

状态反馈控制系统的容错控制策略¹⁾

葛建华 孙优贤 周春晖

(浙江大学工业控制研究所,杭州)

摘 要

本文提出了在状态反馈控制系统中,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的控制作用的容错控制思想。由此所设计的线性状态反馈容错控制系统在任一传感器失效的情况下,均具有从正常系统的控制到故障系统的控制的无扰动切换功能和良好的静动态性能。该法简单、实用,具有广泛的工程应用价值。

关键词: 状态反馈,容错控制,传感器失效。

一、引 言

随着对控制系统可靠性和安全性要求的提高,容错控制系统的研究得到了广泛的重视。这类控制系统可适应其环境的显著变化,在部件正常工作时,系统具有指定的性能;若实际反馈控制系统的一个或多个关键部件(如传感器或执行机构)失效,系统仍维持稳定,或进一步也能实现故障系统的性能最优。实现控制系统具有容错能力的方法是引入控制能力的冗余^[1]。通常有两种方法:一种为主动容错控制方法,其特点是没有检测故障,控制系统自身具有容错能力。文献[2]利用硬件冗余使控制器能容许一个或多个关键部件的失效,其代价是成本的提高。对多变量系统,则利用各子系统间的耦合关系,从而实现在某一传感器或执行机构失效情况下使整个系统仍维持稳定,即所谓的“整体性”研究^[3]。更进一步的研究是对大系统分散控制中的序贯分散鲁棒跟踪系统问题的求解^[4]。另一种方法是被动容错控制方法^[5,6]。它是基于故障检测、故障屏蔽和故障系统重组态技术而实现容错控制的。近年来,有关这方面的文章很多,特别是在故障检测和屏蔽的理论研究和应用方面有许多报道,采用“软件冗余”技术完成原由“硬件冗余”执行的故障检测任务的思想是容错控制中一个概念上的突破,但在故障系统重组态方面,目前主要采用的方法还是硬件多重冗余。

状态反馈控制系统包括全状态反馈和部分状态反馈,在工业过程控制中应用很广。在工业过程中,出于经济性考虑或由于工艺限制,系统不可能提供足够的硬件“冗余”,即不可能为测量一个工艺参数配置一个以上的传感器因此,在系统运行过程中,若某个传感

本文于 1989 年 5 月 21 日收到。

1) 国家自然科学基金资助项目 本文曾在中国自动化学会第三届过程控制报告会上宣读。

器失效,若按传统方法设计的控制系统其性能将严重恶化.本文的目的就是针对状态反馈控制系统,提出一种能容忍传感器失效的控制策略.对某传感器失效的故障,采用被动容错控制思想,在检测和屏蔽该失效传感器后,根据故障源,由其余完好状态反馈回路平均分担已失效状态反馈回路的控制作用.由此设计的状态反馈容错控制系统对传感器失效故障具有容错性.

二、主要结果

考虑一个离散时间线性系统

$$X(k+1) = \phi X(k) + BU(k), \quad (1)$$

$$Y(k+1) = CX(k+1). \quad (2)$$

式中

$$X(k) \in R^{n \times 1}; \quad \phi \in R^{n \times n}; \quad U(k) \in R^{m \times 1};$$

$$B \in R^{n \times m}; \quad Y(k+1) \in R^{l \times 1}; \quad C \in R^{l \times n}.$$

为了使控制系统具有满意的性能,可采用状态反馈.状态反馈控制律的设计方法一般有两种:1)极点配置法;2)二次型最优调节器.考虑实现的方便性,常采用可以直接测量的状态变量作为反馈量,最终得到的状态反馈表达式为

$$U(k) = KCX(k), \quad (3)$$

式中 $K \in R^{m \times l}$.

闭环控制系统表达式为

$$X(k+1) = (\phi - BKC)X(k) + BU(k), \quad (4)$$

$$Y(k+1) = CX(k+1). \quad (5)$$

系统的闭环特征极点由 $\phi - BKC$ 所决定.当系统出现故障时,故障闭环系统的表达式可写为

$$X_f(k+1) = (\phi_f - B_f K_f C_f)X_f(k) + B_f U_f(k), \quad (6)$$

$$Y_f(k+1) = C_f X_f(k+1). \quad (7)$$

式中下标“f”代表失效后的矩阵.

故障系统的闭环特征极点由 $\phi_f - B_f K_f C_f$ 所决定.我们希望故障后的系统性能尽可能地与原系统性能一致,或者说

$$\phi - BKC = \phi_f - B_f K_f C_f. \quad (8)$$

由此得到故障系统所需修改的状态反馈增益值为

$$K_f = B_f^+ (\phi_f - \phi) C_f^+ + B_f^+ B K C C_f^+, \quad (9)$$

式中 B_f^+ , C_f^+ 分别是 B_f , C_f 的伪逆矩阵.

