

# 再沸油加热炉多变量系统的设计及 微机控制

白方周 庞国仲 赵子士 恽源世 薛建平 罗宁芬 孙承寿 关山  
(中国科技大学)

## 摘 要

南京烷基苯厂再沸油加热炉(F-501炉)系一多变量工业对象. 本文描述了采用 Rosenbrock 的逆奈氏阵列法进行解耦设计以及采用多变量 Smith 预估技术补偿对象纯滞后所获结果, 也简要提到微机控制系统硬、软件的构成与特点. 该系统投运一年多表明, 控制性能完全满足设计要求, 且带来十分显著的经济效益.

## 一、炉子概况

F-501 是一台大型辐射对流型上抽立式燃烧加热炉, 它是整个烷基苯装置的热源. 被加热后的热油(载热体)分三路进入 16 只换热器, 换热后返回炉子再加热. 在额定负荷下, 入口热油温度为  $285^{\circ}\text{C}$  左右, 工艺要求出口热油温度恒定在  $310^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . 炉子正常热负荷为 3700 万大卡/时, 热油循环总量为 1200 吨/时. 燃油为重油, 耗油量为 3600 公斤/时.

为满足工艺要求, 原控制系统采用以炉出口温度为主调、燃油压力为副调的串级调节, 运行情况良好. 但对烟气氧含量未实施控制, 因此只能处于富氧燃烧状态, 热量损失严重. 1983 年江苏省能源技术中心对该炉测定: 氧含量为 5.2%, 空气过剩系数为 1.306, 可见氧量较高, 空气过剩系数过大, 热效率不高. 由于炉子耗油量很大, 所以, 如能在对热油温度控制的同时实施低氧燃烧控制, 则必将提高炉子的热效率, 大幅度地节省燃油.

