和周期,加州理工大学和斯坦福大学联合提出了一种标准化

的微纳卫星设计方案—立方体卫星(CubeSat)。立方体卫星每个标准尺寸单元为1U,内核尺寸为10 cm×10 cm×10 cm,质量不超过1.33 kg,按大小可以分为1U、2U、3U等规格^[5]。立方体卫星拥有发射成本低和可批量化生产等特点,成为了光学微小卫星中不可或缺的一部分。Planet 公司研制的“鸽子”(Dove)系列卫星是典型的立方体卫星,该卫星的大部分组件都采购自货架产品(Commercial Off The Shelf, COTS),成本低于100万美元,生产周期不到10天^[6]。随着各种低轨商业光学微小卫星的相继入轨,光学微小卫星进入了发展的高速期。这些卫星组成的星座在气象、对地观测、灾害监测等领域发挥着重要作用,全面开启了微小卫星的大数据时代。除此之外,科研机构 and 卫星公司还发射了大量光学微小卫星,以用于关键技术的在轨试验,包括新型星载光通信终端试验^[7]、新型空间望远镜在轨试验^[8]等前沿技术论证。

相比西方发达国家,我国对光学微小卫星的研制起步较晚。陈芳允院士在1992年和1994年提出的对地观测七星网络和全球移动卫星信息系统“GMSIS”是我国微小卫星研究起步的一个重要标志。随着“实践5号”、“清华1号”、“天拓1号”等一系列小卫星的成功应用^[9],我国微小卫星事业走上了发展的快车道。近几年,国内有一批世界领先的光学微小卫星发射升空,比较典型的有环境与灾害监测小卫星星座“环境一号”^[10]、长光卫星公司的商用高分辨率遥感小卫星星座“吉林一号”^[11]以及中国航天科技集团的商用高分辨率遥感小卫星星座“高景一号”^[12]。

2 光学微小卫星的主要参数统计

本文统计分析了近20年发射(含计划发射)的部分典型光学微小卫星数据(数据来源于Eo-portal 卫星任务数据库,表中空余部分表示无有效数据),从多个方面给出了其发展趋势。表1汇总了部分参数的统计情况,表2单独汇总了部分卫星的谱段情况。

