

地基火星大气掩星观测的时间系统与坐标系统

韩婷婷^{1,2} 毛晓飞³ 张素君^{1,2} 李磊³ 平劲松¹ 洪振杰³

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. 温州大学数学与信息科学学院, 温州 325035)

提 要

在地基掩星观测反演火星大气的资料处理过程中,掩星平面的建立是数据整理模块考虑的第一项任务。该文详细介绍了利用初始的观测资料(飞行器、火星与地球的历表),确定信号时延、建立掩星平面、计算掩星点高度以及在火固坐标系下掩星点和太阳的位置等流程中的时间系统与坐标系统问题。

主题词: 时间系统 — 坐标系 — 掩星

分类号: P185.36, P19

1 引 言

火星是太阳系中与地球距离最近、与地球条件最为相似、也是目前除地球以外人类研究最多的行星。发达国家的深空探测计划对火星的研究已经获得重大的进展。从20世纪60年代中期水手4号飞行器成功完成了火星探测以后,火星大气反演技术之一的星地行星掩星技术,已经在国际上获得了相当的成果。

开展火星航天任务的研究是我国在完成嫦娥计划以后深空探测的下一个目标。中俄联合探测火星计划萤火一号(YH-1)是继嫦娥计划以后的深空工程项目之一。该任务的主要科学目标包括:空间磁场、火星大气电离层和粒子的分布特性探索、等离子体离子逃逸率、物理过程和输运机制研究、火星正午和子夜的电离层掩星探测、火星地形、地貌和沙尘暴以及赤道附近的重力场的研究等;它提供了利用自己的飞行器获得火星掩星地基观测资料,以研究火星中性大气和电离层的机会。

中国科学院上海天文台和温州大学合作,参与了YH-1项目计划中地基掩星反演行星大气的观测资料的接收系统、数据处理系统软件包的开发。图1为地基火星大气掩星观测处理软件系统结构图。YH-1计划预计2009年11月发射卫星,目前正在从事各项科学任务的准备。

本文针对YH-1任务,描述地基行星大气掩星观测处理软件包和观测资料整理模块中涉及的坐标与时间系统等相关问题。图2为观测资料整理模块的流程。

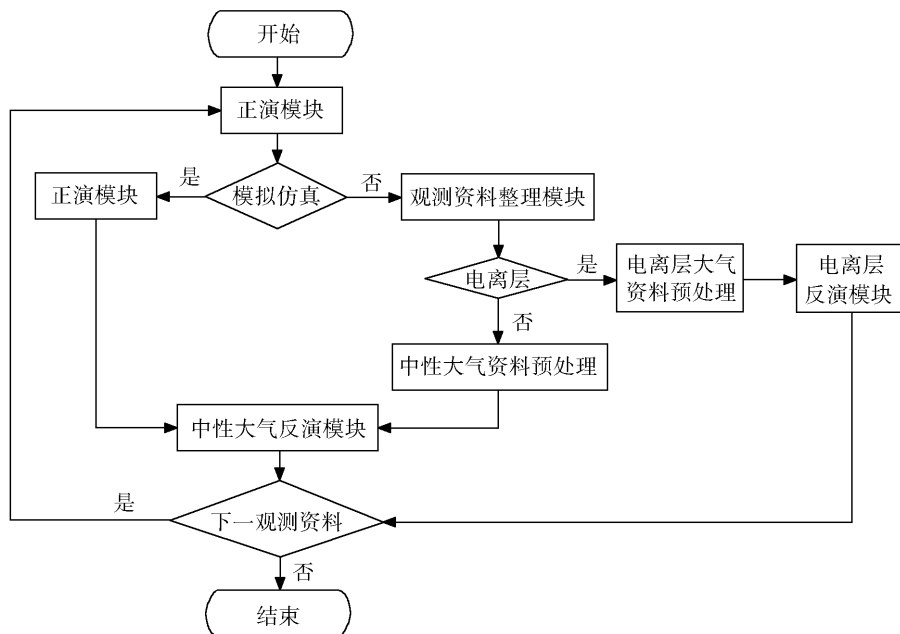


图 1 地基火星大气掩星观测处理软件系统结构

Fig. 1 Structure of the Earth-based martian atmosphere occultation processing system

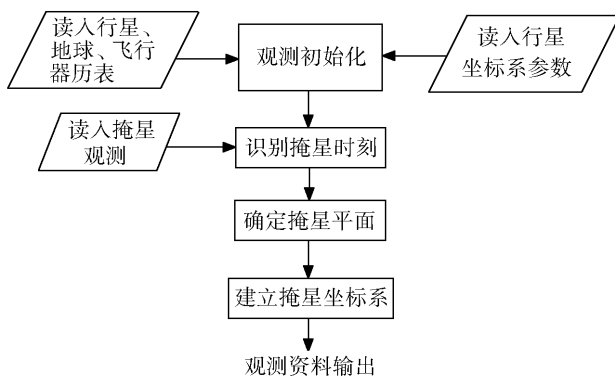


图 2 观测资料整理模块的流程

Fig. 2 Process of the observation data arrangement module

2 掩星观测方程

当发生掩星事件时行星飞行器发出的信号穿过行星大气后被地面观测站接收(如图 3 所示),其接收到的无线电信号频移为^[1]:

