

基于Buck电路的DC/DC变化



1-数学建模

1.1 先验设计

1.1.1-设计要求

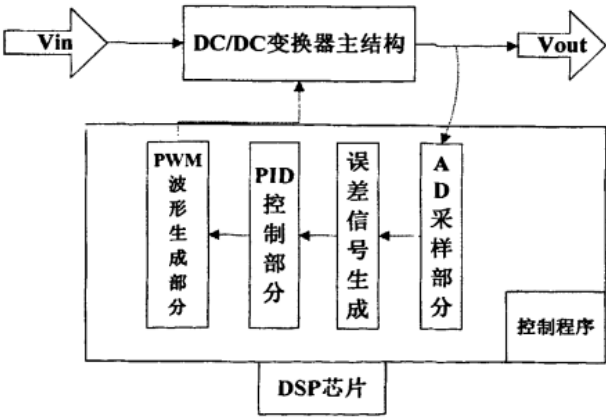
设计要求：设计一个Buck变换电路，技术指标：输入电压 $V_s = 12\text{V}$,输出电压等于 $V_o = 5\text{V}$,开关频率 $F_s = 25\text{KHZ}$,电容电压波动 20mv ,电感电流波动 0.8A 。

1.1.3-控制方式

控制电路选型方案：

比较因素	模拟电源	数字电源
电气性能	达到一定的高度，再提升非常难	在原有基础上进一步提升
实时性	由模拟器件构成，信号是实时的	数字结构，由离散信号构成
调整方式	修改硬件电路设计，或调整元器件参数	调整算法软件，更改控制芯片来控制精度
体积	元器件多且大，体积随设计复杂度提升而加速提升	体积小，集成度高
可靠性和抗干扰性	受环境温度、湿度、噪声、电磁场等的干扰和影响大	受这些因素的影响小
可扩展性与通信能力	基本无可扩展性	可增减的外设，可增加芯片间通讯能力

课题选型：



1-数学建模

1.1 先验设计

1.1.1-设计要求

设计要求：设计一个Buck变换电路，技术指标：输入电压 $V_s = 12V$,输出电压等于 $V_o = 5V$,开关频率 $F_s = 25KHZ$,电容电压波动 $20mV$,电感电流波动 $0.8A$ 。

1.1.2-控制对象

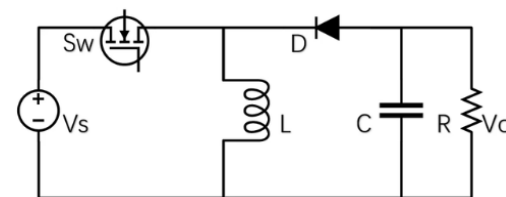
选择合适拓扑的因素：

- (1). 电路要求传输的最大功率；
- (2). 输入输出是否需要变压器隔离；
- (3). 加在变压器初级或电感上的电压值是多大；
- (4). 加在开关管上的最大电压有多高；
- (5). 流过开关管的峰值电流有多大。

拓扑结构选型方案：

拓扑	反激	正激	推挽	半桥	全桥
功率	小于 150W	小于 150W	小于 1000W	小于 1000W	500W 以上
开关管数量	1 个	1 个	2 个	2 个	4 个
控制复杂度	简单	简单	比较简单	比较简单	复杂
成本	低	低	较高	较高	高
变压器利用率	低	低	较低	较高	高

课题选型：Buck降压电路

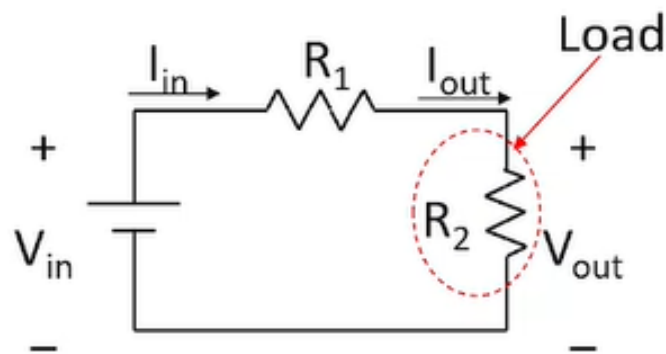


1-数学建模

1.2开环电路分析

1.2.1-电路元件分析

串联负载降压电路分析



电路效率= $V_{out}/V_{in}=5/12=0.41$ （极差）

- **电源 V_s** ：输入电压，电压变化则**失去线路的调整率**
- **负载 R** ：实际场景为电机（转矩），电网等。当 R 处于变化，**失去负载的调整**。

