

B016121

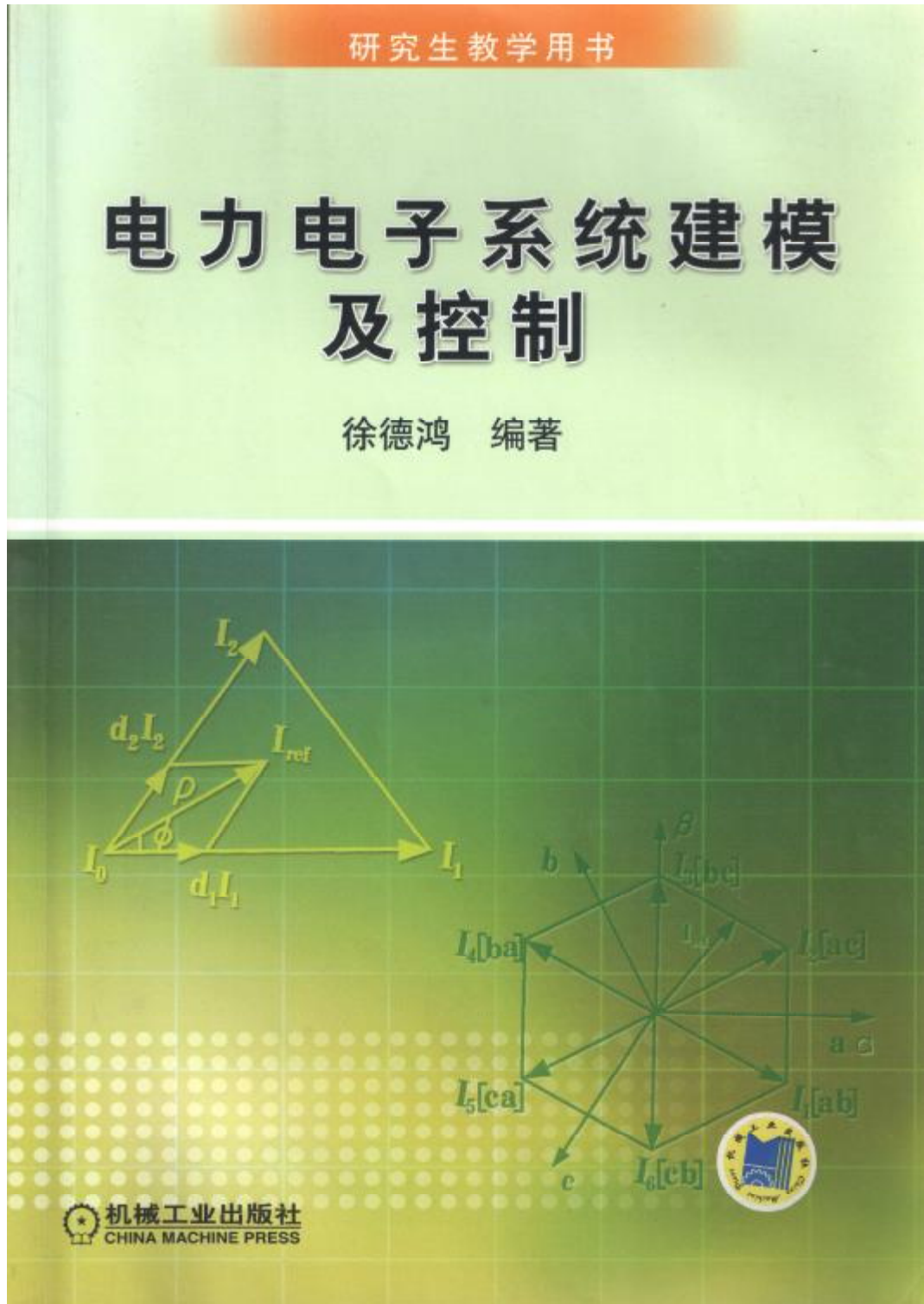
# 《电力电子系统建模、控制与仿真》

参考教材参考例程及注意事项

2015 年 4 月 07 日

## 参考教材

《电力电子系统建模及控制》，徐德鸿编著，机械工业出版社；  
自动控制原理方面的教材，其它相关的专著与论文等。



# 注意事项

考核要求：

- (1) 时间要求：在本学期结束前二星期，将电子文档发到我信箱：[wxy01@seu.edu.cn](mailto:wxy01@seu.edu.cn)，为方便管理，防止进入垃圾邮件，电子文档与邮件标题建议格式为：学号姓名\_课程名称\_论文标题，例“132081 朱海勇\_电力电子系统建模控制与仿真\_XXXXXXX”；同时**纸质文档**放到我在学院办公室的信箱（动力楼二楼）；注意使用学校统一的封面。
- (2) 考核内容：用 Matlab 搭建仿真模型，结合你自己的论文课题或导师研究方向或自己有兴趣的方向，参考后面的例程，给出模型的建立过程与仿真结果。
- (3) 其它建议：建模过程中对自动控制原理相关知识要求比较高，建议与毕业课题紧密相关的同学补习一下自动控制原理方面的基本知识；
- (4) 关于教材内容：电力电子建模有相通性，但具体的变换电路形式多种多样，参考教材的第一章是建模的基本概念，大家一定要学习一下，后面的内容，大家可以针对具体的研究对象有针对性地学习，例如，要研究的是 DC—AC 变换电路，那么可以针对教材的第 7 章“逆变器的建模与控制”进行深入研究。

