

用卫星图片推测卫星轨道参数和轨道预报

雷用武

(贵州省气象台)

一般气象卫星接收站，在没有卫星轨道报和不知道轨道参数的情况下，精确地预报卫星的空间位置或推测卫星轨道的准确参数，是关系到能否进行正常接收的一项重要工作。这里介绍一下适合我们条件的用卫星图片推测卫星轨道参数的方法。

一、用卫星图片推测轨道参数的原理

随着科学技术的发展，人造卫星已成为有源星体，人造卫星探测资料的发送源从不连续到连续发送图片。人造卫星在空间的位置，投影在它的星下点的地球表面上，卫星图片的中线就是卫星的星下点（姿态稳定）的轨迹。气象卫星的探测仪器（即辐射扫描仪），是利用它的辐射感应元件一条线一条线的直接进行辐射感应的，扫描线利用卫星的前进而向前移动，用扫描线构成图象。卫星探测仪扫描的同时，就向地面发送。探测仪器扫描是和轨道路径相垂直的，这些扫描线之间是衔接的，所以构成清晰的图象，图象的中线就是轨道轨迹线。地面的接收设备也是把扫描线还原成图象。卫星探测仪器的扫描速度和地面接收设备的扫描速度的同步误差为 10^{-6} 。用卫星上探测仪器的一条扫描线的时间、地理位置和扫描线的条数，就能准确地计量卫星在轨道上运行的状况。所以，用卫星图片来推测卫星轨道交点周期，既准确又方便。卫星图片中线（星下点）的地理位置的变化，就是卫星轨道平面进动和地球自转及地球绕太阳公转引起轨道平

面变化的综合反映。卫星图片中线各处的地理位置与经线的交角和轨道倾角有关。所以，通过卫星图片能直接推测出轨道交点周期、轨道倾角、卫星过交点的经度和轨道平面进动值。

用卫星图片来推测轨道参数，需要一个先决条件，即图片要具有一定的分辨率，主要地形的边界要清晰可辨（流星号和泰罗斯N号都具备）。

二、具体测定和计算轨道参数

1. 测定卫星轨道的交点周期和周期变化率

卫星轨道的交点周期需要准确到秒以下。具体测法：在每天收到的卫星图片中线上，找一个清晰地形的边界，用放大镜从图片的开始或结束的扫描线计算到这个清晰的地形边界的扫描线条数n，乘以每条扫描线的时间 t_0 （机器扫描线时间已知），就是从图片的开始或结束时间到这个地形边界的时间差 $T_s = nt_0$ 。图片的开始或结束的时间是我们记录下来的时间 T_0 ，卫星星下点通过这个地形边界的时间 $T_{x_1} = T_0 \pm T_s$ 。用同样的方法计算卫星的星下点第二次通过这个地形边界的时间 T_{x_2} ，用 $T_{x_2} - T_{x_1}$ 间的轨道线条数M去除，就得出卫星轨道交点的周期。对于星下点在24小时内偏移该地形边界不大的卫星，可用两天的轨道来计算，但有一定的误差。例如第一次测得的时间是15时37分10.5秒，第二次测得的时间是15时38分50.5秒，两次相差24时1分40秒，轨道14条，周期

$$T = \frac{T_{x_2} - T_{x_1}}{M} = \frac{39^h 38^m 50.5^s - 15^h 37^m 10.5^s}{14} \\ = 1^h 42^m 58.5^s \dots \dots \dots \quad (1)$$

注意问题：测量时最好用两次星下点是通过同一个标准地形边界，并且离图片信标距离相同，以消除轨道倾角引起的误差。记时要准确，测量时可能引起误差0.5条扫描线，因扫描线之间有部分是重叠的。但周期误差才0.017—0.008秒(120、240转)，如果轨道条数多误差更小。相隔一段时间再测量参数，就得出周期变化率。

2. 卫星的高度 h

根据天体力学开普勒第三定律：各行星绕月运动的周期的平方与轨道长半轴的立方成正比。即

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{\mu} (R + h)^3 \dots \dots \dots \quad (2)$$

开普勒常数 $\mu = 398,613.52 \text{ km}^3/\text{sec}^2$ 。R 为地球赤道平均半径，我国取 R = 6378.245km；国际上 R = 6378.160km。气象卫星为近圆形轨道，偏心率 e 很小，h 就是卫星高度的第一近似值。

3. 求轨道平面进动 Ω 值和两条轨道间的截距 I

轨道平面进动 Ω 值是重要的轨道因素，特别是轨道预报必须知道 Ω 。卫星在什么位置过升交点，也是轨道预报、接收跟踪和图片定位工作必须要解决的问题。这个问题在天文测轨上是一个很复杂的计算问题，现用卫星图片分析和简单的计算来解决。

