

微纳卫星专用发射运载器发展趋势研究

Research on the Trends of Developing Dedicated Launch Vehicle for Micro/Nano Satellite

战培国 / 中国空气动力研究与发展中心

摘要: 微纳卫星低成本、快速专用发射运载器是近些年来航天运输领域人们研究关注的问题之一。本文在简要介绍国外微纳卫星发展现状及趋势的基础上,分析微纳卫星发射运载器市场及供求关系,研究专用发射运载器研发及概念技术发展趋势,探讨专用发射运载器在民用和军事领域的发展前景。

Abstract: The low-cost/responsive dedicated launch vehicle for micro/nano satellite is one of the problem in the area of aerospace transportation. This paper introduces development states and trends of micro/nano satellite, analyzes the supply and demand of the dedicated launch vehicle market, researches the development, concept and technology of the dedicated launch vehicle, discusses the trends of the dedicated launch vehicle in civil and military area.

关键词: 微纳卫星; 微小型运载火箭; 发射

Keywords: micro/nano satellite; micro-launch-vehicle; launch

0 引言

微纳卫星是指重量在10~100kg的微小卫星(Micro-satellite)和1~10kg的纳卫星(Nano-satellite)的总称。通常微纳卫星大多发射运行于大约185~300km的低地球轨道(LEO),根据任务需要也有进入极地或太阳同步轨道的。相比传统大卫星,它们具有体积小、重量轻、对用户要求反应迅速、研制周期短、成本低、使用寿命较短等特点。由于微纳卫星已能部分承担大卫星的任务,因此,在通信、对地遥感、星际探测、科学研究和技术试验等方面的应用迅速增长,受到越来越多国家的重视。

目前,世界范围内尚未形成成熟的微纳卫星低成本、快速专用发射运载器市场,微纳卫星通常是作为常规运载火箭的二级载荷搭载发射,或采用常规运载火箭一箭多星发射。微纳卫星搭载发射费用较低,但这种发射方式的时间灵活性受限,期望获得的最佳卫星轨道可

能受限,某些快速发射(如军事应急发射)需求也受限。因此,随着世界范围内对微纳卫星应用量的增长,如何发展低成本、快速发射入轨低地球轨道的微纳卫星专用发射运载器成为卫星发射领域人们研究关注的问题之一。

1 微纳卫星发射运载器现状

1.1 微纳卫星的发射需求

微纳卫星的发射需求决定着发射运载器的需求。根据美国联邦航空组织商业太空运输办公室2010年发布的预测,有效载荷质量小于100kg的太空发射将有可能成为一个新兴的太空发射市场^[1]。美国Futron公司太空活动电子实验室数据库检索数据表明^[2]:2000年至2010年,世界范围内10~100kg级别的微小卫星发射年平均大约为12个;除此之外,2005年至2010年小于10kg级别的纳卫星成功发射了54个以上。

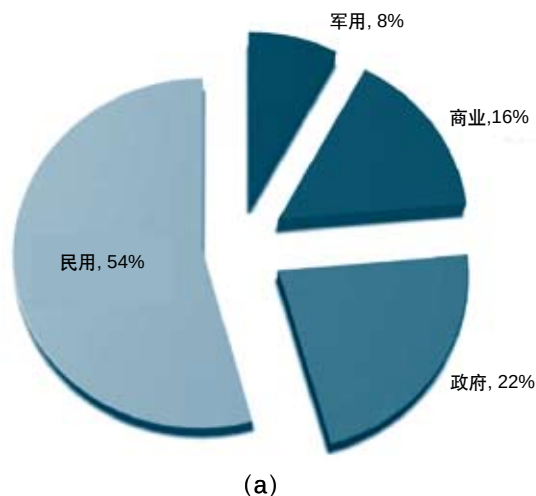
图1(a)给出了2000年至2009年,微

纳卫星(1~50kg级别)应用中在民用、军事、商业、政府机构的占比;图1(b)给出了美国商业太空组织(SpaceWorks Commercial)1~50kg级别微纳卫星发射数量统计及预测,2012至2014年预计约50~60个,并呈现出较快的增长趋势。另据该组织统计数据,2000和2011年,51~100kg级别微小卫星发射年平均不到5个^[3]。

