

实用的特大时间常数的 仿真方法和模拟电路

苏 安 邦

(应用物理系)

摘 要

模拟与仿真是在实验室的条件下,对生产过程或设备的物理或化学机理进行研究的重要手段,也是控制设备长期运行考核与控制方案效果验证的有效工具.由于模拟式的仿真遇到电容漏电阻及其电容量的限制,要达到1h以上的实时仿真是比较困难的.本文提出两种可行的实施线路及具体电路参数,采用本仿真电路,可由小电容实现大时间常数的仿真,以供从事各种实验仿真的有关人员参考使用.

一、前 言

为了对设备或控制系统进行模拟仿真,可以根据其性能用电路实现,其中一个主要功能部件为惯性环节(图1).其传递函数为

$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{K_f}{T_f s + 1} \quad (1)$$

式中, K_f 是 $y(t)$ 的终值; T_f 是该环节的时间常数; s 是拉氏算子.当 $T_f \approx RC$ 时, R 和 C 的取值不宜过大,否则将影响测量或控制精度.对于模拟计算机,时间常数在 1 min 内是可以实现的.但是,对慢速变化的过程,如多段加热过程的控制设备、物料均匀设备或浮压调节,有时要求时间常数长达 1 h 以上.在这种情况下,实时模拟将是困难的.

为了增大时间常数,通常采用反馈措施加以解决.图2是带反馈环节的流图,其中 $-G_1(s)$ 是反馈网络的传递函数.图2系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{G_f(s)}{1 + G_1(s)} \quad (2)$$

设 $G(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1}$, 代入式(2), 有

$$\frac{1}{1 + G_1(s)} = \frac{K_m}{K_f} \left(\frac{T_f s + 1}{T_m s + 1} \right) \approx \frac{1}{1 + \frac{(T_m - T_f)s}{T_f s + 1}}$$

本文1986年12月24日收到.

从而得

$$G_1(s) = \frac{(T_m - T_f)s}{T_f s + 1} \quad (3)$$

式中, T_m 是系统的时间常数。我们希望 $T_m \gg T_f$, 因此 $T_m - T_f$ 是一个大的数值。由式 (3) 可见, $G_1(s)$ 应由惯性环节和微分环节串联而成, 但是微分部件, 尤其是大时间常数的电子微分部件容易引入干扰, 难以达到精确的模拟。

现在把图 2 的信号流图改为图 3。根据同样道理, 可以求得

$$G_1(s) = \frac{(T_m - T_f)s}{T_f s + 1} \quad (4)$$

显然, 只要新环节 $G_2(s)$ 的传输增益足够大, 就可以使 $\frac{T_m - T_f}{G_2(s)}$ 比较小, 从而可能做成慢速的实时控制。

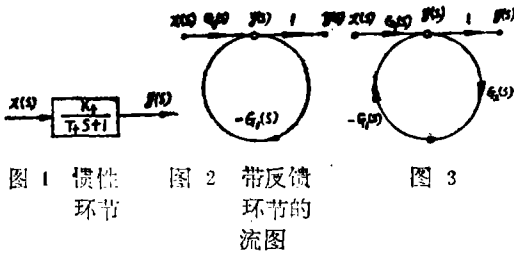


图 1 惯性环节

图 2 带反馈环节的流图

图 3

二、慢速实时仿真环节的结构框图

图 4 虚线以下部分是待求电路, 今用信号流图表示(图 5a)。根据信号流图简化法则, 依次把图 5(a)简化为图 5(b)、(c)。因此系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{G_f(s)}{1 - \frac{D_1(s)D_2(s)D_4(s)}{1 + D_2(s)D_3(s)}} \quad (5)$$

设

$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{K_m}{T_m s + 1}, \quad G_f(s) = \frac{K_f}{T_f s + 1}$$

代入式(5)

$$\frac{K_m}{K_f} \left(\frac{T_f s + 1}{T_m s + 1} \right) = \frac{1}{1 - \frac{D_1(s)D_2(s)D_4(s)}{1 + D_2(s)D_3(s)}} \quad (6)$$

