

從宇宙火箭到星际航行

張厚政

(中国科学院力学研究所)

今年一月二日苏联人民成功的发射出了一个人造行星，这个紅色行星从月球附近飞过，然后就进入了繞太阳运动的行星轨道，週期为450天，轨道则在地球和火星的轨道之間，距火星最近的距离为地球与火星距离的 $\frac{1}{4}$ 。这个人造行星——宇宙火箭的发射成功震动了全世界，它再一次证明了社会主义阵营的空前强大，社会主义制度的无比优越性，苏联在最新科学技术上已把美国远远的抛在后面。同时它也表明苏联在发射三颗人造地球卫星之后又向宇宙航行方向跨进了一大步，它将成为人类征服宇宙空间道路上的新的里程碑。

这支宇宙火箭最令人感兴趣的地方，一个是它的重量(达到1472公斤)，另一个就是它的速度(超过第一宇宙速度达到了第二宇宙速度，因此能成为人造行星)。下面就来解释一下这些问题：

一、三种宇宙速度

最近大家常常在报纸上看到第一宇宙速度，第二宇宙速度和第三宇宙速度这三个名词，并且也常看到它们的数值是8公里/秒，11.2公里/秒和16.7公里/秒等，这些都是怎么样得来的呢？

1. 第一宇宙速度。当我们在地面上水平地抛射物体时，它必然会落到地面上。不过如果抛射出去的速度愈大，则它就跑得愈远，当速度大到一定的程度后，当它还没有来得及落回地面时，就已经繞地球一圈而回到出发了(如果略去空气的阻力的話)。这时它就变成了一个人造卫星，可以繞着地球旋轉而不落回地面。这个速度 v_1 就叫作第一宇宙速度，它的大小应该是多少呢？可以这样来计算，因为地球与任何物体間的吸引力永远为万有引力，大小为：

$$f = -k \frac{Mm}{r^2}.$$

其中 M 为地球的质量， m 为物体的质量， r 为物体与地心的距离， k 为万有引力常数， $k=6.68 \times 10^{-8}$ 厘米³/克·秒²，负号表示为吸引力，若要物体圍繞地球作速度为 v_1 的圆运动，那么維持它所需的向心力 $\frac{mv_1^2}{r}$ 必等于万有引力，即

$$\frac{mv_1^2}{r} = k \frac{Mm}{r^2};$$

$$\therefore v_1 = \sqrt{\frac{kM}{r}}. \quad (1.1)$$

若在地球表面， $r=R=6371$ 公里，即地球的半径，地球的质量 $M=589 \times 10^{19}$ 吨，化成CGS制再注意到万有引力常数 $k=6.68 \times 10^{-8}$ 厘米³/克·秒²，代入上式即算出：

$$v_1 = 7.9 \text{ 公里/秒} \approx 8 \text{ 公里/秒}. \quad (1.2)$$

这就是第一宇宙速度的来源。但是在地球表面是不可能存在卫星的。因为地球表面有一层稠密的大气，空气的阻力很大，阻力可写成：

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_D,$$

其中 ρ 为空气密度， v 为物体速度， S 为物体表面积， C_D 为物体的阻力系数，由物体的形状决定。由于空气阻力所造成的困难，最主要的倒不在于因此而需要很多额外的能量，而是在于阻力摩擦会产生大量的热，使速度还没有达到8公里/秒时物体就化为灰坐了。所以人造卫星只能在300公里以上的高空中存在，那里空气已非常稀薄，式中的 ρ 很小，故阻力很小，对人造卫星的影响很小。但是就是因为这个阻力才使人造卫星旋轉得愈来愈低，終至落入大气中毁灭。

由(1.1)式也可以看出，半径 r 出现在分母，故离地球愈远，卫星的圍繞速度也就愈小。

又我們知道，每一点的重力加速度 g_r 为：

$$g_r = k \frac{M}{r^2}.$$

因此(1.1)式可化为：

$$v_1 = \sqrt{g_r r}, \quad (1.3)$$

用这个式子计算有时要方便得多。但要注意一点，当物体速度恰为7.9公里/秒时，它的方向必须是水平方向才能成为人造卫星，否则仍将落至地面，这点由(1.1)式的推导就可看出，圆运动中的 v 指的是切线速度。

