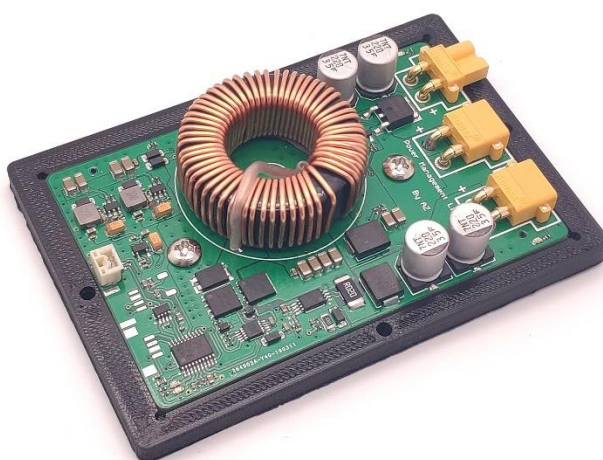


法拉电容恒功率电源管理系统使用说明

附开源资料



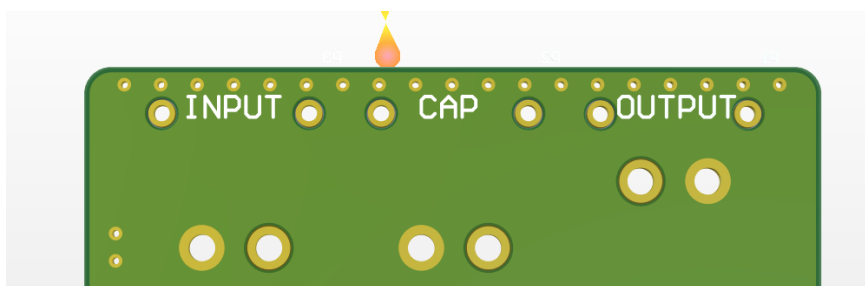
购买链接



1. 简要使用说明

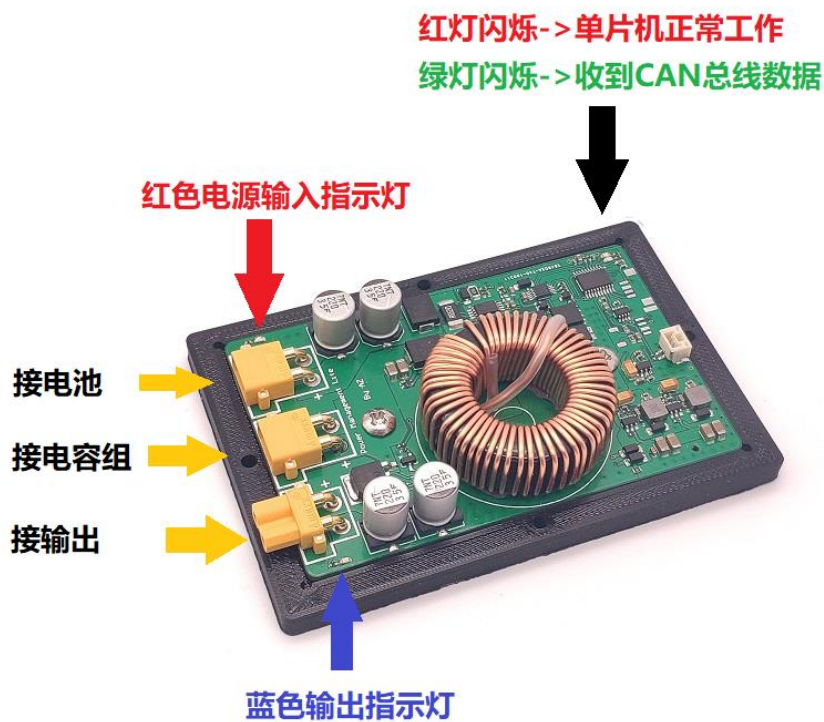
1.1 接线

本法拉电容恒功率电源管理系统有三个插头，1、INPUT：此处接入裁判系统底盘输出。
2、CAP：此处接入法拉电容。3、OUTPUT：此处接入负载，一般是底盘的四个电机的电源。
INPUT 输入电压一般不超过 28V，电容组耐压推荐 30V。请勿将电源反接!!