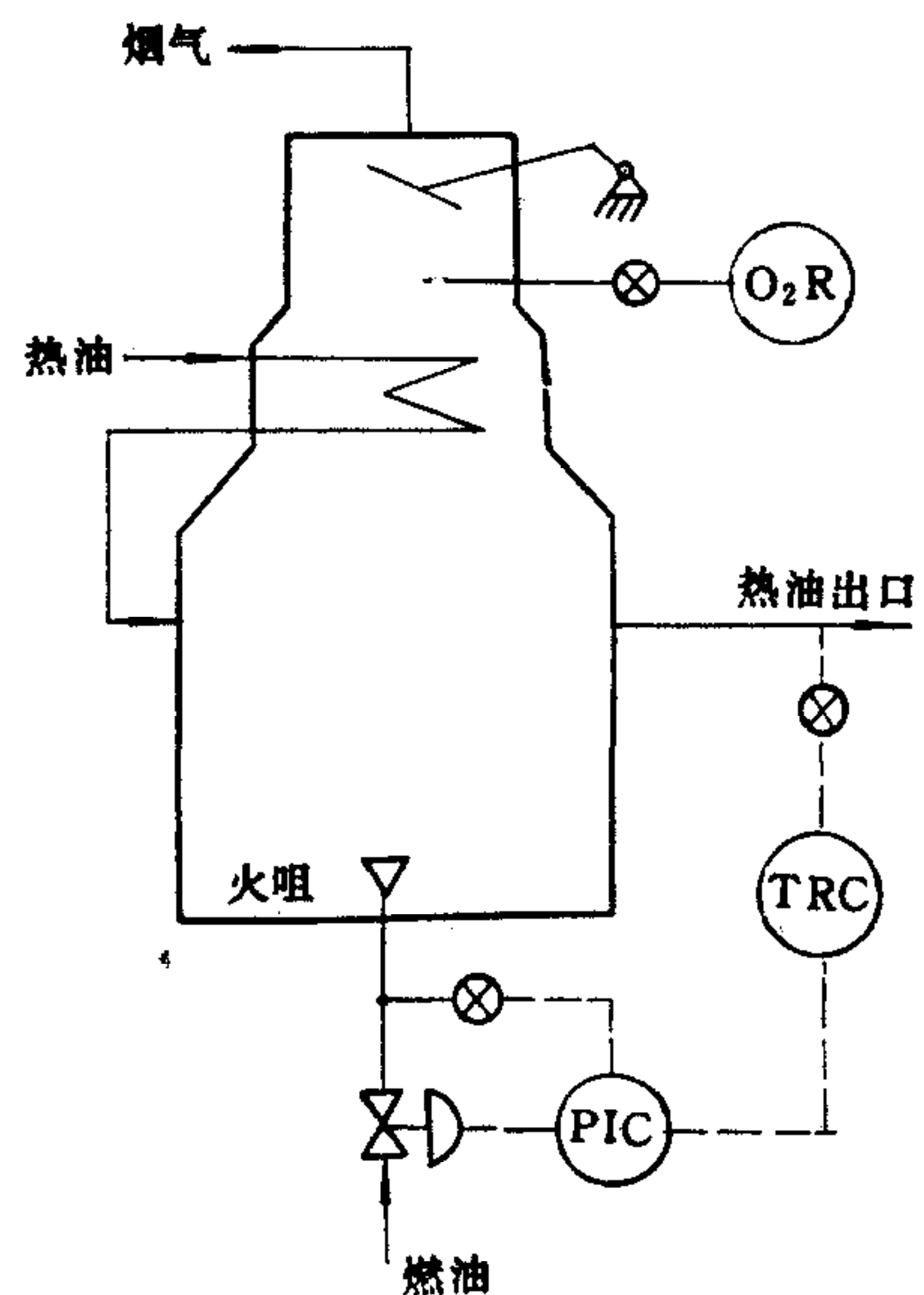


图 1 加热炉原控制简图

## 二、确定对象模型和控制方案

对控制系统的基本要求是：保证炉热油出口温度稳定在  $310^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  的情况下实现低氧燃烧。通过机理分析和现场实验发现，燃油压力变化对炉热油出口温度和氧含量都有很大影响；烟道挡板开度的变化也同时影响氧含量和热油温度。因此，单独增加一个氧量控制回路，是不能满足上述基本要求的。

若把燃油压力和挡板开度两个量的变化作为控制量，炉出口温度和氧含量作被控量，则可用如下简化框图描述加热炉各变量间的关系：在工作点 ( $P = 5$  公斤/厘米<sup>2</sup>,  $T =$

