

从“凤凰”计划看在轨资源重用的应用前景

周敏琦¹, 张雅声²

(1. 装备学院研究生管理大队, 北京 101416; 2. 装备学院航天装备系, 北京 101416)

摘要: 通过对美国国防高级研究计划局“凤凰”计划的背景、目标、核心功能、试验过程及其影响的详细解读, 阐述了在轨资源重用的概念, 并从地球静止轨道卫星资源重用需求、卫星本体部件的可重用性和地球静止轨道卫星可接受在轨资源重用的潜在对象3个方面, 分析了美国在轨资源重用的可行性及应用前景。

关键词: 美国; 在轨资源重用; “凤凰”计划; 地球静止轨道; 服务航天器

中图分类号: V19(712) **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2013.09.003

地球静止轨道(GEO)资源是人类最为宝贵的资源之一。目前, GEO及附近的墓地轨道^[1]上充斥着大量的废弃卫星, 不但造成了轨道资源的巨大浪费, 也对在轨卫星的正常运行构成了严重威胁。如何减少太空垃圾, 甚至是变废为宝, 一直是大家关注的问题^[2-3]。

通常情况下, GEO卫星失效之后卫星上还有许多部件可以利用。如果能将废弃卫星上的这些仍能使用的部件拆下来, 利用在轨模块组装技术将其重新利用起来, 不仅能够降低失效卫星成为太空垃圾所造成的威胁, 而且还能够省下一大笔重新发射卫星的费用。于是, 美国国防高级研究计划局(DARPA)提出了“凤凰”计划的概念, 希望能从GEO废弃卫星上拆解下通信天线并加以重新利用, 为美军提供更经济、更持续的天基通信服务。本文将通过对“凤凰”计划的详细解读, 分析“凤凰”计划中所体现的在轨资源重用的应用前景。

1 “凤凰”计划发展概况

1.1 “凤凰”计划的提出与进展

2011年10月, 美国DARPA首次提出了“凤凰”计划的概念; 2012年6月27日, DARPA正

式成立研究团队; 同年7月25日, “凤凰”计划进入技术研发阶段。

“凤凰”计划将分为3个阶段^[4]: 第一阶段为期14个月, 主要是完成各个实验设备的初始设计和原型系统的设计与实现; 第二阶段为期26个月, 将会完成所有硬件部件的设计并进行组装、检验, 最后集成到服务航天器上; 第三阶段为期大约6个月, 主要完成发射及在轨演示验证任务。目前, “凤凰”计划已接近第一阶段尾声, 已经完成了各部件的初始设计, 进行了原型系统的初步验证, 预计将于2013年8月完成第一阶段。

1.2 “凤凰”计划的核心功能模块

“凤凰”计划的三大核心功能模块是: 服务航天器(Servicer/Tender)、有效载荷在轨交付系统(PODS)和细胞卫星(Satlet)。其中, 与在轨资源重用密切相关的是服务航天器和细胞卫星。

(1) 服务航天器(Servicer/Tender)

服务航天器是“凤凰”计划中执行机动交会和操控任务的平台, 计划在上面安装3台机械臂, 其中, 2台机械臂是7个自由度的FRIEND机械臂, 另外一台机械臂是超灵巧多关节仿生机械臂(Hyper-Dexterous Conformable Robot)。

第一作者简介: 周敏琦(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为航空宇航科学与技术。

收稿日期: 2013-07-12

图 1 所示为含有 2 台 FRENDD 机械臂的服务航天器结构示意图：其中一台 FRENDD 机械臂，负责抓住废弃卫星，保证服务航天器与废弃卫星之间相对固定；另一台 FRENDD 机械臂，负责对废弃卫星的一系列操作任务。



图 1 服务航天器

FRENDD 机械臂末端可以针对载荷操作、天线切割以及 Satlet 的安装等操作任务更换多种操作工具，实现夹、锯、剪等功能；而仿生机械臂则是一种超灵巧的机械臂，类似于象鼻或者蛇形，可在狭小的空间灵巧避障，提供照明、摄像以及对目标的定位等功能。3 台机械臂协同工作，就可以充分保证在轨资源重用、在轨组装等任务的实现。

(2) 有效载荷在轨交付系统 (PODS)

图 2 所示为有效载荷在轨交付系统 PODS。PODS 是用来作为储藏容器安全地存放 Satlet，以便能够作为寄生有效载荷搭载商业卫星进入太空。按照设想，PODS 还可以在其一端存放用于服务航天器机械臂末端的各种工具。



图 2 有效载荷在轨交付系统

(3) 细胞卫星 (Satlet)

