

文章编号 :1001 - 2486(2005)01 - 0039 - 05

反作用轮低速特性观测补偿方法*

李连军 戴金海

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 :反作用轮在现代高精度卫星姿态控制中占据着重要的地位。但由于反作用轮工作于低速状态,其转速过零时摩擦力矩的非线性特征将会对姿态控制精度产生较大的影响,并影响卫星运行寿命。基于 Dahl 摩擦模型建立了直流电机驱动的反作用轮系统数学模型,在此基础上设计了用于改善反作用轮低速性能的补偿观测器,并将其应用于三正交结构姿态控制系统。数字仿真说明此方法可以有效地抑制反作用轮低速摩擦产生的扰动,从而大幅度改善卫星姿态控制精度及其姿态稳定性。最后探讨了该观测器方法同变结构控制方法的综合应用前景。

关键词 :反作用轮低速摩擦 ;状态观测器 ;姿态控制 ;仿真分析

中图分类号 :T273 文献标识码 :A

The Compensation Method of the Observation of the Reaction Wheel at Low Speed

LI Lian-jun ,DAI Jin-hai

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

Abstract :Reaction wheels are widely used for spacecraft attitude control in missions that require fine pointing accuracy and stabilization nowadays. But the friction produced by the reaction wheel assembly (RWA) itself when crossing zero is one of the most significant sources of disturbance. And it is necessary to eliminate these disturbances , especially for those cases that the wheels are running at low-speed throughout the space mission. The mathematical model of the reaction wheel assembly driven by a DC motor is presented on the base of Dahl friction equations. And a state observer is constructed to estimate the friction torque in order to compensate for it. A numerical simulation model , which assumes the satellite attitude is controlled by three reaction wheels arranged in an orthogonal geometry , is established. The simulation results prove that this method can improve the satellite attitude pointing accuracy and stability efficiently. Finally , the integration of the observer method and a sliding-mode control law is discussed.

Key words :reaction wheel low-speed friction ; state observer ; attitude control ; simulation analysis

在现代高精度卫星姿态控制系统中,反作用轮占据着重要的地位。利用三个正交安装的反作用轮作为姿控系统执行机构,可实现整星零动量,且控制精度高、结构简单、成本低。但反作用轮转速过零时,由于摩擦力矩相对控制力矩较大,卫星姿态会暂时失控,直到控制力矩大于摩擦力矩,因此有必要对该扰动进行有效抑制。

关于反作用轮低速摩擦的补偿问题,主要存在两类解决方案:其一是从反作用轮的低速动力学特征出发,对其实施补偿,如在反作用轮输入信号上附加与转速同号的偏差信号或高频振颤信号,或者采用反作用轮转速的高增益反馈;其二是从姿态控制系统设计的角度出发,寻求鲁棒性好的姿控方案,如采用非线性反馈控制、变结构控制等。

1 反作用轮系统数学模型

反作用轮受驱动电机电磁力矩 T_m 及轴承摩擦力矩 T_f 的合力矩支配,其作用于卫星本体的控制力

* 收稿日期 2004 - 10 - 15

作者简介:李连军(1975—)男,博士生。

矩 T_c 为：

$$T_c = T_m + T_f \tag{1}$$

且有 $T_c = -J \frac{d\Omega(t)}{dt}$ ($\Omega(t)$ 为反作用轮转速, T_m 满足直流电机方程^[1]：

$$T_m = K_m \cdot i(t) \tag{2}$$

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) + K_e \cdot \Omega(t)$$

式中 $u(t)$ 为电机驱动电压, $i(t)$ 为电机电枢电流, $u(t)$ 由控制器根据卫星姿态偏差确定。

T_f 包括轴承固体摩擦力矩 T_{f1} 和润滑剂粘滞摩擦力矩 T_{f2} 。采用 Dahl 摩擦模型^[2] 则：

$$\begin{cases} \frac{d\Omega}{dt} = -J^{-1}(T_{f1} + T_{f2} + T_m) \\ \frac{dT_{f1}}{dt} = \beta \Omega [T_{f1} \text{sign}(\Omega) - T_{f0}]^2 \\ T_{f2} = D\Omega \end{cases} \tag{3}$$

