

# 前馈控制的工程实现

李 旭

(上海发电设备成套设计研究所)

## 摘 要

本文讨论了工程中常见的单回路和多回路前馈控制的工程实现,并把控制对象分为有自平衡和无自平衡两大类,把每大类的传递函数化成标准表达式,用低阶近似方法求出各种前馈控制及其参数的计算公式。

上述结果亦可推广到多变量控制系统。

## 前 言

六十年代以来,前馈控制在化工、电站、冶金等生产自动化中得到广泛的应用,收到显著的经济效果。但由数学模型求出的前馈控制表达式中,包含超越函数因子和理想微分环节,这在工程实现上是有困难的,迄今尚未系统地解决。本文将控制对象分成有自平衡和无自平衡两大类,分别给以标准的表达式,用低阶近似法求出各种前馈控制,并整定其参数。以往的静态前馈控制及所谓的“超前-滞后”前馈控制器都是本文的特例。

## 一、前馈-反馈控制

从图1可以看出,要实现全补偿必须满足

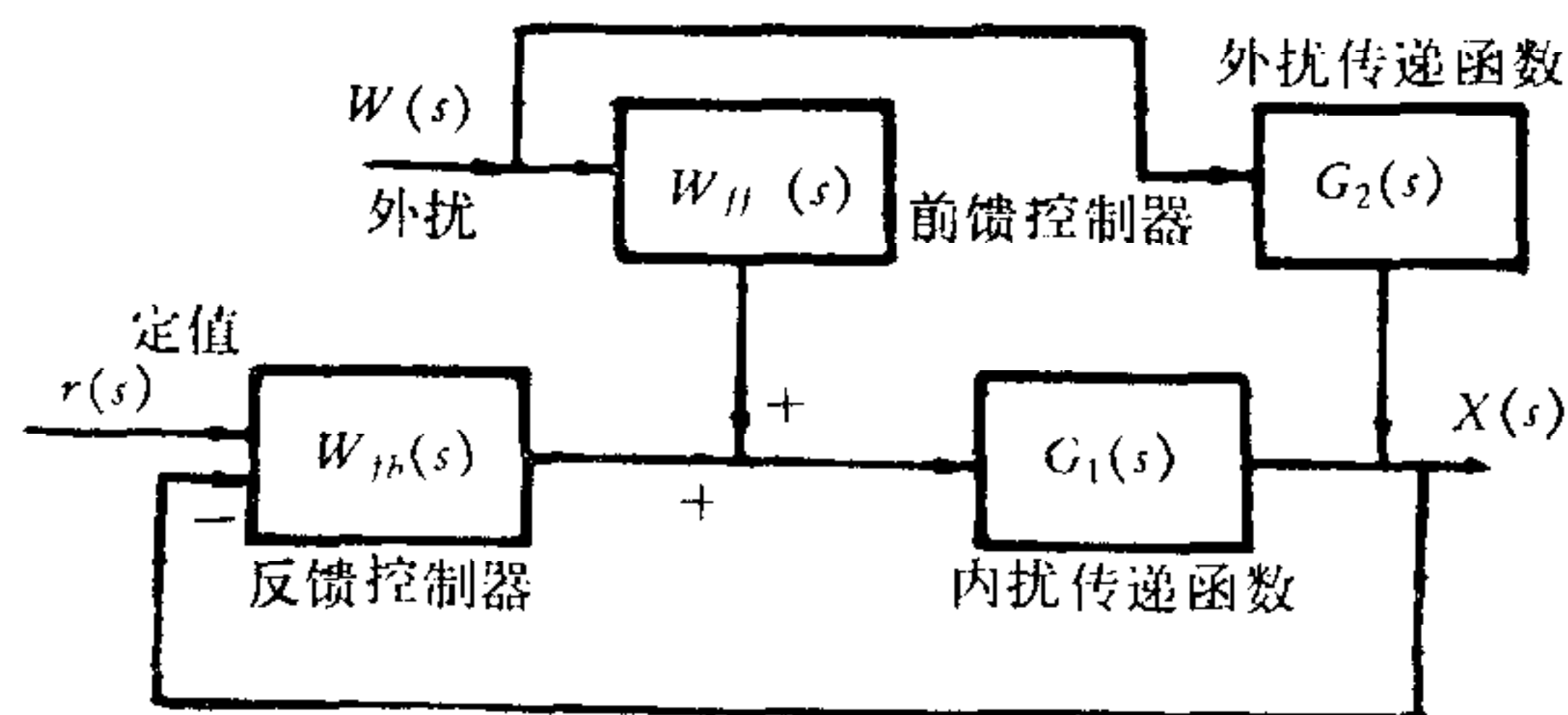


图1 前馈-反馈控制方框图

$$W_{ff}(s) = -G_2(s)/G_1(s). \quad (1)$$

上式中可能包含超越函数因子或各阶理想微分环节,在工程上实现是有困难的。下面将以常规模拟式调节仪表为基础,求出前馈控制的低阶近似表达式。

### 1. 传递函数的处理

对有自平衡的控制对象,取标准表达式为

$$W(s) = K/(1 + Ts)^n \quad (1.1)$$

无自平衡的控制对象,取标准表达式为

$$W(s) = K/(1 + T_c s) - 1/T_a s \quad (1.2)$$

若对象的数学模型是由阶跃扰动法求取的飞升曲线时,先把相同的纯迟延时间除去,然后按[2]直接求出标准传递函数表达式.若用其他方法求出数学模型,则先约去相同的纯迟延因子,再用下述公式化为标准型的传递函数表达式.

$$1) \frac{(1 + T_4 s)(1 + T_5 s)e^{-\tau s}}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)(1 + T_3 s)} \cong \frac{1}{(1 + Ts)^n}, \quad (1.3)$$

