远程星际航行补篇

钱学森 朱毅麟
(中国空间技术研究院,北京 100094)

摘 要 通过一系列变量置换推导出不同喷气速度和不同加速度条件下,计算恒星际飞船加速段的时间和距离的普遍公式及多级火箭加速情况下加速段的时间和距离的公式。最后以天狼星作为航行目标、计算了用5级和10级火箭加速飞行的时间和距离。结果表明,当火箭的级数很多,且各级加速度相等时,其飞行时间与距离非常接近匀加速飞行的情况。

关键词 星际航行 远程星际航行 星际飞船 多级火箭 喷气速度 质量比
中图分类号:V529.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-8748(2010)01-0001-06

A Note on Interstellar Astronautics

QIAN Xuesen ZHU Yilin
(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: This paper discusses an extension of Dr. Qian's previous work on interstellar travel into the field of multi-stage rocketry. Through the transformation of variables for integration, it was found possible to present some general formulas for the time and distance of accelerating or decelerating part of the trajectory as functions of various parameters such as final speed and exhaust speed. Instead of carrying out the integration for individual values of exhaust speed, the results which are finally plotted in figures have been directly obtained from the general formulas for various practical values of exhaust speed. Numerical examples are also presented and show that a travel to Sirius, a star at a distance of 8.6 light years from the earth, by a five-stage rocket and a ten-stage rocket, both accelerating to $V=0.94c$ with exhaust speed of $0.6c$ and both at the uniform acceleration of $20\mathrm{m/s^2}$ with respect to the occupants, would require $T_a=0.994$ years and $T_a=0.894$ years respectively. The total travel time to Sirius as observed by the occupants would be 4.37 years and 4.20 years respectively.

Key words: interplanetary flight; interstellar flight; interstellar spacecraft; multi-stage rocket; exhaust speed; mass ratio

1 引言

本文是在文献[1]的基础上所作的用多级火箭进行远程星际航行的计算。与文献[1]相比,补充了两点新的内容:第一点是引进新的积分变量,导出星际飞船加速段的时间和距离的普遍公式,它对于任何喷气速度值可以直接计算;第二点是关于用多级火箭加速时,加速段的时间和距离的计算。

收稿日期:2009-11-15; **修回日期**:2009-01-12

作者简介:钱学森(1911—2009),男,中国科学院院士、中国工程院院士,中国现代物理学家、世界著名火箭专家,中国空间技术研究院首任院长,荣获"两弹一星功勋奖章"、"国家杰出贡献科学家"荣誉称号。
朱毅麟(1934—),男,研究员,国际宇航科学院院士,主要从事力学及航天系统工程研究。

2 单级火箭

关于匀加速情形，由于积分比较简单，而且已在文献[1]中讨论过，这里不再重复，只讨论等推力的情形。在推力不变的条件下，星际飞船在任一瞬时所感到的加速度 a 是一变量，可以写成飞船在该瞬时相对于地球的速度 u^0 的函数：

$$a = a_1\left(\frac{1+\frac{u^0}{c}}{1-\frac{u^0}{c}}\right)^{\frac{c}{2w}}\left(1-\frac{(u^0)^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

式中 a_1 是飞船的初始加速度；c 是光速；w 是火箭发动机的喷气速度。

2.1 加速段的时间 T_a^0

星际飞船的速度从 $u^0=0$ 加速到 $u^0=V$ 所需的飞船上的时间用 T_a 表示。由

$$\mathrm{d}t = \frac{\mathrm{d}u^0}{a\left(1-\frac{(u^0)^2}{c^2}\right)} \tag{2}$$

将式(1)代入，并积分得

$$T_a = \frac{c}{a_1}\int_0^{\frac{V}{c}}\left(\frac{1-\xi}{1+\xi}\right)^{\frac{c}{2w}}\frac{\mathrm{d}\xi}{(1-\xi^2)^{3/2}} \tag{3}$$

加速段在地球上的时间用 $T_a{}^0$ 表示。

由

$$\mathrm{d}t^0 = \frac{\mathrm{d}u^0}{a\left(1-\frac{(u^0)^2}{c^2}\right)^{3/2}} \tag{4}$$

