

免责声明：凡在本杂志发表的文章只代表作者观点，而非美国国防部、空军部、空军教育和训练司令部、空军大学或美国其他任何政府机构的官方立场。

机动航天器——轨道和亚轨道飞行相结合实现节约效益

A Taskable Space Vehicle: Realizing Cost Savings by Combining Orbital and Suborbital Flight

托马斯·C·科奥空军上尉 (Capt Thomas C. Co, USAF)

乔纳森·T·布莱克博士 (Dr. Jonathan T. Black) *

美国通过太空开发，获得明显的战场环境优势，但是太空运行成本越来越昂贵，势将危及这些优势。美国不遗余力开拓太空技术始有今日，然而太空研究、开发和运行经费一再缩减，太空系统趋于老化，为当今世界敌手留出各种可乘之机。一些国家原无太空能力，而今迅速赶上，以难以想象的低成本发展太空技术，与美国争锋。美国国防部拥有强大的太空能力，但为降低部署和维护费用，必须考虑如何改变太空运作现行做法，以防失去太空支配地位。美国战略司令部、国家航天总署、国防先进研究项目署，以及空军部等，对预算削减对美国太空优势地位的冲击都有清醒的认识。为填补现有太空资产能力和需求之间的缺口，机动响应太空项目 (Operationally Responsive Space—ORS) 办公室规划了重大的发展目标，但笔者认为此目标需进一步扩展。本文提出一种分阶段发展方式，可以成倍提高 ORS 项目的成本节约效益，同时提升美国的太空能力。此方式注重挖掘航天飞机和卫星在轨道和亚轨道飞行的潜力，实施反复机动，执行多种任务。

ORS 办公室在 2007 年成立，由国防部内多个部门联合组成，目的是研制低成本进入太空技术，以响应和满足战场需要。进

ORS = 机动响应太空项目
TOT = 飞临目标上空时间

入太空的成本不低，航天器的研制和发射构成太空使命中最大的成本项目。ORS 办公室决心把这两项成本同时降低，做到能在几周内就将航天器升空，全部费用只及原来的一个零头（亦即每一分钱相当于目前同类太空项目中一美元。）¹ 但是就目前进展而言，ORS 项目只关注如何快速制备航天器和如何以最低成本发射，而没有考虑航天器的机动潜力，没有考虑使航天器获得变轨能力，在寿期内执行多种任务。ORS 项目的支持者 James Wertz 博士认为：“运用目前在轨卫星是无法实现 [机动响应太空] 目标的，就像是子弹已经出膛，再指望坏蛋撞到弹道内。”² 如果能采用非传统变轨技术使同一颗卫星执行多种任务，就能提高太空作战响应能力，满足战场需求，同时进一步降低项目的成本。

实施这种灵活变轨新方式需要经过四个阶段。第一阶段是改变太空运行概念，思考如何使一些在轨卫星以高效方式大幅变轨。有关此技术的硬件已经存在，经过大量检验，并获得透彻理解。此技术包括一个电控推进系统（网格离子发动机或霍尔效应小推力发动机），对重量 500—1,000 公斤的小型卫星有效。³ 第二阶段是对那些在地球表面 150—500 公里高度外大气层（即热层）中飞行的卫星合理利用有限的空气动力，通过空气动力的拽力实现变轨。⁴ 在以上所述的新太空

* 科奥上尉是美国空军理工学院博士研究生，布莱克博士是理工学院航空航天工程系助理教授。

运行概念和电控推进技术以及小型卫星平台的基础上，第三阶段是制造出能充分利用空气动力的航天器（类似于航天飞机和 X-37）。这三种硬件技术目前分别用在航天飞行装置中，因此，我们需以全新的运行概念，把航天器的各种功能正确组合，就可将轨道卫星变成机动航天器。第四个也是最后一个阶段是在研制过程中把机动能力纳入 ORS 项目概念。现在第一阶段正在进展中，机动变轨概念的潜力已现端倪。其他几个阶段将如下文所述逐渐展开。