$$\Delta f = \left\{ f_s - f_s \frac{v_{xs}}{c} \cos(\beta_e - \beta_r) - f_s \frac{v_{ys}}{c} \sin(\beta_e - \beta_r) + f_s \frac{v_{y1}}{c} \cos(\delta_s - \delta_r) + f_s \frac{v_{y1}}{c} \sin(\delta_s - \delta_r) \right\} - \left(f_s - f_s \frac{v_{xs}}{c} \cos\beta_e - f_s \frac{v_{ys}}{c} \sin\beta_e + f_s \frac{v_{y1}}{c} \cos\delta_s + f_s \frac{v_{y1}}{c} \sin\delta_s \right), \quad (1)$$

其中: f_s 是飞行器发射的无线电波频率, c 是真空中光速; v_{xs}, v_{ys} 分别是飞行器 x 方向(相对火星质心)和 y 方向的速度, v_{x1}, v_{y1} 分别是地球 x 方向(相对火星质心)和 y 方向的速度; (1) 式

中的角变量的定义参见图 3。

如果观测量是延迟率 $\Delta \dot{\rho}$, 那么

$$\Delta f = \frac{f_s}{c} \Delta \dot{\rho}, \quad (2)$$

在球对称的假设下, Bouguer 公式成立^[2]:

$$a = -y_1 \sin(\delta_s - \delta_r) = \sqrt{(x_s^2 + y_s^2)} \sin(\beta_e - \gamma - \beta_r). \quad (3)$$

其中, a 是碰撞参数, $(0, y_1)$ 是测站坐标。从方程 (1) 和 (2) 通过迭代可以解出 $a, \delta_r(a), \beta_r(a)$; 而偏折角:

$$\alpha(a) = \delta_r(a) + \beta_r(a). \quad (4)$$

假设地球上测站的位置是无穷远, 则有 $\delta_s = 0, \delta_r = 0$, 和 $\beta_e = \pi/2$ 。方程 (1) 和 (3) 可以分别写成:

$$\Delta f = \left(-f_s \frac{v_{xs}}{c} \sin\beta_r - f_s \frac{v_{ys}}{c} \cos\beta_r + f_s \frac{v_{ys}}{c} \right), \quad (5)$$

$$a = \sqrt{(x_s^2 + y_s^2)} \cos(\gamma + \beta_r), \quad (6)$$

而偏折角:

$$\alpha(a) = \beta_r(a). \quad (7)$$

利用以上观测方程求得的弯曲角, 在球对称条件下, 进行反演计算, 可以得到中性大气的折射率、温度、压强廓线或电离层电子密度廓线。在火星大气中, 中性层考虑为 $0 \sim 50\text{km}$ 高度范围, 电离层考虑为 $100 \sim 2500\text{km}$ 高度, $50 \sim 100\text{km}$ 认为是掩星观测火星的不灵敏区域^[3]。

3 掩星坐标系

在地基火星大气掩星观测处理流程中, 飞行器历表是由观测定轨或轨道仿真(如 GEO-DYN) 得到, 它们的时间和坐标系统分别是 *UTC* 和行星瞬时平赤道坐标系; 地球和火星的位置和速度采用 DE450 历表或其它历表, 它们的时间和坐标系统分别是 *TDB* 和太阳系质心坐标系; 地面观测资料的时间系统为 *UTC*。信号从飞行器发出, 经过 Δt 传播到地面上的接收站, 这就是信号时延。

