

## 谈谈光压和光帆 2 号

姬 扬 (中国科学院半导体研究所 北京 100083)

**摘 要** 本文利用美国行星学会网站公布的“光帆 2 号”飞行器的轨道数据,分析了其应用太阳帆技术的原理。

**关键词** 光压 太阳帆

**文章编号** 1002-0748(2019)12-0002

**中图分类号** G633·7

**文献标识码** A

飞翔一直是人类的梦想。古代哲学家庄子在《逍遥游》中写道,“夫列子御风而行,泠然善也。”随着飞机的发明,“御风而行”的梦想已经实现了,人类可以在大气层中自由地飞翔。然而,“驭光而行”的希望却很渺茫,凭借太阳光或者激光飞出太阳系的设想,仍然还只是设想而已。

“御风而行”借助了气体分子传递的动量,“驭光而行”则依赖于光产生的压力——光压(light pressure),照射到物体上的光可以对物体产生压力。就像所有的物质粒子一样,光子(光的基本粒子)也具有动量,在光子和其他粒子碰撞的过程中,同样要满足动量守恒定律,可以把自己的动量传递给对方,从而产生压力。

早在 17 世纪初,为了解释彗星的尾巴为什么总是背着太阳,天文学家开普勒提出,太阳光产生了压力。到了 19 世纪中叶,英国物理学家麦克斯韦总结了前人特别是法拉第发现的实验现象,提出了电磁学的系统理论(麦克斯韦方程),预言了光是电磁波,并给出了光压的公式。20 世纪初,俄国科学家列别捷夫用实验证明了光压的存在。1923 年,美国物理学家康普顿在研究 X 射线与物质散射的实验中,发现短波电磁辐射(如 X 射线和伽玛射线)的光子跟物质粒子发生相互作用时可以失去能量、从而让波长变长——这就是康普顿效应,不仅表明光具有粒子的特性,也证明了光子具有动量。

从经典电磁理论的角度来看,当光正入射到黑体(完全吸收光的物体)上的时候,产生的压强是  $p = S/c$ , 其中,  $S$  为光的能流密度(坡印廷矢量),  $c$  为光速。如果光被完全反射,光压就会增加一个系数 2;如果倾斜入射,还会增加一个系数  $\sin \theta$ , 其中  $\theta$

是入射方向与物体表面的夹角。光压非常小,在地球表面,正午时分的太阳光强大约是 1 kW 每平方米,因此光压只有大约  $3 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ 。在实验室里观察光压,样品的尺寸很小,需要悬挂在真空中,真空容器中残留的气体分子和样品表面吸附的气体分子都很容易影响观测的效果,需要非常细致地做实验。在大气层外,太阳的光强更大一些,气体吸附造成的影响会小一些,物体的运动范围可以很大,光压的微小效果更容易显示出来——是的,我说的就是人造卫星,它们都有着面积很大的太阳能电池板。

光压对卫星的影响有一些报道,比如说,“信使号”水星探测器(MESSENGER)在飞往水星的过程中,就利用了太阳能电池板上受到的光压来做一些轨道修正,以便节省一些卫星的燃料。但是具体的数据并没有看到,这里我想用最近的一个新闻来说明光压效应,以及如何利用物理知识从数据图表里看到更多的信息。

2019 年 8 月 2 日,新华社发布新闻报道《驭光而行不是梦!“光帆 2 号”成功在太空验证太阳帆技术》:

新华社华盛顿 8 月 1 日电(记者周舟)经过数年的电脑模拟及多次地面测试,美国行星学会的“光帆 2 号”飞行器近日终于在太空成功验证了太阳帆技术,仅利用太阳光的光子动量作为动力就抬升了轨道高度,成为首个在地球轨道上受控运行的太阳帆飞行器。

……

“光帆 2 号”于 6 月 25 日搭乘美国“猎鹰重型”运载火箭进入太空。据美国行星学会发布的消息,这个飞行器于 7 月 23 日展开银色太阳帆,经地面人

员优化调整朝向后开始围绕地球提升轨道,从 7 月 26 日至 7 月 30 日借助太阳帆将远地点提高 2 km, 距地表约 727 km。

在美国行星学会的网站上,不仅有“光帆 2 号”的概念图和照片,还有其运行轨道的近地点和远地点的数据(从 7 月 12 日到 7 月 31 日),如图 1 所示。

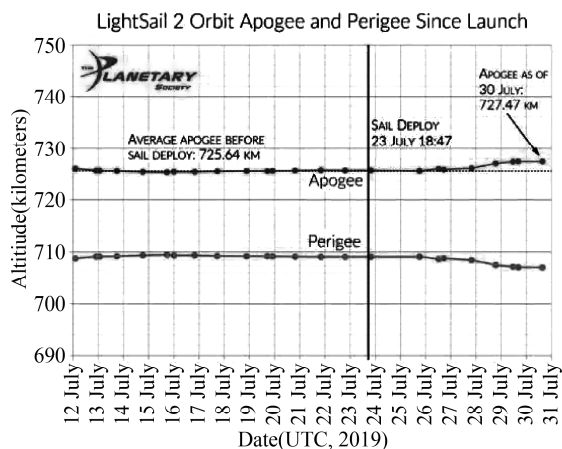


图 1 “光帆 2 号”运行轨道的近地点和远地点  
(图片来自美国行星学会网站)