将式(1)代入并积分得

$$T_a{}^0 = \frac{c}{a_1}\int_0^{\frac{V}{c}}\left(\frac{1-\xi}{1+\xi}\right)^{\frac{c}{2w}}\frac{\mathrm{d}\xi}{(1-\xi^2)^2} \tag{5}$$

2.2 加速段经过的距离 $x_a{}^0$

由

$$\mathrm{d}x_a^0 = u^0\mathrm{d}t^0 \tag{6}$$

并利用式(4)和式(1)，积分得

$$x_a^0 = \frac{c^2}{a_1}\int_0^{\frac{V}{c}}\left(\frac{1-\xi}{1+\xi}\right)^{\frac{c}{2w}}\frac{\xi\mathrm{d}\xi}{(1-\xi^2)^2} \tag{7}$$

令

$$v = \frac{V}{c},\quad \mu = \frac{w}{c} \tag{8}$$

并定义 $A(v)$，$B(v)$，$C(v)$为下列积分：

$$A(v) = \int_0^v\left(\frac{1-\xi}{1+\xi}\right)^{\frac{1}{2\mu}}\frac{\mathrm{d}\xi}{(1-\xi^2)^{3/2}} \tag{9}$$

$$B(v) = \int_0^v\left(\frac{1-\xi}{1+\xi}\right)^{\frac{1}{2\mu}}\frac{\mathrm{d}\xi}{(1-\xi^2)^2} \tag{10}$$

$$C(v) = \int_0^v\left(\frac{1-\xi}{1+\xi}\right)^{\frac{1}{2\mu}}\frac{\xi\mathrm{d}\xi}{(1-\xi^2)^2} \tag{11}$$

于是单级火箭星际飞船加速段的时间和距离可写成：

$$T_a = \frac{c}{a_1}A(v) \tag{12}$$

$$T_a^0 = \frac{c}{a_1}B(v) \tag{13}$$

$$x_a^0 = \frac{c^2}{a_1}C(v) \tag{14}$$

根据阿克莱公式，初始加速度 a_1 与熄火时的最大加速度具有关系式

$$\frac{a_1}{a_2} = \left(\frac{1-v}{1+v}\right)^{\frac{1}{2\mu}}(1-v^2)^{-\frac{1}{2}} \tag{15}$$

所以，T_a，T_a^0 和 $x_a{}^0$ 可化为

$$T_a = \frac{c}{a_2}\left(\frac{1+v}{1-v}\right)^{\frac{1}{2\mu}}(1-v^2)^{\frac{1}{2}}A(v) \tag{16}$$

$$T_a^0 = \frac{c}{a_2}\left(\frac{1+v}{1-v}\right)^{\frac{1}{2\mu}}(1-v^2)^{\frac{1}{2}}B(v) \tag{17}$$

$$x_a^0 = \frac{c^2}{a_2}\left(\frac{1+v}{1-v}\right)^{\frac{1}{2\mu}}(1-v^2)^{\frac{1}{2}}C(v) \tag{18}$$

3 $A(v)$，$B(v)$，$C(v)$的计算

引进变量置换，可使 $A(v)$，$B(v)$，$C(v)$对任何实数 μ 积分出来。令

$$\eta = \frac{1}{2\mu}\ln\frac{1+\xi}{1-\xi} \tag{19}$$

则

$$\left(\frac{1-\xi}{1+\xi}\right)^{\frac{1}{2\mu}} = e^{-\eta}$$

$$1-\xi^2 = \frac{1}{\cosh^2(\mu\eta)} \tag{20}$$

$$\mathrm{d}\xi = \frac{\mu}{\cosh^2(\mu\eta)}\mathrm{d}\eta$$

代入式(9)、(10)、(11)积分得

$$\begin{aligned}A(v) &= \frac{\mu}{2}\int_0^{\frac{1}{2\mu}\ln\frac{1+v}{1-v}}\left[\mathrm{e}^{-(1-\mu)\eta}+e^{-(1+\mu)\eta}\right]\mathrm{d}\eta \\ &= \frac{\mu}{1-\mu^2}\left[1-\left(\frac{1-v}{1+v}\right)^{\frac{1}{2\mu}}\frac{1+\mu v}{\sqrt{1-v^2}}\right]\end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}B(v) &= \frac{\mu}{4}\int_0^{\frac{1}{2\mu}\ln\frac{1+v}{1-v}}\left[\mathrm{e}^{-(1-2\mu)\eta}+2e^{-\eta}+e^{-(1+2\mu)\eta}\right]\mathrm{d}\eta \\ &= \frac{\mu}{2}\left\{1+\frac{1}{1-4\mu^2}-\left(\frac{1-v}{1+v}\right)^{\frac{1}{2\mu}}\times\right. \\ &\qquad \left.\left[1+\frac{(1+v^2+4\mu v)}{(1-4\mu^2)(1-v^2)}\right]\right\}\end{aligned} \tag{22}$$