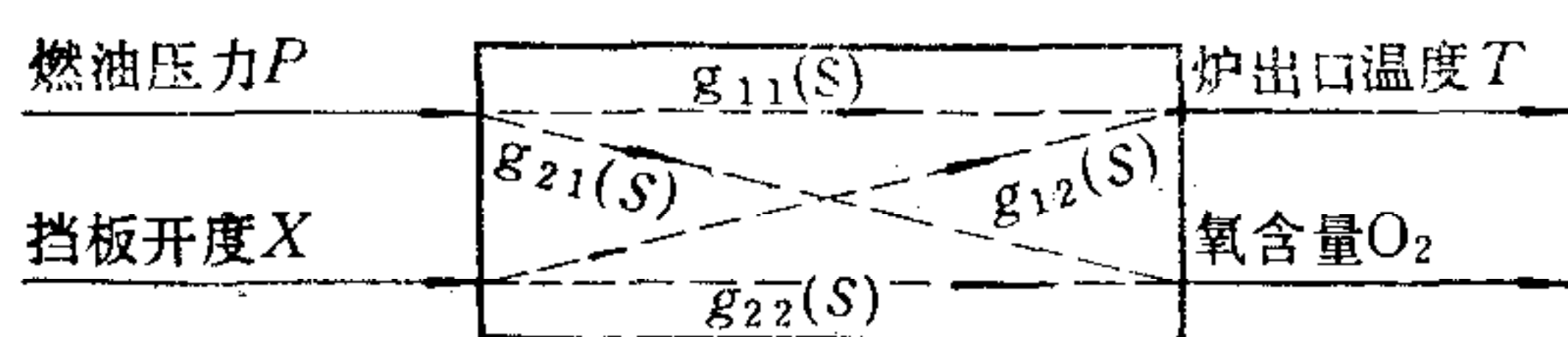


图2 加热炉的简化框图

$310^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{O}_2 = 5\%$ ) 附近采用飞升响应法测试, 然后通过曲线拟合, 得到 4 个标量传递函数  $g_{ij}(i, j = 1, 2)$ , 于是对象的传递函数矩阵为:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.6}{2400s^2 + 85s + 1} e^{-55s} & \frac{-0.1}{3360s^2 + 110s + 1} e^{-30s} \\ \frac{-1.1}{70s + 1} e^{-15s} & \frac{0.6}{80s + 1} e^{-30s} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

由式(1)不难看出, 被控对象是一个强关联多变量多重时延系统。经过分析论证, 决定采用多变量 Smith 预估器对时延进行补偿, 以逆奈氏阵列法设计预补偿器削弱两个回路间的关联, 然后按单回路进行校正设计。控制方案的框图示于图 3。图中  $G(s)$  为对象的传递函数矩阵,  $P(s)$  为多变量 Smith 预估器矩阵,  $K_p(s)$  为预补偿器矩阵,  $k_{c1}(s)$  和  $k_{c2}(s)$  分别为温度回路和氧回路控制器传递函数。需要指出的是, 由于将原模拟仪表构成的压力副环回路合并至对象的数学模型中。这样, 测出的  $G(s)$  是包含有压力环、执行机构、测量仪器等在内的广义对象数学模型。图中  $u_1$  作为燃油压力副环模拟调节器的给定值。用微机实施控制时, 温度回路相当于计算机监督控制 (SCC), 氧回路则为直接数字控制 (DDC)。