其中,  $nT = T_1 + T_2 + T_3 + \tau - T_4 - T_5$ ,

$$n = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + \tau - T_4 - T_5}{T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 - T_4^2 - T_5^2}.$$

$$2) \frac{(1 + T_2 s)e^{-\tau s}}{(1 + T_1 s)^{n_1}} \cong \frac{1}{(1 + Ts)^n}, \quad (1.4)$$

其中,  $nT = n_1 T_1 + \tau - T_2$ ,

$$n = (n_1 T_1 + \tau - T_2)^2 / (n_1 T_1^2 - T_2^2).$$

$$3) \frac{K_1}{(1 + T_1 s)^{n_1}} \cdot \frac{K_2}{(1 + T_2 s)^{n_2}} \cdots \frac{K_m}{(1 + T_m s)^{n_m}} \cong \frac{K}{(1 + Ts)^n}, \quad (1.5)$$

其中,  $K = K_1 K_2 \cdots K_m$ ,  $nT = \sum n_i T_i$ ,  $n = (\sum n_i T_i)^2 / \sum n_i T_i^2$ .

$$4) \frac{K_1}{(1 + T_1 s)^{n_1}} + \frac{K_2}{(1 + T_2 s)^{n_2}} + \cdots + \frac{K_m}{(1 + T_m s)^{n_m}} \cong \frac{K}{(1 + Ts)^n}, \quad (1.6)$$

其中,  $K = \sum K_i$ ,  $nT = \sum K_i n_i T_i / K$ ,

$$n = (\sum K_i n_i T_i)^2 / [K \sum K_i n_i (n_i + 1) T_i^2 - (\sum K_i n_i T_i)^2].$$

## 2. 前馈控制的实现

1)  $G_1(s)$ ,  $G_2(s)$  均为有自平衡对象,即

$$G_1(s) = K_1/(1 + T_1 s)^{n_1}, \quad G_2(s) = K_2/(1 + T_2 s)^{n_2}$$

① 若  $n_1 = n_2$ ,  $T_1 \cong T_2$ , 则选用静态前馈控制,

$$W_{ff}(s) = -K_2/K_1.$$

② 若  $n_1 = n_2 = 1$ ,  $T_1 \neq T_2$ , 则

$$W_{ff}(s) = K_f(1 + T_{f_1} s)/(1 + T_{f_2} s),$$

$$K_f = -K_2/K_1, \quad T_{f_1} = T_1, \quad T_{f_2} = T_2.$$

例 1. [4] 中换热器的前馈-反馈控制系统中,

$$G_1(s) = 54e^{-2s}/(1 + 18s), \quad G_2(s) = 60e^{-1.3s}/(1 + 14s).$$

经上述方法处理后,仍用现有符号,

$$G_1(s) = 54/(1 + 18.7s), \quad G_2(s) = 60/(1 + 14s),$$

则  $K_f = -1.11$ ,  $T_{f_1} = 18.7$ ,  $T_{f_2} = 14$ .

文[4]中经大量电模拟试验得到的最佳参数范围为:

$$-K_f = 1.1-1.7, \quad T_{f_1} = 18, \quad T_{f_2} = 12-16.$$

可见,计算值与电模拟所得到的结果完全符合.

③ 若  $n_1 < n_2, n_1 T_1 < n_2 T_2$ , 则

$$W_{ff}(s) = K_f / (1 + T_f s)^{n_f},$$

$$K_f = -K_2 / K_1, \quad n_f T_f = n_2 T_2 - n_1 T_1, \quad n_f = (n_2 T_2 - n_1 T_1)^2 / (n_2 T_2^2 - n_1 T_1^2).$$

④ 若  $n_1 < n_2, n_1 T_1 > n_2 T_2$ , 则

$$W_{ff}(s) = K_f (1 + K_D T_f) / (1 + T_f s)^2,$$

$$K_f = -K_2 / K_1, \quad K_D T_f = n_1 T_1 - n_2 T_2 + 2 T_f,$$

$$T_f = -(n_1 T_1 - n_2 T_2) + \sqrt{0.5 B}, \quad B = (n_1 T_1 - n_2 T_2)^2 + n_1 T_1^2 - n_2 T_2^2.$$

计算中, 当  $T_f < 0$  时, 近似地取  $T_f = T_2$ .