# 答疑问题

如果大家问题比较多，进行集中答疑。

参考例程

## 直流升压斩波电路模型建立及 **PI** 调节器设计

## 一、状态空间平均法

首先要了解到在 CCM 模式下，变换器的工作模式分为开启状态，关闭状态。

(1) 开启状态，时间为[0, dTs]：

可以写出的状态方程为：

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A_1 \mathbf{x}(t) + B_1 u(t) \quad (1)$$

$$y(t) = C_1 x(t) + E_1 u(t) \quad (2)$$

其中：x(t)为状态向量；u(t)为输入向量；A1 和 B1 分别为状态矩阵与输入矩阵；y(t)为输出变量；C1 和 E1 分别为输出矩阵和传递矩阵。

(2) 关闭状态，时间为[dTs, Ts]：

可以写出的状态方程为：

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A_2 \mathbf{x}(t) + B_2 u(t) \quad (3)$$

$$y(t) = C_2 x(t) + E_2 u(t) \quad (4)$$

其中：x(t)为状态向量；u(t)为输入向量；A2 和 B2 分别为状态矩阵与输入矩阵；y(t)为输出变量；C2 和 E2 分别为输出矩阵和传递矩阵。由于此时为开关关闭状态，所以 A2、B2、C2、E2 的形式与上面(1)与(2)不一样。

为了消除纹波的影响需要在一个周期内对状态变量求平均，所以有

$$\dot{\mathbf{x}}(t)\tilde{n}_{Ts} = \frac{1}{T_s} \int_0^{t+T_s} \dot{\mathbf{x}}(t) dt \quad (5)$$

同样的方法有

$$\dot{\mathbf{u}}(t)\tilde{n}_{Ts} = \frac{1}{T_s} \int_0^{t+T_s} \dot{\mathbf{u}}(t) dt \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{y}}(t)\tilde{n}_{Ts} = \frac{1}{T_s} \int_0^{t+T_s} \dot{\mathbf{y}}(t) dt \quad (7)$$

因此可以对平均状态变量对时间求导数：

$$\dot{\mathbf{x}}(t)\tilde{n}_{Ts} = \frac{1}{T_s} \int_0^{t+T_s} \dot{\mathbf{x}}(t) dt \quad (8)$$

$$\text{同时 } \int_0^{t+T_s} \dot{\mathbf{x}}(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{t+T_s} \left( \frac{dx(t)}{dt} \right) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{t+T_s} dx(t) = \frac{1}{T_s} [x(t+T_s) - x(t)] \quad (9)$$

因此可以得到等式：

$$\dot{\mathbf{x}}(t)\tilde{n}_{Ts} = \frac{1}{T_s} \int_0^{t+T_s} \dot{\mathbf{x}}(t) dt \quad (10)$$

将(1)(3)代入(10)，可以得到：

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t)\tilde{n}_{Ts} &= \frac{1}{T_s} \left( \int_0^{t+dTs} \dot{\mathbf{x}}(t) dt + \int_{t+dTs}^{t+T_s} \dot{\mathbf{x}}(t) dt \right) \\ &= \frac{1}{T_s} \left\{ \int_0^{t+dTs} [A_1 x(t) + B_1 u(t)] dt + \int_{t+dTs}^{t+T_s} [A_2 x(t) + B_2 u(t)] dt \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

状态变量与输入变量在一个周期内的平均值可以代替瞬时值，并且近似认为平均值在一个开关周期内维持恒值。则可以视  $\dot{\mathbf{u}}(t)\tilde{n}_{Ts}$  与  $\dot{\mathbf{x}}(t)\tilde{n}_{Ts}$  在一个开关周期内为常量。

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} &= \frac{1}{T_s} \left\{ \int_0^{t+dTs} [A_1 \mathbf{x}(t) + B_1 u(t)] dt + \int_{t+dTs}^{t+Ts} [A_2 \mathbf{x}(t) + B_2 u(t)] dt \right\} \\ &= \frac{1}{T_s} \left\{ \int_0^{t+dTs} [A_1 \dot{\mathbf{x}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} + B_1 \dot{\mathbf{u}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts}] dt + \int_{t+dTs}^{t+Ts} [A_2 \dot{\mathbf{x}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} + B_2 \dot{\mathbf{u}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts}] dt \right\} \quad (12)\end{aligned}$$

整理可以得到：

$$\dot{\mathbf{x}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} = [d(t)A_1 + d\Phi(t)A_2]\dot{\mathbf{x}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} + [d(t)B_1 + d\Phi(t)B_2]\dot{\mathbf{u}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} \quad (13)$$

这就是 CCM 模式下的平均变量状态方程一般公式，其中  $d(t) + d\Phi(t) = 1$ 。

用同样的方法可以求得

$$\dot{\mathbf{y}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} = [d(t)C_1 + d\Phi(t)C_2]\dot{\mathbf{x}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} + [d(t)E_1 + d\Phi(t)E_2]\dot{\mathbf{u}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} \quad (14)$$