表 1 光学微小卫星参数汇总

卫星名	发射年份	平台质量 (kg)	载荷质量 (kg)	体积 (dm ³)	功耗 (w)	轨道高度 (km)	轨道类型	探测器	用途
Bard-B	1990	68.5	2.5	121	25	1010	S	CCD	技术论证
ADEOS	1996					800	S	CCD	轨道通信
BIRD	2001	94	13.8	615	40	572	S	CCD	红外检测
BLITS	2001	7.53		5		832	S	CCD	技术论证
AlSat-2	2002	116	18.5	360		670	S	Silicon array	国土成像
DMC-1G	2002	100		216		686	S	CCD	灾害预报
AIM	2004	200	24	1663	335	600	S	CCD	科研探索
CSTB1	2007	1		1		745	S	HgCdTe CCD	技术论证
EgyptSat-1	2007	165	26		50	668	S		对地成像
BX-1	2008	40		87		280×296	E	KAI CCD	在轨试验
CanX-2	2008	3.5		3	4	635	S	KAI CCD	技术论证
Compass-1	2008	1		1	1	635	S	CMOS	技术论证
RapidEye	2008	156	43	195	64	630	S	CMOS	地图、安全
Deimos-1	2009	88		266	30	661	S	CMOS	成像、灾害
DubaiSat-1	2009	200	35.7	1526	330	686	S	CCD	教学
RazakSat	2009	190	42.1	1356	330	685	Q	CMOS	技术论证
Aalto-1	2010	4	0.6	3	4.8	450×720	S	CCD	技术论证
DST	2010	35	20	53	32	550	C	CMOS	高分成像
N2	2011	286	2.7			700×733	S	microbolometer	观测卫星
Sich-2	2011	176	26	6344	90	670	S	CMOS	灾害, 农业
RASAT	2011	95	6.5	271	47	675×700	S	KLI CCD	技术论证
COPPER	2012	1.3	0.07	1	2	500	P	TDI CCD	红外成像
BRITE Aus	2013	6.5		8	6	775	S	CCD	恒星观测
BRITE Can	2013	6.5		8	6	630	S	silicon cells	恒星观测
CASSIOPE	2013	50		3561	600	325×1500	P	CCD	技术论证
Dove	2013	5.8		3		241	C	CCD	技术论证
KySat-2	2013			1		500	C	CCD	教学
SkySat	2013	83		384	120	600	S	CCD	对地观测
Pico-Dragon	2013	0.98		1	2.35	400	C	CCD	对地观测
BUAA-Sat	2014	30		45	13	550	S	CCD	教学
ChubuSat-1	2014	200	0.9	160	85	504	S	silicon array	太空碎片
Deimos-2	2014	310	50	3427	450	630	S	CCD	高分成像
Flock-1	2014	5		3		400	C	CCD	对地成像
Hodoyoshi1	2014	60			50	504	S	CCD	技术论证
Hodoyoshi3	2014	56	5.85	175	45	630	S	KLI CCD	对地成像
KazEOSat-2	2014	185	43	504	55	630	S	CCD	对地成像
Rising-2	2014	43	3.4	125	42	628	S	MT9P CMOS	对地观测
GRIFEX	2015					685	S	CMOS	技术论证
KR1	2015	78	5.96	126	30	550	Q	CCD CMOS	灾害预报
LAPAN-A2	2015	68		85	10.2	650	Q	CCD	灾害, 环境

表 1(续) 光学微小卫星参数汇总

卫星名	发射年份	平台质量 (kg)	载荷质量 (kg)	体积 (dm ³)	功耗 (w)	轨道高度 (km)	轨道类型	探测器	用途
Nano-Jasmine	2015	35	1.7	132		800	S	TDI CCD	技术论证
PISat	2015	5.3	0.17	12	4.5	630	S	Kodak CCD	技术论证
AAReST	2016	40		960	5	650	S	CCD	技术论证
BIROS	2016	180	50	342	80	515	S	mono CCD	火灾检测
CNES_eyesat	2016	78		1				CCD	技术演示
Diwata-1	2016	50		106		400	C	CMOS	灾害、农业
GHGSat-D	2016	15	5.4	24		515	S	CCD	温室气体
LAPAN-A3	2016	115		111	50	515	S	CCD & CMOS	海上交通
OPAL	2016			0.1		370	C	CCD	太阳活动
KazSTSAT	2017	110	50		35	542	S	CCD	对地成像
NEMO	2017	16	9	16	80	650	S	CCD	空间监视
OPS-SAT	2017	5.4		3	30	600	S	Omni CMOS	观测卫星
MATS	2019	50		387	40	600	S	CMOS	大气层研究
有效数		49	26	47	37	52			
平均		80	18	506	87	607			S: 太阳同步轨道
标准偏差		79	18	1161	138	219			C: 近圆轨道
最大		310	50	6344	600	1010			E: 近地椭圆轨道
最小		0.98	0.07	0.1	1	241			Q: 近赤道轨道 P: 极地轨道