假设地面接收机接收到从飞行器发射的无线电信号的时刻为 t , 无线电信号从飞行器到

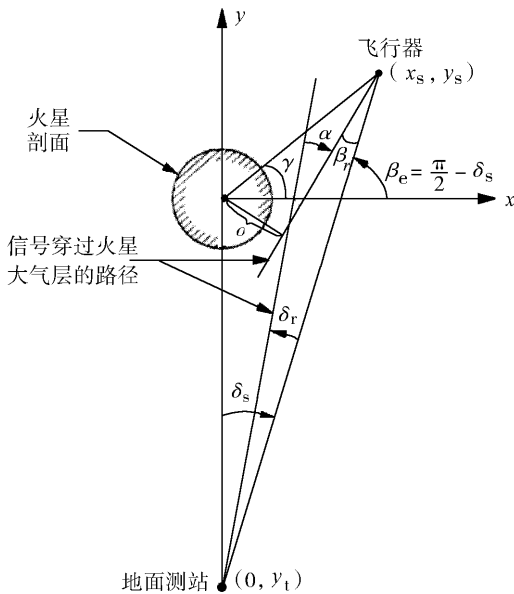


图 3 掩星坐标系和掩星事件几何图

Fig. 3 The geometric occultation coordinate system and events

地面站的传播时间为 Δt 。以 $t - \Delta t$ 时刻行星和飞行器的位置, t 时刻地球的位置(其中忽略了测站与地心的传播时间差)建立的平面为掩星平面。掩星坐标系(见图 3)的坐标原点取在行星中心,以地球到行星中心的指向为 y 轴方向。定义在初始时刻,获得的观测资料中行星中心到地球的方向矢量 \mathbf{r}_{ME} 与行星中心到飞行器的矢量 \mathbf{r}_{MS} 叉乘确定的地球、火星、飞行器三者所在的平面上,从 \mathbf{r}_{ME} 逆时针旋转到 \mathbf{r}_{MS} , 旋转的角度即 \mathbf{r}_{ME} 到 \mathbf{r}_{MS} 的旋转角 θ 。则任意时刻,掩星平面的法矢量 \mathbf{n} 如公式(8)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{n} = \mathbf{r}_{ME} \times \mathbf{r}_{MS} & 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ, \\ \mathbf{n} = -\mathbf{r}_{ME} \times \mathbf{r}_{MS} & 180^\circ < \theta < 360^\circ. \end{cases} \quad (8)$$

也即掩星坐标系的 z 轴方向矢量,将法矢量 \mathbf{n} 与 \mathbf{r}_{ME} 叉乘,得到掩星平面 x 轴方向矢量。在具体的求解过程中,将每次解得的法向量与初始时刻确定的法向量对比,当方向相反时,即认为平面反转,考虑采用式(8)判定掩星平面的法向量。

反演过程中,需要判定掩星时刻、确定掩星平面和建立掩星坐标系,然后得到地球和飞行器在掩星坐标系中的位置和速度矢量。为了研究行星大气的分布和变化特性,还必须确定掩星点在行星地固坐标系中的位置,以及它与太阳的相对位置。

4 时间系统及其表示方式

4.1 时间系统

地基行星掩星观测涉及的时间系统如表 1 所示。

表 1 地基行星掩星观测的时间系统

Table 1 The Time System of Earth-based Mars Atmosphere Occultation

行星飞行器的 时间系统	地球、火星历表的 时间系统	地面观测资料的 时间系统
UTC	TDB	UTC

考虑精度的要求不高,本文中不考虑引力相对论的影响,UTC和TDB之间的转换公式^[4]为:

$$TDB = UTC + \Delta UTC + 32.184s, \quad (9)$$

其中 ΔUTC 为跳秒。2000年后的跳秒情况如表2所示。

表 2 跳秒表

Table 2 The leap seconds

时间	跳秒数
2000.1.1 - 2006.1.1	32s
2006.1.1 - 2009.1.1	33s
2009.1.1 至今	34s

飞行器发出信号时刻(UTC)为 t' ,地面站接收到的时刻(TDB)为 t ,信号的时间延迟为 Δt ,可以得到:

$$t = t' + \Delta UTC + 32.184s + \Delta t. \quad (10)$$

4.2 时间表示方式

在地基火星大气掩星观测处理流程中所涉及的时间表示方式有格里高利历、儒略日、年积日、历书秒等。

(1) 格里高利历是我们日常所广泛采用的日历。本软件系统中,飞行器历表用该时间表示。

(2) 儒略日是从公元前 4712 年 1 月 1 日格林尼治时间 12 时开始连续累积的日数时间的方法,记为 JD 。由于儒略日的数字越来越大,目前采用参考历元为 $J2000.0$ (对应的儒略日为 $JD = 2451545.0$)进行约化,对应的时间系统为 TDB 。

(3) 年积日是指从每年的1月1日0时(UTC)开始累计的天数,计数从1开始(即每年1月1日的年积日为1)。

(4) 历书秒,从2000年1月1日12时(TDB)为第一秒开始计量的秒数;它对应于此时刻的UTC系统下的时间表示^[5]。

在地基行星大气掩星观测处理流程中,先将UTC归算到TDB系统,然后再用统一的时间表示(年积日或历书秒)进行相应的计算。

5 坐标系统

5.1 坐标定义

地基火星掩星观测涉及的坐标系统如表3所示。

表3 地基火星掩星观测的坐标系统

Table 3 The Coordinate System of Earth-based Mars Atmosphere Occultation

坐标系	原点	参考平面	x 轴方向
火星瞬时平赤道坐标系 P	火星质心	瞬时火心火星平赤道面 (Mars-centered Mars Mean Equator of-date)	指向火星平春分点
火固坐标系 N	火星质心	瞬时火心火星平赤道面	指向参考平面与 火星本初子午面交线方向
历元火心天球平坐标系 (EME2000) P'	火星质心	平行于地球的 $J2000$ 平赤道	指向地球 $J2000$ 平春分点
太阳系质心天球坐标系 r	太阳系质心	$J2000.0$ 地球平赤道	指向 $J2000$ 地球平春分点

