

**CNIC-01725**  
**SWIP-0171**

**HL-2A 反馈控制参数的优化及系统仿真**  
**OPTIMIZATION AND SIMULATION OF THE**  
**FEEDBACK CONTROL SYSTEM OF HL-2A**  
*(In Chinese)*

**中国核情报中心**  
**China Nuclear Information Centre**

CNIC-01725  
SWIP-0171

## HL-2A 反馈控制参数的优化及系统仿真

毛苏英 蒋超 刘莉  
(核工业西南物理研究院, 成都, 610041)

### 摘 要

利用 MATLAB 仿真软件对等离子体电流和水平位移的 HL-2A 反馈控制系统进行了稳定性分析, 设计了 PID 控制器, 进行了离散化处理并得出了仿真结果。

关键词: PID 控制器 仿真 阶跃响应

# **Optimization and Simulation of the Feedback Control System of HL-2A**

*(In Chinese)*

MAO Suying JIANG Chao LIU Li  
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu, 610041)

## **ABSTRACT**

Making use of the MATLAB language to analyze the stability of the plasma current and radial position control system in the HL-2A, the PID controller is designed and the system response is simulated.

**Key words:** PID controller, Simulation, Step response

# 引言

HL-2A 反馈控制系统主要是实现对等离子体电流、位置、形状和密度的实时反馈控制，而这一目标的实现是与 HL-2A 实验进度密切相关的。我们重点讨论第一阶段首先要实现的等离子体电流、水平位移的反馈控制。等离子体电流控制，即电流的大小和波形控制，主要由欧姆电源反馈控制；等离子体位置的控制，主要由垂直场电源和水平场电源快速反馈控制。文献 [1] 给出了这两项控制的数学模型及具体推导，本文利用 MATLAB 仿真软件对上述两项控制系统进行稳定性分析、设计 PID 控制器并得出仿真结果。

## 1 电流反馈控制系统的优化及仿真

### 1.1 电流反馈控制系统的传递函数

用欧姆电源的电压作为控制输入的等离子体电流控制的前向通道传递函数如式 (1) 所示：

$$G_1(s) = -\frac{M_{P\Omega}s}{L_p s + R_p} \frac{K_1}{L_{\Omega}s + R_{\Omega}} \frac{1}{t_s s + 1} \quad (1)$$

由于 HL-2A 装置等离子体与欧姆及垂直场耦合明显，因此应记入垂直场的影响作为干扰，其传递函数为：

$$G_2(s) = -\frac{M_{PV}s}{L_p s + R_p} \frac{K_2}{L_V s + R_V} \frac{1}{t_s s + 1} \quad (2)$$

其中： $R$  表示线圈电阻， $L$  表示线圈的自电感， $M$  表示线圈间的互感。下标  $V$  表示垂直场线圈，下标  $P$  表示等离子体电流，下标  $\Omega$  表示欧姆线圈。 $t_s$  为欧姆电源的延时。 $K_1$  为欧姆电源额定电压与控制最大电压之比， $K_2$  为垂直场电源额定电压与控制最大电压之比。

把具体参数代入式 (1) 和式 (2)，得到如下系统框图：

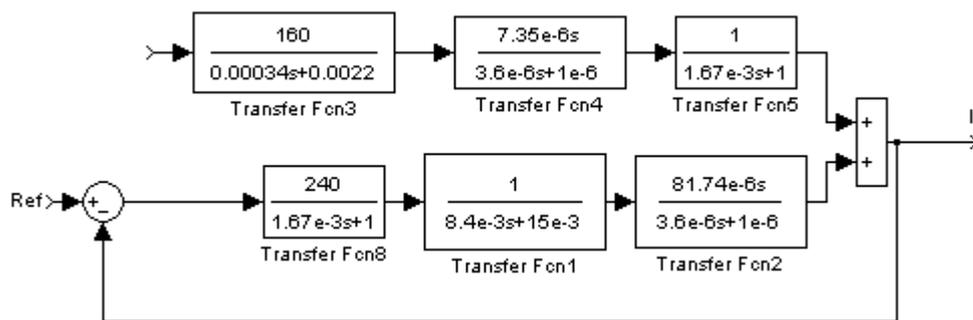


图 1 电流反馈控制系统框图

## 1.2 PID 控制器的设计

通过 MATLAB 分析可知此系统是一不稳定系统，必须设计控制器进行优化。经反复调整控制参数设计出的 PID 控制器如图（2）虚框所示，控制器的传递函数为式（3）所示。

