自主水下航行器航向系统传感器故障容错控制

唐小静 任章 徐德民

（西北工业大学航海工程学院 西安 710072）

摘 要 针对一类传感器故障的线性控制系统，设计出一个能在故障情况下正确估计出系统真实状态的容错观测器，并在此基础上实现对传感器故障的容错控制．结合某水下自主航行器（AUV）航向控制系统传感器故障的仿真结果验证了所提方案的有效性．

关键词 传感器故障，容错控制，自主水下航行器

1 引言

随着对控制系统可靠性要求的提高，容错控制成为一个活跃的研究领域．实现容错的控制方法可分为主动和被动两种方式．快速准确的控制系统 FDI 是实现主动容错控制的重要前提，但目前存在的一个主要问题是现有的控制系统 FDI 技术缺乏与容错控制的有效结合[1]．被动容错控制是使系统对故障具有完全的鲁棒性，设计未免过于保守[3]．而且，对许多实际系统，被动容错控制问题不一定有解．

对于自主水下航行器等运动体的控制，由于运行环境恶劣，干扰因素多，极易发生传感器故障，但传感器故障只影响系统的测量输出，如果能够设法在故障情况下正确地估计出系统的真实状态，就可以得到正确的反馈控制信号，使系统不受故障的影响．

2 问题描述

考虑发生传感器故障时的线性定常系统：

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{1a}$$

$$y(t) = Cx(t) + f\alpha(t) \tag{1b}$$

其中 $x(t)$ 是 n 维状态向量，$u(t) \in R^p$，$y(t) \in R^q$，B 和 C 为满秩，设系统可控且可观．f 是故障方向矢量，$\alpha(t)$ 是一未知的时间函数，表征了故障的时间特性．故障检测的目的就是设计某种残差信号，通过对残差信号的分析和评价来判断故障是否发生并估计出故障的方向和时间特性．在本文中，故障被限制为一类特殊的传感器恒值漂移故障，即 $\alpha(t)$ 为一常数，此时输出方程为

$$y(t)=Cx(t)+f\alpha \tag{2}$$

容错观测器设计的思想是根据对故障检测和估计的结果，补偿掉故障的影响，实现对真实状态的渐近估计．此时基于状态反馈的闭环系统对传感器故障就具有了容错能力．

3 故障幅值及系统状态的渐近估计

由于系统（1）满足可观测条件，故可以构造如下形式的渐近观测器：

$$\dot{\hat{x}}=A\hat{x}+Bu+L(y-\bar{y}) \tag{3a}$$

$$\bar{y}=C\hat{x}+\hat{f}=\hat{y}+\hat{f} \tag{3b}$$

$$\hat{y}=C\hat{x} \tag{3b}$$

其中 $\hat{f}$ 是对故障的估计，设 $e_x=x-\hat{x}$，则误差方程和输出残差为：

$$\dot{e}_x(t)=(A-LC)e_x(t)+L\hat{f}-\alpha Lf \tag{4}$$

$$r(t)=y(t)-\hat{y}(t) \tag{5}$$

其中 $(A-LC)$ 为严格 Hurwitz 阵，当系统没有故障发生时，观测器（3）可以实现渐近的状态估计．考察误差方程（4），如果将 $-\alpha Lf$ 视为未知的常值干扰输入，则对 $\hat{f}$ 的估计问题就可转化为设计一反馈信号 $\hat{f}$，使得 $e_x(t)\to 0$ 成立，此时可同时实现对故障和状态的渐近估计．

假设 1：L 的设计使得 (A,L) 为可控对．

假设 2：存在适当维数的矩阵 C_1，使下式成立：

$$rank\begin{bmatrix} A-LC & L \\ C_1 & 0 \end{bmatrix}=n+q$$

假设 3：设故障的方向矢量满足匹配条件：

$$L_i f\neq 0$$

其中 L_i（$i=1,2,\cdots,n$）为 L 的行向量，即 $L=\begin{bmatrix} L_1^T & L_2^T & \cdots & L_n^T \end{bmatrix}^T$．