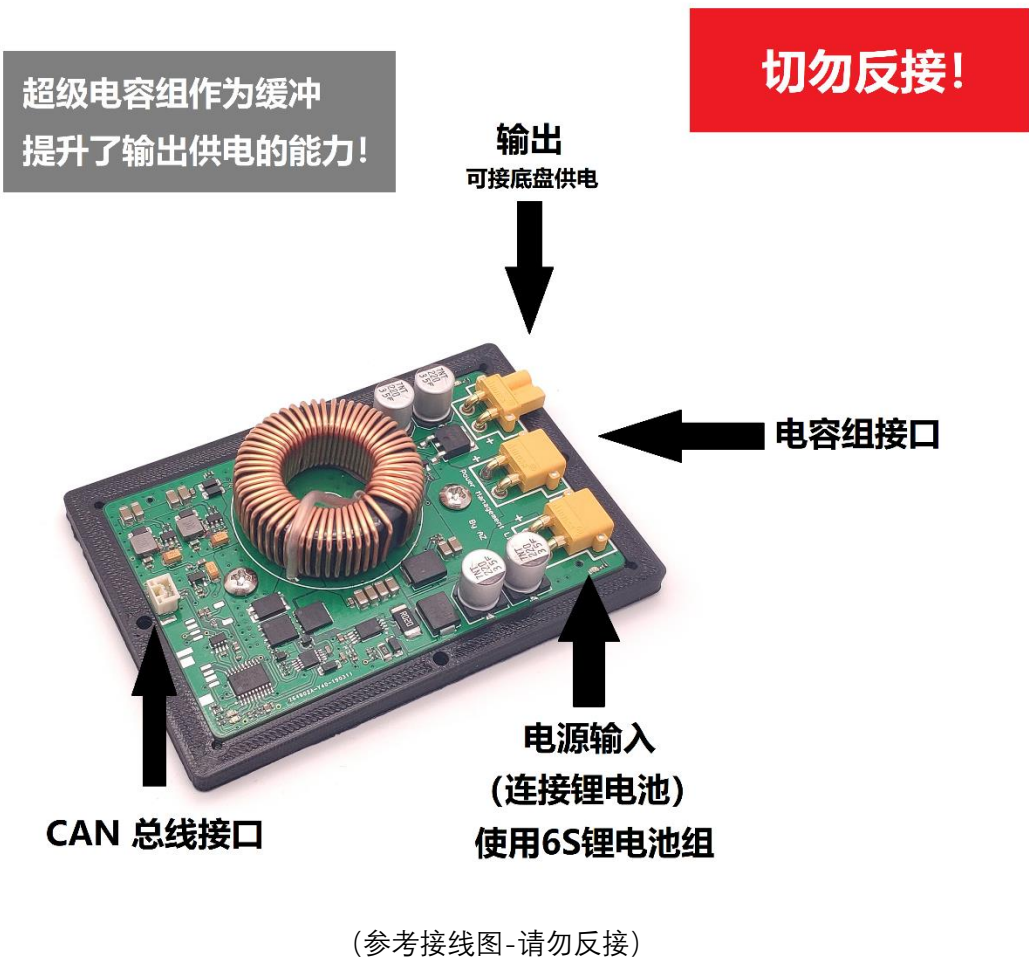


(此图视角为电路板背面)

指示灯说明



(参考接线图与指示灯说明)



1.2 通信说明

本系统可以通过 CAN 总线反馈电容电压、输入电流、输入电压、设定的功率四个数据，用于监控供电状态。也可以通过 CAN Bus 设定功率，从 45W—100W 可调，默认功率为 70W。

(1) CAN 反馈报文格式：

地址：	0x211
数据长度：	8
字节 1：	输入电压数据低八位
字节 2：	输入电压数据高八位
字节 3：	电容电压数据低八位
字节 4：	电容电压数据高八位
字节 5：	输入电流数据低八位
字节 6：	输入电流数据高八位
字节 7：	目标功率数据低八位
字节 8：	目标功率数据高八位