2. 第二宇宙速度，当物体的速度略大于7.9公

里/秒,并且方向合适时,它就可以沿椭圆轨道绕地球运动,而仍然是人造地球卫星。物体的速度愈大,椭圆便拉得愈长,当速度大到一定程度时,椭圆终于不再闭合而变成一抛物线,这时物体就会跑到地球的吸引力范围之外再也不回来了。在速度是多少时会发生这一情况呢?因在距离地心为 r 的一点处,物体的位能(势能)为 $k\frac{Mm}{r}$,要想使物体摆脱地球的吸引力再也不回来必须它的动能足以转换成这一位能,即要求:

$$\frac{mv_2^2}{2} = k\frac{Mm}{r}$$

$$v_2 = \sqrt{2k\frac{M}{r}} = \sqrt{2g_0r} \quad (1.4)$$

这就是理论力学中所常见的逃逸速度,也就是所谓的第二宇宙速度。由(1.4)与(1.3)(1.1)比较可以看出第二宇宙速度永为第一宇宙速度的 $\sqrt{2}$ 倍,即1.41倍。即:

$$v_2 = 1.41v_1 \quad (1.5)$$

在地球表面, $v_2 = 11.2$ 公里/秒。 (1.6)

实际上,用在第二宇宙速度时物体的动能恰足以反抗万有引力作用而跑到无穷远这一概念,积分可得:

$$\frac{mv_2^2}{2} = \int_r^{\infty} k\frac{mM}{r^2} dr,$$

将得出完全同样的结果。

由计算也可看出,当达到了第二宇宙速度时(在地球表面附近为11.2公里/秒),无论向那个方向抛射都是一样的,同样可跑到地球的引力范围之外(只要不恰向地面抛射)。

3. 第三宇宙速度,当物体的速度达到了第二宇宙速度后,可以跑到地球的引力范围之外去,但是因为太阳还有着更为强大的引力场,所以它还会绕着太阳飞行,成为太阳的行星,苏联发射的这支火箭正是这样。如果要想克服太阳的引力场跑到太阳系以外去,还必须要有更大的速度才行,这个速度就是第三宇宙速度,计算也比前两个略为复杂。

在地球所处的轨道上要想抛一个物体逃出太阳的引力场,显然只要用式(1.4)把其中的 r 改为地球轨道半径, g_0 改为太阳引力的加速度就成了。但是这里可以有一个更巧妙的办法。我们已知地球绕太阳运动的平均速度为29.77公里/秒 \approx 30公里/秒。这就相当于该点对太阳的第一宇宙速度 v_1 。所以根据(1.5)式一下子就可以把这物体脱离太阳的速度算出:

$$v_3 = 1.41 \times 30 = 42.3 \text{ 公里/秒。}$$

但是由于火箭是从运动着的地球上发射的,地球是在以30公里/秒的速度运动,故地球上发射火箭只要再给它,

$$v_3 = 42.3 - 30 = 12.3 \text{ 公里/秒}$$

的速度就成了。这时从地球上看到它的速度是12.3公里/秒,而实际上它对太阳的相对速度已达42.3公里/秒,故已可逃出太阳的引力场。但是这仍然不是第三宇宙速度,因为要使物体对地球获得这一速度,首先必须克服地球的万有引力场。克服地球的万有引力场需要 $v_2 = 11.2$ 公里/秒的速度,考虑到所需要的都是能量,因此需要取平方和,所以第三宇宙速度为:

$$v_3 = \sqrt{12.3^2 + 11.2^2} = 16.7 \text{ 公里/秒,} \quad (1.7)$$

在1957年10月4日,苏联人民成功地发射了第一颗人造卫星,于是人类首先达到了第一宇宙速度,今年1月2日苏联人民又成功地发射了人造行星于是第二宇宙速度又被人类达到,宇宙航行的大门就开始被人类打开了。使物体达到这一速度的主要问题就在于火箭技术,下面我们把这个话题谈一谈。

二、火箭技术

(1) 有几个条件使得发射人造卫星、人造行星或宇宙飞船必须使用火箭发动机。提到火箭不得不引起我们的骄傲,因为火箭首先是由中国人发明的。火箭的特点在于它本身携带有燃料及氧化剂,因此工作起来不需要从外界吸取氧气,这就使得它在高空中没有空气的地方仍旧能够工作,而普通飞机用的喷气式发动机是不能胜任这一工作的,它们需要空气,

火箭有固体燃料火箭与液体燃料火箭两种,主要取决于它们所用燃料的不同,一般简称为固体火箭与液体火箭。固体火箭的燃料就是普通的火药,把火药压成柱状放于燃烧室内,由压紧的程度可决定燃烧的快慢,燃烧后由喷管喷出,火箭即由于反作用力而向前跑去。固体火箭的特点是构造特别简单,但不好控制且燃烧时间短(不超过数秒钟),所以一般只用于小火箭。