机动响应太空

美国当前大量使用太空资产，导致国防部太空计划费用高涨，通常每年需花费数十亿美元。传统的太空使命着眼于战略层面、体现为很耐用（10—20 年寿期）、欠灵活、很昂贵（1 亿—20 亿）、很能干、很复杂、难替代。⁵ 这些特征互相牵制着。因为发射费用极高，研制者就将系统设计得极其能干和可靠，因此成本极高且寿期极长。在这种高度能干、高度可靠和长期运行的卫星中，所有关键部件都需有备份（几乎相当于整个卫星），而这些备份作为冗余，增加了卫星重量，由此提高发射成本。显然，这种保持自我运行的概念导致航天飞行装置无限膨胀，性能越来越强，动辄数十亿美元，并需要数十年才能制成。这种模式已经成为航天界的思维特征。现在我们需要把机动和快速响应作为一种制度化要求，使我们的太空资产能快速响应突发的威胁和灾难，因此我们必须找出新的太空资产研制和运作模式。

目前的太空系统研发运作模式经常满足不了战场的需求。这些太空系统需要长期研制才能进入成熟设计和容纳必要的技术，待到终于制成可以交付部署时，其中许多电子

部件已经落后，于是技术人员又要重新设计和纳入新技术。国防部无法跟上军事作战的需要。⁶ 交付期经常一延再延，用户不得不等待多年，到最后总算交付时，说不定原定的使用目的已经改变。在 1990 年 9 月策划“沙漠风暴”行动期间，作战策划者意识到现有卫星通信能力不足以支持这场战争，于是紧急请求增加发射国防卫星通信系统 III 卫星。此卫星最终在 1992 年 2 月 11 日升空，比战争晚了整整一年多。⁷ 设计者后来继续研制这颗卫星的后续星，即“宽带全球 SATCOM”卫星，它采用现成的商业货架技术，采购计划中声称可节省时间。研制过程自 2001 年启动，发射时间定在 2003 年第四季度。但是此卫星直到 2007 年 10 月 7 日才发射升空，2008 年才进入运行轨道——比原定时间推迟五年。⁸ 这项延误严重影响了太平洋司令部和中央司令部各战区之间的通信，致使近 80% 的通信流量依靠商用卫星，成本飞涨，纳税人埋单。

ORS 项目希望改变太空运作模式。和当前的方式不同，ORS 项目所开发的航天器着眼于战术层面、寿期短（一年寿期）、灵活（根据使命、时间和地理位置需要）、廉价（低于 2000 万美元）、功能专一（每颗卫星只配置和使命要求相关的功能，多颗专用卫星各司其责，构成大系统协同运作，从而减少外部攻击造成的破坏）、技术简易，以及可随时替换。⁹ ORS 强调卫星和发射火箭尺寸要小，能迅速按需部署，能快速向用户提供所需的能力。正在研制中的此概念技术继续依赖传统的开普勒轨道，意即发射出去的每一个航天器只用于一种用途。¹⁰ 只要稍做对比，就能看出 ORS 卫星与传统卫星无一处相同。

ORS 模式标志着对美国的太空文化进行重大修正。各相关方基本一致同意，太空运

作必须降低使命成本，提高对用户需求的响应速度。但是要想实现这些目标非常困难，需要有毅力有决心改变现有硬件、现行指挥控制，以及现存测试模式。但愿国家计划制定者们认可改变此思维模式能带来的种种收益，愿意接受新的运作规则，允许快速改变，使我们能够更灵活、更迅速、更高效地满足用户的需要。

ORS 项目如果能够考虑容纳对机动卫星技术的研究，例如设计一种 500 公斤重量级的卫星，带有多次机动变轨所需的足够燃料，应可实现更大的收益。¹¹ 这意味着，同一颗卫星在完成一项任务后，可以变轨执行另一项任务。假定变轨幅度不大，此卫星应可实施 15 次以上的变轨。¹² 一次机动变轨可以节省发射次数 50%，三次机动变轨就能节省 75%。按照 ORS 项目的现行思路，即便能在硬件研制和测试方面大量节省，发射费用将继续居高不下，因为必须为每一项任务发射一颗卫星。由此来看，如采用可多次变轨的多任务机动卫星，将比目前的 ORS 项目远更合算。

