

文章编号: 1001-2486(2011)03-0001-04

广播星历参数星上自主拟合算法*

陈忠贵, 刘光明, 廖 瑛, 文援兰

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 导航星座自主导航要求卫星能自主生成导航电文, 针对星载计算机的处理能力有限, 引入基于遗忘因子的递推最小二乘估计算法实现快速拟合广播星历。针对导航卫星轨道偏心率近似为 0, 在数据拟合过程中会导致法矩阵($H^T H$)奇异的问题, 提出基于无奇异变换的广播星历参数拟合算法, 引入无奇异轨道根数代替经典开普勒根数, 迭代拟合得到改进广播星历参数, 再将结果归一化到基于开普勒根数的广播星历参数。利用仿真算例验证了广播星历星上自主拟合算法的合理性。

关键词: 星上自主更新; 广播星历参数; 无奇异变换; 递推最小二乘

中图分类号: V474.2 **文献标识码:** A

Autonomously Updated Broadcast Ephemeris Algorithm

CHEN Zhong-gui, LIU Guang-ming, LIAO Ying, WEN Yuan-lan

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The navigation constellation's autonomous navigation requires the autonomously updating of the broadcast ephemeris. In view of the limited data-processing ability of the satellite, the forgetting factor recursive least-squares algorithm was introduced to improve the data-processing efficiency. Considering that the navigation satellite's orbit eccentricity is equal to zero approximately, it would result in the singularity of the normal matrix in the process of fitting. The new broadcast ephemeris parameters fitting algorithm was developed and the partial derivative matrix of satellite position vector with respect to modified parameter was deduced based on the non-singular transformation. Finally, the rationality of formulas and algorithm are validated by simulation.

Key words: onboard updated technique; broadcast ephemeris parameters; non-singular transformation; recursion least square

导航星座自主导航是指星座卫星在长时间得不到地面测控系统支持的情况下, 通过星间双向测距、数据交换以及星载处理器滤波处理, 不断修正地面站注入的卫星长期预报星历及时钟参数, 并自主生成导航电文和维持星座基本构型^[1]。采用自主导航技术能够有效减少地面站的布设数量, 减少地面站至卫星的信息注入次数, 增强系统的生存能力。而星上自主生成导航电文是导航星座自主导航得以实现的一个不可或缺的组成部分。星上自主生成的导航电文中的导航卫星星历由星载计算机计算得到, 通过卫星发布给用户, 精度相对较低, 但是可用于实时导航定位, 而导航卫星广播星历拟合误差也会直接影响用户的导航定位精度^[2]。文献[3]对 GPS 广播星历参数的拟合算法及其精度评估进行了研究; 文献[4]研究了利用切比雪夫多项式拟合星历参数; 文献[5]针对静止轨道卫星轨道倾角近似为 0, 致使卫星轨道的

升交点定义模糊, 研究轨道倾角变换拟合广播星历参数的方法。

针对星载计算机处理能力有限, 引入基于遗忘因子的递推最小二乘估计算法实现现在轨实时拟合广播星历问题; 针对卫星轨道存在奇点(偏心率近似为 0), 导致法矩阵($H^T H$)奇异, 提出基于无奇异变换的广播星历参数拟合算法, 引入无奇异轨道根数代替经典开普勒根数, 推导了空间目标位置矢量对基于无奇异轨道根数的广播星历参数偏导数矩阵, 利用变换后的观测方程拟合广播星历参数, 并用仿真数据对拟合算法加以验证。

1 广播星历在轨拟合算法

导航卫星的广播星历参数设计为开普勒根数及其扩展参数, 包括表示轨道摄动的调和改正系数, 外加两个长期项, 广播星历的具体参数及定义见文献[5]。参考 GPS 广播星历, 真正需要拟合

* 收稿日期: 2010-11-08

基金项目: 国家 863 基金资助项目(2007AA12Z308)

作者简介: 陈忠贵(1961—), 男, 研究员, 博士生。

的导航卫星广播星历有 15 个, 即 $\mathbf{X}_0 = (\sqrt{a}, e, i, \Omega_0, \omega, M, \Delta n, \dot{\Omega}, di/dt, C_{us}, C_{uc}, C_{is}, C_{ic}, C_{rs}, C_{rc})^T$ 。则广播星历参数拟合算法中, 相应的状态方程和观测方程为