卫星轨道平面相对地球上某点的变化由三个量来计算：①主要是地球的自转 $wd = 15^\circ/\text{时} \times T$ (T 为周期)；②由于地球绕太阳公转，卫星轨道平面也一起跟着公转，每天卫星轨道平面进动值 $ld = 0.985647^\circ/\text{平太阳日}$ 。③地球形状、日、月和大气等摄动力引起轨道平面的进动用一个量来计算，即综合进动 Ω 值。 Ω 的测定用下列方法：用标准地形来测量卫星的星下点的变化。例如用高原上某一湖泊——玛旁雍错湖东缘地形边界来测量卫星的星下点向西10天减少5.802°。(1978年10月3日—10月13日， $87.531^\circ - 81.729^\circ = 5.802^\circ$ ，9个等级信标的流星号)，每天卫星的星下点向西移 $0.5802^\circ/\text{日}$ (有的卫星的星下点向东移——泰罗斯)，卫星的周期 $T = 1^h 42^m 27.922^s$ ；卫星飞行14圈后地球转动的角距 $wd = 15^\circ/\text{时} \times 1^h 42^m 27.922^s \times 14 = 358.62878324^\circ$ ；卫星飞行14圈星下点变动的角距 $I_1 = 360^\circ + 0.5802^\circ = 360.5802^\circ$ ；

$$\Omega_{\text{总}} = I_1 - wd = 360.5802^\circ - 358.62878324^\circ = 1.9514676^\circ$$

$$\Omega = \Omega_{\text{总}} - ld = I_1 - wd - ld = 1.9514676^\circ - 0.985647^\circ = 0.96576976^\circ/\text{平太阳日} \dots \dots \dots \quad (3) \quad (\Omega \text{ 取负值})$$

轨道平面进动 Ω 值用上述方法计算(实测)比理论公式

$$\Omega = \frac{10}{(1-e^2)^2} \left(\frac{R}{a} \right)^{3.5} \cos i \text{ 度}/\text{平太阳日} \dots \dots \dots \quad (4)$$

的求算简单方便，也较准确，因公式求 Ω 取决于 e、R、 $a = R + h$ 、i(轨道倾角)的准确求算才能得出。

如果用一个月以上的时间间隔和分辨率高的图片(如地球资源卫星分辨率为25—500m)来推算轨道平面进动 Ω 值，准确率是很高的。

测定了轨道平面进动 Ω 值，两条轨道之间的截距 I 就容易计算了。

$$I = \frac{(360^\circ + ld \pm \Omega)}{1440} \times T \dots \dots \dots \quad (5)$$

符号意义同上，前进轨道 Ω 取正，后退轨道取负，T 单位为分钟。也可直接用 I_1 除轨道条数 M。现用这两种方法分别计算对比如下： $I_1 = 360.5802^\circ$ ； $\Omega = 0.96576976^\circ$ ； $ld = 0.985647^\circ$ ； $T = 1^h 42^m 27.922^s$ ； $M = 14$ ；

$$(a) \quad Ia = \frac{(360^\circ + ld + \Omega)}{1440} \times T \\ = 25.755190809336^\circ;$$

$$(b) \quad Ib = I_1 \div M = 25.75572857^\circ;$$

$Ib - Ia = 0.000537761^\circ$ 。用上面两种方法都能算出两条轨道之间的截距 I，只相差 0.000537761° ，这个差值说明了什么？因(a)方法计算用到 Ω 和 T，(b)方法计算只用 Ω 值，说明 Ω 和 T 的测量准确性较高，达到我们使用的要求。

4. 求确定轨道空间位置的倾角 i

①用天体力学理论公式做近似计算：因为 Ω 值直接测定出来，气象卫星是近圆形轨道，故把 $e = 0$ 处理，公式(4)可化为

$$\cos i = -\frac{\Omega}{10} \left(1 + \frac{h}{R} \right)^{3.5} \dots \dots \dots \quad (6)$$

②也可以用卫星图片上的地形边界测定星下点的位置来计算 i。例如测得星下点的 B、C 点的经度 λ_B 、 λ_C 和纬度 φ_B 、 φ_C ，如图1所示。

在球面三角形 OBC 中， $BC = a$ ； $OC = 90^\circ - \varphi_C$ ； $OB = 90^\circ - \varphi_B$ ； $\lambda = \lambda_B - \lambda_C$ ；B、C 两点的时间 ΔT 为已知；根据球面三角形的边余弦定理：

$$\cos a = \sin \varphi_B \sin \varphi_C + \cos \varphi_B \cos \varphi_C \cos \lambda \dots \dots \dots \quad (7)$$

由于存在轨道平面进动

$$\lambda x = \lambda \pm \Delta \lambda \Omega \dots \dots \dots \quad (8)$$

$\Delta \lambda \Omega$ 值用公式(5)计算。在球面三角形 OAC 中， $AC = b$ ， $OC = OA$ ，

$$\cos b = \sin^2 \varphi_C + \cos^2 \varphi_C \cos \lambda x \dots \dots \dots \quad (9)$$

在球面三角形 ABC 中：

$$\cos B = \frac{\cos b - \cos a \cos c}{\sin a \sin c} \dots \dots \dots \quad (10)$$