5.1.1 火星北极指向

在历元火心天球平赤道坐标系 EME2000 (Earth Mean Equator and Equinox of Epoch $J2000$) ($O-XYZ$) 参考架中定义了火星瞬时平自转极,火星瞬时平赤道坐标系与火固坐标系 ($O-xyz$) 中的 z 轴(火星北极)的赤经 α 和赤纬 δ 可以表示为^[6]:

$$\begin{aligned}\alpha &= 317^\circ.68143 - 0^\circ.1061T, \\ \delta &= 52^\circ.8865 - 0^\circ.0609T.\end{aligned}\quad (11)$$

其中 T 是相对于 $J2000$ 历元(JED2451545.0)的儒略世纪数。

5.1.2 IAU 矢量

在瞬时(of-date)火心平赤道面上,参考矢量 IAU (IAU-vector) 定义为瞬时火心平赤道面与 $J2000$ 历元地球平赤道面(EME2000 坐标系的参考平面)的交线,从火心指向交点 Q (其赤经为 $\alpha + 90^\circ$, 赤纬为 $90^\circ - \delta$) 的单位矢量。 Q 点被定义为火星瞬时平赤道与地球历元平赤道的升交点。IAU 矢量(如图4)的定义中放弃了行星的轨道面,避免了行星历表的计算,而地球的平轨道面是可以很精确地计算的。IAU 矢量可以通过火星北极矢量和地球北极矢量叉乘得到^[7]。

5.1.3 IAU 矢量与火星春分点之间的关系

通过平轨道极或平轨道角动量矢量可确定火星的平轨道。行星历表可以提供 $J2000$ 太

阳质心坐标系中火星的位置 \mathbf{R} 和速度 \mathbf{V} ; 火星的轨道角动量单位矢量 \mathbf{H} 为:

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{R} \times \mathbf{V}}{|\mathbf{R} \times \mathbf{V}|}, \quad (12)$$

它表示了火星轨道极的方向。严格地说, 这样得到的轨道是密切轨道, 而不是平轨道。它对坐标变换的影响很小。瞬时春分点单位矢量 \mathbf{B} 则通过瞬时自转极与火星轨道极的矢量积获得:

$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{Z} \times \mathbf{H}}{|\mathbf{Z} \times \mathbf{H}|}. \quad (13)$$

定义角 ψ 为以瞬时春分点为起始点自西向东到 \mathbf{IAU} 矢量的角距, 则有(对火星而言, ψ 在第二象限):

$$\cos\psi = \mathbf{IAU} \cdot \mathbf{B}. \quad (14)$$

在火星观测者(Mars Observer)的行星常数、模型和其他一些文献中, 采用了定义为从 \mathbf{IAU} 矢量到瞬时秋分点的角距 Δ :

$$\psi + \Delta = 180^\circ. \quad (15)$$

取 $J 2000.0$ 历元时刻 ψ 的值为 $136^\circ.7528$ 。 ψ 近似每年变化 $0^\circ.001^{[7]}$ 。则:

$$\psi = 136^\circ.7528 + 0^\circ.001y. \quad (16)$$

其中 y 为从 $J 2000.0$ 起算的年数。

5.1.4 \mathbf{IAU} 矢量与火星本初子午线的关系

火固坐标系以瞬时火心平赤道面为参考面, 它的参考方向为火星本初子午面与参考面的交线。火星本初子午线定义为通过火星南纬 5° 的 Airy-0 环形山中心点的经线。由 \mathbf{IAU} 可通过 W 角(自 Q 沿火星赤道向东计量至 B 点的弧长)来得到本初子午面的位置, 它是在火星赤道面上, 相对 \mathbf{AU} 矢量 Q 点以右手方向计算的角度^[7]:

$$W = 176^\circ.630 + 350^\circ.89198226d. \quad (17)$$

其中, 常数项是 $J 2000$ 历元的值, d 是从 $J 2000$ 起算的地球日数。

在瞬时火星赤道面上, 可以分别建立火星本初子午面和春分点与 \mathbf{IAU} 矢量的关系, 它们分别用角 W 和角 ψ 描述。则从火星春分点沿赤道自西向东到本初子午面的角距为 V :

$$V = W + \psi. \quad (18)$$

上式中, W 和 ψ 角都随时间而变化, 该式即火星春分点相对 \mathbf{IAU} 矢量的变化。火星春分点位置与 \mathbf{IAU} 矢量都是自转极位置的函数, 而春分点位置还是轨道极位置的函数, 而轨道极相对惯性空间存在旋转运动。火星的自转极与轨道极之间有缓慢的旋转运动。

火星定向模型、火星春分点、火星本初子午线以及 \mathbf{IAU} 矢量三者的空间位置关系如图 4 所示。其中 R 为火星春分点, Q 为 \mathbf{IAU} 矢量与火星赤道面的交点, B 为火星本初子午线与火星赤道面的交点, γ 为地球春分点, R 与 Q 之间的角距为 ψ 。

