

花瓣式舱门太空垃圾清理器

摘要 随着人类对太空开发和研究的不断深入,太空垃圾的数量也在不断增长,逐渐威胁到地球和在轨航天器的安全。我们小组设计了一种多功能太空垃圾清理器,可以通过电磁吸附、变轨对接、喷射金属网等方式回收处理不同材质、不同体积的太空垃圾,保护在轨航天器,还太空洁净,还地球安宁。

关键词 太空垃圾 清理器 电磁吸附 变轨

引言

1957 年 10 月,前苏联将第一颗卫星送入轨道,人类空间活动的序幕由此拉开,同时也为太空送去了第一批人造垃圾。此后,随着人类太空史上的一次次振奋人心的壮举,越来越多的废弃物被遗留在太空,现如今太空中的垃圾尺寸在毫米级以上的空间碎片数以亿计,总质量达到几千吨,成为空间环境的主要污染源,无时无刻不在对地球和在轨航天器构成巨大威胁。2011 年 9 月 23 日,一颗已经报废的重达 6 吨的美国“高层大气研究卫星”因燃料不足而失控坠落,穿越地球大气层后,总重 5 0 0 公斤的 2 6 个残留碎片将最终散落在地球。一波未平,一波又起。10 月份,德国又有一枚废弃卫星“ROSAT”坠向地球。针对这种现状,我们小组设计了一种多功能太空垃圾清理器,以求尽量以低成本,短时间,处理较多的太空垃圾。



图 1 太空垃圾

1、方案描述



图 2 多功能太空垃圾清理器在轨效果图

1.1 组成结构

航天器由三部分构成：最外层为电磁铁。第二层是航天器的设备舱，舱内有变轨姿态调整系统、使其脱离飞行轨道而返回地面的制动火箭系统、供应电能的电池、储气的气瓶、喷嘴等系统。为了让各种仪器、设备不受到外层电磁铁的影响，这两层中间以电磁屏蔽材料隔开。

最里层为内表面附有缓冲材料的空腔，用于收集较大的太空垃圾。缓冲材料我们的想法是使用聚乙烯气泡薄膜——密度小、质量轻，温度适应性强，如果气泡薄膜非常密集的话，其缓冲性能极佳。如下图所示：

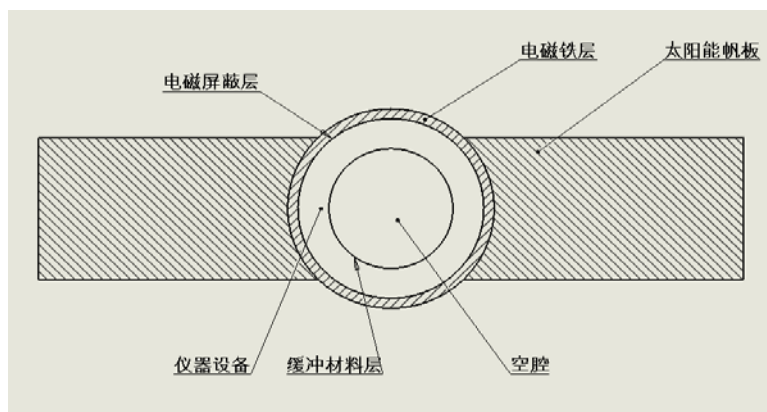


图 3 多功能太空垃圾清理器组成结构图

1.2 工作原理

我们设计的航天器有一套探测材质（金属/非金属）和速度的装置，同时会利用已有的在轨卫星辅助其进行探测工作，将周围的太空垃圾的信息传送到地面控制中心，地面根据得到的垃圾大小、材质、方向、飞行速度等数据，向航天器发出指令，对太空垃圾进行处理。