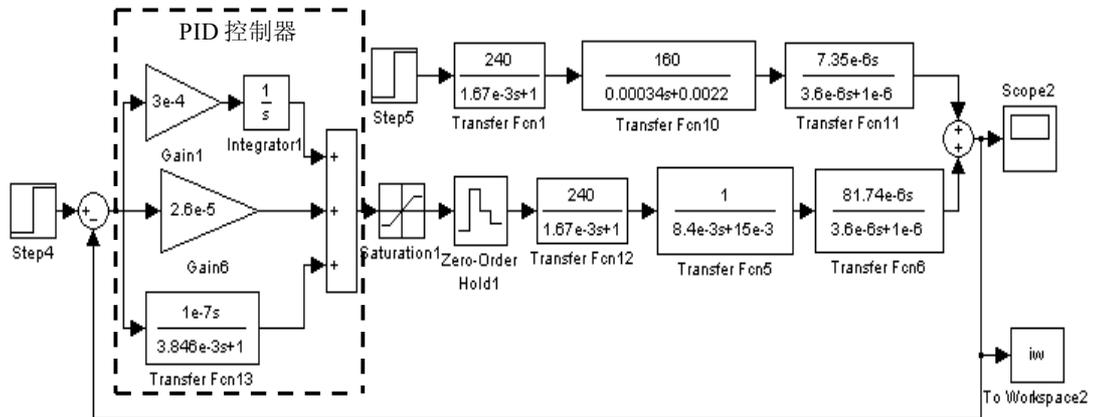


图 2 优化后的电流反馈控制系统框图

$$G_c(s) = 2.6 \times 10^{-5} + \frac{3 \times 10^{-4}}{s} + \frac{10^{-7}s}{1 + 3.846 \times 10^{-3}s} \quad (3)$$