解决方案：

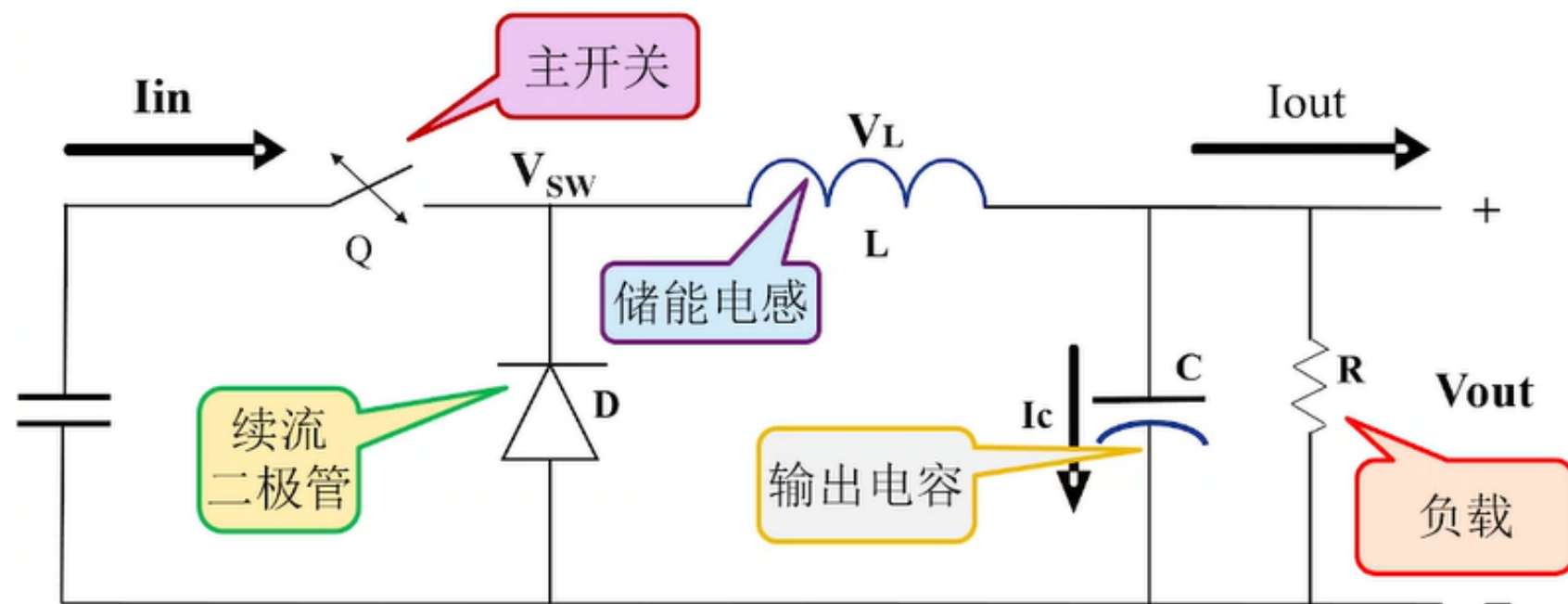
- **开关 Sw** ：串联的电阻 R_1 导致**热损耗**，效率低。通过开关的高频驱动，从电源到负载的单次输送能量拆分够小。
- **电容 C** ：电压惰性，让 V_s 端对电容进行补偿，进而保证负载 R 端的电源不变。单电容导通时导致**尖峰电流**（短路）损坏开关器件。

