

# 绳系卫星系绳参数的实时估计方法

何勇, 梁斌, 徐文福, 郭碧波

(哈尔滨工业大学 空间智能研究所, 哈尔滨 150001, heyong2004@163.com)

**摘要:** 研究了绳系卫星在轨运动中系绳参数的实时估计方法. 分析了现有的估计方法所存在的问题, 引入三轴张力计的测量信息和扩展 Kalman 滤波方法, 提出了系绳摆角在大角度变化时系绳参数的实时估计方法, 并进行了详细的推导与论证. 最后, 通过仿真验证了上述估计方案和算法的有效性, 且获得了较好的估计精度.

**关键词:** 绳系卫星; 系绳参数; 大角度; 实时估计

中图分类号: V47

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)07-1033-05

## Real-time estimation method on tether parameters for tether satellite

HE Yong, LIANG Bin, XU Wen-fu, GUO Bi-bo

(Institute of Space Intelligent System, Harbin Institute Technology, Harbin 150001, China, heyong2004@163.com)

**Abstract:** To study the real-time estimation method on tether parameters for orbital motion of tethered satellite system, after analyzing the main problems in current estimation methods, the measurement information of a three-axis tether tensiometer and the extended Kalman filter were introduced, then a real-time estimation method was developed for large-angle change on tether swaying angle. This estimation method was deduced and demonstrated in detail. Finally, the validity of the estimation method was verified by simulation results and a preferable estimation precision was obtained.

**Key words:** tether satellite; tether parameters; large angle; real-time estimation

绳系卫星系统(Tethered satellite system, 简称 TSS)是指由两颗或两颗以上的卫星通过系绳相连所构成的系统. 该系统虽然结构并不复杂, 但却具有广阔的应用前景, 如: 太空发电、人工重力、变轨飞行、处理太空垃圾以及大气层的研究等等<sup>[1-3]</sup>. 为保证 TSS 在轨应用的正常运行, 有大量的学者对其控制方法进行过研究<sup>[4-7]</sup>, 这些研究均是基于系绳参数精确已知的情况下开展的, 而在实际工程应用中, 如何获得这些参数的精确值是一个需要解决的问题. 系绳的长度和长度的速率信息可以通过采用系绳速率控制的方法来获得, 但系绳的面内、面外摆角及其相应角速率的获得比较困难, 可以考虑通过系绳的动力学方程来求得, 但对于柔性的系绳动力学方程存在着求解困难、计算量大以及计算效率差等不利因素, 故上

述文献的动力学方程都进行了简化, 这势必会使实际值与真实值产生偏差, 且简化次数越多, 该偏差值越大, 仍用此参数信息作为 TSS 的控制信号将会使 TSS 的运动控制效果变差甚至失稳.

关于系绳参数的估计方法, T. S. Denney, Jr<sup>[8]</sup> 和 M. E. Greene<sup>[9]</sup> 考虑过以三轴张力计为测量信息, 通过 Kalman 滤波方法完成对系绳的面内、面外摆角及其相应角速率的估计, 但 M. E. Greene 的方法适用于面外摆角为小角度的情况, 而 Denney T. S., Jr 的滤波算法适合用于系绳参数的离线估计, 对于系绳参数的实时估计将会由于计算量太大而无法实现. P. Tortora<sup>[10]</sup> 等在 M. E. Greene 方法的基础上引入三轴磁强计的测量信息研究过电动力系绳参数的估计方法, 但 P. Tortora 的方法只适合用于具有电动力系绳的 TSS.

本文在 T. S. Denney, Jr 和 M. E. Greene 方法的基础上, 对系绳动力学方程进行简化并对简化

收稿日期: 2009-04-16.

作者简介: 何勇(1981—), 男, 博士研究生;

梁斌(1968—), 男, 教授, 博士生导师.

后所带来的影响进行了研究,解决了系绳在大角度变化时系绳参数的实时估计问题.

### 1 系绳动力学的基本知识

为便于下文的讨论,本文的 TSS 由两颗卫星组成,系绳的运动控制机构安装在主星  $S_1$  上,其示意图如图 1 所示.