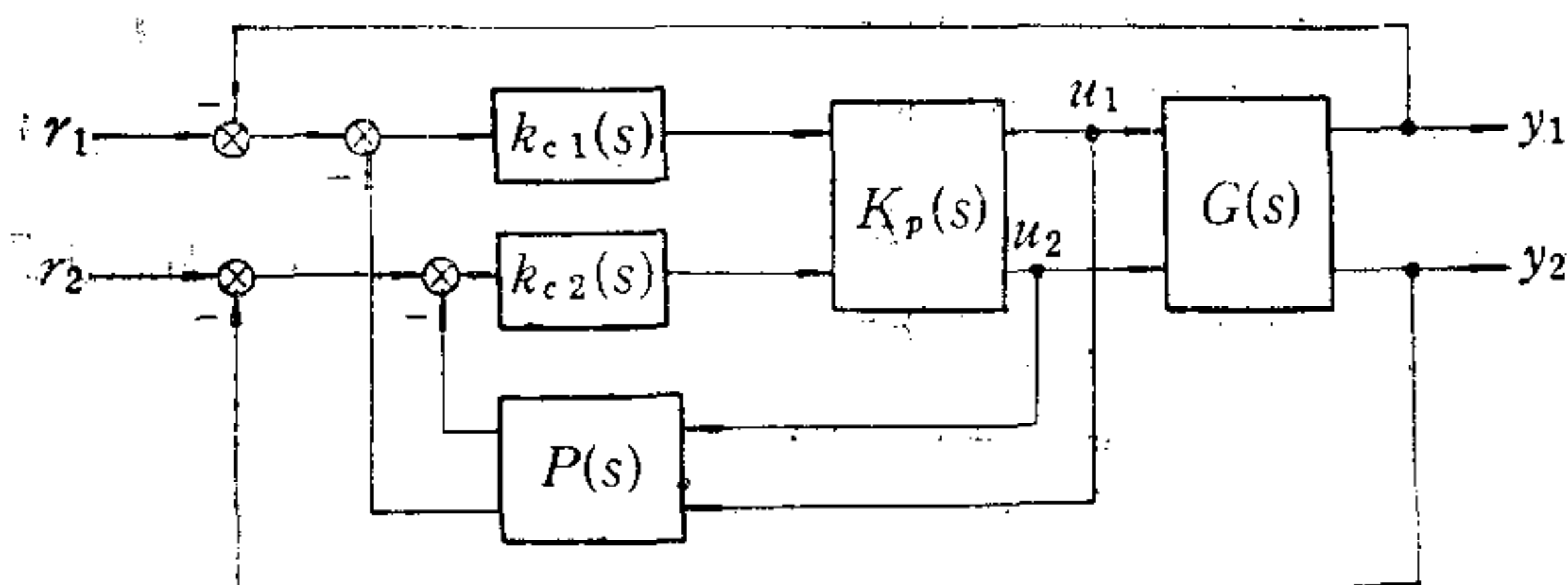


图3 加热炉控制方案框图

### 三、控制系统的设计

(1) 设计多变量 Smith 预估器, 补偿对象的纯时延. 假设模型与对象完全匹配, 则多变量 Smith 预估器矩阵可表示为

$$P(s) = G_0(s) - G(s) = \{g_{ij}(s)[1 - e^{-\tau_{ij}s}]\}_{2 \times 2}, \quad (2)$$

其中  $G_0(s) = \{g_{ij}(s)\}_{2 \times 2} = G(s)|_{\tau_{ij}=0}$  为等效无时延对象传递函数矩阵.

图 3 所示系统的闭环传递函数矩阵为

$$H(s) = G(s)K_p(s)K_c(s)[I + G_0(s)K_p(s)K_c(s)]^{-1}, \quad (3)$$

相应的特征方程为

$$\det [I + G_0(s)K_p(s)K_c(s)] = 0. \quad (4)$$

显然, 由于式(4)已不含有纯时延项, 表明多变量 Smith 预估器的补偿时延作用与单回路 Smith 预估器相同. 但是, 因  $G(s)$  各元素的  $\tau_{ij}$  不相同, 故通常不能像单变量系统那样将无时延部分与纯时延部分分离开, 只能画出如图 4 所示的等效框图.

