

# 飞船发射窗口计算

颜 华 李革非

(北京航天飞行控制中心)

**摘要** 根据飞船在轨运行中电源、热控、GNC 和应用等分系统的约束条件,介绍飞船综合发射窗口的计算方法。

**关键词** 飞船 发射窗口 升轨发射 降轨发射

## 1 前言

根据空间应用和飞行任务的要求,在航天器飞行轨道设计完成后,实施飞行任务的首要工作就是制定发射窗口,即确定发射日期、时刻及其时间区间。航天器轨道的高度、椭圆度和倾角与发射时刻无关,但轨道平面在空间的方位不仅与发射方位角有关,还决定于航天器脱离地球表面的时刻。通常,航天器飞行任务都对发射窗口有特定要求,这些要求对应某个发射时刻或允许一定的发射时刻区间。对于从地球发射的航天器,限制发射窗口的因素有两类:与太阳方向有关的称为太阳窗口,与空间卫星组网有关的称为平面窗口和相位窗口。

载人飞船的发射窗口是确定完成飞船飞行任务所允许的发射时间。飞船各系统对太阳方向的约束要求决定了飞船发射窗口的技术要求,因此,飞船发射窗口设计应综合和分析飞船各系统对发射窗口的技术要求,集中这些要求的相容性,从而得到综合发射窗口。

载人飞船发射窗口的规划约束条件是由载人航天任务型号部门明确的。要求实现的发射窗口规划是在给定的人轨参数条件下,考虑飞船能源分系统、热控分系统、GNC 分系统、应用分系统对发射窗口的约束条件,完成给定年度内可能的发射窗口计算。

飞船发射窗口规划设计原则是:

- (1) 保障飞船能源的正常供应要求;
- (2) 满足热控对飞船受晒的要求;
- (3) 满足飞船测量设备的光照要求;
- (4) 满足飞船应用系统的要求。

本文以对载人飞船发射窗口计算复核为背景,介绍载人飞船发射窗口的软件实现方法,并给出初步的计算结果。

## 2 基本概念

### 2.1 升轨发射与降轨发射

利用运载火箭将飞船送入预定轨道,运载火箭的轨道在发射过程中不进行横向机动,轨道平面在空间的方位直接取决于发射场 L 的地心纬度  $\varphi$ 、发射方位角 A 和发射时刻  $t_L$ 。

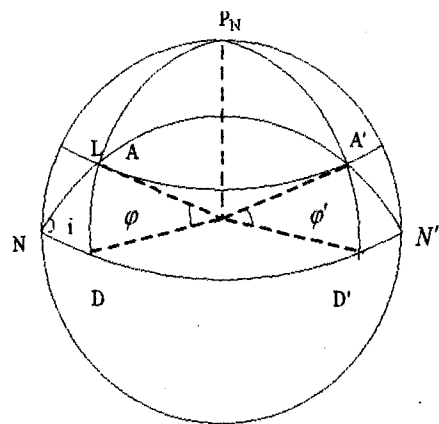


图 1 升轨发射与降轨发射

描述轨道平面方位的要素是轨道倾角  $i$  和升交点  $\Omega$ , 参见图 1。发射方位角 A 定义为发射点指北方向与运载火箭速度水平方向的顺时针角。有两种发射方式:一种是以方位角 A 进行升轨发射,在球面上的位置 1; 另一种是经过半天当发射场转到球面位置 2,以方位角  $A'=180^\circ-A$  进行降轨发射。两种方式获得同一轨道。轨道倾角和发射方位角的关系是:

$$\cos i = \sin A \cos \varphi \quad (1)$$

根据基本球面三角关系,为使给定的轨道倾角发射方位有双解,  $A < 90^\circ$  和  $A > 90^\circ$ , 即升轨发射和降轨发射。显然,轨道倾角一定不会小于发射点的地心纬度  $\varphi$ 。为实现给定的轨道升交点经度  $\Omega$ , 由球面几

何可得,发射时刻的发射场恒星时角应设定为:

$$a_t = \Omega + \Omega_D \text{ (升轨发射)}$$

$$a_t = \Omega + \Omega_D + 180^\circ \text{ (降轨发射)} \quad (2)$$

式中,  $\Omega_D$  为球面赤道上发射时发射场子午线的节点 D 相对轨道节点 N(升交)或 N'(降交)之间的夹角,向东为正,向西为负。

$$\Omega_D = \pm \arcsin\left(\frac{\tan\varphi}{\tan i}\right) \quad (3)$$

对于升轨发射,取正号,例如  $i < 90^\circ$ , 则  $\Omega_D > 0$ , 发射场子午线节点 D 位于升交点 N 的右侧。对于降轨发射,取负号。