以机动卫星满足用户需要

ORS 项目乐观宣称，其研制的卫星将表现为低成本，能按需发射，能在接到任务指令后数小时以内进入指定轨道。ORS 项目的长期愿景是把制成这种卫星的目标日期定在 2020 年。假定这样的航天器按时制好，发射装置和地面控制都已就位，其速度将始终赶不上用户的需求，常态性的短缺将迅速消耗掉所有现存能力，生产根本无法跟上，所谓机动快速响应便成无稽之谈。机动响应能力的意义不仅仅局限于太空部分，快速发射定制卫星可以缩短满足用户新需求的时间，快速发射增补或替补卫星对于保持特定的太空

能力具有关键意义。目前的航天器制造流程遵照的是按计划发射的思维模式，而机动太空模式是将航天器事先造好备好，随时准备按需发射。如从目前流程有效转到机动太空模式，意味着我们必须在发射场保持相当数量的作战物资库存，即航天器储备，以及相应的发射火箭储备。¹³

ORS 概念要求具备快速发射库存航天器的能力，从而对突发危机做出迅速响应。比如今天可能突然接到命令要求发射一个卫星，部署到太平洋上空监视海啸灾区形势；明天又受命发射另一颗卫星，收集中亚起义农民的活动情报。为此，我们必须准备大量储备，一接到命令就能发射升空投入运作。但是在可见未来，需求将不断增长，将一直远远超过制造和部署这些资产的能力和速度。如上文有关 SATCOM 通信卫星的讨论所提及的那样，由于需要支持新现的地面和天空作战系统，前线部队和后方司令部之间的通信占用了大量带宽资源，导致军事能力迅速用竭。为了建设一种真正的机动响应能力（利用现有储备），我们需要转变思维模式。

如果对 ORS 概念下制造的卫星配备机动能力，经由非传统（新异）轨道变轨，就能降低快作战节奏形成的压力，减少必要能力储备。一颗发射到近地轨道的卫星如果具备这种机动能力，就能及时变换到另一个轨道平面，快速响应多种国际事件或用户需求。这样的运行方式，视卫星承担多少任务，可能缩短其在轨寿期，低于 ORS 项目目前所定的一年寿期标准。但是同一颗卫星如能执行用户要求的多种任务，就能大幅度降低发射次数，为每个航天器节省数百万美元发射成本。

具体而言，所建议的新异轨道将借助地球大气的空气动力，来改变卫星的轨道参数。我们可以方便地利用二十世纪中期“双子座”计划、“水星”计划和“阿波罗”计划开发出的技术，来设计能再入大气层的航天器，利用升力和拽力来改变其飞行路径、速度和高度，实现变轨。¹⁴ 本质而言，这种轨道航天器几乎就是亚轨道飞行器，其在大气层中飞行时就像飞机。用 Kerry Hick 中校提供的运动方程做多次再入大气层飞行剖面模拟，表明航天器只要具备足够的升力，就能像飞机一样做爬升、俯冲和翻滚等机动。¹⁵ 航天器飞行剖面中的这段非开普勒部分不仅能改变轨道（改变新的行动目的所要求的航迹地面投影），对跟踪此航天器的敌人而言还将增添一个新的不确定性。敌人可能猝不及防，对突然飞临上空的航天器毫无预警。航天器再入大气层的深度确定控制机构如何调整轨道参数。再入大气层的深度若很大，就可实现大幅变轨，甚至大推力液燃推进火箭发动机都无法做到，因为无法携带此类发动机所需的大量燃料。¹⁶