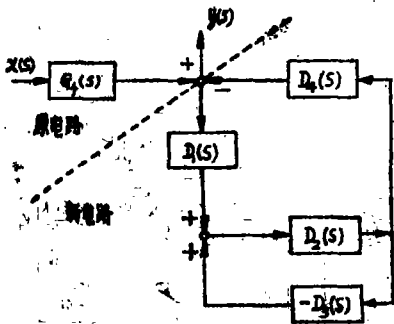


图 4 慢速仿真框图

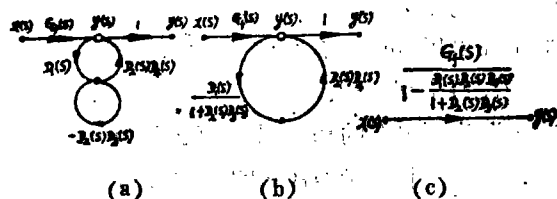


图 5 图 4 的信号流图及其简化

取 $K_m \approx K_f$, 由式(6)得

$$\frac{(T_m - T_f)S}{T_f S + 1} = - \frac{D_1(s)D_2(s)D_4(s)}{1 + D_2(s)D_3(s)} \quad (7)$$

从式(7)可见, 只要适当选取 $D_1(s)$ 、 $D_2(s)$ 、 $D_3(s)$ 和 $D_4(s)$ 就可以使 $T_m \gg T_f$.

下面介绍两种结构.

第一种结构: 取 $D_1(s) = K_1$, $D_2(s) = 1$, $D_3(s) = \frac{1}{T_3 S}$, $D_4(s) = -K_4$. 代入式(7)

$$\frac{(T_m - T_f)S}{T_f S + 1} = \frac{K_1 K_4 T_3 S}{T_3 S + 1}$$

调节 T_3 使 $T_3 \approx T_f$, 则

$$T_m = T_f + K_1 K_4 T_3 \approx K_1 K_4 T_3 \quad (8)$$

即惯性环节 $G_f(s)$ 接入电路后, 时间常数增大 $K_1 K_4$ 倍, 因而可进行慢速控制.

第二种结构: 取 $D_1(s) = K_1$, $D_2(s) = K_2(1 + \frac{1}{T_2 S})$, $G_3(s) = \frac{1}{T_3 S}$, $G_4(s) = -\frac{K_4}{T_4 S + 1}$. 代入式(7)

$$\frac{(T_m - T_f)S}{T_f S + 1} = \frac{K_1 K_2 K_4 (1 + \frac{1}{T_2 S}) \frac{1}{(T_4 S + 1)}}{1 + K_2 (1 + \frac{1}{T_2 S}) \frac{1}{T_3 S}}$$

如果 T_2 很小, 上式近似为

$$\frac{(T_m - T_f)S}{T_f S + 1} = \frac{K_1 K_4 T_3 S}{T_4 S + 1} \quad (9)$$

调节 $G_4(s)$ 的时间常数 T_4 , 使 $T_4 \approx T_f$, 则

$$T_m = T_f + K_1 K_4 T_3 \quad (10)$$

只要适当选取 K_1 、 K_4 和 T_3 , 就可以实现慢速模拟控制.

三、慢速模拟电路

1. 第一种电路

根据图 4 原理构成的电路见图 6. 两个图的对应关系为: A_1 和 A_2 对应 $D_1(s)$, A_3 对应 $D_2(s)$, A_4 和 A_5 对应 $D_3(s)$, A_6 对应 $D_4(s)$. 为了减少电源组数, 集成运算放大器全部采用 F007, 各脚接法和 A_1 相同, 图中没有全部标出.

“x”为新电路的输入端, “y”为输出端. 设某惯性环节 $G_f(s)$ 的时间常数为 1 min, 经图 6 仿真电路后, 时间常数设计在 1 h 以上, 输出电流在 5—20 mA.