一. 若靠近的太空垃圾为较小的金属碎片，则打开外层电磁铁电源，改变碎片的运行轨道，接近航天器，然后打开舱门，使碎片进入航天器，关闭舱门，关闭电磁铁电源。

二. 若靠近的太空垃圾为较大的金属碎片或非金属，则通过喷射燃气改变运行速度，变轨，使垃圾的运行方向与清理器轨道相切，并且使清理器和太空垃圾在同一时间到达同一地点。这时，为了使太空垃圾和清理器实现无碰撞对接，让清理器瞬间改变速度到太空垃圾的速度，打开舱门，使太空垃圾进入，关闭舱门。为了便于尽可能多地收集太空垃圾，避免清理器受到过大冲击，同时更好地保护太阳能翻板，我们将清理器的舱门部分设计为可展开的花瓣式，如图 4。花瓣式舱门共有六片，正常状态下紧密连接并开启自锁装置；当清理器接收到可以开启舱门收集垃圾的信息时，花瓣自锁装置解除，花瓣底部的连接缓冲装置升起，将花瓣舱门推起并打开。连接缓冲装置可以采用 C 型碳纤维复合材料，当舱门受到外部力量冲击时收缩，能够存储能量，吸收过大的压力。

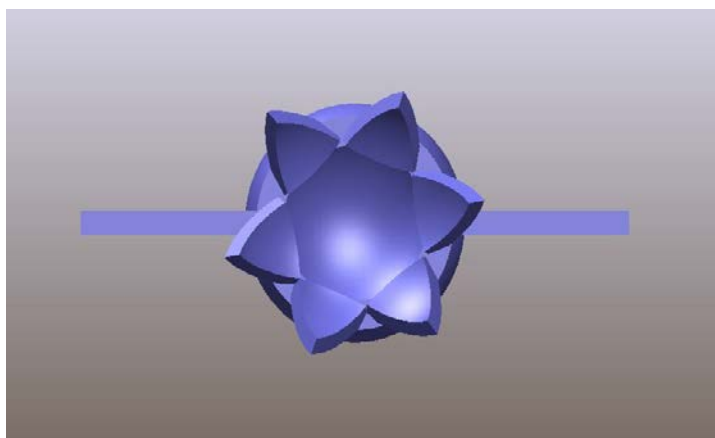


图 4.1 花瓣式舱门俯视图

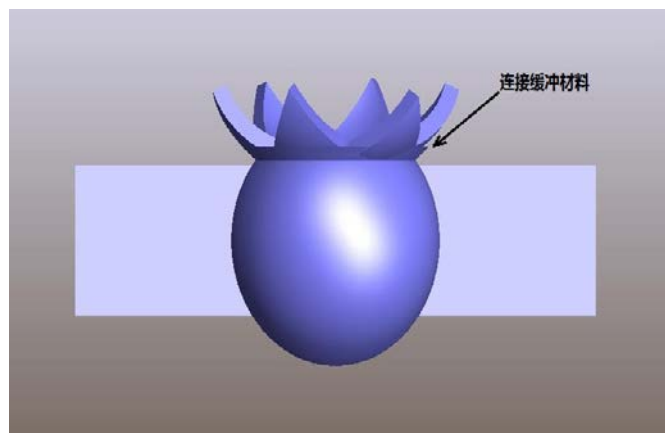


图 4.2 花瓣式舱门侧视图

由于清理航天器具有姿态和轨道控制系统，在自身的调节下，它会很快恢复到稳定工作状态。所以，虽然收集太空垃圾过程中会有轻微碰撞，但正常情况下不会使航天器失去控制。

关于清理器的变轨方式，我们设计了两种方案，并给出了每一种方案的具体参数计算。我们希望通过探测装置传输给地面的垃圾清理器和太空垃圾位置关系、速度等信息，来计算出经过多久太空垃圾清理器需要开始变轨，以及变轨过程中喷出的燃气量。

假设某一时间，由探测装置传输给控制系统的垃圾清理器和太空垃圾位置关系、速度等信

息如图 4、5、6 所示。A 为垃圾清理器，变轨前速度为 v_1 ，角速度为 ω_1 ，距地心半径为 r_1 ，

变轨后速度为 v_2 ，角速度为 ω_2 ，距地心半径为 r_2 ；B 为太空垃圾，速度为 v_0 ，且 B 在变轨时间内以直线运动， θ 是使 A、B 同一时间到达同一位置所要转过的角度， l 为 B 在与 A 相遇前还要飞过的距离， t 为喷气加速这一过程所需时间。