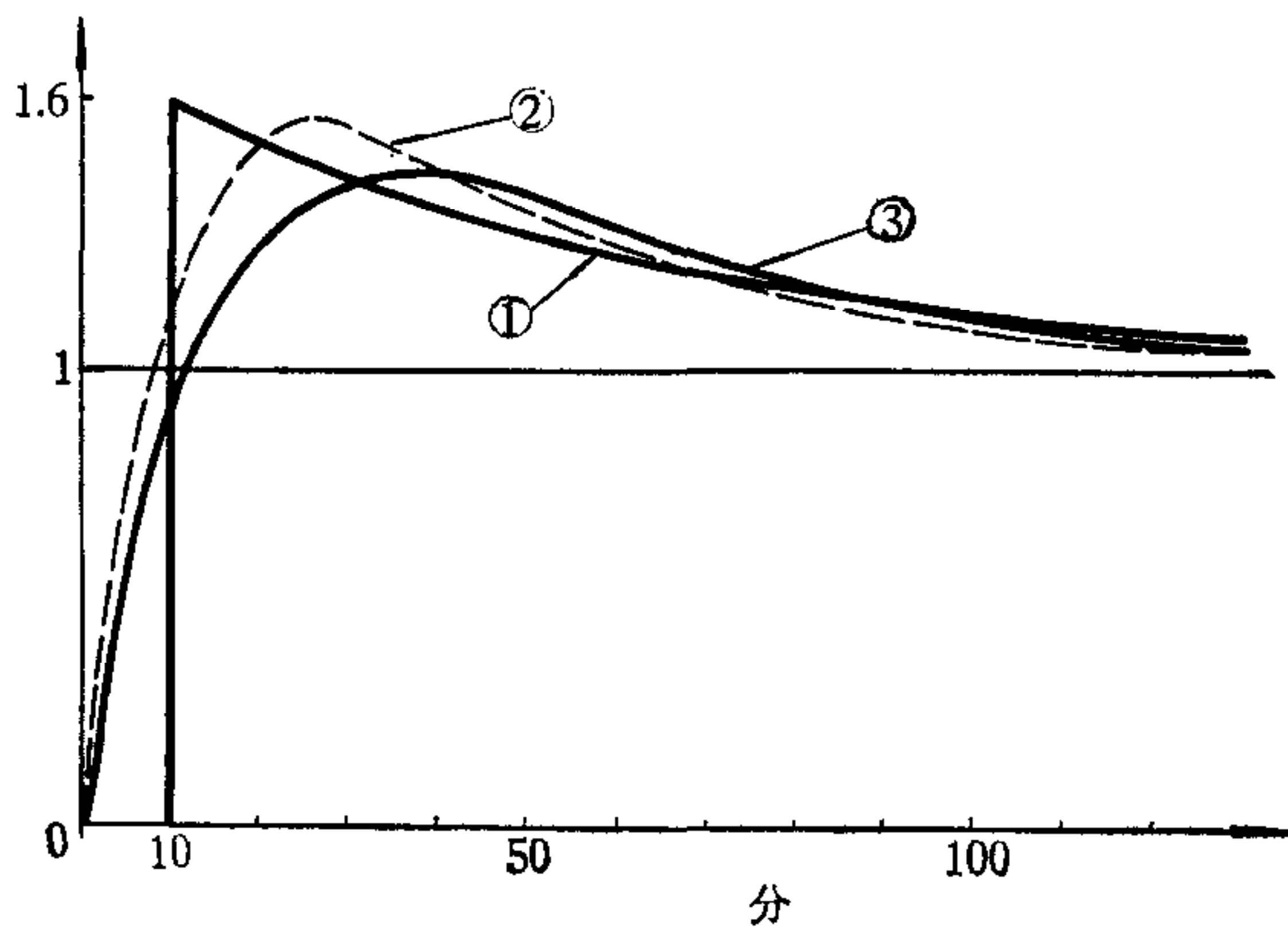
例 2. 文 [5] 一个精密分馏塔的前馈控制中,

$$G_1(s) = e^{-20s} / (1 + 95s), \quad G_2(s) = e^{-30s} / (1 + 60s),$$

经上述方法处理后得  $n_1 = 1, T_1 = 95, n_2 = 1.37$ , 所以按  $n_2 > n_1$  的情况处理, 但在实际计算时仍取  $n_2 = 1, T_2 = 70$ , 经计算得

$$K_f = -1, \quad K_D T_f = 3 \times 24, \quad T_f = 24.$$

图 2 中曲线(1)为原始曲线, 曲线(2)为文[5]试验得出的曲线, (3)为本文计算曲线。



$$\text{①} \dots \frac{e^{-10s}(1 + 95s)}{1 + 60s}; \quad \text{②} \dots \frac{1 + 80s}{(1 + 40s)(1 + 10s)};$$

$$\text{③} \dots \frac{1 + 3 \times 24s}{(1 + 24s)^2}$$

图 2 两种前馈方式补偿效果比较图

⑤ 若  $n_1 \geq n_2$ , 则

$$W_{ff}(s) = K_f [(1 + K_D T_f s) / (1 + T_f s)],$$

$$K_f = -K_2 / K_1, \quad K_D T_f = n_1 T_1 - n_2 T_2$$

$$T_f = [n_1 T_1^2 - n_2 T_2^2 - (n_1 T_1 - n_2 T_2)^2] / 2(n_1 T_1 - n_2 T_2).$$

若计算中出现  $T_f < 0$ , 则取  $T_f = \min(T_1, T_2)$ , 若

$K_D T_f < 0$ , 则实际微分环节取负号。

例 3. 文 [5] 热交换器的前馈控制中, 数学模型由表格给出, 经 [2] 方法处理, 求得

$$G_1(s) = 1 / (1 + 0.7s)^2,$$

$$G_2(s) = 1 / (1 + 0.5s)^2.$$

计算得  $K_f = -1, K_D T_f = 0.4, T_f = 0.5$ .