据悉,“光帆 2 号”的重量大约 5 kg, 只有一个面包那么大,但是在太空展开后,太阳帆的总表面积有 32 m<sup>2</sup>。从上图可以看出,7 月 23 日是太阳帆展开的时间,此前的卫星轨道基本保持不变,近地点为 709 km(距离地面),远地点为 725 km。太阳帆展开以后,轨道的数据在几天里仍然不变,应该是在为实验做准备。从 7 月 27 日开始,“光帆 2 号”的轨道开始发生变化,在 4 天时间里,远地点从 725.64 km 增加到 727.47 km,平均每天变化大约 500 m。但是在变化最快的时候(7 月 28 日),一天时间里改变了大约 1 km。值得注意的是,近地点也同时改变了,从 709 km 缩小到大约 707 km。卫星的椭圆轨道的长轴长度并没有变化,甚至可能还略微缩小了一点。

为了让光压产生的效果最大,“光帆 2 号”需要调整其姿态,在从近地点运动到远地点的时候,太阳帆正对着太阳;从远地点运动到近地点的时候,太阳帆的表面与太阳光平行。

我们先做一些简单的计算。卫星轨道的平均高度是 717 km,卫星速度大约是 7.6 km/s,比第一宇宙速度 7.9 km/s 略低一些,这当然是因为它不是贴着地球表面飞行的缘故。绕地球一圈的时间是 98 min,平均每天环绕地球 14.7 圈。

在地球大气层外面,太阳的光强大约是

1.5 kW/m<sup>2</sup>,假设太阳帆的反射率是 1,那么光压大约是 1×10<sup>-5</sup> N/m<sup>2</sup>。太阳帆的表面积大约 30 m<sup>2</sup>,所以,总的受力为 3×10<sup>-4</sup> N。这个力很小,但是卫星轨道的半径 7100 km 很大(地球半径+轨道高度),所以运行半圈后太阳光做功为 4200 J,达到了卫星总能量的 1.4×10<sup>-9</sup>。由此可以推算出,如果不考虑任何空气阻力的话,卫星轨道的半径应该增大相同的比例(1.4×10<sup>-9</sup>),也就是 100 m,一天下来就是 1500 m。这与行星协会给出的数据很接近。

然而,如果仔细考察的话,就会发现一些问题。上面这个估计已经是最大值了,而且“光帆 2 号”的最大变化值——每天 1 km(7 月 28 日)。但是,“光帆 2 号”是受到空气阻力的,因为轨道数据表明,虽然近地点和远地点都有变化,但是轨道半径基本保持不变,这就意味着,空气阻力做功了(同样是因为太阳帆的面积很大),其大小与太阳光压做的功基本相等。因为空气阻力是全程起作用,而太阳光只在半程起作用,所以可以认为,在半程的情况下,空气阻力是太阳光压的一半。按照这样的考虑,卫星轨道的远地点在每个周期的变化长度只有 50 m,一天下来最多也就是 700 多米。这个数值接近而且大于“光帆 2 号”在 4 天里的平均变化量(500 m),但是要小于其最大的变化量。另外,从轨道数据可以看出,“光帆 2 号”在 4 天里的变化情况是非常不均匀的。

为什么最大变化量会超过估计值呢?一个显然的原因是这个估计有些粗糙,但我觉得还有其他原因。

会是太阳风的贡献吗?太阳风是太阳上层大气射出的超声速等离子体带电粒子流,在地球附近的太阳风密度是每立方厘米有几个到几十个粒子,其速度为 200~800 km/s。如果按照这些数据做计算,可以得到光帆受到的压力只有大约 10<sup>-8</sup>~10<sup>-7</sup> N,远小于太阳光压。由此可知,太阳风可能不是原因。

也许是光帆表面吸附的气体分子?太阳光使得气体分子脱附,从而产生额外的推力。但是,太阳帆很薄,正反面的温度不会相差很大,而且两面都会吸附分子,卫星轨道处的空气又非常稀薄,所以这个也不是很有说服力。

我觉得,这个额外的动力应该是来自于卫星本身。在 700 多千米的高空处,在张开太阳帆之前,卫星的横截面积很小,阻力可能还不明显,所以卫星的轨道参数没有变化。等太阳帆张开以后,空气阻力就不能忽略了,这从刚才对 7.27—7.31 这几天的分

析就可以看出来。但是,在 7.23—7.27 这几天里,卫星轨道的参数并没有显著变化,虽然太阳帆已经张开了,这只能说明,“光帆 2 号”用自己的动力装置(其实就是朝外面喷了些燃料气体之类的)补偿了空气阻力的影响。