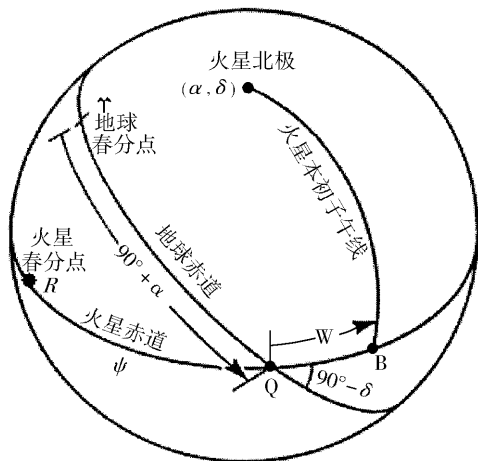


图 4 火星的定向模型

Fig. 4 Orientation model of Mars

5.2 坐标转换

定义火星瞬时平赤道坐标系中任一矢量用 \mathbf{P} 表示,其转换到 EME2000 坐标系下用 \mathbf{P}' 表示,该矢量再转换到火固坐标系下用 \mathbf{N} 表示。本系统涉及的坐标转换如图 5 所示。

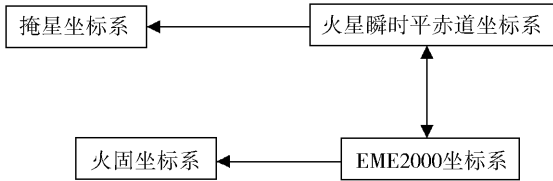


图 5 地基行星掩星观测系统坐标转换

Fig. 5 The Coordinate Transform of Earth-based Mars Atmosphere Occultation

5.2.1 火星瞬时平赤道坐标系与 EME2000 坐标系的转换

图 6 为 EME2000 坐标系 ($O-XYZ$) 与火星瞬时平赤道坐标系 ($O-xyz$) 的空间关系。将火星瞬时平赤道坐标系转换到 EME2000 坐标系的矩阵转换式如下:

$$\mathbf{P}' = \mathbf{R}_3(-90^\circ - \alpha) \mathbf{R}_1(\delta - 90^\circ) \mathbf{R}_3(-\varphi) \mathbf{P}. \quad (19)$$

其中 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_3$ 为转换矩阵。

5.2.2 EME2000 与火固坐标系的转换

图 7 为 EME2000 与火固坐标系的空间关系,将 EME2000 坐标系转到火固坐标系的矩阵转换式如下:

$$\mathbf{N} = \mathbf{R}_3(W) \mathbf{R}_1(90^\circ - \delta) \mathbf{R}_3(90^\circ + \alpha) \mathbf{P}'. \quad (20)$$

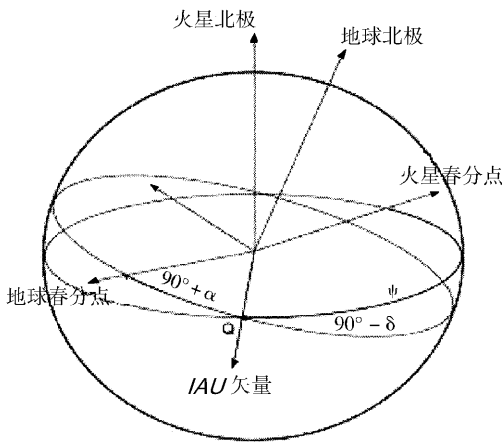


图 6 火星瞬时平赤道坐标系与 EME2000 坐标系的转换

Fig. 6 The transformation between Mars Mean Equator of-date Coordinate and EME2000

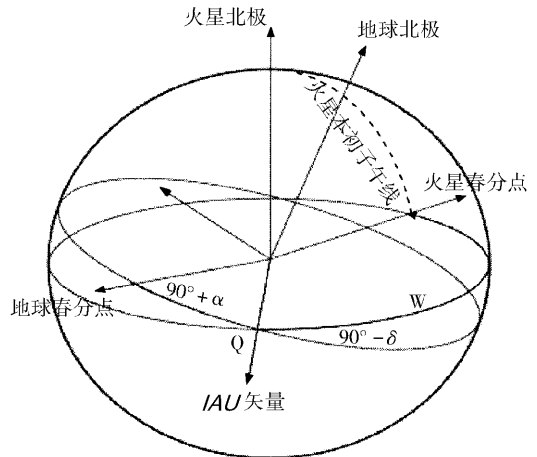


图 7 火固坐标系与 EME2000 坐标系的转换

Fig. 7 The transformation between Mars Non-inertial Coordinate and EME2000

5.2.3 火星瞬时平赤道坐标系与掩星面坐标系的相互转换

由 DE405 历表中得到在太阳系质心坐标系中火星、地球的位置与速度,由其获得地球到火星的方向矢量 \mathbf{r}_{ME} ,该矢量即在 EME2000 坐标系中,因此由 5.2.1 节的逆变换将该方向从