图 3 中实线为本文算出的一阶前馈控制的补偿曲线, 虚线为文 [5] 二阶前馈控制器的补偿曲线.  $g_1(t), g_2(t)$  为对象的过渡过程曲线。


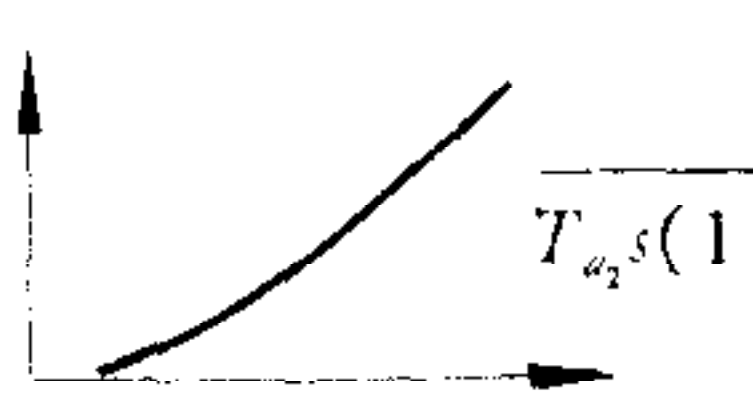

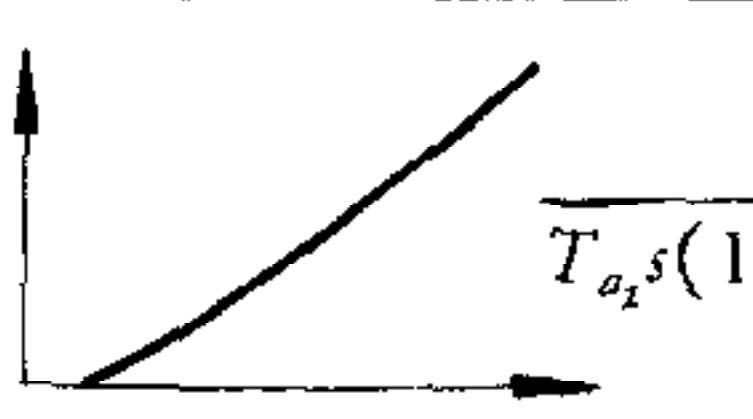
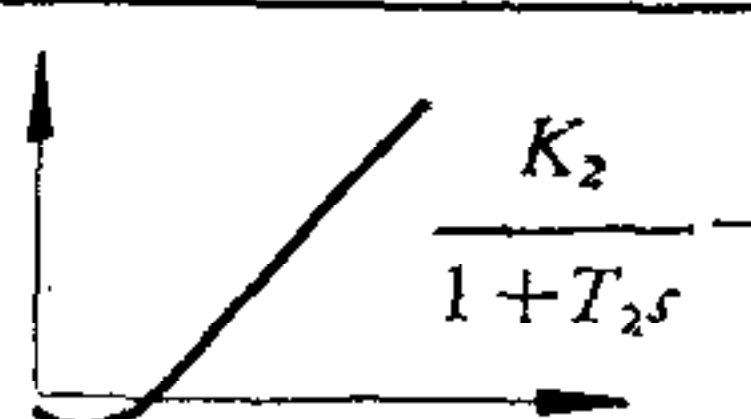

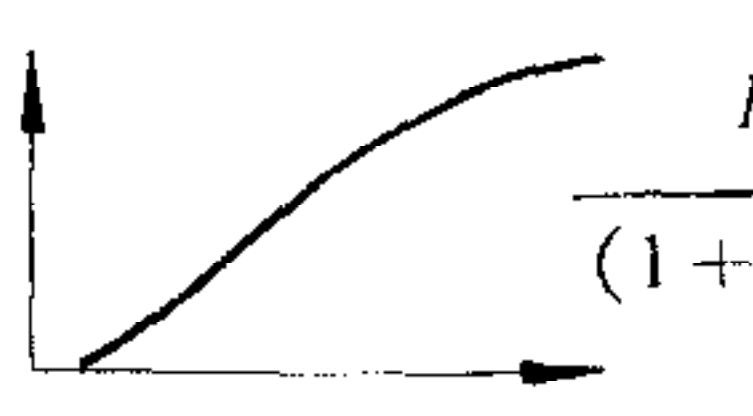

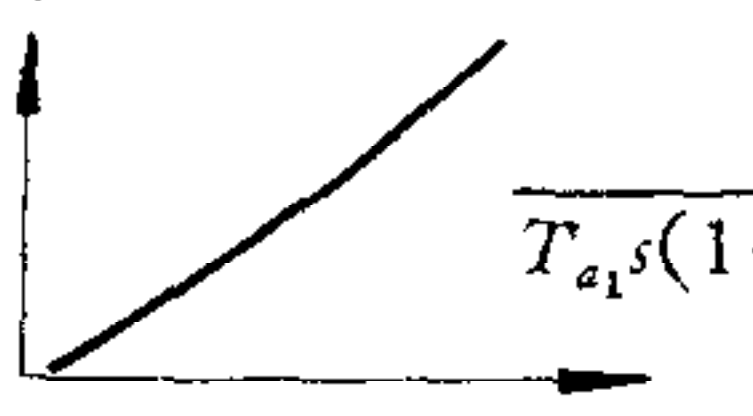
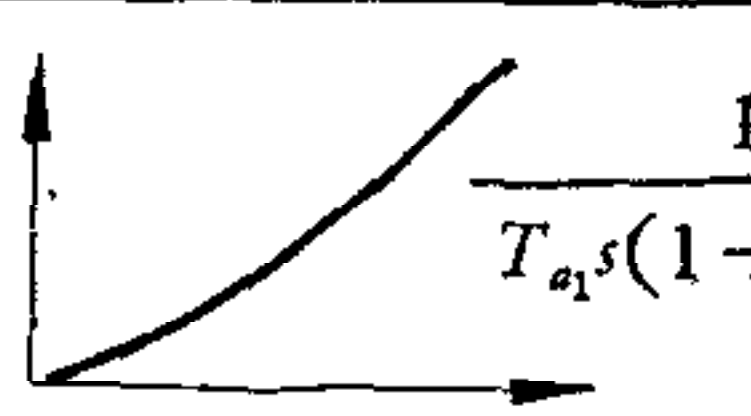
对于  $G_1(s), G_2(s)$  不全为有自平衡对象时, 可用同样方法讨论, 结果列在表 (1) 中。