$$C(v)=\frac{\mu}{4}\int_0^{\frac{1}{2\mu}\ln\frac{1+v}{1-v}}\left[e^{-(1-2\mu)\eta}-e^{-(1+2\mu)\eta}\right]\mathrm{d}\eta$$
$$=\frac{\mu^2}{1-4\mu^2}\left[1-\left(\frac{1-v}{1+v}\right)^{\frac{1}{2\mu}}\left(\frac{v/\mu+1+v^2}{1-v^2}\right)\right] \tag{23}$$

这样就得到包含任意 $\mu=\dfrac{w}{c}$ 值的普遍公式。对任何有实际意义的 μ 值都可用上述公式计算，而在文献[1]中只有在 μ 值等于某些特定的值时，才能进行分部积分。不过，下面的情形例外：

当 $\mu=1$ 时，式(21)不能用，应由式(9)直接积分得

$$A(v;1)=\int_0^v\frac{\mathrm{d}\xi}{(1+\xi)^2(1-\xi)}$$
$$=\frac{1}{2}\left[\left(1-\frac{1}{1+v}\right)+\frac{1}{2}\ln\frac{1+v}{1-v}\right] \tag{24}$$

当 $\mu=\dfrac{1}{2}$ 时，(22)、(23)两式不能用，直接由(10)、(11)两式积分得

$$B\left(v;\frac{1}{2}\right)=\int_0^v\frac{\mathrm{d}\xi}{(1+\xi)^3(1-\xi)}$$
$$=\frac{1}{4}\left[\frac{v(3+2v)}{(1+v)^2}+\frac{1}{2}\ln\left(\frac{1+v}{1-v}\right)\right] \tag{25}$$

$$C\left(v;\frac{1}{2}\right)=\int_0^v\frac{\xi\,\mathrm{d}\xi}{(1+\xi)^3(1-\xi)}$$
$$=\frac{1}{4}\left[\frac{1}{2}\ln\frac{1+v}{1-v}-\frac{v}{(1+v)^2}\right] \tag{26}$$