分解平均变量为：

$$\text{状态变量： } \dot{\mathbf{x}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} = \mathbf{X} + \hat{\mathbf{x}}(t)$$

$$\text{输入变量： } \dot{\mathbf{u}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} = \mathbf{U} + \hat{\mathbf{u}}(t)$$

$$\text{输出变量： } \dot{\mathbf{y}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} = \mathbf{Y} + \hat{\mathbf{y}}(t)$$

其中  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{U}$ 、 $\mathbf{Y}$  为直流变量； $\hat{\mathbf{x}}(t)$ 、 $\hat{\mathbf{u}}(t)$ 、 $\hat{\mathbf{y}}(t)$  为分离出来的小信号向量。

再对控制量  $d(t)$  进行分解可以得到

$$d(t) = D + \hat{d}(t), \quad d\Phi(t) = 1 - d(t) = D\Phi - \hat{d}(t)$$

其中  $D + D\Phi = 1$ ， $\hat{d}(t)$  为小信号量。

将  $\dot{\mathbf{x}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} = \mathbf{X} + \hat{\mathbf{x}}(t)$   $\dot{\mathbf{u}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} = \mathbf{U} + \hat{\mathbf{u}}(t)$   $\dot{\mathbf{y}}(t)\tilde{\mathbf{n}}_{Ts} = \mathbf{Y} + \hat{\mathbf{y}}(t)$  代入(13)(14)

然后化简可以得到

$$\begin{aligned}\mathbf{X} + \hat{\mathbf{x}}(t) &= (DA_1 + D\Phi A_2)\mathbf{X} + (DB_1 + D\Phi B_2)\mathbf{U} \\ &\quad + (DA_1 + D\Phi A_2)\hat{\mathbf{x}}(t) + (DB_1 + D\Phi B_2)\hat{\mathbf{u}}(t) \\ &\quad + [(A_1 - A_2)\mathbf{X} + (B_1 - B_2)\mathbf{U}]\hat{d}(t) \\ &\quad + (A_1 - A_2)\hat{\mathbf{x}}(t)\hat{d}(t) + (B_1 - B_2)\hat{\mathbf{u}}(t)\hat{d}(t) \\ \mathbf{Y} + \hat{\mathbf{y}}(t) &= (DC_1 + D\Phi C_2)\mathbf{X} + (DE_1 + D\Phi E_2)\mathbf{U} \\ &\quad + (DC_1 + D\Phi C_2)\hat{\mathbf{x}}(t) + (DE_1 + D\Phi E_2)\hat{\mathbf{u}}(t) \\ &\quad + [(C_1 - C_2)\mathbf{X} + (E_1 - E_2)\mathbf{U}]\hat{d}(t) \\ &\quad + (C_1 - C_2)\hat{\mathbf{x}}(t)\hat{d}(t) + (E_1 - E_2)\hat{\mathbf{u}}(t)\hat{d}(t)\end{aligned}$$

令  $A = DA_1 + D\Phi A_2$   $B = DB_1 + D\Phi B_2$   $C = DC_1 + D\Phi C_2$   $E = DE_1 + D\Phi E_2$ 。化简得到：

$$\begin{aligned}
\dot{X} + \dot{X}(t) &= AX + BU + A\hat{x}(t) + B\hat{u}(t) & Y + \hat{y}(t) &= CX + EU + C\hat{x}(t) + E\hat{u}(t) \\
+ [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U]\hat{d}(t) & & + [(C_1 - C_2)X + (E_1 - E_2)U]\hat{d}(t) \\
+ (A_1 - A_2)\hat{x}(t)\hat{d}(t) + (B_1 - B_2)\hat{u}(t)\hat{d}(t) & & + (C_1 - C_2)\hat{x}(t)\hat{d}(t) + (E_1 - E_2)\hat{u}(t)\hat{d}(t)
\end{aligned}$$

此时可以看出两等式的左右边直流与交流应该是相等的，则有：

$$\dot{X} = AX + BU \quad Y = CX + EU \quad (15)$$

因为  $X$  为直流分量，所以  $\dot{X} = 0$ 。得到系统的稳态方程：

$$\begin{cases} 0 = AX + BU \\ Y = CX + EU \end{cases} \quad (16)$$

可以由上式解得稳态解：

$$\begin{cases} X = -A^{-1}BU \\ Y = (-CA^{-1}B + E)U \end{cases} \quad (17)$$

交流分量可以得到：

$$\begin{aligned}
\dot{X}(t) &= A\hat{x}(t) + B\hat{u}(t) + [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U]\hat{d}(t) \\
&+ (A_1 - A_2)\hat{x}(t)\hat{d}(t) + (B_1 - B_2)\hat{u}(t)\hat{d}(t)
\end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
\hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) + E\hat{u}(t) + [(C_1 - C_2)X + (E_1 - E_2)U]\hat{d}(t) \\
&+ (C_1 - C_2)\hat{x}(t)\hat{d}(t) + (E_1 - E_2)\hat{u}(t)\hat{d}(t)
\end{aligned} \quad (19)$$

