

状态反馈控制系统的容错控制又一策略

孙金生 王执铨 李 军

(南京理工大学自动控制系·南京, 210094)

摘要: 本文在文献[1]的基础上提出了用邻近两状态反馈回路平均分担因传感器失效而失效的回路控制作用的容错控制思想, 进而把这种方法推广到多变量系统中。

关键词: 容错控制; 状态反馈; 系统重构

1 引言

控制系统的可靠性是系统能投入运行的关键。随着系统复杂性的增加, 控制系统的可靠性问题越来越迫切地需要得到解决。容错控制作为提高控制系统可靠性的重要手段, 越来越得到广泛的重视和研究。控制系统的容错指的是当系统中有些部件失效时, 这些部件在系统中的功能能够用系统的其它部件完全代替或部分代替, 使系统能继续保持原有的性能或不丧失最基本的性能(如稳定性)。目前通常采用的方法有系统重构^[1]、控制冗余^[2]、鲁棒性设计^[3,4]等。

状态反馈控制系统在工业过程控制中应用广泛, 按传统方法设计的反馈控制系统在出现传感器失效时其性能将严重恶化, 甚至失稳。文[1]提出一种当某个传感器失效时, 由其余完好的状态反馈回路平均分担已失效回路控制作用的容错控制策略, 但该方法不适用于多变量系统, 且状态变量多的 SISO 系统采用这种方法动态性能可能会恶化。由此, 本文提出一种用邻近两状态反馈回路平均分担已失效回路控制作用的容错控制思想, 并把它推广到多变量系统。

2 SISO 系统的容错控制

对于图 1 所示的 SISO 线性定常状态反馈控制系统, 文[1]提出了一种用其余完好状态反馈回路平均分担已失效回路控制作用的容错控制策略, 这种重构方法虽然简单, 但因是采用各环节的静态增益代替其传递函数来计算补偿量的, 故当系统状态较多时, 因环节之间的惯性作用必然导致系统的动态响应过程恶化。为减小这种不利影响, 本文提出了如下利用邻近两状态反馈回路补偿失效回路控制作用的系统重构方法。

定理 1 假设对象是最小相位系统, 则对于图 1 所示的 SISO 线性定常状态反馈控制系统, 当传感器 k_i 失效时, 故障系统反馈增益重构公式为:

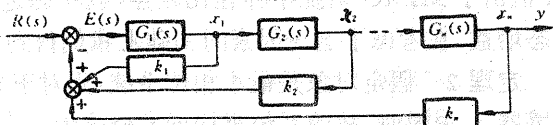


图 1 SISO 状态反馈控制系统

1) 当 $1 < i < n$ 时

$$\begin{cases} k'_{i-1} = k_{i-1} + \frac{k_i G_i(s)}{2} \Big|_{s=0}, \\ k'_i = 0, \\ k'_{i+1} = k_{i+1} + \frac{k_i}{2G_{i+1}(s)} \Big|_{s=0}, \\ k'_j = k_j, \quad j \in \{1, 2, \dots, i-2, i+2, \dots, n\}. \end{cases} \quad (1)$$

2) 当 $i = 1$ 时

$$\begin{cases} k'_1 = 0, \\ k'_2 = k_2 + \frac{k_1}{2G_2(s)} \Big|_{s=0}, \\ k'_3 = k_3 + \frac{k_1}{2G_2(s)G_3(s)} \Big|_{s=0}, \\ k'_j = k_j, \quad j \in \{4, 5, \dots, n\}. \end{cases} \quad (2)$$

3) 当 $i = n$ 时

$$\begin{cases} k'_j = k_j, \quad j \in \{1, 2, \dots, n-3\}, \\ k'_{n-2} = k_{n-2} + \frac{k_n G_{n-1}(s) G_n(s)}{2} \Big|_{s=0}, \\ k'_{n-1} = k_{n-1} + \frac{k_n G_n(s)}{2} \Big|_{s=0}, \\ k'_n = 0. \end{cases} \quad (3)$$

其中 $k'_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为重构后的状态反馈增益.

证 略.

