

# 重构控制律的容错控制

西北工业大学 王镛根\*\*

**【摘要】** 本文针对单输入单输出的多回路系统提出了一种简单可行的容错控制方法。当控制系统中任一传感器失效时,对该传感器的邻近回路采用重构控制律的方法加以补偿,不仅使系统仍能稳定且控制质量与传感器失效前相一致。本方法既适合于最小相位系统也适合于非最小相位系统。数字仿真结果表明本方法可行。

关键词: 容错控制 重构控制律 传感器失效 单入单出

## 1 前言

在复杂的控制系统中,传感器或执行器出现的故障概率远比系统本身出现的故障概率高。因此,人们不仅要求控制系统具有良好的动静态性能,而且要求当系统出现故障时,仍能保持系统稳定且满足要求的性能指标,也就是要求系统具有强的鲁棒性,这就是容错控制。

一个典型的容错控制系统至少具有下述三个属性中的一个:鲁棒性、可重构性和可调整性。鲁棒性意味着系统的控制性能对系统结构或参数的变化是不敏感的。可重构性意味着有目的地修改控制系统的某些参数以补偿系统中某些故障。可调整性是指通过改变系统的参数及结构以补偿系统的某些故障。鲁棒系统得到的是具有固定参数和结构的故障容错,而可重构的和可调整的系统必须是自适应的,它们能够进行故障检测和辨识以及具有改变系统的能力。显然可重构的或可调整的系统所能达到的性能要比具有鲁棒的系统所能达到的性能好。

一个容错控制系统应包括故障检测、隔离及调整。本文仅研究可重构的系统的容错控制,文中提出了一种既适合于最小相位系统也适合于非最小相位系统的重构控制律以补偿任一传感器失效的方法。文中还证明了这种重构控制律仍能保持系统的稳定性。

## 2 重构控制律设计

设单入单出的反馈系统如图 1 所示。

其中:  $G_i(s)$  是传递函数,  $k_i$  是传感器的增益,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

### 2.1 重构控制律

设系统中第  $i$  个传感器失效,则重构控制律为

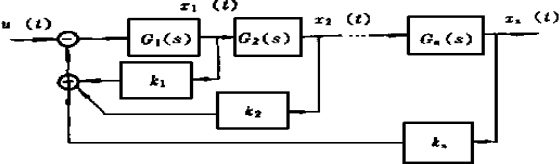


图 1 单入单出的反馈系统

$$\left. \begin{aligned} k_l' &= k_l \quad l = 1, 2, \cdots, i-1, i+2, i+3, \cdots, n \\ k_{i+1}' &= k_{i+1} + k_i / G_{i+1}(s) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

即除了第  $i+1$  个反馈增益需要进行重构以外, 其余完好的反馈增益保持不变, 这比文献[1]中介绍的方法简便多了。

如果系统中第  $n$  个传感器失效, 则重构控制律为

$$\left. \begin{aligned} k_{n-1}' &= k_{n-1} + G_n(s) k_n \\ k_l' &= k_l \quad l = 1, 2, \cdots, n-2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

当第  $i$  个传感器失效时, 令  $k_{i+1}$  重构, 重构的原则是使重构后的系统的闭环传递函数与失效前的系统的闭环传递函数相同。在这里因为第  $k_{i+2}$  直到  $k_n$  没有变化, 所以实际上只要使系统的直到第  $i+1$  内回路的闭环传递函数在失效前后相同即可得到全补偿。

失效前, 系统直到第  $i+1$  内回路的闭环传递函数为

$$\begin{aligned} \Phi_{i+1}(s) &= G_1(s) G_2(s) \cdots G_{i+1}(s) / (1 + G_1(s) k_1 + G_1(s) G_2(s) k_2 \\ &\quad + \cdots + G_1(s) G_2(s) \cdots G_{i+1}(s) k_{i+1}) \end{aligned} \quad (3)$$

失效后, 系统直到第  $i+1$  内回路的闭环传递函数为(已经重构控制律)

$$\begin{aligned} \Phi_{i+1}'(s) &= G_1(s) G_2(s) \cdots G_{i+1}(s) / (1 + G_1(s) k_1 + G_1(s) G_2(s) k_2 \\ &\quad + \cdots + G_1(s) G_2(s) \cdots G_{i+1}(s) k_{i+1}') \end{aligned} \quad (4)$$