1-数学建模

1.2开环电路分析

1.2.2-电路框图设计

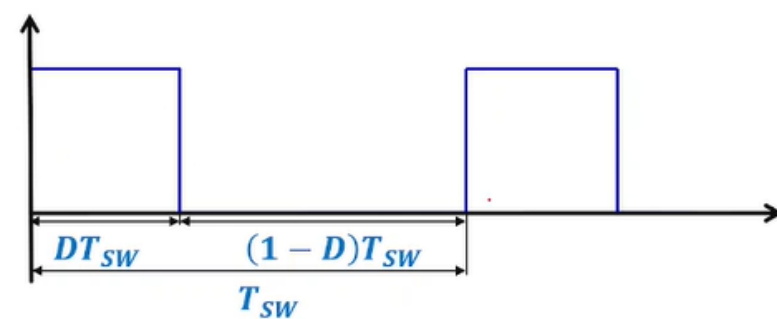
Buck降压电路电路分析：



- **电感 L** ：电流惰性，防止尖端电流产生。关断时，电容释放电压导致电感电流瞬间找不到释放通道引起巨大电压尖峰，损坏开关器件。
- **续流二极管 D** ：导通时正常流过，关断时电感电流继续流动。

控制对象：控制开关频率进而保证负载电压稳定

- T_{sw} : 开关周期
- $f_{sw} = 1/T_{sw}$ ：开关频率
- DT_{sw} : 导通时间
- D : 占空比



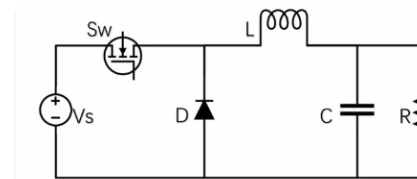
1-数学建模

1.2开环电路分析

1.2.3-控制对象的元件参数数学推导

参数计算的假设前提条件

- 1、开关管和二极管均为理想型器件；
- 2、电感L较大，使得在一个周期内电流连续，且无内阻；
- 3、直流输出电压 U_o 恒定；
- 4、整个电路无功耗；
- 5、电路已达到稳态；



假设输入电压 $V_s=12V$
输出电压 $V_o=5V$
开关频率 $F_s=25KHz$
电容电压波动 $20mV$
电感电流波动 $0.8A$

① 占空比

$$D=V_o/V_s=0.4167$$

② 电感

$$L \geq V_o(V_s - V_o) / (\Delta I_L \cdot F_s \cdot V_s) = 145.83 \mu H$$

③ 电容

$$C \geq \Delta I_L / (8 \cdot F_s \cdot \Delta V_o) = 200 \mu F$$

导通时的占空比D的计算

- 1、开关管导通时，由基尔霍夫电压定律得：
$$U_L = U_i - U_o$$
- 2、开关管断开时，由基尔霍夫电压定律得：
$$U_L = -U_o$$
- 3、针对电感L应用“伏秒值相等”得：
$$(U_i - U_o) \cdot D \cdot T_s - U_o(1 - D)T_s = 0$$
- 4、求的D为：
$$D = U_o / U_i$$

电感L的计算

- 1、开关管导通时，由基尔霍夫电压定律得：
$$U_L = U_i - U_o$$
- 2、由法拉第定律：
$$U_L / L = \Delta I_L / D \cdot T_s$$
- 3、电感L为：
$$L = U_L \cdot D \cdot T_s / \Delta I_L$$

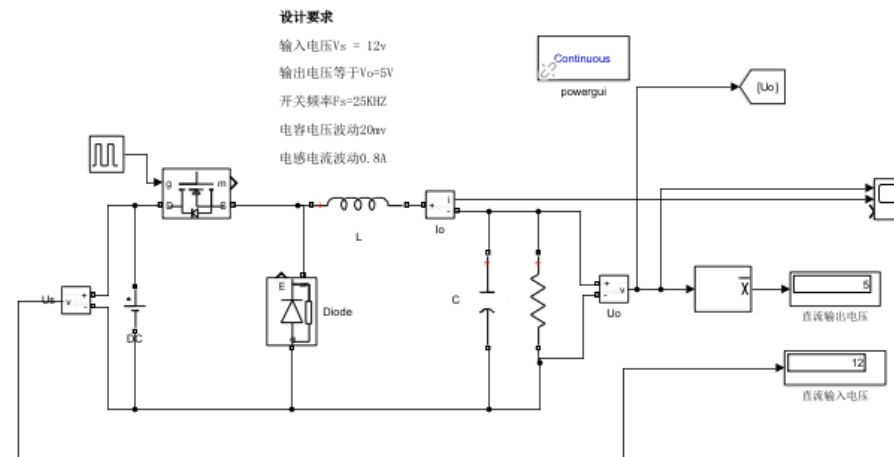
电容C的计算

- 1、电容C充电的电荷为：
$$\Delta Q = \Delta I_L \cdot T_s / 8$$
- 2、电容定义式：
$$C = \Delta Q / \Delta U_c$$
- 3、将1中的式子带入2中：
$$C = (\Delta I_L \cdot T_s) / (8 \Delta U_c)$$