其中 $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。

对应系统框图如图 1 所示。

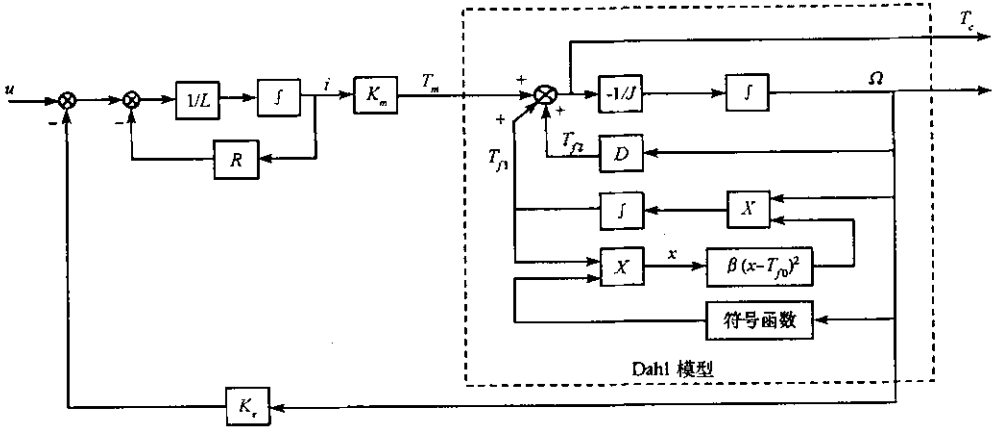


图 1 反作用轮系统动力学模型

Fig. 1 Dynamics of the reaction wheel assembly

模型中各参数意义及取值为^[2~4] 转动惯量 $J = 0.043 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 电机电枢的电感 $L = 0.001079 \text{ H}$, 电机电枢的电阻 $R = 0.54 \Omega$, 反电势系数 $K_e = 0.062 \text{ V} \cdot \text{s}$, 电机转矩系数 $K_m = 0.062 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$, 阻尼系数 $D = 0.009 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$, 轴承静止斜坡参数 $\beta = 12200 (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad})^{-1}$, 库仑摩擦力矩 $T_{f0} = 0.014 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。另取数字转速测量精度为 $1.46 \text{ r}/\text{min}$, 飞轮最大转速为 $\pm 6000 \text{ r}/\text{min}$ 。

2 观测器设计

综合(2)、(3)两式, 可得：

$$\begin{cases} \frac{d\Omega}{dt} = -\frac{D}{J}\Omega - \frac{1}{J}T_{f1} - \frac{K_m}{J} \cdot i \\ \frac{dT_{f1}}{dt} = \beta \Omega [T_{f1} \text{sign}(\Omega) - T_{f0}]^2 \\ \frac{di}{dt} = -\frac{K_e}{L} \cdot \Omega - \frac{R}{L} \cdot i + \frac{u}{L} \end{cases} \tag{4}$$

将其简化为如下线性系统^[4]：

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Omega}{dt} \\ \frac{dT_{f1}}{dt} \\ \frac{di}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{J}\Omega - \frac{1}{J}T_{f1} - \frac{K_m}{J} \cdot i \\ 0 \\ -\frac{K_e}{L} \cdot \Omega - \frac{R}{L} \cdot i + \frac{u}{L} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,转速 Ω 是可以直接测量的。针对上式设计状态观测器^[5]:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{\Omega}}{dt} \\ \frac{d\hat{T}_{f1}}{dt} \\ \frac{d\hat{i}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{J}\hat{\Omega} - \frac{1}{J}\hat{T}_{f1} - \frac{K_m}{J} \cdot \hat{i} + k_1(\Omega - \hat{\Omega}) \\ k_2(\Omega - \hat{\Omega}) \\ -\frac{K_e}{L} \cdot \hat{\Omega} - \frac{R}{L} \cdot \hat{i} + \frac{u}{L} + k_3(\Omega - \hat{\Omega}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 k_1 、 k_2 和 k_3 为观测器增益系数。令 $x = [\Omega \ T_{f1} \ i]^T$, $\hat{x} = [\hat{\Omega} \ \hat{T}_{f1} \ \hat{i}]^T$, $\tilde{x} = x - \hat{x}$, 则由(4)、(6)两式得:

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = A_0\tilde{x} + v \quad (7)$$

其中 $A_0 = \begin{bmatrix} -\frac{D}{J} - k_1 & -\frac{1}{J} & -\frac{K_m}{J} \\ -k_2 & 0 & 0 \\ -\frac{K_e}{L} - k_3 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$, $v = \begin{bmatrix} 0 \\ \beta\alpha(T_{f1} \operatorname{sign}(\Omega) - T_{f0})^2 \\ 0 \end{bmatrix}$ 。运用文献[4]的方法,可以证明该