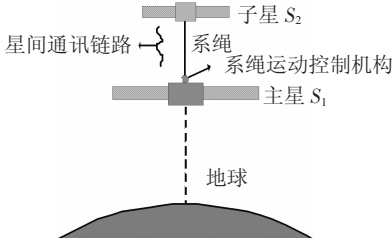


图 1 TSS 结构示意图

#### 1.1 基本定义

在对 TSS 的研究过程中,常常将主星和子星看成两个质点  $S_1$  和  $S_2$ <sup>[10]</sup>,  $S_1, S_2$  在轨道坐标系的关系及其系统构型如图 2 所示.

下面对参数和坐标系进行定义.

1) 参数定义.  $l, \dot{l}$  分别为系绳的长度及其速率;  $\alpha, \dot{\alpha}$  为系绳的面内摆角及其速率;  $\beta, \dot{\beta}$  为系绳的面外摆角及其速率;  $R, \dot{R}$  为系统质心的地心距及其速率;  $u, \dot{u}$  为系统质心的纬度幅角及其速率;  $M$  为系统的总质量,且  $M = m_1 + m_2 + m_l, m_1$  是主星质量,  $m_2$  是子星质量,  $m_l$  是系绳的质量 ( $m_l = \rho l, \rho$  为系绳线密度);  $T_l$  为系绳的拉力;  $t$  为系绳的运动控制时间.

2) 坐标系定义. 系统质心轨道坐标系 ( $O_o X_o Y_o Z_o$ , 简称轨道坐标系): 其坐标原点  $O_o$  为系统质心,  $Y_o$  轴由地心指向系统质心,  $Z_o$  轴位于轨道平面内垂直于  $Y_o$  轴, 并指向在轨飞行的前进方向;  $X_o$  轴使得  $O_o X_o Y_o Z_o$  构成右手正交系.

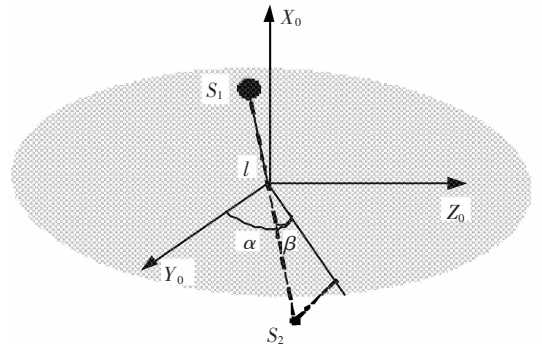
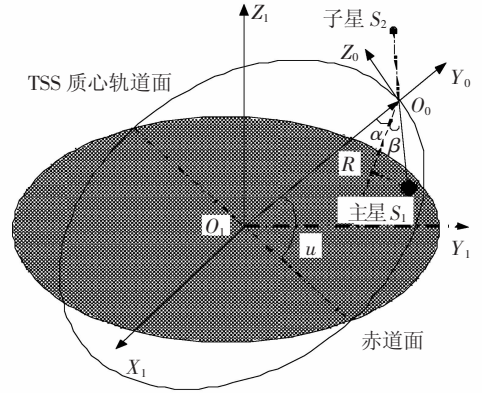


图 2 系统构型和坐标系定义

本体坐标系: 原点为子星释放前主星和子星对接面的中心,  $O_b Y_b$  通过坐标原点, 垂直于星箭对接面, 指向子星方向, 在对地定向状态下背向地心;  $O_b Z_b$  通过坐标原点与  $O_b Y_b$  成  $+90^\circ$  方向, 在对地定向状态下指向前进方向;  $O_b X_b$  按右手法则确定, 在对地定向状态下为轨道面的法线方向.  $O_b X_b Y_b Z_b$  坐标系为直角坐标系, 与主星固连. 然而本文的主星被当成质点, 所以图 2 中未对该坐标系表达.  $O_l X_l Y_l Z_l$  为 J2000 地心惯性坐标系.