将上述的结果绘制成曲线如图 1～图 3 所示。

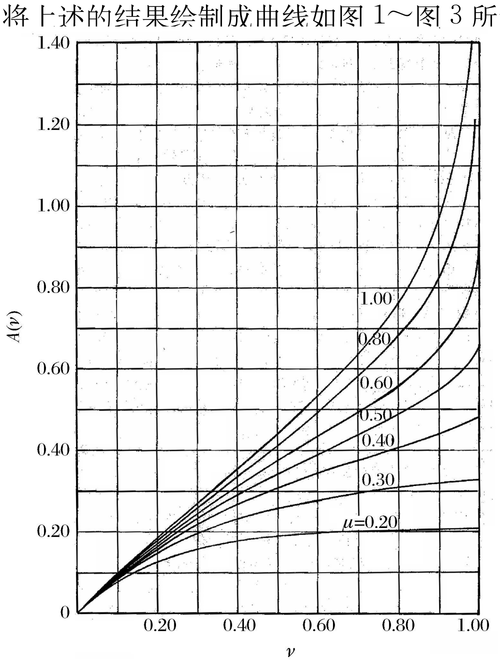

图 1　不同 μ 情况下 $A(v)$ 与 v 的关系曲线

Fig. 1　$A(v)$ vs. v with various μ

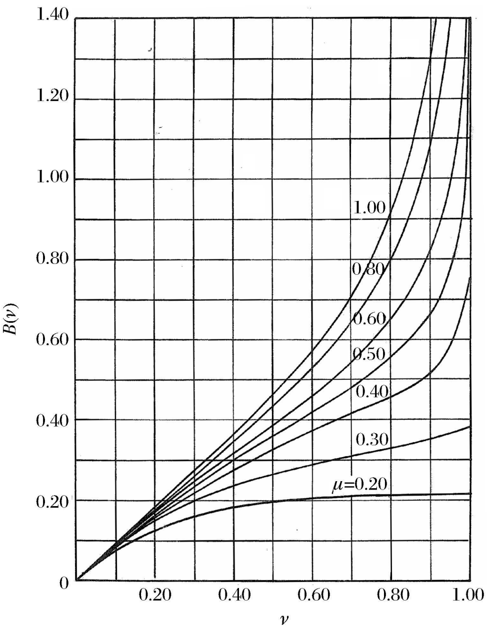

图 2　不同 μ 情况下 $B(v)$ 与 v 的关系曲线

Fig. 2　$B(v)$ vs. v with various μ

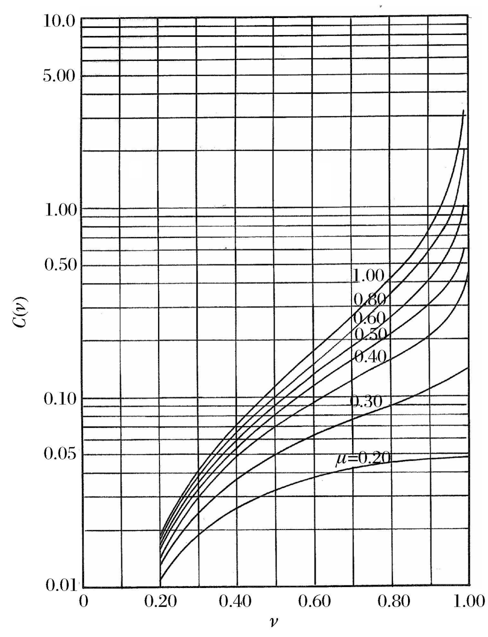

图 3　不同 μ 情况下 $C(v)$ 与 v 的关系曲线

Fig. 3　$C(v)$ vs. v with various μ

4　多级火箭

4.1　多级火箭的质量比和速度

令 $(M_1^0)_i$ 表示第 i 级火箭点火时多级火箭的静质量；$(M_2^0)_i$ 表示第 i 级火箭熄火时多级火箭的静质量。设用 n 级火箭来加速星际飞船，$i=1,2,\cdots,$

n。

第一级火箭加速段静质量比为

$$\varepsilon_1=\frac{(M_1^0)_1}{(M_2^0)_1} \tag{27a}$$

第二级火箭加速段静质量比为

$$\varepsilon_2=\frac{(M_1^0)_2}{(M_2^0)_2} \tag{27b}$$

依此类推，第 i 级火箭加速段静质量比为

$$\varepsilon_i=\frac{(M_1^0)_i}{(M_2^0)_i} \tag{27c}$$

设多级火箭的起始速度 v_0 等于零。各级火箭熄火时，飞船所达到的速度(速度绝对值，不是 ΔV)分别用 $V_1, V_2, \cdots, V_n$ 表示，根据阿克莱公式得到该级质量比与该级初、末速度之间的关系：

$$\varepsilon_i=\frac{(M_1^0)_i}{(M_2^0)_i}=\left(\frac{1-\frac{V_{i-1}}{c}}{1+\frac{V_{i-1}}{c}}\cdot\frac{1+\frac{V_i}{c}}{1-\frac{V_i}{c}}\right)^{\frac{c}{2w}} \tag{28}$$

由此，可得

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_1&=\left(\frac{1+v_1}{1-v_1}\right)^{\frac{1}{2\mu}}\\ \varepsilon_1\varepsilon_2&=\left(\frac{1+v_2}{1-v_2}\right)^{\frac{1}{2\mu}}\\ &\cdots\cdots\\ \varepsilon_1\varepsilon_2\cdots\varepsilon_i&=\left(\frac{1+v_i}{1-v_i}\right)^{\frac{1}{2\mu}}\\ &\cdots\cdots\\ \varepsilon_1\varepsilon_2\cdots\varepsilon_n&=\left(\frac{1+v_n}{1-v_n}\right)^{\frac{1}{2\mu}}\end{aligned}\right\} \tag{29}$$