EME2000 坐标系中转换到火星瞬时平赤道坐标系中。

在火星瞬时平赤道坐标系下,已知火星到飞行器的方向矢量 \mathbf{r}_{MS} ,火星到地球的方向矢量 \mathbf{r}_{ME} ,则掩星面的单位法向量 $(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \mathbf{t})^T$ 可由公式(8)得出。

由图 8 可知,火星瞬时平赤道坐标系 $\mathbf{M}(x, y, z)$ 变换到掩星面坐标系 $\mathbf{r}'(x', y', z')$ 的矩阵表达式为:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{R}_3(\alpha_3)\mathbf{R}_2(\alpha_2)\mathbf{R}_1(\alpha_1)\mathbf{P}. \quad (21)$$

其中, (x', y') 平面为原坐标系的掩星面, z' 轴正方向定义为掩星面的法向量方向, y' 轴正方向定义为 \mathbf{r}_{ME} 的负方向。因此可以确定掩星面坐标系中飞行器与地球的位置和速度矢量,从而得出飞行器在掩星坐标系中的 x' 坐标,便于后续的掩星时刻的判定。

公式(21)中的旋转角 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 的具体算法如下:

$$\alpha_1 = \begin{cases} \pi/2 & t = 0 \text{ 且 } s < 0, \\ -\pi/2 & t = 0 \text{ 且 } s > 0, \\ -\arctan(s/t) & t \neq 0. \end{cases} \quad (22)$$

若 $t < 0$, $\alpha_1 = \alpha_1 + \pi$ 。以 x 为轴旋转 α_1 ,得到新坐标系 $x' y' z'$,则掩星面单位法向量在该新坐标系 xoz' 面上,坐标为 $(r, 0, t')^T$,且 $(r, 0, t')^T = \mathbf{R}_1(\alpha_1) \cdot (r, s, t)^T$;其中:

$$\alpha_2 = \begin{cases} \pi/2 & t' = 0 \text{ 且 } r > 0, \\ -\pi/2 & t' = 0 \text{ 且 } r < 0, \\ \arctan(r/t') & t' \neq 0. \end{cases} \quad (23)$$

若 $t' < 0$, $\alpha_2 = \alpha_2 + \pi$ 。以 y 为轴旋转 α_2 ,得到新坐标系 $x' y' z''$,则地球到火星的方向矢量在该新坐标系 $x'oy'$ 面上,其坐标为 $(x, y, 0)^T$,且 $(x, y, 0)^T = \mathbf{R}_2(\alpha_2) \cdot \mathbf{R}_1(\alpha_1) \cdot \mathbf{r}_{ME}$,其中:

$$\alpha_3 = \begin{cases} -\pi/2 & y = 0 \text{ 且 } x < 0, \\ \pi/2 & y = 0 \text{ 且 } x > 0, \\ \pi - \arctan(x/y) & y \neq 0. \end{cases} \quad (24)$$

若 $y < 0$, $\alpha_3 = \alpha_3 - \pi$ 。

5.3 坐标转换的应用

5.3.1 确定发生掩星的时间段

当从火星中心到飞行器与地球的联线的垂线距离(假设地球上测站的位置是在无穷远处,此即飞行器在掩星坐标系中的 x' 坐标)等于火星半径 R (即球心距)加 250km 时定义为掩星开始时刻;信号被火星表面遮掩为掩星结束时刻,整个时段为掩星过程。定义该垂线与火星表面的交点为星下点 A ,与飞行器和地球联线的交点为掩星点。

(1) 确定星下点 A 在火星瞬时平赤道坐标系下的经纬度

利用飞行器、火星与地球的历表求出星下点 A 在火星瞬时平赤道坐标系中的坐标为 $(x,$

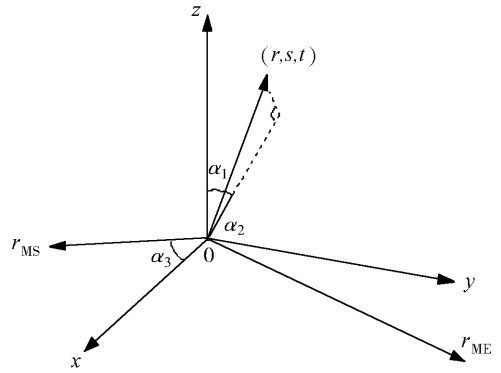


图 8 火星瞬时平赤道坐标系与掩星平面坐标系的转换示意图

Fig. 8 Schematic representation of the transformation between Mars Mean Equator of-date and occultation-plane coordinate system

y, z), 则星下点 A 的经度 L 和纬度 B 分别为:

$$B = \tan^{-1} \left\{ \frac{z}{(x^2 + y^2)^{1/2}} \right\}. \quad (25)$$

$$L = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right). \quad (26)$$

(2) 确定星下点 A 的球心距

考虑火星为二轴椭球, 则由火星参数写出火星的椭球方程如下:

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1. \quad (27)$$

其中: 长半轴 $a = 3397\text{km}$; 极半轴 $c = 3375\text{km}$ 。在火星椭球体上过星下点 A 的截面为一椭圆,

表示如图 9, 其椭圆方程为:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1. \quad (28)$$

