

航天推进技术与动量定理

施 坚

新课程的课程理念要求，物理教学要“关心学科发展，关注科技前沿”。作为对中学物理教学具有“指挥棒”功能的高考，近年已经开始命制一些物理与 STS 相结合的试题。近三年的考试大纲也明确地指出了与生活、科技生产等实际相结合的命题思想要有所体现。

所有推进系统的原理都是植基于物理学动量守恒定律，或者说是使用根据牛顿第三运动定律的反作用力效果来使飞行器前进。比如水面船舰用种种方法拨动海水以获得反作用力使船舰前进，飞机则是以螺旋桨或喷射引擎等拨动空气来获得反作用力。就太空船而言则是由喷射气体或是由外界提供动能来获得反作用力而能前进。在高中解答这类习题通常用到动量守恒定律和动量定理等知识，下面就结合高中动量定理与航天推进技术展开探讨。

离子推进技术

离子推进器是新一代航天动力装置，它利用加速装置将离子高速喷出以提供反冲力，可用于卫星姿态控制和轨道修正。典型应用有欧盟研制的“智能一号”，它的核心即为太阳能离子发动机，可将太阳能转化为电能，再通过电能电离惰性气体原子，喷射出高速氙离子流，为探测器提供主要动力。

例 1. 欧盟研制的“智能一号”(SMART-1)月球探测器，在围绕月球运行了近 3 年以后，于 2006 年 9 月 3 日完成了对月球的“轻柔一击”。测试太阳能离子发动机的性能，其实是“智能 1 号”探月之旅最主要的任务。太阳能离子发动机(即通常所说的“电火箭”推进技术)为探测器的轨道纠偏或调整姿态等提供动力。其工作原理是：将太阳能转化为电能，再通过电能电离惰性气体原子(如氙)，将产生的氙离子经过加速电场加速后，从尾喷管高速喷出，提供反冲力。它利用燃料的效率比普通化学燃料发动机高 10 倍，主要利用太阳能，因此在宇宙无重力状况下能够连续运转几年；而普通火箭发动机运转时，数以吨计的燃料几分钟即可用完。因此，欧空局把“电火箭”推进技术列为十大尖端技术之一。假如探测器连同离子发动机和氙气的总质量为 M ，每个氙离子的质量为 m ，电量为 q ，加速电压为

U ，离子加速后形成的电流强度为 I ，假如开始飞行器的速度为零，求：

(1) 发动机单位时间内应喷出多少个氙离子？

(2) 在离子发动机工作的初始阶段由离子发动机给探测器产生的加速度的大小为多少？

解析：(1) 设单位时间内应喷出 n 个离子，根据电流强度的定义可以知道： $n=I/q$ 。

(2) 设离子被喷出尾管时的速度为 v ，则 t 时间内喷出离子个数为 nt ，

由动量定理得：

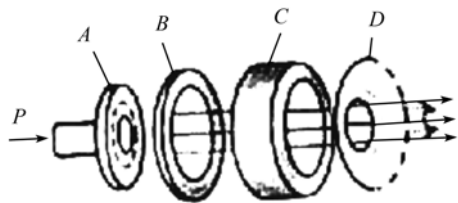
$$F=\Delta p/t=ntmv/t=nmv=mvI/q。$$

在发射离子的过程中，与发射出的离子组成的系统动量守恒，设喷射出的离子的总质量为 m_1 ，发射离子后，离子的速度为 v ，则有： $m_1v=(M-m_1)v_1$ 。因为 $M \gg m_1$ ，所以 $v \gg v_1$ 。故在离子发动机工作的初始阶段探测器的速度可以忽略不计。

在离子加速阶段，由动能定理得： $qU=1/2mv^2$ ，得： $v=\sqrt{2qU/m}$ 。根据牛顿第二定律： $F=Ma$ ，联立上述几式，得： $a=F/M=(mI/Mq)\sqrt{2qU/m}$ 。

点评：本题以物理知识在科技前沿问题中的应用为线索，紧密结合科技时事，考查了带电粒子在电场中的加速、动量定理、动量守恒、动能定理、功率等知识，考查学生收集有效信息，建立物理模型的能力。

例 2. (2007 年天津卷)离子推进器是新一代航天动力装置，可用于卫星姿态控制和轨道修正。推进剂从图中 P 处注入，在 A 处电离出正离子， BC 之间加有恒定电压，正离子进入 B 时的速度忽略不计，经加速后形成电流为 I 的离子束后喷出。已知推进器获得的推力为 F ，单位时间内喷出的离子质量为 J 。为研究问题方便，假定离子推进器在太空中飞行时不受其他外力，忽略推进器运动速度。



(1) 求加在 BC 间的电压 U ;

(2) 为使离子推进器正常运行, 必须在出口 D 处向正离子束注入电子, 试解释其原因。

解析: (1) 设一个正离子的质量为 m 、电荷量为 q , 加速后的速度为 v ,

根据动能定理, 有 $qU=1/2mv^2$ 。

设离子推进器在 Δt 时间内喷出质量为 ΔM 的正离子, 并以其为研究对象, 推进器 ΔM 的作用力 F' , 由动量定理, 有 $F'\Delta t=\Delta Mv$ 。