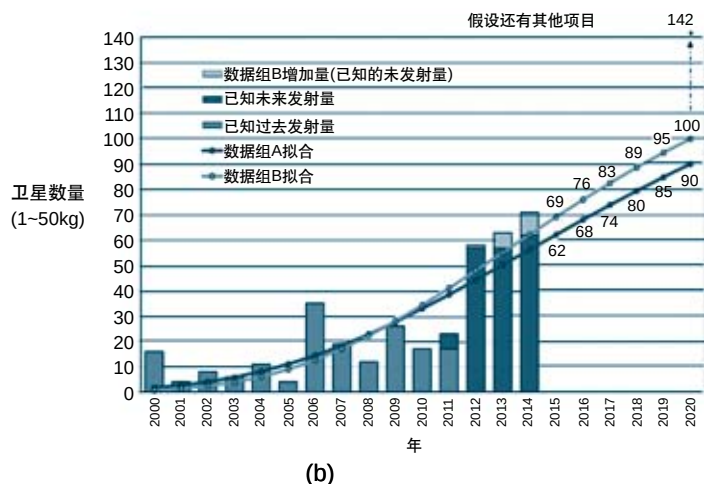
国外文献统计数据表明^[4],微纳卫星市场遍及五大洲24个国家60多个不同的各类卫星运行组织,这些组织包括民用和军用政府机构、大学、研究所、盈利和非盈利组织等,微纳卫星用户分布非常分散并且大多经费预算不高。

1.2 微纳卫星发射运载器

目前,微纳卫星发射使用的主要运载火箭见表1。分析可见,微纳卫星发射运载器主要以大、中、小型常规运载火箭为主,微纳卫星发射所需的专用发射运载器(运载能力100kg左右)极少。通



(a)



(b)

图1 微纳卫星应用领域及市场预测

表1 微纳卫星发射使用的运载火箭

运载火箭名称	国家	投入使用年代	LEO能力(kg)	发射价格(百万美元/次)
Cosmos	俄罗斯	1967	1400	13
START 1	俄罗斯	1993	632	9.0
Dnepr	俄罗斯	1999	4400	15.0
Volna	俄罗斯	2001	120	0.3
Minotaur-1,2	美国	2000	640	12.5
Pegasus	美国	1994	445	22.5
Taurus	美国	1994	1450	19.0
Ariane	法国			
LM2(长征系列)	中国	1975/1999	2500/3500	15.0-25.0
PSLV	印度	1993	3700	30.0
VLS	巴西	1997	380	6.6
Rockot	德/俄	1994	1800	15.0
M 5	日本	1997	1800	40.0
Shavit 1	以色列	1988	225	12.5

常,微纳卫星采用大中型运载火箭作为二级载荷搭载发射或一箭多星发射^[5]。商业市场的大中型运载火箭成熟可靠、信誉好,因此,微纳卫星的这种发射模式有利于提高成功率并降低发射成本。例如,2004年,法国曾用“阿丽亚娜”5G运载火箭一箭七星发射1颗主星“太阳神”2A,同时搭载发射4颗“群峰”卫星、1颗“太阳伞”和1颗西班牙的微纳卫星。2013年,印度用PSLV一箭七星发射国外微纳卫星等。

图2给出了2004年到2010年世界200kg以上运载能力的火箭实际发射次数和能提供的发射次数。由图可见,能提供的发射次数超出实际发射次数近一倍^{[3][5]}。因此,尽管按照图1(b)未来微纳卫星需求预测将有较大增长,但按照现行微纳卫星的主流发射模式和发射能力看,微纳卫星可用的运载火箭发射能力将远超发射需求。