令  $\Phi_{i+1}'(s) = \Phi_{i+1}(s)$  得  $k_{i+1}' = k_{i+1} + k_i / G_{i+1}(s)$ , (1) 式得证。

当系统中最后一个反馈回路的传感器失效, 因为没有第  $k_{n+1}$  可重构, 此时有两种方法可以重构: 一种方法是对  $k_{n-1}$  重构, 另一种方法是对  $k_1$  重构, 不难证明,  $k_{n-1}' = k_{n-1} + k_n \cdot G_n(s)$  或  $k_1' = k_1 + k_n \cdot G_2(s) \cdot G_3(s) \cdots G_n(s)$ , 可见第一种重构方法的计算较简单。

现在归纳本文提出的重构控制律:

当第  $i$  个( $i = 1, 2, \cdots, n-1$ ) 传感器失效时, 第  $i+1$  个反馈进行重构, 重构控制律为

$$k_{i+1}' = k_{i+1} + k_i / G_{i+1}(s) \quad i = 1, 2, \cdots, n-1 \quad (5)$$

当第  $n$  个传感器失效时, 第  $n-1$  个反馈回路进行重构, 重构控制律为

$$k_{n-1}' = k_{n-1} + k_n G_n(s) \quad (6)$$

## 2.2 稳定性证明

本文提出的重构控制律方法的原则是保证重构后与重构前的闭环系统的传递函数一致, 所以重构后的系统不会改变重构前系统所具有的稳定性。

重构前系统闭环传递函数的特征方程为

$$1 + G_1(s) k_1 + G_1(s) G_2(s) k_2 + \cdots + G_1(s) G_2(s) \cdots G_n(s) k_n = 0 \quad (7)$$

若第  $i$  个传感器失效, 则第  $i+1$  个反馈回路补偿重构控制律为(5) 式, 而重构后的系统闭环传递函数的特征方程为

$$\begin{aligned} &1 + G_1(s) k_1 + G_1(s) G_2(s) k_2 + \cdots + G_1(s) G_2(s) \cdots G_{i-1}(s) k_{i-1} \\ &+ 0 + G_1(s) G_2(s) \cdots G_i(s) G_{i+1}(s) k_{i+1}' + \cdots + G_1(s) G_2(s) \cdots G_n(s) k_n = 0 \end{aligned}$$

化简后得到的结果与(7) 式相同。可见当系统中任一传感器(包括第  $n$  个传感器)失效时, 本文提出的重构控制律不影响系统的稳定性。显然, 上述证明对非最小相位系统同样适用。

## 3 算 例

设系统结构图如图 1 所示且设  $n = 3$ , 其中

$$G_1(s) = 0.85 / (0.5s + 1) \quad , \quad G_2(s) = 2 / (13.5s - 1) \quad , \quad G_3(s) = 0.9 / (s + 1)$$

$$k_1 = 1.5 \quad , \quad k_2 = 1.0 \quad , \quad k_3 = 2.5^{[1]}$$

可见系统为非最小相位系统。

当第 1 个传感器失效时, 即  $k_1 = 0$  时, 由 (5) 式可得重构控制律  $k_2' = 10.125s + 0.25$ ,  $k_3' = k_3$ ; 当第 2 个传感器失效时, 即  $k_2 = 0$  时, 由 (5) 式可得重构控制律  $k_1' = k_1$ ;  $k_3' = 3.611s + 1.111$ ; 当第 3 个传感器失效时, 即  $k_3 = 0$  时, 由 (5) 式可得重构控制律  $k_1' = k_1$ ;  $k_2' = 1 + 2.25 / (s + 1)$ 。

当  $u(t) = 10$  时原系统的动态响应见图 2。当  $k_1$  或  $k_2$  失效时的补偿前、后系统动态响应因篇幅限制而省略。当  $k_3$  失效时, 未补偿及补偿后的系统动态响应见图 3。