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}(\mathbf{X}_0, t_0, t) \quad (1)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}(\mathbf{X}, t) = \mathbf{Y}(\mathbf{X}_0, t_0, t) \quad (2)$$

其中: \mathbf{X}_0 为待估参数向量; \mathbf{Y} 为含有 m ($m \geq 15$) 个观测量的观测列向量, 一个观测量对应导航卫星在 t 时刻的一个位置分量。

状态方程和观测方程均为非线性方程, 因此广播星历参数估值问题为非线性系统最小二乘估值问题, 需将非线性方程线性化和迭代求解^[5]。

设 \mathbf{X}_{i0} 为广播星历参数估值 \mathbf{X}_0 在第 i 次迭代的初值, 将方程(2)在 $\mathbf{X}_0 = \mathbf{X}_{i0}$ 处展开:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}(\mathbf{X}_{i0}, t_0, t) + \left(\frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{X}_0} \right)_{\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_{i0}} (\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}_{i0}) + O((\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}_{i0})^2) \quad (3)$$

$$\text{令 } \mathbf{x}_0 = \mathbf{X}_0 - \mathbf{X}_{i0} \quad \mathbf{y} = \mathbf{Y} - \mathbf{Y}(\mathbf{X}_{i0}, t_0, t) \quad (4)$$

$$\mathbf{H} = \left(\frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{X}_0} \right)_{\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_{i0}} = \left(\frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{X}_0} \right)_{\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_{i0}} \quad (5)$$

略去方程(3)中 $O(\mathbf{x}_0^2)$ 以上高阶项可得

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x}_0 + \mathbf{v} \quad (6)$$

根据最小二乘估值原理, 可得到 \mathbf{x}_0 的估值

$$\hat{\mathbf{x}}_0 = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{y} \quad (7)$$

对于星上自主生成星历算法, 需要提高算法处理数据的效率, 降低计算工作量, 由此引入递推最小二乘估计算法。由于递推过程中信息矩阵的正定性会逐渐减小, 新的观测信息对估计值的改进作用降低, 出现“数据饱和”^[7]。为了解决这一问题, 提出通过在以前处理的数据乘以遗忘因子, 形成所谓的渐消记忆的递推算法。下面给出遗忘因子的非线性最小二乘递推算法:

Step 1 选取估值和信息矩阵初值 $\hat{\mathbf{X}}_0, \mathbf{P}_0$ (采用前 q 次观测数据计算 $\hat{\mathbf{X}}_0 = \mathbf{P}_0 \mathbf{H}_q^T \mathbf{W}_q \mathbf{Y}_q, \mathbf{P}_0 = (\mathbf{H}_q^T \mathbf{W}_q \mathbf{H}_q)^{-1}$), 设置遗忘因子 λ , 容许误差 δ 。

Step 2 获取第 $j+1$ 次观测矢量和观测矩阵, 计算增益矩阵 $\mathbf{K}_{j+1} = \mathbf{P}_j \mathbf{h}_{j+1}^T (\lambda \mathbf{w}_{j+1}^{-1} + \mathbf{h}_{j+1} \mathbf{P}_j \mathbf{h}_{j+1}^T)^{-1}$, 参数估值 $\hat{\mathbf{X}}_{j+1} = \hat{\mathbf{X}}_j + \mathbf{K}_{j+1} (\mathbf{y}_{j+1} - \mathbf{h}_{j+1} \cdot \hat{\theta}_j)$ 。

Step 3 更新增益矩阵 $\mathbf{K}_{j+1}^* = \mathbf{P}_j \mathbf{h}_{j+1}^T (\lambda \mathbf{w}_{j+1}^{-1} + \mathbf{h}_{j+1} \mathbf{P}_j \mathbf{h}_{j+1}^T)^{-1}$ 和参数估值 $\hat{\mathbf{X}}_{j+1} = \hat{\mathbf{X}}_j + \mathbf{K}_{j+1}^* \cdot \mathbf{v}_{j+1}$, 计算信息矩阵 $\mathbf{P}_{j+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{j+1}^* \mathbf{h}_{j+1}) \cdot \mathbf{P}_j / \lambda$ 。