#### 1.2 动力学方程

TSS 典型的动力学方程如下式所示<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \ddot{l} = -\mu_1 \dot{l}^2/l + \mu_2 l [\dot{\beta}^2 + (\dot{u} + \dot{\alpha})^2 \cos^2 \beta + \mu (3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta - 1)/R^3] - T_l M / [m_1 (m_2 + m_l)], \\ \ddot{\alpha} = 2R\dot{u}/R - (\dot{u} + \dot{\alpha}) [(2 + \mu_3) \dot{l}/l - 2\dot{\beta} \tan \beta] - (3\mu/2R^3) (\sin 2\alpha + M^* \dot{l} \sin 2\alpha \cos^2 \beta / (MR^2)), \\ \ddot{\beta} = - (2 + \mu_3) \dot{\beta} \dot{l}/l - 0.5 (\dot{u} + \dot{\alpha})^2 \sin 2\beta - 3\mu \cos^2 \alpha \sin 2\beta / (2R^3). \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= (2m_1 - M)m_l / (2m_1(m_2 + m_l)), \\ \mu_2 &= (m_2 + m_l/2) / (m_2 + m_l), \\ \mu_3 &= 2(m_1(m_2 + m_l/2) / MM^* - 1). \end{aligned}$$

直接对方程(1)微分计算可得系绳参数值的大小, 但方程(1)是忽略系绳的弹性和柔性情况下所建立的, 有弹性并且可弯曲的系绳更加接近于实际情况, 因此直接对方程(1)求解的值与真实值的大小会产生偏差. 为提高简化系绳动力学方程时系绳参数的估计精度, 本文引入三轴张力

计的测量信息, 按 2.2.1 节中的方法对方程(1)进一步简化, 结合扩展 Kalman 滤波方法完成了对系绳摆角大角度变化时系绳参数的实时估计.

### 2 系绳参数的实时估计方法

#### 2.1 问题的描述

有弹性且可弯曲的系绳更接近实际情况, 但系绳的柔性动力学存在着求解困难、计算量大以及计算效率差等不利因素. 针对这一问题, T. S. Denney, Jr<sup>[8]</sup> 和 M. E. Greene<sup>[9]</sup> 考虑过以三轴张

力计为测量信息,通过 Kalman 滤波器完成对  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\dot{\alpha}$  以及  $\dot{\beta}$  的估计,仿真结果表明能够实现对角度和角速率的估计,其估计误差也是在可接受的范围内,但存在以下有待改进的地方。

1) T. S. Denney, Jr 的滤波算法适合于系绳参数的离线估计,对于绳系卫星系统参数的实时估计将会由于计算量太大而无法实现。

2) M. E. Greene 的方法适合面外摆角为小角度的情况,其状态变量为  $\mathbf{X} = [\theta \ \varphi \ \dot{\theta} \ \dot{\varphi}]^T$ 。

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = -2\eta(\dot{\theta} + \omega) - 1.5\omega^2 \sin 2\theta, \\ \ddot{\varphi} = -2\eta\dot{\varphi} - \omega^2\varphi - 3\omega^2\varphi \cos^2\theta. \end{cases} \quad (2)$$

方程(2)中的  $\theta$  和  $\varphi$  分别为本文中的  $\alpha$  和  $\beta$ ,  $\eta = \dot{l}/l, \omega^2 = \mu/R^3$ 。选用方程(2)作为滤波器算法的状态方程相比 T. S. Denney, Jr 的方法能使滤波算法得到简化,但该状态方程是假设系绳面外摆角为  $\pm 10^\circ$  范围内展开所得的。若面外摆角  $\varphi$  的值在  $\pm 10^\circ$  以外,由于此时  $\varphi$  不能再当成小量对待,仍用此滤波算法将会使估计误差的收敛性变差甚至发散。

为扩大 M. E. Greene 方法的使用范围,有必要解决 M. E. Greene 方法中的不足,即解决系绳在大角度变化时系绳参数的实时估计问题。

## 2.2 系绳参数估计的实现

TSS 控制需要的是角度和角速率信息,而对于本文所讨论的三轴张力计测量系统,仅能按一定周期提供三轴方向的张力信息,而不能提供角度和角速率信息,因此必须借助其他的测量敏感器的信息并设计估计算法来得到角度和角速率的信息。考虑到使用动态滤波技术可以降低测量误差对估计精度的影响,本文使用扩展 Kalman 滤波的方法来完成角度和角速率的估计。

