

文章编号: 1001-0920(2006)10-1185-05

## 导弹控制系统的容错控制研究

刘湘崇, 梁彦, 程咏梅, 潘泉, 张洪才

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

**摘 要:** 为了提高导弹姿态控制系统的可靠性, 防止由于传感器失效而引起导弹自毁, 提出基于信号重构的容错控制方法。为了对姿态控制系统中的传感器进行信号重构, 首先考虑弹体弹性振动的影响, 分析了弹体弹性振动与姿态角之间的关系; 然后分析了传感器输出信号之间的关系; 最后, 通过解析冗余方法, 用正常工作的传感器输出信号重构出现故障的传感器的正常信号。仿真实验表明了该方法的有效性。

**关键词:** 弹性振动; 容错控制; 惯性传感器; 振型斜率

**中图分类号:** TP302.8 **文献标识码:** A

## On Fault-tolerant Control of Missile Control Systems

LIU Xiang-chong, LIANG Yan, CHENG Yong-mei, PAN Quan, ZHANG Hong-cai

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China Correspondent: LIU Xiang-chong, Email: liuxiangchong100@gmail.com)

**Abstract:** To enhance the reliability of missile attitude control systems and prevent the self-destruction caused by failed inertia sensors, an approach of fault-tolerant control based on signal reconfiguration is proposed. To reconfigure signals of the sensors in the missile attitude control system, the impact of elastic oscillation of the missile body is considered, and the relationship between the elastic oscillation of the missile body and the attitude angles is analyzed. The relationship among the sensors is also analyzed. The normal signal of a failed sensor is reconfigured with other normally working sensors via analytical redundancy. The simulation result shows the effectiveness of the approach.

**Key words:** Elastic oscillation; Fault-tolerant control; Inertia sensor; Oscillation mode slope

### 1 引言

中远程弹道导弹元器件老化失效和发射强烈振动引发元器件失效, 特别是惯性传感器失效将导致导弹的自毁, 因此有必要对传感器实行容错控制。容错控制分为硬件冗余容错控制和解析冗余容错控制: 硬件冗余增加了成本和重量, 而且在有些情况下不允许进行硬件冗余, 如惯性传感器组合平台, 它有较大的体积和重量, 无法进行硬件冗余; 解析冗余容错控制是指通过解析方法利用系统中存在的冗余特性实现容错控制, 关于解析冗余容错的研究, 不同的问题有着不同的算法<sup>[1-5]</sup>。另外, 在导弹飞行中还必须考虑弹性振动影响。弹体弹性振动引起的信号是

低频信号, 其频率非常接近姿态控制系统的运行频率, 如果不加以控制, 会造成弹体变形或断裂。

根据弹体弹性振动与姿态角之间和惯性传感器输出信号之间的关系, 把刚体角度信号和不同阶的弹性振动引起的角度信号从惯性传感器的输出信号中分离之后, 用正常运行的惯性传感器的输出信号即可重构故障传感器的输出信号, 仿真实验证明了该方法的有效性。

### 2 容错控制算法

#### 2.1 容错控制方案

导弹惯性传感器失效的容错控制系统包括信号分离、信号重构、故障诊断和切换控制 4 部分, 如图

收稿日期: 2005-07-21; 修回日期: 2005-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(60404011, 60372085)。

作者简介: 刘湘崇(1963—), 男, 湖北江陵人, 博士生, 从事信号处理、控制理论与控制工程等研究; 梁彦(1971—), 男, 河南新乡人, 副教授, 博士, 从事信息融合理论与应用、自适应滤波等研究。

1所示。首先,从惯性传感器的输出信号中实时地分离出刚体的角度信号和由不同阶弹性振动引起的角度信号;然后,根据弹体弹性振动与姿态角之间和惯性传感器输出信号之间的关系,对每一个传感器的输出信号进行重构,当系统中某个传感器发生故障时,切换控制部分将用重构的信号代替出现故障的传感器信号,实现容错控制。