液体火箭所携带的燃料及氧化剂都是液体(如果是气体则要把它压成液体以减小体积,便于携带)。燃料通常用汽油,酒精,液态氢等,氧化剂则通常为液

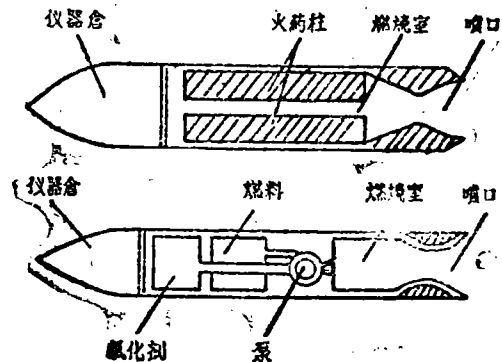


图 1

态氧, 硝酸, 液态氟等。工作时用泵把它们按比例压入燃烧室, 燃烧后再由喷管喷出, 由于氧化剂及燃料(科学家把它们统称为推进剂)常为腐蚀性很强的液体(如硝酸等), 或温度极低的液体(如液氧、液氟等), 为了保护容器不受损坏及它们不会蒸发, 通常都在发射前半小时才注入。压推进剂入燃烧室的泵可由过氧化氢的分解产生的推力带动。液体火箭的构造虽较为复杂, 但便于控制并且携带的推进剂多, 工作时间较长(可达数分钟), 故大型的都用液体火箭发射人造卫星、人造行星的多级火箭的前两级必也是液体火箭。

(2) 火箭动力学。关于火箭运动的基本方程式是伟大的俄罗斯科学家齐奥尔科夫斯基首先导出的。这个方程在火箭运动上很重要, 所以在里把它们推导一下。

如果火箭的排气速度为 c (即燃料与氧化剂燃烧后从喷管喷出时的速度), 火箭的瞬时质量为 m , 则火箭单位时间排出的质量为 $\frac{dm}{dt}$, 因此推力为 $c \frac{dm}{dt}$ 火箭的运动方程就应当是:

$$m \frac{dv}{dt} = -c \frac{dm}{dt}, \quad (2.1)$$

因为火箭的质量是在减少所以有一负号, v 为火箭的速度。上式可变为:

$$-\frac{dv}{c} = \frac{dm}{m}.$$

于是可以很容易的积分出:

$$\ln m = -\frac{v}{c} + \text{常数}.$$

积分常数可由初始条件定出, 当火箭未发射时速度 $v=0$, 质量 $m=m_0$, 代入上式定出常数 $=\ln m_0$, 于是:

$$\ln \frac{m_0}{m} = \frac{v}{c};$$

即:

$$\frac{m_0}{m} = e^{\frac{v}{c}}. \quad (2.2)$$

这就是齐奥尔科夫斯基导出的火箭运动的基本方程。可见在一定的排气速度 c 时, 火箭最后所达到的速度 v 取决于质量比 $\frac{m_0}{m}$, 即取决于火箭发动前的质量 (包括燃料, 氧化剂等) m_0 与燃烧后的质量 m 之比。质量比愈大则可达到的速度愈大。质量比所以可以大于 1 就是因为燃烧前火箭带有燃料和氧化剂, 在燃烧后燃料与氧化剂都排出了故质量减少。这就看出质量比太大是不可能的, 因为发动机、载荷、火箭壁等都要有一定的质量, 而我们努力的方向之一就是尽量提高质量比 $\frac{m_0}{m}$ 。现在一般火箭的质量比在 3 与 4 之间。

方程式(2.2)的推导中略去了火箭所受的重力, 如果更精确些考虑到重力, 当火箭垂直向上运动时方程(2.1)则就应当是

$$m \frac{dv}{dt} = -c \frac{dm}{dt} - mg. \quad (2.3)$$

其中 g 表示重力加速度, 因为重力是向下而火箭是向上飞的故有一负号, 再考虑到火箭的加速度为:

$$a = \frac{dv}{dt},$$

消去 dt , 于是式(2.3)变为:

$$\frac{dm}{m} = -\frac{dv}{c} - \frac{g}{a} \frac{dv}{c},$$

积分出为:

$$\ln m = -\left(1 + \frac{g}{a}\right) \frac{v}{c} + \text{常数}.$$

同样由初始条件, 当 $v=0$ 时, $m=m_0$, 定出常数 $=\ln m_0$, 于是:

$$\ln \frac{m_0}{m} = \left(1 + \frac{g}{a}\right) \frac{v}{c},$$

或可写作:

$$\frac{m_0}{m} = e^{\frac{v}{c} \left(1 + \frac{g}{a}\right)}. \quad (2.4)$$

上式为考虑到重力, 当火箭向上发射时的运动方程, 可以看出加速度 a 愈大则要求的质量比愈小。当 a 非常大时 $\frac{g}{a} \rightarrow 0$, 则式(2.4)变为(2.2)。