2.2.1 状态方程 直接将方程(1)作为滤波器的状态方程进行滤波估计,虽然能够获得较好的滤波结果,但会使滤波算法的复杂性增加,鉴于该方面考虑,本文在  $m_1/m_1, m_2/m_1$  以及  $l/R$  为小量的情况下(即忽略  $l/R$  的二阶小量,且  $\mu_3 = 0$ ),将方程(1)写成如下形式:

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} = 2\dot{R}\dot{\alpha}/R - 2(\dot{u} + \dot{\alpha})(\dot{l}/l - \dot{\beta}\tan\beta) - (3\mu\sin 2\alpha)/(2R^3), \\ \ddot{\beta} = -2\dot{l}\dot{\beta}/l - 0.5(\dot{u} + \dot{\alpha})^2 \sin 2\beta - (3\mu\cos^2\alpha \sin 2\beta)/(2R^3). \end{cases}$$

取状态变量为  $\mathbf{X} = [\alpha \ \beta \ \dot{\alpha} \ \dot{\beta}]^T$ ,则状态方程可表示为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}[\mathbf{X}] + \mathbf{w}. \quad (3)$$

由式(3)得离散状态下的转移矩阵  $\Phi((k +$

$1)/k)$  为(离散时间  $T$  为小量的情况)

$$\Phi((k + 1)/k) = \mathbf{I} + \mathbf{F}(t_k)T.$$

其中,  $\mathbf{w}$  为系统噪声向量,  $\mathbf{f}[\mathbf{X}]$  和  $\mathbf{F}(t)$  分别为  $\mathbf{f}[x(t)] =$

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ 2\dot{R}\dot{\alpha}/R - 2(\dot{u} + \dot{\alpha})(\dot{l}/l - \dot{\beta}\tan\beta) - (3\mu\sin 2\alpha)/(2R^3) \\ -2\dot{l}\dot{\beta}/l - 0.5(\dot{u} + \dot{\alpha})^2 \sin 2\beta - (3\mu\cos^2\alpha \sin 2\beta)/(2R^3) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & F_{34} \\ F_{41} & F_{42} & F_{43} & F_{44} \end{bmatrix}.$$

其中:

$$F_{31} = - (3\mu/R^3) \cos 2\alpha, F_{32} = 2(\dot{u} + \dot{\alpha})\dot{\beta}\sec^2\beta,$$

$$F_{33} = -2(\dot{l}/l) + 2\dot{\beta}\tan\beta, F_{34} = 2(\dot{u} + \dot{\alpha})\tan\beta,$$

$$F_{41} = (3\mu\sin 2\alpha \sin 2\beta)/(2R^3),$$

$$F_{42} = - [(\dot{u} + \dot{\alpha})^2 + (3\mu\cos^2\alpha)/R^3] \cos 2\beta,$$

$$F_{43} = - (\dot{u} + \dot{\alpha}) \sin 2\beta, F_{44} = -2\dot{l}/l.$$

2.2.2 量测方程 方程(1)表明动力学方程的建立是在系绳为刚性体并忽略其弹性的基础上,与前面提到的情况一样,直接对其求解势必会使计算值与真实值产生偏差,为此引入三轴张力计的测量信息,结合姿态敏感器的测量信息,通过扩展 Kalman 滤波器方法来完成系绳面内、面外摆角及其相应角速率信息的估计,其量测方程可表示为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}(\mathbf{X}) + \mathbf{u}.$$

式中:  $\mathbf{u}$  为量测噪声向量,且  $\mathbf{w}$  和  $\mathbf{u}$  均为独立的零均值高斯白噪声,  $\mathbf{H}(\mathbf{X})$  表达式如下:

$$\mathbf{H}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} F_{bx} \\ F_{by} \\ F_{bz} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{\text{err}} \mathbf{C}_{\text{bo}} \begin{bmatrix} -T_i \sin\beta \\ T_i \cos\beta \cos\alpha \\ T_i \cos\beta \sin\alpha \end{bmatrix}$$