观测器能够实现对(4)式状态的观测,并可通过 k_1 、 k_2 和 k_3 的调整来改善稳态误差和收敛速度。

另外,对于电压控制型电机驱动的反作用轮系统,不能直接利用估计出的 \hat{T}_{f1} 进行摩擦补偿,而需要将其等效为电机的摩擦补偿电压 \hat{u}_f , 利用 \hat{u}_f 产生的力矩来抵消摩擦力矩影响。由图1可知 \hat{T}_{f1} 与 \hat{u}_f 的关系为:

$$\hat{u}_f = K_f \left(\frac{L}{K_m R} \frac{d\hat{T}_{f1}}{dt} + \hat{T}_{f1} \right) \quad (8)$$

式中 K_f 为反馈增益。图2为加入补偿观测器的反作用轮系统框图。

针对给出的反作用轮参数,选取 $k_1 = 0.1973$, $k_2 = -4.3018 \times 10^{-4}$, $k_3 = 14.2234$, 对应的矩阵 A_0 的特征值为 $\{-500.67, -0.1, -0.1\}$ 。

3 补偿效果分析

考虑三个反作用轮正交安装的姿态控制系统,并取卫星滚动、俯仰、偏航轴的转动惯量分别为 $4616\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $2626\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $3155\text{kg} \cdot \text{m}^2$; 卫星轨道角速度 $\omega_o = 0.001059\text{rad/s}$ 。假设作用于卫星的干扰力矩为 $T_{dx} = A_0(3\cos\omega_o t + 1)$, $T_{dy} = A_0(1.5\sin\omega_o t + 3\cos\omega_o t)$, $T_{dz} = A_0(3\sin\omega_o t + 1)$, 并取 $A_0 = 10^{-5}\text{N} \cdot \text{m}$ 。

依据上述模型建立系统的 Simulink 仿真模型,采用 PID 控制器,三通道控制器参数如下(按 K_p 、 K_I 、 K_D 顺序)滚动通道(974, 1.69, 413); 俯仰通道(554, 0.96, 235); 偏航通道(665, 1.15, 282)。分别取 $K_f = 1$ 、 $K_f = 10$ 和 $K_f = 100$, 可得补偿效果如图3~5所示(以滚动通道为例),其中图5右图为左图虚线框部分的放大。