2 微纳卫星专用发射运载器发展

除了价格因素外,某些快速发射需求,如美国作战响应空间概念就需要微纳卫星快速进入太空,是促使微纳卫星专用发射运载器发展的驱动力。

2.1 专用微小型陆基运载火箭

目前,世界上微纳卫星专用微小型陆基运载火箭研制情况见表2^[6]。由表可见,世界微纳卫星专用微小型运载火箭研制主要集中在美国,且多处于调研、发展和概念研究中。美国陆军太空和导弹防御司令部和陆军力量战略司令部的多用途微纳导弹系统较为成功,能够提供20kg左右有效载荷的低地球轨道快速发射,与现有的陆军战术导弹系统和多用途发射火箭系统发动机相适应和匹配,可用于执行除发射微纳卫星外的多种任务。

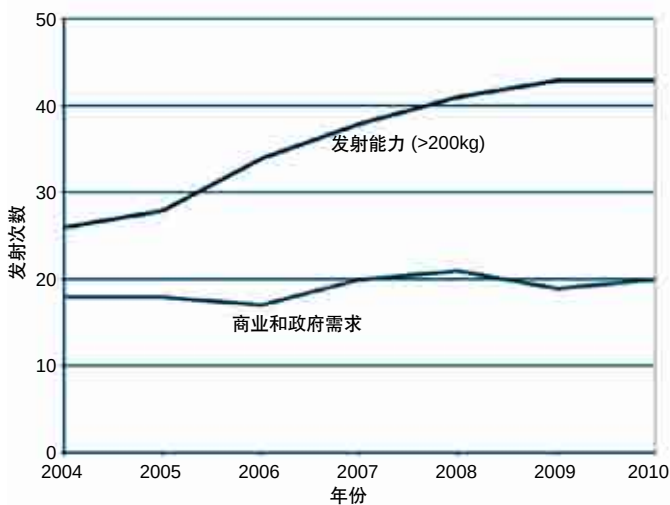


图2 世界200kg以上发射能力运载火箭的供求关系

表2 微纳卫星专用运载火箭

运载火箭名称	国家	发展状况	LEO能力(kg)	市场目标
待定	美国	创新奖	大于1kg, 一周2次	“立方星”应用
Aldebaran	法国、德国、西班牙	概念研究	小于300kg	非商业的、政府科技验证任务
MLV (微小卫星运载火箭)	加拿大	市场调研	小于150kg	
MN (多用途导弹)	美国	2011年	约23kg	军事, 作战相应空间
Neptune 30	美国	发展中	30kg	大学、非盈利机构
Scorpius/Mini-Sprite	美国	设计阶段	225kg	军事、民用和教育机构
Virgin Galactic /SSLV	美国	发展中	100kg	科学研究
Swords	美国	发展中	25kg (750km)	军事
Nano-Launcher	日本	概念研究	100kg	学术、政府任务
KT1 (开拓者 1号)	中国	2002年	100kg	商业

为了激发微纳卫星专用发射运载器的市场开发热情,美国宇航局(NASA)的一个“纳卫星快速发射挑战”机构设立了200万美元奖金,奖励在一周内能2次将微纳卫星送入近地轨道的发射运载器研制^[7]。

2.2 未来微纳卫星专用发射运载器

1) 空基挂载专用火箭运载器

母机挂载空射火箭发射是空中快速机动发射微纳卫星的一种形式^[8]。主要采用现役飞机和专用火箭发射器组合,发射有效载荷为几十千克低地球轨道的微纳卫星。母机主要有两种类型:一是采用大型飞机,如B-52、波音747

类;二是采用战斗机,如F-15、Su-27类。其关键技术主要涉及火箭发射器在母机上的挂载方式,箭、机空气动力学干扰问题,机、箭分离时母机飞行状态参数的确定等。

高空气球挂载空射火箭发射也是微纳卫星空射的一种形式。气球是轻于空气的近空间飞行器的一种形式,其飞行高度可达20km以上并可回收,可用作低成本微纳卫星发射平台。

2) 天基载星发射运载器

微纳卫星载星(SatCarrier)概念^[9]是将多个微纳卫星存储于载星,并将载星预先发射到较高的轨道上运行。当需要微纳卫星时,遥控载星释放微纳卫星并转移到低地球轨道。美国空军开展了微纳卫星载星概念的任务、用途、轨道设计管理等相关研究。微纳卫星载星可专用设计,也可用在较高轨道上长期运行的其他卫星兼任,系统方案及概念原理见图4。其关键技术是微纳卫星存储器的日常运行轨道选择及控制、微纳卫星推进技术及快速部署时的轨道转移控制等。