表 2 部分光学微小卫星谱段统计

卫星名	谱段范围 / μm	卫星名	谱段范围 / μm	卫星名	谱段范围 / μm	卫星名	谱段范围 / μm
	0.43-0.56		0.42-0.51		0.45-0.52		0.45-0.52
BIROS	0.57-0.73	Deimos-2	0.51-0.58	Hodoyoshi-1	0.52-0.60	LANPAN-A3	0.52-0.60
	0.79-0.93		0.60-0.72		0.63-0.69		0.63-0.69
	3.4-4.2		0.76-0.89		0.78-0.89		0.76-0.90
	8.5-9.3						
	0.52-0.62		0.42-0.51		0.52-0.62		0.50-0.59
Dove	0.63-0.69	OPS-SAT	0.51-0.58	DMG-1G	0.63-0.69	EgyptSat-1	0.61-0.68
	0.76-0.90		0.60-0.72		0.76-0.90		0.79-0.89
	0.45-0.52		0.42-0.51		0.50-0.59		0.45-0.52
Hodoyoshi-3	0.52-0.60	DubaiSat-1	0.51-0.58	Sich-2	0.61-0.68	SkySat	0.52-0.60
	0.63-0.69		0.60-0.72		0.79-0.89		0.61-0.70
	0.78-0.89		0.76-0.89		1.55-1.70		0.74-0.90
	0.63-0.69		0.45-0.63		0.42-0.51		0.42-0.51
KazSTSAT	0.69-0.74	KR1	0.50-0.90	DST	0.51-0.58	LAPAN-A2	0.51-0.58
	0.77-0.90		0.90-1.50		0.60-0.72		0.60-0.72

3 光学微小卫星的主要参数分析

通过对轨道的统计,可以分析卫星的任务特点;通过对尺寸和质量的统计,可以分析卫星的集成化水平和发展趋势;通过对功耗的统计,可以分析卫星的电子器件性能;通过对谱段的统计,可以分析卫星的综合探测能力;通过对传感器的统计,可以分析卫星的制造成本和成像质量。本文分别对光学微小卫星的轨道、尺寸、质量、功耗等重要参数进行分析。

3.1 轨道

从近 20 年发射的 52 颗光学微小卫星的轨道高度来看,最大近地点轨道高度为 1010 km,最小近地点轨道的高度为 241 km,平均高度为 595 km,标准差为 140 km;最大远地点轨道的高度为 1500 km,最小远地点轨道的高度为 257 km,平均高度为 625 km,标准差为 182 km。其中,绝大部分轨道的高度在 400~800 km 之间,由于尺寸和质量的限制,光学微小卫星的成像分辨率普遍不高。而采用近地轨道可以获得更高的空间分辨率,从而有效弥补这一不足。

在轨道类型方面,80% 以上的卫星采用太阳同步轨道。一般来说,卫星的轨道是由其业务所决定的。由于大部分光学微小卫星属于侦查、气象和资源类的卫星,需要从照片中提取足够的信息。太阳同步轨道卫星以相同方向经过同一纬度的当地时间是相同的,每次对同一区域拍摄时的照度是相同的。通过对比,可以获得更多的信息^[14]。此外,太阳同步轨道卫星在经过同纬度地点时拥有相近的光照条件,对卫星上的太阳能电池和可见光传感器十分有利。

3.2 尺寸

统计的 47 颗卫星中,体积最大的为 6 m^3 ,最小的为 0.0001 m^3 ,平均体积 0.5 m^3 ,标准差 1 m^3 。从图 1 中可以看出,近年来发射的微小卫星尺寸呈逐年稳步下降的趋势,从统计结果来看, 1 m^3 以下的卫星 40 颗, 1 m^3 以上的 7 颗,小尺寸(小于 1 m^3) 卫星已成为主流。

为了尽可能地利用有限的平台资源,越来越多的新技术被应用到了光学微小卫星之中。美国

犹他州立大学的立方体卫星项目 OPAL(Oxygen Photometry of the Atmospheric Limb) 在其高分散多狭缝成像光谱仪 (high-dispersion multi-slit imaging spectrometer) 中使用了光路折叠的设计以节约平台资源^[15];德国柏林技术大学航空与航天研究所的研究项目 (Dobson Space Telescope, DST) 在卫星体积和质量有严格限制的情况下,使用 50 cm 口径的可折叠光学系统^[16] 在 550 km 的轨道高度完成了对地球的高分辨率 (1 m GSD) 成像。