### 2.2 轨道日照角 $\eta$

考察图 2: O 为地心, N 为北天极, H 是太阳, V 是春分点, B 是轨道升交点, OQ 是轨道法线,  $\varepsilon$  是黄赤交角,  $\Lambda$  是太阳黄经,  $\alpha_h$  是太阳赤经,  $\delta_h$  是太阳赤纬,  $\Omega$  是升交点赤经,  $i$  是轨道倾角。

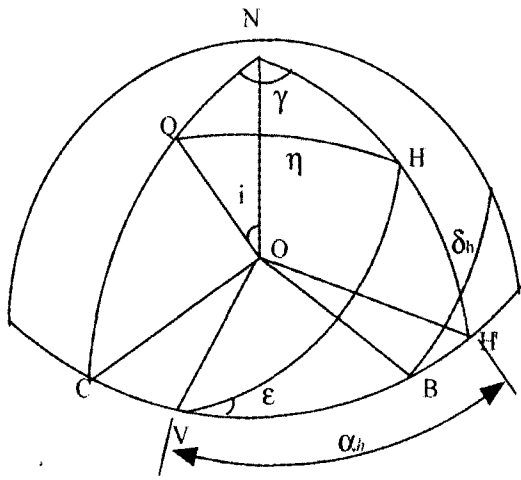


图 2 太阳日照角的确定

对于球面三角形 QNH, 建立方程式:

$$\cos\eta = \cos i \sin\delta_h - \sin i \cos\delta_h \sin(\alpha_h - \Omega) \quad (4)$$

### 2.3 航天器轨道的日照因子

在一个轨道运行周期 T 内, 航天器受到太阳照射的时间为  $T_s$ 。把  $T_s$  与 T 之比称为日照因子  $k_s = \frac{T_s}{T}$ 。

设地球半径为 R, 轨道高度 h,  $r = R + h$ ,  $\eta$  为轨道平面的法线与地日连线之间的角度。当  $\eta = \pi/2$  时, 半遮蔽角  $\alpha_0$  为:  $\cos\alpha_0 = \frac{\sqrt{2Rh+h^2}}{R+h}$ 。

日照因子:

$$k_s = 1 - k_c = \frac{1}{2} + \frac{\arcsin(\cos\alpha_0/\sin\eta)}{\pi} \quad (5)$$

## 3 发射窗口规划约束条件

### 3.1 电源分系统约束条件

为了保证太阳能电池帆板正常发电, 提供飞船各仪器设备充足的电源, 要求飞船在自主运行期间, 太阳矢量与轨道面的夹角不大于  $20^\circ$ 。

### 3.2 GNC 分系统约束条件

飞船轨道坐标系  $Ox_0y_0z_0$  定义为: 原点 O 为飞船质心,  $Oz_0$  指向地心,  $Oy_0$  沿轨道平面的负法线方向,  $Ox_0$  与  $Oy_0$  及  $Oz_0$  成右手系。太阳地心单位矢量在轨道坐标系中的投影为:  $(S_{0x}, S_{0y}, S_{0z})^T$ 。

#### (1) 红外地球敏感器对太阳矢量的要求

在整个飞行过程的阳照区, 为保证红外地球敏感器的测量, 要求太阳矢量不进入红外地球敏感器的视场以及太阳保护现场。对太阳矢量的要求为:

$$\arccos(S_{0y}) \geq 70^\circ \text{ 或者 } \arccos(S_{0y}) \leq 40^\circ$$

$$\arccos(S_{0y}) \geq 140^\circ \text{ 或者 } \arccos(S_{0y}) \leq 110^\circ$$

#### (2) 数字太阳敏感器对太阳矢量的要求

为保证数字太阳敏感器有效地测量太阳矢量, 在整个飞行过程中, 要求:

$$145^\circ \geq \arccos(S_{0y}) \geq 35^\circ$$

#### (3) 模拟太阳敏感器对太阳矢量的要求

为保证帆板上模拟太阳敏感器有效地测量太阳矢量, 从而保证太阳帆板能够正确跟踪太阳, 在整个飞行过程中, 要求:  $130^\circ \geq \arccos(S_{0y}) \geq 50^\circ$ 。

(4) 综合以上 3 点要求, 当满足  $70^\circ \leq \arccos(S_{0y}) \leq 110^\circ$  时, 所求得的时间集合构成了 GNC 分系统约束下的发射窗口。