第一种方案中， t_1 为航天器接收信号到开始喷气变轨所需时间， θ_1 为航天器接收信号到开始喷气变轨转过的角度， t_2 为航天器在变轨结束到 A、B 相遇所用时间， θ_2 为航天器在变轨结束到 A、B 相遇转过的角度，变轨需要喷出的燃气量为 Δm_1 和 Δm_2 ，喷气相对速度为 u ， k 为常数。

求： Δm_1 、 Δm_2 和 t_1 ，以确定在接收信息多久之后，垃圾清理器需要做出反应进行变轨，以及变轨需要喷出的燃气量。

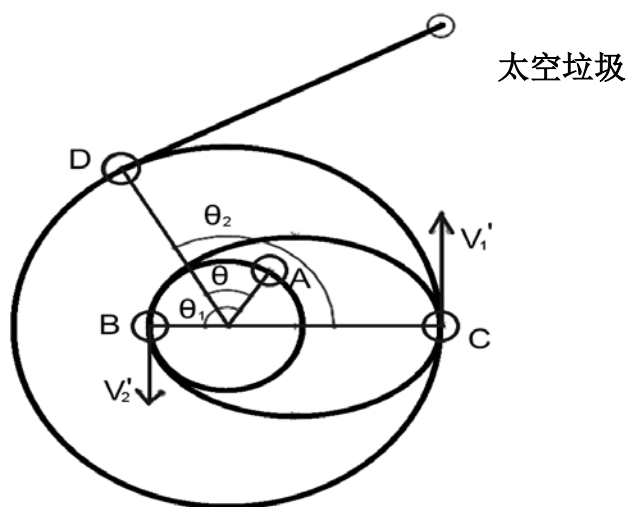


图 4

在 r_1 轨道上:

$$\frac{GMm}{r_1^2} = \frac{mv_1^2}{r_1} \rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{GM}{r_1}} \dots\dots(1)$$

由开普勒第二定律，得

$$v_1' r_1 = v_2' r_2 \dots\dots(2)$$

B 点第一次喷气过程中，动量守恒：

$$mv_1 = (m - \Delta m)v_1' + \Delta m(v_1 - u) \dots \dots (3)$$

从 C → D 过程中，机械能守恒：

$$\frac{1}{2}(m - \Delta m_1)v_1'^2 - \frac{GM(m - \Delta m_1)}{r_1} = \frac{1}{2}(m - \Delta m_1)v_2'^2 - \frac{GM(m - \Delta m_1)}{r_2} \dots \dots (4)$$

C 点处航天器第二次喷气：

$$(m - \Delta m_1)v_2' = (m - \Delta m_1 - \Delta m_2)v_2 + \Delta m_2(v_2 - u) \dots \dots (5)$$

在 r_2 轨道上：

$$\frac{GMm}{r_2^2} = \frac{mv_2^2}{r_2} \rightarrow v_2 = \sqrt{\frac{GM}{r_2}} \dots \dots (6)$$

由(2)(4)得：

$$v_1' = \sqrt{\frac{2GM r_2}{r_1(r_1 + r_2)}} \dots \dots (7)$$

$$v_2' = \sqrt{\frac{2GM r_1}{r_2(r_1 + r_2)}} \dots \dots (8)$$

将(1)(7)带入(3)得：

$$\Delta m_1 = \frac{m \left(\sqrt{\frac{GM}{r_1}} - \sqrt{\frac{2GM r_2}{r_1(r_1 + r_2)}} \right)}{\sqrt{\frac{GM}{r_1}} - \sqrt{\frac{2GM r_2}{r_1(r_1 + r_2)}} - u}$$

将(6)(8)带入(5)得：

$$\Delta m_2 = \frac{(m - \Delta m_1) \left(\sqrt{\frac{GM}{r_1}} - \sqrt{\frac{2GM r_2}{r_1(r_1 + r_2)}} \right)}{\sqrt{\frac{GM}{r_1}} - \sqrt{\frac{2GM r_2}{r_1(r_1 + r_2)}} - u}$$