3 MIMO 系统的容错控制

MIMO 系统与 SISO 系统不同,其状态之间不一定都存在传递函数关系,因此不能简单地套用 SISO 系统的容错控制方法,但对任一状态而言,必然存在与其有传递函数关系的状态,因此,当某一状态反馈传感器失效时,可以用与其有传递函数关系的状态进行补偿.但由于 MIMO 系统中存在比较点,故状态之间稳态值之比并不一定是其传递函数的静态增益,在考虑了这一因素的基础上我们得到如下重构方法:

定理 2 假定对象是最小相位系统,则对于 r 维输入的 MIMO 系统,当某一状态反馈传感器 x_i 失效时,故障系统重构增益公式为:

$$\left. \begin{aligned} k'_{jm} &= k_{jm} + \frac{1}{2} k_{ji} g_{mi}, \\ k'_{ji} &= 0, \\ k'_{jn} &= k_{jn} + \frac{1}{2} k_{ji} g_{ni}, \end{aligned} \right\} \quad j = 1, 2, \dots, r. \quad (4)$$

且若 $x_m(x_n)$ 与 x_i 之间没有比较点时,其它状态反馈增益不变;若 $x_m(x_n)$ 与 x_i 之间有比较点,则当 $x_m(x_n)$ 在比较点之前时,比较点上其它各状态的反馈增益需加上 $x_m(x_n)$ 分担的部分;当 $x_m(x_n)$ 在比较点之后时,比较点上其它各状态的反馈增益需相应减去 $x_m(x_n)$ 分

担的部分. 式中 $k'_{jm}, k'_{jn}, k'_{ji}$ 为重构后的反馈增益, g_{mi}, g_{ni} 分别为与 x_i 有密切传递函数关系的状态 x_m, x_n 到 x_i 的静态增益.

证 略.

4 设计实例

例 1 考虑特性如下的五阶系统

$$\begin{aligned} G_1(s) &= \frac{x_1(s)}{E(s)} = \frac{2.5}{1.25s + 1}, & G_2(s) &= \frac{x_2(s)}{x_1(s)} = \frac{2}{2s + 1}, \\ G_3(s) &= \frac{x_3(s)}{x_2(s)} = \frac{1.6}{s + 1}, & G_4(s) &= \frac{x_4(s)}{x_3(s)} = \frac{1.25}{0.625s + 1}, \\ G_5(s) &= \frac{x_5(s)}{x_4(s)} = \frac{4}{2.5s + 1}. \end{aligned}$$

为使系统具有令人满意的性能, 采用全状态反馈控制, 得状态反馈增益阵为

$$K = [5.85 \quad 25.555 \quad 27.8 \quad 14.114 \quad 10.764].$$

当某一传感器失效时, 根据本文提出的重构方法易得重构后的状态反馈增益如表 1 所示. 根据文[1]中提出的方法, 故障系统重构后的反馈增益如表 2 所示.

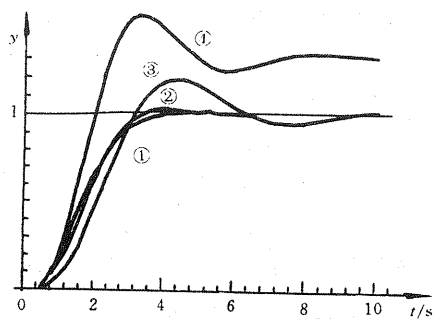
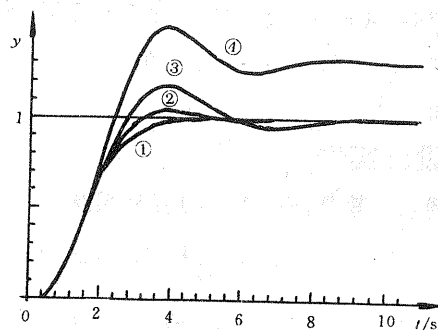
表 1 本文方法的重构结果

重构后的状态反馈增益					
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
k_1 失效	0	27.018	28.714	14.114	10.764
k_2 失效	31.405	0	35.786	14.114	10.764
k_3 失效	5.85	47.795	0	25.234	10.764
k_4 失效	5.85	25.555	36.621	0	12.528
k_5 失效	5.85	25.555	54.71	35.642	0

表 2 文[1]方法的重构结果

重构后的状态反馈增益					
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
k_1 失效	0	26.286	28.257	14.480	10.855
k_2 失效	18.628	0	31.793	17.308	11.563
k_3 失效	28.09	36.67	0	19.674	12.154
k_4 失效	19.964	32.612	32.211	0	11.646
k_5 失效	48.906	47.083	41.255	24.878	0

图 2 和图 3 是以 k_3 失效为例给出的仿真结果, 仿真结果表明, 系统在故障情况下的性能严重恶化, 采用容错控制后故障系统的稳态值都能与原系统一样, 但两者相比本文给出的方法的动态响应过程更接近正常系统的动态响应过程, 明显优于文[1]中提出的方法的动态过程.

图2 k_3 在 $t=0$ 时失效的阶跃响应曲线图3 k_3 在 $t=1$ s 时失效的阶跃响应曲线

① 正常系统 ② 本文容错控制系统 ③ 文[1]中容错控制 ④ 故障系统

例2 考虑图4所示的MIMO系统.