Step 4 若连续 3 次出现 $|\hat{\mathbf{X}}_{j+1} - \hat{\mathbf{X}}_j|^T (\hat{\mathbf{X}}_{j+1}$

$-\hat{\mathbf{X}}_j)| < \delta$, 则停止递推计算, $\hat{\mathbf{X}}_{j+1}$ 为所求估值; 否则返回 Step 2 继续递推迭代, 以获得较为准确的估计值。

该算法的迭代递推公式为

$$\mathbf{K}_{j+1} = \mathbf{P}_j \mathbf{h}_{j+1}^T (\lambda \mathbf{w}_{j+1}^{-1} + \mathbf{h}_{j+1} \mathbf{P}_j \mathbf{h}_{j+1}^T)^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{j+1} = \hat{\mathbf{X}}_j + \mathbf{K}_{j+1} \mathbf{v}_{j+1}$$

$$\Phi_{j+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{j+1} \mathbf{h}_{j+1}) \Phi_j - \mathbf{K}_{j+1} (\lambda \mathbf{w}_{j+1}^{-1} + \mathbf{h}_{j+1} \mathbf{P}_j \mathbf{h}_{j+1}^T)^{-1} \mathbf{v}_{j+1}$$

$$\mathbf{P}_{j+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{j+1} \mathbf{h}_{j+1}) \cdot \mathbf{P}_j / \lambda$$

权矩阵 \mathbf{w}_{j+1} 可以采用基于残差取权方法确定, 记残差 $\mathbf{v}_{j+1} = [\nu_1, \nu_2, \nu_3]^T = \mathbf{y}_{j+1} - \mathbf{h}_{j+1} \cdot \hat{\theta}_{j+1}$, 令 $s^2 = \sum_{i=1}^3 1/\nu_i^2$, 取 $w_i = (1/\nu_i^2)/s^2$, 则 $\mathbf{w}_{j+1} = \text{diag}[w_1, w_2, w_3]$ 。

2 广播星历参数无奇异变换方法

对于导航卫星出现小偏心率或小倾角轨道的特殊情况, 广播星历的最小二乘估计求解需作相应处理。事实上, 当基本变量为开普勒根数时, 位置矢量 \mathbf{r} 对开普勒根数的偏导数为下列矩阵:

$$\left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right) = \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial a} \quad \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial e} \quad \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial i} \quad \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \Omega} \quad \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \omega} \quad \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial M} \right) \quad (8)$$

对于列向量 $\partial \mathbf{r} / \partial \omega$ 和 $\partial \mathbf{r} / \partial M$, 不难证明^[8]

$$\left| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \omega} - \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial M} \right| = \left| (\hat{\mathbf{R}} \times \mathbf{r}) - \frac{\dot{\mathbf{r}}}{n} \right| = O(e) \quad (9)$$

而对于列向量 $\partial \mathbf{r} / \partial \omega$ 和 $\partial \mathbf{r} / \partial \Omega$, 则有^[8]

$$\left| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \omega} - \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \Omega} \right| = \left| (\hat{\mathbf{R}} \times \mathbf{r}) - (\hat{\mathbf{j}}_z \times \mathbf{r}) \right| = O(\sin i) \quad (10)$$

其中: $\hat{\mathbf{R}} = (\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}) / \sqrt{\mu a (1 - e^2)}$, $\mu = 3.986005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ 为地球引力常数; $\hat{\mathbf{j}}_z = (0 \quad 0 \quad 1)^T$ 。

式(9)、(10)表明矩阵 $(\partial \mathbf{r} / \partial \boldsymbol{\sigma})$ 分别存在两列元素之差为 $O(e)$ 和 $O(\sin i)$ 的量级, 当出现两种奇点的情况, $e \approx 0, i \approx 0$ 或 180° , 相应的矩阵行列式为 0, 这将导致法化矩阵非正定, 从而破坏了可观测性。对于 $i \approx 0$ 或 180° 的情况, 升交点的物理意义不明确, 法矩阵 $\mathbf{H}^T \mathbf{H}$ 接近奇异, 导致迭代不收敛。解决这个奇点问题, 可在星历参数拟合前, 对导航卫星轨道进行基于轨道倾角的旋转变换, 消除轨道倾角出现奇异的情况, 具体方法参考文献[5]; 对于 $e \approx 0$ 情况, 可采用将卫星近地点角距强制定义为 0, 进行拟合广播星历, 但是拟合精度不好, 甚至可能出现偏心率 e 为负数的情况。