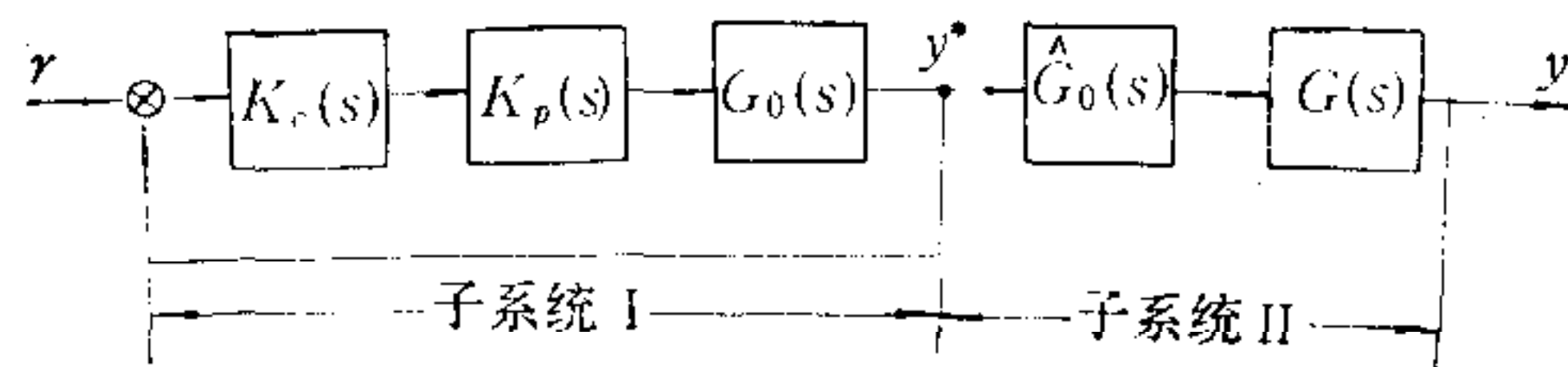


图 4 图 3 的等效框图

值得指出的是, 由于采用微机控制, 因此所构造的 Smith 预估器

$$P(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.6}{2400s^2 + 85s + 1} (1 - e^{-55s}) & \frac{-0.1}{3360s^2 + 110s + 1} (1 - e^{-50s}) \\ \frac{-1.1}{70s + 1} (1 - e^{-15s}) & \frac{0.6}{80s + 1} (1 - e^{-30s}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

是通过软件实现的, 递推算式此处从略.

(2) 采用 INA 法完成子系统 I 的设计. 由于  $G_0(s)$  不含纯时延项, 因而可直接用 INA 法设计. 利用 CAD 程序包绘出  $\hat{G}_0(s) = [G_0(s)]^{-1}$  附有 Gershgorin 带的奈氏阵列, 再用程序包中的伪对角化程序设计预补偿器, 得到

$$\hat{K}_p(s) = \hat{K}_p = \begin{bmatrix} 1.473 & -0.2356 \\ -2.956 & 1.473 \end{bmatrix} \quad (6)$$

或

$$K_p = [\hat{K}_p]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0.16 \\ 2.007 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

现在, 对已达到对角优势的系统进行单回路补偿设计, 最后得出

$$K_c(s) = \text{diag} [k_{c1}(s), k_{c2}(s)] = \begin{bmatrix} 1.5 \left( 1 + \frac{1}{55.4s} + 8.25 \right) & 0 \\ 0 & 8 \left( 1 + \frac{1}{96s} \right) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

(3) 检查真正输出  $y$  是否满意。上述设计结果表明  $y^*$  是满足要求的,但并不能保证处于闭环之外(图4)子系统 II 的输出  $y$  也是满意的,而  $y$  才是真正的输出。为此需要检查  $y$ , 方法是在对  $y^*$  进行仿真时,同时也记录下  $y$ 。若发现动态耦合比较严重,可以修正  $k_{c1}(s)$  和  $k_{c2}(s)$ 。

#### 四、微机系统的硬件和软件

(1) 硬件。微机控制系统采用了 TP-801B 单板机为核心,配置过程输入/输出通道及其它外围设备组成了过程控制计算机(图5)。为与原控制仪表精度相匹配,系统中采用了字长为 12 位的 AD574J 型 A/D 转换器和 12 位的 AD7521 型 D/A 转换器。微机系统除完成特定的控制功能外,还可完成对现场工艺参数的监测、打印、制表和报警。由于设有状态切换开关,还可实现计算机和常规仪表间的无扰切换。