(3) 现在我们分析一下 $v, c, \frac{m_0}{m}$ 各量间的关系。为了简单只根据(2.2)来作分析。从式(2.2)来看, 当质量比为固定时, 则排气速度 c 愈大愈好, c 愈大则火箭所达到的速度愈大。反之, 当排气速度 c 固定时, 质量比 $\frac{m_0}{m}$ 愈大则 v 愈大。所以我们的目的就是想办法来提高 $\frac{m_0}{m}$ 和 c 。

排气速度 c 由所用的燃料和氧化剂决定, 现在把一些最重要的推进剂列表如下:

表 1

推进剂	排气速度 c (公里/秒)	推进剂	排气速度 c (公里/秒)
氧+汽油	2.5	氧+氢	3.6
氧+酒精	2.5	氟+氢	3.8
氧+氮	2.6	氟+肼	3.2
过氧化氢	1.2	.	.

如果用普通的化学推进剂, 例如氧和汽油或酒精, 则排气速度为 2.5 公里/秒, 若能达到第一宇宙速度和第二宇宙速度可算出 $\frac{v}{c}$ 分别为 3.2 与 4.5, 由式(2.2)就可算出要求质量比 $\frac{m_0}{m}$ 分别为 24 与 90。这显然是不可能的, 只要注意到一桶普通汽油与桶重之比为 13, 就知道这种火箭是不能实现了, 因为火箭除了器壁

外还要有发动机, 载荷等, 更何况它还要耐高温高压。所以必须应用多级火箭。

多级火箭就是由几个火箭接在一起, 上面的小下面的大, 这样最下面的第一级火箭燃烧完毕后, 它的外壳及发动机都已变成没有用的东西, 带着它来加速当然只能浪费燃料, 所以最好的办法就是在第二级火箭开动前把它扔掉。第二级火箭在第一级达到的速度基础上把速度再提高一次, 这就是多级火箭能达到更高速度的原因。由(2.2)可知多级火箭能够获得的速度由下式决定:

$$v = c_1 \ln \frac{m_{10}}{m_1} + c_2 \ln \frac{m_{20}}{m_2} + \dots,$$

其中 c_1, c_2, \dots 分别第一级第二级火箭的排气速度, $m_{10}, m_1, m_{20}, m_2, \dots$ 分别为各级火箭工作前与工作后的质量。现在让我们用式(2.2)估计一下发射人造卫星和人造行星的火箭的重量。

现在所能达到的质量比 $\frac{m_0}{m}$ 在 3—4 之间。此时按式(2.2)火箭速度可达到 $v=1.2c$ 左右。但由于空气阻力及重力等火箭速度就只达到约 $v=c$ 。此时的质量比虽为 3—4 但最后质量中还包括有这级火箭的外壳和发动机等, 有效载荷的质量只是 m 中的一部分。按目前比较先进的技术水平有效载荷可能为火箭起飞前总质量的 $\frac{1}{9}$ 。这就是说第一级火箭总重约为第二级的 9 倍, 第二级又为第三级的 9 倍左右, 依此类推。每一级火箭所增加的速度应与排气速度 c 差不多, 用目前普通的化学燃料, 排气速度 $c=2.5$ 公里/秒, 因此发射一个人造地球卫星使之达到 7.9 公里/秒需要一个三级火箭。每一级火箭是上一级质量的 9 倍, 如果卫星的质量为 $m_{\text{卫}}$ 的话, 则火箭起飞前的总质量应为:

$$m_{\text{箭}} = 9^3 m_{\text{卫}} \doteq 720 m_{\text{卫}}, \quad (2.5)$$

要达到第二宇宙速度则需要一个四级火箭, 如果人造行星的质量为 $m_{\text{行}}$, 则:

$$m_{\text{箭}} = 9^4 m_{\text{行}} \doteq 6500 m_{\text{行}}, \quad (2.6)$$

第一个苏联人造卫星为 83.6 公斤, 第二颗为 508.3 公斤, 第三颗为 1327 公斤(有效载荷为 986 公斤)。由式(2.5)可估计出发射它们的火箭为 60 吨, 380 吨与 700 吨。这颗人造行星的最后一级火箭为 1472 公斤, 但其仪器、能源及容器共重 361.3 公斤, 即有效载荷为 361 公斤。由(2.6)可算出发射前火箭的总重量为 2400 吨。