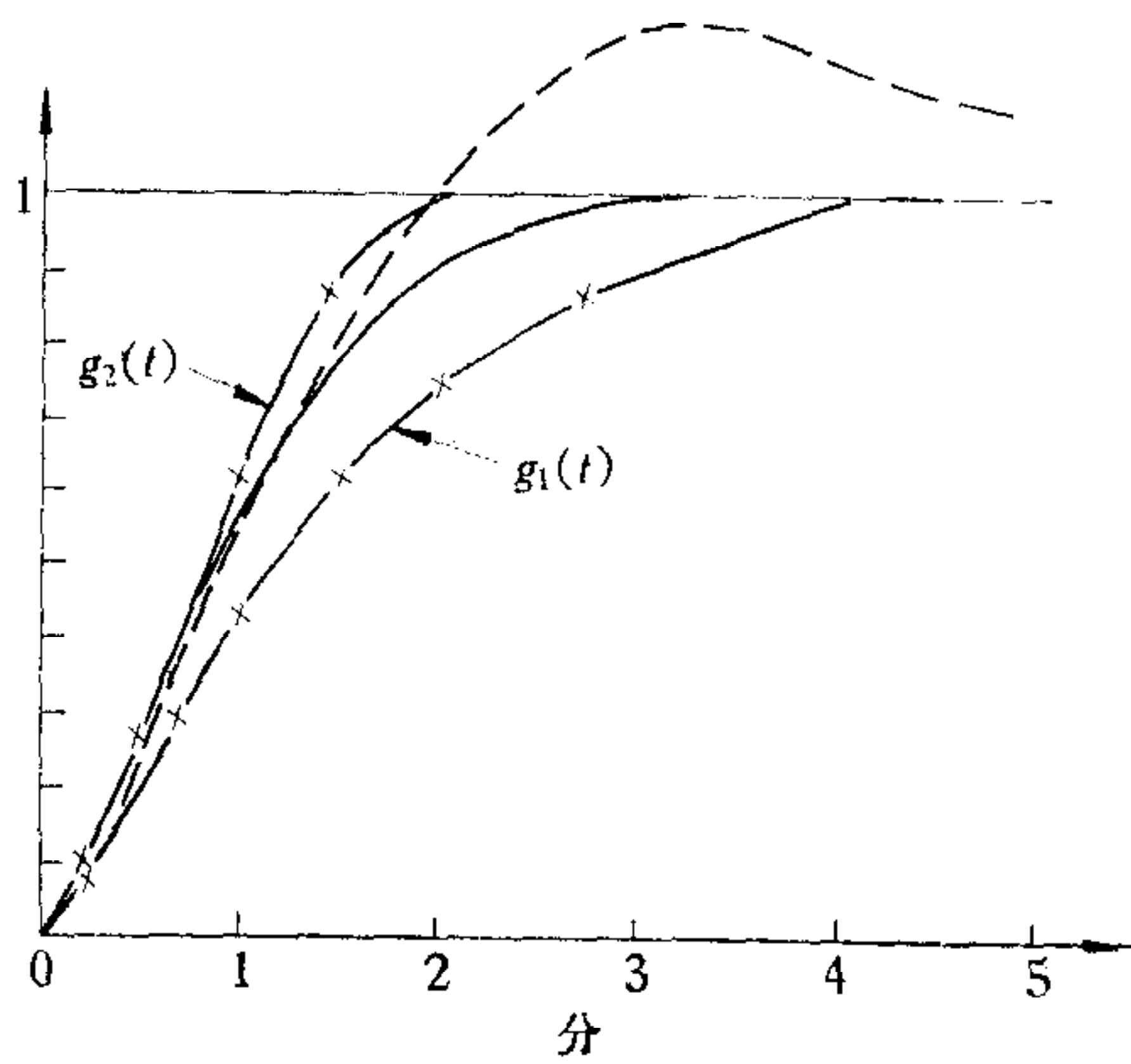
### 3. 汽包锅炉水位前馈-反馈控制系统中动态前馈控制

以往大、中型锅炉的汽包水位控制均采用“三冲量”给水控制系统, 其中蒸汽流量信号即为静态前馈控制。随着生产的发展, 对控制系统提出了更高的要求, 如在大型轧钢机的冲击负荷下, 水位波动剧烈, 为尽可能扩大机组承受冲击负荷的能力, 必须采用动态前馈控制。在负荷变化很频繁的化肥厂供热锅炉上, 也有类似的要求。这时