其中 a 为火星的长半轴, c 为火星的极半轴, B 表示星下点 A 的球心纬度, R 表示星下点 A 的球心距; 则由图 9 可得星下点 A 的球心距 R ^[5]:

$$R = \sqrt{\frac{a^2 c^2}{c^2 \cos^2 B + a^2 \sin^2 B}}. \quad (29)$$

则据此可确定掩星点高度为 $x' - R$, 便于后续反演计算时中对中性大气和电离层的分层。

5.3.2 火固坐标系中掩星点与太阳位置

确定火固坐标系中掩星点与太阳的位置, 利于分析火星大气以及电离层产生的机制。利用

5.2 节的转换关系式, 可以将掩星点从掩星坐标系转换至火固坐标系中, 即可确定掩星点在火固坐标系中的位置。利用 历表可以获得在太阳系质心天球坐标系下地球的位置矢量 \mathbf{r}_E , 则以地球质心为原点, 地球质心天球坐标系即 EME2000 坐标系下太阳的位置矢量为 \mathbf{r}_{sun} , 且 $\mathbf{r}_{\text{sun}} = -\mathbf{r}_E$, 利用 5.2 节的转换公式将太阳的位置矢量从 EME2000 坐标系转换至火固坐标系, 则可确定在火固坐标系下太阳的位置。

6 计算实例

已知 YH-1 飞行器为绕火星的大椭圆轨道, 远火点离火星表面的高度为 80000km, 近火点离火星表面的高度为 800km, 轨道倾角为 $1^\circ.8$ 。由 YH-1 飞行器的轨道根数, 利用 STK^[8] 仿真 2010 年 7 月 1 日 0 时至 2010 年 7 月 8 日 0 时期间火星、地球和 YH-1 飞行器的场景, 得出观测阶段的历表。飞行器在该仿真场景中运行两个多周期, 根据以上关于时间和坐标系统转换的理论和公式可知, 当掩星点高度大于零小于 250km, 且飞行器在掩星坐标系下的 Y 坐标大于零时, 掩星发生, 则可利用表 4 判断掩星时间段。飞行器在掩星坐标系下的 X, Y 坐标示于图 10。由结果可知, 在每个周期内发生一次入掩星与出掩星, 且每次掩星时间为 5min 左右。

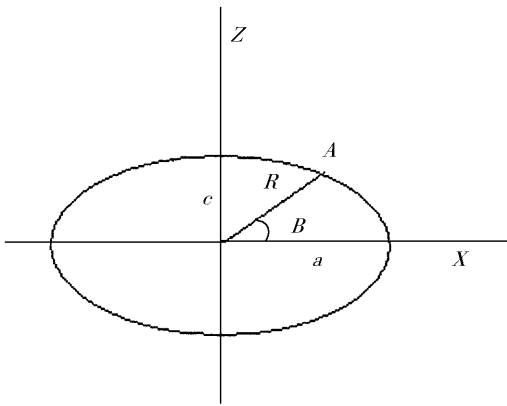


图 9 火星椭球面示意图

Fig. 9 Mars ellipsoid diagram

表 4 仿真场景中的掩星时间

Table 4 The occultation time in simulation scene

日期	掩星时间	时间总计	掩星方式
2010-7-4	04: 45: 50 ~ 04: 51: 00	6min	入掩星
	05: 22: 55 ~ 05: 27: 10	5min	出掩星
2010-7-7	09: 50: 00 ~ 09: 55: 00	5min	入掩星
	10: 27: 33 ~ 10: 32: 00	5min	出掩星