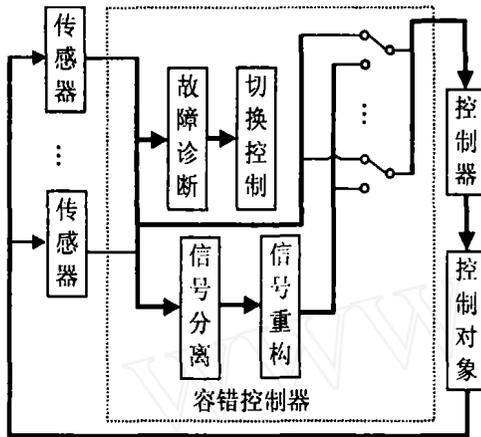


图1 导弹惯性传感器失效的容错控制方案

## 2.2 信号分离

从惯性传感器的输出信号中分离出刚体控制信号和各阶弹性振动信号引起的角度信号是容错控制实现所必须首先解决的问题。首先,对惯性传感器的输出信号进行短时快速的傅立叶变换,得到信号的频域幅值。频域幅值中极点处的频率即是传感器的刚体角度信号和不同阶弹性振动引起的角度信号的频率。因为椭圆滤波器可以实现多通道和多阻道,在通道和阻道内等波纹以及通道与阻道间最小的过渡断,所以可选用椭圆滤波器进行滤波。

设计一个椭圆滤波器使得具有极点处频率的信号可以通过。一组初相位为零和频率为极点处频率的正弦信号相加形成一个测试信号,将该测试信号经过上面的椭圆滤波器滤波。经过滤波可以从测试信号中获得每个滤出的正弦信号,其初相位就是同样频率信号经过相同滤波器滤波后的相位滞后量。惯性传感器的输出信号也经过相同的椭圆滤波器进行滤波,滤出的惯性传感器输出信号的相位用测试信号测试出的相同频率信号的相位滞后量进行补偿,最后得到了分离出的实时刚体角度信号和不同阶弹性振动引起的角度信号。

## 2.3 信号重构

按以下两种情况进行信号重构:

1) 不考虑弹性振动时信号的重构。在不考虑弹性振动简化的情况下,因为中远程弹道导弹的偏航和滚动角都很小,在设计过程中不考虑姿态通道之

间的耦合,因此,导弹控制系统的俯仰、偏航和滚动3个通道的传感器信号的重构可分别设计。因为姿态角的修正过程是一个低频的正弦衰减过程,且姿态角信号与姿态角速率信号的频率相同、相位差一定、幅值成比例,因此,某个通道的姿态角和姿态角速率信号重构可以采用相位补偿法和幅值补偿法进行重构。

2) 考虑弹性振动时信号的重构。中远程导弹弹体较长,不考虑弹体弹性振动的设计具有较大的误差,该误差会使弹性振动加剧,导致弹体变型或断裂,因此,必须考虑弹性振动的影响。因为俯仰与偏航通道间的耦合大而俯仰通道(或偏航通道)与滚动通道的耦合小,所以将俯仰通道和偏航通道作为一个系统进行容错控制设计,并将滚动通道单独作为一个系统进行容错控制设计。这两个容错控制系统的设计条件是每个系统只有一个传感器失效。当出现多个传感器失效的情况下,如果俯仰通道和偏航通道各出现一个失效的传感器,可采用不考虑弹性振动的设计方法进行重构,但重构的性能有所下降。如果一个通道出现两个传感器同时失效,是很难进行重构的,因为不符合重构的条件。

俯仰角速率传感器(或偏航角速率传感器)、俯仰角传感器(或偏航角传感器)、滚动角速率传感器和滚动角传感器处的各弹性振动导数信号分别为

$$\dot{q}_{g\Gamma i} = A_{g\Gamma i} \sin(2\pi f_i t + \theta_{g\Gamma i}), \quad (1)$$

$$\dot{q}_{r\Gamma i} = A_{r\Gamma i} \sin(2\pi f_i t + \theta_{r\Gamma i}), \quad (2)$$

$$\dot{q}_{y\Gamma i} = A_{y\Gamma i} \sin(2\pi f_i t + \theta_{y\Gamma i}), \quad (3)$$

$$\dot{q}_{x\Gamma i} = A_{x\Gamma i} \sin(2\pi f_i t + \theta_{x\Gamma i}). \quad (4)$$