注释：假设 1 实际上是保证了 $(A-LC,L)$ 的可控性，由等式

$$\begin{bmatrix} sI-A+LC & L \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} sI-A & L \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_n & 0 \\ C & I_q \end{bmatrix}$$

可以看出，如果 (A,L) 为可控对，则 $(A-LC,L)$ 仍为可控对．在假设 1 满足后，假设 2 对控制问题（4）有解是必要的．假设 3 保证了补偿控制量与故障信号必出现在同一通道中，该假设可由 L 的设计来保证．有关容错观测器的设计可归结为下面的定理 1：

定理 1：如果控制问题（4）的解由下式给出：

$$\hat{f}(t)=K_1 e_x(t)+K_2 C_1\int_{t_0} e_x(t)dt \tag{6}$$

则（3）式所设计的观测器可同时实现对故障和系统真实状态的渐近估计．式（6）中 t_0 为由输出残差（5）估计的故障发生时间，式（6）中

$$\begin{bmatrix}K_1 & K_2\end{bmatrix}=G\begin{bmatrix}A-LC & L\\ C_1 & 0\end{bmatrix}^{-1} \tag{7}$$

$G=-R^{-1}B_1^T P$， P 是 Riccati 代数方程

$$A_1^T P+PA_1-PB_1R^{-1}B_1^T P+Q=0$$

的正定对称解，其中 R 、Q 是适当选取的加权矩阵，$A_1=\begin{bmatrix}A-LC & L\\ 0 & 0\end{bmatrix}$，$B_1=\begin{bmatrix}0\\ I_q\end{bmatrix}$.

证明：由于常值干扰的存在，为了避免性能指标的积分值趋于无穷，取性能指标式

$$J=\int_0^\infty[e_x^T(t)Qe_x(t)+\dot{\hat{f}}^T(t)R\dot{\hat{f}}(t)]dt$$

反馈信号 $\hat{f}(t)$ 的设计目的是使 $\lim\limits_{t\to\infty}e_x(t)=0$ 的同时使积分性能指标 J 达最小值．定义积分环节 $\dot{\hat{f}}(t)=\xi(t)$，将 $\xi(t)$ 视为一新的输入变量，可得增广系统方程为

$$\begin{bmatrix}\dot{e}_x(t)\\ \dot{\hat{f}}(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A-LC & L\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e_x(t)\\ \hat{f}(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ I\end{bmatrix}\xi(t)+\begin{bmatrix}I\\ 0\end{bmatrix}(\alpha Lf)$$

可以证明，若原系统（1）完全可控，则增广系统必定也是完全可控的．取输出为

$$y_1(t)=\begin{bmatrix}C_1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e_x(t)\\ \hat{f}(t)\end{bmatrix}$$

如果状态变量、控制变量和输出变量的稳态值分别用 e_{xs}、 $\hat{f}_s$ 和 y_{1s} 表示，则当系统达到稳态后有：

$$\begin{bmatrix}-\alpha Lf\\ y_{1s}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A-LC & L\\ C_1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e_{xs}\\ \hat{f}_s\end{bmatrix} \tag{8}$$

显然，当稳态值 $e_{xs}=0$ 时，有 $\alpha Lf=-L\hat{f}_s$，可见 $\hat{f}(t)$ 可以实现对故障的渐近估计．记 $\delta x(t)=\begin{bmatrix}e_x^T(t) & (\hat{f}(t)-\hat{f}_s)^T\end{bmatrix}^T$，由增广系统方程和式（8）可得

$$\delta\dot{x}(t)=\begin{bmatrix}A-LC & L\\ 0 & 0\end{bmatrix}\delta x(t)+\begin{bmatrix}0\\ I_q\end{bmatrix}\xi(t) \tag{9}$$