火箭起飞前为 60 吨, 容易想象。起飞前为 380 吨, 虽然较大但想起来也还可能。起飞前为 700 吨乃至 2400 吨似乎太大了一些, 所以有人估计苏联已经用了新式的化学燃料, 使排气速度大为提高。如果排

气速度提高到 $c=3.5$ 公里/秒左右, 则发射人造行星达到第二宇宙速度只要三级火箭就够了。这样起飞前火箭的重量只需为人造行星的七百倍左右, 有效载荷为 361.3 公斤, 所以有人估计苏联发射这支人造行星的火箭起飞前为 250—400 吨。

当然使用新式的化学燃料也不简单, 不只是一个燃料的问题。排气速度高, 温度必也高, 因此耐高温的合金, 器壁的冷却, 燃烧的控制等也都必须很好的解决, 这就要求各方面的技术都有很高的水平。所以我们说当人造卫星重量大了, 不只是一个量的问题, 而且包含有质的变化。

三、宇宙航行

宇宙航行是最容易引起大家兴趣的一个问题, 宇宙航行实际上可分为三类, 一是到地球卫星上去的航行, 即是到月亮上去的航行。一是到其他行星上去的航行, 另外一个则是跑出太阳系到其他恒星世界去的航行。

(1) 到月亮上去的航行。月亮还没有在地球的引力范围之外, 所以不需要达到第二宇宙速度——11.2 公里/秒就可以达到月球, 实际上只要达到 11.1 公里/秒就够了。火箭向月球运动时同时受到地球和月亮的引力的作用, 但二者的方向相反, 离地球愈远则地球的引力愈小, 月球的愈大。到达一点(约走过全部地月距离的 $\frac{9}{10}$), 月球和地球引力的大小相等, 我们不妨把它叫作中和点, 过了这点后月球的引力就比地球大了。显然开始时火箭的速度要逐渐减小, 如果初速恰为 11.1 公里/秒时, 到达中和点速度差不多减少到接近于零, 过了这点火箭在月球引力的作用下速度又逐渐增加, 最后以 2.34 公里/秒(月球表面的第二宇宙速度, 即逃逸速度)的速度撞于月球。整个航程(地球到月亮的平均距离为 38.5 万公里)共需 118 小时, 差不多是 5 整天的时间。这个时间并不算太长, 比北京到莫斯科坐火车的时间还要短些。

如果火箭发射的速度提高到 11.2 公里/秒, 则所需的时间将大为缩短。这是因为原来在中和点附近的太慢费时间太多, 现在把速度略为提高一点, 在地球附近速度相差不大, 但到中和点附近速度就高了好多倍因此使时间大为节省, 只需 49 小时即两整天就可以到达月球了。

如果速度再高, 所需的时间还要减少。今把一些结果列于表 2。可见当速度提高到 15.2 公里/秒时, 只需 8 小时就够了, 这实在算不得一个太长途的旅行。

我们再来看看这支火箭的运动。它于莫斯科时间 1 月 2 日晚 8 时(20 时)发射, 航行速度很快,

表 2

轨道速度 (公里/秒)	其到月球时 所需时间(小时)	轨道 (公里)	所需 时间(小时)
11.1	17	13.7	17
11.2	18	15.2	8
11.3	19	16.3	6

发射后 7 小时即 1 月 3 日 3 时距地球已 10 万公里，3 日 12 时距地球 20 万公里，21 时即距地球 28.4 万公里，到 4 日早晨 5 时 50 分即达到距月球最近之点，此时离月球五、六万公里，离地球 37 万公里，航行共用 34 小时。此时它的速度是 2.54 公里/秒，因为速度不大，故没有被月球捕获而向月球或变成月球的卫星。当时月球为 6000 公里时对月球的第一宇宙速度和第二宇宙速度是很容易由式(1-1)及(1-4)算出，但可以简单的与地球比较而得出。我们知道地球的半径约为 6000 公里，正与这距离相等，月球质量为地球质量的 $\frac{1}{81}$ ，由式(1-1)可以看出这一点的第二宇宙速度正为地球表面的 $\frac{1}{9}$ 即