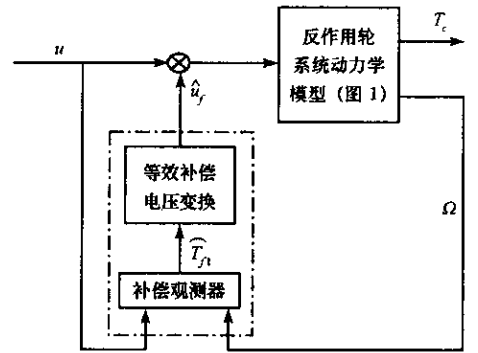


图2 加入补偿观测器的反作用轮系统
Fig.2 The reaction wheel assembly with a compensation observer

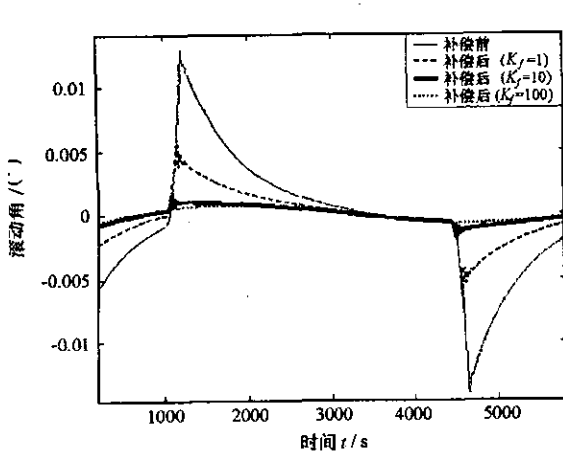


图 3 滚动角误差
Fig.3 Roll angle errors

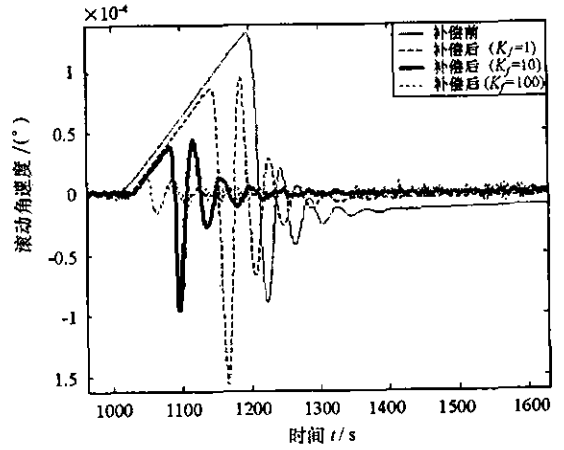


图 4 滚动角速度
Fig.4 Rates of roll angle

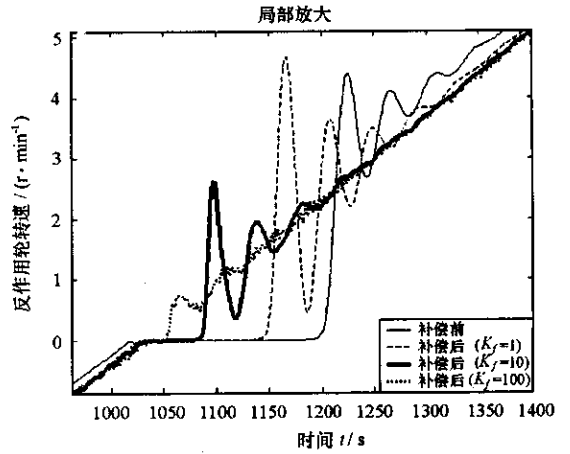
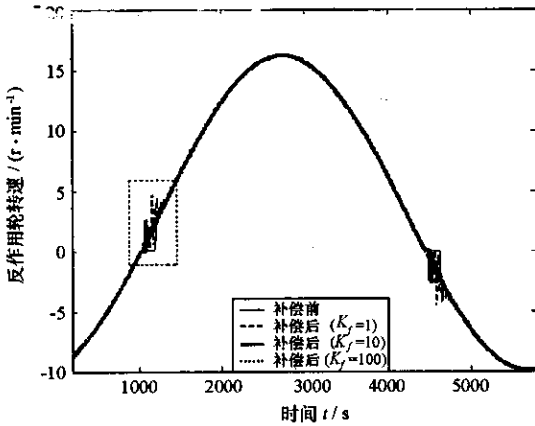


图 5 反作用轮转速(1)

Fig.5 Rotation speeds of the reaction wheel(1)

从仿真曲线可以看出,加入补偿观测器后,姿态角误差、姿态稳定性均得到了明显改善,反作用轮转速过零时间亦大大减小;引入 K_j 后,补偿效果更为显著,具体见表 1(表中相对值为相对补偿前的百分比)。

表 1 补偿效果(1)

Tab.1 Compensation results(1)

	补偿前	补偿后 ($K_j=1$)		补偿后 ($K_j=10$)		补偿后 ($K_j=100$)	
	精度 (3σ)	精度 (3σ)	相对值	精度 (3σ)	相对值	精度 (3σ)	相对值
滚动角	$1.4 \times 10^{-4} (^{\circ})$	$5.75 \times 10^{-3} (^{\circ})$	41.1%	$1.89 \times 10^{-3} (^{\circ})$	13.5%	$1.48 \times 10^{-3} (^{\circ})$	10.6%
角速度	$6.76 \times 10^{-5} (^{\circ})/s$	$4.94 \times 10^{-5} (^{\circ})/s$	73.1%	$2.13 \times 10^{-5} (^{\circ})/s$	31.5%	$9.28 \times 10^{-6} (^{\circ})/s$	13.7%
转速过零时间	120s	80s		37s		13s*	

* 为所考察时间段内在零附近波动时间

4 观测器方法同变结构控制的结合

采用如下变结构控制方法^[56]：

滑动流型： $\dot{s} = x + kx^2$ ，其中 $x = [\varphi \quad \theta \quad \Psi]^T$ ， $k = \text{diag}(k_{\varphi} k_{\theta} k_{\psi})$ 为正正常系数矩阵；到达律： $\dot{s} = -gs - \varepsilon \text{sign}(s)$ ，其中 $g = \text{diag}(g_{\varphi} g_{\theta} g_{\psi})$ ， $\varepsilon = \text{diag}(\varepsilon_{\varphi} \varepsilon_{\theta} \varepsilon_{\psi})$ 均为正正常系数矩阵；控制律：

$$u_c = -I_0(k^{-1} + g)\dot{x} - [I_0k^{-1}g + D_0J_0^{-1}I_0(k^{-1} + g)]x$$

$$-I_0 k^{-1} \varepsilon \text{sign}(s) - (D_0 J_0^{-1} I_0 g) [x + \varepsilon \text{sign}(s)] dt \quad (9)$$