因为上面式子中含有信号积，所以上面式子是非线性的。我们要求的是线性的等式。又因小信号的乘积的幅值是远远小于等式中其他项的，因此可以去掉小信号乘积，此时就可以得到线性的小信号等式。

$$\dot{X}(t) = A\hat{x}(t) + B\hat{u}(t) + [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U]\hat{d}(t) \quad (20)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) + E\hat{u}(t) + [(C_1 - C_2)X + (E_1 - E_2)U]\hat{d}(t) \quad (21)$$

其中  $A = DA_1 + D\Phi_2$ ， $B = DB_1 + D\Phi_2$ ， $C = DC_1 + D\Phi_2$ ， $E = DE_1 + D\Phi_2$

## 二、升压斩波电路部分模型的建立

对于升压斩波电路而言，其主电路可分为输入滤波部分和升压斩波部分。为便于分析，只考虑升压斩波部分，其后的负载可以等效为一个负载电阻，升压斩波部分可以简化为图 1 所示电路。

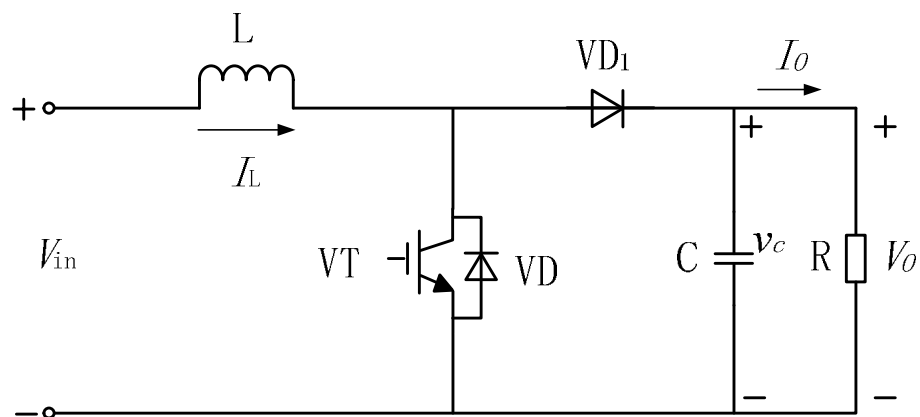
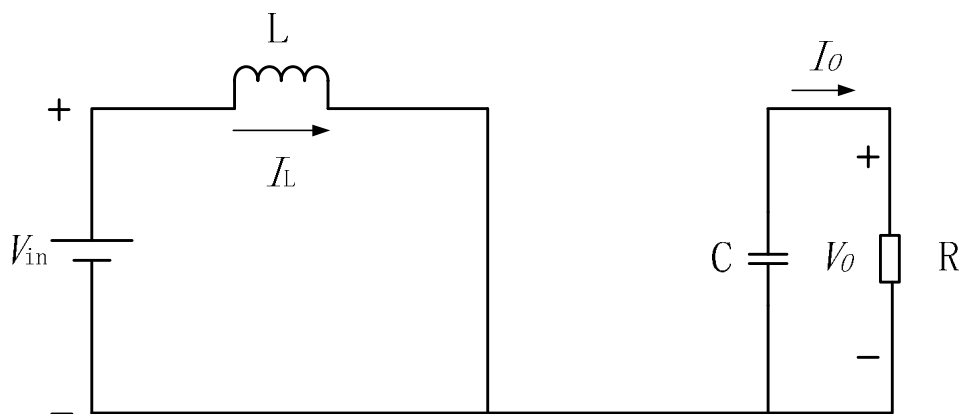
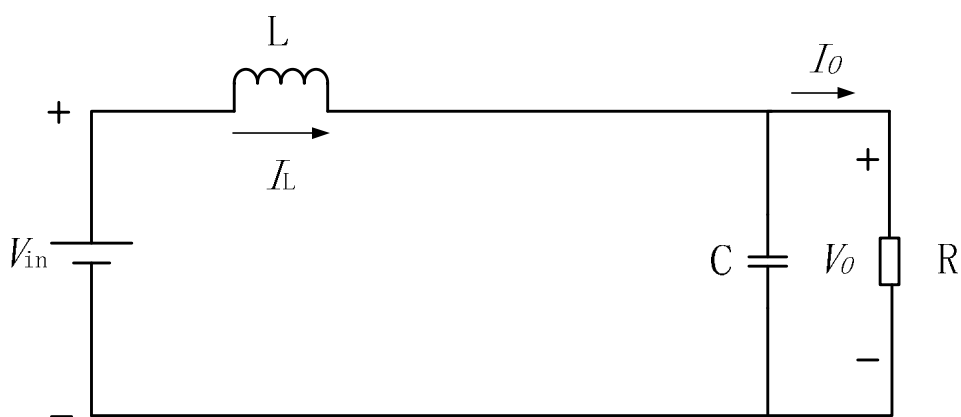


图 1 简化的升压斩波电路

此电路主要的工作状态有两种，即开关管导通模式和开关管关断模式，分别对应图 2a 和 b 电路中的开关管 and 二极管工作在导通和截止两个状态，是一个强非线性系统。对于 boost 电路，可以取电感电流  $i_L(t)$  和电容电压  $v_c(t)$  作为状态变量，输入电压  $v_{in}(t)$  为输入变量，输出电压  $v_o(t)$  为输出变量。