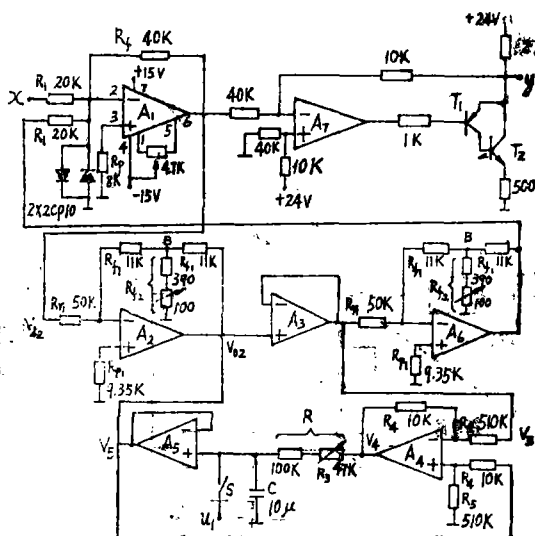


图 6 实时仿真电路之一

图中 A_1 接成反相加法器,两个反并联的二极管 D_1 和 D_2 用以限制放大器输入信号的幅度, R_F 取为 R_1 、 R_2 和 R_f 的并联。为了保证相加精度,要求电阻 R_1 、 R_2 和 R_f 的精度为 $\pm 0.1\%$ 。调试时把加法器输入端接地,细心调节接在F007的1和5脚间的电位器,使输出电位为零,从而消除由于输入失调量引起的输出误差电压,本级增益为2倍, A_3 是电压跟随器。

A_4 和 A_5 组成积分器。其中 A_4 是减法器, A_5 是电压跟随器, RC 是积分网络。积分器的输出电压为

$$V_5 = -\frac{R_4}{RCR_5} \int V_3 dt \quad (11)$$

积分时间常数为

$$T_{45} = \left(\frac{R_5}{R_4}\right)RC \quad (12)$$

本积分器的时间常数应能跟随外接惯性环节时间常数的变化,小范围的变化由多圈电位器 R_3 调节,大范围变化调节 R_4 和 R_5 ,其换算关系见表1。只要 R_4 和 R_5 取用精度为 $\pm 0.1\%$ 的电阻,则可以得到非常好的线性。图中开关 S 用于调节电容器 C 的初始状态。若 S 的一端接地,开关闭合时,初状态为零,输出为零;若 S 的一端接某一电压 U_1 时,则初状态为 U_1 。

表 1

$R_4(K\Omega)$	25	20	15	10	10	10
$R_5(K\Omega)$	510	510	510	510	680	1000
$T_{45}(s)$	20—30	25—38	34—51	50—75	68—102	100—150

惯性环节接入图6后,系统的时间常数为

$$T_m \approx K_1 K_2 K_6 T_{45} \quad (13)$$

其中 $K_1 = 2$ 是运算放大器 A_1 的闭环增益, K_2 和 K_6 分别是 A_2 和 A_6 两级运算放大器的增益,为了减少静态误差电压, A_2 和 A_6 两级都采用改进型的反比例放大器,反馈电阻由 R_{f1} 和 R_{f2} 组成的T型电阻网络代替。由图6中 A_2 级可得

$$V_B = \frac{R_{f1} || R_{f2}}{R_{f1} + R_{f1} || R_{f2}} V_{02} \quad (14)$$

$$-\frac{V_B}{V_{i2}} = \frac{R_{f1}}{R_{r1}} \quad (15)$$

两式联立得到运算放大器 A_2 的理想闭环增益

$$K_2 = \frac{V_{02}}{V_{i2}} = -\frac{2R_{f1} + \frac{R_{f1}^2}{R_{f2}}}{R_{r1}} \quad (16)$$

显然式(16)右端分子就是等效反馈电阻

$$R_f = 2R_{f1} + \frac{R_{f1}^2}{R_{f2}} \quad (17)$$

这种电路的补偿电阻 R_{r1} 要保证电路处于平衡对称状态。为此 R_{r1} 的选取应使同相端和反相端外接直流有效电阻相等,即

$$R_{P1} = \frac{R_{r1} [R_{f1} + (R_{f1} || R_{f2})]}{R_{r1} + R_{f1} + (R_{f1} || R_{f2})} \quad (18a)$$

若 $R_{f1} \gg 100R_{f2}$, 上式可改为

$$R_{P1} = \frac{R_{r1} R_{f1}}{R_{r1} + R_{f1}} \quad (18b)$$

引起的误差小于1%。我们可以根据所要求的仿真时间定出 K_2 和 K_8 (通常取 $K_2 = K_8$)，再由式 (16) — (18) 求出 R_f 、 R_{f1} 、 R_{f2} 和 R_{P1} 。图 6 当 R_3 调节到 $T_{45} = 1 \text{ min}$ 时，微调 R_{f2} 可使模拟仿真时间在 50—80 min 范围内选用，若需要改变仿真时间，可依表 2 数据更换 R_{f1} 和 R_{P1} 。

表 2

K_2	5—6.5	6.2—7.7	7.3—9	8.4—10.3	9.6—12
$R_{f1}(\text{K}\Omega)$	11	12	13	14	15
$R_{P1}(\text{K}\Omega)$	9.35	9.99	10.61	11.23	11.82
仿真时间 $T_m(\text{min})$	50—80	75—115	105—160	140—210	180—280

