

小小“蚂蚁”飞苍穹显神通，为“太极一号”保驾护航

时间:2019-12-12 点击率:215

小小“蚂蚁”飞苍穹显神通，为“太极一号”保驾护航

马隆飞，贺建武，段俐，康琦

(中国科学院力学研究所)

2019年8月31日，中国科学院在甘肃酒泉中国卫星发射中心发射了一颗名为“太极一号”的卫星，这颗卫星是为了在太空里探测引力波而开路的——进行前期关键技术的验证。

2016年2月，全世界的科学家都为引力波的发现而无比兴奋，它不仅直接证明了爱因斯坦的广义相对论，还为人类开启了探索宇宙的新旅程，因为引力波包含着大量的宇宙演化的信息（例如，恒星死亡、黑洞形成与成长、银河系演化等）。所以，2017年诺贝尔物理学奖颁给了成功在地面探测到引力波的三位美国科学家。

由于引力波信号非常微弱，探测难度很大，如同测量我们对着一栋高楼大厦吹口气所产的震荡。2016年所发现的引力波信号是科学家们在地面上探测到的，他们使用了两台相距3000千米的激光干涉仪（全称为激光干涉引力波天文台，英文缩写为LIGO），其中每台都是由两根直径为1.2米、长度为4000米的真空钢管按L型构建而成。

当然，与此同时，科学家不约而同地想到：能否到太空里去探测引力波呢？这里的原因不难理解：首先和在地面上相比，太空的环境更加安静，噪声源少，能够极大的发挥探测设备的高灵敏度；其次，在太空基本不受空间限制，能加长激光干涉臂长，这样更容易捕获引力波涟漪的信号；最后，地面只能实现高频引力波探测，而在太空里还可以探测到中低频引力波，中低频的引力波波源更加丰富，具有更重要的天文学、宇宙学和物理学意义。



图1 建在美国的地面激光干涉仪LIGO照片

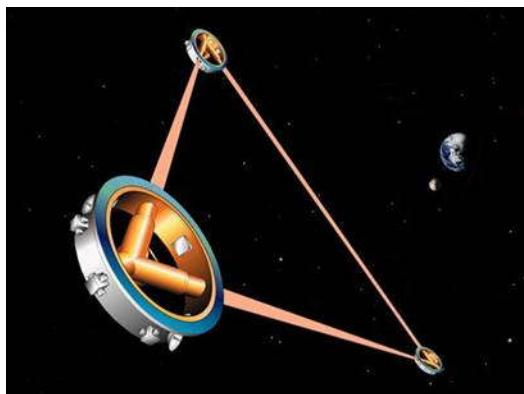


图2 三角形编队飞行的空间激光干涉仪示意

“空间太极计划”就是中国科学家胡文瑞院士等提出的一项空间引力波探测计划，他早在2008年就发起了中国科学院引力波探测论证组。2010年，推出太极计划初步方案，2015年，正式提出太极计划发展路线图。“空间太极计划”采用三颗卫星完成等边三角形编队飞行，两两相距300万千米（即三角形的边长），这个星组在日心轨道上飞行，以期探测到达这个轨道范围上的引力波。而刚刚发射升空的“太极一号”（Taiji-01）就是为最终任务“太极三号”（Taiji-03）打前阵的。因为在太空利用卫星测量引力波的方式要求卫星非常的稳定，不能左右摇晃，哪怕是受到的太阳光压也需要想办法抵消掉，使卫星处在合力几乎为零的状态。

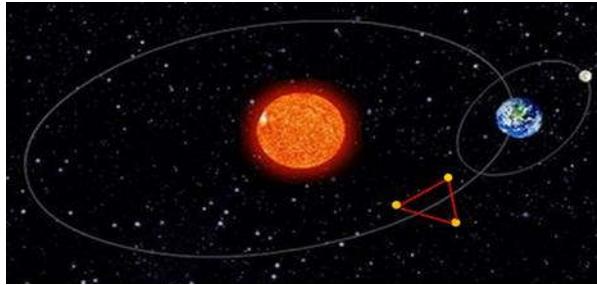


图3 “空间太极计划”示意图：中间红色星球为太阳，右侧蓝色星球为地球，右上侧白色星球为月亮，三角形编队的太极三号运行在日心轨道上

怎么办？如何抵消卫星受到的太阳光压？怎样保持卫星的姿态？科学家给“太极”卫星配备了一种微型推进系统（简称为“微推力器”），这种推进系统和咱们常常听到的“长征”系列火箭不同。后者往往要把几吨甚至是几十吨的卫星或飞船从地面发射到太空，需要很大的推力。而“太极一号”卫星的轨道与姿态维持任务所需的推力十分之小，只要“微牛”（英文缩写为 μN ）的数量级。这次“太极一号”上就装配了中科院力学研究所微重力重点实验室实验流体课题组研制的微推力器 $\mu\text{RIT-1}$ ，它的最大推力只有几十微牛，而推力分辨能力可以达到亚微牛级（相当于推力调节能力达到1千克物体所受重力的一亿分之一）。

这里的“牛”是作用力的单位“牛顿”的简称，其中的“微”表示百万分之一。大家知道牛顿第二定律为 $F=ma$ （其中F是作用力，m是物体质量，a是物体运动加速度），1牛顿就是使1千克质量的物体产生1米/秒²加速度所需的作用力。那么，大家来想象一下，“微牛”这种数量级的作用力到底有多小？

对我们而言，一只小小的蚂蚁抬起一个物体的力量是微乎其微的。根据相关知识，工蚁的体重为20~60毫克，这里取50毫克为体重的估算值。而它可以抬起的物体重量为自身体重的40~400倍，这里取100倍来估算。就是说，蚂蚁可以抬举起5克重的物体，为了克服这个物体的重力，蚂蚁需要付出的举力=0.005千克*9.8米/秒²=0.049牛=49000微牛。