详细推导公式：[手撕Buck! Buck公式推导过程 - 知乎 \(zhihu.com\)](https://zhuanlan.zhihu.com/p/100000000)

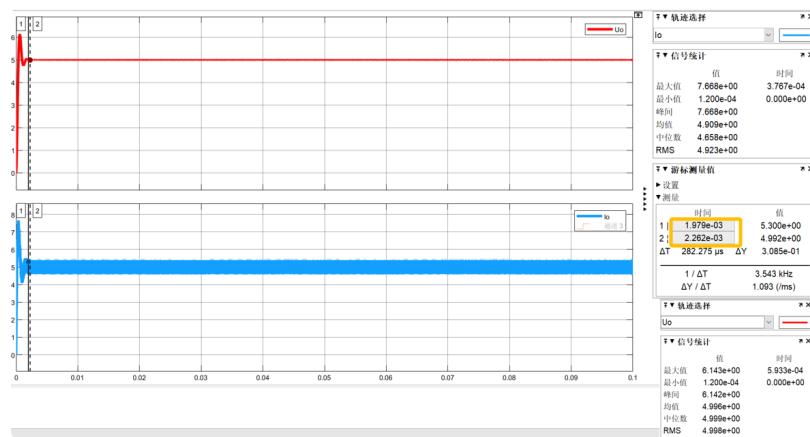
2-模型验证

01-Matlab仿真建模

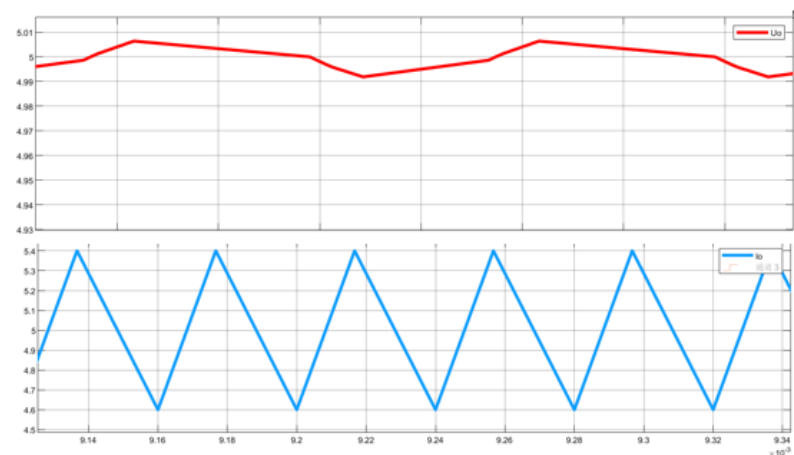


02-Matlab波形分析

电流电压响应时间



电流电压波动分析



1-数学建模

1.3-闭环电路分析

1.3.1-PID算法和调参方式

问题：以电机转速为例子，可以通过根据电机转速需要设置PWM输出对应固定的值，为什么还需要PI控制器？

应用场景：

1. 电机随着使用时间的增加，电机的性能其实会发生变化，输出相同的PWM值，速度会和最开始测得的值是不一样的
2. 小车（电机控制小车的速度），如果我改变小车的负重，根据生活中的常识，相同的输出电压下，负载越重，小车的速度越慢

PID算法的本质：保证电机转速在性能变化的过程中也保持（负载电压／电机转速／负载电流）

- 比例P（现在）：值越高快速达到目标速度值，但会影响系统震荡
- 积分I（过去）：只要偏差存在，对误差累加，反映在调节力度（误差微积分的面积）
- 微分D（未来）：通过正反作用力，抑制震荡（误差微积分的速率）
- 提示：出现静差时，对于D是不需控制，对于P理解是增加速度。

[最通俗易懂的PID讲解（控制原理详解及作用分析）-CSDN博客](#)