取性能指标

$$J=\int_0^\infty[\delta x^T(t)Q\delta x(t)+\xi^T(t)R\xi(t)]dt$$

由式（9）和上述性能指标所描述的最优调节器问题的最优控制可取为：

$$\zeta(t) = -R^{-1}B_1^T P\delta x(t) = G\delta x(t)$$

其中$G = -R^{-1}B_1^T P$， P是 Riccati 代数方程

$$A_1^T P + PA_1 - PB_1 R^{-1} B_1^T P + Q = 0$$

的正定对称解．将增广控制量$\zeta(t)$写为

$$\zeta(t) = -R^{-1}B_1^T P\begin{bmatrix} e_x(t) \\ \hat{f}(t) \end{bmatrix} + R^{-1}B_1^T P\begin{bmatrix} 0 \\ \hat{f}_s \end{bmatrix}$$

由（4）、（9）及假设2，推导可得

$$\begin{bmatrix} e_x(t) \\ \hat{f}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A-LC & 0 \\ C_1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{e}_x(t) - \alpha Lf \\ y_1(t) \end{bmatrix} \tag{10}$$

将上式代入$\zeta(t)$，有

$$\zeta(t) = K_1 \dot{e}_x(t) + K_2[y_1(t) - y_{1s}]$$

考虑到$\dot{\hat{f}}(t) = \zeta(t)$，将该等式积分得

$$\hat{f}^*(t) = K_1 e_x(t) + K_2 C_1 \int_0 e_x(t)dt$$

实际运行时，当 FDI 单元检测出故障发生时才启动上述故障估计算法，所以实际积分起始时间是故障发生时刻t_0，即

$$\hat{f}(t) = K_1 e_x(t) + K_2 C_1 \int_{t_0} e_x(t)dt \tag{11}$$

证毕．

由于信号$e_x(t)$是不能测量得到的，所以式（11）不能直接运用．但注意到K_1和C_1均为$q\times n$的行满秩矩阵，所以总可以通过行初等变换，使得下式成立

$$K_1 = E_1 C, \quad C_1 = E_2 C$$

其中初等变换矩阵E_i满足$\det(E_i) \neq 0$，$i = 1,2$．此时$\hat{f}$的估计算法为

$$\hat{f}(t) = E_1 r(t) + K_2 E_2 \int_{t_0} r(t)dt$$

容错控制系统框图见图1所示.