本文针对 $e \approx 0$ 的情况, 引入无奇异轨道根数 $a, i, \Omega, \xi, \eta, \lambda$ 替换开普勒根数 $a, e, i, \Omega, \omega, M$:

$$a, i, \Omega, \xi = e \cos \omega, \eta = -e \sin \omega, \lambda = M + \omega \quad (11)$$

式(5)中基于无奇异轨道根数的广播星历参数的偏导数矩阵 $\partial \mathbf{Y} / \partial \mathbf{X}$ 公式如下:

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial (\Delta n)} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \dot{\boldsymbol{\Omega}}} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial (di/dt)} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial C_{ic}} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial C_{is}} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial (\sqrt{a})} = \frac{2}{\sqrt{a}} \mathbf{r} \quad \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial M} = \frac{\dot{\mathbf{r}}}{n} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial i} = r \sin u \begin{pmatrix} \sin i \sin \Omega \\ -\sin i \cos \Omega \\ \cos i \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \Omega} = r \begin{pmatrix} -\cos u \sin \Omega - \sin u \cos i \cos \Omega \\ \cos u \cos \Omega - \sin u \cos i \sin \Omega \\ 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi} = \xi_1 \mathbf{r} + \xi_2 \dot{\mathbf{r}} \quad \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \eta} = \eta_1 \mathbf{r} + \eta_2 \dot{\mathbf{r}} \quad (16)$$

其中:

$$\begin{cases} \xi_1 = [-a(\cos u + \xi) - r(\sin u - \eta)(\xi \sin u + \eta \cos u)/(1 - e^2)] / p \\ \xi_2 = r [a \sin u - a^2 \eta \sqrt{1 - e^2} / (r(1 + \sqrt{1 - e^2})) + r(\sin u - \eta)/(1 - e^2)] / \sqrt{\mu p} \\ \eta_1 = [a(\sin u - \eta) - r(\cos u + \xi)(\xi \sin u + \eta \cos u)/(1 - e^2)] / p \\ \eta_2 = r [a \cos u - a^2 \xi \sqrt{1 - e^2} / (r(1 + \sqrt{1 - e^2})) + r(\cos u + \xi)/(1 - e^2)] / \sqrt{\mu p} \end{cases}$$

$p = a(1 - e^2), r = \sqrt{\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}}, u = f + \omega; \mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}$ 为卫星位置、速度矢量。

该算法迭代拟合得到 ξ, η, λ 后,需要归一化到基于开普勒根数的广播星历参数,再对外进行发布,其归一化公式为: $e = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}; \omega = a \tan(-\eta/\xi); M = \lambda - \omega$ 。如此将保证偏心率 e 为正数,它的正负性质会转移到卫星近地点角距 ω 。

3 仿真计算与分析

广播星历拟合精度是指广播星历对精密星历的逼近程度,产生精密星历的算法以及精密星历本身精度对广播星历拟合精度的影响应该很小,甚至可以忽略不计,因此,导航卫星的广播星历拟合精度分析并不考虑精密星历本身精度^[9]。设 GEO(静止轨道)卫星长半轴 42 164km, 偏心率 0, 轨道倾角 0°; IGS0(倾斜静止轨道)卫星长半轴 42 164km, 偏心率 0, 轨道倾角 55°。卫星轨道起始历元为: 1 Jun 2010 00:00:00。用以产生导航卫星精密星历数据的力学模型为 21 × 21 阶地球引力场、日月引力、太阳辐射光压、潮汐摄动、大气阻力摄动等^[10]。设置遗忘因子 $\lambda = 0.9$, 容许误差 $\delta = 1 \times 10^{-8}$, 采用前 4 次观测数据计算 $\mathbf{X}_0, \mathbf{P}_0$ 。