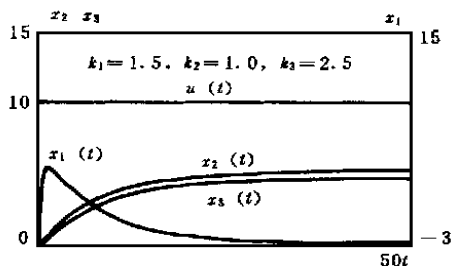


图 2  $u(t) = 10$  时原系统的动态响应

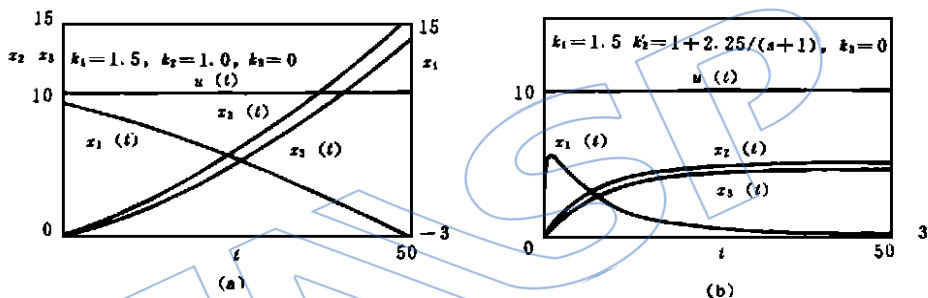


图 3  $k_3$  失效时未补偿及补偿后的系统动态响应

由图 3 可见, 当系统中传感器失效时, 系统性能明显下降甚至失稳, 而经过本文提出的重构控制律补偿后系统的性能基本上与原系统性能一致。

本文针对单入多出回路系统中任一传感器失效情况下, 提出了重构控制律的一种新方法, 该法不仅适用于最小相位系统, 而且适用于非最小相位系统。所提出的重构控制律的方法同样适用于系统中任一传感器失效时只允许最外层反馈回路补偿的约束条件的情况, 此时只要将重构控制律稍加调整即可。本法具有重构控制律简单, 易于实现且补偿精度高等优点。

致谢 算例的数值计算由张西锋同志帮助完成。

## 参 考 文 献

- 葛建化, 孙优贤, 国春晖. 重构控制律补偿传感器失效的容错控制研究. 中国自动化学会第三届过程控制科学报告会论文集, 1989

(责任编辑 王庆康)

## NUMERICAL PREDICTION OF STEADY FORCE NOISE ON A COMPRESSOR ROTOR BLADE

Chen Jiang and Ren Rugan (*Gas Turbine Establishment*)

Sun Xiaofeng and Hu Zongan (*Beijing university of Aeronautics and Astronautics*)

**ABSTRACT** Sources of compressor noise are usually considered as multiple pure tone noise, interaction noise and broadband noise. In the paper, the noise propagation equation of steady force on the compressor rotor blade is derived. The numerical results are compared with the WP-11 compressor rotor acoustical experiment. The theoretical and experimental investigations indicate that the steady force noise on the compressor rotor blade is an important source of the compressor noise.

## A NEW TYPE OF FUEL CONTROL MODEL

Qiu Xuguang

(*Xi'an Yuandong Company*)

**ABSTRACT** A new type of fuel control model is developed without the conventional fuel cock and pressure drop valve. It consists of a high-precision electronic block, a micro-computer and an actuator. The actual fuel flow calculated by the micro-computer or checked from the data chart against the parametric signals fed out from the digital-type transducer in relation to the fuel supply is compared with the required fuel flow and the actuator then balances the actual flow with the required by adjusting the pumping flow or return flow according to the amount of deviation and its characteristics if there is any deviation. The fuel of control unit built with the new model features high precision, low weight, compact size and good adaptability, and is especially suitable to the application of digital control project of aircraft and engine. The new type of fuel control model has been testified for about 100 hours on the digital control research test bed for a type of aeroengine.

## FAULT-TOLERANT CONTROL OF RECONFIGURING RULE

Wang Yinggen

(*Northwestern Polytechnical University*)

**ABSTRACT** A new method of fault-tolerant control for multiloop SOSI system is suggested. A reconfiguration control rule is applied to the neighbouring loop of any fault sensor for compensating its effect. The suggested method is able not only to maintain the stability of the system but also to keep the controlling quality to be the same as that before the fault happens. This method is suitable for both minimal and non-minimal phase systems. The results of the numerical simulation show that the method is of good compensating function.

## "WINDAGE" FOR HIGH GEAR SYSTEMS IN AVIATION

Chen Shixuan

(*Nanjing Aeronautical Institute*)

**ABSTRACT** The problems about "Windage" and churning for high-speed gear systems in aviation are considered. The domestic and foreign technical projects are introduced. The structural measures for depressing and using "Windage" in high-speed gear systems in aviation are presented.