

线性状态变量反馈控制系统的应用研究* 1)

孙优贤 应依群
(浙江大学)

摘 要

本文提出用二阶标准系统作为设计线性状态变量反馈控制系统的理想模型,探讨了闭环极点配置和实现输出调节的一些方法,介绍了在工程应用中需要解决的有关问题。

在串级调节系统的设计中,如何恰当地选择副参数,是一个实际存在的问题。设计人员一方面希望所构成的副回路有很好的快速作用,另一方面又要求副回路不仅考虑到主要扰动,而且尽可能地考虑到其它次要扰动。当然,这在不少场合下是矛盾的。解决这个现实存在的矛盾,一种较好的方法是设计线性状态变量反馈控制系统(以下称 LSVF 系统),图 1 是加热炉 LSVF 系统的方框图。

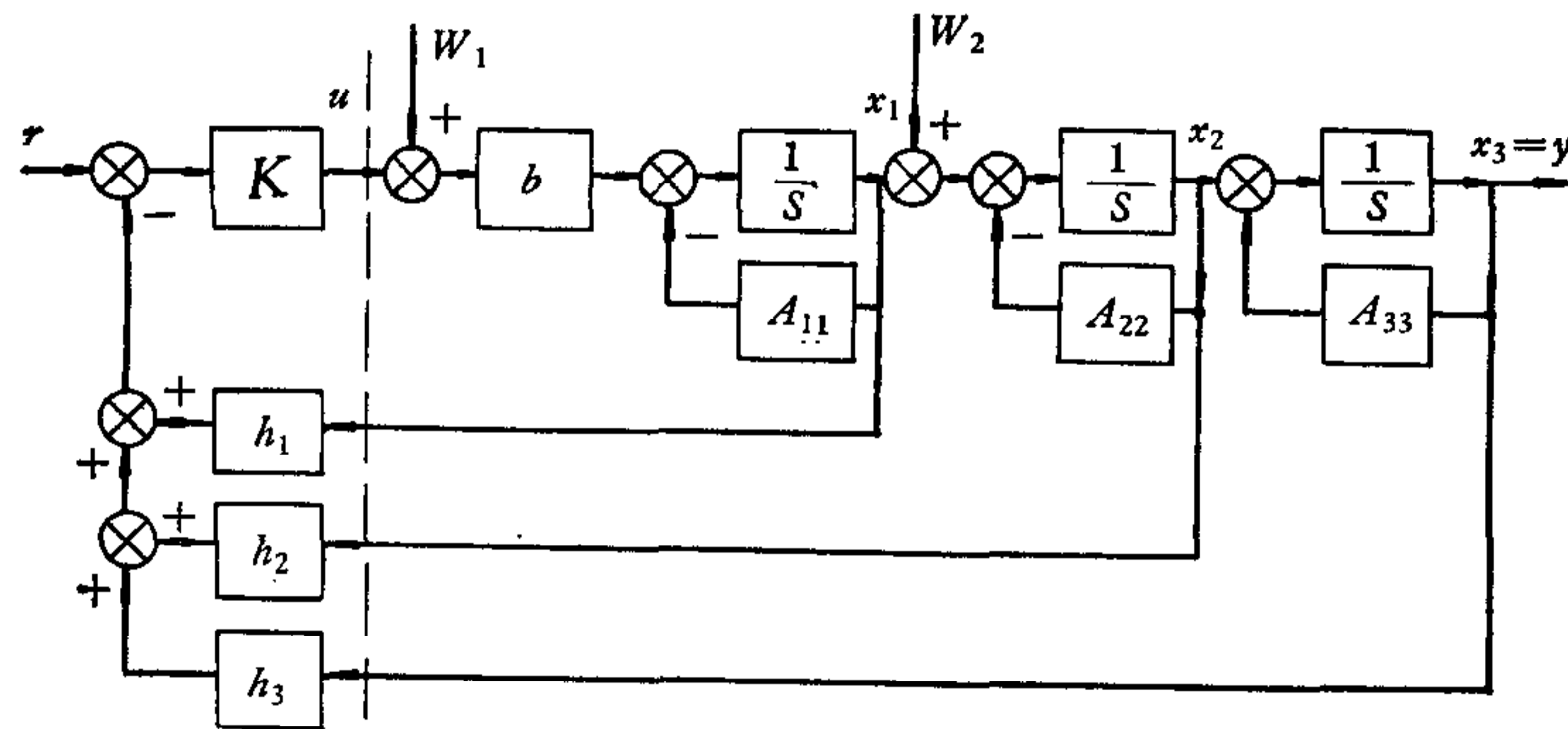


图 1 加热炉状态变量反馈控制系统方块图

图中, x_i 为状态变量; W_i 为扰动变量; u 为控制变量; r 为给定作用; A_{11} , A_{22} , A_{33} 为控制对象内部反馈系数, h_1 , h_2 , h_3 为状态调节器的各个系数, K 为状态调节器总的放大系数。这种 LSVF 系统,可以克服来自各个方面的扰动,达到较高的控制精度。