由开普勒第三定律得：

$$\frac{a^3}{T^2} = k \rightarrow \frac{\left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right)^3}{T^2} = k \rightarrow T = \sqrt{\frac{(r_1 + r_2)^3}{8k}} \dots \dots (9)$$

$$t + t + t_1 + t_2 + \frac{T}{2} = \frac{l}{v_0} \dots \dots (10)$$

由图可知

$$\theta_1 + \theta_2 - \theta = \pi \dots\dots (1)$$

$$\theta_1 = \omega_1 t_1 = \frac{v_1}{r_1} t_1 = \sqrt{\frac{GM}{r_1^3}} t_1 \dots\dots (2)$$

$$\theta_2 = \omega_2 t_2 = \frac{v_2}{r_2} t_2 = \sqrt{\frac{GM}{r_2^3}} t_2 \dots\dots (3)$$

将(2)(3)带入(1)得：

$$\sqrt{\frac{GM}{r_1^3}} t_1 + \sqrt{\frac{GM}{r_2^3}} t_2 - \theta = \pi \dots\dots (4)$$

由(10)(14)得：

$$t_1 = \frac{\pi + \theta + \sqrt{\frac{GM}{r_2^3}} \left(2t + \sqrt{\frac{(r_1+r_2)^3}{32k}} - \frac{l}{v_0} \right)}{\sqrt{\frac{GM}{r_1^3}} - \sqrt{\frac{GM}{r_2^3}}}$$

第二种方案中，转移过程运动可分为两部分：

1. 切向以速度 $v_{1\tau}'$ 逃离地球，到达 C 点时速度为 $v_{2\tau}'$ ；
2. 法向为在万有引力作用下沿法向从 r_1 轨道到 r_2 轨道。

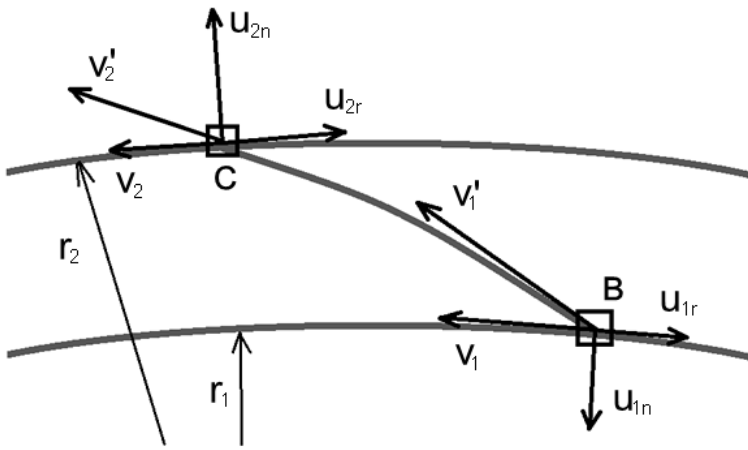


图 5

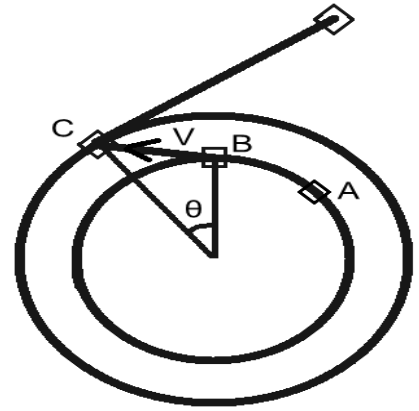


图 6

(1) 在 B 点第一次喷气，切向喷出质量为 Δm_1 的燃料，法向喷出质量为 Δm_3 的燃料：

$$mv_1 = (m - \Delta m_1 - \Delta m_3) v_1' + \Delta m_1 u_{1\tau}' + \Delta m_3 u_{1n}$$

$$\rightarrow \begin{cases} \text{切向: } mv_1 = (m - \Delta m_1 - \Delta m_3)v_{1\tau}' - \Delta m_1 u_{1\tau} \\ \text{法向: } 0 = (m - \Delta m_1 - \Delta m_3)v_{1n}' - \Delta m_3 u_{1n} \end{cases}$$