1-数学建模

1.3-闭环电路分析

1.3.1-PID算法和调参方式

PID调整参数方式：

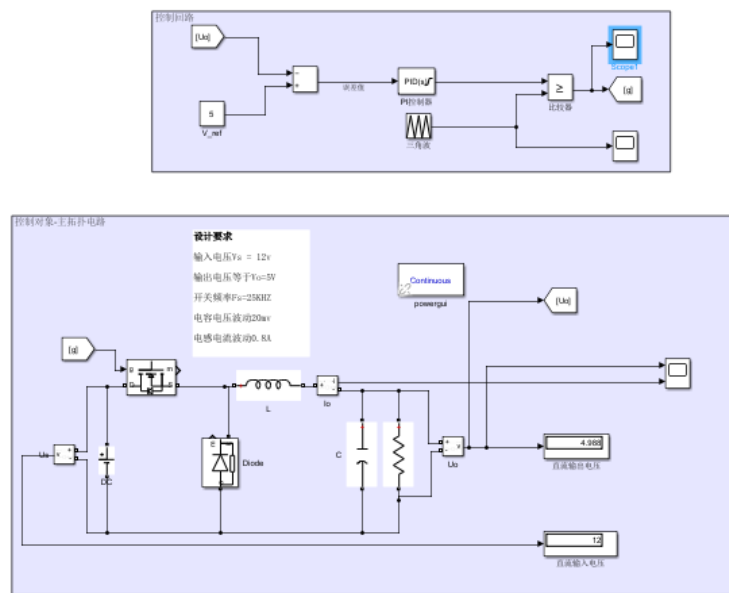
1. 数学推导：通过计算求得，但是实际系统难以达到设计要求
2. 反复调参：对实际系统进行试凑方法观察响应曲线，难以达到最优化值
3. 工具调参：Matlab工具帮助整定参数

反复试凑调整步骤：

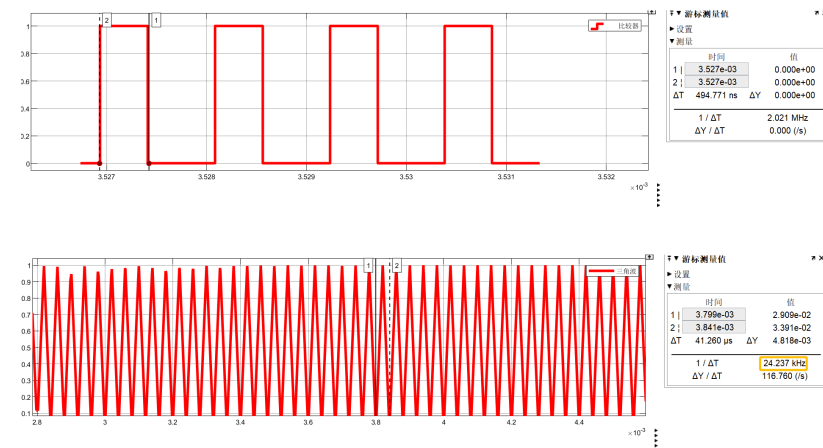
1. 比例环节：比例系数由小变大，并观察相应的系统响应，直至得到 反应快、超调小的响应曲线。
2. 积分环节：系统的静差不能满足设计要求，则须加入积分环节。整定时首先置积分参数 K_i 为一较大值，并将经第一步整定得到的比例系数略为缩小(如缩小为原值的0.8倍)，然后减小积分参数。
3. 微分环节：动态过程经反复调整仍不能满意，则加入微分环节，其调节过程也如前采取由大及小的方法进行。