数据接收后，按照高低八位拼接成 16 位有符号数，除 100 就可以得到电压、电流、功率数据。

此处反馈的数据与 3508 等电机反馈数据格式不同，此处采用低位在前的方式发送数据是为了减少 Cortex-M0 单片机的运算量而不得已采取的方式。由于 Cortex-M0 采用小端结构，所以默认保存数据低位在前。法拉电容恒功率电源管理系统发送反馈数据的代码如下：

```
uint16_t data[4];
data[0] = (uint16_t) (InputVot * 100.f);
data[1] = (uint16_t) (CapVot * 100.f);
data[2] = (uint16_t) (Test_Current * 100.f);
data[3] = (uint16_t) (Target_Power * 100.f);
CAN_Send_Msg(&hcan, (uint8_t *) data, 0x211, 8);
```

在你的主控板上，推荐如下数据处理代码：

```
case 0x211:
{
    extern float PowerData[4];
    uint16_t * pPowerdata = (uint16_t *) can_rx_data; //CAN收到的8个字节的数组
    PowerData[0] = (float)pPowerdata[0] / 100.f; //输入电压
    PowerData[1] = (float)pPowerdata[1] / 100.f; //电容电压
    PowerData[2] = (float)pPowerdata[2] / 100.f; //输入电流
    PowerData[3] = (float)pPowerdata[3] / 100.f; //设定功率
}break;
}
```

(2) CAN 设定功率格式：

地址：	0x210
数据长度：	最少两个字节
字节 1：	功率设定数据高八位
字节 2：	功率设定数据低八位

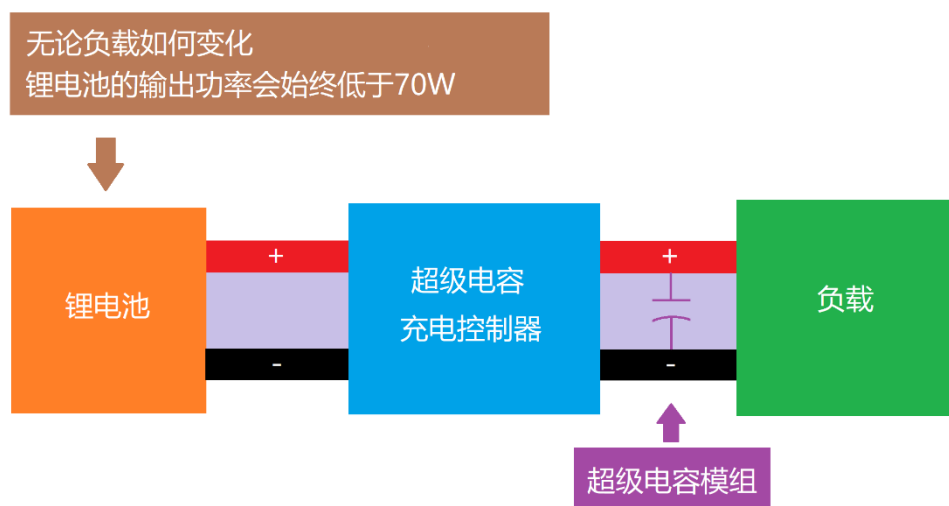
功率设定步进为 0.01W，发送值从 4500——10000 对应 45W 到 100W，比如，设定 80W 功率的代码如下：

```
uint16_t temPower = 8000;
uint8_t sendbuf[8];
sendbuf[0] = temPower >> 8;
sendbuf[1] = temPower;
CAN_Send_Msg(&hcan1, sendbuf, 0x210, 8);
```

注意，不推荐以太高的频率发送功率数据，推荐 10Hz。

2. 原理说明

2.1 组成说明



本控制板采用同步 Buck 结构，采集输入功率，实现输入功率控制，经过滑模控制、前馈控制等控制算法实现恒功率控制。当输入有电时候，自动打开输出；输入断开，自动关闭输出。当外部电容或输入其中一个有电时候，法拉电容恒功率电源管理系统得控制器都会工作，可以与主控板通信。