对于传感器失效的故障, ϕ_f 和 B_f 都同相应的原矩阵一样,因此,式(9)改为

$$K_f = K C C_f^+. \quad (10)$$

由于实际情况中极少出现两个传感器同时失效的情况,因此这里仅考虑一个传感器失效的情况.此时,因为 K_f 是 $m \times (l-1)$ 矩阵,含有 $m \times (l-1)$ 个未知数,而式(10)只能提供 m 个独立方程,故无法求解出 K_f , 必须寻找新的重组态途径.

图 1 所示为 SISO 线性定常状态反馈控制系统。

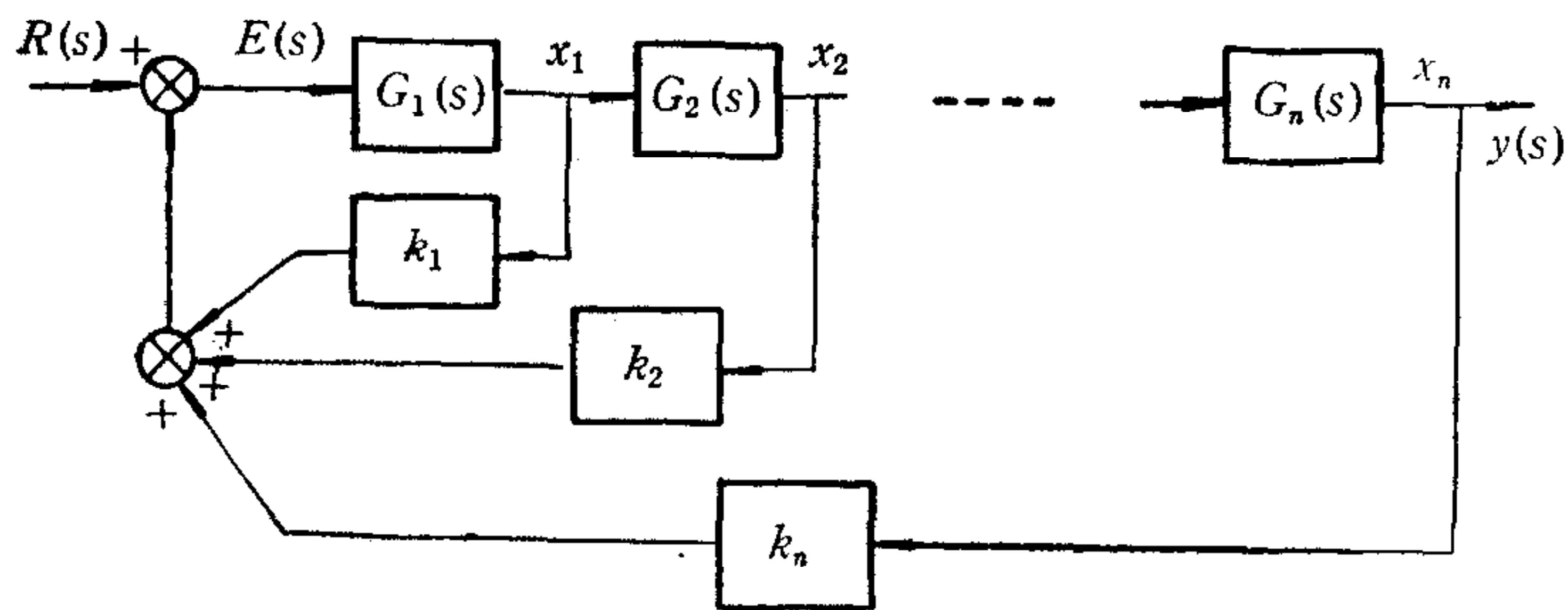


图 1 SISO 状态反馈控制系统

定理。假设对象是最小相位系统，则对于 SISO 线性定常状态反馈控制系统，当某一状态反馈传感器 k_i 失效时，故障系统重组态反馈增益公式为

$$\begin{aligned}
 k'_1 &= k_1 + \frac{k_i G_2(s) \cdots G_i(s)}{n-1} \Big|_{s=0}, \\
 &\vdots \\
 k'_{i-1} &= k_{i-1} + \frac{k_i G_i(s)}{n-1} \Big|_{s=0}, \\
 k'_i &= 0, \\
 k'_{i+1} &= k_{i+1} + \frac{k_i}{(n-1)G_{i+1}(s)} \Big|_{s=0}, \\
 &\vdots \\
 k'_n &= k_n + \frac{k_i}{(n-1)G_{i+1}(s) \cdots G_n(s)} \Big|_{s=0}.
 \end{aligned} \tag{11}$$