将 $\dot{q}_{g\Gamma i}$ 和 $\dot{q}_{r\Gamma i}$ 分解到弹体坐标系的 $Y_1$ 和 $Z_1$ 轴,分别得到 $\dot{q}_{Y_1g\Gamma i}$ 、 $\dot{q}_{Z_1g\Gamma i}$ 、 $\dot{q}_{Y_1r\Gamma i}$ 和 $\dot{q}_{Z_1r\Gamma i}$ 。俯仰角传感器处(或偏航角传感器处)与俯仰角速率传感器处(或偏航角速率传感器处)的弹性振动的方向相同,即

$$\frac{\dot{q}_{Y_1g\Gamma i}}{\dot{q}_{Z_1g\Gamma i}} = \frac{\dot{q}_{Y_1r\Gamma i}}{\dot{q}_{Z_1r\Gamma i}} \quad (5)$$

滚动角传感器处与滚动角速率传感器处的弹性振动间的关系为

$$A_{y\Gamma i} = kA_{x\Gamma i}, \quad (6)$$

$$\theta_{y\Gamma i} = \theta_{x\Gamma i} + \alpha \quad (7)$$

其中: $q$ 为弹性振动信号, $A$ 为信号的峰值, $\theta$ 为信号的初相位, $f$ 为弹性振动的频率; $g\Gamma$ 、 $r\Gamma$ 、 $i$ 、 $Y_1$ 、 $X_1$ 、 $Z_1$ 和 $Z_1$ 分别为角速率传感器的位置、角度传感器的位置、俯仰(或偏航)通道弹性振动阶次、滚动通道弹性振动阶次和3个弹体坐标系轴; $\Delta\varphi$ 、 $\psi$ 和 $\gamma$ 分别为俯仰角与俯仰程序角的差值信号、偏航角信号和滚动角信号;无下标时为刚体角度信号。式(6)和(7)通过过去的的数据或故障发生前的信号测量确定。

设  $W$  为弹性振型, 它是弹性振动信号的幅值与弹性振动引起的姿态角的比值  $W$  为弹性振型斜率, 弹性振型斜率是弹性振动信号的导数值与弹性振动引起的姿态角速率信号的比值 弹性振型和弹性振型斜率的获取方法已有详细研究(如我国航天二院等), 由于篇幅原因不细述 弹性振型斜率是导弹位置和弹性振动信号的导数值的函数, 因为传感器安装位置一定, 这些函数退化为一元函数, 用实测数据建立, 重构信号时代入弹性振动信号的导数值即可算出弹性振型斜率

弹性振动引起的在俯仰角速率传感器、偏航角速率传感器、滚动角速率传感器、俯仰角传感器、偏航角传感器和滚动角传感器处的各姿态角速率信号如下<sup>[6, 7]</sup>:

$$\Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i} = W_{qg\Gamma m i} \dot{q}_{Y_1 g\Gamma i} + W_{qg\Gamma h i} \dot{q}_{Z_1 g\Gamma i}, \quad (8)$$

$$\dot{\psi}_{qg\Gamma i} = W_{qg\Gamma m i} \dot{q}_{Z_1 g\Gamma i} + W_{qg\Gamma h i} \dot{q}_{Y_1 g\Gamma i}, \quad (9)$$

$$\dot{\gamma}_{qg\Gamma} = W_{qg\Gamma i} \dot{q}_{g\Gamma i}, \quad (10)$$

$$\Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i} = W_{q\Gamma m i} \dot{q}_{Y_1 \Gamma i} + W_{q\Gamma h i} \dot{q}_{Z_1 \Gamma i}, \quad (11)$$

$$\dot{\psi}_{q\Gamma i} = W_{q\Gamma m i} \dot{q}_{Z_1 \Gamma i} + W_{q\Gamma h i} \dot{q}_{Y_1 \Gamma i}, \quad (12)$$

$$\dot{\gamma}_{q\Gamma} = W_{q\Gamma i} \dot{q}_{\Gamma i}. \quad (13)$$

其中  $q, m$  和  $h$  分别表示弹性振动引起的信号、与姿态角改变方向同方向和与姿态角改变方向相垂直且不是  $X_1$  轴的方向(如  $m$  是  $Y_1$  方向, 则  $h$  是  $Z_1$  方向). 俯仰角速率传感器、偏航角速率传感器、滚动角速率传感器、俯仰角传感器、偏航角传感器和滚动角传感器的各姿态角速率信号如下<sup>[6, 7]</sup>:

$$\Delta \dot{\varphi}_{g\Gamma} = \Delta \dot{\varphi}_+ \sum_{i=1}^2 \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i} + \sum_{i=3}^t \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i} + M_{Rq\Gamma} + N_{q\Gamma}, \quad (14)$$