图 6 中的运算放大器 A_7 和 T_1 、 T_2 构成输出电路， T_1 和 T_2 组成 PNP 型复合管，并接成射极跟随器的形式，复合管的等效集电极回路接负载电阻 R_7 ，输出端 “y” 是复合管的等效发射极。这样，从运算放大器 A_7 的输入端到输出端 “y” 的电路是反相型比例运算放大器，它作为整个仿真电路的输出级。

2. 第二种电路

第二种电路见图 7。它和图 4 的对应关系是： A_1 和 A_2 对应 $D_1(s)$ ， A_3 和 A_4 对应 $D_2(s)$ ， A_5 和 A_6 对应 $D_3(s)$ ， A_7 、 A_8 和 A_9 对应 $D_4(s)$ 。

本电路的惯性环节 A_7 和 A_8 的时间常数应和外接惯性环节 $G_f(s)$ 的时间常数 T_f 相等。由图 8 可以看出电路的传递函数为

$$\frac{u_3(s)}{u_i(s)} = \frac{\beta}{R_8 C_8} \cdot \frac{1}{(a+1) \left[1 + \frac{\beta}{R_8 C_8 (r+1) S} \right]} = \frac{r+1}{(a+1) \left[\frac{r+1}{\beta} R_8 C_8 S + 1 \right]}$$

所以此惯性环节的时间常数为 (以 T_4 表示)

$$T_4 = \frac{r+1}{\beta} R_8 C_8 \approx \frac{r}{\beta} R_8 C_8, \text{ 当 } r \gg 1 \text{ 时} \quad (19)$$

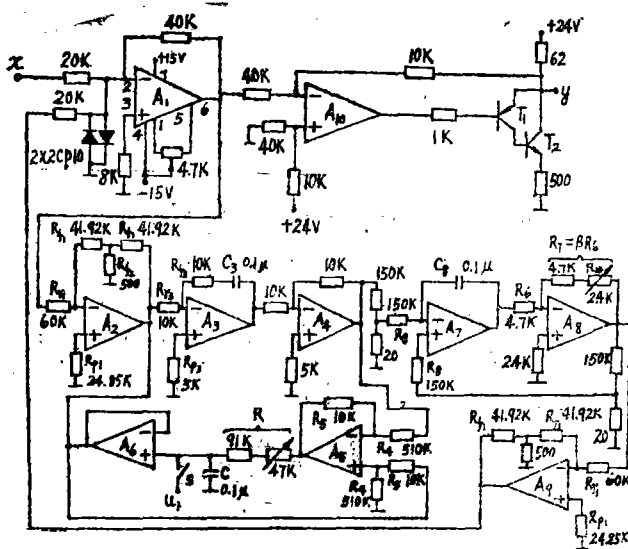


图 7 实时仿真电路之二

今取 $R_8 = 150\text{k}\Omega$, $C_8 = 0.1\mu\text{F}$, $r = 5000$, 则 $rR_8C_8 = 75\text{s}$ 。为了跟踪 T_f 的变化, 取 $\frac{R_7}{R_6} = \beta = 1 \sim 1.5$, R_7 选用 $4.7\text{k}\Omega$ 电阻串联 $2.4\text{k}\Omega$ 多圈电位器, 其关系见表 3。设 $T_f = 1\text{min}$, 调节多圈电位器使 $T_4 = 1\text{min}$ 。

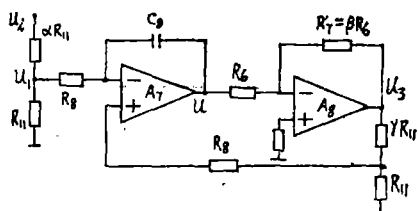


图 8 惯性电路

表 3

β	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
$T_4(\text{s})$	75	68	62	57	54	50

结合图 7, 可把式(10)改写为

$$T_m = T_f + K_1 K_2 K_9 T_3 \quad (20)$$

式中, K_1 、 K_2 、 K_9 分别为运算放大器 A_1 、 A_2 和 A_9 的闭环增益的绝对值, 设计时取 $K_1 = 2$, $K_2 = K_9$;