随着立方体卫星的快速发展,小卫星微型化、微卫星皮纳化的趋势非常明显。但是,并不是所有任务都适合立方体卫星,过小的体积会制约卫星的性能。预计未来光学微小卫星尺寸会逐步稳定在一个大小合适的尺寸。

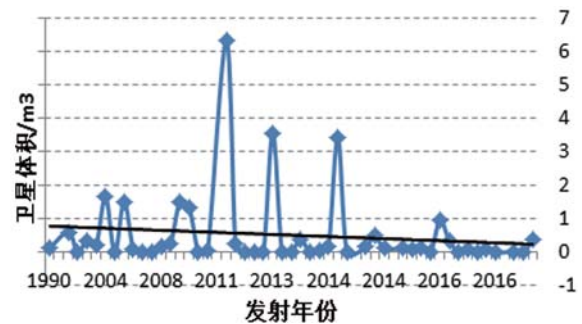


图 1 近 20 年部分光学微小卫星的体积

3.3 质量

在近 20 年发射的 49 颗光学微小卫星中,质量最大的为 310 kg,最小的为 1 kg,平均为 80 kg,标准差为 79 kg。微小卫星的质量总体保持平稳,大致稳定在 10 kg 到 300 kg 这个区间。其中,50 kg 以下的卫星 21 颗,50~300 kg 的卫星 27 颗,300 kg 以上的卫星 1 颗。对发射的光学微小卫星按上述质量区间进行统计,可以得到以下结论:

(1) 在光学微小卫星中,50 kg 以下卫星的发射数量位居第二,这些卫星主要由立方体卫星构成,包括 Planet 公司发射的“鸽群”(Flock-1) 商用卫星星座^[17] 以及各种技术论证卫星。为了实现最佳设计,确保结构完整性,同时使质量最小化,该级别卫星的支架和内部面板一般会采用镁合金、空间级塑料等轻型航空材料制作。为

了提高其耐氧化性能,使用高磷化学镀镍等化学品对镁部件进行镀覆^[18]。

欧洲宇航局 (European Space Agency, ESA) 计划在 2017 年下半年发射他们的首颗纳米卫星 OPS-SAT^[19]。ESA 的加入极大地推动了微纳(皮)卫星的发展。数据表明,光学微纳(皮)卫星已经进入了高速发展阶段,预计其数量将在未来几年内急剧上升,不久便会成为光学微小卫星的中坚力量。

(2) 50~300 kg 的光学微小卫星数量最多,并且这些卫星涵盖了对地成像、灾害预报、环境监测、农业生产、在轨演示等诸多领域,应用十分广泛。其中主要包括几个大型的星座如国际灾害监视星座 DMC 的第一代微型卫星系统 DMC-1G^[20] 以及快眼 (“RapidEye”) 等对地观测星座^[21]。

(3) 300 kg 以上的光学微小卫星的数量最少。这种较大的光学微小卫星基本都是高分辨率成像卫星,它们包括 SSTL 的第三代微型灾害监视星座 DMC-3^[22]、美国“战术星”系列卫星^[23]、中国“吉林一号”商业遥感卫星星座和中国“高景一号”商业遥感卫星等。

光学微小卫星的平均质量还会有小幅下降,但充分考虑到卫星的成本、功耗和关键效能等因素,其质量并不会一直下降。SSTL 公司创始人 Martin Sweeting 在一次小卫星会议上曾表示^[24]:“一颗微小卫星的最佳大小为 42 kg”。预计未来光学微小卫星的质量将会维持在 40~50 kg 左右。

3.4 平均功耗

37 个有效样本中,最大平均功耗为 600 W,最小为 1 W,平均值为 87 W,标准差为 138 W,卫星的平均功耗呈总体下降趋势。

由于平台质量和体积的限制,微小卫星的能源供需矛盾尤为突出,这就要求其必须朝着低功耗的方向发展。以 STLL 公司的 KazSTSA^[25] 为例,其有效载荷的在轨平均功耗只有 30 W,仅和一台 14 in 显示器的相当。考虑到微小卫星的特殊性,科研人员对其电源系统开展了一系