证明。在故障情况下，重组态最理想的情况是通过修改其余正常状态反馈回路的增益，使故障系统尽可能接近原系统的性能。设修改后的状态反馈增益分别为 k'_1, k'_2, \dots, k'_n 。在无故障情况下，容易得到

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + k_1 G_1(s) + \cdots + k_n G_1(s) \cdots G_n(s)}. \tag{12}$$

在某一传感器 k_i 失效情况下，式 (12) 改为

$$\begin{aligned}
 \frac{E'(s)}{R(s)} &= 1/[1 + k'_1 G_1(s) + \cdots + k'_{i-1} G_1(s) \cdots G_{i-1}(s) \\
 &\quad + k'_{i+1} G_1(s) \cdots G_{i+1}(s) + \cdots + k'_n G_1(s) \cdots G_n(s)].
 \end{aligned} \tag{13}$$

令式 (12) 等于式 (13)，即

$$E(s) = E'(s), \tag{14}$$

或

$$\begin{aligned}
 &1 + k_1 G_1(s) + \cdots + k_n G_1(s) \cdots G_n(s) \\
 &= 1 + k'_1 G_1(s) + \cdots + k'_{i-1} G_1(s) \cdots G_{i-1}(s) \\
 &\quad + k'_{i+1} G_1(s) \cdots G_{i+1}(s) + \cdots + k'_n G_1(s) \cdots G_n(s).
 \end{aligned} \tag{15}$$

显然,若根据式(15)能够求得 $k'_j(j=1,2,\dots,n)$,则实现了第 i 个传感器失效的故障系统性能与原系统性能的完全一致。但是,式(15)是一个含有 $n-1$ 个未知数的方程,无法求解。

由上面分析不难发现,对于第 i 个传感器失效的故障系统,相当于原系统的特征方程中缺了 $k_i G_1(s) \cdots G_i(s)$ 项。因此,如果假设其余完好状态反馈控制回路在仍承担自身原先控制作用的同时,再额外平均分担由于第 i 个传感器失效所损失的控制作用

$$k_i G_1(s) \cdots G_i(s),$$

则由此求解出的重组态故障系统性能就与原系统一致。根据上述重组态思想,修改式(15)成如下形式:

$$\begin{aligned} & (k'_1 - k_1)G_1(s) + (k'_2 - k_2)G_1(s)G_2(s) + \cdots \\ & + (k'_{i-1} - k_{i-1})G_1(s) \cdots G_{i-1}(s) + (k'_{i+1} - k_{i+1})G_1(s) \cdots G_{i+1}(s) + \cdots \\ & + (k'_n - k_n)G_1(s) \cdots G_n(s) = k_i G_1(s) \cdots G_i(s). \end{aligned} \quad (16)$$

由上面的假设可以把式(16)化为如下 $(n-1)$ 个方程:

$$\begin{aligned} (k'_1 - k_1)G_1(s) &= \frac{k_i G_1(s) \cdots G_i(s)}{n-1}, \\ &\vdots \\ (k'_{i-1} - k_{i-1})G_1(s) \cdots G_{i-1}(s) &= \frac{k_i G_1(s) \cdots G_i(s)}{n-1}, \\ (k'_{i+1} - k_{i+1})G_1(s) \cdots G_{i+1}(s) &= \frac{k_i G_1(s) \cdots G_i(s)}{n-1}, \\ &\vdots \\ (k'_n - k_n)G_1(s) \cdots G_n(s) &= \frac{k_i G_1(s) \cdots G_i(s)}{n-1}. \end{aligned} \quad (17)$$

求解上述方程组,得到故障系统的状态反馈重组态公式为

$$\begin{aligned} k'_1 &= k_1 + \frac{k_i G_2(s) \cdots G_i(s)}{n-1}, \\ &\vdots \\ k'_{i-1} &= k_{i-1} + \frac{k_i G_i(s)}{n-1}, \\ k'_i &= 0, \\ k'_{i+1} &= k_{i+1} + \frac{k_i}{(n-1)G_{i+1}(s)}, \\ &\vdots \\ k'_n &= k_n + \frac{k_i}{(n-1)G_{i+1}(s) \cdots G_n(s)}. \end{aligned} \quad (18)$$