在 PID 输出后接上一限幅器及零阶保持器以模拟实际系统，图（2）为优化后的电流反馈控制系统框图。

因本系统为计算机控制系统，因此应把连续时间系统对时间进行离散化，采样时间  $T$  为 3 ms，离散后的电流反馈控制系统框图如图（3）所示。

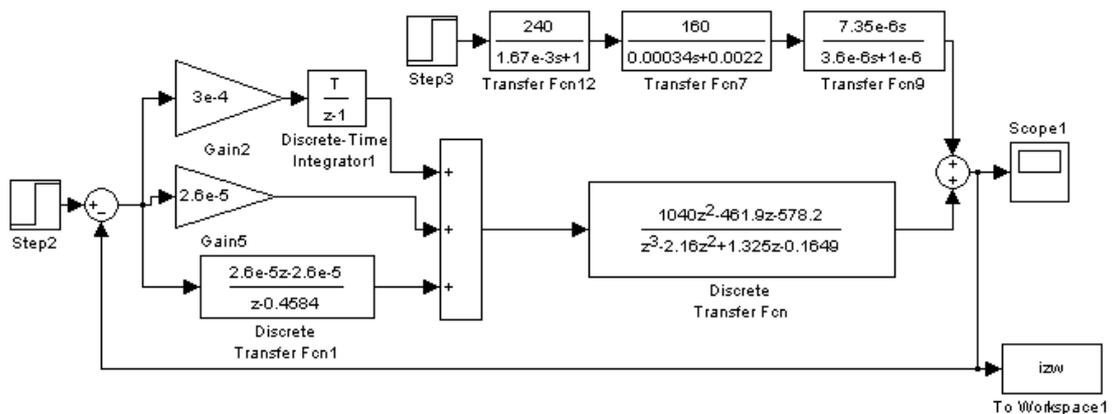


图 3 离散后的电流反馈控制系统框图

### 1.3 电流控制系统仿真结果

图（4）为等离子体电流控制仿真结果，其输入为 450 kA 阶跃响应，在 1 s 时加入一阶跃干扰，表示垂直场电流变化为最大值的 40% 时所引起的干扰。

由此看出，加入 PID 控制器后，系统性能得到了很好的改善，系统很稳定，能够满足控制的要求。对于阶跃函数的响应，主要的问题是响应的时间较长，其原因是欧姆线圈时间常数太大，但同时，欧姆系统的抗干扰能力会很强。由于满足要求的 PID 控制器参数很小，因此离散化后系统的阶跃响应有一定的稳态误差，在今后可以尝试设计其他类型的控制器以消除稳态误差。

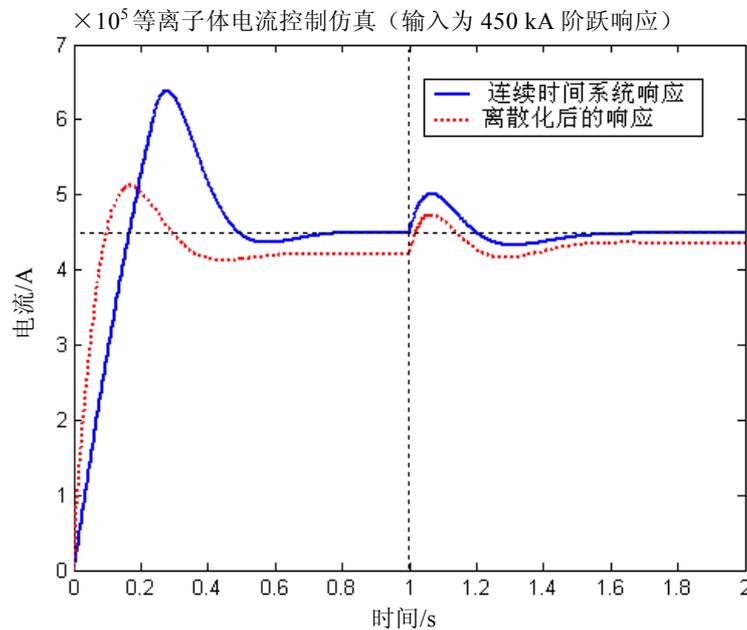


图 4 等离子体电流控制仿真

## 2 水平位移反馈控制系统的优化及仿真

### 2.1 水平位移反馈控制系统的传递函数

水平位移反馈控制系统前向通道传递函数如式（4）所示，在此假设  $I_p=450$  kA：

$$G_V(s) = \frac{K_C K_F K_P K_S (T_{VS} s + 1)}{R_V (T_C s + 1) (T_{VS} s + 1) (K_P T_{VS} s + K_S) (t_s s + 1)} \quad (4)$$

其中  $K_C=U_V/U_K$ ， $K_P=R_0/B_0$ ， $K_S=2\pi b^2/\mu_0 I_p$ ， $\mu_0$  是真空磁导率， $R_0$  是等离子体大半径， $b$  是真空室的半宽， $B_0$  是等离子体在中心时的垂直磁场， $U_V$  是垂直场的电压， $U_K$  是垂直场控制器的输出电压值， $K_F$  是垂直场电流与所产生的垂直磁场强度间的系数， $T_C$  是垂直场的时间常数， $T_{VS}$  是真空室的集肤时间常数， $t_s$  为垂直场电源的时间常数。

其它杂散磁场干扰传递函数如式 (5) 所示:

$$G_2(s) = \frac{K_p K_S}{K_p T_{VS} s + K_S} \quad (5)$$

把具体参数代入式 (4) 和式 (5), 得到如下系统框图:

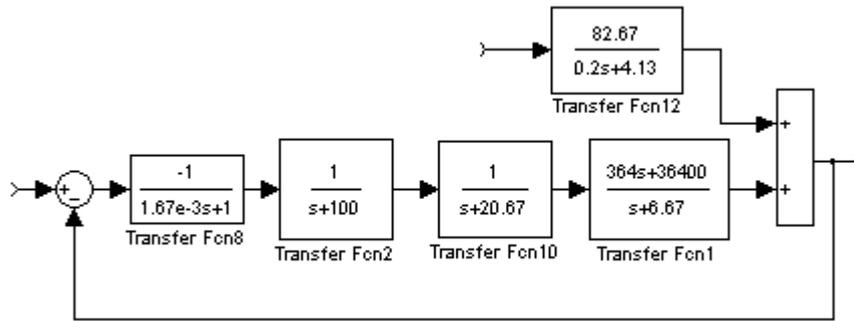


图 5 水平位移反馈控制系统框图

## 2.2 PID 控制器的设计

通过 MATLAB 分析可知此系统虽能达到稳定, 但性能很差, 必须设计控制器进行优化。经反复调整控制参数设计出的 PID 控制器如图 (6) 虚框所示, 控制器的传递函数为式 (6) 所示。

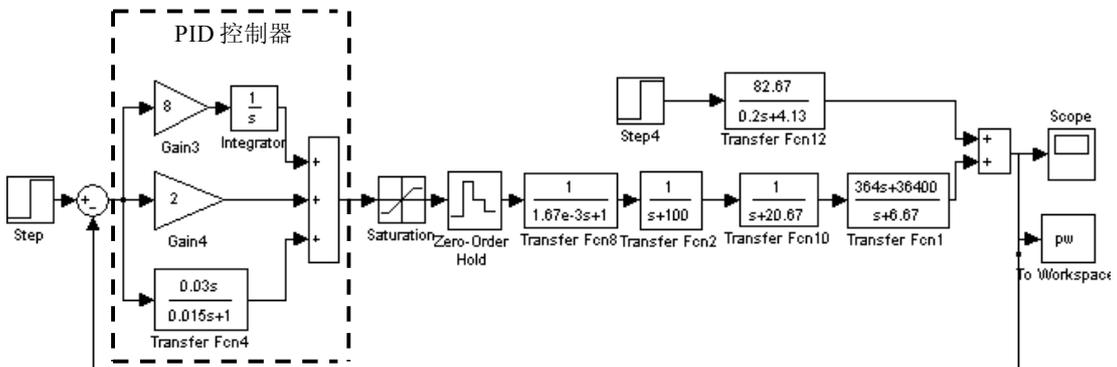


图 6 优化后的水平位移反馈控制系统框图

$$G_c(s) = 2 + \frac{8}{s} + \frac{0.03s}{0.015s + 1} \quad (6)$$

在 PID 输出后接上一限幅器及零阶保持器以模拟实际系统, 图 (6) 为优化后的电流反馈控制系统框图。

同样把连续时间系统对时间进行离散化，采样时间  $T$  为 3 ms，离散后的电流反馈控制系统框图如图（7）所示。

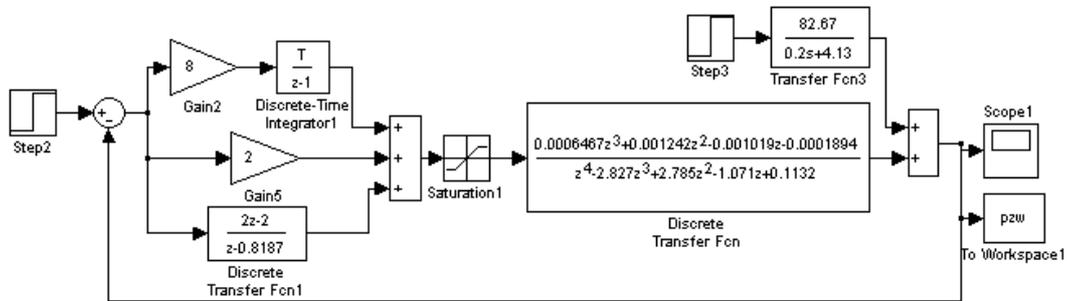


图 7 离散后的水平位移反馈控制系统框图

### 2.3 电流控制系统仿真结果

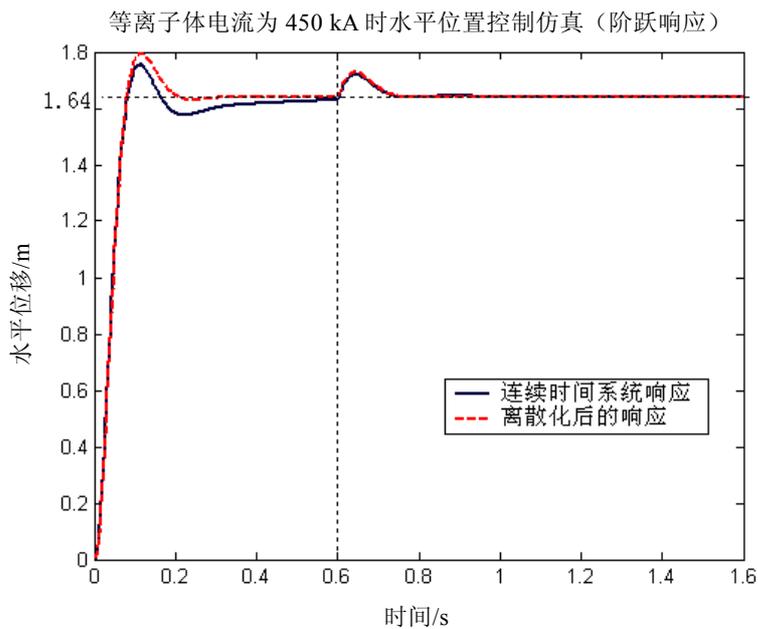


图 8 等离子体水平位移控制仿真

图（8）为等离子体水平位移控制仿真结果，其输入为 1.64 m 阶跃响应，在 0.6 s 时加入一幅度为 0.01 T 的阶跃干扰。

由此看出，加入 PID 控制器后，系统性能得到了很好的改善，系统很稳定，且进行离散化后系统性能更好，能够满足控制的要求。

### 3 结 论

综上所述, 本文所设计的 PID 控制器改善了对等离子体的电流和水平位置的控制, 基本能满足 HL-2A 反馈控制系统第一阶段工作的要求, 同时保留了今后对控制器进一步改进的可能, 例如进行自适应控制器的设计, 使控制器的参数在系统参数发生变化时, 能自动辨识, 然后自动调整控制器的参数, 将使控制效果更好。

#### 参 考 文 献

- 1 蒋超. HL-2A 等离子体电流和水平位置反馈控制数学模型. 中国国防科学技术报告. SWIP/A-200130. 2001  
(JIANG Chao. The models of the plasma current and radial position feedback control in HL-2A. National Defence Science and Technology Report. SWIP/A-200130. 2001)
- 2 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析——MATLAB 语言应用. 北京: 清华大学出版社, 2000. 245  
(XUE Dingyu. Design and analyzing for feedback control system —— Application of MATLAB language. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 245)
- 3 孙虎章. 自动控制原理. 北京: 中央广播电视大学出版社, 1984  
(SUN Huzhang. Automatic control principle. Beijing: Central Radio and TV University Press, 1984)
- 4 孙亮. MATLAB 语言与控制系统仿真. 北京: 北京工业大学出版社, 2001  
(SUN Liang. MATLAB language and simulation for control systems. Beijing: Beijing Industry University Press. 2001)
- 5 陈桂明等. 应用 MATLAB 建模与仿真. 北京: 科学出版社, 2001  
(CHEN Guiming. Applying MATLAB language to modeling and simulation. Beijing: Science Press, 2001)