列研究。目前,国外的微小卫星电源技术已经趋于成熟,并且出现了一系列货架产品。

3.5 谱段

据不完全统计,近十年发射的大部分光学微小卫星针对不同观测目标设置了不同的谱段。由表 2 可知,绝大多数卫星都搭载了多光谱 CCD 相机,普遍设置了三个(红、绿、蓝)以上的观测谱段,而某些环境与灾害监测卫星还专门针对火灾、旱灾等灾害安装了红外谱段相机,针对大气监测安装了光谱分辨率更高的超光谱成像仪等设备。新一代温室气体监测卫星 GHGSat-D^[26] 配备了先进的微型高分辨率成像光谱仪,其质量仅为 5.4 kg,但光谱分辨率却高达 0.1 nm。

现代光学微小卫星谱段设置灵活且针对性强,拥有较强的综合探测能力,一星多用、一星多能将会成为未来光学微小卫星的普遍特点,其有效载荷将会发展为高集成度、多谱段、多功能、多工作模式的先进探测系统。

3.6 图像传感器

52 颗卫星的图像传感器类型中,CCD 图像传感器占 71%,COMS 传感器有占 23%。虽然 CCD 器件的成本比 CMOS 器件高,且制造工艺更复杂,但它能够有效克服 CMOS 易出现杂点和成像质量低的缺点,因而得到了更广泛的应用。为了提高光学微小卫星的成像质量,许多新技术被应用到了图像传感器中,比如:日本于 2015 年发射的微小试验卫星 Nano-Jasmine 使用了一种新型的全耗尽 CCD(Full-Depletion CCD),该卫星在时间延迟积分(Time Delay Integration, TDI)观察模式中使用这种新的 CCD,通过整合像素的电子变化来抑制读出噪声^[27]。又比如 SkySat 卫星采用了 TDI 体制的过采样探测技术^[28],其 CMOS 传感器以高帧频对同一地面目标多次采样,通过多帧数据融合提高图像的信噪比和分辨率。

科研人员对新型 CMOS 的研制也取得了重大进展。去年,北京大学鹏海林团队首次发现了一种全新的二维半导体硒氧化铋(Bi₂O₂Se)。该半导体同时具备超高电子迁移率、合适带隙、环

境稳定和可批量制备的特点, 是一种高性能的 CMOS 沟道材料^[29]。CMOS 的整体性能有望大幅提升。除此之外, CMOS 在成本上拥有巨大优势, 预计新型 CMOS 器件将逐步取代 CCD 器件。

4 结束语

简介了国内外光学微小卫星的发展情况。通过参数统计, 分析了光学微小卫星的发展特点。作为大型光学卫星的一个重要补充, 光学微小卫星的出现极大地丰富了现有航天系统的探测能力和探测手段, 其谱段设置灵活, 且针对性强, 拥有较强的综合探测能力。一星多用、一星多能将会成为未来光学微小卫星的普遍特点。随着立方体卫星的发展、新型 CMOS 等新技术的应用, 光学微小卫星将迎来更为广阔的发展前景。