微推力器 $\mu\text{RIT-1}$ 所产生的最大推力约为蚂蚁抬举物体的力量的千分之二。所以，我们把这种微推力器比喻为“蚂蚁”，一点也不过分。不过，这种蚂蚁不仅被送上太空去遨游，它还会不时地、根据需要向外喷火呢！

在学术上，微推力器 $\mu\text{RIT-1}$ 有一个挺拗口的名字——射频离子推力器。顾名思义，它需要射频电流（也就是交流电，频率为300kHz~300GHz）来提供能源。工质氙气在推力器内部会形成“等离子体”这种相对特殊的物态，它是自然界第四种物态（这四种物态分别是：气态、固态、液态和等离子体态）。等离子体虽然在日常生活中随处可见，但容易被人们忽视，如荧光灯、霓虹灯和闪电等。在这种物态下，组成物质的中性分子或原子发生了部分或全部电离，所以等离子体中存在着等量的自由电子（带负电荷）和正离子（带正电荷）。射频离子推力器要设法将等离子体中带正电荷的离子喷出去，从而产生反向推力。这就是我们高中物理中学过的牛顿第三定律，作用力与反作用力的关系。

从射频离子推力器喷出去的正离子能量很高，像一道明亮的火焰，发出耀眼的蓝色光芒（参见图4）。所以，我们把它戏称为“会喷火”的蚂蚁！

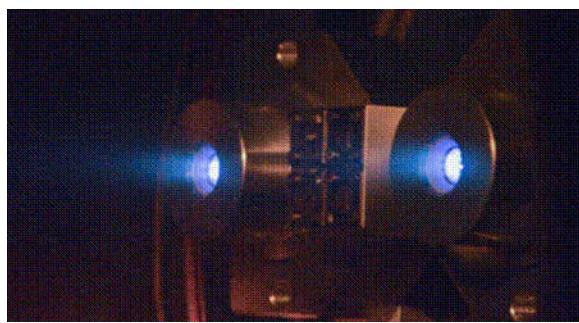


图4 运行中的射频离子推力器

图5是射频离子推力器工作原理示意图。可以看出，推力器有一个放电室，外面缠绕着螺旋线圈，前端有气体入口，尾端是栅极系统。此外，它还有一些辅助系统，包括气体流量控制单元和进气部件、射频发生器系统以及中和器等。别小看这些“辅助”系统，它们也发挥着重要的作用呢！例如，气体流量控制单元能够精确地调节、控制进入放电室的气体流量，从而使得推力的大小可以依据需要变化，因此这是一个可变推力的推力器，它的分辨力可以达到亚微牛量级。就是说，调节精度小于1微牛呢！

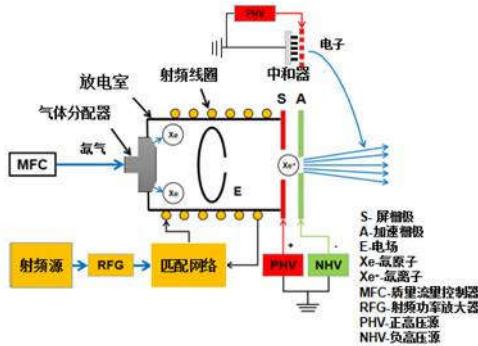


图5 射频离子推力器工作原理示意图

现在让我们来看看射频离子推力器的工作原理吧！当缠绕在放电室外部的螺旋圈加载射频交流电时，根据高中物理所学的右手定则，我们可得知：在放电室的轴向方向形成周期变化的磁场，也就是说，在放电室轴向方向的磁通量会周期变化。再根据法拉第电磁感应定律，在放电室周向方向会感应出环向电场。从推力器外部进入放电室里的电子在环向电场中随机加速，部分电子可以获得足以电离气体原子的能量，当这部分高能电子与中性的气体原子发生碰撞时便有可能使原子电离，从而产生具有等量自由电子和正离子的等离子体。

但是，放电室里的等离子体不会自动地飞离推力器进入太空，那么推力如何产生呢？这就需要给等离子体一个“动力”——电势差，把其中一种带电粒子引出去。于是，科学家在推力器放电室尾部，安置了一套多孔带电的导体板——栅极系统，其中屏栅上有上千伏的正电位，而加速栅为百余伏的负电位。利用栅极系统与放电室内部等离子体间的电势差，便可将放电室内的正离子引出推力器，进而产生推力。但是，由于推力是利用喷射正离子产生的，那么就需要一个配套的装置能够喷射电子到推力器尾焰中，中和喷出去的正离子，这个装置就是前面介绍的中和器。不然，推力器很快就会“罢工”了。因为没有喷出去的电子会积累在电路中，危及电子系统安全。

虽然射频离子推力器的工作原理较为简单，我们利用高中物理知识就能解释，但是成功研制能够正常运行并满足任务要求的飞行样机并不那么容易。因为其中各个部件间的耦合关系十分复杂，需要开展大量的理论和实验研究工作。

射频离子微推进团队仅用了不到十个月的时间，就研制出满足工程任务要求的微推进产品，并按时交付卫星系统，经地面测试后，于2019年8月31日在中国酒泉卫星发射中心，随“太极一号”乘坐“快舟一号”顺利进入预定轨道。目前，射频离子微推进系统在轨工作正常，成功完成了在轨的功能与性能测试工作，这也是国际首次在轨验证了射频离子微推进技术！



图6 “太极一号”乘坐“快舟一号”成功发射升空