细胞卫星是一种应用“细胞化”和“形态学重构”概念的新型卫星结构，类似于模块化的皮卫星或者纳卫星，其形态有多种，见图 3 所示。



图 3 多种形态的细胞卫星

每个 Satlet 是一个独立的卫星子系统，分别具有指令和数据操作、电源、热控制、数据分享、姿态控制、推进等功能，同时能够附着在被切割下来的废弃卫星天线上，共同对天线提供电源、数据处理、姿态控制等功能。

1.3 “凤凰”计划的试验过程

根据 DARPA 在 2013 年 3 月公布的“凤凰”计划公告书，“凤凰”计划将在 2015—2016 年进行首次轨演示验证试验。演示验证试验的操控过程大致分为 9 步，其示意图见图 4 所示。

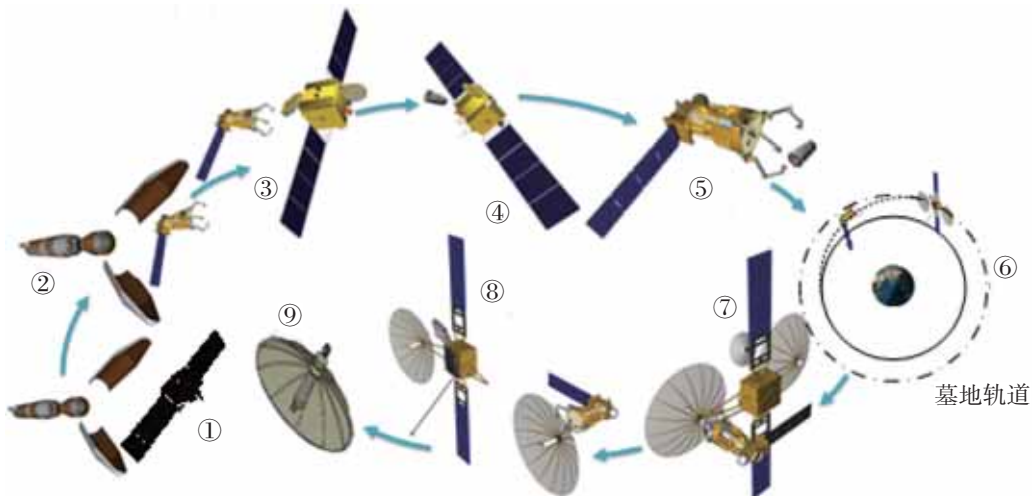


图 4 “凤凰”计划操控过程

(1) 将 PODS 作为寄生有效载荷搭载商业卫星(寄主)发射入轨。

(2) 将服务航天器单独发射到 GEO 轨道上靠近 PODS 寄主卫星的地方。

(3) 服务航天器与商业卫星远距离交会至距离商业卫星 1 km 处。

(4) 当服务航天器出现在商业卫星的视野范围内时,商业卫星释放 PODS。

(5) 服务航天器交会机动(如果需要)到正在自由飞行中的 PODS 附近,利用 FRENED 机械臂抓住 PODS,并将其放在星载工具槽中。

(6) 服务航天器利用推进装置进行轨道机动,远离商业卫星,机动到 GEO 墓地轨道上,与选定的(已知其特征与轨道参数)退役卫星进行异轨交会。服务航天器先交会抵达距目标卫星 20 km 处,然后逐步接近到 100 m。

(7) 服务航天器接近到距离退役卫星 1.5 m 处,用机器臂对其实施抓捕。随后,服务航天器使用 FRENED 机械臂及附带的工具将工具槽中的 Satlet 取出并安装在退役卫星上。这一步可能需要航天器在退役卫星上的不同点处停靠和分离,从而使 FRENED 机械臂以合适的角度接触到天线。当天线依然附属在退役卫星上时,Satlet 即可被激活进行测试,通过测试后关闭。

(8) 服务航天器机械臂用末端的切割工具切开天线的支撑架,再用其他工具把天线从目标卫星上拆下来。服务航天器离开退役卫星,拖着天线进行机动至一个适当的距离。

(9) 激活依然附属在天线上的 Satlet,验证基本功能,服务航天器释放新构成的反射面天线,让其自由飞行之后,还要验证天线通信的功能。

2 在轨资源重用可行性分析

从在轨资源重用操作的对象来看,如果需要进行在轨资源重用,必须要考虑 3 个问题:一是为什么要进行在轨资源重用,二是对象卫星本体的部件是否具有可重用性,三是潜在的可接受在轨资源重用操作的对象有哪些。下面将分别从在轨资源重用需求、卫星本体部件的可重用性以及 GEO 可接受在轨资源重用的潜在对象等 3 个方面来探讨上述 3 个问题。