(2) 在 C 点第二次喷气，切向喷出质量为 Δm_2 的燃料，法向喷出质量为 Δm_4 的燃料：

$$m' = m - \Delta m_1 - \Delta m_3$$

$$\rightarrow \begin{cases} \text{切向: } m'v_{2\tau}' = (m' - \Delta m_2 - \Delta m_4)v_2 - \Delta m_2 u_{2\tau} \\ \text{法向: } m'v_{2n}' = 0 + \Delta m_4 u_{2n} \end{cases}$$

(3) 对变轨过程，切向运动满足开普勒第二定律及动能定理，其过程时间 t 应该取决于法向运动 $v_{1n}' \rightarrow v_{2n}', r_1 \rightarrow r_2$ ，故研究法向运动取变换开始（即喷气完成瞬间）为 $t = 0$ ，

$$\text{即 } r(0) = r_1 \dots\dots \textcircled{1}$$

对任意 t ，运动到 r 处由动量定理可得：

$$G \frac{Mm'}{r^2} dt = m'(v + dv - v) = m'dv \dots\dots \textcircled{2}$$

$$v^2 - v_{1n}'^2 = 2GM \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right) \dots\dots \textcircled{3}$$

$$\text{得: } v = \sqrt{v_{1n}'^2 + 2GM \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right)} \dots\dots \textcircled{4}$$

取 $r = \frac{1}{y}$ ，对④作积分：

$$dv = \frac{-2GM}{\sqrt{v_0^2 + 2GM(y_1 - y)}} dy \dots\dots \textcircled{5}$$

将⑤代入②并求积分有：

$$\int_0^t dt = \int_{r_1}^r -\frac{1}{y^2} \frac{1}{\sqrt{v_0^2 + 2GM(y_1 - y)}} dy$$

当 $r = r_2$ 时，解得：

$$t = \frac{2GM}{(v_{1n}' + \frac{2GM}{r_1})^{\frac{3}{2}}} \ln \left[\frac{\sqrt{v_{1n}' + \frac{2GM}{r_1}} + \sqrt{v_{1n}' + 2GM \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}}{\sqrt{v_{1n}' + \frac{2GM}{r_1}} - \sqrt{v_{1n}' + 2GM \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}} \cdot \frac{\sqrt{v_{1n}' + \frac{2GM}{r_1}} - v_{1n}'}{\sqrt{v_{1n}' + \frac{2GM}{r_1}} + v_{1n}'} \right]$$

现有的航天器主要使用第一种变轨方式，这种方式对航天器的机动性能要求不高，消耗燃料少，但变轨所需的时间较长。所以我们设想出了第二种轨道转移方案。这种方案可以实现清理器更为灵活的运动，大大缩短了变轨距离，所以我们考虑的是，如果测到距离较远、速度较慢的太空垃圾，就采用第一种变轨方式，因为清理器有足够的时间到达接收太空垃圾的地点；如果测到距离较近、速度较慢的太空垃圾，就采用第二种变轨方式，以及时回收到太空垃圾。

三、若靠近的太空垃圾体积巨大，已经超过航天器自身的处理范围，那它将会喷出一种速度快、强度高的金属网，附着在太空垃圾表面，使其运行的轨道和速度改变，坠入大气层，保护附近的卫星和其他在轨航天器。

1.3 发射与回收

这种清理航天器的发射可以两种形式：一种是直接通过火箭送到太空垃圾比较密集的区域，如处于低地球轨道的、距地面 700 千米至 900 千米高度的轨道范围，是极具商业价值和各国密集使用卫星的一个区域。另一种是“一箭双星”的方式，同时发射清理航天器和卫星，使清理航天器保护卫星的正常运行。