即

$$v_i=\frac{V_i}{c}=\frac{(\varepsilon_1\varepsilon_2\ldots\varepsilon_i)^{2\mu}-1}{(\varepsilon_1\varepsilon_2\ldots\varepsilon_i)^{2\mu}+1}$$

在各级质量比均相等的情形下，即

$$\varepsilon_1=\varepsilon_2=\cdots=\varepsilon_n=\varepsilon \tag{30}$$

要求达到的最后速度为 V_n 时，多级火箭每一级必需达到的质量比为

$$\varepsilon=\left(\frac{1+v_n}{1-v_n}\right)^{\frac{1}{2n\mu}} \tag{31}$$

利用式(28)和式(29)，可求得各级质量比相同情况下，各级熄火时达到的速度为

$$v_i=\frac{V_i}{c}=\frac{\left(\frac{1+v_n}{1-v_n}\right)^{\frac{i}{n}}-1}{\left(\frac{1+v_n}{1-v_n}\right)^{\frac{i}{n}}+1} \tag{32}$$

或

$$v_i=\frac{\varepsilon^{2i\mu}-1}{\varepsilon^{2i\mu}+1} \tag{33}$$

$$(i=1,2,\cdots,n)$$

4.2 多级火箭加速段的时间和距离

以第 i 级加速段为例，设 $(a)_i$ 是第 i 级加速段的瞬时加速度；$(a_1)_i$ 是该段的初始加速度；$(a_2)_i$ 是该段终了时的最大加速度。

根据式(28)有

$$\frac{(a)_i}{(a_2)_i}=\frac{(M_2)_i}{(M)_i}=\frac{(M_2^0)_i}{(M^0)_i}\left(\frac{1-\frac{V_i^2}{c}}{1-\frac{(u^0)^2}{c}}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$=\left(\frac{1-\frac{u^0}{c}}{1+\frac{u^0}{c}}\,\frac{1+\frac{V_i}{c}}{1-\frac{V_i}{c}}\right)^{-\frac{1}{2\mu}}\left(\frac{1-\frac{V_i^2}{c}}{1-\frac{(u^0)^2}{c}}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\therefore\quad (a)_i=(a_2)_i\left(\frac{1+v_i}{1-v_i}\right)^{-\frac{1}{2\mu}}(1-v_i^2)^{-\frac{1}{2}}\times\left(\frac{1-\xi}{1+\xi}\right)^{-\frac{1}{2\mu}}(1-\xi^2)^{\frac{1}{2}} \tag{34}$$

将式(34)代入式(2)得

$$\mathrm{d}t=\frac{c}{(a_2)_i}\left(\frac{1+v_i}{1-v_i}\right)^{-\frac{1}{2\mu}}(1-v_i^2)^{\frac{1}{2}}\times\left(\frac{1-\xi}{1+\xi}\right)^{\frac{1}{2\mu}}(1-\xi^2)^{-3/2}\mathrm{d}\xi$$

$$=\frac{c}{(a_2)_i}\varepsilon_i\varepsilon_2\cdots\cdots\varepsilon_i(1-v_i^2)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{1-\xi}{1+\xi}\right)^{\frac{1}{2\xi}}\times\frac{1}{(1-\xi^2)^{3/2}}\mathrm{d}\xi$$

对 ξ 从 v_{i-1} 积分到 v_i 得到第 i 级加速段在星际飞船上的时间：

$$(T_a)_i=\int_{v_{i-1}}^{v_i}\mathrm{d}t=\frac{c}{(a_2)_i}\varepsilon_1\varepsilon_2\cdots\varepsilon_i(1-v_i^2)^{\frac{1}{2}}\times\int_{v_{i-1}}^{v_i}\left(\frac{1-\xi}{1+\xi}\right)^{\frac{1}{2\mu}}\frac{\mathrm{d}\xi}{(1-\xi^2)^{3/2}}$$

$$=\frac{c}{(a_2)_i}\varepsilon_1\varepsilon_2\cdots\varepsilon_i(1-v_i^2)^{\frac{1}{2}}\times[\mathrm{A}(\mathrm{v}_i)-A(v_{i-1})] \tag{35}$$