由牛顿第三定律知 $F'=F$,

设加速后离子束的横截面积为 S , 单位体积内的离子数为 n , 则有 $I=nqvS$, $J=nmvS$ 。

两式相比可得 $I/J=q/m$, 又 $J=\Delta M/\Delta t$, 联立以上各式解得 $U=F^2/2JI$ 。

(2) 推进器持续喷出正离子束, 会使带有负电荷的电子留在其中, 由于库仑力作用将来严重阻碍正离子的继续喷出, 电子积累足够多时, 甚至会将喷出的正离子再吸引回来, 致使推进器无法正常工作。因此, 必须在出口 D 处发射电子注入到正离子束, 以中和正离子, 使推进器获得持续推力。

点评: 本题考查学生收集、处理信息, 建立物理模型的能力, 要求熟练应用流体模型、动量定理、动能定理等知识。一般试题都是将碰撞问题作为科技事件的结合点, 而且难以命题, 两试题转向离子推进问题, 使得高考试题的命题思路迅速柳暗花明!

光压推进系统

光对被照射物体的压力称为光压。光子是静止质量为零的中性粒子, 是光和电磁波能量、动量的携带者, 其能量 $\varepsilon=h\nu$, 动量 $p=h/\lambda=h\nu/c$ (h 为普朗克常数, ν 为光的频率, λ 为光的波长)。真空中, 每个光子都以光速 $c=3\times 10^8$ 米/秒运动。光子撞击物体表面时, 会给物体一定冲量, 使物体受到冲力。由动量定理可知, 若每秒有 N 个光子垂直撞击在完全吸收其冲量的物体上, 则物体获得的动量增量 (即受到的压力) 为 $Nh\nu/c$; 若光子垂直撞击并被完全反弹回去, 则变为 $2Nh\nu/c$ 。目前, 光压动力已被用于行星探测船的姿态修正和控制 (如“科学家四号”以光压力矩控制姿态)。利用光压作为主要推动力最简单、最典型的应用就是太阳帆。

例 3. 根据量子理论, 光子不但有能量 $\varepsilon=h\nu$,

而且有动量, 计算公式为 $p=h/\lambda$, 式中 h 是普朗克常量, λ 是光的波长。既然光子有动量, 那么光照射到物体表面被吸收或被反射时就会对物体有压力, 叫做“光压”。太阳帆是一种靠太阳光压作为控制力和推动力的新型航天器, 科学家设想未来的宇航事业中利用太阳帆来加速星际飞船, 这样可以大大减少航天器发射中自身体积和重量的影响。在某个设计方案中, 计划给探测器安上面积极大、反射率极高的薄膜, 并设法让它始终正对太阳。

(1) 已知在地球绕日轨道上, 每平方米面积上得到的太阳光的功率为 $P_0=1.35\text{kW}$, 探测器本身的质量为 $M=100\text{kg}$, 太阳帆薄膜面积为 $S=4\times 10^4\text{m}^2$, 那么探测器由地球发射到太空时, 太阳光对帆面的最大光压为多大? 对应探测器得到的加速度为多大?

(2) 若太阳帆是黑色的, 飞船的加速度为多少?

(3) 若太阳帆采用反射率极高的薄膜且探测器仅靠光压加速, 那么每一天内增加的速度是多大?

解析: 依据题中所给信息, 取时间 t 内垂直射到物体表面的 n 个光子为研究对象, 依据动量定理求出压力, 再据压强公式求出压强。

(1) 由光子的能量表达式 $\varepsilon=h\nu$ 和动量表达式 $p=h/\lambda$ 以及光在真空中光速 $c=\lambda\nu$, 可得光子的动量和能量之间关系为 $\varepsilon=pc$ 。

设时间 t 内照射到帆面的光子个数为 n , 每个光子能量为 ε , 垂直射到帆面后全部反射, 则这时太阳光对帆面的光压最大, 设这个压强为 $p_{\text{压}}$ 。每平方米面积上得到的太阳光的功率为 $P_0=n\varepsilon/St=np c/St$, 由动量定理, 当入射光全部被反射时对帆面的压力为 $F=2pn/t$, 则压强为 $p_{\text{压}}=2pn/St=2P_0/c=9\times 10^{-6}\text{Pa}$; 由牛顿第二定律 $F=Ma$, 得:

$$a=F/M=2pn/Mt=2P_0S/Mc=3.6\times 10^{-3}\text{m/s}^2。$$

(2) 若太阳帆是黑色的, 有 $F=pn/t$, 由牛顿第二定律 $F=Ma$, 得: $a=1.8\times 10^{-3}\text{m/s}^2$

$$(3) \Delta v=a\Delta t=3.6\times 10^{-3}\times 24\times 60\times 60=311\text{m/s}。$$

点评: 本题通过提供大量科技信息, 很巧妙地吧太阳帆高科技推进技术和量子科学结合起来进行命题, 考查了学生收集和处理信息的能力, 建立物理模型的能力, 要求熟练应用量子物理、动量定理、牛顿定律等知识。

(江苏省梁丰高级中学 215600)