表 1 前馈控制选型汇总表

$G_1(s)$		$\frac{K_2}{(1+T_2s)^{n_2}}$		$\frac{1}{T_{a_2}s(1+T_{c_1}s)}$		$\frac{K_2}{(1+T_2s)^{n_2}}$		$\frac{1}{T_{a_1}s(1+T_{c_1}s)}$		$\frac{K_2}{1+T_2s} \frac{1}{T_{a_1}s}$
$G_2(s)$		$\frac{K_1}{(1+T_1s)^{n_1}}$		$\frac{K_1}{(1+T_1s)^{n_1}}$		$\frac{1}{T_{a_1}s(1+T_{c_1}s)}$		$\frac{1}{T_{a_1}s(1+T_{c_1}s)}$		$\frac{1}{T_{a_1}s(1+T_{c_1}s)}$
$W_{ff}(s)$	$n_1=n_2$ $T_1 \cong T_2$	$K_f$	$K_f = \frac{K_2}{K_1}$	$n_1 T_1 \cong T_{c_2}$	$\frac{1}{T_f s}$ $T_f = K_1 T_{a_2}$	$n_2 T_2 > T_{c_1}$	$\frac{K_D T_f s}{1+T_f s}$ $K_D T_f = K_2 T_{a_1}$ $T_f = n_2 T_2 - T_{c_1}$	$K_f \frac{1+T_{f1}s}{1+T_{f2}s}$ $K_f = \frac{T_{a_1}}{T_{a_2}}$ $T_{f1} = T_{c_1}$ $T_{f2} = T_{c_2}$	$1 \pm \frac{K_D T_f s}{1+T_f s}, K_D T_f > 0, \text{取正号}$ $K_D T_f < 0, \text{取负号}$ $K_D T_f =  K_2 T_{a_1} - T_{c_1} $ $T_f = \frac{K_1 T_{a_1} (T_2 - T_{c_1})}{K_2 T_{a_1} - T_{c_1}}$ 若 $T_f < 0, T_f \cong T_2$	
	$n_1=n_2=1$	$K_f \frac{1+T_{f1}s}{1+T_{f2}s}$	$K_f = \frac{K_2}{K_1}$ $T_{f1} = T_1$ $T_{f2} = T_2$	$n_1 T_1 > T_{c_2}$	$\frac{1+T_f s}{K_D T_f s}$ $K_D T_f = K_1 T_{a_2}$ $T_f = n_1 T_1 - T_{c_2}$	$n_2 T_2 < T_{c_1}$	$\frac{K_D T_f s (1+K'_D T'_f s)}{(1+T'_f s)^2}$ $K_D T_f = K_2 T_{a_1}$ $K'_D T'_f$ 由第一类情况 (4) 解决			
	$n_1 < n_2$ $n_1 T_1 < n_2 T_2$	$\frac{K_f}{(1+T_f s)^{n_1}}$	$K_f = \frac{K_2}{K_1}$ $n_1 T_f = n_2 T_2 - n_1 T_1$ $n_1 = \frac{(n_2 T_2 - n_1 T_1)^2}{n_2 T_2^2 - n_1 T_1^2}$	$n_1 T_1 > T_{c_2}$	$\frac{1}{K_D T_f s (1+T_f s)}$ $K_D T_f = K_1 T_{a_2}$ $T_f = T_{c_2} - n_1 T_1$					
	$n_1 < n_2$ $n_1 T_1 > n_2 T_2$	$K_f \frac{1+K_D T_f s}{(1+T_f s)^2}$	$K_f = \frac{K_2}{K_1}$ $K_D T_f = n_1 T_1 - n_2 T_2 + 2 T_f$ $T_f = n_2 T_2 - n_1 T_1 + \sqrt{0.5 B}$ $B = (n_2 T_2 - n_1 T_1)^2 + n_1 T_1^2 - n_2 T_2^2$ 若 $T_f < 0$ , 取 $T_f \cong T_2$	$n_1 T_1 < T_{c_2}$						
	$n_1 \geq n_2$	$K_f \frac{K_D T_f s}{1+T_f s}$ $K_D T_f > 0$ 取正号 $K_D T_f < 0$ 取负号	$K_f = \frac{K_2}{K_1}$ $K_D T_f =  n_1 T_1 - n_2 T_2 $ $T_f = \frac{n_1 T_1^2 - n_2 T_2^2 - (n_1 T_1 - n_2 T_2)^2}{2(n_1 T_1 - n_2 T_2)}$ 若 $T_f < 0$ 取 $T_f \cong \min(T_1, T_2)$	$n_1 T_1 < T_{c_2}$						



虚线——  $(1 + \frac{1}{1 + 0.5s} - \frac{1}{1 + 1.9s}) \cdot \frac{1}{(1 + 0.7s)^2}$   
 实线——  $(1 + \frac{0.4s}{1 + 0.5s}) \frac{1}{(1 + 0.7s)^2}$