所以，n 级总加速时间为

$$T_a=\sum_{i=1}^{n}(T_a)_i$$

$$=\sum_{i=1}^{n}\frac{c}{(a_2)_i}\varepsilon_1\varepsilon_2\cdots\varepsilon_n(1-v_i^2)^{\frac{1}{2}}\times[\mathrm{A}(\mathrm{v}_i)-A(v_{i-1})] \tag{36}$$

第 i 级加速段在地球上的时间 $(T_a^0)_i$，利用式(4)及式(34)，从 v_{i-1} 积到 v_i 得

$$(T_a^0)_i = \frac{c}{(\alpha)_i}\varepsilon_1\varepsilon_2\cdots\varepsilon_i(1-v_i^2)^{\frac{1}{2}}\times [B(v_i)-B(v_{i-1})] \tag{37}$$

所以，n 级总加速时间(地球上的时间)为

$$T_a^0 = \sum_{i=1}^{n}(T_a^0)_i = \sum_{i=1}^{n}\frac{c}{(\alpha)_i}\varepsilon_1\varepsilon_2\cdots\varepsilon_i(1-v_i{}^2)^{\frac{1}{2}}\times [B(v_i)-B(v_{i-1})] \tag{38}$$

第 i 级加速段的距离 $(x_a^0)_i$，利用式(6)从 v_{i-1} 积到 v_i 得

$$(x_a^0)_i = \frac{c^2}{(\alpha)_i}\varepsilon_1\varepsilon_2\cdots\varepsilon_i(1-v_i^2)^{\frac{1}{2}}\times [C(v_i)-C(v_{i-1})] \tag{39}$$

所以，n 级总加速距离为

$$x_a^0 = \sum_{i=1}^{n}(x_a^0)_i = \sum_{i=1}^{n}\frac{c^2}{(\alpha)_i}\varepsilon_1\varepsilon_2\cdots\varepsilon_i(1-v_i^2)^{\frac{1}{2}}\times [C(v_i)-C(v_{i-1})] \tag{40}$$

当各级质量比相同，且各级的最大加速度也都相同时，即

$$\varepsilon_1=\varepsilon_2=\cdots=\varepsilon_n=\varepsilon \tag{41}$$

及

$$(\alpha)_1=(\alpha)_2=\cdots=(\alpha)_n=\alpha \tag{42}$$

则得

$$T_a = \frac{c}{\alpha}\sum_{i=1}^{n}\varepsilon^i(1-v_i^2)^{\frac{1}{2}}[A(v_i)-A(v_{i-1})] \tag{43}$$

$$T_a^0 = \frac{c}{\alpha}\sum_{i=1}^{n}\varepsilon^i(1-v_i^2)^{\frac{1}{2}}[B(v_i)-B(v_{i-1})] \tag{44}$$

$$x_a^0 = \frac{c^2}{\alpha}\sum_{i=1}^{n}\varepsilon^i(1-v_i^2)^{\frac{1}{2}}[C(v_i)-C(v_{i-1})] \tag{45}$$

4.3　举例

同文献[1]中所举的例子一样，仍以天狼星作为星际飞船的航行目标。天狼星距离地球 8.6 光年，喷气速度仍假设为 $\mu=\frac{w}{c}=0.6$，要求达到的最大速度为 $v=\frac{V}{c}=0.94$。下面分别用 5 级火箭和 10 级火箭来计算。

第一种情况：用 5 级火箭。设各级质量比相同，最大加速度也相同，取 $\alpha=20\mathrm{m/s^2}$。计算结果为：$\varepsilon^5=18.1$，即每一级质量比应取 1.785。这个要求对于多级火箭来说是很容易做到的。