当然，这种航天器需要经过一些设计修改，才能克服重力和大气摩擦发热影响而反复出入大气层。既然 ORS 项目决心彻底改变太空运作思维模式和结构，就可乘此机会索性再跨一步，认真考虑本文所提的新异建议，以相对简单的设计修改换取更大的灵活性和收益。我们通过早期载人太空飞行项目已经掌握了再入大气层的各种力量作用、控制、收益和风险。在新航天器的设计中，我们认真选择功能特征组合，应能极大提高其升力，把握空气动力控制，实现变轨。这样做，我们就能扩展其飞行包线，提高其作战灵活性。

机动航天器概念，除了对 150 公里以上高度不太适用之外，还可应用于目前在轨的

那些不具备 ORS 能力的卫星。大气拽力对在 700 公里或以下高度飞行的卫星产生不同程度的影响，航天飞机和国际空间站始终受此影响，必须抵消此力才能防止轨道变形。我们已经研制出卫星机动技术并投入应用，但是运行概念必须改变（参看以上第一阶段）。低推力电控发动机用于驱动已经入轨的卫星做缓慢、精确和高度有效的留守机动。当前的运行概念就是把航天器送入轨道，然后在此轨道上驻守至终，几乎没有例外。目前大多数航天器都是按这种概念设计，很少有人思考如何进一步利用这些具备动力的飞行。其实如果必要，这些发动机可以推动大型卫星进入新轨道；如果是地球同步卫星，可为不同的地理战区服务；如果是近地轨道卫星，可以改变飞临目标上空的时间。¹⁷ 为了利用这种潜力，运行概念必须起始于这样的假设：航天器并非必须在其最初发射和进入的轨道内飞行。此外，我们还可思考如何利用上层大气改变航天器轨道的潜能（即使是微小的拽力也能引起可观的轨道变化），就是说，对于已经在轨的航天器，即便不修改其特性，它也可实施重大机动，从而改变飞临目标上空时间（TOT）或者地理覆盖面（参看以上第二阶段）。

概念设计和结果

轨道的细小改变，可以影响卫星的航迹地面投影。未装备 ORS 硬件的航天器利用电控推力发动机连续推进 7 天时间，可以在同一轨道平面中充分改变速率，从而改变航迹地面投影而产生 24 小时 TOT 变动。¹⁸ 航迹地面投影的改变与调整轨道所用的时间成正比。或者说，实施 TOT 变动的的时间越长，变动的潜在幅度就越大。遵循以上所述项目的第一阶段和第二阶段可实现这个结果，即调

整目前在轨航天器的运行概念，允许通过轨道机动来改变 TOT。然而，这样做在响应时间上仍然和正在进展的 ORS 项目的目标值相距甚远。ORS 项目的目标是在接到任务的第一道命令后 9 小时内发射航天器，在发射后 45 分钟内到达地球任何指定部位的上空。¹⁹ 不过这个目标还未成为现实。目前的在轨卫星可借助电控推力在轨道中机动，但不能再入大气层（即卫星必须保持在 122 公里高度以上），可在 7 天时间内在规定的 TOT 抵达地球任何部位的上空。与之相比，电脑模拟表明，机动卫星如能借助空气动力做超平面变轨，则进入新轨道所需的时间可减少 75%（由 7 天缩短为约 2 天），即如以上第三阶段所述。如在 ORS 航天设计中增加一点精巧创新，我们应可为之配备大气机动能力，使之成为一种不昂贵但高度有效的航天器，能对美国面临的当前威胁迅速做出响应。

ORS 项目所设计的航天器在特征上体现为小巧、质轻、容易保持高度（定向）和位置（驻位）。为使这种航天器具备以上第四阶段所述的机动能力，我们可以为卫星配置一台小型冲力（火箭）发动机和一台高效电控推力发动机（例如霍尔效应小推力发动机）。冲力可推动卫星快速但小幅变轨，持续的电控推力则聚集能量推动卫星进入稳定驻位轨道，并可反复此过程。按照这种设计概念，我们首先将卫星发射到指定轨道平面，执行首项任务；完成此任务之后可通过冲力实施小幅变轨，使其近地点（轨道中距地球表面最近点）进入或“栽入”大气层，让卫星利用空气动力改变轨道平面，从而执行第二项任务。卫星每做这种机动，就会损失能量。计算机模拟表明，当卫星能量到了只能勉强维持轨道飞行的水平时，连续电控推力系统将能有效提升此水平，使卫星保持在轨道内。