图3 两种前馈方式补偿效果比较图

提高控制品质。图4为电站锅炉过热器的控制系统。主调节器为比例-积分-微分调节器，副环调节器为比例调节器，比例带记为  $\delta$ 。对象的传递函数为：

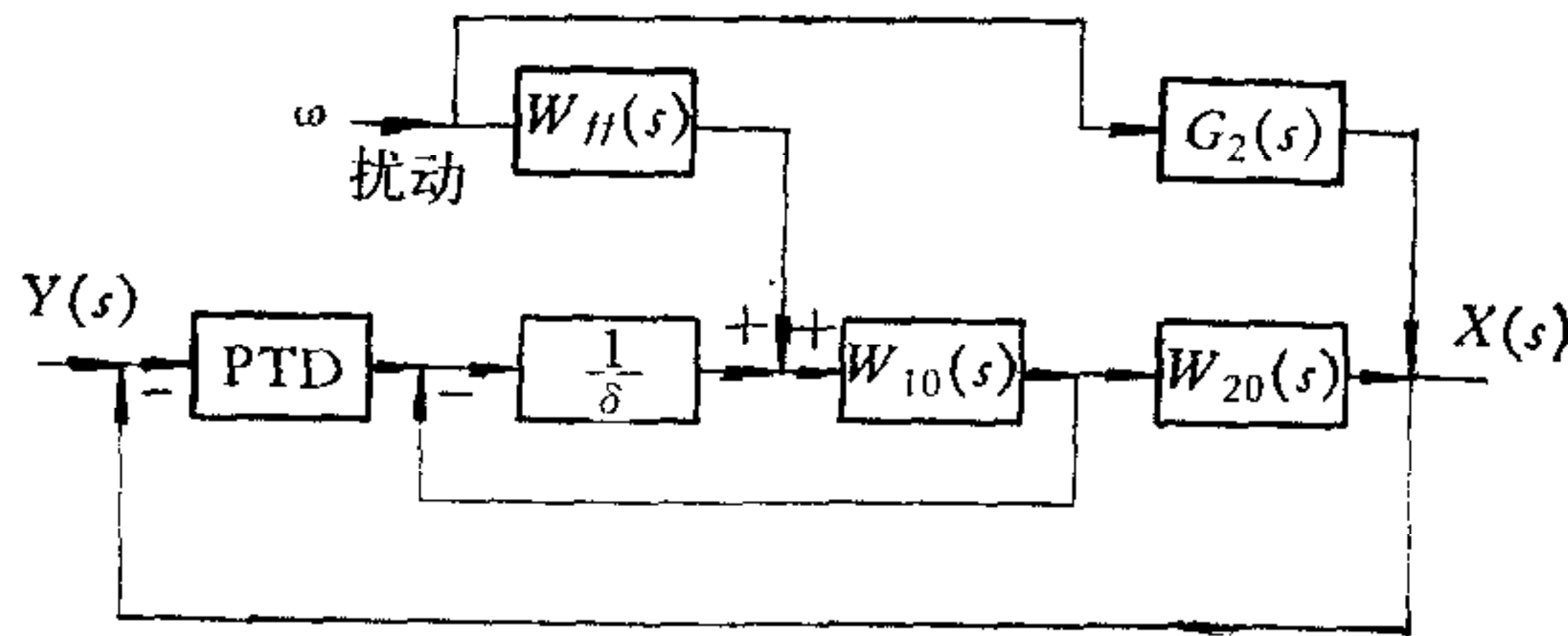


图4 前馈-串级控制系统方框图

对主控制区段

$$W_0(s) = W_{10}(s) \cdot W_{20}(s) = K_0 / (1 + T_0s)^{n_0}$$

对超前控制区段

$$W_{10}(s) = K_{10} / (1 + T_{10}s)^{n_{10}}$$

均可由试验求出。惰性区段的传递函数由计算求出，

$$\text{即, } W_{20}(s) = K_{20} / (1 + T_{20}s)^{n_{20}}$$

$$\text{这时, } G_1(s) = \delta W_0(s) / [\delta + W_{10}(s)] \cong K_1 / (1 + T_1s)^{n_1}$$

$$K_1 = \delta K_0 / (\delta + K_{10}), n_1 T_1 = n_{20} T_{20} - K_{10} n_{10} T_{10} / (\delta + K_{10}),$$

$$n_1 = (n_1 T_1)^2 / [(n_1 T_1)^2 - A],$$

$$A = n_{20}(n_{20} - 1) T_{20}^2 + K_{10} n_{10} (n_{10} + 1) T_{10}^2 / (\delta + K_{10})$$

$$- 2K_{10} n_{20} T_{20} n_{10} T_{10} / (\delta + K_{10}),$$

$$n_{20} = (n_0 T_0 - n_{10} T_{10})^2 / (n_0 T_0^2 - n_{10} T_{10}^2),$$

$$T_{20} = (n_0 T_0^2 - n_{10} T_{10}^2) / (n_0 T_0 - n_{10} T_{10}).$$

其中  $\delta$  值可由串级系统整定计算得出，也可近似地取为：

$$G_1(s) = 1/T_a s - (T_a/T_c)/(1 + T_c s) = 1/T_a s(1 + T_c s),$$

$$G_2(s) = K_1/(1 + T_1 s) - 1/T_a s,$$

此时可取，

$$W_{ff}(s) = K_f [1 - K_D T_f s / (1 + T_f s)].$$

$K_f = \delta$  为给水流量信号的分流系数，

$K_D T_f$  和  $T_f$  由表(1)中公式求出。

经模拟试验，其动态偏差较原“三冲量”系统在相同的冲击负荷下要降低40—50%。

#### 4. 前馈-串级控制系统

串级控制系统一般用于对象迟延较大，且控制品质要求较高的生产过程中。这时若选用合适的前馈控制，则能进一步

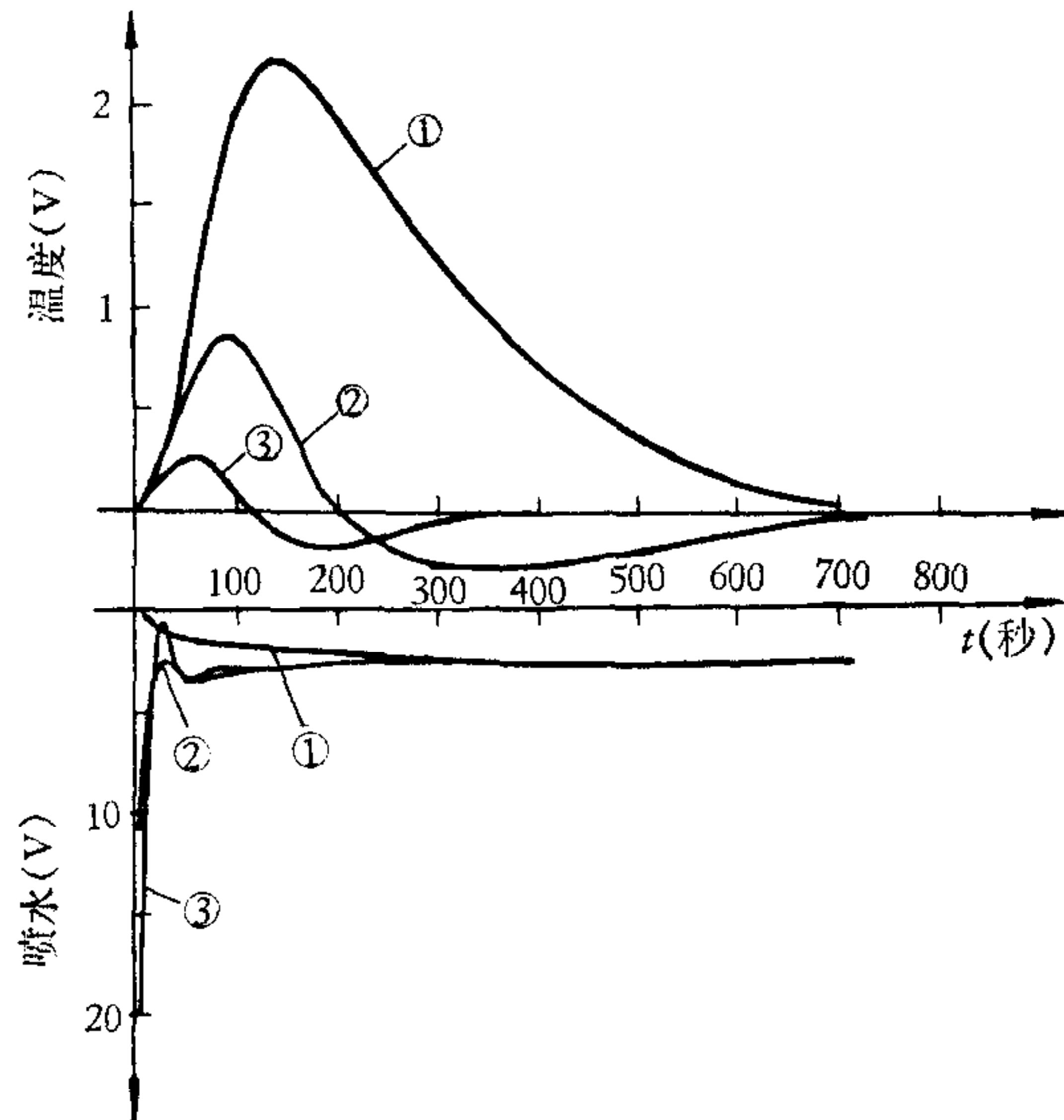
$$\delta = K_{10}T_{20}(n_{20}^2 - 1)/24T_{10}n_{20}.$$