3) 混合新技术运载器

美国波音公司开展了部分可重复使用超燃吸气式飞行器小卫星发射概念研究^[10],发射重量45kg。美国国防部国防高级研究计划局(Defence Advanced Research Projects Agency, DARPA)发起了可负担起的小货物



图3 美国运输机和F-15战斗机空射研究

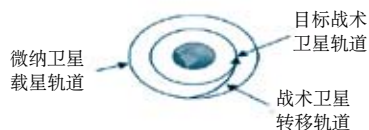


图4 美国空军微纳卫星载星(SatCarrier)概念

快速进入太空项目^[11],有效载荷约110~180kg。美国NASA兰利研究中心开展了部分可回收重复使用两级运载微小卫星发射系统研究^[12],有效载荷150kg。这些微纳卫星发射概念或技术研究均属于混合新技术运载器,其设计特点是采用多级推进和新动力系统,第一级可重复使用。

3 微纳卫星专用发射运载器发展前景

1) 微纳卫星的市场需求具有较大的波动性。微纳卫星造价相对便宜,其用户群体在卫星市场大多属于低购买力者,且分布广。1998年,美国联邦航空组织曾预测1998到2010年非地球同步轨道商业卫星将发射1202个(403次发射),但到2003年,该组织将预测修改为2003到2010年商业卫星将发射80个(51次发射),这期间军事和政府的需求下降相对较小^[2]。因此,分析微纳卫星未来需求增长,需要考虑其波动性大的特点。

2) 商业微纳卫星专用陆基发射微小运载火箭发展前景不容乐观。制约专用微小型运载火箭发展的因素很多,成本控制问题仅是其中的重要因素之一。卫星发射是太空运输,属运输范畴,无论是从陆地运输还是航空运输的发展经验看,采用单个、快速专用运输工具的运输成本普遍要高于采用集合、慢速运输工具的成本。其次,卫星发射是一个高风险的领域,运载火箭的可靠性、成功率和声誉是一个积累的过程,也是赢得发射市场的另一重要因素,高可靠性意味着质量,意味着成本。另外,降低发射成本需要提高运载火箭使用率,如前所述,微纳卫星的市场分布广泛,具有国际性且受政治等因素影响,其客户群体已经形成了固有的惯性。因此,专用陆基微小型运载火箭要从微纳卫星作为二级载荷搭载或一箭多星发射的大运载火箭中瓜分市场份额难度较大,未来的商业发射仍将以大运载火箭搭载和一箭多星为主。

3) 军用快速发射需求是微纳卫星

专用发射运载器发展的主要驱动力。美国提出了“作战响应空间”概念,设想了未来的战场需要提供“微小战术卫星快速入轨”的能力^[13],需要发展能负担得起的、快速发射运载器,这一潜在军事需求是国外开展各种微纳卫星发射新技术研究的动力。

4) 利用现役弹道导弹改装是降低专用微小型运载火箭发展成本的主要途径。在表1所列的目前常用的运载火箭中,许多都是基于已有的弹道导弹转化而来。例如,俄罗斯的“Dnepr”源自SS-18弹道导弹,“Rockot”源自SS-19弹道导弹,美国“Minotaur 4”源自“和平卫士”弹道导弹等等。美国陆军积极致力于微纳卫星的开发应用,其发展专用微小型运载火箭的思路也是最大限度利用已有导弹系统硬件和发射设施,研发多用途微小导弹系统,它既可用于微纳卫星快速发射,也可用作其他用途,如导弹防御目标飞行器、红外和雷达感应练习飞行器等。