图 1、图 3 分别给出了 GEO、IGSO 卫星在 60s 数据采样间隔的条件下, 5h 弧段长度的广播星历

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial C_{us}} = r \sin 2u \begin{pmatrix} -\sin u \cos \Omega - \cos u \cos i \sin \Omega \\ -\sin u \sin \Omega + \cos u \cos i \cos \Omega \\ \cos u \sin i \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial C_{uc}} = r \cos 2u \begin{pmatrix} -\sin u \cos \Omega - \cos u \cos i \sin \Omega \\ -\sin u \sin \Omega + \cos u \cos i \cos \Omega \\ \cos u \sin i \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial C_{rs}} = \sin 2u \begin{pmatrix} \cos u \cos \Omega - \sin u \cos i \sin \Omega \\ \cos u \sin \Omega + \sin u \cos i \cos \Omega \\ \sin u \sin i \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial C_{rc}} = \cos 2u \begin{pmatrix} \cos u \cos \Omega - \sin u \cos i \sin \Omega \\ \cos u \sin \Omega + \sin u \cos i \cos \Omega \\ \sin u \sin i \end{pmatrix} \quad (20)$$

的位置拟合误差与外推误差。广播星历参考历元取轨道起始历元: 1 Jun 2010 00:00:00.000 UTCG, 由广播星历计算轨道与前 1h 导航卫星精密星历的误差, 称为拟合误差; 由广播星历计算轨道与后 4h 导航卫星精密星历的误差, 称为外推误差。横坐标为相对于卫星轨道起始历元的时间, 纵坐标为位置拟合误差, 分别为导航卫星的位置(Position)误差、X 方向误差(X)、Y 方向误差(Y)和 Z 方向误差(Z)。图 2、图 4 分别给出了 GEO、IGSO 卫星广播星历的速度拟合误差与外推误差, 横坐标为相对于卫星轨道起始历元的时间, 纵坐标为速度拟合误差, 分别为导航卫星的速度

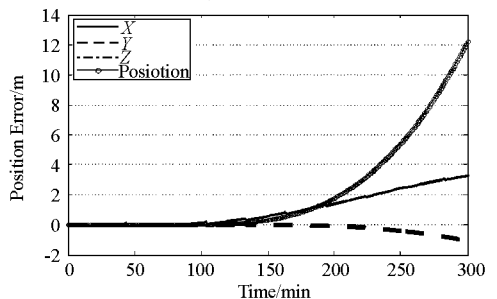


图 1 GEO 广播星历位置拟合及外推精度
Fig.1 Accuracy of position data fitting and extrapolation on GEO

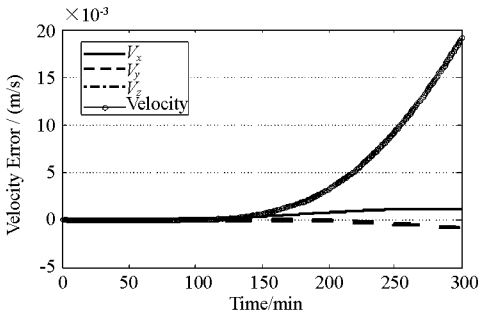


图2 GEO 广播星历速度拟合及外推精度
Fig.2 Accuracy of velocity data fitting and extrapolation on GEO

快,外推 4h 位置误差达到了 12m,速度误差达到了 0.02m/s,这将影响卫星导航定位,需要及时更新星历;外推误差主要体现在 Z 方向上,这是由于 GEO 星历拟合采用了轨道倾角旋转处理方法。

(2)对于 IGSO 卫星,广播星历在 1h 弧段数据位置拟合误差均方差为 0.045m,速度拟合误差均方差为 0.00018m/s,位置拟合误差约为等效伪距误差中卫星星历误差(4.2m)^[9]的百分之一,可满足卫星导航定位精度要求。外推误差随时间迅速增大,外推 4h 位置误差达到了 13m,速度误差达到了 0.023m/s,这将影响卫星导航定位,需要及时更新星历;外推误差主要体现在 Y、Z 方向上。