参考文献

- [1] 童兴. 小卫星如何按重量分类[J]. *国际太空*, 2001(8): 5.
- [2] 周润松, 刘韬. 国外高分辨率小卫星星座进入高速发展期[J]. *国际太空*, 2017(1): 30-34.
- [3] 黄志澄. 小卫星技术及其军事应用的新进展[J]. *卫星应用*, 2008(2): 36-41.
- [4] Shelton W L. Military Space: At a Strategic Crossroad[J]. *Air & Space Power Journal*, 2013, **27**: 4-10.
- [5] 何慧东. 立方体卫星应用发展研究[J]. *卫星应用*, 2016(11): 31-36.
- [6] Boshuizen C, Mason J, Klupar P, et al. Results from the Planet Labs Flock Constellation[C]. *Proceedings of the 28th AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2014: 1-3.
- [7] Schmidt C, Brechtelsbauer M, Rein F, et al. OSIRIS Payload for DLR's BiROS Satellite[C]. *International Conference on Space Optical Systems and Applications, Kobe*, 2014: 6-9.
- [8] Underwood C, Pellegrino S, Lappas V J, et al. Using CubeSat/micro-satellite Technology to Demonstrate the Autonomous Assembly of a Reconfigurable Space Telescope (AAReST)[J]. *Acta Astronautica*, 2015, **114**: 112-122.
- [9] 安君帅, 张生玥, 肖跃. 国内外小卫星的发展现状及前景[C]. 第十二届卫星通信学术年会论文集: 第十二届卫星通信学术年会, 2016: 95-102.
- [10] 王桥, 吴传庆, 厉青. 环境一号卫星及其在环境监测中的应用[J]. *遥感学报*, 2010, **14**(1): 104-121.
- [11] 张曼倩. 吉林林业一号卫星[J]. *卫星应用*, 2017(3): 78.
- [12] 赵迎龙, 锤望. 高景一号商业遥感卫星成功发射[J]. *航天器工程*, 2017(1): 145-145.
- [13] Macdonald M, McKay R, Vasile M. Extension of the Sun-Synchronous Orbit[J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2015, **33**(6): 1935-1940.
- [14] Jeppesen M, Miller J, Cox W, et al. The Optical Profiling of the Atmospheric Limb (OPAL) CubeSat Experiment[C]. *AGU Fall Meeting*, 2015.
- [15] Segert T, Danziger B, Lieder M. Dobson Space Telescope The Future of Microsat Based Observation [M/OL]. [2017-05-10]. <http://www.dobson-space-telescope.com>,
- [16] Center N S. Largest flock of Earth-imaging Satellites Launch into Orbit from Space Station[M/OL]. [2017-05-10]. <https://phys.org/news/2014-02-largest-flock-earth-imagingsatellites-orbit.html>
- [17] Grocott S C O, Ibrahim N, Diaconu D, et al. The NEMO-AM Mission: Earth Observation and Aerosol Monitoring on a Nanosatellite Platform[C]. *4S Small Satellites Systems and Services Symposium*, 2014.
- [18] Evans D J. OPS-SAT: Designing a Mission from the Ground Upwards[C]. *International Conference on Space Operations*, 2016.
- [19] Earth Observation Portal. DMC-1G[M/OL]. [2017-05-11]. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/D/DMC-1G>.
- [20] Earth Observation Portal. RapidEye[M/OL]. [2017-05-11]. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/R/RapidEye>.
- [21] 刘韬. 首批第三代“灾害监测星座” - 北京-2 星座于 7 月成功发射[J]. *国际太空*, 2015(7): 1-6.
- [22] 陈亮. 美国战术星项目发展综述[J]. *外军信息战*, 2012(4): 14-19.
- [23] Debra Werner. Smallsat Builders Admit a Little Bigger Might be a Little Better[M/OL]. [2017-05-11]. <http://spacenews.com/smallsat-builders-admit-a-little-bigger-might-be-better>.
- [24] Earth Observation Portal. KazSTSAT[M/OL]. [2017-05-14]. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/K/KazSTSAT>.
- [25] Earth Observation Portal. GHGSat-D[M/OL]. [2017-05-14]. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/G/GHGSat>.
- [26] Yamada Y, Fujita S, Gouda N, et al. Scientific Goals of Nano-JASMINE[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2013(S289): 429-432.
- [27] 朱仁璋, 丛云天, 王鸿芳, 等. 全球高分光学星概述(一): 美国和加拿大[J]. *航天器工程*, 2015, **24**(6): 85-106.
- [28] Wu J, Yuan H, Meng M, et al. High Electron Mobility and Quantum Oscillations in Non-encapsulated Ultrathin Semiconducting Bi₂O₂Se[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017(43): 1-6