5) 快速发射是微纳卫星军事应用的需求特点。通常微纳卫星从军方用户提出需求、卫星和火箭集成装配到入轨提供使用需要1周至6个月的时间。美国空军微纳卫星载星概念将微纳卫星存储在较高的地球轨道上,需要时释放微纳卫星到较低的低地球轨道。该方案从军方用户提出需求到入轨提供使用仅需1小时到1天时间,是一种天基快速部署方案。

6) 美、俄、法规划了微纳卫星发射运载器的发展路线图^{[14][15]},如图6所示。近期,主要是发展空射快速响应运载火箭;中期,主要是发展混合运载火箭,第一级可重复使用,二、三及以上级抛弃;远期,发展类似飞机的运载器,水平起飞,两级入轨,第一、二级可重复使用,以上级抛弃。

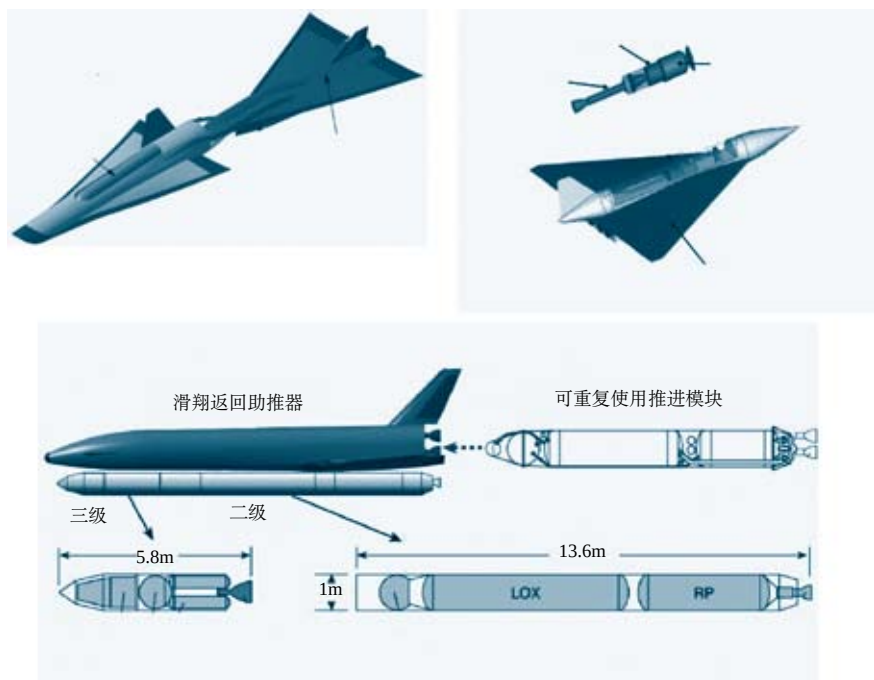


图5 几种微纳卫星运载器方案

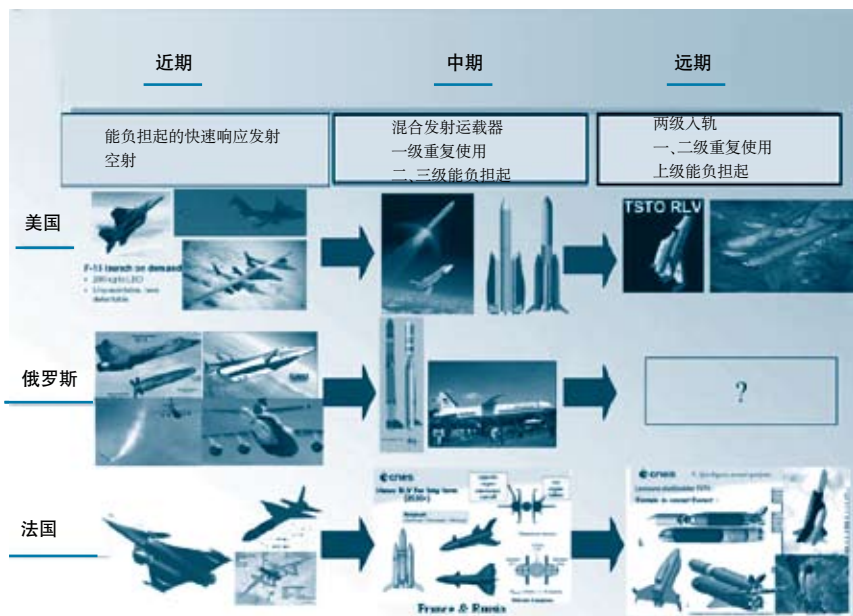


图6 美、俄、法可重复使用微纳卫星发射运载系统路线图

4 结束语

微纳卫星应用的快速增长使航天小载荷运输市场浮现出一个新的发展商机,人们开始探讨发展微纳卫星专用发射运载火箭,试图使微纳卫星发射从传统的大运载火箭搭载发射市场中分离出来。但是,商业卫星发射市场是一个高成本、高风险的市场,其制约的因素很多,微纳卫星专用发射运载火箭的商业市场不确定性很大,目前的搭载发射或一箭多星发射仍将是微纳卫星发射的主流。在军事应用领域,可负担得起、快速响应发射是微纳卫星专用发射运载器的发展方向,美国陆军利用军方现役成熟导弹硬件系统改装发展多用途微小导弹系统的做法,以及空军的微纳卫星载星天基快速部署概念都是降低发射成本和实现快速响应的较好思路。

AST

参考文献

[1] Ian Christensen. Market Characterization: Launch of Very-small and Nano Sized Payloads Enabled by

New Launch Vehicles[R].IAC-10. E6.3.9,California:2010.

[2] Jeff Foust etc.Small Launch Vehicle Services: Supply and Demand Through 2010[R].AIAA 2004-6000,Virginia:2004.

[3] Dominic D. Analysis of The Earth-to-orbit Launch Market for Nano and Micro-satellites[R].AIAA 2010-6705,Virginia:2010.

[4] Col.Yoram,Ilan Lipovsky. Responsive Tactical Space Using Micro Satellites and Aerial Launching: the Perspective of a Small Nation[R].AIAA-RS4-2006-3002,Virginia:2006.

[5] Rusch. Estimating the Demand for Launch Vvehicle Services[R].AIAA 2000-1121,Virginia: 2000.