估计一下需要喷出的气体量。刚才计算了,每半周轨道太阳光压做的功是卫星总能量的  $1.4 \times 10^{-9}$ 。喷出气体的速度大约是几百米每秒,为了方便起见,假设是 500 m/s。根据动量守恒可以得到,每次喷出 1 g 气体的量,就可以达到这个目的(即,使得卫星总能量改变  $1.4 \times 10^{-9}$ )。每天需要消耗的气体大约就是 15 g。

卫星的另一个动作也需要消耗气体:在空中转身 90 度。为了检验光压的效果,每圈需要转两次身。每个转身都需要喷气提供一个转动的力矩,而启停两个阶段的喷气方向正好相反。假设转身一次需要 1 分钟,太阳帆的质量均匀分布在表面上,可以得到每次喷出的气体量也是大约零点几克。一圈两次转身需要大约 1 g 的气体。

由上可知,为了保持“光帆 2 号”的轨道不变,每天需要大约 15 g 的气体,如果调整太阳帆的姿态,每天还需要另外 15 g 气体。据报道说,“光帆 2 号”运行大约一个月后就会自行坠毁,一个月需要大约几百克的气体质量,大约是卫星自重的 10%,还是有可能的。(需要注意的是,这个估计值仍然是很粗糙的。)

根据我们上面的分析,“光帆 2 号”虽然在 4 天内让远地点增加了 2 km,但是它的卫星轨道数据不足以说明这完全是由于太阳光压导致的结果,可能还有其他因素的作用。美国行星学会的首席科学家在宣布“光帆 2 号”任务取得成功的声明中说,“我们的(成功)标准是仅利用太阳光压改变飞行器的运行轨道,从而验证受控太阳帆技术,这是先前从未做过的事情。”恐怕还是有些言过其辞了。

从另一个方面来说,光压对人造地球卫星的影响肯定是有的,只是公开的详细数据不多而已。为了获得持续的能量供应,卫星都有巨大的太阳能电池板,微不足道的光压也会产生一些长期的效应。给卫星上装上角锥反射镜,利用激光探测技术可以把卫星轨道信息精确到毫米的量级,通过适当的建模并与实际测量结果进行比较,可以探知地球引力场的变化、稀薄大气产生的阻力以及太阳光压乃至太阳风对卫星轨道产生的影响。从这个意义上来说,“光帆 2 号”对于验证光压的独特性也是可以商榷的。

在 700 多千米高的高空,空气阻力无法忽略,地球的引力又很大,卫星的运行距离也不是很大,所以并不特别适合“光帆 2 号”来检验太阳光压。如果让它脱离地球引力的束缚,在类似于地球的公转轨道上绕着太阳公转。采用类似于上面的计算可以知道,适当地调整姿态,每转一圈可以让太阳光做功  $1.5 \times 10^6$  J,达到其总能量的  $7 \times 10^{-7}$ (注意,此时的速度是地球绕太阳的公转速度),使得远日点向外偏移 10 km,但仍然是微不足道的。这个原因当然是“光帆 2 号”太重了,或者说太厚了。

2016 年 4 月的时候,著名科学家霍金联合互联网投资人尤里·米尔纳宣布启动“突破摄星”计划(Breakthrough Starshot),打算投入 1 亿美元,利用激光和纳米技术制作并驱动小型太空飞船,希望其速度能达到 20% 光速,从而有可能飞往离地球最近的半人马座阿尔法星,并发回照片。虽然激光的强度远远高于太阳光,未来纳米技术制作的新飞船的面积可以远大于“光帆 2 号”,同时厚度也大为减小,但仔细的分析表明,这个项目的目标还是太不现实了——然而,那就是另一个故事了。随着霍金的去世,“突破摄星”计划恐怕也只能停留在宣传的阶段了。

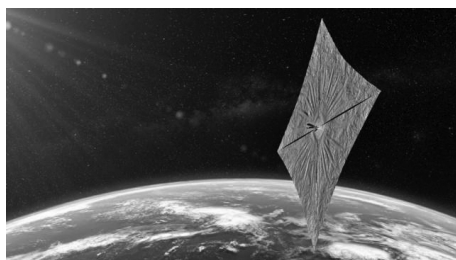


图 2 “光帆 2 号”在地球上空的艺术想象图  
(图片来自美国行星学会网站)

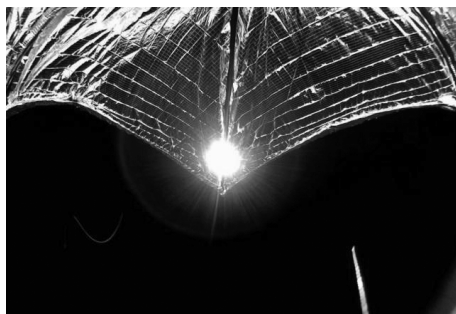


图 3 2019 年 7 月 23 日,“光帆 2 号”展开太阳帆  
(图片来自美国行星学会网站)

#### 参考文献

- [1] 美国行星学会网站. <http://www.planetary.org/>.