2.1 地球静止轨道卫星资源重用需求分析

太空中的资源,既包括像 GEO 一样的高价值轨道^[5],也包括轨道上的卫星资源。卫星资源既可以是运行良好的卫星,也可以是已经废弃的卫星。所以,在轨资源重用的概念是:可以指将废弃卫星或太空垃圾,从高价值轨道上移除^[6];也可以指在轨道上对失效卫星进行在轨维修使其恢复功能^[7],或者将废弃卫星上可以重用的部件与其他运行良好的卫星组合起来,实现资源的重新利用。本质上来说,在轨资源重用是在轨服务的一种类型。

(1) 地球静止轨道环境需要“清理”

众所周知,GEO 轨道非常“拥挤”。根据哈佛-史密森尼天体物理学中心(Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)专家乔纳森·麦多维尔(Jonathan McDowell)提供的数据^[8],自 1963 年首颗 GEO 卫星发射入轨以来,全世界总共有 1 336 颗 GEO 卫星入轨。但是,由于 GEO 的轨道特性,卫星一旦失效,便无法像低轨卫星一样可以最终坠落至地面,其失效卫星就只能以无控状态在地球静止轨道上漂移,不仅将占据宝贵的轨道资源,而且还存在与正常工作的 GEO 卫星相撞的危险。如果因为碰撞而产生了空间垃圾,势必会引起恶性循环。因此,需要对这些 GEO 废弃卫星进行清理或者重用。进行在轨资源重用,将有助于改善 GEO 轨道环境。

(2) 现有的 GEO 卫星研制发射成本过高

“凤凰”计划着眼于 GEO 废弃卫星天线重用,原因之一就是带有大型天线的卫星发射入轨的成本太高。首先,从运载火箭的运载能力来看,最大的运载火箭能力也是有限的,这就限制了可部署的天线的最大尺寸。其次,从卫星研制及发射的成本来看,虽然天线质量平均只占通信卫星总质量的 2%~3%,但是随着天线尺寸的增大,卫星的成本也会相应地增大,运载火箭的尺寸和高轨发射成本也会随之增大。此外,天线单位质量的制造成本并不是很高,但是如果将用大型火箭发射大型卫星的成本算进来的话,那就很高了。例如,2013 年 1 月发射的 TDRS-K 数据中继卫星,拥有两副直径 4.9 m 的伞状抛物面天线(见图 5 所示),卫星标价为 3.5 亿美元,但发射又耗费约 2 亿美元。因此,可以看出,卫星的成本取决于天线的尺寸。如果能

通过模块化卫星在轨组装的方式充分利用废弃卫星的大型天线，实现太空资源再利用，就可以大大降低太空开发成本。



图5 TDRS-K 卫星在轨示意图及其地面收拢状态

2.2 卫星本体部件的可重用性分析

GEO 通信卫星多采用三轴姿态稳定控制航天器的外形，这种外形设计便于外伸部件在收拢状态的布置。航天器的外伸部件一般有变轨发动机、天线、太阳能电池翼、姿态敏感器、姿态推力器、制冷器、热辐射器或热辐射器盖板等^[9]。外伸部件与航天器内部部件相比，更容易被服务航天器机械臂进行重用操作。一般认为，如果当 GEO 卫星燃料耗光，并且太阳能电池阵因空间粒子辐照而导致性能衰减至失效点，那么就认为其使用寿命已到终点，这个过程大约需要 15 年。也就是说，GEO 卫星的寿命约为 15 年，但是 DARPA 经过计算得出 GEO 卫星的天线结构却至少能有 100 年的寿命。因此，即便有些卫星已经“退役”，它们的某些部件仍是加以重新利用的，特别是大型反射面天线这种机械部件，可以使卫星的通信部分达到很长的寿命，甚至远超卫星的整体寿命，美国 TDRS-1 卫星运行长达 25 年之后仍能为南极科考提供通信服务就说明了这一点^[10]。现在唯一可以实际在轨重新利用的部件只有反射面天线，其他的部件，在将来卫星制造标准化、模块化后，也可以成为是潜在的可重用资源。

“凤凰”计划所设想的天线重用方式为：将 Satlet 放置在切割下来的 GEO 废弃卫星反射面天线的馈源处，使 Satlet 能够收集到反射面天线聚集的电磁波能量，并将这些反射信号重新发送至地面接收天线，或者将其发给 1 km 远处的服务卫星；多个