可简化地取各环节传递函数的静态增益代替 $G_j(s)$,由此得到上述定理所述的故障系统重组态公式。

以上得到的全状态反馈控制系统在某传感器 k_i 失效情况下重组态的方法,同样适用于采用部分状态反馈的控制系统。上述的推导是在连续时间控制系统中进行的,也同样适用于离散时间系统的情况。在实际的容错控制实现过程中,增益重组态值是经离线算好

编入程序的。当判断出某一传感器失效后, 软件就自动转入容错控制。由于在求取故障系统新的状态反馈增益时是取各环节传递函数的静态增益代替该环节传递函数, 因此所得到的仍是定常状态反馈增益值, 重组态后的故障系统静态工作点仍不变, 从而实现了从正常系统控制到故障系统控制的无扰动切换。

三、例 子

某水位控制装置的原理图如图 2 所示。该装置由贮槽、泵、调节阀等组成。贮槽 I、

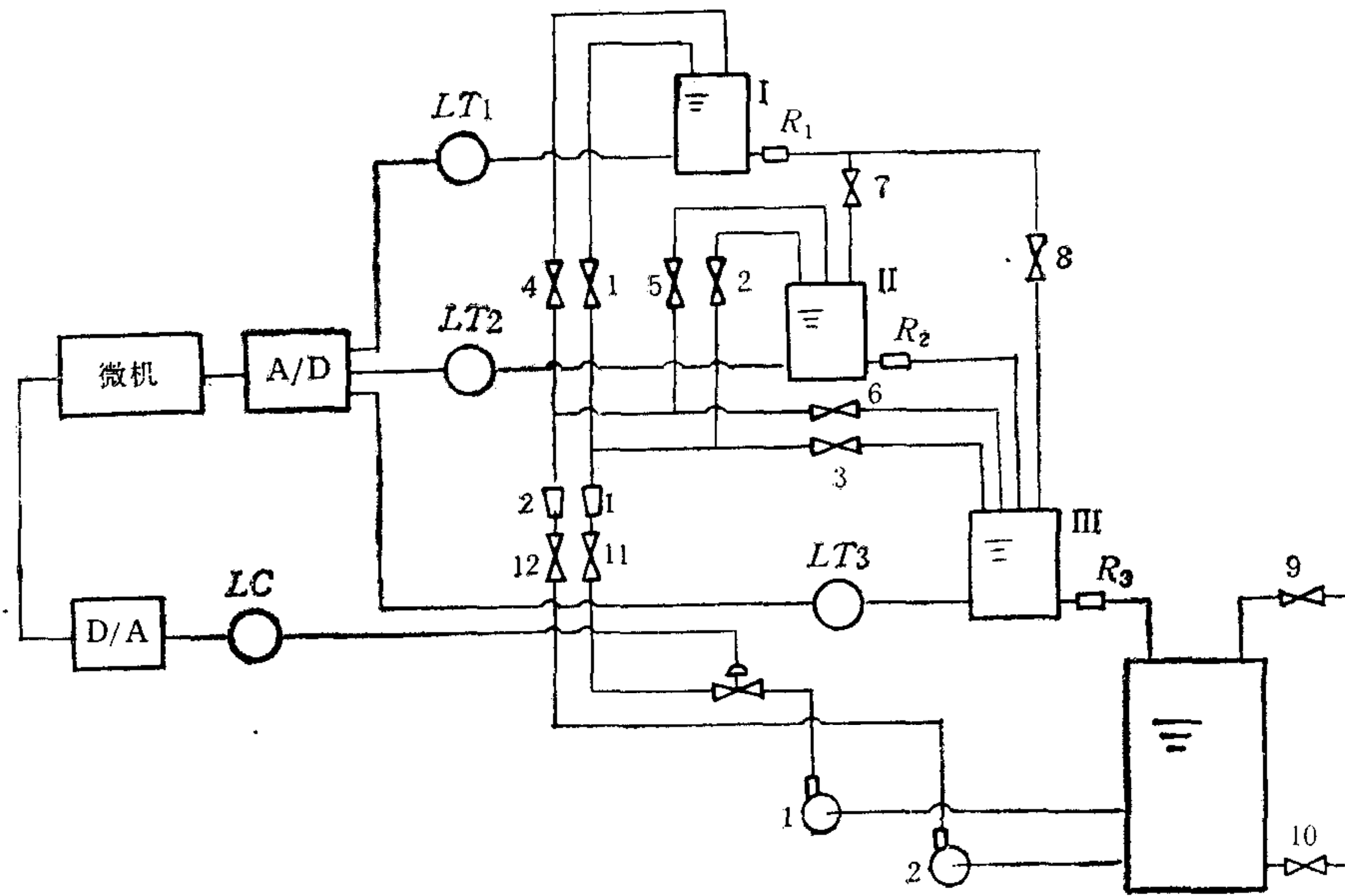


图 2 水位控制装置原理图

II、III 串联, 每个贮槽的出口装有节流孔, 通过节流孔阻力 R_1 , R_2 和 R_3 的调节, 可以改变各个贮槽的时间常数和放大倍数。泵 1 产生循环水量, 通过阀 1, 阀 2, 阀 3, 阀 7 和阀 8 的切换, 组成各种流程, 经流量计 1 送至贮槽 I, II, III, 得到各种不同的控制对象。在本实验中, 阀 1 和阀 7 是打开的。泵 2 产生扰动流量, 通过阀 4, 阀 5 和阀 6 的切换, 可以改变扰动作用点。工艺上要求严格控制贮槽 III 的液位。

对于上述控制要求, 本文采用全状态反馈控制。取状态变量为: $x_1 = h_1$, $x_2 = h_2$, $x_3 = h_3$ 。测量信号经 A/D 转换后进入 Apple 机, 由控制软件实现对系统的容错控制。其中, 关于传感器失效的检测准则是