一、设计方法

1. 理想模型的确定

在状态变量反馈控制中,我们采用下面的二阶标准系统作为理想模型:

* 本文曾在 1979 年 11 月全国自动化技术应用学术年会上宣读。修改稿于 1980 年 2 月 22 日收到。
1) 上海工业自动化仪表研究所钱炳洽同志参加部分试验工作。

$$J(s) = \frac{K}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (1)$$

用二阶标准系统作为理想模型,好处是:(1)它的衰减系数 ξ 全权决定了控制过程的衰减程度,这样,我们可以根据各种不同系统对稳定裕度的要求选择 ξ 的数值,以满足工艺生产对闭环系统动态行为的要求。(2)二阶系统中的自然频率 ω_0 和衰减系数 ξ ,决定了系统的振荡频率 $\omega_n(\omega_n = \sqrt{1 - \xi^2}\omega_0)$,这样,我们可以根据控制对象的大致特性,选择操作周期 $T(T = 2\pi/\omega_n)$ 。

由此可见,如果我们设计一个超调量为 y_m ,回复时间为 T_m 的控制过程,只需按照下面两个关系式:

$$y_m = \frac{K}{\omega_0^2} e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (2)$$

$$T_m = -\frac{\ln(0.05\sqrt{1-\xi^2})}{\xi\omega_0} \quad (3)$$

选择 ξ, ω_0 ,就可以得到我们需要的闭环动态行为。

2. 闭环极点的配置

上面的理想模型,是一个二阶标准系统,但是在实际的过程控制中,闭环传递函数在大多数情况下不可能是二阶的,有的可能是高阶的,有的可能有闭环零点,有的可能有另一对振荡极点。在这种情况下,我们提出用零极点对消法和无影响消除法,通过闭环极点的配置、消除闭环零点,或者使其它所有配置的极点使系统接近于二阶标准系统的行为。

1) 零极点对消法

假定得到某系统的闭环传递函数为:

$$G(s) = \frac{K'(s + z_1)}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (4)$$

式中, z_1 为闭环零点, a_i 为相应各项的系数。现在,我们选择式(1)为理想模型。考虑到式(4)是一个三阶系统,而且还有一个零点,为此需要在理想模型的基础上,配置一个极点,并使所配置的极点 $p_1 = z_1$,这时,理想模型成为:

$$\begin{aligned} J(s) &= \frac{K(s + z_1)}{(s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2)(s + p_1)} \\ &= \frac{K(s + z_1)}{s^3 + (2\xi\omega_0 + p_1)s^2 + (2\xi\omega_0 p_1 + \omega_0^2)s + \omega_0^2 p_1} \end{aligned} \quad (5)$$

将式(4)与式(5)的同阶次项相比较,就可以十分方便地取得整个状态调节器的结构及每个系数,而按照这一状态调节器实现的规律,就是一个二阶标准系统,它的衰减系数为所需的 ξ ,自然频率为所要求的 ω_0 。

2) 无影响配置法

假如所得到的系统闭环传递函数为:

$$G(s) = \frac{K'}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (6)$$

理想模型为式(1)。为了使式(1)和式(6)具有相同的阶数,需要配置一个极点,并使这个极点基本上不影响二阶标准系统的行为。经过大量的实验研究和理论分析证明,当配置的极点 $p_1 \geq 5\xi\omega_0$ 时,不仅不会降低二阶标准系统的质量,而且还可以有所改善,因此,理想模型成为:

$$J(s) = \frac{K}{(s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2)(s + p_1)} = \frac{K}{s^3 + (2\xi\omega_0 + p_1)s^2 + (2\xi\omega_0p_1 + \omega_0^2)s + \omega_0^2p_1} \quad (7)$$