我们的清理航天器将在太空工作 3-6 月，当航天器燃料用尽或者舱内容量饱和之后，则在地面引导下坠落到指定地点，以免成为新的太空垃圾。

1.4 动力来源：

首先，航天器两侧安有太阳能帆板，为其提供动力。同时，为了防止太阳能帆板遭到太空垃圾撞击，它可以在太空垃圾靠近时折叠起来。

同时，在实现变轨的动力上，我们考虑让垃圾处理器在需要变轨时通过电能和少量燃料使捕获的太空垃圾发生化学或物理变化成为高压气体并向外喷射来获得动力。但这需要十分高功率的太阳能转化设备，以提供足够的光电功率，实现短期高温。

1.5 重要参数

尺寸：直径为 8.00 米的球形

重量：4820kg

在轨平均运行速度：7.79km/s

太阳能帆板面积：2.0×7.5 米

平均电力：1.5kw

轨道高度：距地面 700 千米至 900 千米

工作时间：3-6 月

2、技术原理及可行性分析

2.1

清理器收集太空垃圾的“对接”过程，涉及到它的速度改变、轨道转移、姿态调整等，无论是在理论上还是在技术上都会比较复杂，需要进行精确的计算分析。

2.2

为了尽可能降低航天器本身的使用成本，减轻地面导引的压力，清理器本身具有自主处理信息的能力，这将会要求清理器具有强大的控制系统。

2.3

为了防止清理航天器对其他在轨卫星的正常工作产生影响，同时加大吸附力度，我们使用了电磁铁而不是永久性磁铁，但是，如何在清理器电磁铁开启状态下保护其他航天器免受电磁场干扰，将会是需要进一步研究的问题。

2.4

太空垃圾发生化学或物理变化成为高压气体并向外喷射，需要十分高功率的太阳能转化设备，以实现短期高温。以目前太阳能帆板能提供的能量水平，这种方案的实现尚需进一步研究。

3、应用前景及经济效益分析

根据美国宇航局的统计，目前地球轨道上有大约 4000 个运行中或报废的人造卫星和火箭残体，此外还有大约 6000 个可以看到并跟踪的太空垃圾碎片；而直径超过一厘米的太空垃圾，更多达 20 万个。这些物体大多数的运行速度，都在 2 万公里/小时以上，无时无刻不对卫星本身的安全、航天飞机以及国际空间站的安全构成威胁。

这些空间碎片分布在从低地球轨道到地球同步轨道的各种轨道上。瑞士一家保险公司 2011 年的一项研究结果表明，一颗截面 10 平方米的卫星每年与直径大于 1 厘米的太空碎片碰撞的机会为万分之一。尺寸小于 1 毫米的碎片会使航天器的光学敏感器件性能下降，而与尺寸大于 10 厘米的大空间碎片相撞会令航天器“机毁人亡”。所以，如果人们预测航天器与大空间碎片撞击概率超过某一阈值，航天器即要进行机动变轨。多国合作并唯一在轨运行的空间站国际空间站平均每年因为这些太空垃圾要进行 1 次规避飞行，可见其危害十分巨大。

1986 年，“阿丽亚娜”号火箭进入轨道之后不久便爆炸，成为 564 块 10 厘米大小的残骸和 2300 块小碎片，10 年后，法国侦察卫星“西雷斯”撞上这些残骸，受损严重停止工作。2011 年 9 月底，一颗已经报废的美国“高层大气研究卫星”重达 6 吨，因燃料不足而失控坠落，穿越地球大气层后，总重 5 0 0 公斤的 2 6 个残留碎片最终落在地球上。

为了解决太空垃圾充斥太空的问题，世界各国的科学家都做出了许多努力和尝试。现有的太空垃圾清理方案包括：

3.1 自杀卫星

与足球的体积相近，一旦侦察到太空垃圾，便依附在垃圾上，使其速度降低，最后进入大气层，与太空垃圾同归于尽。

缺点：又会产生新的太空垃圾，而且卫星只能一次性使用，成本高昂。

3.2 立方帆

英国萨里大学空间中心的科学家研制出了首个专为清扫太空垃圾的小型飞行器“立方帆”。“立方帆”使用太阳能帆作为动力推进系统，并借助太阳帆进行“轨道刹车”，帮助它脱离轨道，坠入大气层烧毁。它分两步进行垃圾清理：位于低轨道的太空垃圾，直接用展开的帆将其黏住；在较高轨道上的垃圾，借助太阳能动力去接近。