(3)GEO、IGSO 卫星,偏心率近似为 0,且轨道高度较高,若采用传统广播星历参数的拟合算法,其法化矩阵 $H^T H$ 会接近奇异,无法迭代求解;而采用基于无奇异轨道根数的广播星历参数的拟合算法,可克服法化矩阵奇异的问题。

GEO 卫星广播星历迭代收敛的递推次数为 26,IGSO 卫星广播星历迭代收敛的递推次数为 24,都较快地收敛到稳定值。由于采用无奇异轨道根数代替经典开普勒根数形成改进广播星历参数进行迭代求解,最后还要归一化到传统广播星历参数对外发布,而在开普勒根数转换到无奇异根数过程中会存在一定的精度损失。

为体现该算法处理数据的快速性,以 IGSO 卫星的广播星历拟合为例,与文献[11]给出的广播星历参数拟合算法进行比较(设置遗忘因子 $\lambda = 0.9$,容许误差 $\delta = 1 \times 10^{-8}$,取 1h 弧段长度,数据采样间隔 60s)。表 1 给出了方案 1(论文提出的拟合算法)和方案 2(文献[11]给出的拟合算法,考虑调和项影响)的仿真结果。

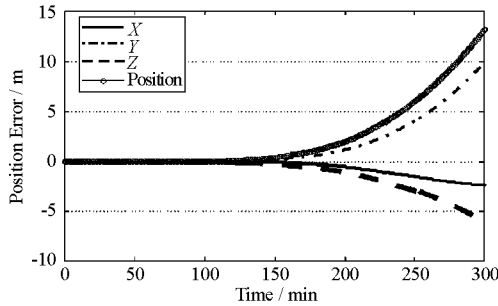


图3 IGSO 广播星历位置拟合及外推精度
Fig.3 Accuracy of position data fitting and extrapolation on IGSO

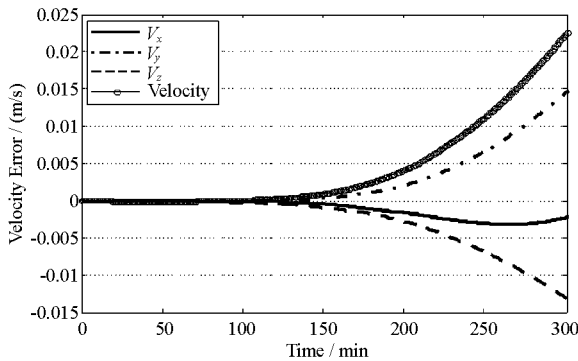


图4 IGSO 广播星历速度拟合及外推精度
Fig.4 Accuracy of velocity data fitting and extrapolation on IGSO

(Velocity) 误差、X 方向误差 (V_x)、Y 方向误差 (V_y)和 Z 方向误差(V_z)。

由图 1~图 4 可知:

(1)GEO 卫星广播星历在 1h 弧段数据位置拟合误差均方差为 0.043m,速度拟合误差均方差为 0.0002m/s,位置拟合误差均方差约为等效伪距误差中卫星星历误差(4.2m)^[9]的百分之一,可满足卫星导航定位精度要求。外推误差随时间增加较

表 1 广播星历参数的拟合误差和拟合效率

Tab.1 Fitting errors and efficiency of broadcast ephemeris parameters

	位置误差均方差(m)	速度误差均方差(m/s)	收敛时的迭代次数	计算偏导数的时间
方案 1	0.045	0.00018	24	1×10^6 次 58s
方案 2	0.042	0.00016	26	2.8×10^6 次 89s

由计算结果可以看出,相对于方案 2,方案 1 的广播星历参数的拟合误差略微大一些,但是方案 1 的拟合效率较高,可以提高数据处理能力,适用于星上自主星历更新。

48th Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Florida, USA, January, 2010.

[7] Li Y W. Dynamics Modeling and Simulation of Flexible Airship [D]. Montreal: Doctoral dissertation of Department of Mechanical

Engineering, McGill University, 2008.

[8] Isidori A. Nonlinear Control Systems [M]. London: Bertelsmann Springer Publishing Group, 2005.