比较式(6)和式(7),可以得到整个状态调节器的各个系数,按照这个状态调节器实现的规律,就是标准二阶系统。

经过理论分析和实验研究,我们提出表1所示的极点配置图表。

表1 闭环极点配置表

闭环传递函数 $G(s)$	理想模型 $J(s)$	极点配置
$\frac{K'(s+z)}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}$	$\frac{K(s+z_1)}{(s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2)(s+p_1)}$	$p_1 = z_1$
$\frac{K'}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}$	$\frac{K}{(s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2)(s+p_1)}$	$p_1 \geq 5\xi\omega_0$
$\frac{K'(s+z_1)(s+z_2)}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}$	$\frac{K(s+z_1)(s+z_2)}{(s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2)(s+p_1)(s+p_2)}$	$p_1 = z_1$ $p_2 = z_2$
$\frac{K'(s+z_1)}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}$	$\frac{K(s+z)}{(s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2)(s+p_1)(s+p_2)}$	$p_1 = z_1$ $p_2 \geq 5\xi\omega_0$
$\frac{K'}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}$	$\frac{K}{(s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2)[(s+\alpha)^2 + \beta^2]}$	$\alpha \geq 5\xi\omega_0$ $\beta \geq 5\sqrt{1-\xi^2}\omega_0$
$\frac{K'}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}$	$\frac{K}{(s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2)(s+p_1)(s+p_2)}$	$p_1 \geq 5\xi\omega_0$ $p_2 \geq 10\xi\omega_0$

这一表格基本上包括了实际过程控制中经常遇到的各类系统。如果出现更高阶次的系统,可以按照表1相同的原则配置极点。

二、实 验 研 究

图2所示的实验装置,由三个贮槽I、II、III串联而成,它可以代表一类化工过程的控制对象。图中,循环水量由泵1产生,经调节阀和转子流量计1送至贮槽I,II,III。通过阀1、阀2、阀3和阀7、阀8的切换,可以组成各种形式的流程,得到各种不同的控制对象。在这个实验中,阀1和阀7是打开的。每个贮槽的出口装有恒节流孔,通过恒节流孔阻力 R_1, R_2, R_3 的调整,可以改变各个贮槽的时间常数和放大系数。扰动流量由泵2产生,通过阀4、阀5、阀6的切换,可以改变扰动作用点,转子流量计2可以直接读出扰动的幅值。工艺要求严格控制贮槽III的液位,同时希望贮槽I和II的液位不要大幅度地波动。具体要求为: $H_1 = 100\text{mmH}_2\text{O}$; $H_2 = 20\text{mmH}_2\text{O}$, $H_3 = 4\text{mmH}_2\text{O}$ 。