$$1) \quad x_{i\min} < x_i < x_{i\max},$$

$$2) \quad \dot{x}_{i\min} < \dot{x}_i < \dot{x}_{i\max}.$$

如果 x_i 不满足上面的任一条件, 就认为该传感器失效, 应该排除出控制回路, 转入容错控制策略。

通过实际测试, 求得对象各环节的特性为

$$G_1(s) = \frac{x_1(s)}{R(s)} = \frac{0.588}{0.8s + 1}, \tag{19}$$

$$G_2(s) = \frac{x_2(s)}{x_1(s)} = \frac{1.89}{0.8s + 1}, \tag{20}$$

$$G_3(s) = \frac{x_3(s)}{x_2(s)} = \frac{0.84}{0.85s + 1}. \tag{21}$$

为使系统具有满意的性能,得到状态反馈增益阵为

$$[k_1 \ k_2 \ k_3] = [1 \ 1 \ 0.5]. \tag{22}$$

因为 $G_2(s)|_{s=0} = 1.89$, $G_3(s)|_{s=0} = 0.84$, 根据上节的重组态公式,容易得到

1) 当 k_1 失效时,修改后的状态反馈容错控制律为

$$[k'_1 \ k'_2 \ k'_3] = [0 \ 1.265 \ 0.815], \tag{23}$$

2) 当 k_2 失效时,修改后的状态反馈容错控制律为

$$[k'_1 \ k'_2 \ k'_3] = [1.945 \ 0 \ 1.1], \tag{24}$$

3) 当 k_3 失效时,修改后的状态反馈容错控制律为

$$[k'_1 \ k'_2 \ k'_3] = [1.4 \ 1.21 \ 0]. \tag{25}$$

实验时,取采样周期 $T = 0.05$ 分,各传感器失效采用开关断开的方法实现。

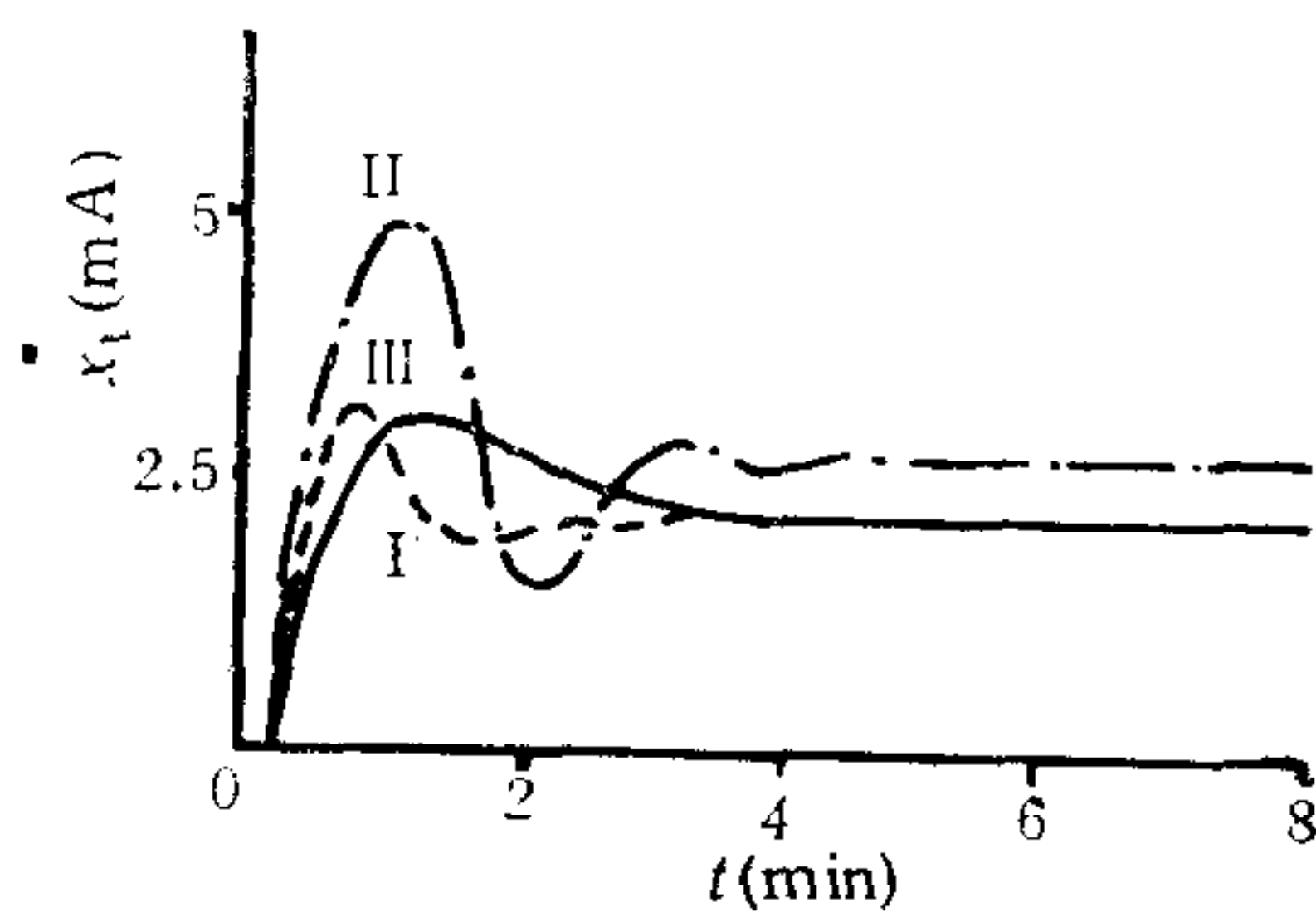


图 3 I: 容错控制阶跃响应曲线; II: 故障系统阶跃响应曲线; III: 正常系统阶跃响应曲线

图 3 表示在传感器 k_1 失效情况下 (k_2, k_3 失效情况略),对于给定输入阶跃信号,在系统正常、系统失效和故障系统采用容错控制三种情况下,各状态变量的计算机仿真动态响应曲线. 这里,假设传感器失效和阶跃信号是同时在 $t = 0$ 时刻加入的. 仿真结果表明,系统在有故障情况下的性能严重恶化,采用容错控制后的故障系统动态响应与原正常系统的动态响应很接近,最后的静态值也与原系统一致.