(上接第 4 页)

4 结论

广播星历参数拟合算法研究,不仅对用户导航定位精度的提高具有重要意义,而且对我国卫星导航定位系统广播星历参数设计具有一定参考价值。文中针对导航卫星星载计算机处理能力有限,引入基于遗忘因子的递推最小二乘估计算法实现快速拟合广播星历,提高了数据处理能力;针对导航卫星轨道偏心率近似为 0,提出基于无奇异变换的广播星历在轨实时拟合算法,采用无奇异轨道根数代替经典开普勒根数形成改进广播星历参数进行迭代求解方法,解决了参数拟合过程中法化矩阵奇异问题。通过对 GEO、IGSO 卫星仿真结果分析得知,该方法数据处理速度相对较快,满足星上自主生成星历技术要求,且广播星历拟合精度较好,满足用户实时导航定位精度要求。

参考文献:

[1] 帅平,曲广吉,陈忠贵. 导航星座自主导航技术研究[J].

(上接第 13 页)

3 结论

本文采用经典成核理论,将描述湿蒸汽两相凝结流动的气相和液相控制方程进行耦合求解,采用维里状态方程对模型做进一步的完善,并且采用经典实验结果对数值仿真算法进行了校验,对超声速环型蒸汽引射系统进行了初步的设计和数值仿真,主要结论如下:

(1)在不发生壅塞的条件下,适当地减小收敛比,可以使得扩张段的激波串向上游移动,也能减少甚至消除蒸汽的再次冷凝,提高扩张段的总压恢复系数,改善引射器性能。

(2)在保证引射器能启动的条件下,适当地减小面积比,会提高引射系数。增大二次喉道的长径比可以使得二次喉道出口气流静压分布更均

中国工程科学,2006,8(3):22-30.

[2] Weber T, Ray J, Kouba J. Review of IGS Analysis Products[C]//IGS Network, Data and Analysis Center Workshop, Ottawa, 2002.
[3] Rajan J A, Orr M. On-orbit Validation of GPS II - R Autonomous Navigation [C]//Proceedings of the ION 59th Annual Meeting, Albuquerque, NM, June 23 - 25, 2003: 411 - 419.
[4] 朱俊,文援兰,廖瑛. 一类适用于各种轨道类型的导航卫星广播星历研究[J]. 航天控制. 2005.
[5] 刘光明,廖瑛,文援兰. 导航卫星广播星历参数拟合算法研究[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(3): 100 - 104.
[6] 袁建平,罗建军,岳晓奎. 卫星导航原理与应用[M]. 北京:中国宇航出版社, 2003.
[7] 刘谢进,杨格兰,霍玉洪. 递推加权最小二乘算法的研究[J]. 系统仿真学报, 2009,21(14):4248 - 4250.
[8] Escobar P R. Methods of Orbit Determination[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1965.
[9] 阳仁贵,欧吉坤,闻德保. GPS 广播星历误差及定位结果的影响[J]. 测绘信息与工程. 2006.
[10] 刘林. 人造地球卫星轨道力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1992.
[11] 崔先强,焦文海,秦显平. GPS 广播星历参数拟合算法的探讨[J]. 测绘科学, 2006,31(1): 25 - 26.

匀,也可以提高扩张段的总压恢复系数。

参考文献:

[1] 刘泽军. 蒸汽引射系统凝结流动过程数值研究[D]. 长沙:国防科技大学,2009.
[2] 黄生洪,徐胜利,李俊杰,等. 水蒸汽凝结对超声速风洞蒸汽引射系统的影响[J]. 推进技术,2005,26(5).
[3] Daiguji H, Ishazaki K, Ikohagi T. A High-resolution Numerical Method for Transonic Non-equilibrium Condensation Flows Through a Steam Turbine Cascade [C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Computational Fluid Dynamics, 1995:479 - 484.
[4] Young J B. An Equation of State for Steam for Turbo Machinery and Other Flow Calculations[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1998, 110: 1 - 7.
[5] Moses C A, Stein G D. On the Growth of Steam Droplets Formed in a Laval Nozzle Using Both Static Pressure and Light Scattering Measurements[J]. J. of Fluid Engineering, Sep 1978, 100:311 - 322.
[6] Zori L, Kelecy F. Wet Steam Flow Modeling in a General CFD Flow Solver[C]//35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit 6 - 9, Toronto Ontario Canada, 2005.