Satlet 还可以平均分布在卫星反射面天线骨架上，给已经分离废弃卫星天线提供电源、热控、姿态控制或者推力。如此，GEO 废弃卫星的天线，就可以被重新利用起来了。由于“Satlet”本来就是一种低成本、高性能的模块化卫星，能作为“寄生有效载荷”搭载商业卫星快速、低成本地进入轨道，因此，DARPA 认为，这种 GEO 卫星天线重用的方式，将会使 GEO 卫星的通信成本大大降低。

2.3 GEO 可接受在轨资源重用的潜在对象分析

用已经入轨的 1 336 颗 GEO 卫星减去现在能统计到的还在运行的 431 颗 GEO 卫星^[11]，全世界约有 905 颗 GEO 废弃卫星。此外，根据欧洲航天局（ESA）的统计^[12]，每年都会有一些 GEO 卫星退役，其 2008—2012 年的情况见图 6 所示。可见，最近 5 年，平均每年有 15 颗 GEO 卫星寿命终止。其中，有一些卫星是刚进入 GEO 轨道就因为一些技术原因而失效被迫进入“寿命终止”状态的。根据前面的分析，这类 GEO 失效卫星，上面其实有很多部件是可以重新加以利用的。

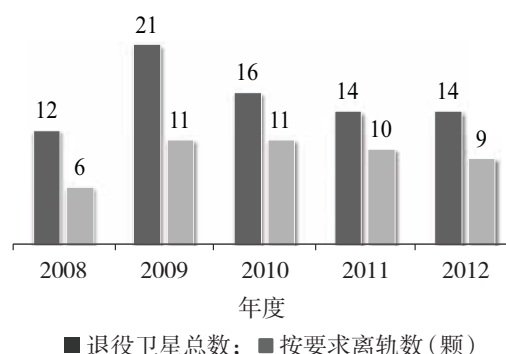


图6 2008—2012 年每年 GEO 退役卫星数目

中国自 1984 年首颗 GEO 卫星入轨以来，已有 40 颗 GEO 卫星发射入轨，现有 23 颗卫星在轨运行，另外还有 17 颗卫星失效或者寿命终止，如，东方红 2 号、东方红 3 号、风云 2 号、北斗导航试验星等均均为废弃卫星，它们都是可接受在轨资源重用的潜在对象。

总之，一旦“凤凰”计划中所验证的在轨资源重用技术投入实用，也即针对废弃卫星的高价值、长寿命部件的在轨资源重用具有可行性，则根据 GEO 上可重用资源充足、可接受重用对象众多的事实，可以断言：在轨资源重用，具有广阔的应用市场前景。

3 “凤凰”计划对于在轨资源重用的启示

3.1 技术上的继承和发展

总的来说,“凤凰”计划并不是“另起炉灶”,而是“老菜新做”。自1999年至今,美国先后提出并开展了“轨道快车”、XSS、DART、MiTex、SUMO/FREND等各类以“在轨服务技术”为名的相关空间计划研究^[13],这些研究的技术成果均在“凤凰”计划中有所体现。因此,“凤凰”计划可以说是美国长期发展的各项空间操控技术的高度集成。并且,在继承的同时,“凤凰”计划又提出了一系列新概念技术,例如,细胞卫星技术、PODS及寄生发射技术等。

3.2 民用领域的影响

“凤凰”计划所牵引的新概念技术一旦成熟,必能解决GEO资源重用等一系列民用问题。“凤凰”计划所带来的影响将极其深远^[14],有可能导致航天领域的全面变革。

(1)“凤凰”计划可能催生新体制工作卫星的出现。“凤凰”计划采用全新的卫星功能模块独立设计、制造、寄生发射模式和空间组装模式,使具有复杂大型化、高精度、高稳定度、长寿命、分布式、多任务等特征的新构型卫星成为可能。能够大大降低卫星各分系统和部件的耦合度,原本传统卫星苛刻的冗余、安全性可以适度降低,实现低成本、短周期及批量化生产。

(2)“凤凰”计划有可能改变GEO资源的利用模式。通过“凤凰”计划重用GEO废弃卫星,在降低卫星成本的同时促进GEO资源的重新利用,并且可以利用“凤凰”计划的轨道转移技术将大量GEO废弃物转移到墓地轨道,从而极大地解决目前GEO资源紧张的局面。此外,“凤凰”计划一旦实施成功,还可以极大地促进自主在轨服务技术领域的发展。

4 结语

“凤凰”计划使在轨资源重用的概念更加具体和明确。本文通过对“凤凰”计划的详细解读,分析了在轨资源重用的可行性和应用前景。通过在轨资源重用需求分析、卫星本体部件的可重用性分析和GEO可接受在轨资源重用的潜在对象分析,可