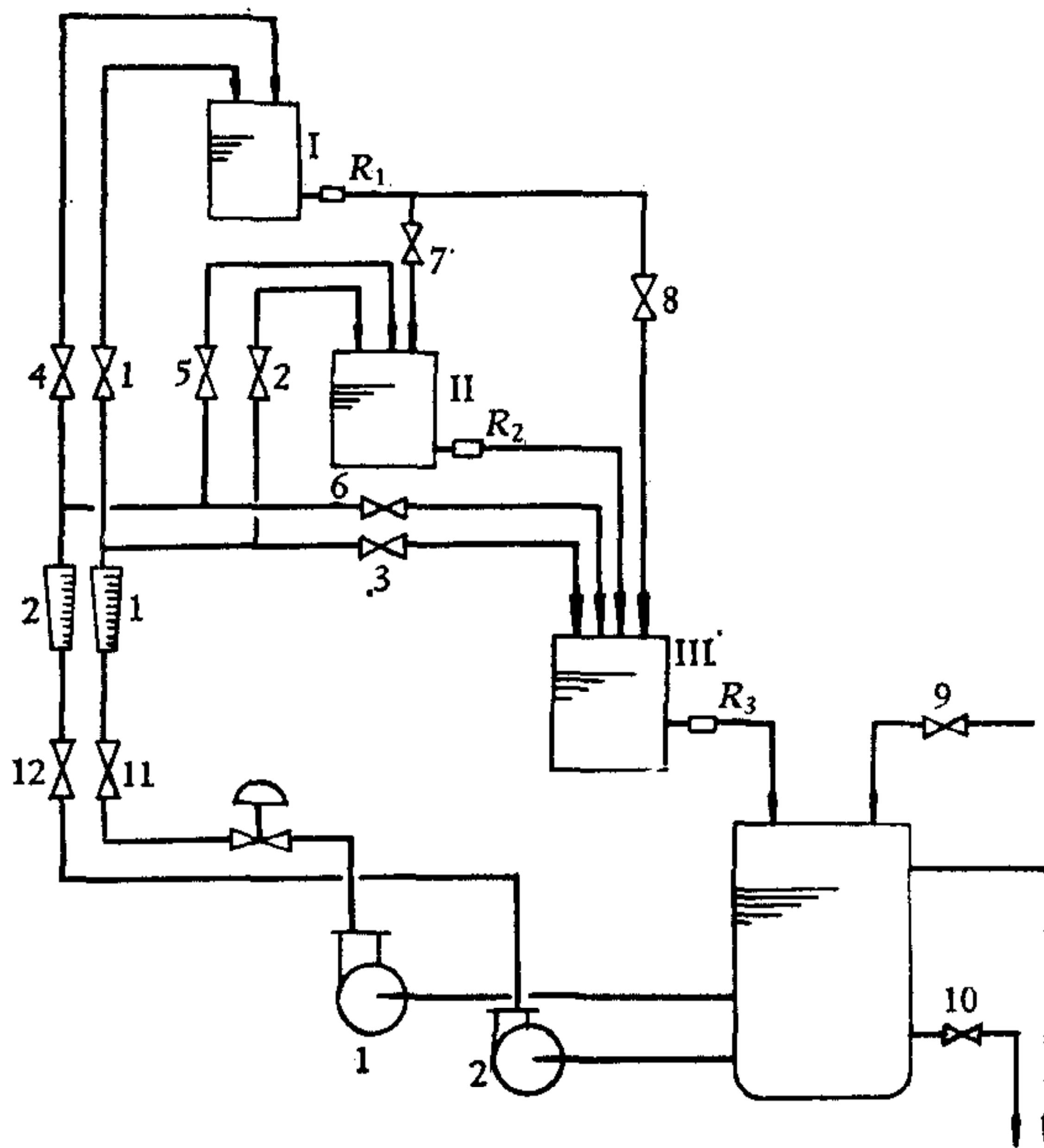


图2 实验装置工艺流程图

对于上述控制要求，我们采用 LSVF 系统，取状态变量： $x_1 = H_1$ ， $x_2 = H_2$ ， $x_3 = H_3 = y$ 。通过理论计算和实际测试，求得各环节的特性为：