下面举一实例,并在模拟机上验证其结果.

某电厂锅炉过热器的传递函数为:

$$W_0(s) = 1.25/(1 + 40s)^4, \quad W_{10}(s) = 1.25/(1 + 14s)^2$$

$$G_2(s) = -0.34/(1 + 30s)^3$$



蒸汽流量扰动 10V

①……无前馈

②……静态前馈  $W_{ff}(s) = 1$

③……动态前馈  $W_{ff}(s) = 1 + 1.67 \times 30s/(1 + 30s)$

图5 前馈-串级控制系统在外扰时过渡过程比较图

这时比例-积分-微分调节器整定参数为: 比例带  $\delta_1 = 1.50$ , 积分时间常数  $T_i = 88$  秒, 微分时间常数  $T_D = 13$  秒.

用上述公式计算结果为:

$$\delta = 0.46, \quad K_i = 0.34, \quad n_i = 4, \quad T_i = 35 \text{ 秒}.$$

利用第1章公式得

$K_f = 1$ ,  $K_D T_f = 50$ , 计算发现  $T_f < 0$ , 故取  $T_f = 30$ ,  $K_D = 1.67$ , 即

$$W_{ff}(s) = 1 + 1.67 \times 30s/(1 + 30s).$$

图5中纵坐标为模拟机输出电压。从图中看出效果是很显著的。

## 二、多变量前馈-反馈控制

类似于公式(1), 此时的全补偿条件为<sup>[5]</sup>:

$$A_{C \times K} + B_{K \times M} \cdot F_{M \times K} = O_{C \times K}. \quad (2.1)$$

$A_{C \times K}$  为内扰传递函数矩阵,  $B_{K \times M}$  为外扰传递函数矩阵,  $F_{M \times K}$  为前馈控制传递函数矩阵.  $O_{C \times K}$  为  $C$  行  $K$  列零矩阵.

此时若方程(2.1)有解的话,  $F_{M \times K}$  的元素  $f_{ij}$  均可表为:



$$f_{ij} = P_{ij}/Q_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad j = 1, 2, \dots, K$$

其中,

$$P_{ij} = \sum p_{i_1} p_{i_2} \cdots p_{i_n}, \quad (2.2)$$

$$Q_{ij} = \sum q_{i_1} q_{i_2} \cdots q_{i_n}. \quad (2.3)$$

这里,  $p_i$  和  $q_i$  均为  $A_{C \times K}$  或  $B_{K \times M}$  的元素.

计算步骤可归纳如下:

- i) 先把  $A_{C \times K}$ ,  $B_{K \times M}$  的每个元素均化为标准型  $K/(1 + Ts)^n$ ;
- ii) 把 (2.2), (2.3) 式中连乘项用公式 (1.5) 化为标准型;
- iii) 这时 (2.2), (2.3) 式中均为标准型相加, 再用公式 (1.6) 化为标准型.

利用第 1 章的结果, 就可求出前馈控制传递函数矩阵  $F_{C \times K}$  中每个元素  $f_{ij}$  的实用表达式.

### 参 考 文 献

- [1] 精馏塔先进控制, 化工自动化及仪表 (1980.5).
- [2] 李旭, 由试验阶跃响应曲线求取传递函数, 电力技术通讯 (1980.4).
- [3] 万百五等, 大系统的模型简化, 自动化学报, 1980, 6 卷 1 期.
- [4] 吕勇哉等, 前馈控制及其工业应用, 自动化学报, 1979, 5 卷 3 期.
- [5] Magmullam, E. G., Shinskey, F. G., Selected Papers on Process Control & Process Dynamics, Vol.1 Feedforward Control. Oct, 1974, 33—38.
- [6] Shinskey, F. G. *idem* 189—204.
- [7] Bollinger R. E., D. E. Lamb, *idem* 249—256.
- [8] 相樂和男、戸田忠, ボイラ蒸気温度制御システムの改善, 火力原子力発電, 24 (1973), No. 12, 1405—1414.

## FEEDFORWARD CONTROL TO BE USED IN PRACTICAL ENGINEERING

LI XU

(Shanghai Power Equipment Research Institute)

### ABSTRACT

The single and multi-loop feedforward control often used in practical engineering are discussed in this article. The objects to be controlled are divided into two groups, self-balancing or non-self-balancing. for each group the transfer function is transferred into a standard expression. Various types of feedforward controller and their respective parameter calculation formulas are derived by low-order approximation.

The above results and method can be used in the multivariable control system to find out every element of the feedforward transfer function matrix and calculate its appropriate parameters.