如上图的连接，当底盘电机（负载）超过设定功率时，输入也不会超过你设定的功率，不足部分由法拉电容补偿。由于法拉电容容量有限，补偿的时间也有限，所以超功率也不宜太久。按照标配的 8F（100F，12 串）的电容，完全满足使用要求。

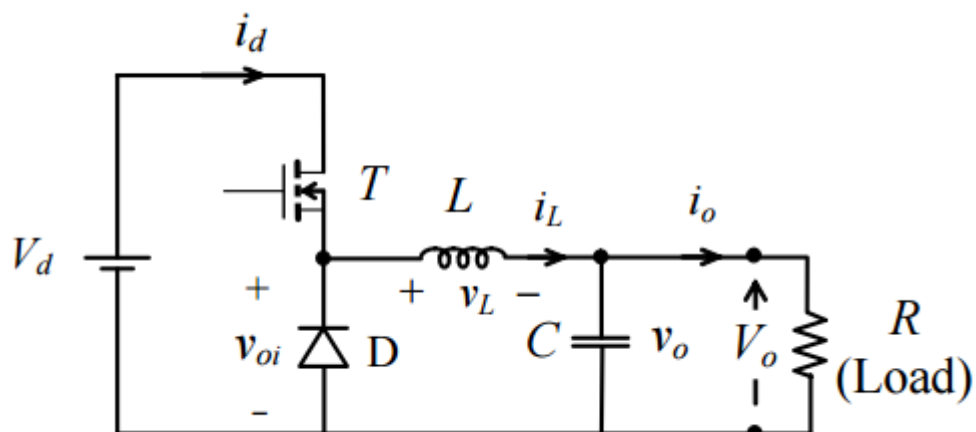
2.1 RM 使用注意事项

在主控板正常工作时候，电容相当于直接接在负载两端，也就是说，**电机两端的电压在超过设定功率时候是不恒定的**。这种设计**对于电机负载来说，比采用升压设计更有效**。电机作为电流驱动型设备，大家使用的 3508 等电机的电调具备优秀的电流环设计，能抑制输入电压的缓慢变化带来的影响。而且电机在刹车等操作的时候，回馈的电流会直接冲回法拉电容组。而如果采用升压方案，首先系统整体的效率会下降，常规同步升压的效率理想情况下也仅仅 90%，损耗非常大，而且电机刹车会造成升压输出端的泵升电压，如果处理不当，轻则击穿 MOS，重则烧毁电调。

此设计有以下注意事项，当需要持续超功率时候，应关注电容电压不要低于 12V，这可能会造成 620 电调的低压保护，在测试中，使用 8F 电容组，测试的步兵车重量等于官方限重，即使上坡、高速跑，电容电压也始终在 20V 上下，全程行动自如，并且不超功率。

附录资料

Buck 电路设计指南（基础知识）



T 导通，L 充电，斜率为 $\frac{V_d - V_o}{L}$ 。T 关闭，L 续流放电（L-R-D），斜率为 $\frac{V_o}{L}$ 。

$$\int_0^{T_{on}} \frac{V_d - V_o}{L} dt = \int_{T_{on}}^{T_s} \frac{V_o}{L} dt$$

$$\frac{V_d - V_o}{L} t_{on} = \frac{V_o}{L} t_{off}$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = D$$

电流关系：

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{1}{D}$$

在电流连续和不连续的边缘时：

$$i_{Lmax} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2}$$

$$i_{Lmin} = I_L - \frac{\Delta I_L}{2}$$

ΔI_L 可以由 L 充电上升期间得到（当然也可以由下降期间，只不过这样计算比较复杂）：

$$\Delta I_L = \frac{V_d - V_o}{L} D T_s$$

接下来要得到 I_L ，在 Buck 电路中， $I_L = I_o$ ：

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R}$$

由：

$$i_{Lmin} = I_L - \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_o}{R} - \frac{1}{2} \frac{V_d - V_o}{L} D T_s = 0$$

$$\frac{V_o}{R} = \frac{1}{2} \frac{V_d - V_o}{L} DT_s$$

得到：

$$Lf_s = \frac{1}{2} \frac{V_d - V_o}{V_o} DR = \frac{1}{2} \frac{\frac{V_o}{D} - V_o}{V_o} DR = \frac{1}{2} \frac{V_o - DV_o}{DV_o} DR = \frac{1}{2} (1 - D)R$$