$$\dot{\psi}_{g\Gamma} = \dot{\psi}_+ \sum_{i=1}^2 \dot{\psi}_{qg\Gamma i} + \sum_{i=3}^t \dot{\psi}_{qg\Gamma i} + M_{\psi g\Gamma} + N_{\psi g\Gamma}, \quad (15)$$

$$\dot{\gamma}_{g\Gamma} = \dot{\gamma}_+ \sum_{\gamma=1}^2 \dot{\gamma}_{qg\Gamma \gamma} + \sum_{\gamma=2}^t \dot{\gamma}_{qg\Gamma \gamma} + M_{\gamma g\Gamma} + N_{\gamma g\Gamma}, \quad (16)$$

$$\Delta \dot{\varphi}_{\Gamma} = \Delta \dot{\varphi}_+ \sum_{i=1}^2 \Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i} + \sum_{i=3}^t \Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i} + M_{R\varphi} + N_{\varphi}, \quad (17)$$

$$\dot{\psi}_{\Gamma} = \dot{\psi}_+ \sum_{i=1}^2 \dot{\psi}_{q\Gamma i} + \sum_{i=3}^t \dot{\psi}_{q\Gamma i} + M_{\psi \Gamma} + N_{\psi \Gamma}, \quad (18)$$

$$\dot{\gamma}_{\Gamma} = \dot{\gamma}_+ \sum_{\gamma=1}^2 \dot{\gamma}_{q\Gamma \gamma} + \sum_{\gamma=2}^t \dot{\gamma}_{q\Gamma \gamma} +$$

$$M_{R\gamma} + N_{\gamma}. \quad (19)$$

其中:  $\Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i}$  是弹性振动高阶项引起的俯仰角速率信号,  $M_{Rq\Gamma}$  是弹性振型斜率等参数引起的估计误差,  $N_{q\Gamma}$  是信号噪声  $\Delta \varphi, \Delta \varphi_{q\Gamma i}, \Delta \varphi_{qg\Gamma i}, \psi, \psi_{q\Gamma i}, \psi_{qg\Gamma i}, \dot{\gamma}, \dot{\gamma}_{q\Gamma}$  和  $\dot{\gamma}_{qg\Gamma}$  可用信号处理的方法从惯性传感器的输出信号中分离出来 式(5) ~ (19) 适用于中远程垂直发射的弹道式导弹

由式(1), (2), (5), (8), (9), (11), (12), (14), (15), (17) 和(18) 得到第一组容错控制系统的重构信号即式(20) ~ (23). 俯仰角速率传感器、偏航角速率传感器、俯仰角传感器和偏航角传感器的各重构信号如下:

$$\Delta \dot{\varphi}_{R\Gamma} = \Delta \dot{\varphi}_+ \sum_{i=1}^2 \left( \frac{W_{qg\Gamma m i} (W_{\varphi h i} \dot{\psi}_{q\Gamma i} - W_{\varphi m i} \dot{\psi}_{q\Gamma i})}{W_{\psi g\Gamma m i} (W_{\varphi h i} \Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i} - W_{\varphi m i} \Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i})} + \frac{\Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i} + W_{qg\Gamma h i} (W_{\varphi h i} \Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i} - W_{\varphi m i} \dot{\psi}_{q\Gamma i})}{\dot{\psi}_{q\Gamma i} + W_{\psi g\Gamma h i} (W_{\varphi h i} \dot{\psi}_{q\Gamma i} - W_{\varphi m i} \Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i})} \right) \times \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i} + \sum_{i=3}^t \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i} + M_{Rq\Gamma} + N_{q\Gamma}, \quad (20)$$

$$\dot{\psi}_{R\Gamma} = \dot{\psi}_+ \sum_{i=1}^2 \left( \frac{W_{\psi g\Gamma m i} (W_{\varphi h i} \Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i} - W_{\varphi m i} \dot{\psi}_{q\Gamma i})}{W_{qg\Gamma m i} (W_{\varphi h i} \dot{\psi}_{q\Gamma i} - W_{\varphi m i} \Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i})} + \frac{\dot{\psi}_{q\Gamma i} + W_{\psi g\Gamma h i} (W_{\varphi h i} \dot{\psi}_{q\Gamma i} - W_{\varphi m i} \Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i})}{\Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i} + W_{qg\Gamma h i} (W_{\varphi h i} \Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i} - W_{\varphi m i} \dot{\psi}_{q\Gamma i})} \right) \times \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i} + \sum_{i=3}^t \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i} + M_{R\psi\Gamma} + N_{\psi\Gamma}, \quad (21)$$

$$\Delta \varphi_{R\Gamma} = \Delta \varphi(t_f) + \int_f^t \Delta \dot{\varphi}_{R\Gamma} dt + T \varphi, \quad (22)$$

$$\psi_{R\Gamma} = \psi(t_f) + \int_f^t \dot{\psi}_{R\Gamma} dt + T \psi \quad (23)$$