$$b = 1.24 \tag{8}$$

$$\frac{X_1(s)}{Q(s)} = \frac{3.76}{7s + 1} = G_1(s) \tag{9}$$

$$\frac{X_2(s)}{X_1(s)} = \frac{0.95}{7s + 1} = G_2(s) \tag{10}$$

$$\frac{X_3(s)}{X_2(s)} = \frac{0.84}{11s + 1} = G_3(s) \tag{11}$$

按外界扰动 W_2 设计的 LSVF 系统，其方块图如图 3 所示：

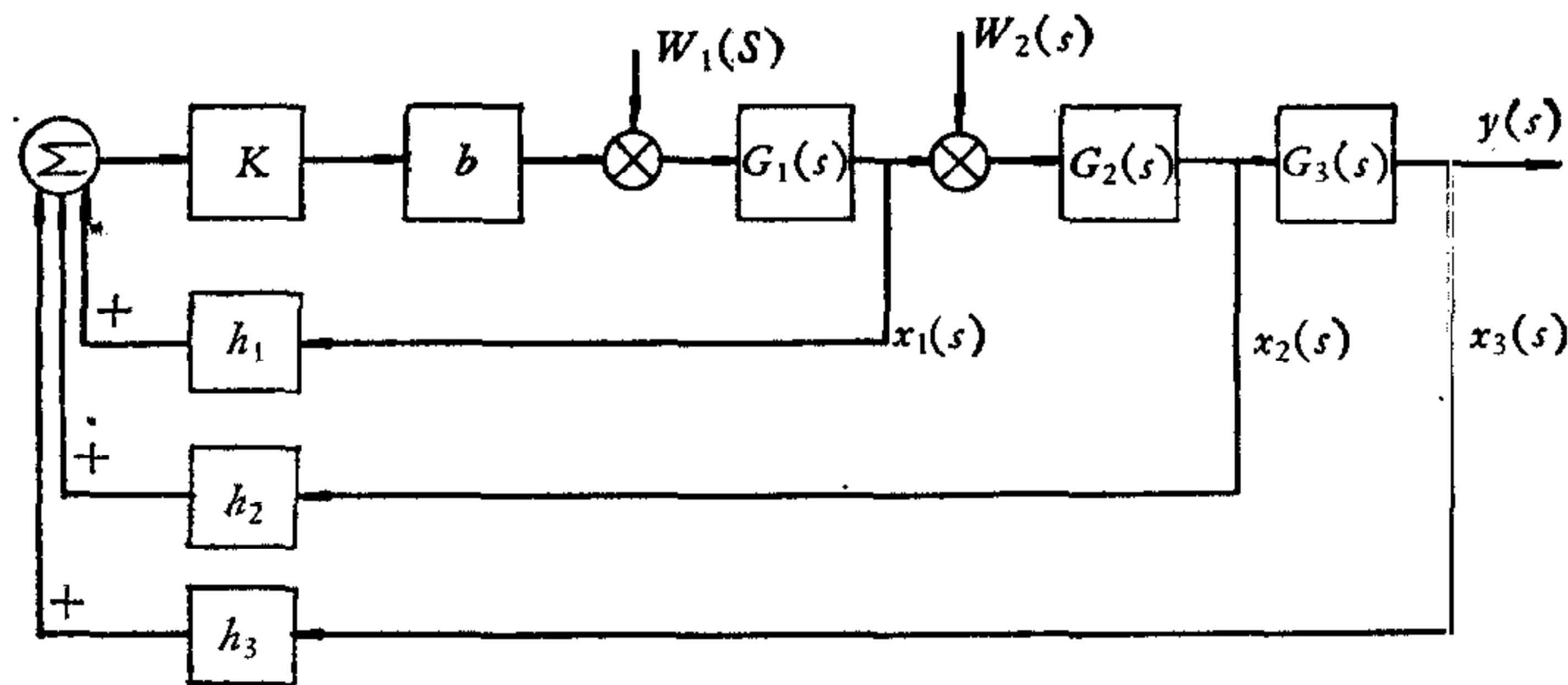


图3 LSVF 系统方块图

该系统的闭环传递函数为：

$$\frac{Y(s)}{W_2(s)} = \frac{G_2(s)G_3(s)}{1 + KbG_1(s)h_1 + KbG_1(s)G_2(s)h_2 + KbG_1(s)G_2(s)G_3(s)h_3}$$

将(8)–(11)式代入上式,经整理得到:

$$\frac{Y(s)}{W_2(s)} = \frac{0.798(7s + 1)}{539s^3 + (203 + 289.5h_1)s^2 + (25 + 67.7h_1 + 39.3h_2)s + (1 + 3.76h_1 + 3.57h_2 + 3.01h_3)} \quad (12)$$

根据表 1, 取上述三阶系统的理想模型为:

$$J(s) = \frac{K(s + z_1)}{(s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2)(s + p_1)} \quad (13)$$

使闭环极点 $p_1 = z_1 = \frac{1}{7}$, 比较式(12)和式(13)的各项系数,得:

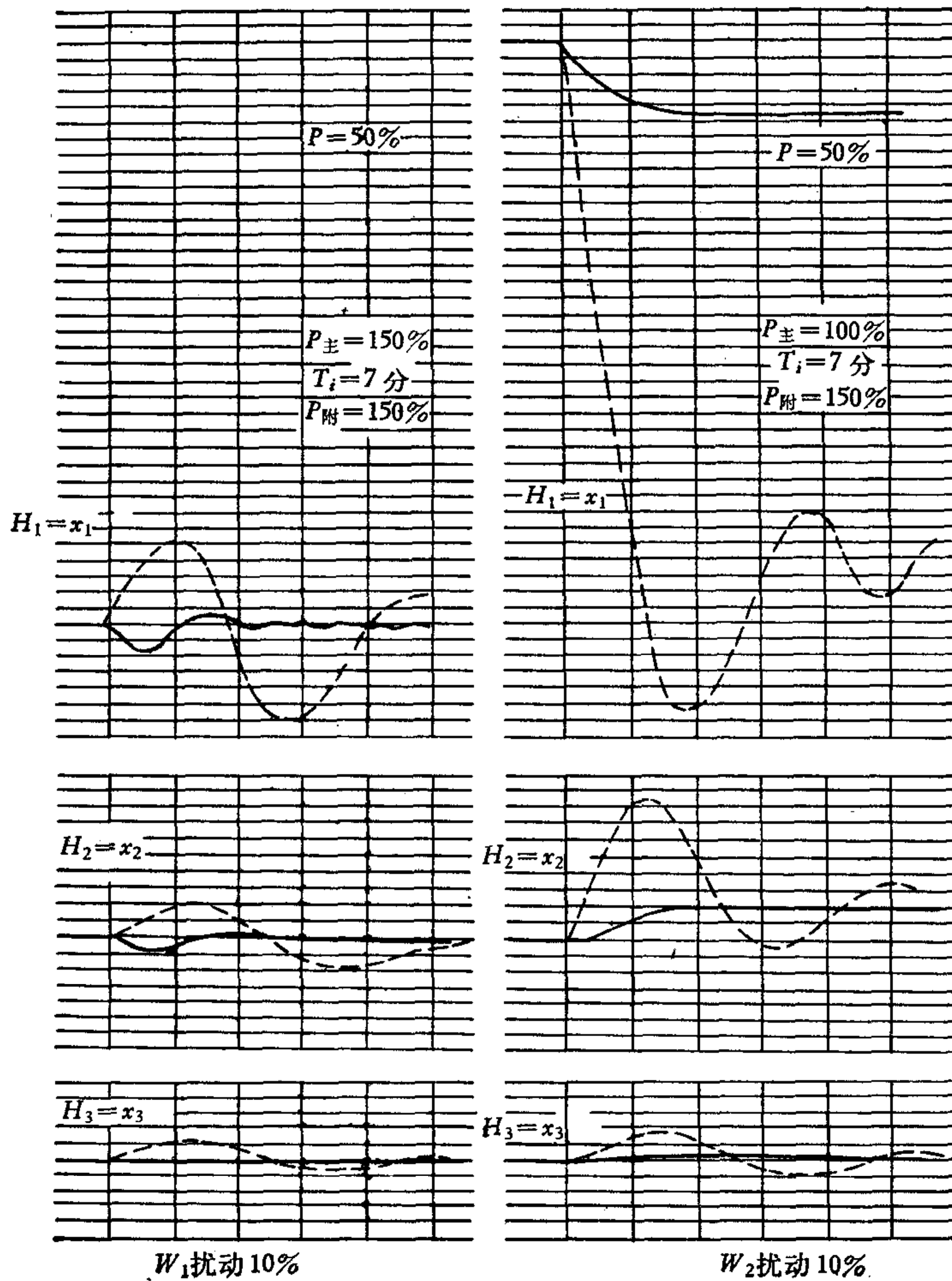


图 4 过渡过程曲线比较图

图中: 纵坐标每格 4mmH₂O; 横坐标每格 4 分钟。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{7} + 2\xi\omega_0 &= (539)^{-1}(203 + 289.5h_1) \\ \omega_0^2 + 2\xi\omega_0 \frac{1}{7} &= (539)^{-1}(25 + 67.7h_1 + 39.3h_2) \\ \frac{1}{7} \omega_0^2 &= (539)^{-1}(1 + 3.76h_1 + 3.57h_2 + 3.01h_3) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

假如希望最大偏差 y_m 很小, 可取 $\xi = 0.8$, 这时可以得到状态调节器各个反馈系数 h_i 随自然频率 ω_0 而变化的关系式:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= (289.5)^{-1}[539(1.6\omega_0 + 0.143) - 203] \\ h_2 &= (39.3)^{-1}[539(\omega_0 + 0.23\omega_0) - 25 - 67.7h_1] \\ h_3 &= (3.01)^{-1}[539(0.143\omega_0^2) - 1 - 3.76h_1 - 3.57h_2] \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

考虑到控制对象最大的时间常数为 11 分, 因此可取操作周期 T 等于或两倍大于 11 分, 即:

$$\begin{aligned} T &\geq 2T_s = 2 \times 11 = 22 \text{ 分} \\ \omega_0 &= \frac{\omega}{\sqrt{1-\xi^2}} = \frac{2\pi}{T\sqrt{1-\xi^2}} \approx 0.4 \text{ 弧度/分} \end{aligned} \quad (16)$$

将式 (16) 代入式 (15), 最后得到状态调节器的各个系数为:

$$[h] = [h_1 h_2 h_3] = [0.76 \quad 1.60 \quad 1.34] \quad (17)$$

按照这一关系式实现的 LSVF 系统, 在外界扰动 W_1, W_2 10% 阶跃作用下的过渡过程曲线, 见图 4 实线所示, 虚线为 X_3-X_2 组成的串级调节系统在同样扰动作用下的过渡过程曲线。曲线充分表明: 在 W_1, W_2 作用下, LSVF 系统取得了十分满意的调节质量, 而串级调节系统在 W_2 作用下, 无法满足工艺要求, X_1 的变化幅度竟达到 164mmH₂O。