(a)



(b)

图 2 升压斩波电路两种工作状态的等效电路

(a)开关管开通时的等效电路 (b)开关管关断时的等效电路

当开关管导通时，运用基尔霍夫定律列方程得



$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = v_{in}(t) \\ C \frac{du_C(t)}{dt} = -\frac{u_C(t)}{R} \\ v_o(t) = u_C(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = \frac{v_{in}(t)}{L} \\ \frac{du_C(t)}{dt} = -\frac{u_C(t)}{RC} \\ v_o(t) = u_C(t) \end{cases} \quad (22)$$

根据上面式子可以得到：

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}_{i_L}(t) = \hat{e}_0 - \frac{1}{RC} \hat{e}_{u_C}(t) + \frac{1}{L} \hat{e}_{v_{in}}(t) \\ \dot{\hat{e}}_{v_o}(t) = \hat{e}_0 \\ v_o(t) = u_C(t) \end{cases} \quad (23)$$

当开关管关断时，运用基尔霍夫定律列方程得

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = v_{in}(t) - u_C(t) \\ C \frac{du_C(t)}{dt} = -\frac{u_C(t)}{R} + i_L(t) \\ v_o(t) = u_C(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = \frac{v_{in}(t)}{L} - \frac{u_C(t)}{L} \\ \frac{du_C(t)}{dt} = -\frac{u_C(t)}{RC} + \frac{i_L(t)}{C} \\ v_o(t) = u_C(t) \end{cases} \quad (24)$$

根据上面式子可以得到：

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}_{i_L}(t) = \hat{e}_0 - \frac{1}{L} \hat{e}_{u_C}(t) + \frac{1}{L} \hat{e}_{v_{in}}(t) \\ \dot{\hat{e}}_{v_o}(t) = \hat{e}_1 - \frac{1}{RC} \hat{e}_{u_C}(t) \\ v_o(t) = u_C(t) \end{cases} \quad (25)$$

对式子（23）和式（25）两式根据占空比做平均，得到基本状态平均方程

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}_{i_L}(t) = \hat{e}_0 - \frac{1-d}{L} \hat{e}_{u_C}(t) + \frac{1}{L} \hat{e}_{v_{in}}(t) \\ \dot{\hat{e}}_{v_o}(t) = \hat{e}_1 - \frac{d}{RC} \hat{e}_{u_C}(t) \\ v_o(t) = u_C(t) \end{cases} \quad (26)$$

对于基本状态平均方程组施加扰动，令瞬时值：

$$\begin{cases} v_{in} = V_{in} + \hat{V}_{in} \\ d = D + \hat{d} \\ i_L = I_L + \hat{i}_L \\ u_C = U_C + \hat{u}_C \\ v_o = V_o + \hat{v}_o \end{cases} \quad (27)$$

式中  $\hat{V}_{in}, \hat{d}, \hat{i}_L, \hat{v}_C, \hat{v}_o$  ——对应  $V_{in}, D, I_L, V_C, V_o$  的扰动量

将式（27）代入（26），且假定动态分量远小于静态量，即：

$\frac{\hat{V}_{in}}{V_{in}} \ll 1, \frac{\hat{d}}{D} \ll 1, \frac{\hat{x}}{X} \ll 1$ 。再将稳态分量和扰动分量分离为二组方程，则可得到：

稳态方程：

$$\begin{cases} AX + BV_{in} = 0 \\ V_o = CX \end{cases} \quad (28)$$

扰动方程:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + B\hat{V}_{in} + E\hat{d} \\ \hat{v}_o = C\hat{x} \end{cases} \quad (29)$$

式中  $X = \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_c \end{bmatrix}$ ,  $\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_c \end{bmatrix}$ ,  $A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{D\Phi}{L} \\ \frac{D\Phi}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$ ,  $C = [0 \quad 1]$ ,  $E = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$ 。

式 (29) 即为升压斩波电路的动态低频小信号状态平均方程。

先由 (28) 式可以解得升压斩波电路的稳态解:

$$\begin{cases} V_o = \frac{V_{in}}{D\Phi} \\ I_L = \frac{V_o}{D\Phi R} \end{cases} \quad (30)$$

再由式 (29) 状态方程求得 Boost 变换器从输入到输出的传递函数为:

$$\left. \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_{in}(s)} \right|_{\hat{d}(s)=0} = \frac{D\Phi}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + D\Phi^2} \quad (31)$$

和由控制到输出的传递函数:

$$G(s) = \left. \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_{in}(s)=0} = \frac{D\Phi_o - sLI_L}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + D\Phi^2} = \frac{D\Phi_o(1 - \frac{Ls}{RD\Phi^2})}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + D\Phi^2} \quad (32)$$

### 三、升压斩波电路 PI 调节器的设计

现在以一具体电路进行设计, 电路参数如下: 电感  $L = 8\text{mH}$ ; 电容  $C = 1650\mu\text{F}$ ; 电阻  $R = 80\Omega$ ;  $V_{in} = 220\text{V}$ ;  $V_o = 400\text{V}$ 。