其中:  $R$  为重构信号的下标;  $t_f$  为故障发生的时间;  $t$  为当前时间;  $T$  为故障发生时传感器输出信号的测量误差, 有

$$\Delta \dot{\varphi}_{R\Gamma} = \Delta \dot{\varphi}_+ \sum_{i=1}^2 \left( \frac{W_{\varphi m i} (W_{qg\Gamma h i} \dot{\psi}_{qg\Gamma i} - W_{\psi g\Gamma m i} \dot{\psi}_{qg\Gamma i})}{W_{\varphi \Gamma m i} (x_{\Gamma}) (W_{\psi g\Gamma h i} \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i} - W_{qg\Gamma m i} \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i})} + \frac{\Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i} + W_{\varphi h i} (W_{\psi g\Gamma h i} \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i} - W_{qg\Gamma m i} \dot{\psi}_{qg\Gamma i})}{\dot{\psi}_{qg\Gamma i} + W_{\varphi \Gamma h i} (W_{qg\Gamma h i} \dot{\psi}_{qg\Gamma i} - W_{qg\Gamma m i} \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i})} \right) \times \Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i} + \sum_{i=3}^t \Delta \dot{\varphi}_{q\Gamma i} + M_{R\varphi} + N_{\varphi}, \quad (24)$$

$$\dot{\psi}_{R\Gamma} = \dot{\psi}_+ \sum_{i=1}^2 \left( \frac{W_{\varphi \Gamma m i} (W_{\psi g\Gamma h i} \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i} - W_{qg\Gamma m i} \dot{\psi}_{qg\Gamma i})}{W_{\varphi m i} (W_{qg\Gamma h i} \dot{\psi}_{qg\Gamma i} - W_{\psi g\Gamma m i} \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i})} + \frac{\dot{\psi}_{qg\Gamma i} + W_{\varphi \Gamma h i} (W_{qg\Gamma h i} \dot{\psi}_{qg\Gamma i} - W_{\psi g\Gamma m i} \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i})}{\Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i} + W_{\varphi h i} (W_{\psi g\Gamma h i} \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i} - W_{qg\Gamma m i} \dot{\psi}_{qg\Gamma i})} \right) \times \Delta \dot{\varphi}_{qg\Gamma i} +$$

$$\Delta \hat{\Phi}_{q\Gamma i} + \sum_{i=3} \Delta \hat{\Psi}_{q\Gamma i} + M_{R\Gamma} \psi_{\Gamma} + N_{\Gamma} \psi_{\Gamma} \quad (25)$$

根据式 (3), (4), (6), (7), (10), (13), (16) 和 (19) 可以得到第 2 个容错控制系统的重构信号, 即式(26) 和 (27). 滚动角速率传感器和滚动角传感器的各重构信号如下:

$$\begin{aligned} \hat{Y}_{R\Gamma} &= \hat{Y} + W_{\gamma\Gamma} k A_{\Gamma} \sin(2\pi f_{\Gamma} t + \theta_{\Gamma} + \alpha) + \\ & \hat{Y}_{q\Gamma} + M_{R\Gamma} \psi_{\Gamma} + N_{\gamma\Gamma}, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \hat{Y}_{\Gamma} &= \hat{Y}_{\Gamma}(t_f) + \int_f^t \{ \hat{Y} + W_{\Gamma} (x_{\Gamma}) k^{-1} \times \\ & A_{\gamma\Gamma} \sin(2\pi f_{\Gamma} t + \theta_{\gamma\Gamma} - \alpha) + \\ & \hat{Y}_{q\Gamma} + M_{R\Gamma} + N_{\Gamma} \} dt + T_{\gamma} \end{aligned} \quad (27)$$

误差因素的影响分析如下: 式 (20), (21) 和 (26) 存在重构误差, 式 (22), (23) 和 (27) 不仅存在重构误差, 而且存在重构积累误差. 弹性振动高阶项所引起的角度或角速率的误差在工程上直接舍去, 因为相比之下它的量较小, 舍去后可以满足工程要求. 信号噪声会给信号处理带来不利因素, 可用去噪法 (如小波滤波) 来减小其影响. 测量误差、估计误差、重构误差和累积误差可使稳定时间加长, 稳态误差增大, 这类误差可通过未出现故障时的过去或实时测量值与重构值进行比较, 总结它们之间的规律, 并据此进行补偿, 以减小影响.