以看出:太空中,特别是地球静止轨道,有着迫切的在轨资源重用需求,卫星某些长寿命的机械部件具有一定的可重用性,GEO潜在的可接受在轨资源重用潜在对象众多,通过利用机器人服务航天器、模块化卫星、在轨组装等技术,在轨资源重用不仅具有很高的可行性,而且有着广阔的应用前景。■

参考文献:

- [1] Working Group 4. Reorbit Procedure for GEO Preservation (IADC-97-04)[C/OL].//IADC. 15th IADC Meeting, Houston, Texas, U.S.A., December 12 1997[2013-05-25]. <http://iadc-online.org/Documents/IADC%20reorbit%20recommendation199704.pdf>.
- [2] Anselmo L, Pardini C. Space Debris Mitigation in Geosynchronous Orbit[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(7): 1091-1099.
- [3] Long A, Richards M, Hastings D. On-Orbit Servicing: A New Value Proposition for Satellite Design and Operation[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2007, 44(4): 964-976.
- [4] Tactical Technology Office of DARPA(TTO). Broad Agency Announcement Phoenix technologies[EB/OL].[2013-04-15]. http://www.darpa.mil/our_work/tto/programs/phoenix.
- [5] Chobotov V, Melamed N, Ailor W H, et al. Ground Assisted Rendezvous with Geosynchronous Satellites for the Disposal of Space Debris by Means of Earth-Oriented Tethers[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 64(9-10): 946-951.
- [6] 李于衡, 杨开忠, 单长胜, 等. 地球同步轨道废弃卫星清理方法初步研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41(2): 205-212.
- [7] 梁斌, 徐文福, 李成, 等. 地球静止轨道在轨服务技术研究现状与发展趋势[J]. *宇航学报*, 2010, 31(1): 1-13.
- [8] Mcdowell J. The GEO Catalog[DB/OL].[2013-04-15]. <http://planet4589.org/space/log/geo.log>.
- [9] 彭成荣. 航天器总体设[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011: 349.
- [10] Wikipedia. TDRS-1[EB/OL].[2013-04-15]. <http://en.wikipedia.org/wiki/TDRS-1>.
- [11] Union of Concerned Scientists. UCS Satellite Database[DB/OL].[2013-04-15]. http://www.ucsusa.org/global_security/space_weapons/satellite_database.html
- [12] Flohrer T. Classification of Geosynchronous Debris, Issue

- 15[R]. European Space Agency, European Space Operations Center, Space Debris Office, 2013.
- [13] 陈小前, 袁建平, 姚雯, 等. 航天器在轨服务技术[M]. 北

- 京: 中国宇航出版社, 2009: 25.
- [14] 闫巍, 宣颖, 慈元卓, 等. 美军“凤凰”计划进展及影响[J]. 863 航空航天技术, 2012(1): 1-14.

Phoenix Program: A Promising Application of On-Orbit Space Resources Repurposing

ZHOU Min-qi¹, ZHANG Ya-sheng²

(1. Department of Postgraduate Management, Academy of Equipment, Beijing 101416;
2. Department of Space Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416)

Abstract: The potential application of on-orbit space resources repurposing is analyzed by presenting the information of DARPA's Phoenix Program which includes its background, goal, key performance attributes, demonstration sequence and implications. The concept of on-orbit space resources repurposing in Phoenix Program is generalized. The feasibility of on-orbit space resources repurposing is analyzed on three issues: the demand of geosynchronous orbit (GEO) space resources repurposing, the feasibility of satellite bus components repurposing and the potential objects for on-orbit space resources repurposing in GEO.

Key words: U.S.; on-orbit space resources repurposing; Phoenix Program; geosynchronous orbit; service spacecraft

(上接第5页)

Analysis on Post-2010 Epidemiological Trend and Forecast of 2013 Public Health Threats of EU Countries

NIE Jian-gang

(National Health and Family Planning Commission of the Peoples's Republic of China, Beijing 100044)

Abstract: In order to map out the comprehensive epidemiological trend of infectious diseases spreading among European countries, and to better plan relevant preparations and interventions, in early 2013, the European Centre for Diseases Prevention and Control (ECDC) reviewed the epidemiological situation of infectious diseases prevalence and highlighted the major health threats of EU countries, based on the surveillance and analysis on infectious diseases in 27 EU members and 3 countries of European Economic Areas between 2010 and 2011. Thereupon, a projected analysis was made to forecast the major public health risk factors and threat faced by EU states in 2013.

Key words: EU; infectious diseases; epidemiological trend; public health risks