由式 30 可以求得  $D = 0.45$ 。升压斩波电路不加 PI 调节器之前的系统开环传递函数为:

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{D\Phi_o(1 - \frac{Ls}{RD\Phi^2})}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + D\Phi^2} \\ &= \frac{220 - 0.07273s}{1.32 \times 10^{-5}s^2 + 10^{-4}s + 0.55^2} \end{aligned} \quad (33)$$

利用 MATLAB 画出系统修正前的频率特性曲线, 如图 3 所示。

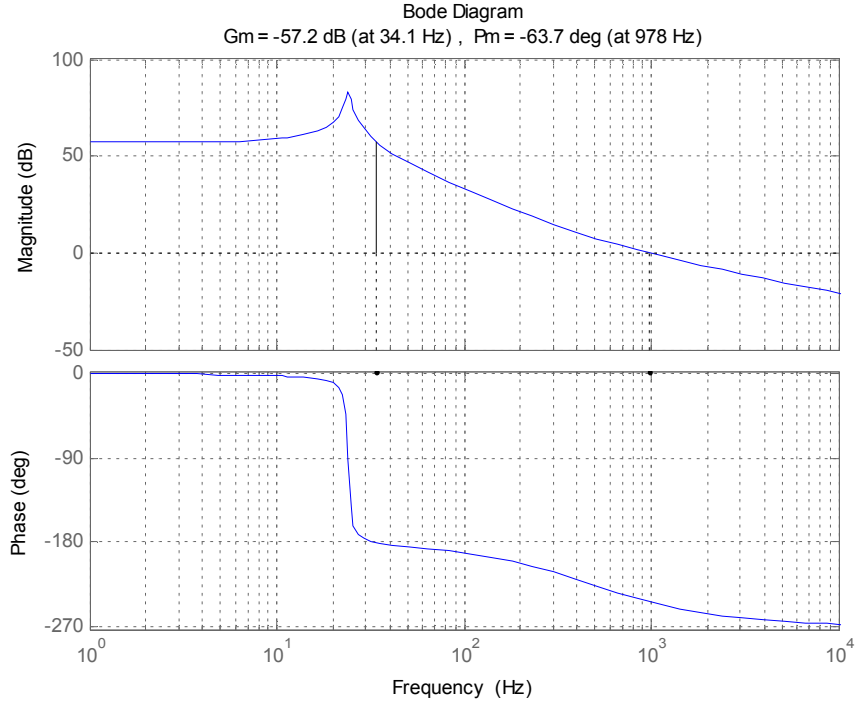


图3 系统修正前的频率特性曲线

可以得到系统的幅值裕度  $Gm=-57.2\text{dB}$ ，相角裕度  $Pm=-63.7\text{deg}$ ，幅值裕度和相角裕度皆小于零，可知系统不稳定，需要进行校正，这里采用 PI 调节器进行校正，也可使用 PID 调节器进行校正，可参考其它相关文献。

校正后系统的闭环结构框图如图 4 所示：

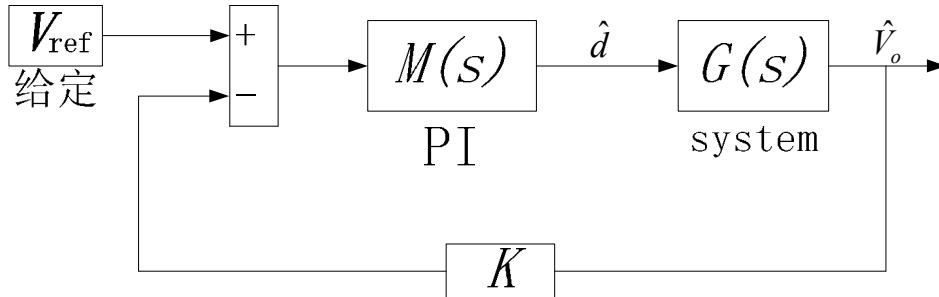


图4 由 PI 调节器组成的系统闭环结构框图

图中  $G(s)$  由式 33 得到， $M(s) = K_p + \frac{K_I}{s}$ ， $V_{ref}$  为给定控制变量的变化， $K$  为反馈放大系数， $\hat{V}_o$  为对应输出的变化。可以得出系统的闭环传递函数为：

$$\frac{\hat{V}_o}{V_{ref}} = \frac{M(s)G(s)}{1 + KM(s)G(s)} \quad (34)$$

取  $K=1$ ，即采用单位负反馈。此时系统的闭环传递函数为：

$$\frac{\hat{V}_o}{V_{ref}} = \frac{(K_p + \frac{K_I}{s}) \cdot \frac{220 - 0.07273s}{1.32 \cdot 10^{-5}s^2 + 10^{-4}s + 0.55^2}}{1 + (K_p + \frac{K_I}{s}) \cdot \frac{220 - 0.07273s}{1.32 \cdot 10^{-5}s^2 + 10^{-4}s + 0.55^2}}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{(K_p + \frac{K_I}{s})' (220 - 0.07273s)}{1.32 \times 10^{-5} s^2 + 10^{-4} s + 0.55^2 + (K_p + \frac{K_I}{s})' (220 - 0.07273s)} \\
&= \frac{(sK_p + K_I)' (220 - 0.07273s)}{1.32 \times 10^{-5} s^3 + (10^{-4} - 0.07273K_p)s^2 + (0.55^2 + 220K_p - 0.07273K_I)s + 220K_I}
\end{aligned}$$