### 2.4 故障诊断

通过相邻小波系数算法可对具有持续各阶弹性振动信号的导弹控制系统惯性传感器进行故障诊断. 用小波系数故障诊断法无法对这类系统进行故障诊断, 因为其小波系数与多阶弹性振动的幅值有关, 有时发生故障的小波系数还没有不发生故障的小波系数大, 这样就难以确定用小波系数进行诊断的阈值. 当信号有突变或传感器出现故障时, Mallat 小波系数会在信号跳变的后两拍出现变号或者出现大的变化, 根据这一特点, 用下面相邻小波系数算法对传感器进行故障诊断.

首先计算

$$m_{\text{mallat}}(j, n) = \frac{|w(j-1, n) - w(j, n)| + |w(j-1, n) - w(j-2, n)|}{2} \quad (28)$$

其中:  $m_{\text{mallat}}$  是相邻小波系数运算的值;  $w(j, n)$  是第  $j$  拍第  $n$  个传感器的小波系数,  $n = 1, 2, \dots, 6$  分别代表俯仰角速率传感器、偏航角速率传感器、滚动角速率传感器、俯仰角传感器、偏航角传感器和滚动角传

感器. 因为 Mallat 小波系数只在信号发生突变的后两拍出现大的变化, 而且工程上认为信号只有出现大于确定的值  $V_0$  (如 0.2V) 时才认为是故障, 因此, 当  $m_{\text{mallat}}$  出现不小于阈值  $T_{\text{mallat}}$  的值, 且这时后两拍出现了不小于  $V_0$  突变时, 传感器出现故障. 计算如下:

$$d_{\text{mallat}}(j, n) = \begin{cases} 1, & m_{\text{mallat}}(j, n) > T_{\text{mallat}}(n), \\ & |v(j-1, n) - v(j, n)| > V_0(n); \\ 1, & m_{\text{mallat}}(j, n) > T_{\text{mallat}}(n), \\ & |v(j-1, n) - v(j-2, n)| > V_0(n); \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (29)$$

其中:  $d_{\text{mallat}}(j, n)$  为 1 表示传感器有故障,  $d_{\text{mallat}}(j, n)$  为 0 表示传感器无故障.

### 2.5 切换控制

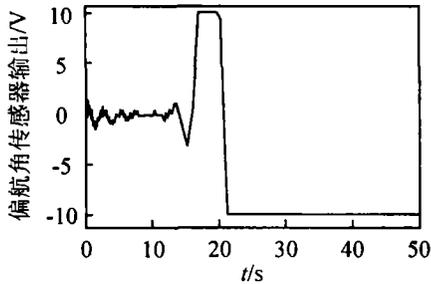
首先用式 (20) ~ (23), (26) 和 (27) 将每个传感器输出都用其他传感器输出来进行重构, 同时对每个传感器进行实时故障检测; 当某个传感器被诊断出现故障时, 切换控制部分就用该传感器的重构信号来代替这个传感器的输出信号在系统中工作. 第  $n$  个传感器的切换策略为

$$\begin{cases} \text{切换, } d_{\text{mallat}}(j, n) = 1; \\ \text{不切换, } d_{\text{mallat}}(j, n) = 0. \end{cases} \quad (30)$$

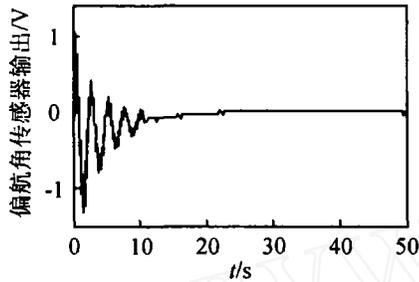
### 3 仿真实验

由于俯仰通道与偏航通道的参数相同, 这里只将偏航通道容错控制和滚动通道的容错控制实验结果加以说明. 以苏式某导弹模型为例, 设在第 0 s 时偏航通道受到一个单位阶跃信号的干扰, 在第 10 s 时偏航速率传感器断线, 当对系统没有进行容错控制时, 第 10 s 后进入控制器的偏航速率信号为 0, 偏航角传感器的输出发散, 偏航通道是一个不稳定的系统, 如图 2(a) 所示. 当偏航通道发生同样的故障, 系统存在容错控制时, 进入控制器的偏航角速率信号收敛, 偏航角传感器的输出信号也收敛, 如图 2(b) 所示. 由图 2(b) 可以看出, 由于对系统进行了容错控制, 系统是稳定的.