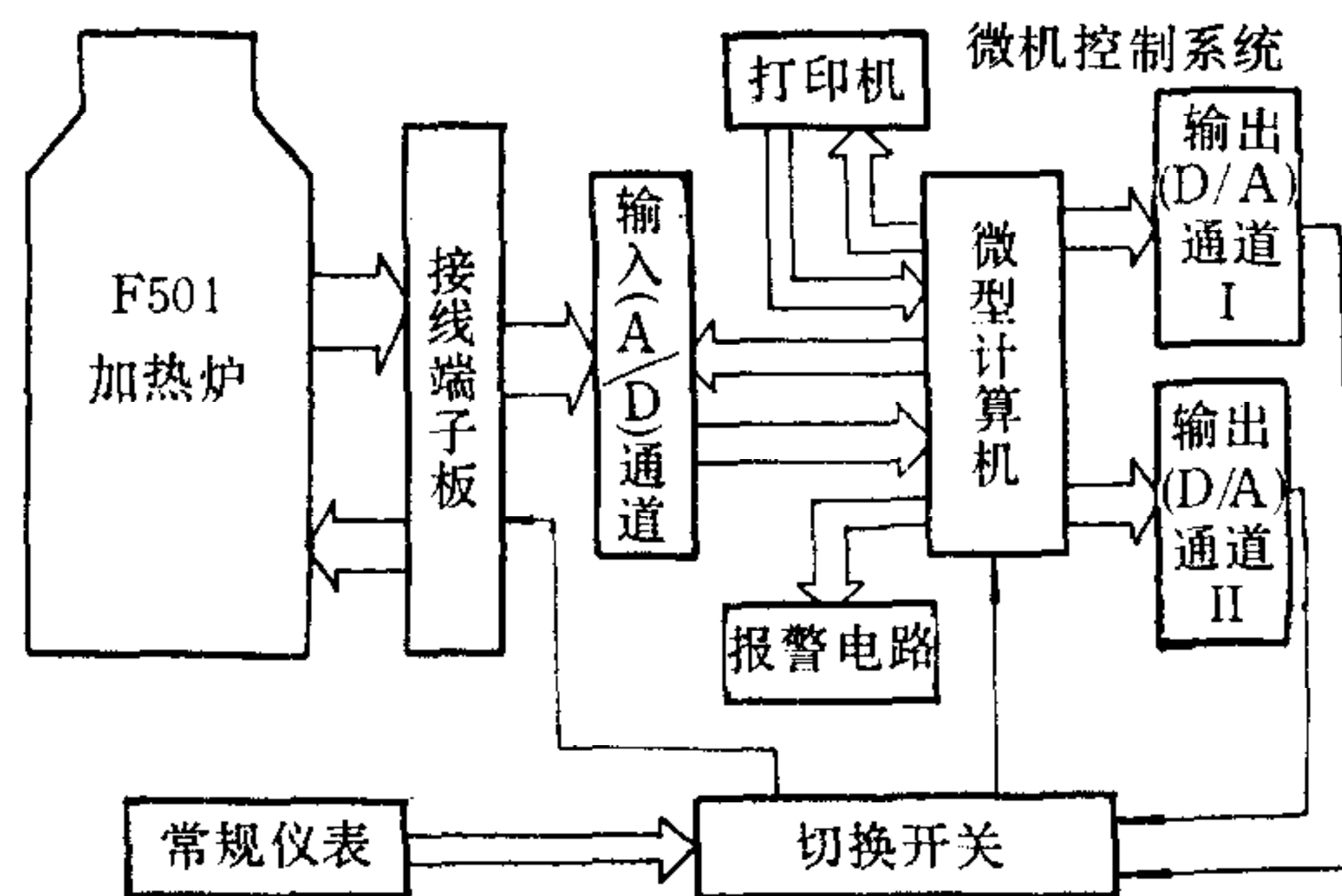


图5 加热炉微机系统的总框图

(2) 软件。控制系统软件全部用 Z-80 汇编语言编写,最后得到 6K 字节的二进制机器码程序固化在 3 片 2716 的 EPROM 芯片中。整个软件可分为基本子程序库,专用子程序库,中断服务程序和系统管理程序四大部分,它们之间的联系如图 6 所示。