这个过程可以重复多次，直到推进系统的燃料耗尽。航天器如配备本文所述的两种发动机（火箭和电控），就能运用现有技术响应执行多项用户任务。不过有关如何有效实施这些机动的知识和经验，目前还相当有限。根据本文的设计概念，航天器所能完成的任务，和传统的仅带化学推进系统的近地轨道卫星相比，可以提高 6 倍。（低推力电控发动机的效率 [每加仑航程数] 比大推力发动机高出 5—6 倍。）这样的航天器可以执行 15 项以上任务，即发射一次就能完成 15 项 ORS 使命，从而大幅度降低其所宣传的使命成本。

结语:

当前的太空思维模式是发射大型、昂贵及能力强大的卫星，这种做法缺乏可持续发展性，既不能满足美军的战场需要，也跟不上其他拥有太空能力的国家对美国的威胁程度。正如传统战争模式必须改变以适应当今平叛作战需要一样，传统的太空运行做法也需要改变，才能适应今天的太空环境。新的项目，如 ORS 项目及本文讨论的研究概念，都力求实现这种改变。

我们应该采用分阶段的方式来扩展目前的 ORS 概念。在第一阶段，要围绕新的模式建立新的运行概念，利用现有在轨卫星进行实验，探讨能否通过电控推力实施大气层外机动，从而获得大幅 TOT 改动。我们已经具备经过大量验证的、获得充分理解的必要技术。这个阶段并不需要开发任何新装置，因此成本不大。在第二阶段，利用空气动力对轨道高度 122 公里以上的航天器进行机动，从而提高其灵活性，更快速响应战场需求，并打破以往航天器本身和燃料的限制，开辟出新的机遇空间。在第三阶段，将设计新型航天器，使之具备再入大气层能力，实施预

定的变轨，爬升回归太空。充分利用升力和拽力的卫星设计技术也已存在，并经过大量研究。不过，为支持地面需要而改变卫星航迹地面投影可以通过无数种可能选项，目前对这方面的理解还比较有限，故而我们需要加强研究。这个阶段所能提供的潜在效益巨大，可能以极低燃料成本实现大幅变轨并增加航天器的寿期（和利用化学推进实施同等变轨的传统做法相比），甚至能将任务完成量提高 5—6 倍，而目前的卫星无法做如此大幅机动。在最后一个阶段，将通过增加机动能

力来扩展 ORS 项目收益。这些高效低成本的卫星将能在寿期内实行多种任务，从而减少发射次数，使 ORS 卫星成为真正的机动快速响应系统。

美国太空发展思维模式将不可避免地发生变化，这种变化已经开始。我们未来的常规太空行动必须包括小型、廉价、快速响应和灵活机动的航天器，我们将不再需要数年，只需数月，就能研制、生产和发射所需的航天器。♣