设滚动通道在第 0 s 时受到一个单位阶跃信号的干扰, 在第 15 s 时滚动速率传感器断线, 当对系统没有进行容错控制时, 滚动速率传感器输出变为 0, 滚动角传感器的输出发散, 滚动通道变成不稳定的系统, 如图 3(a) 所示. 当滚动通道发生同样的故障, 系统存在容错控制时, 进入控制器的滚动角速率信号收敛, 滚动角传感器的输出信号也收敛, 如图 3(b) 所示. 由图 3(b) 可以看出, 由于对系统进行了容错控制, 系统是稳定的.

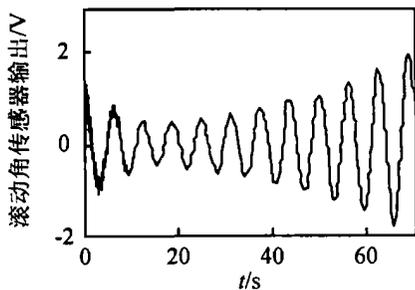


(a) 未进行容错控制

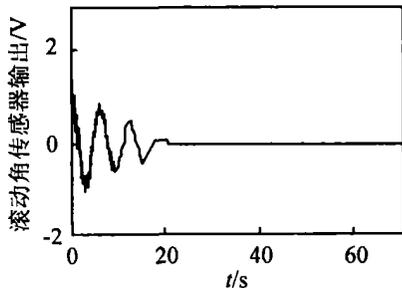


(b) 进行容错控制

图 2 偏航角传感器的输出



(a) 未进行容错控制



(b) 进行容错控制

图 3 滚动角传感器的输出

#### 4 结 论

中远程弹道导弹容错控制的研究实现了算法上

的三大突破: 在信号分离中解决了滤波信号时间滞后问题, 实现了传感器输出信号的实时分离; 在信号重构中找到了姿态角传感器处与姿态角速率传感器处的弹性振动间的关系, 解决了各传感器输出信号的重构问题; 在故障诊断中克服了小波故障诊断的缺点, 解决了输出信号含有多阶弹性振动信号的传感器故障诊断问题。将导弹控制系统容错控制算法应用于中远程弹道导弹的设计, 必将大大提高导弹的可靠性。

#### 参考文献 (References)

- [1] Izumikawa Y, Yubai K, Hirai J. Fault-tolerant Control System of Flexible Arm for Sensor Fault by Using Reaction Force Observer [A]. *Proc of the 8th IEEE Int Workshop on Advanced Motion Control* [C]. Kawasaki, 2004: 583-588
- [2] Hsieh F S. Fault-tolerant Deadlock Avoidance Algorithm for Assembly Processes [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 2004, 34(1): 65-79
- [3] Tohma Y. Incorporating Fault-tolerance into an Automatic-computing Environment [J]. *IEEE Distributed Systems Online*, 2004, 5(2): 1-12
- [4] Clouqueur T, Saluja K K, Ramanathan P. Fault-tolerance in Collaborative Sensor Networks for Target Detection [J]. *IEEE Trans on Computers*, 2004, 53(3): 320-333
- [5] Christian J, Feser K. Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method [J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2004, 19(1): 214-220
- [6] 杨军, 杨晨, 段朝阳, 等. *现代导弹制导控制系统设计* [M]. 北京: 航空工业出版社, 2005 (Yang J, Yang C, Duan C Y, et al. *Modern Missile Guidance and Control System Design* [M]. Beijing: China Aviation Industry Press, 2005)
- [7] 陈佳实. *导弹制导和控制系统的分析与设计* [M]. 北京: 宇航出版社, 1989 (Chen J S. *Analyis and Design of Missile Guidance and Control System* [M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 1989)