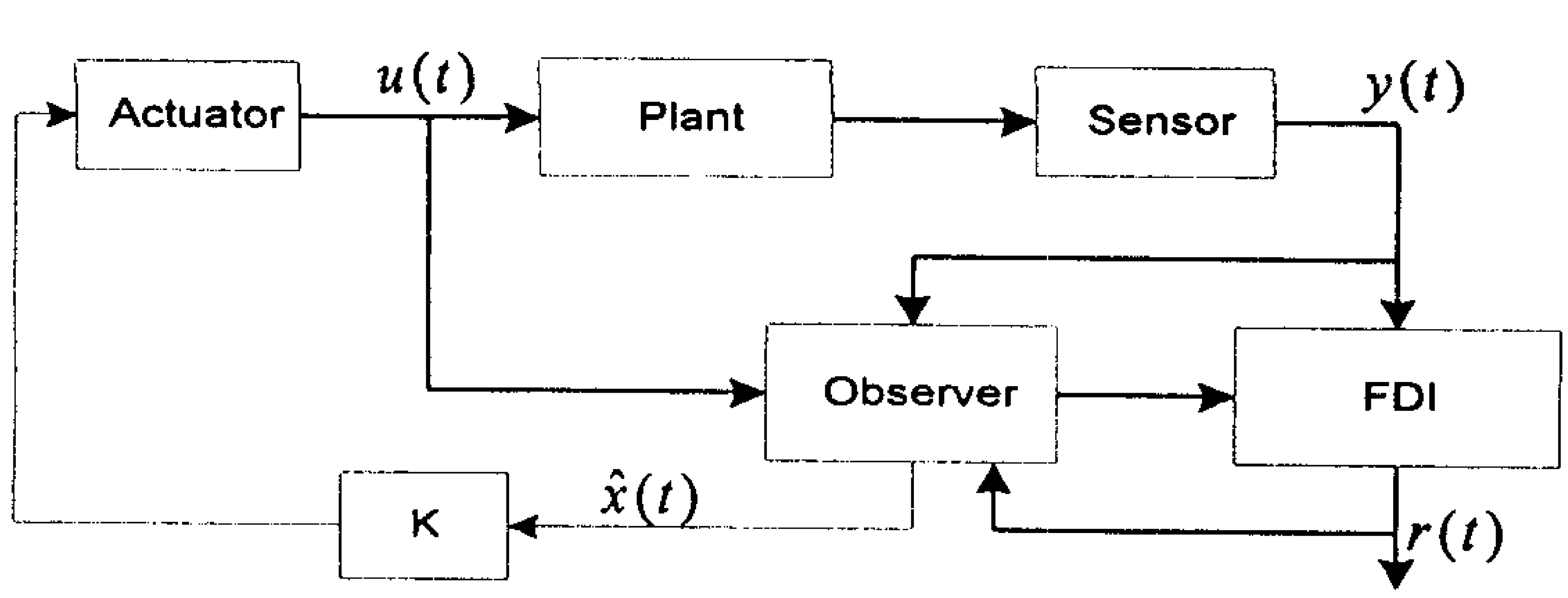

图1 容错控制系统框图

4 仿真结果与分析

现以某自主水下航行器航向通道为例，线性化后的航向控制系统的系统矩阵为：

$$A=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1\\ 0 & -1.3536 & 0.223\\ 0 & 11.742 & -5.381\end{bmatrix},\quad B=\begin{bmatrix}0\\ 0.113\\ 1.883\end{bmatrix},\quad C=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

状态变量 $x=\begin{bmatrix}\psi & \beta & \omega_{y1}\end{bmatrix}^T$，$u=\delta_r$ 为舵角信号，为了运用状态反馈，在工程实际中，航向角 ψ 用二自由度陀螺测量，角速度 ω_{y1} 用速率陀螺测量，侧滑角 β 难以测量，需构造观测器加以估计．航行器在航行过程中会受到浪涌、海流等干扰因素的影响，使其偏离航向，干扰作用可等效为传感器受恒值扰动[4]．为了使航行器保持正确的航向，航向控制系统应对这种传感器恒值干扰具有容错能力．假设第一个传感器在 $t=3$ 秒时发生单位阶跃干扰，图 2 是采用通常的 Luenberger 观测器而系统故障时的闭环响应曲线，图 3 是采用容错观测器时的闭环响应曲线．