注释：

1. James R. Wertz, *Responsive Space Mission Analysis and Design* [灵活响应太空项目使命分析和设计], (El Segundo, CA: Microcosm Press, 2007), 4. (这是 Wertz 博士所教课程的一本参考手册。) 灵活响应太空项目中每一颗卫星的制造、有效载荷、发射、及运行一年的成本为 2000 万美元，笔者将此费用与传统太空计划中每颗卫星需要 20 亿美元（不包括运行成本）相比。
2. 同上，第 5 页。
3. 霍尔效应小推力发动机是一种离子推进发动机，通过电场来加快推进剂。此小推力发动机捕获磁场中的电子，用以对推进剂离子化，从而有效加快离子速度，产生推力，同时将雾流中的离子中和。在霍尔效应小推力发动机中，开放端的电子等离子区，而非标准离子推力器的网格，产生有吸引力的负电荷。参看 Wikipedia: The Free Encyclopedia, s.v. "Hall effect thruster" [霍尔效应小推力发动机], http://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect_thruster; 和 "Hall Effect Thruster Systems" [霍尔效应小推力发动机系统], Busek, <http://www.busek.com/halleffect.html>.
4. 地球大气层与外层空间的界限并不明确。在距地球表面 700 公里高度以下飞行的卫星受到大气层拽力不同程度的影响。从 120 公里高度开始，再入大气层阻力变得明显，当前的卫星都不具备抗拒这种阻力的能力。
5. 见注释 1，第 7 页。
6. 在 2007 年 9 月的一系列汇报和会议上，联合宽带工作小组讨论了国防部军事卫星通信的能力瓶颈，以及使用这些卫星满足战场需求的途径。军用平台，如“全球鹰”、“捕食者”及“蓝军跟踪”等，需要高能力、灵活及紧随卫星带宽，但当时的卫星网无法提供。国防部的这些需求有 80% 通过商用卫星来满足，引发越来越严重的担忧。工作小组每季度碰一次头，见面地点每次不同，如加州、科罗拉多州、佛罗里达州等。另参看 Greg Berlocher, "Military Continues to Influence Commercial Operators" [军界继续影响商界运营商], *Satellite Today*, 1 September 2008, http://www.satellitetoday.com/military/milsatcom/Military-Continues-To-Influence-Commercial-Operators_24295.html.
7. David N. Spires, *Beyond Horizons: A Half Century of Air Force Space Leadership* [空军主导太空半世纪], rev. ed. (Peterson AFB, CO: Air Force Space Command in association with Air University Press, 1998), 268.
8. "Wideband Gapfiller System" [宽带缺口填补系统], [GobalSecurity.org](http://www.globalsecurity.org/space/systems/wgs-schedule.htm), 10 April 2005, <http://www.globalsecurity.org/space/systems/wgs-schedule.htm>. 宽带缺口填补系统后来在约 2007 年改名为宽带全球卫星通信 (Wideband Global SATCOM)。
9. 见注释 1，第 7—9 页。
10. "Keplerian" (开普勒) 一词表示围绕一个天体运行的卫星的轨道，此轨道受引力控制，没有大气拽力或推进力（推力发动机）。
11. Robert Newberry, "Powered Spaceflight for Responsive Space Systems" [灵活响应太空系统项目中的动力航天器], *High Frontier* 1, no. 4(2005): 48.
12. 同上。

13. Les Doggrell, "Operationally Responsive Space: A Vision for the Future of Military Space" [发展太空作战反应能力 — 军用太空未来纵观], *Air and Space Power Journal* 20, no. 2 (Summer 2006): 49.
14. Lt Col Kerry D. Hicks, Introduction to Astrodynamic Reentry [航天动力再入大气层原理], AFIT/EN/TR-09-03 (Wright-Patterson AFB, OH: Graduate School of Engineering and Management, 9 September 2009), 239—41.
15. 同上。
16. "Mars Reconnaissance Orbiter Successfully Concludes Aerobraking" [火星侦察轨道器成功实现飞行制动], *National Aeronautics and Space Administration*, 30 August 2006, http://www.nasa.gov/mission_pages/MRO/news/mrof-20060830.html.
17. 在 2008 年, WGS-1 卫星从其测试位置纬度 122.8 度西移到 180 度西, 但继续在对地静止轨道上。此卫星的这次分阶段机动完全依靠 Xenon 离子推进系统发动机 (一种电控推力发动机)。有关近地轨道卫星实现 TOT 变化的讨论, 参看注释 11, 46—49。
18. 同上, 第 48 页。
19. 见注释 1, 第 9 页。

The advertisement features the Air University logo at the top, followed by the title "ASPJ AIR & SPACE POWER JOURNAL". A central globe is surrounded by six journal covers in different languages: Arabic, Chinese, English, Africa and Francophonie, Portuguese, and Spanish. The text "Distributed in over 150 countries" is written across the globe. At the bottom, it says "Read Air & Space Power Journal online" with the URL <http://www.airpower.au.af.mil/> and the Air Force Research Institute logo.