其中  $\mathbf{C}_{\text{err}}$  为三轴张力计的安装误差,可通过测量部件的标定得出;  $\mathbf{C}_{\text{bo}}$  为系统质心轨道坐标系到本体坐标系的转换矩阵,可通过姿态敏感器的测量信息来获得.需要加以说明的是当  $|\mathbf{F} = \mathbf{0}|$  成立时,系绳保持松弛状态或松弛状态的临界值,此时的系统不再为 TSS<sup>[12]</sup>,仍用此滤波算法进行系绳参数的估计是没有实际意义的,因此  $|\mathbf{F} = \mathbf{0}|$  是否成立可当作滤波算法的使用条件。

2.2.3 扩展 Kalman 滤波方法 扩展 Kalman 滤波方法的步骤如下:

1) 计算滤波值的预测值.数值积分  $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X})$  (本文采用四阶龙格-库塔方法),得到  $\mathbf{X}((k + 1)/k)$ 。

2) 估计误差的协方差矩阵.

$$P((k+1)/k) = \Phi((k+1)/k)P(k/k)\Phi((k+1)/k)^T + Q(k+1).$$

式中:  $Q(k+1)$  为系统动态噪声方差

3) 最优增益矩阵.

$$K(k+1) = P((k+1)/k)H^T(k+1)([R(k+1) + H(k+1)P((k+1)/k)H(k+1)^T]^{-1}).$$

式中  $R(k+1)$  为测量噪声方差,  $H(k+1)$  为量测方程在  $t_{k+1}$  时刻对状态的偏导数.

4) 最优滤波值.

$$\hat{X}(k+1) = \hat{X}((k+1)/k) + K(k+1)[Z(k+1) - H(\hat{X}((k+1)/k), k)].$$

5) 估计误差协方差矩阵的递推.

$$P((k+1)) = (I - K(k+1)H(k+1))P((k+1)/k).$$

### 3 仿真研究

#### 3.1 仿真条件

选系绳的回收阶段作为研究对象,其控制率为

$$\begin{cases} L = L_{if} + (L_{ii} - L_{if})e^{-ct}, \\ L = -c(L_{ii} - L_{if})e^{-ct}. \end{cases}$$

系绳释放的阶段中,随着绳长的增加,其面内和面外摆角及角速率将趋于零,此时对角度和角速率的估计不能突出滤波器的作用;系绳回收的阶段中,随着绳长的减小,其面内和面外的角速率将逐渐增大(这里是指系绳的面外摆角和角速率初值不为零的情况下,若系绳面外摆角和角速率初值为零,则系绳面外摆角和角速率一直为零)<sup>[13-14]</sup>. 为此本文选 TSS 的回收及其终了阶段的运动控制作为研究对象.

TSS 质心运行于轨道高度为 500 km 的圆轨道上,主星和子星的质量分别为  $m_1 = 14\ 000\text{ kg}$  和  $m_2 = 1\ 000\text{ kg}$ ;系绳的线密度  $\rho_l = 1\text{ kg/km}$ . 系绳回收控制中的起始长度  $L_{ii} = 50\text{ km}$ ;回收控制终了时的系绳长度  $L_{if} = 45\text{ km}$ ;  $c = 5e^{-3[9]}$ .

系绳的动力学模型考虑了系绳的弹性和柔性<sup>[15]</sup>,系绳面内、面外摆角及其角速率的初始值为  $[0\ 10\ 0.13\ 0]^T$ ,角度和角速率单位分别为  $(^\circ)$  和  $(^\circ)/s$ ,滤波器的初始值为  $[-1\ 11\ 0\ 0]^T$ .

三轴张力计的测量精度<sup>[9]</sup>为  $[10^{-3}\ 10^{-3}\ 10^{-3}]N$ . 滤波器的采样时间为 1 s,仿真时间为 5 000 s.

#### 3.2 仿真结果

图 3 为 TSS 运动过程中系绳长度的变化,图 4~6 为系绳参数的估计值及其相应的估计误差.