按外界扰动 W_1 设计的 LSVF 系统, 在 80% W_1 的阶跃变化下, 输出变量 $X_3 = Y$ 最大偏差只有 1mmH₂O, 回复时间为 2 分钟。可是由 X_1-X_3 组成的串级调节系统, 在同样的扰动作用下, 输出变量最大偏差达到 6mmH₂O, 回复时间竟达到 45 分钟之久。为了消除输出变量的余差, 实验证明, 在主反馈回路上设置积分器效果显著。

三、工程应用

从上面的实验研究中可以看到, 设计 LSVF 系统, 必须知道控制对象的动态特性, 这给工程应用带来一定的困难。为了解决 LSVF 系统的工程应用问题, 我们对各种不同的状态调节器参数, 进行了分析和比较, 结果如下: (1) 在各种 LSVF 系统中, 不管是按照哪个扰动进行设计的, 在 W_1 作用下的调节过程, 大大优于 W_2 作用下的调节过程, 这就说明在设计 LSVF 系统时, 扰动位置仍然是十分重要的。(2) 在各种 LSVF 系统中, 对于同一个扰动, 状态反馈系数 h_i 在一个较大的范围内变化时, 所得到的系统质量大致相当, 最大偏差和回复时间相差不大。(3) 在各种 LSVF 系统中, 主要扰动从哪里加入, 就增加哪里的反馈系数, 有助于增强这一回路的校正作用, 从而可以提高系统质量。以上各点, 见图 5 所示。由此可见, 当事先不能获得对象的动态特性时, 仍然可以设计 LSVF 系统; 在具体设计、运行和调整中, 如下各项可供参考。