在球面三角形 DBE 中：

$$i = \arccos(\sin B \cos \varphi_B) \dots \dots \dots \quad (11)$$

5. 卫星过升交点的经度

能接收到赤道的图片，就在图片上直接求出。收不到赤道的图片的接收站，经度需要计算。如图2所示，A 点为测定的标准地形的经度 λ_A ，纬度 φ_A ，求卫星过升交点的经度。计算步骤：

$$\text{①} \sin \mu = \frac{\sin \varphi_A}{\sin i} \dots \dots \dots \quad (12) \quad i \text{ 是倾角。}$$

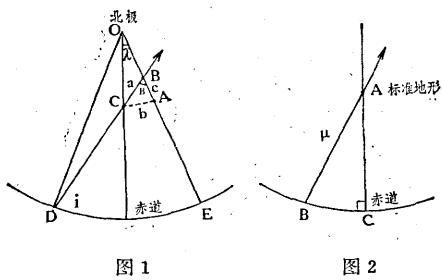


图 1

图 2

$$\textcircled{2} \quad \bar{P} = \frac{360^\circ}{T} \text{ (度/分)} \quad \text{(13) } T \text{ 是周期。}$$

③求出卫星从升交点B飞行到A点的时间

$$T_A = \frac{\mu}{P} \text{ (分)} \quad \text{(14)}$$

$$\textcircled{4} \quad b = BC, \quad \cos b = \frac{\cos \mu}{\cos \varphi_A} \text{ 或} \\ \sin b = \tan \varphi_A \cot g i \quad \text{(15)}$$

⑤过升交点B的经度 λ_0 :

$$\lambda_0 = \lambda_A \mp b + \Omega_A = \lambda_A \mp b + \frac{360^\circ + ld \pm \Omega}{1440} \\ \times T_A \quad \text{(16)}$$

前进轨道取上面的符号，后退轨道取下面的符号。

(6) 偏心率 e 。一般不必计算，因气象卫星是近圆形轨道，远、近地点之差在 20—50km，也可以用公式(4)计算。

三、卫星轨道的预报

掌握了卫星的运行规律，就可以做出卫星空间位置的简略预报。根据卫星轨道的预报，就知道卫星飞越我们接收区的时间和空间位置，以便进行跟踪接收工作。为了跟踪方便，避免每天进行繁杂计算，可根据轨道参数计算卫星星下点的标准轨道曲线，并点绘在大圆盘上（和诺阿卫星方式一样），以此读出跟踪的时间、方位、仰角，并作成跟踪卡片。这样，每天只计算过赤道时间和经度就可进行接收工作了。

气象卫星近圆形轨道给轨道预报提供了方便，计

算方法有些和轨道参数计算类似。

每两分钟卫星飞行的大圆角

$$g = \frac{360^\circ}{T} \times 2 \quad \dots \dots \dots \text{(17)}$$

2 分钟卫星飞行的纬度

$$\varphi_T = \arcsin (\sin g \sin i) \quad \dots \dots \dots \text{(18)}$$

2 分钟卫星飞行的经度

$$l_0 = l_T - \Delta l_T = \arcsin (\tan \varphi_T \cot g i) - \\ \frac{(360^\circ + ld \pm \Omega)}{1440} \times 2 \quad \dots \dots \dots \text{(19)}$$

i 为倾角。

对于卫星轨道的预报采用平均角速度 g ，气象卫星远、近地点差值大的误差大一些，为了更精确预报，卫星的速度根据开普勒第二定律来求算，计算繁杂一些。

实际使用时，对于苏联流星号和美国泰罗斯气象卫星（每天接近 14 条轨道的卫星）的轨道预报和计算，较方便准确。轨道参数小数部分用每天的订正值计算。相隔 10 天或半个月做一次计算，修正订正值和轨道参数小数部分。例如苏联流星号 9 个等级信标的前进轨道气象卫星（120 转），周期 $1^h 42^m 28^s$ ，截距 25.755° ，倾角 81.5° 。订正值：每天提前 $5''$ （分） $25.5''$ （秒），每天过升交点的经度向西减少 0.58° ；美国泰罗斯后退轨道的气象卫星周期（由轨道报） $1^h 42^m 06^s$ ，截距 25.52° ，倾角 99.1° 。订正值：每天提前 $10'' 24.5''$ ，每天过升交点经度向东增加 2.61° 。只要算出订正值，每天使用方便和容易校正。

用卫星图片推测卫星轨道参数方法，是一条新途径，特别是战时和不知道轨道参数的情况下，适合一般接收站。随着图片分辨率的提高，准确性也提高。由繁杂的天文计算方法变为较方便的推测方法，不需要复杂的监测设备和计算系统。人造卫星和其他星体不同，人造卫星是有源星体。图片反映了卫星轨道的轨迹，并且能连续不间断地记载下来，给卫星测轨工作提供了宝贵的资料。

上述方法通过近一年来接收苏联流星号气象卫星的实践使用，效果良好。与有轨道报的泰罗斯卫星的轨道参数对照，只有在小数部分上的误差（泰罗斯卫星的轨道参数小数部分未告诉，只根据轨道报推算）。流星号和泰罗斯结合使用是有益的。