为使系统具有好的性能,得全状态反

馈控制律为

$$K = \begin{bmatrix} 3.533 & 1.960 & 0.653 & 2.347 \\ 0.653 & 0.270 & 2.678 & 1.566 \end{bmatrix}.$$

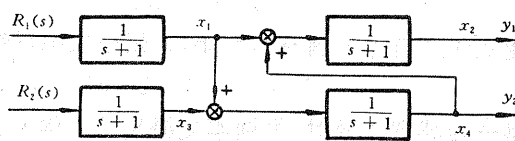


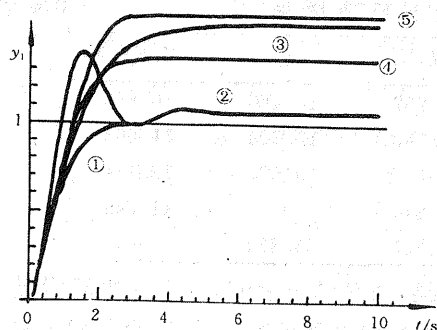
图4 MIMO 系统结构图

当某一传感器失效时,根据定理2求得重构后的控制律如表3所示.

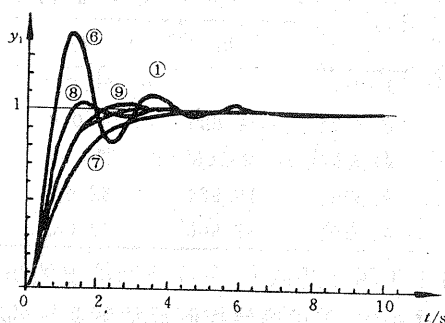
表3 重构后的状态反馈控制律

	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}
x_1 失效	0	3.726	-1.113	2.347	0	0.597	2.351	1.566
x_2 失效	5.493	0	0.653	4.307	0.923	0	2.678	1.836
x_3 失效	2.880	2.287	0	2.674	-2.025	1.609	0	2.895
x_4 失效	3.533	3.133	1.826	0	0.653	1.053	3.461	0

图5和图6是系统输出 y_1 的阶跃响应曲线. 仿真结果表明,故障系统的性能严重恶化,而容错控制系统虽然动态性能受到一些影响,但都能保证稳态值不受影响,说明本文提出的容错控制方法是有效的.

图5 故障系统输出 y_1 的阶跃响应

① 正常系统 ② ~ ⑤ $x_1 \sim x_4$ 失效的故障系统 ⑥ ~ ⑨ $x_1 \sim x_4$ 失效容错控制系统

图6 容错控制系统输出 y_1 的阶跃响应

参 考 文 献

- [1] 葛建华等. 状态反馈控制系统的容错控制策略. 自动化学报. 1991, 17(2): 191—197
- [2] Siljak, D. D. . Reliable Control Using Multiple Control Systems. Int. J. Control. 1980, 31(2): 303—329
- [3] Shimemura, E. and Fujita, M. . A Design Method for Linear State Feedback Systems Possesing Integrity Based on a Solution of a Riccati-type Equation. Int. J. Control. 1985, 42(4): 887—899
- [4] Medanic, J. V. et al. On the Design of Reliable Control Systems. Proceedings of the 1990 American Control Conference, 1990, 3030—3035

A New Algorithm of Fault-tolerant Control with State Feedback Control Systems

SUN Jinsheng, WANG Zhiquan and LI Jun

(Department of Automatic Control, Nanjing University of Science and Technology • Nanjing, 210094, PRC)

Abstract: In this paper, on the basis of paper[1], a new algorithm of fault-tolerant control is presented. When one of the sensors is failure, its two near state feedback circuits will bear the control action of the fault circuit averagely. And then this algorithm is developed to multivariable systems.

Key words: fault-tolerant control; state feedback; reconfiguration

本文作者简介

孙金生 1967年生. 分别于1990年和1992年在华东工学院自动控制系获工学学士和工学硕士学位, 现为南京理工大学博士生. 目前主要研究方向是: 多变量系统的容错控制, 大系统的分散鲁棒控制, 分散容错控制.

王执铨 1939年生. 1962年毕业于哈尔滨军事工程学院. 现为南京理工大学自控系教授, 博士生导师. 目前主要研究兴趣为动态大系统的容错控制, 高精度数字伺服系统, 智能控制等.

李 军 1970年生. 1991年和1994年于华东工学院分获工学学士和工学硕士学位, 现在南京理工大学攻读博士学位. 感兴趣的研究方向为模糊控制, 容错控制, 高精度数字伺服系统.