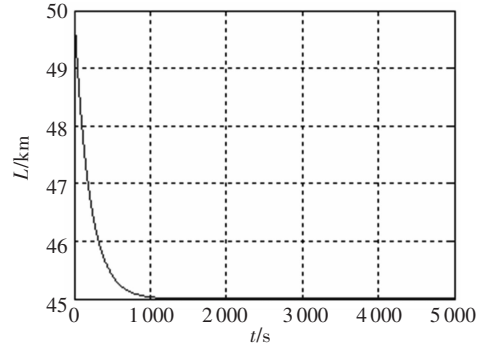


图 3 系绳的长度变化

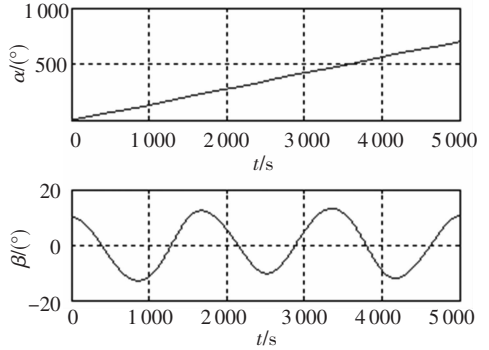


图 4 角度的估计值

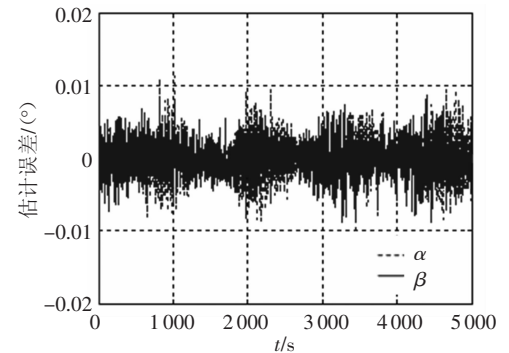


图 5 角度估计误差

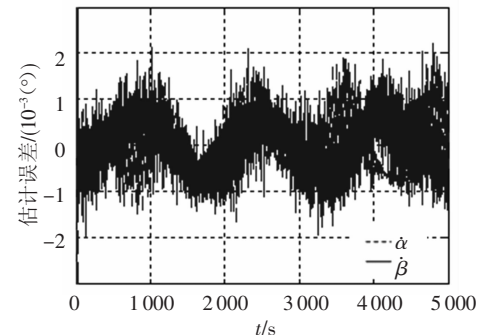


图 6 角速度的估计误差

在  $t$  为 2 000 s 后,由图 3 中的仿真数据可知系绳的长度  $L < 45.0002$ ,此时系绳的长度与回收终了长度 ( $L_{if} = 45$ ) 非常接近,则  $t$  在 0~5 000 s 内可表示 TSS 整个运动过程中系绳参数值的变化.

从图 4~图 6 看,系绳摆角大幅度变化时,采用本文所提出的估计方法仍能使系绳参数的估计值迅速收敛到真值附近,且具有良好的稳定性. 稳态时,角度估计误差的量级能达到  $10^{-2}$ ,角速率

估计误差的量级能达到  $10^{-3}$ .

表1为采用本文所提出的方法和 M. E. Greene 的方法在稳态时角速率估计误差的数据(表中  $\dot{\theta}$  和  $\dot{\varphi}$  分别表示采用 M. E. Greene 方法时面内和面外摆角角速率的估计误差).

表1 角速率的估计误差

t/s	角速率的估计误差/( $^{\circ}$ ·s $^{-1}$ )			
	$\dot{\theta}$	$\dot{\alpha}$	$\dot{\phi}$	$\dot{\beta}$
3 000	0.063 249	-0.000 870	0.019 623	-0.000 660
3 100	0.060 015	-0.000 780	0.016 164	-0.000 440
3 200	0.059 225	-0.000 140	0.011 199	0.000 048
3 300	0.060 442	-0.000 073	0.004 771	-0.000 420
3 400	0.063 463	-0.000 340	-0.002 610	-0.001 050
3 500	0.067 884	-0.000 180	-0.010 370	-0.001 110
3 600	0.073 814	0.000 571	-0.017 020	-0.000 550
3 700	0.076 904	0.000 284	-0.023 520	-0.000 500
3 800	0.080 293	-0.000 095	-0.025 550	-0.000 340
3 900	0.082 449	0.000 106	-0.022 370	0.000 506
4 000	0.081 192	-0.000 280	-0.016 000	0.000 762