从而可以得到系统的闭环特征方程为：

$$D(s) = 1.32 \times 10^{-5} s^3 + (10^{-4} - 0.07273K_p)s^2 + (0.55^2 + 220K_p - 0.07273K_I)s + 220K_I = 0$$

列出相应的劳斯表：

$$\begin{array}{c|cc}
s^3 & 1.32 \times 10^{-5} & 0.55^2 + 220K_p - 0.07273K_I \\
s^2 & 10^{-4} - 0.07273K_p & 220K_I \\
s^1 & 0.55^2 + 220K_p - 0.07273K_I - \frac{1.32 \times 10^{-5} \times 220K_I}{10^{-4} - 0.07273K_p} & 0 \\
s^0 & 220K_I & 
\end{array}$$

根据劳斯判据，令劳斯表中第一列各元为正，可得：

$$\begin{aligned}
&\downarrow 10^{-4} - 0.07273K_p > 0 \\
&\downarrow 0.55^2 + 220K_p - 0.07273K_I - \frac{1.32 \times 10^{-5} \times 220K_I}{10^{-4} - 0.07273K_p} > 0 \\
&\downarrow 220K_I > 0
\end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned}
&\downarrow 0 < K_p < 0.001375 \\
&\downarrow 0 < K_I < \frac{3.025 - 1600060K_p^2}{291.1273 + 528.96529K_p} \leq 0.01039
\end{aligned}$$

此时系统的开环传递函数为：

$$F(s) = M(s)G(s) = (K_p + \frac{K_I}{s}) \left( \frac{220 - 0.07273s}{1.32 \times 10^{-5} s^2 + 10^{-4} s + 0.55^2} \right) \quad (36)$$

试取  $K_p = 0.0001$ ； $K_I = 0.003$ 。带入上式中，并用 MATLAB 画出此时系统的频率特性曲线，如图 5 所示。可以得到系统的幅值裕度  $G_m=10.3\text{dB}$ ，相角裕度  $P_m=30\text{deg}$ ，幅值裕度大于  $10\text{dB}$ 、相角裕度接近  $45\text{deg}$ 。