缺点：消除太空垃圾的效率低；飞行器在轨道上展开携带装置或者让携带装置充气膨胀，极易因为零部件卡住或失灵而失败。

3.3 激光发射器

从地面或者太空发射激光，将太空垃圾推至离地球更近的轨道，使其在地球引力作用下加速下落。

缺点：成本过高，激光发射装置非常昂贵，而且可以击中的目标有限。

而我们的方案创意在于：

（1）我们的太空垃圾清理器实际上是一个无人宇宙飞船，有很好的机动性能，在地面引导下可以变速、变轨、打开和关闭舱门、喷出金属网，及时对外界环境做出反应，处理太空垃圾。通过类似与对接技术的方法，让太空垃圾“自行”进入到清理器的容纳舱内，不同于其他主动抓取太空垃圾的清理器，减小了对清理器的冲击，工作区域也因可以暂时转换轨道而变得更加广。

（2）对比常用的缩回式舱门，花瓣式舱门有如下优点。一，六片花瓣全部展开时，可收集的太空垃圾是普通舱门的 180%，提高了垃圾清理的效率。二，花瓣舱门底部的连接缓冲装置配合舱门，对即将进入清理器的垃圾进行第一次缓冲，以保护清理器内部结构。三，太阳能帆板与舱门位置垂直，花瓣式设计可大幅度减小太阳能帆板受到直接冲击的危险。

（3）对金属、非金属、小型碎片、大体积垃圾，我们的垃圾清理器都能起到清理作用，适用范围广，工作效率高。

（4）除了传统的变轨方式，我们还提出了一种新的变轨方式，可以缩短变轨时间，及时处理飞行速度较快的太空垃圾。

（5）如果通过“汽化”部分太空垃圾获得一定动力得以实现的话，我们的太空垃圾处理器的不仅携带燃料可相对减少，以增大其容量，更重要的是可以将本来会在大气层焚毁的垃圾转化为动力，还能及时处理清理器中的垃圾，延长其使用寿命。

（6）我们的太空垃圾清理器对待垃圾的态度是“包容”的——将垃圾收于体内，达到一定量后返回，回收的垃圾清理器携带了大量太空垃圾，这些太空垃圾由于受到清理器外壳的保护，在经过大气层的时候并没有被焚毁，可以重复利用。

(7) 我们的太空垃圾清理器还存在着巨大的发展空间。例如，在发射某些重要卫星的时候，作为辅助卫星或者伴星一同发射，时刻围绕在这些重点卫星周围，当有垃圾碎片靠近时，便可将这些威胁及时清走，保证受保护的卫星的安全为较为需要保护的飞行器护航；在绕地飞行过程中通过增加装置行驶卫星的功能，如探测、警卫、干扰等等。

结语

如今，为了地球和在轨航天器的安全，太空垃圾的处理已是迫在眉睫。但是，发射太空垃圾清理器永远是一种治标不治本的方法，而且需要耗费大量的人力、物力、财力。要想从根本上解决这个问题，就必须合理利用太空资源，减少太空垃圾产生，还地球安宁，还太空洁净。

【参考文献】

- 【1】 陈丹. 扫除太空路上的“绊脚石”. 科技日报, 2010 年 5 月 15 日
- 【2】 和平. 太空垃圾与日俱增 科学家提出“怪招”清垃圾. 今日科苑, 2008 年, 第 9 期
- 【3】 魏二虎, 严韦. 太空垃圾实时监测系统建立可行性分析. 《测绘信息与工程》, 2007 年, 第 2 期
- 【4】 杨秀敏. 太空垃圾的危害. 国际太空, 1990 年, 第 5 期