由表1可得,当系绳面外摆角  $\beta$  大角度变化时,按 M. E. Greene 的估计方法所得的角速率估计误差无法在 0 附近收敛或收敛效果变差,而采用本文所提出的方法,无论是在面内还是在面外,摆角大角度变化时均能使估计值迅速收敛到真值附近,且具有较好的估计精度.

## 4 结 论

本文对系绳摆角在大角度变化时系绳参数的实时估计方法进行了研究,采用三轴张力计作为测量设备,通过扩展 Kalman 滤波器方法进行角度和角速率的估计.仿真结果表明:无论是在面内还是在面外摆角大角度变化时,该滤波算法均能使系绳参数的估计值迅速收敛到真值附近,且具有良好的稳定性,角度和角速率的估计误差分别达到  $10^{-2}$  和  $10^{-3}$  的量级.另外,三轴张力计可以实时提供三轴方向的测量值,不存在时延问题,提高三轴张力计的测量精度有助于提高估计值的精度,但角度和角速率的估计精度不会优于  $10^{-3}$  和  $10^{-4}$ ,这与状态方程的简化有关.

文中的估计方法实现了 TSS 运动过程中系绳参数的实时估计,解决了系绳摆角大角度变化时的估计问题.在实际工程中的实现简单易行,不但能提高利用 TSS 的动量交换技术进行轨道转移时的入轨精度,而且还能提高需要系绳参数作为反馈控制量的控制精度,可以为 TSS 工程化应用提供设计依据.

## 参考文献:

[1] MANTRI P, MAZZOLENI A P, PADGETT D A. Para-

metric study of deployment of tethered satellite systems [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2007, 44(2): 412-424.

- [2] 于绍华,刘强.有分布质量系绳的卫星系统的动力学[J].宇航学报,2001,22(3):52-61.
- [3] KUMAR K D. Review of dynamics and control of non-electrodynamic tethered satellite systems[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2006, 43(4): 705-720.
- [4] WILLIAMS P. Optimal deployment/retrieval of tethered satellites[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, 45(2): 324-343.
- [5] PADGETT D A, MAZZOLENI A P. Analysis and design for no-spin tethered satellite retrieval [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2007, 30(5): 1516-1519.
- [6] WILLIAMS P. Spacecraft rendezvous on small relative inclination orbits using tethers[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2005, 42(6): 1047-1060.
- [7] WILLIAMS P. Optimal deployment/retrieval of a tethered formation spinning in the orbital plane[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2006, 43(3): 638-650.
- [8] DENNEY T S, Jr, GREENE M E. On state estimation for an orbiting single tether system[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27(4): 680-695.
- [9] GREENE M E, DENNEY T S, Jr. Real-time estimator for control of an orbiting single tether system[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27(6): 880-883.
- [10] TORTORA P, SOMENZI L, IESS L, et al. Small mission design for testing in-orbit an electrodynamic tether deorbiting system[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2006, 43(4): 883-892.
- [11] KUMAR K D, YASAKA T, SASAKI T. Orbit transfer of service vehicle/payload through tether retrieval[J]. Acta Astronautica, 2004, 54: 687-698.
- [12] 于绍华,刘强,杨林娜.绳系卫星系统二维平面运动和常规动力学[J].宇航学报,2000,21(4):15-24.
- [13] KRUPA M, POTH W. Modelling, dynamics and control of tethered satellite systems[J]. Springer Nonlinear Dynamics, 2006, (43): 73-96.
- [14] DJEBLE A, BAKKALI L E, PASCAL M. On fast retrieval laws for tethered satellite systems[J]. Acta Astronautica, 2002, 40(8): 461-470.
- [15] WILLIAMS P. Deployment/retrieval optimization for flexible tethered satellite systems[J]. Nonlinear Dynamics, 2008, 52(1): 159-179.

(编辑 张宏)