所以为了保持 CCM：

$$Lf_s \geq \frac{1}{2} (1 - D)R$$

在电流不连续时（固定 V_d ）：

$$\frac{V_d - V_o}{L} DT_s = \frac{V_o}{L} \Delta 1 Ts$$

$$(V_d - V_o) DT_s = V_o \Delta 1 Ts$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{D + \Delta 1}$$

关键是求出 $\Delta 1$

由 I_o ，三角形电流面积的积分除以总时间：

$$\begin{aligned} I_o &= \frac{\frac{i_{Lmax}(D + \Delta 1)Ts}{2}}{Ts} = \frac{i_{Lmax}(D + \Delta 1)}{2} = \frac{V_d - V_o}{L} DT_s \frac{(D + \Delta 1)}{2} \\ &= \frac{V_d - \frac{D}{D + \Delta 1} V_d}{L} DT_s \frac{(D + \Delta 1)}{2} \\ &= \frac{\frac{\Delta 1}{D + \Delta 1} V_d}{L} DT_s \frac{(D + \Delta 1)}{2} = \frac{\Delta 1 V_d}{L} DT_s \frac{1}{2} = \frac{DT_s V_d}{2L} \Delta 1 \end{aligned}$$

所以：

$$\Delta 1 = \frac{2L}{DT_s V_d} I_o$$

所以：

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{D + \Delta 1} = \frac{D}{D + \frac{2L}{DT_s V_d} I_o}$$

在电流不连续时（固定 V_o ,求 D）：

$$\frac{V_d - V_o}{L} DT_s = \frac{V_o}{L} \Delta 1 Ts$$

$$(V_d - V_o) DT_s = V_o \Delta 1 Ts$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{D + \Delta 1}$$

关键是求出 $\Delta 1$

由 I_o ，三角形电流面积的积分除以总时间：

$$\begin{aligned}
 I_o &= \frac{\frac{i_{Lmax}(D + \Delta 1)Ts}{2}}{T_s} = \frac{i_{Lmax}(D + \Delta 1)}{2} = \frac{V_d - V_o}{L} DT_s \frac{(D + \Delta 1)}{2} \\
 &= \frac{V_d - \frac{D}{D + \Delta 1} V_d}{L} DT_s \frac{(D + \Delta 1)}{2} \\
 &= \frac{\Delta 1}{D + \Delta 1} \frac{V_d}{L} DT_s \frac{(D + \Delta 1)}{2} = \frac{\Delta 1 V_d}{L} DT_s \frac{1}{2} = \frac{DT_s V_d}{2L} \Delta 1 = \frac{DT_s V_d}{2L} \Delta 1 \frac{V_o}{V_o} = \frac{Ts V_o}{2L} \Delta 1 \frac{DV_d}{V_o}
 \end{aligned}$$

所以，由上式调整顺序分离出 $\Delta 1$ ($I_{OBmax} = \frac{Ts V_o}{2L}$):

$$\begin{aligned}
 \Delta 1 &= \frac{2LV_o I_o}{Ts V_o D V_d} = \frac{I_o}{I_{OBmax}} \frac{V_o}{V_d} \\
 \frac{V_o}{V_d} &= \frac{D}{D + \frac{I_o}{I_{OBmax}} \frac{V_o}{V_d}}
 \end{aligned}$$

调整顺序：

$$\begin{aligned}
 \frac{V_d}{V_o} &= \frac{D + \frac{I_o}{I_{OBmax}} \frac{V_o}{V_d}}{D} \\
 D \frac{V_d}{V_o} &= D + \frac{I_o}{I_{OBmax}} \frac{V_o}{V_d} \\
 D \left(\frac{V_d}{V_o} - 1 \right) &= \frac{I_o}{I_{OBmax}} \frac{V_o}{V_d} \\
 D \left(\frac{V_d - V_o}{V_o} \right) &= \frac{I_o}{I_{OBmax}} \frac{V_o}{V_d} \\
 D &= \frac{I_o}{I_{OBmax}} \frac{V_o}{V_d} \frac{V_o}{V_d - V_o}
 \end{aligned}$$