$$v_2 = 0.88 \text{ 公里/秒。}$$

由(1-5)这点的第二宇宙速度为：

$$v_2 = 1.24 \text{ 公里/秒，}$$

即任一物体在离开心为 6,000 公里时，如果水平速度小于 0.88 公里/秒，则物体落向月球，如果在 0.88 与 1.24 公里/秒之间，则物体即变成月球的卫星也可能落向月球，视运动的方向而定，如果速度大于 1.24 公里/秒，只要不是正面向月球的，必然会摆脱月球的引力。现在速度大于 1.24 公里/秒，那么它当然会脱离月球的引力场了。

(2) 行星际航行。要到其他行星上去，除了克服地球引力外，还要考虑太阳的吸引力。从地球的轨道到外行星的轨道，要克服太阳的引力做功，故需要额外的动能，今以地球至火星的航行为例。从图 2 可以看出到火星上去可以有各种不同的轨道。轨道甲为与地球及火星轨道都相切的半个椭圆，就是所谓的双切轨道，这个轨道最长，故需要的时间最长，要 259 天。但因为它可以充分利用地球轨道运动的动能，同时到火星时速度也最小，所以最节省燃料。轨道丙对应于更大的椭圆中的一部分，那么它要求的速度当然更高，更费燃料。用轨道乙显然更省时间，但是它几乎是逆着太阳的引力运动的，地球轨道运动速度(每秒 30 公里)也不能利用，所以要费多得多的燃料。在有更高喷气速度的火箭以前，这种轨道是不宜采用的。除了有了喷气火箭，如原子火箭等，这些轨道才能考虑。

采用双切轨道甲全部航程共需 259 天，要求的速度约为 11.6 公里/秒。计算方法如下。由物理学可知，一般行星在离心力的作用下作椭圆运动时，每一点的速度为(见图 3)：

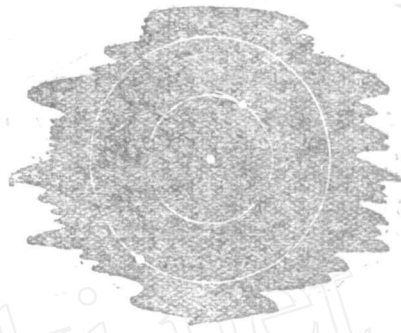


图 2

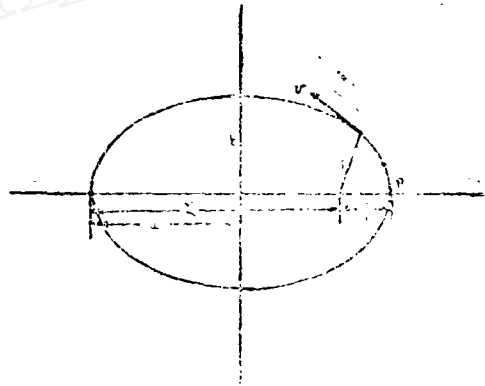


图 3

$$v_p^2 = \mu \left(\frac{2}{r_p} - \frac{1}{a} \right), \quad (3-1)$$

在轨道近日点 P 的速度 v_p 为：

$$v_p^2 = \mu \left(\frac{2}{r_p} - \frac{1}{a} \right), \quad (3-2)$$

μ 可由以太阳为心 r_p 为半径作圆周运动之速度(即环绕速度 v_{p1})求出，在作圆周运动时 $a = r_p$ ，(3-2)变为：

$$\begin{aligned} v_{p1}^2 &= \mu \frac{1}{r_p}, \\ \mu &= v_{p1}^2 r_p, \end{aligned} \quad (3-3)$$

(3-3)代入(3-2)得

$$v_p^2 = v_{p1}^2 \left(2 - \frac{r_p}{a} \right),$$

式中 a 为椭圆的半长轴，由图 3 可以看出：

$$a = \frac{1}{2} (r_p + r_a),$$

代入上式导至：

$$v_p = v_{p1} \left(2 - \frac{2r_p}{r_p + r_a} \right)^{1/2}, \quad (3.4)$$

在图2中可近似把地球及火星的轨道看成圆形，因它们的偏心率都很小这样作误差是不大的。于是 r_p 就是地球轨道的半径， r_a 为火星轨道的半径，太阳就位于 S 点。可知 $r_p = 150 \times 10^6$ 公里， $r_a = 228 \times 10^6$ 公里， v_{p1} 即为地球绕太阳的速度，平均为 30 公里/秒。把这些数字代入式(3.4)得出：