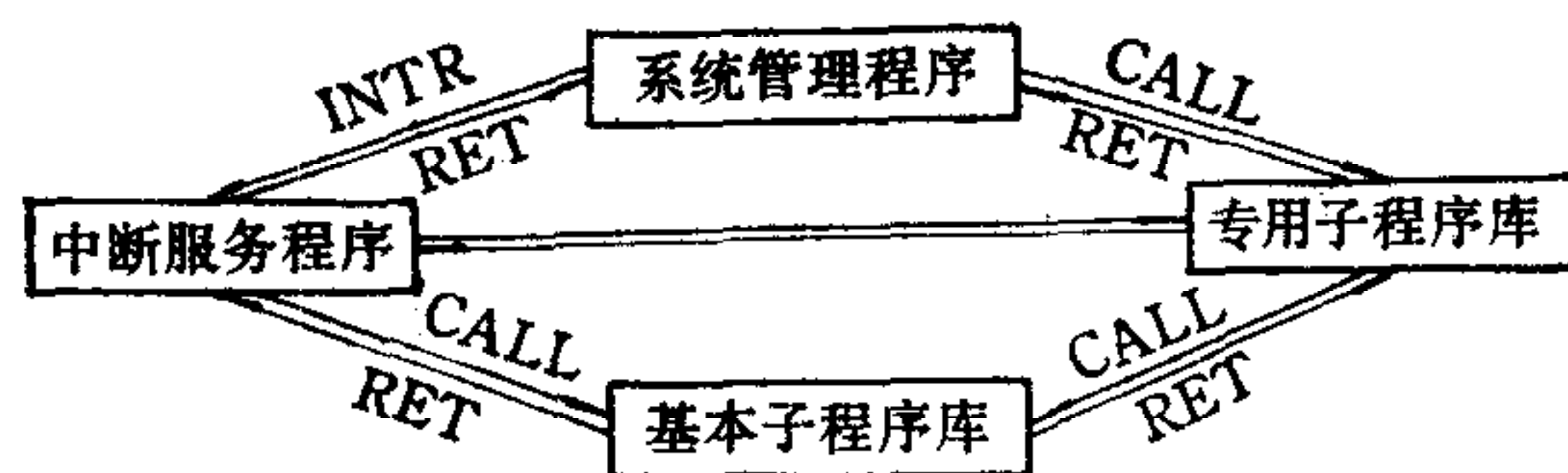


图6 微机系统软件的基本结构

#### 五、微机控制系统的投运及节能效果

该系统于 1985 年 9 月正式投运,一年多运行表明,系统工作正常、可靠,不仅满足既定的性能指标,且有较强的抗干扰能力。

为对系统投运后的节能效果作出公正评价,采取三种方法测定与计算:(1)由江苏省

能源中心进行热平衡测试;(2)由该厂生产计划部门对系统投运前后各一年的耗油数据进行统计;(3)增大或减小氧量设定值,观察燃油消耗记录曲线。三种方法得到的结果非常吻合,即系统投运后,每年节省燃油为三千吨,折合人民币为 138 万元。该系统已于 86 年 11 月通过中国石化总公司主持的部级鉴定。

### 参 考 文 献

- [1] H. H. Rosenbrock, *Computer-Aided Control System Design*, 1974.
- [2] B. A. Ogunnaike, *Multivariable Controller Design for Linear Systems Having Multiple Time Delays*, *AIChEJ*, 25, 1043, 1979.
- [3] 中国科大十系,多变量控制系统频域法 CAD 软件文本 MF-B, 1984, 10.
- [4] 中国科大, F-501 炉多变量微机控制系统研制技术报告, 1985, 10.

## DESIGN AND MICROCOMPUTER CONTROL OF A REBOILER OIL HEATER MULTIVARIABLE SYSTEMS

BAI FANGZHOU ET AL.

*(China University of Science and Technology)*

### ABSTRACT

Nanking Linear Alkyl Benzene Factory's reboiler oil heater (F-501) is a multivariable industrial plant. This paper describes the results which was obtained by decoupling design with INA method putting forward by Rosenbrock and time delay compensation of plant using multivariable Smith predictor technique. The construct and feature of microcomputer control system are briefed as well. This system has operated for over a year, it indicates that control performance satisfies the design requirements fully, and has achieved significant economical benefit.