控制系统处于静态时,如图 4 所示,当传感器 k_i 失效时,在没有采用容错控制时,实验结果表明系

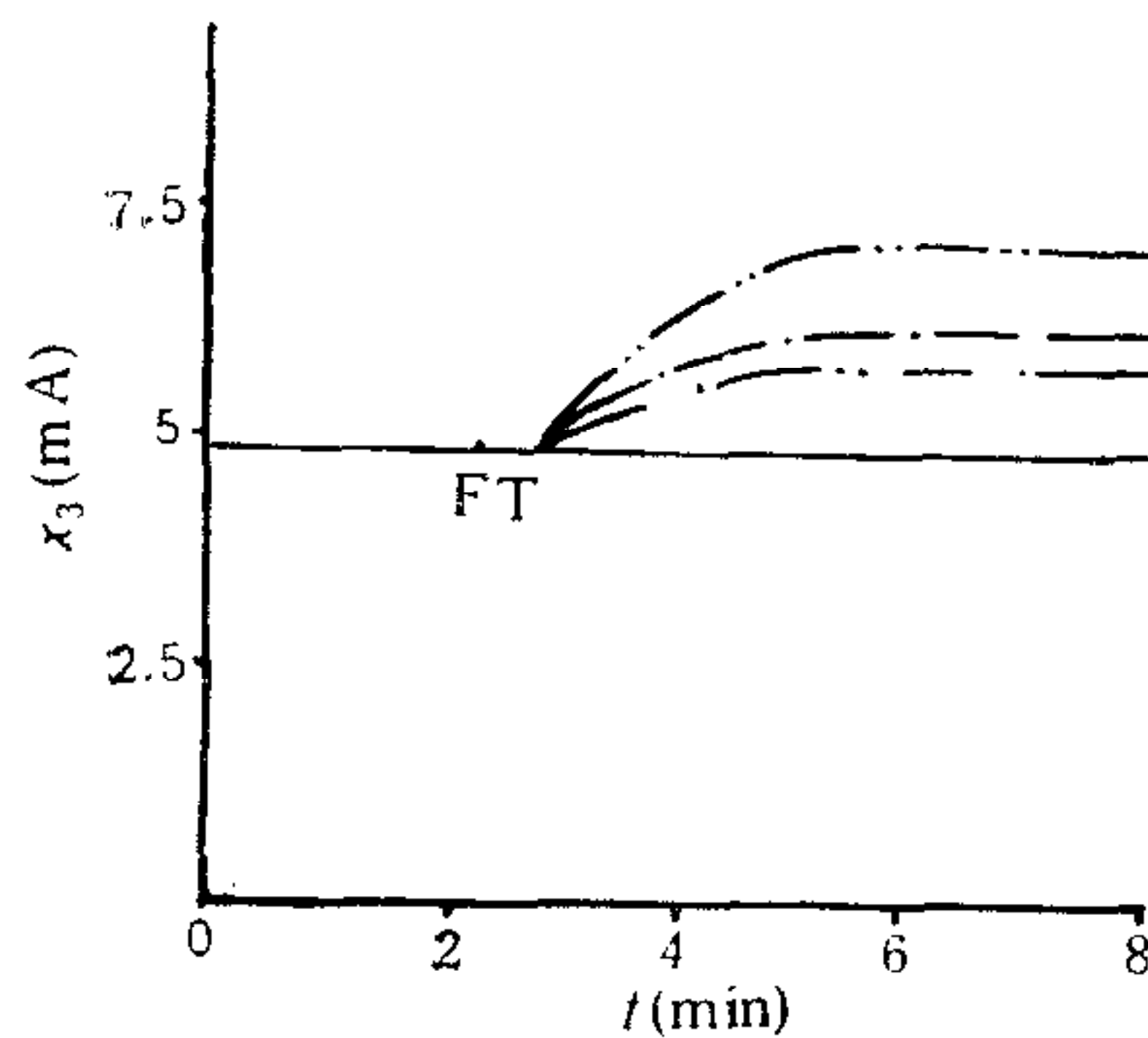


图 4 静态时第 $i(i = 1, 2, 3)$ 个传感器失效的实验曲线

I: 容错控制系统; II_i: 故障系统;
FT: 传感器失效时刻

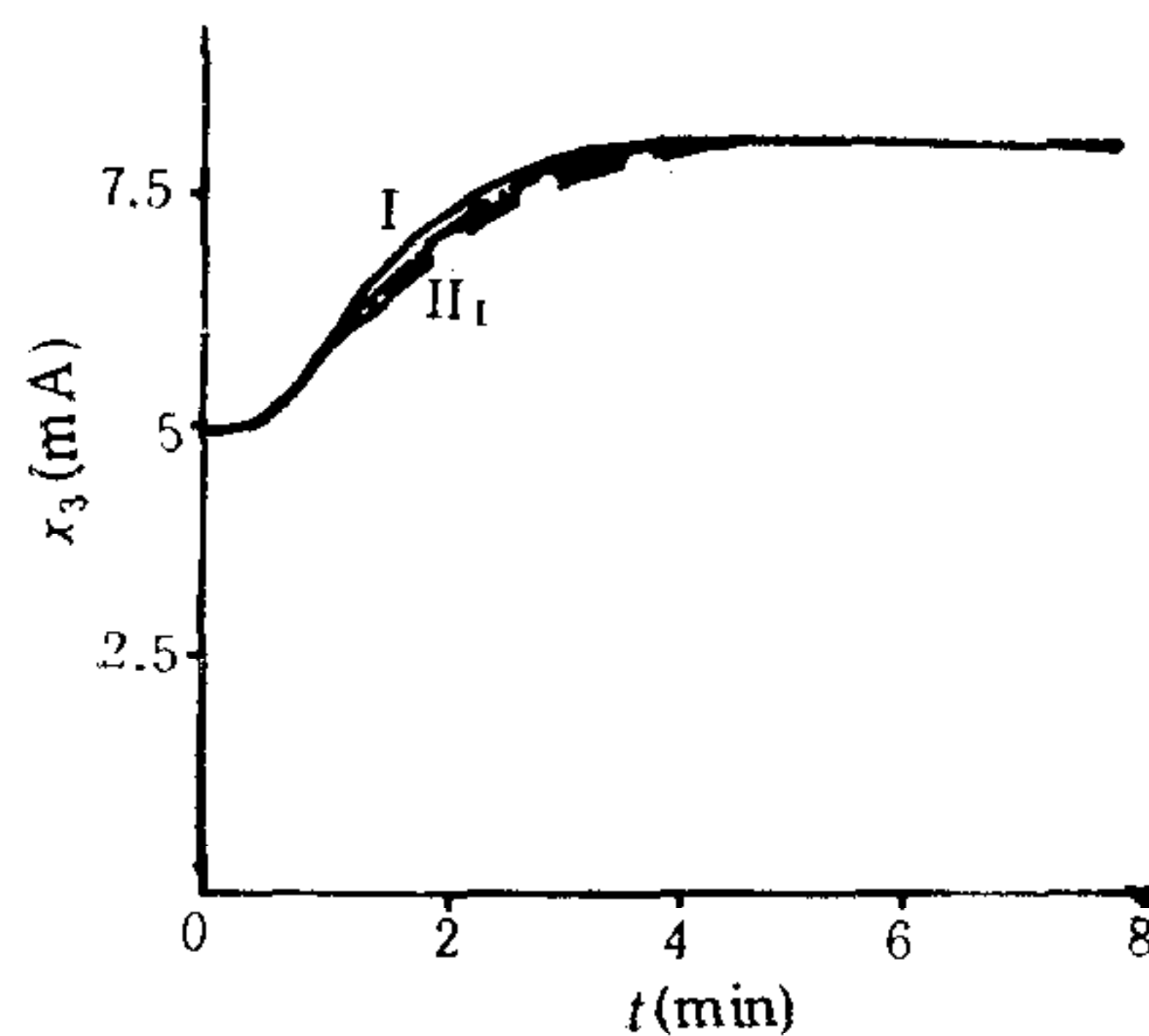


图 5 动态时第 i 个传感器失效的实验曲线

I: 正常系统; II_i: 容错控制系统

统输出严重偏离了原工作点,而采用了容错控制后的系统输出仍稳定在原工作点。

当系统正常工作时,输入一个阶跃信号后,系统在响应过程中 k_i 突然失效,系统自动转入容错控制,实验结果如图 5 所示。结果表明: 输出最终达到相应的设定值,无静态偏差,而且其动态响应曲线与系统正常时的动态响应曲线很接近。在传感器失效前后,输出值无变化,这表明在故障发生后,系统的容错控制保证了从正常系统控制到故障系统控制的无扰动切换。

四、结 束 语

通过上面的讨论可以认为,本文所提出的状态反馈容错控制系统设计方法具有简单、实用的优点,不失为一种良好的工程实用方法。进一步的研究应该是最优容错控制和多变量容错控制。

致谢. 作者在实验过程中得到了鲍伯良高级工程师的很大帮助,借此机会向他表示深深的谢意。

参 考 文 献

- [1] Siljak, D. D., Dynamic Reliability of Multiplex Control System, IFAC Control Science and Technology (8th Triennial World Congress) Kyoto, Japan, (1981), 1821—1826.
- [2] Locatelli, A. et al., On the Design of Reliable Robust Decentralized Regulators for Linear System, *Large Scale Systems*, 10(1986), 95—113.
- [3] Mayne, D. Q., The Design of Linear Multivariable System, *Automatica*, 9(1973), 201—209.
- [4] Davison E. J., Reliability of the Robust Servomechanism controller for Decentralized Systems, IFAC Control Science and Technology (8th Triennial World Congress) Kyoto, Japan, (1981), 1843—1819.
- [5] Ackermann, J., Robustness Against Sensor Failures. *Automatica*, 20(1984), 211—215.
- [6] John, S. Eterno, et al., Design Issues for Fault Tolerant-Restructurable Aircraft Control, Proc of 24 Conference on Decision and Control, Ft. Lauderdale, FL. (1985), 900—905.

AN ALGORITHM OF FAULT-TOLERANT CONTROL WITH STATE FEEDBACK CONTROL SYSTEM

GE JIANHUA SUN YOUXIAN ZHOU CHUNHUI

(Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University)

ABSTRACT

In this paper, a new algorithm of fault-tolerant control is presented. When one of the sensors is failed in a state feedback control system, the remaining state feedback circuits will bear the control action of the fault circuit averagely. This linear state feedback fault-tolerant control system has the function of no disturbed transposition from normal control to fault-tolerant control, and has good performances whenever any sensor is in fault. The method is simple and practical, and has very useful value of engineering application.

Key words: State feedback; fault-tolerant control; sensor failure.