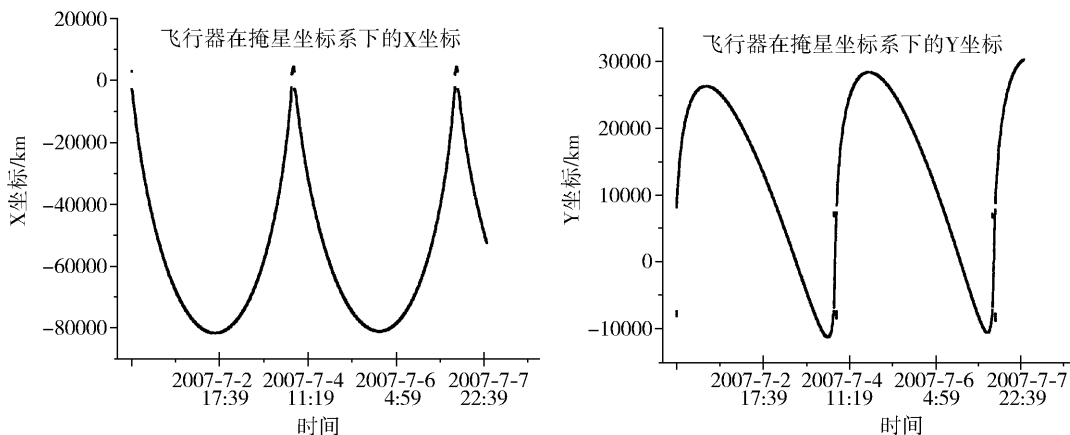


图 10 YH-1 飞行器在掩星坐标系下 X 坐标与 Y 坐标

Fig. 10 The YH-1 aircraft's X and Y coordinates in the occultation coordinate

在以上掩星时间段内,太阳以及 YH-1 飞行器在火固坐标系下的位置如图 11 所示。

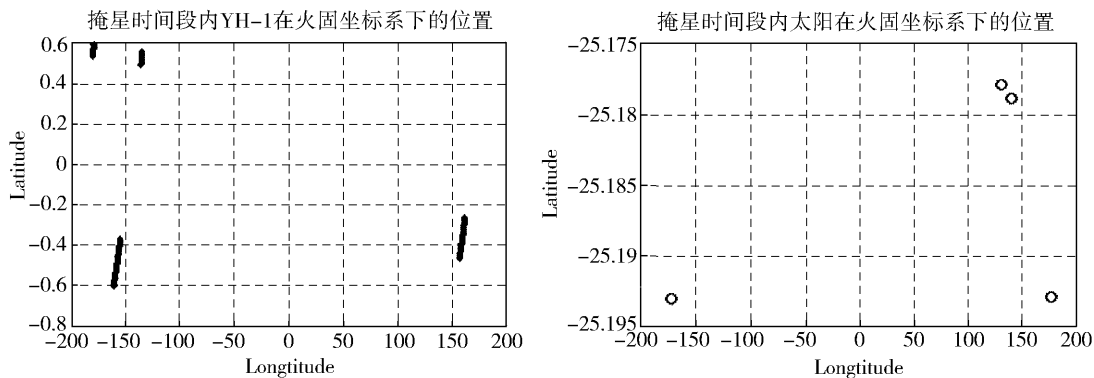


图 11 掩星时间段内 YH-1 与太阳在火固坐标系下的位置

Fig. 11 The YH-1 and the Sun's location in Mars Non-inertial Coordinate during the Occultation time

7 小 结

观测资料整理是地基掩星观测反演火星大气中重要的一个步骤,在观测资料整理模块中

通过利用原始的观测资料将飞行器、地球以及火星三者的时间与坐标系统统一到同一个时间与坐标系统中,获得了信号时延、建立了掩星平面、求出掩星点的高度,确定了发生掩星的时间段以及在火固坐标系下掩星点的位置、掩星时刻太阳的位置,并为整个反演技术的实现奠定了基础。火星大气反演技术是在我国进行火星探测的项目 YH-1 中软件开发的重要部分,在将来的工作中还要通过对数据的分析处理,建立和充实火星大气反演技术的流程,也为早日实现我国的火星大气探测计划提供了条件。

参 考 文 献

- [1] Fjeldbo G, Eshleman V R. *J. Geophys. Res.*, 1965, 70(13): 3217 ~ 3225
- [2] 严豪健, 符养, 洪振杰. 现代大气折射引论, 上海: 上海科技教育出版社, 2006
- [3] Kliore A J, Levy G S, Cain D L *et al.* *Science*, 1967, 158: 1683 ~ 1688
- [4] Allen C W. *Astrophysical Quantities* (4th Ed), Springer, 1999
- [5] 李征航, 黄劲松. *GPS 测量与数据处理*, 武汉: 武汉大学出版社, 2005
- [6] Seidelmann P K, Archinal B A, Ahearn M F *et al.* Report of the IAU/IAG Working Group on cartographic coordinates and rotational elements; 2006, *Celestial Mech. Dyn. Astr.* (2007) 98:155-180 DOI 10.1007/s10569-007-9072-y
- [7] Burkhart P D. MSL Update to Mars Coordinate Frame Definitions, JPL Interoffice Memorandum, 343B-2006-004, August 15, 2006
- [8] 杨颖, 王琦. *STK 在计算机仿真中的应用*, 北京: 国防工业出版社, 2005

THE TIME AND COORDINATE SYSTEM OF EARTH-BASED MARS ATMOSPHERE OCCULTATION

HAN Ting-ting^{1,2} MAO Xiao-fei³ ZHANG Su-jun^{1,2}

LI Lei³ PING Jin-song¹ HONG Zhen-jie³

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3. School of Mathematics & Information Science, Wenzhou University, Zhejiang 325035, China)

Abstract

In the inversion of the Earth-based Mars atmosphere occultation of the data processing, the first task is to establish the occultation plane in the observation data arrangement module. This paper describes how to use the initial data (aircraft, Mars and Earth ephemeris) to determine the signal delay, establish the occultation plane, calculate the height of occultation, as well as define the occultation points and the sun's location in the Mars Non-inertial Coordinate. The time and the coordinates system in the observation data arrangement module are discussed in detail.

Key words Time System — Coordinate System — Occultation