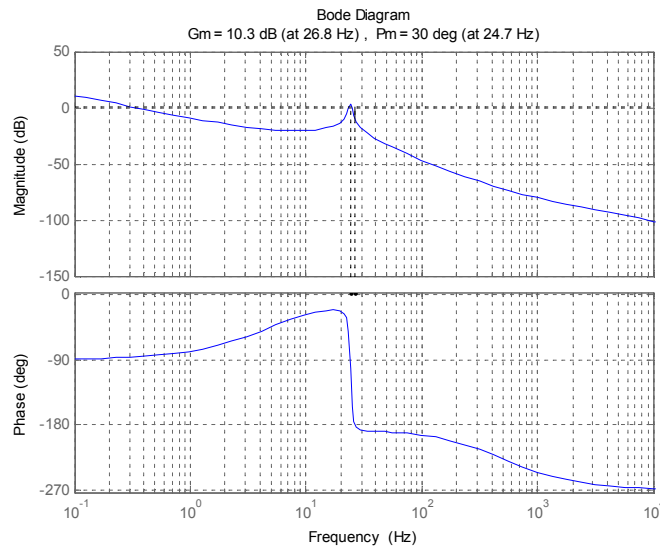


图 5 系统校正后的频率特性曲线

利用 Simulink 搭建系统的传递函数模型，如图 6 所示，并进行仿真。

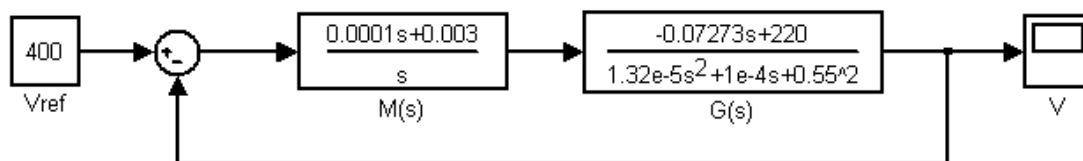


图 6 校正后系统的传递函数模型

仿真得到输出电压的波形如图 7 所示。

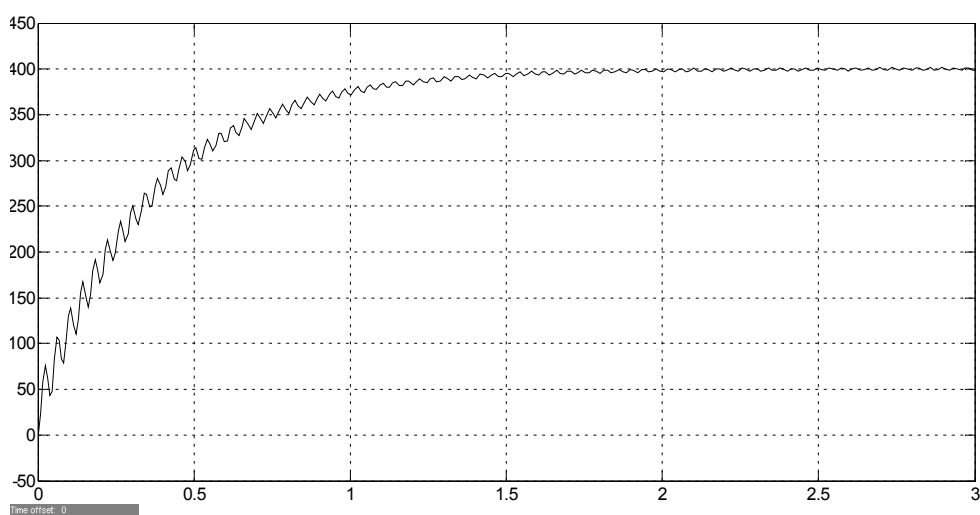


图 7 升压斩波电路传递函数模型仿真波形

在 simulink 中搭建实际电路的仿真模型，如图 8 所示，并进行仿真。

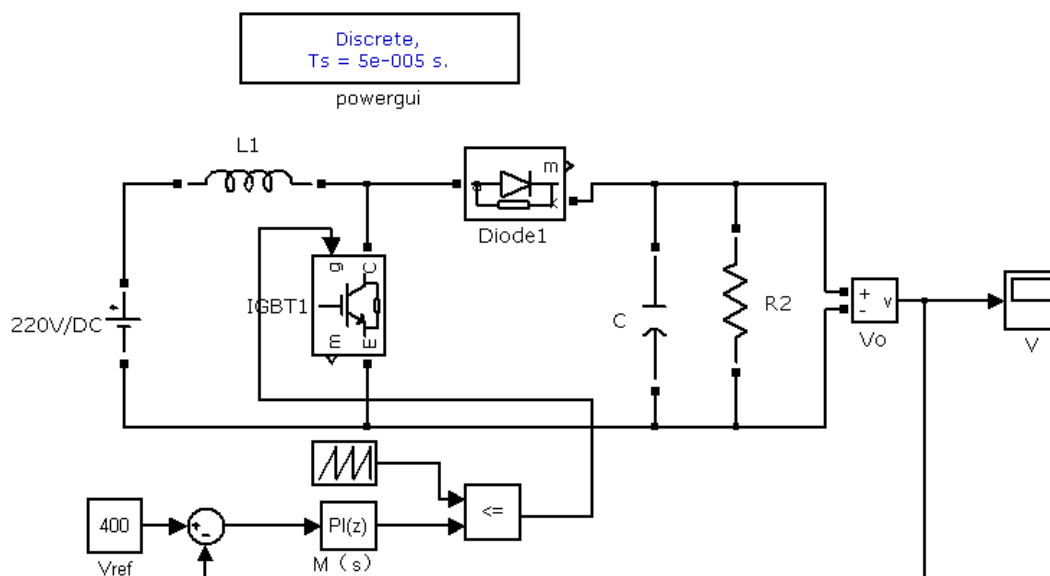


图 8 升压斩波电路实际元件模型

由升压斩波电路实际元件模型仿真得到输出电压的波形如图 9 所示。

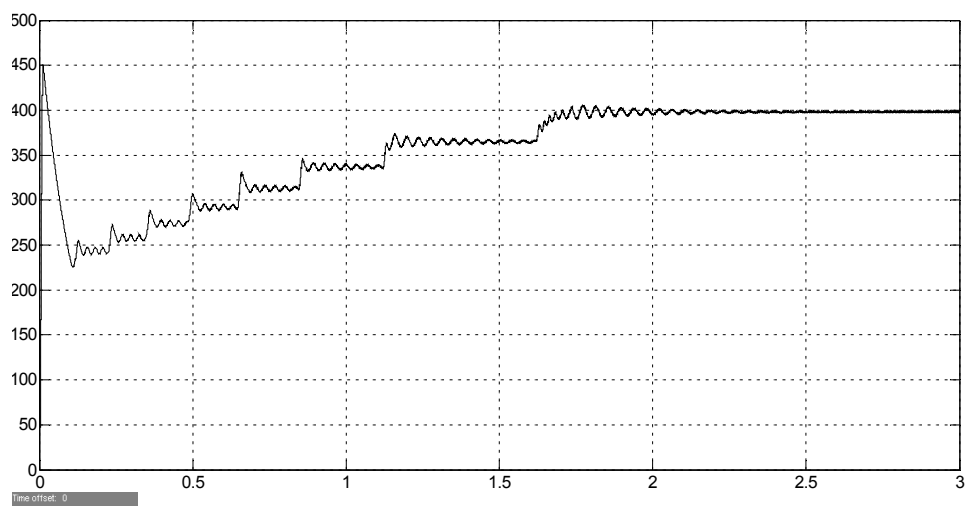


图 9 由实际元件模型仿真得到的输出电压波形

## 参考文献

【1】