### 3.3 热控分系统约束条件

热控分系统的约束条件为: 飞船在自主飞行期间, 要求受晒因子  $0.58 \leq t_s \leq 0.63$ 。

当  $R=6378.140\text{km}$ ,  $H=344\text{km}$ ,  $t_{\min}=0.58$  时,

$$\frac{\sqrt{2Rh+h^2}}{(R+h)\sin[\pi(t_{\min}-1/2)]} = 1.2699$$

因此约束条件为单边松约束, 即  $t_{\max}=0.63$  时对应的日照角  $\eta$  约束。

### 3.4 应用分系统约束条件

在飞船在轨应用期间, 要求太阳矢量与轨道平面的夹角满足:  $|\beta| \leq 23^\circ$ 。

### 4 发射窗口计算结果

根据神舟飞船轨道模拟计算的发射窗口,见图 3~图 7。

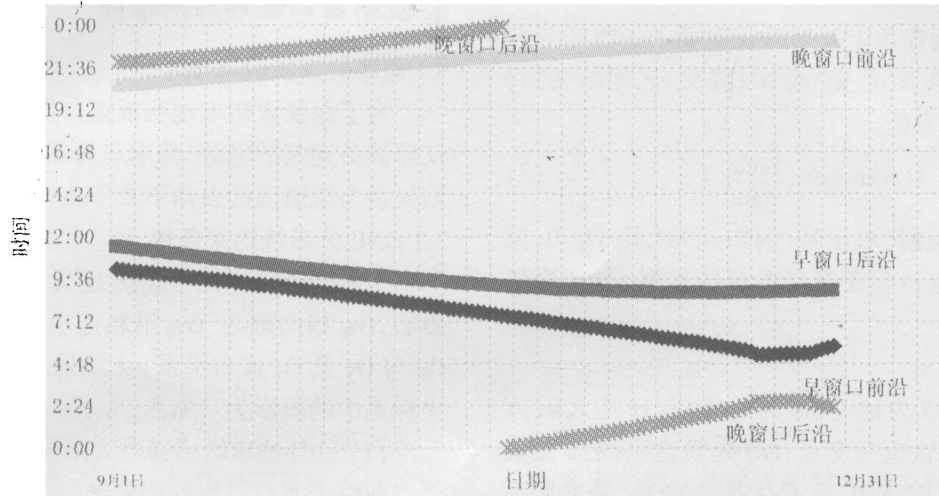


图 3 电源分系统发射窗口

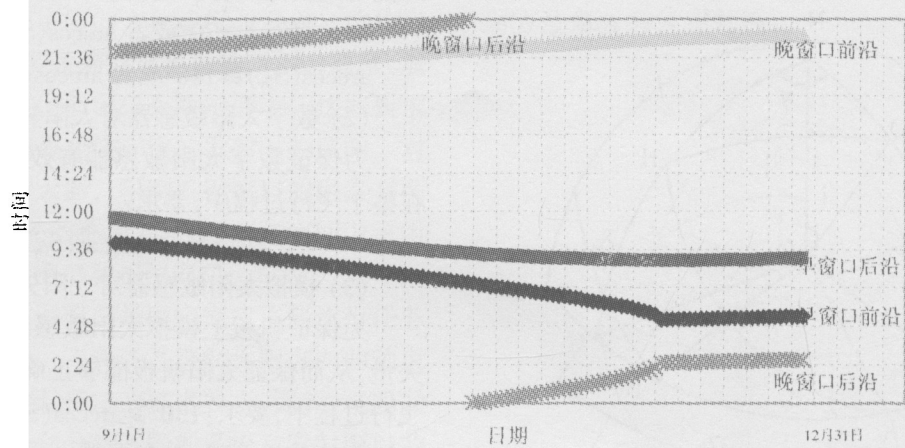