2-模型验证

01-Matlab仿真建模



调制波形

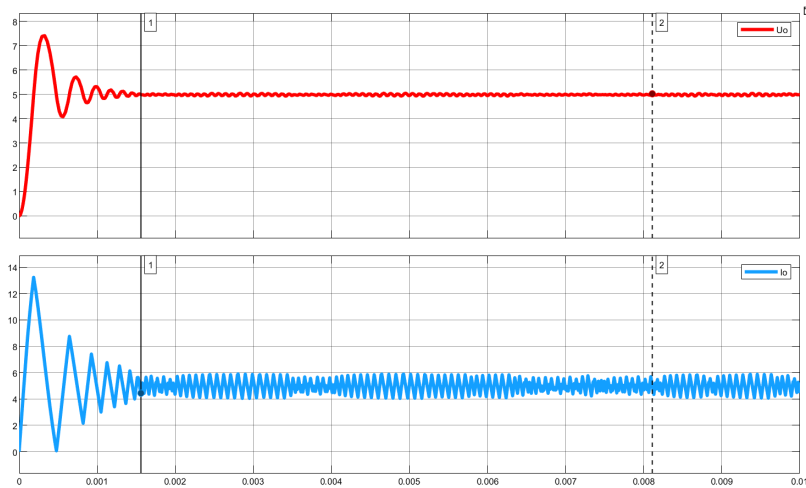


2-模型验证

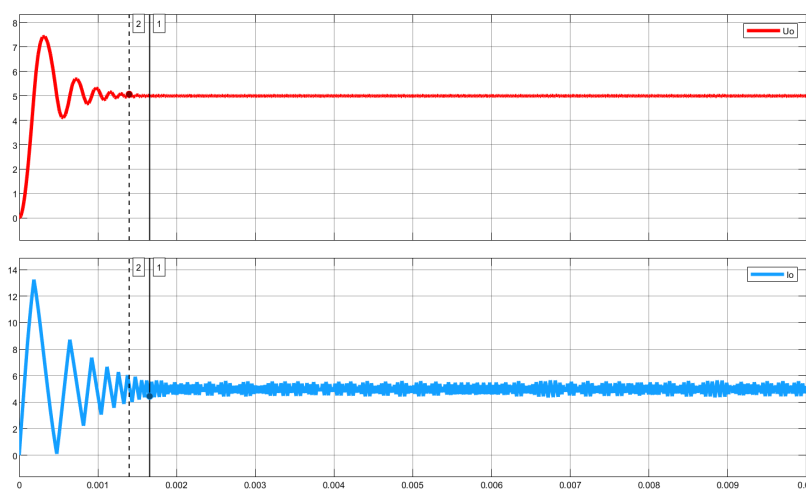
02-Matlab波形分析

PID控制器调参—P值

$K_p = 5$ $K_i = 0$ $K_d = 0$

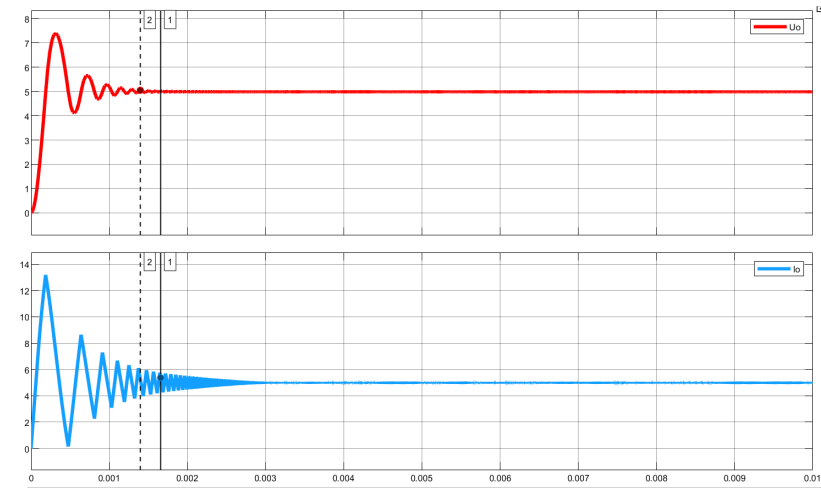


$K_p = 100$ $K_i = 0$ $K_d = 0$



PID控制器调参—D值

$K_p = 100$ $K_i = 0$ $K_d = 100$



2-模型验证

知识分享：频域分析-Matlab去测Buck电路带宽

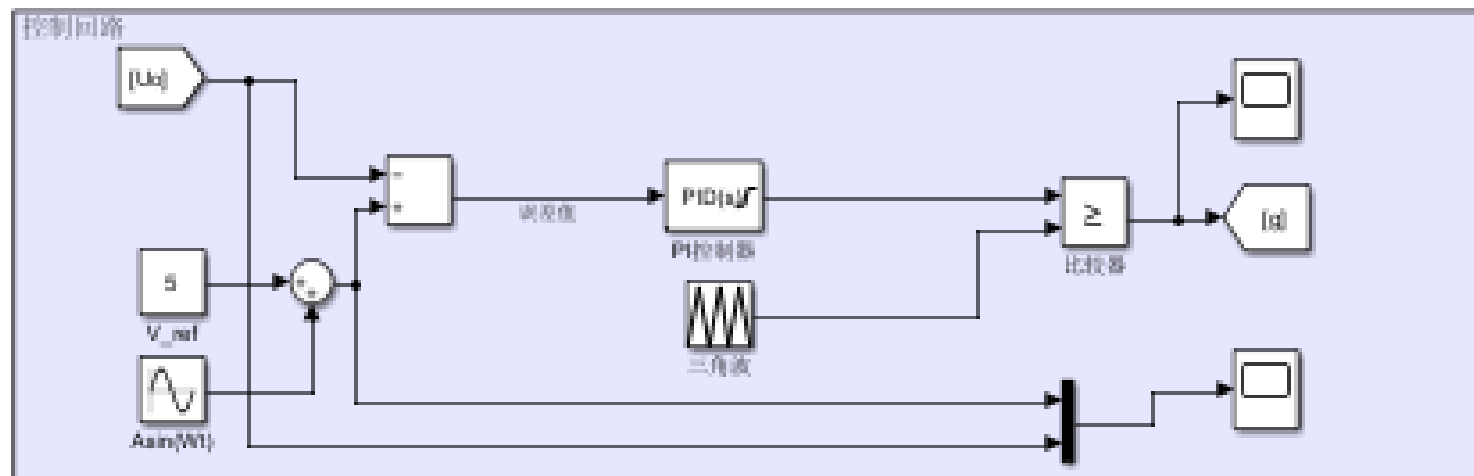
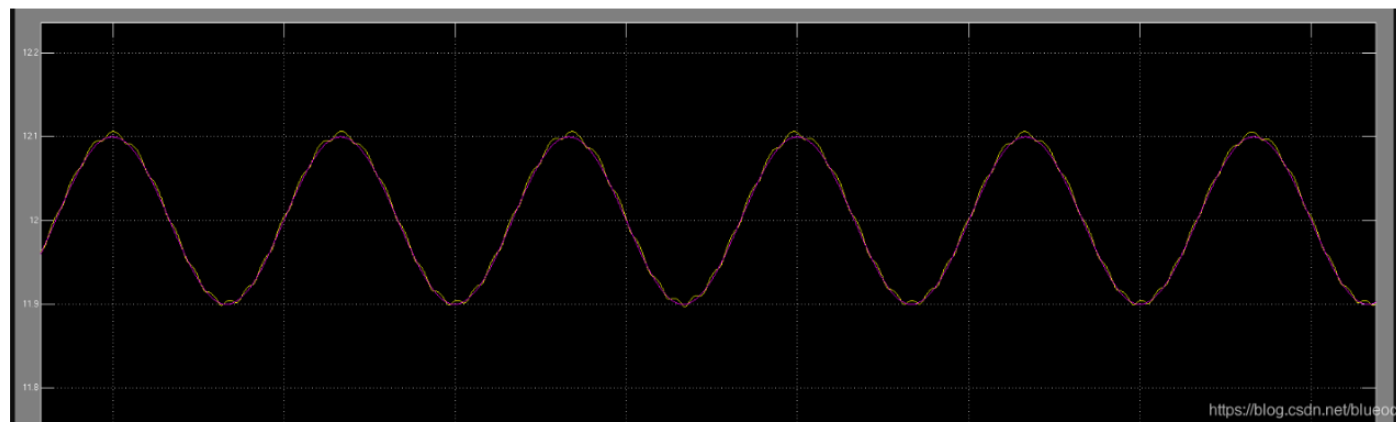


图3 红色为指令，黄色为输出电压

1500hz的时候，如下图4所示，已经开始力不从心了，黄色的输出波形有点跟不上指令了谐波开始变得比较明显



2-模型验证

知识分享：数理推导与Matlab模型验证

将两式相减即可求出最终适合于编程实现的离散化 PID 算法,其方程如下所示:

$$u(k) = u(k-1) + K_p(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_D}{T})e(k) - K_p(1 + \frac{2T_D}{T})e(k-1) + K_p \frac{T_D}{T}e(k-2)$$

$$\text{设 } K_i = \frac{K_p T}{T_i}, K_D = \frac{K_p T_D}{T}$$

这样可以得到其符合 MATLAB 编程规则的表达式:

```
u(1)=u0;  
u(2)=(Kp+Ki+Kd)*error(2)-(Kp+2*Kd)*error(1)+u0  
if i>=3;  
u(k)=u(k-1)+(Kp+Ki+Kd)*error(k)-(Kp+2Kd)*error(k-1)+Kd*error(k-2)
```