星际飞船里的总加速时间为 $T_a=0.994$ 年

地球上的总加速时间为 $T_a^0=1.57$ 年

加速段距离为 $\frac{x_a^0}{c}=1.017$ 光年

故匀速飞行段距离应为 $\frac{x_u^0}{c}=8.6-2\times1.017=6.57$ 光年

地球上的匀速段时间为 $T_u^0=\frac{6.57}{0.94}=6.99$ 年

星际飞船里的匀速段时间为 $T_u=\frac{6.57}{0.94}\times\sqrt{1-(0.94)^2}=2.38$ 年

故星际飞船里的总飞行时间为

$T=2T_a+T_u=4.37$ 年

地球上的总飞行时间为

$T^0=2T_a^0+T_u^0=10.13$ 年

第二种情况：用 10 级火箭，条件与 5 级相同。

计算结果：为达到 0.94 倍光速，每一级的质量比 ε 只要 1.34 即可。

星际飞船里的总加速时间为 $T_a=0.894$ 年

地球上的总加速时间为 $T_a^0=1.46$ 年

加速段距离为 $\frac{x_a^0}{c}=0.975$ 光年

故匀速飞行段距离为 $\frac{x_u^0}{c}=8.6-2(0.975)=6.65$ 光年

地球上的匀速段时间为 $T_u^0=\frac{6.65}{0.94}=7.07$ 年

星际飞船里的匀速段时间为 $T_u=7.07\times\sqrt{1-(0.94)^2}=2.41$ 年

故星际飞船里的总飞行时间为 $T=2T_a+T_u=4.20$ 年

地球上的总飞行时间为 $T=2T_a^0+T_u^0=9.99$ 年

表 1 列出了用 5 级火箭和 10 级火箭两种情况的比较。

表 1　两种情况的比较

Table 1　Comparison between the two cases

单位：年

级数 / 总飞行时间	5 级	10 级	匀加速*
T	4.37	4.20	4.11
T^0	10.13	9.99	9.82

*　匀加速火箭的数据摘自文献[1]

由表 1 可看出，当级数越多时，其结果越接近于匀加速的情形，而匀加速的计算是非常简单的，而且在最大加速度相同的条件下，以最大的加速度做匀加速飞行所需的时间显然是最少的。因此，可以认为，当星际飞船要求达到的最大速度很高(例如 $v \geqslant 0.94$)，必需用级数很多的多级火箭时，完全可以近似地认为它是匀加速飞行。

参考文献 (References)

[1] 钱学森. 远程星际航行[J]. 力学学报，1957，(4)：351

后记

本文是在钱学森先生的指导下与钱先生合作，于 1964 年 7 月完成的。其中理论推导部分主要是钱先生的贡献，我做了整理分析和大量手工计算(当时科研单位都还没有电子计算机)。文稿送先生审定时，先生来信说，虽然这稿子已到了可以发表的水平，“但是我想这样做的实际意义不太大。……今代科学工作者的任务是像 Циолковский 那样，在技术实现宇宙航行之前，提出宇宙航行的技术途径。”

后因单位迁京、“文化大革命”和下放劳动等种种原因，研究中断。再后来，由于电子计算机的迅速发展，用数值法求解复杂的积分已变得容易，本文所做的通过一系列变量置换求分析解的方法的实用优点已不突出，所以一直未考虑发表，但其理论分析及结果在今后至少 50 年内仍有指导意义。本文及先生的来信体现了先生深远邃密的学术思想和严谨求实的治学态度，值得我们认真学习仿效。为此，特将本文及先生的来信发表，以表示对先生的深切怀念。

(朱毅麟)

附：钱学森先生 1964 年 8 月 8 日的来信

朱毅麟同志：

“远程星际航行补篇”及来信收读。您的多级火箭计算结果与预料的情况相符合，可见分析和计算是正确的。如果文章的目的是提出一个比我以前文章更一般(不限 w/c 值)的公式和多级火箭的计算结果，那到了可以把这篇稿子发表了；但是我想这样做实际意义不太大。我们应该考虑到：现阶段的科学技术对解决行星际间的航行已十分肯定，技术途径也十分清楚。问题是对太阳系以外的宇宙航行还没有个技术途径，今代科学工作者的任务是象 Циолковский 那样，在技术实现宇宙航行之前，提出宇宙航行的技术途径。我想现在已知的最高能燃料是氢、氘、氚的聚变，这样我们能够取得的 w/c 约为 0.05，因此您如果能够一个最后能达到 $V/c \cong 0.94$，而 $w/c \sim 0.05$ 的多级火箭就更有意义。每级的 ν_i 如何取？我觉得预计到材料及工艺上的发展，$\nu_i \sim 100$ (即 70，100，150，200)应该是允许的。这样看看须要多少级；可能也不过是十级。如果是这样，那么宇宙航行就算有个实现的途径，今后工作就在于通过大量科学技术工作来实现它。

您看如何？稿子也可以按这个意思加以充实。

此致

敬礼

钱学森

1964.8.8

原稿先附还。

(编辑：张小琳)