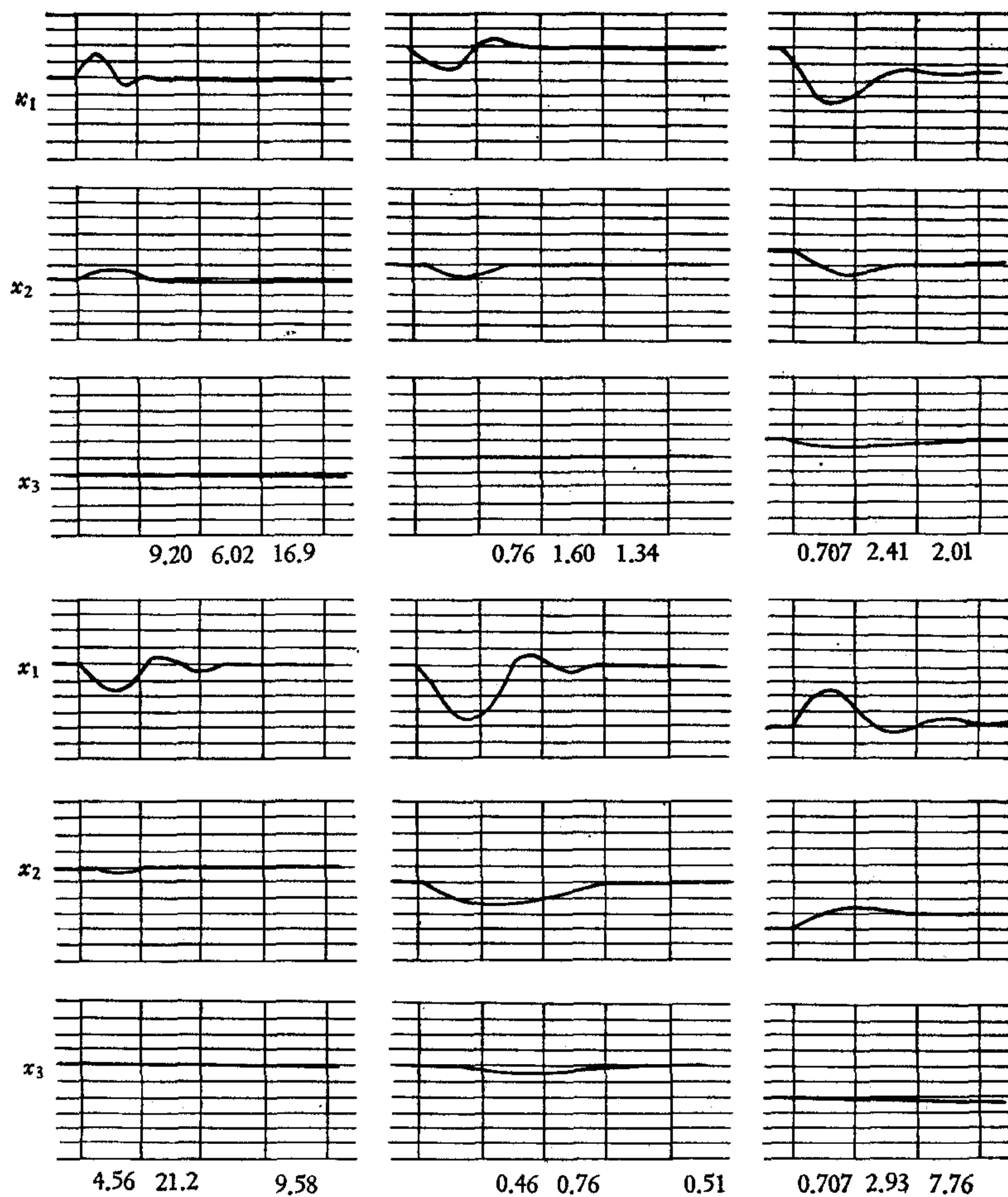


图 5 过渡过程曲线比较图

(1) 设计方面 在设计 LSVF 系统时, 必须使第一个回路包含系统中最主要的扰动; 在选择状态变量时, 还应当使第一个反馈回路尽可能提高反应灵敏度。

(2) 实施方面 在设置状态反馈系数时, 不必用乘除器, 可以直接利用加法器的各个输入通道, 设置 $h_1, h_2 \cdots h_n$, 在用电动 III 型和组装仪表时, 对于一个输入, 四个输出的 LSVF 系统, 只要一只加法器即可实现。

(3) 整定方面 在 LSVF 系统中, 加强反馈系数 h_1 , 不仅可以有效地增强抗干扰能力, 而且可以提高反应速度; 当需要实现输出调节时, 可在输出变量的反馈回路上设置积分作用, 并取积分时间等于半个操作周期。状态调节器总的放大系数, 是由加法器的放大系数和调节器的放大系数组成的, 调整时, 可以先固定加法器的放大系数, 然后整定调节器的放大倍数。

(4) 场合方面 LSVF 系统对于若干个一阶环节串联而成的对象, 对于多容对象和长输管线的控制都是可用的, 关键是能够取得所需的各个状态变量。

参 考 文 献

[1] 化工自动化编写组, 化工自动化上册, 石油化学工业出版社(1973), p222—228.

LINEAR STATE VARIABLE FEEDBACK CONTROL SYSTEM

SUN YOU-XIAN YING YI-QUN
(Zhejiang University)

ABSTRACT

In this paper, it is proposed to use the standard second-order system as an ideal model for the design of feedback control system with linear state variable. Some methods of pole assignment for closed loop scheme and the realization of output regulation are also discussed.

国际自动控制联合会 1982 年学术会议

(一九七九年十二月修改)

会议名称	时间	地点	IFAC 专业委员会	人数
IFAC “数字控制理论与应用”学术讨论会	82年1月	印度新德里	理论、应用、系统工程、发展中国家	500
IFAC “分布控制系统的元部件和仪表”学术讨论会	82年4月	法国格勒诺布尔	元件和仪表	
IFAC 第六届辨识与系统参数估计学术讨论会	82年6月	美国华盛顿	理论、教育、应用	400
IFAC “病人管理的控制原理和技术”学术讨论会	82年中	英国伦敦	生物医学工程	200
IFIP/IFAC 第五届数控机床程序编制语言学术讨论会		苏联明斯克	制造工艺	
IFAC “生物医学工程”学术讨论会		美国	生物医学工程	
IFAC/IFIP 第三届计算机控制的软件学术讨论会		西班牙或意大利、英国	计算机	
IFAC 第二届计算机控制系统的安全性专题讨论会		西德	计算机	
IFAC 第三届分布的计算机控制系统专题讨论会		苏联塔林	计算机	
IFIP/IFAC 第三届海上油田操作自动化学术讨论会		英国伦敦	应用	
IFAC 第三届分布参数系统的控制学术讨论会		法国图卢兹	理论、控制数学、应用	