图 4 GNC 分系统发射窗口

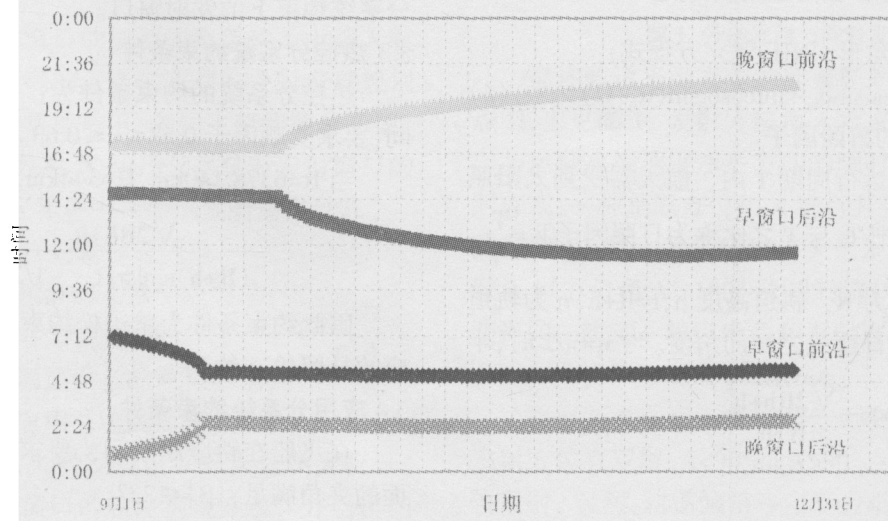


图 5 热控分系统发射窗口

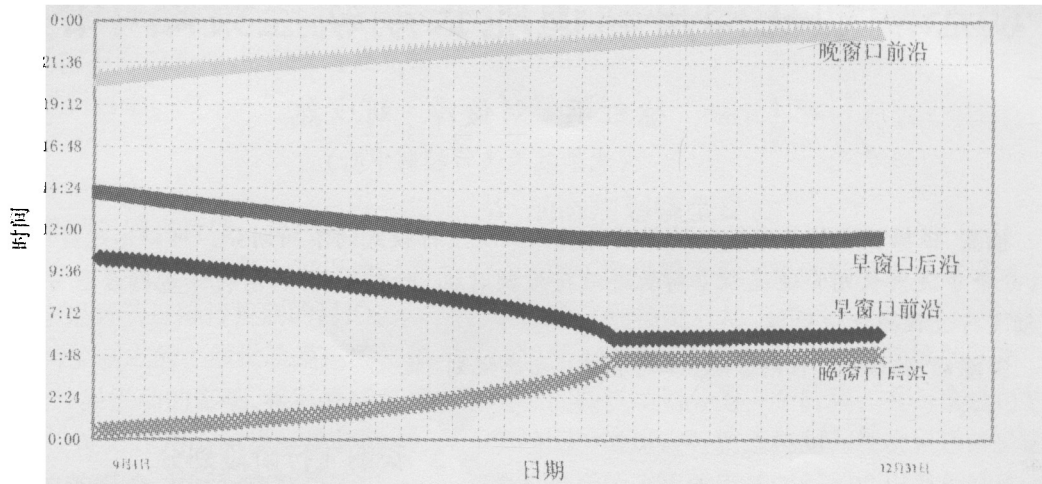


图 6 应用分系统发射窗口

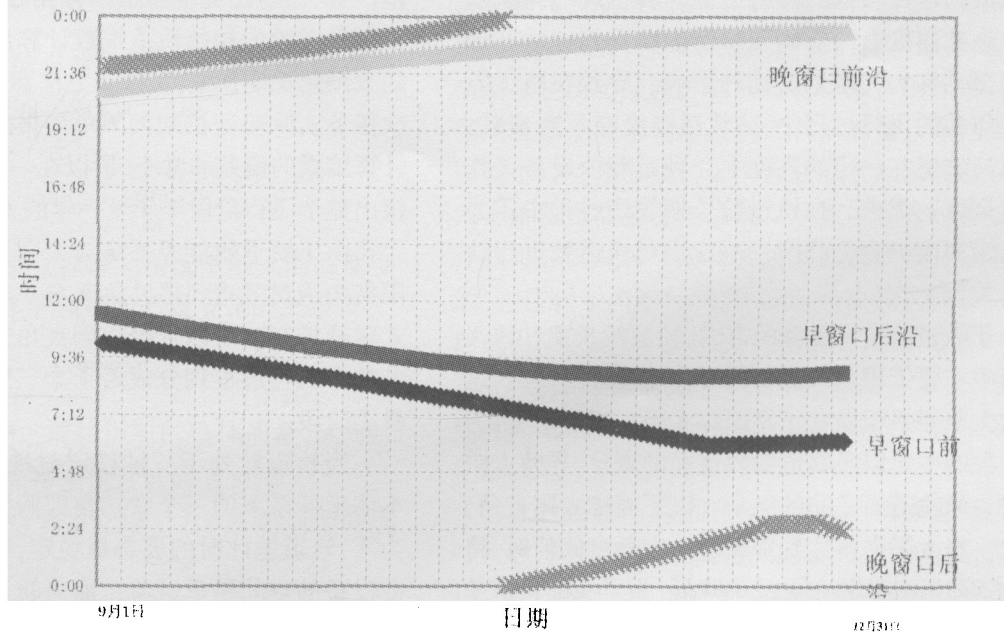


图 7 综合发射窗口

### 5 结论

通过对上述计算结果进行分析，一天当中满足要求的发射窗口有两个：早窗口和晚窗口；约束窗口后沿的主要约束条件是电源及 GNC 分系统的要求，应用系统的要求只影响早窗口的前沿；综合飞船电源分系统、热控分系统、GNC 分系统以及在轨应用

系统对发射窗口的要求，得到的综合发射窗口与窗口范围最小的电源和 GNC 分系统发射窗口接近。◇

#### 参考文献

- [1]肖业伦. 航天器飞行动力学原理,北京,宇航出版社,1995
- [2]SZ-5 神舟五号飞船发射窗口,内部,2003 年 4 月
- [3]神舟 5 号设计轨道的复核评价报告,内部,2003 年 5 月