$$v_p = 33 \text{ 公里/秒。}$$

即要求此火箭对太阳来说具有 33 公里/秒的速度，但地球已有 30 公里/秒，故对地球来说只要沿地球运动方向再给它 3 公里/秒就够了。但是此火箭还需克服地球的引力需速度 11.2 公里/秒。所以总起来共需速度(考虑到应当是动能之和，故平方相加再开方)：

$$v = \sqrt{11.2^2 + 3^2} = 11.6 \text{ 公里/秒。}$$

这就是到火星上去的最低速度。显然采用轨道 1 时不是随时都可发射的，必须使火箭到达火星轨道时，火星正好运动到那里来相会。不然，火箭就要按行星运动再经过 259 天回到出发点。但地球公转周期为 365 天，故这时地球早已不在那里了，于是火箭就将不能回到地球，也不能达到火星，这将是一件不太妙的事情。如果考虑到行星轨道是椭圆的，当达到火星时，火星恰在近日点则航期可缩减为 237 天。

到了火星想要回地球，如仍用双切轨道的话，显然必须等待适当的时期，当地球、火星恰在某一相对位置时才能发射，据计算要等待 455 天才成，再经过 259 天回到地球，往返共需 $259 + 455 + 259 = 973$ 天，为两年另八个月。这确实是一个较长期的旅行。当火箭技术有所提高，能采用轨道乙一类的轨道时，则可使行程大为缩减。

苏联这颗人造行星轨道与火星轨道距离很近，仅为地球轨道与火星轨道距离的 $1/4$ ，可见速度已比 11.6 公里/秒相差不多。另外由它从地球到月球共需 34 小时也可由表 2 看出它的初速度必在 11.2 与 11.6 公里/秒之间。

从地球到金星上去则要更加靠近太阳，因此必须使火箭对太阳的速度小于 30 公里/秒。这只要使火箭脱离地球的引力场后，剩余的速度方向和地球公转速度的方向相反就成了。计算方法与前面的相似，就不再重复。由计算可知到金星上去如用双切轨道(火箭轨道和地球轨道及金星轨道都相切)则需初速为 11.5 公里/秒，所需时间为 146 天，要等候 470 天才能返航，再用 146 天到达地球，来回共需 $146 + 470 + 146 = 762$ 天，即两年另一个月的时间。

到达其他行星也完全类似，最节省燃料的方法都

是用双切轨道，现在把到各行星上去单程所需的时间列表如下：

表 3

目的地	水星	金星	火星	木星	土星	天王星	海王星
单程航期(天)	115	146	258	937	2,043	5,466	10,972

可见到海王星上去单程就要花上 30 年，这还是值得考虑的事情，所需的速度已接近第三宇宙速度，为 16.5 公里/秒。

以上所指的都只是到达那里所需的速度，如果想要在到达另一个星球后慢慢降落，以便不致粉身碎骨，或使火箭变成它的卫星，都需要反方向喷射，以减低速度。这时火箭必须额外携带燃料。如果打算返航当然就要携带更多的燃料了。因此有人有这样一种打算，是否可在其他星球上找到燃料，这样就可不必携带很多燃料使起飞前的重量大为减轻。

为了用起来方便，今把各行星，太阳和月亮的各种常用数据列表于下：

表 4

行星名称	离太阳平均距离(百万公里)	行星半径(公里)	质量(地球质量为单位)	表面上(以地球的重力加速度为率)(米/秒 ²)	公转周期(日)	公转速度(公里/秒)	表面上的速度(公里/秒)
水星	58	2,400	0.036	2.64	88日	48	3.5
金星	108	6,100	0.815	8.32	225日	35	10
地球	150	6,370	1	9.81	365日	30	11.2
火星	228	3,400	0.106	3.72	1年322日	24	5.0
木星	778	70,000	314	25.90	11年315日	13	60
土星	1,426	60,000	91.0	11.48	29年164日	10	35
天王星	2,869	25,000	14.4	9.02	84年86日	7	22
海王星	4,490	26,000	17.0	10.96	161年281日	5	23
冥王星	5,897	3,000	0.91	—	—	—	—