式中 D_0 、 J_0 、 I_0 分别为阻尼系数、反作用轮转动惯量、星体转动惯量的设计值。

仿真中取如下参数 $k = \text{diag}(0.06 \quad 0.06 \quad 0.06)$ $g = \text{diag}(0.02 \quad 0.02 \quad 0.02)$ $\varepsilon = \text{diag}(0.03 \quad 0.03 \quad 0.03)$ 其余同上。图 6 为补偿前后反作用轮转速仿真曲线(右图为左图虚线框部分的放大)补偿效果见表 2。从中可以看出,加入补偿观测器后反作用轮转速过零时间大大减小,且 K_f 增加,效果更为显著,但由于观测误差影响,当 K_f 为 10 和 100 时,滚动角速度指标变差。

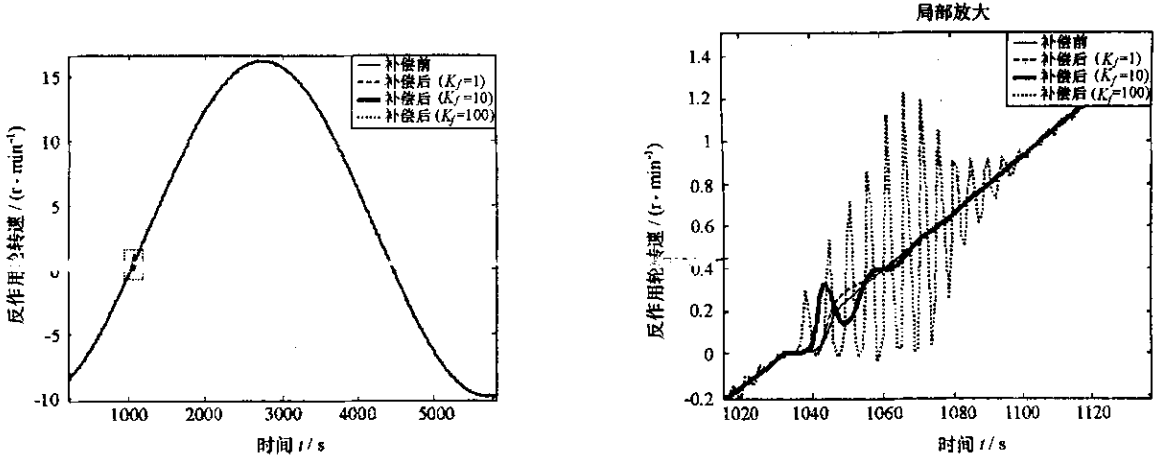


图 6 反作用轮转速(2)

Fig. 6 Rotation speeds of the reaction wheel(2)

表 2 补偿效果(2)

Tab. 2 Compensation results(2)

	补偿前	补偿后 ($K_f = 1$)		补偿后 ($K_f = 10$)		补偿后 ($K_f = 100$)	
	精度 (3σ)	精度 (3σ)	相对值	精度 (3σ)	相对值	精度 (3σ)	相对值
滚动角	$1.58 \times 10^{-5} (^{\circ})$	$7.54 \times 10^{-6} (^{\circ})$	47.7%	$3.13 \times 10^{-6} (^{\circ})$	19.8%	$4.80 \times 10^{-6} (^{\circ})$	30.4%
角速度	$8.80 \times 10^{-7} (^{\circ})/s$	$8.98 \times 10^{-7} (^{\circ})/s$	102.0%	$1.23 \times 10^{-6} (^{\circ})/s$	139.8%	$6.07 \times 10^{-6} (^{\circ})/s$	689.8%
转速过零时间	<10s	<8s		<7s		0s	

5 结论

采用 PID 控制器时,加入补偿观测器十分必要,且较大的反馈增益 K_f 可改善补偿效果;而增大 K_f 将使反作用轮测量噪声的影响增强,在实际应用中需折衷考虑。如果采用变结构控制系统与补偿观测器结合的方案,性能将大大改善,然而如果反馈增益 K_f 过大,尽管姿态角精度有所提高,但姿态角速度的稳定性将变差。

参考文献:

- [1] 梅晓榕,兰朴森,柏桂珍.自动控制元件及线路[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1997:16-36.
- [2] John B S. Reaction Wheel Low-speed Compensation Using a Dither Signal[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 1993, 16(4): 617-622.
- [3] Interface Control Document for the Type-e reaction Wheel Assembly[R]. ITTHACO Space Systems Inc., NY USA, February 18, 2000.
- [4] 王炳全,李瀛,杨涤.改善反作用轮低速性能的观测补偿器方法[J].空间科学学报,1999,19(4):362-367.
- [5] 王炳全,崔祐涛,杨涤.轻型高精度卫星的变结构姿态控制[J].航空学报,2000,21(5):417-420.
- [6] 高为炳.变结构控制的理论及设计方法[M].北京:科学出版社,1996:234-241.