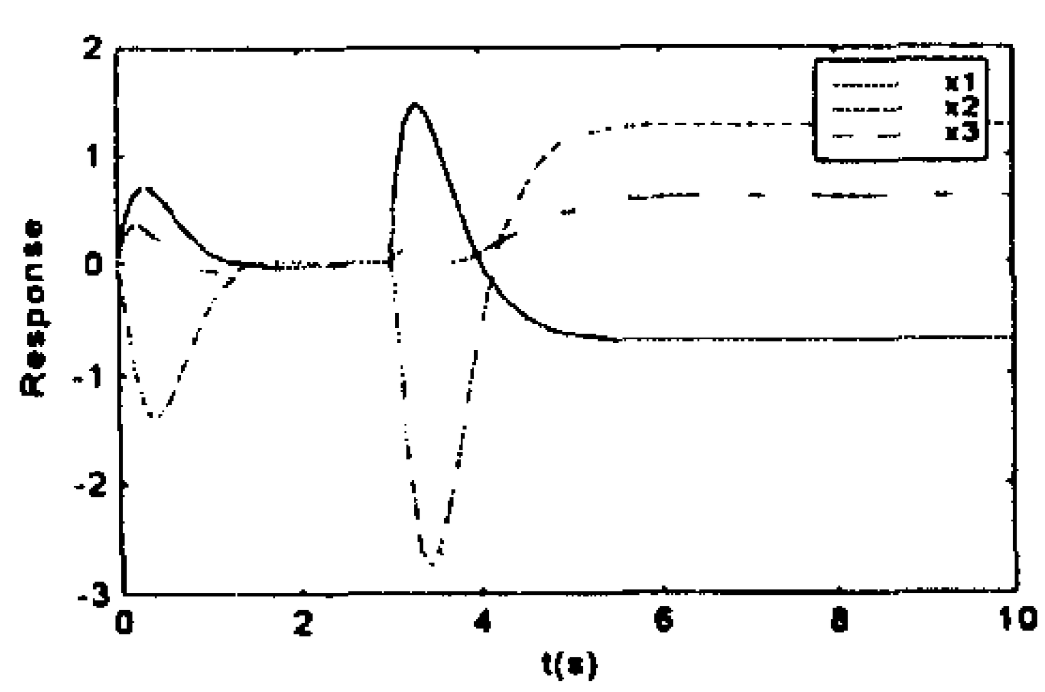

图 2 系统障时的闭环响应

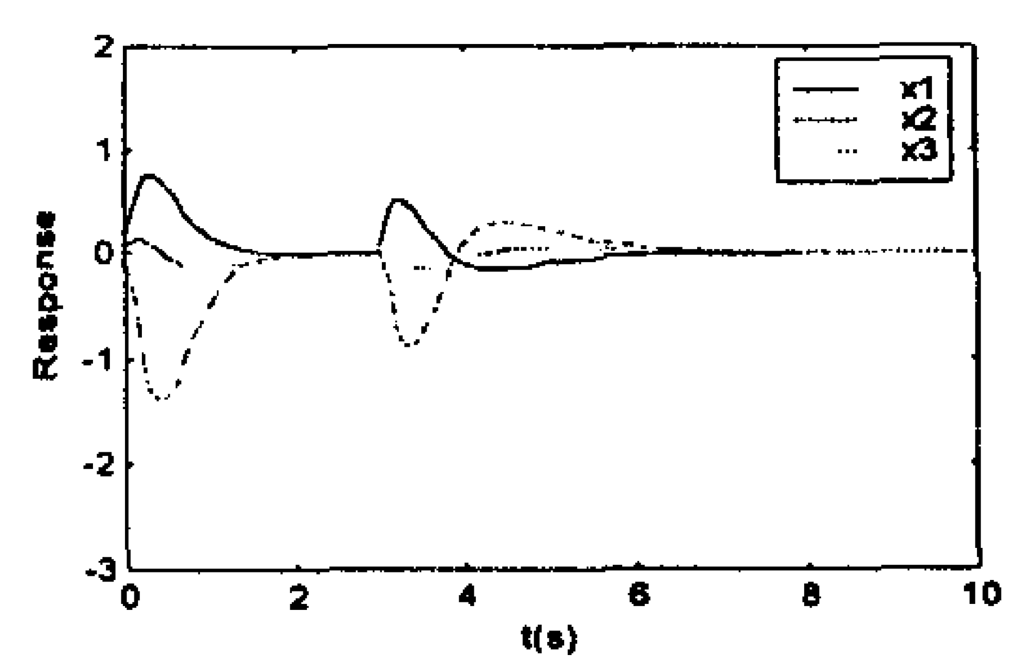

图 3 容错控制系统闭环响应

5 结论

本文提出一种对传感器故障具有容错能力的观测器，并在此基础上实现主动方式的容错．虽然这里研究的是特殊的传感器恒值漂移故障，但设计思想很容易推广到一般故障的情形，如何实现对一般性传感器故障的有效实时估计，是有待进一步研究的问题．

参 考 文 献

1 1 Frank P M Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy—a survey, *Automatica*,**26**:459-474,1990

2. 2 Kabore P and Wang H On the design of fault diagnosis filters and fault tolerant control,In:Proc. American Control Conference, 1999.622-626

3 3 Joshi S M. Design of failure accommodating multiloop LQG-type controllers,*IEEE Trans.on Automatic Control*,1987,**32**(8). 740-741

4. 4 徐德民，鱼雷自动控制系统，西安：西北工业大学出版社，1991