月 球

直径：3,477公里 = 0.27T¹⁾

质量： $\frac{1}{81}T = 0.012T$

离地球平均距离：384,400 公里

恒星月：27日 7时 43分 11秒

朔望月：29日 12时 44分 3秒

逃逸速度：2.34公里/秒

重力： $\frac{1}{6}g$

绕地球速度：1公里/秒

1) T 表示地球的同—数量。

太陽

直徑: 1,391,000公里 = 109T
 質量: 2×10^{33} 克 = 332,000T
 太陽表面上的重力加速度: 273米/秒²

地球

質量: 598×10^{19} 噸
 公轉平均速度: 29.77公里/秒
 赤道上一点因地球自轉而具有的速度: 465米/秒
 恆星日: 23小时56分4.1秒

(3) 恆星际航行。前面已經談到, 只要速度超过 16.7 公里/秒, 就可以跑出太阳系作恆星际航行。但是出去必然有目的地, 必然是打算到某个星球上去。可是恆星間的距离太大, 决非行星間的距离可比。距我們最近的恆星就是半人馬座的比鄰星, 距离我們为 4.2 光年, 約合 40 万亿公里。即使以 20 公里/秒的速度航行还需要 6.3 万年。这根本是不可想象的事情。而肉眼所能看到的最近的恆星则为天狼星, 距我們 8.6 光年, 合 82 万亿公里, 以 20 公里/秒的速度航行則需 12.6 万年, 因此要作恆星际航行, 还必需有更高的科学技术水平。必須能够以接近光速(30 万公里/秒)的速度航行。要达到这个速度用現代的化学推进剂火箭是根本不可能的, 用原子能火箭也不行。必須应用光子火箭或离子火箭。光子火箭的特点是使正粒子及反粒子結合变成光子噴射出去, 这样式(2.2)中的排气速度 c 就大为提高而变成光速, 因此在同样質量比下可使火箭的速度大为提高。离子火箭的特点是用电磁方法使帶电粒子加速噴射出去, 火箭的加速度非常小(可能只有重力加速度的万分之一)但加速時間非常長, 基本上整个航行期間都在加速或減速, 故火箭也可以达到很高的速度。

当火箭以接近光速的速度航行时, 出現了一个很特殊的現象, 就是時間出現了相对論效果。在宇宙飞船里的時間变得比地球上的時間要短。今以 t_0 表示固定于地球的坐标系上的時間, t 表示固定于宇宙飞船上的坐标系上的時間, 也就是說, t_0 是地球上的時間, t 則是宇宙飞船上的時間。当宇宙飞船以速度 v 运动时, 按照相对論宇宙飞船上的時間应有:

$$t = t_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2},$$

其中 c 表示光速。当 $v = 0.9c$ 时, $t = 0.44t_0$, 即地球上过去 100 天时, 飞船上只过去了 44 天, 当 $v = 0.95c$ 时, $t = 0.3t_0$, 即飞船的速度愈接近光速, 在里面的時間就过得愈慢。

这样假定有一个宇宙飞船以 $v = 0.95c$ 的均匀速度向天狼星飞去, 到那里不停留就回来, 則所需的時間在地球上看来应为(略去加速和減速所需的時間):

$$t_0 = \frac{2 \times 8.6}{0.95} = 18.1 \text{年}$$

但是星际航行者看来所用的時間則为:

$$t = t_0 (1 - 0.95^2)^{1/2} = 5.7 \text{年}$$

这虽然是一个非常奇怪的事情, 但却应当是事实。

由于苏联人造行星的发射成功, 可以說去月亮和行星航行的大門已經打开了, 在最近几年內去月球和附近几个行星的宇宙火箭即将实现, 載人的宇宙飞船也为时不远。但是恆星际的航行則要在科学技术更发展的水平上才能实现。有一点可以肯定的是, 人类征服宇宙的時間已經不远了, 終有一天人类会变成宇宙的主人。

等离子体*物理学与可控制热核反应

金 百 順

一、什么是等离子体

大家知道: 要发生热核反应, 必需有足够高的溫度。对氘——氘及氘——氚的反应來說, 这个溫度大概需要 10 亿度左右。在这样高的溫度下, 物質都变成离子和“自由”电子的集合, 同时, 宏觀的来看, 又是中性的。——这就是一般的所謂等离子体。

很明显, 为了控制热核反应就必须研究等离子体

的运动規律。

必須指出: 上述关于等离子体的定义是比較“唯象”的, 并没有揭示出它区别于其他聚集态——特别是气态——的本質特征。为了將等离子体的概念精确化, 可以將它和普通的气体相比較。

* “Plasma”以前譯作“等离子区”或“等离子气体”, 似不很妥當, 現暫譯作“等离子体”。