[6] John R.etc.Army Tactical Nnano-satellites[R].AIAA-RS-2011-1001,Virginia:2011.

[7] Robert Y.F. Micro-satellite Deployment on Demand[R]. AIAA LA Section/SSTC 2003-3001, California:

2003.

[8] Stuart Eves .Angels and Demons: Cooperative and Non-cooperative Formation Flying with Small Satellites [R]. AIAA-RS6-2008-2003,Virginia:2008.

[9] RayMing Chang etc. SatCarrier CONOPS: a Concept of Operations for Satellite Carriers[R]. AIAA-RS7-2009-2003, Virginia:2009.

[10] David A. Young. Responsive Access Small Cargo Affordable Launch (RASCAL) Independent Performance Evaluation[R]. AIAA 2005-3241, Virginia: 2005.

[11] Nesrin Sarigul-Klijn etc. Air Launching Earth-to-Orbit Vehicles: Delta V gains from Launch Conditions and Vehicle Aerodynamics[R].AIAA 2004-872,Virginia:2004.

[12] Bandu N. P. Ascent, Stage Separation and Glideback Performance of a Partially Reusable Small Launch Vehicle[R]. AIAA 2004-0876,Virginia:2004.

[13]Dino A. Lorenzini. Rapid Construction,Launch,and On-orbit Operation of Two AIS Satellites[R]. AIAA-RS8-2010-7001,Virginia:2010.

[14] Kevin G. Bowcutt etc. Responsive and Affordable Launch of Small Satellites: a Reusable Air-breathing Concept[R]. AIAA-RS-2012-5001,Virginia:2012.

[15] Seiji Matsuda. Affordable Micro Satellite Launch Concepts in JAPAN[R]. RS6-2008-5004,Tokio: 2008.

作者简介

战培国,硕士,高级工程师,从事科技情报研究。