根据状态空间平均法的理论,完整系统的状态相量由下式表示:

$$\begin{aligned} A &= DA_1 + D'A_2 \\ B &= DB_1 + D'B_2 \\ C &= DC_1 + D'C_2 \\ E &= DE_1 + D'E_2 \end{aligned}$$

式中, D 为系统的占空比,即变换器开关导通时间与开关周期时间的比值,并且 $D' = 1 - D$ 。

以上的状态方程在 MATLAB 中的实现语句为:

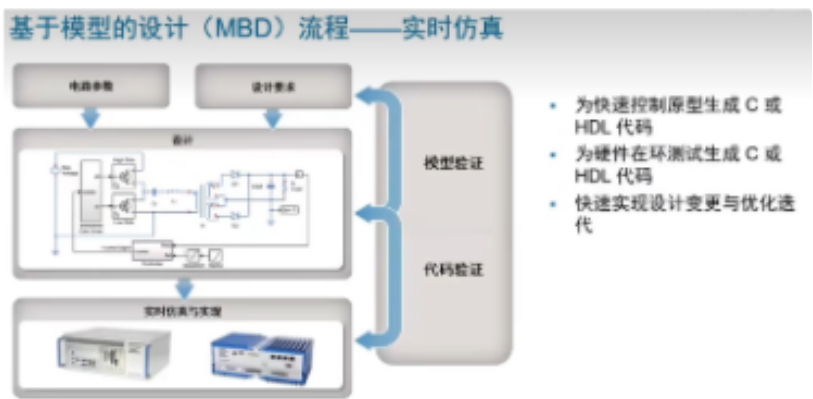
```
(1)A=D(k)*A1+(1-D(k))*A2; B=D(k)*B1+(1-D(k))*B2;  
(2)C=D(k)*C1+(1-D(k))*C2; E=D(k)*E1+(1-D(k))*E2;  
(3)Gm=ss(A,B,C,E);  
(4)Gtf=tf(Gm);  
(5)G=Gtf(2);
```

3-优化方案

3.1模型验证： 针对仿真模型的优化策略

- 最优化：考虑系统损耗
- 离散化：数字化实现系统，并考虑死区时间等实际误差
- 自动化：Matlab实现算法计算参数

3.2物理验证： 搭载处理芯片的代码验证



论文参考：

本章对基于 TMS320F2812 芯片的开关电源数字控制程序进行了详细的设计。首先根据设计需求，对 DSP2812 芯片的时钟，复位，启动方式，进行了相关的配置；接着，对数控程序所用到的 ADC 模块、事件管理器 EVA 模块的相关寄存器进行了详细的配置，给出了 ADC 处理程序、PWM 生成、PID 数控算法的流程图和代码，完成了控制程序的开发工作。此外，对于用于系统中，作为模拟与数字部分的接口电路也进行了设计。

参考资料汇总

参考论文

[1]刘晓宇. 面向半桥式开关电源的数字控制器设计[D]. 江苏:东南大学,2009

[2]刘晓宇,徐申,孙伟锋. 基于MATLAB的数字式DC/DC开关电源系统建模[J]. 通信电源技术,2009

参考资料

平台	Aa 论文标题	研究问题	研究对象	研究方法
视频	Buck变换器课程列表	Buck变换器课程	Buck	Matlab教程
视频	BUCK变换器建模 (详细教程)	Buck变换器	Buck	Matlab教程
知乎	DC/DC变换器小信号建模与控制器设计	Buck控制器小信号建模	Buck	Matlab教程 数据推导
知乎	电力电子系统小信号建模：扰动法与泰勒展开法	Buck控制器小信号建模原理	Buck	数据推导
视频	降压式 (Buck) 变换器的原理与设计	Buck控制器	Buck	数据推导
视频	0基础直接带你上手matlab simulink仿真	Simulink-入门+Function+PID	电气原理	Matlab教程
知乎	手撕Buck! Buck公式推导过程	Buck闭环公式推导	Buck	数据推导

标准流程：系统分析方法