T_3 是图 7 积分器 A_5 和 A_6 的积分时间常数。今取 $R_5 = 10\text{k}\Omega$, $R_4 = 510\text{k}\Omega$, $R = 91\text{k}\Omega$, $C = 0.1\mu\text{f}$, 代入式(12)得到 $T_3 = 0.46\text{s}$ 。若 $R = 91\text{k}\Omega + 47\text{k}\Omega = 138\text{k}\Omega$, 则 $T_3 = 0.70\text{s}$ 。通常多圈电位器调到使 $R = 91\text{k}\Omega$, 即 $T_3 = 0.46\text{s}$ 处。设计时, 取 $K_2 = K_9 = 60$, 由式(20)可得仿真时间 $T_m = 56\text{min}$ 。仿真时间的微调由 R 中的多圈电位器调节, 变化范围为 $56 \sim 84\text{min}$, 若要求更长的仿真时间, 可按表 4 调换 A_2 和 A_9 两级中的 R_{f1} 和 R_{p1} 的阻值。表 4 中仿真时间的下限对应积分电阻 $R = 91\text{k}\Omega$, $T_3 = 0.46\text{s}$ 。 T_m 的上限对应 $R = 138\text{k}\Omega$, $T_3 = 0.70\text{s}$ 的情况。

表 4

仿真时间 $T_m(\text{min})$	56—84	70—105	90—135	120—180	160—240	210—317
$K_2 = K_9$	60	67	76	88	102	116.7
$R_{f1}(\text{K}\Omega)$	41.92	44.36	47.25	50.88	57.77	58.67
$R_{p1}(\text{K}\Omega)$	24.85	25.66	26.59	27.68	60	29.79

A_3 是反比例积分电路, 它的传递函数用 $D_2(s)$ 表示

$$D_2(s) = -\frac{R_{f3}}{Rr_3} \frac{(1 + R_{f3}C_3s)}{R_{f3}C_3s}$$

所以比例增益为 $-\frac{R_{f3}}{Rr_3}$, 时间常数为 $R_{f3}C_3 = 1 \times 10^{-3}\text{s}$, 它比较小, 可以满足式(9)的要求。

图 7 和图 6 相同部分不再赘述。

四、结 论

1. 本文介绍的两种仿真电路都可以作为目前模拟计算机的附件, 利用插入方式接入原模拟电路, 就可以扩大原电路的仿真惯性环节的时间常数。电路工作可靠。

2. 两种电路仿真时间调节对应关系见表 5.

表 5

电路类型	参 数	和外加惯性环节 T_f 的跟踪	仿真时间 T_m 微调	仿真时间 T_m 粗调
图 6 电路		调节 A_4 和 A_5 级的多圈电位器 R_3	调节 A_2 和 A_6 级的 R_{f2}	按表 2 更换电阻 R_{f1} 和 R_{p1}
图 7 电路		调节 A_6 级的多圈电位器 R_{10}	调节 A_3 和 A_6 级的 R	按表 4 更换电阻 R_{f1} 和 R_{p1}

3. 第一种仿真电路的积分电容($10\mu\text{F}$)比第二种仿真电路的积分电容($0.1\mu\text{F}$)大, 因此漏电阻较小, 对积分线性略有影响, 而第二种仿真电路的积分线性良好.

在进行仿真时间粗调时, 必需更换 R_{f1} 和 R_{p1} , 第一种仿真电路的 R_{f1} 和 R_{p1} 稍微改变将引起仿真时间 T_m 较大的变化. 而第二种仿真电路中 R_{f1} 和 R_{p1} 变化引起仿真时间的变化较小, 因此仿真时间的粗调较容易.

参 考 文 献

- [1] 蔡尚峰主编, 自动控制理论, 机械工业出版社, (1981).
- [2] 李清泉、黄昌宁等编, 集成运算放大器的原理与应用, 科学出版社, (1980).
- [3] 周宁华编著, 集成运算放大器及其在电子线路中的应用, 国防工业出版社, (1980).

Practical Simulation of Tremendous Time Constant and Analogous Circuit

Su Anbing

Abstract

In lab condition, simulation and analog are important means for the study of physical or chemical mechanism of production run or equipment, they are also effective tools for the checking of control equipment and for the testing of the effect of control scheme.

Because of the restriction of capacitor leakage resistance and its capacitance, a real-time simulation exceeding one hour is hardly reached.

Based on a long time study, this paper presents two feasible executive circuits and specific circuit parameters.

By adopting this simulation circuits, a large time constant simulation can be realized with small capacitors. Thus it provides a reference for those personnel worked on various lab simulation.