关于 I_{OBmax} 和 I_{LBmax}

在 DCM 和 CCM 的边界(注意在此时 $\frac{V_o}{V_d} = D$ 这个关系依然成立)， I_{LB} 由三角形电流面积

的积分除以总时间得到：

比如由下降趋势的 I_L 求：

$$I_{LB} = \frac{\frac{1}{2} Ts \frac{V_o}{L} (1 - D) Ts}{T_s} = \frac{1}{2} \frac{V_o Ts}{L} (1 - D)$$

比如由上升趋势的 I_L 求：

$$I_{LB} = \frac{\frac{1}{2} T_s \frac{V_d - V_o}{L} D T_s}{T_s} = \frac{\frac{1}{2} T_s \frac{V_d - D V_d}{L} D T_s}{T_s} = \frac{1}{2} T_s \frac{V_d - D V_d}{L} D = \frac{1}{2} T_s \frac{V_d (1 - D)}{L} D$$

$$= \frac{1}{2} T_s \frac{\frac{V_o}{D} (1 - D)}{L} D = \frac{1}{2} \frac{V_o T_s}{L} (1 - D)$$

如果， V_o ， T_s 和 L 都是固定值，所以 I_{LB} 其最大值：

$$I_{LBmax} = \frac{T_s V_o}{2L}$$

流经电感的电流也就是 I_o ：

$$I_{OBmax} = I_{LBmax} = \frac{T_s V_o}{2L}$$

如果， V_d ， T_s 和 L 都是固定值，所以 I_{LB} 其最大值 ($D=\frac{1}{2}$):

$$I_{LB} = \frac{\frac{1}{2} T_s \frac{V_d - V_o}{L} D T_s}{T_s} = \frac{\frac{1}{2} T_s \frac{V_d - D V_d}{L} D T_s}{T_s} = \frac{1}{2} T_s \frac{V_d - D V_d}{L} D = \frac{1}{2} T_s \frac{V_d (1 - D)}{L} D$$

$$= \frac{1}{2} T_s \frac{V_d (D - D^2)}{L}$$

$$I_{LBmax} = \frac{T_s V_o}{8L}$$

流经电感的电流也就是 I_o ：

$$I_{OBmax} = I_{LBmax} = \frac{T_s V_o}{8L}$$

电压波动：

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{\frac{1}{2} \frac{\Delta I_L T_s}{2}}{C} = \frac{\Delta I_L T_s}{8C}$$

接下来求出 ΔI_L (同样可以根据 I_L 上升也能根据 I_L 下降):

$$\Delta I_L = \frac{V_d - V_o}{L} D T_s$$

所以：

$$\Delta V_o = \frac{\frac{V_d - V_o}{L} D T_s T_s}{8C} = \frac{(V_d - V_o) D T_s T_s}{8LC} = \frac{(V_d - D V_d) D T_s T_s}{8LC} = \frac{V_d (1 - D) D T_s^2}{8LC}$$

从而：

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{V_d (1 - D) D T_s^2}{8LC V_o} = \frac{(1 - D) T_s^2}{8LC}$$

在这个电路里：

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$f_s = \frac{1}{T_s}$$

所以：

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V_o}{V_o} &= \frac{(1-D) T_s^2}{8LC} = \frac{(1-D)}{8 \left(\frac{1}{2\pi f_c} \right)^2} \left(\frac{1}{f_s} \right)^2 = \frac{(1-D) (\pi f_c)^2}{2} \left(\frac{1}{f_s} \right)^2 \\ &= \frac{\pi^2(1-D)}{2} \left(\frac{f_c}{f_s} \right)^2 \end{aligned}$$

所以当然是 $f_s \gg f_c$ 比较好。

Buck 电路设计指南（建模知识）

考虑如下的线性系统状态空间模型：

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

引入开关变量 $d(t)$,

$d(t) = 1$ 开关处于闭合状态 ($0 \leq t \leq DT$)

$d(t) = 0$ 开关处于开启状态 ($DT \leq t \leq T$)

其中 D 是占空比, T 是 PWM 波的周期.

Buck 电路的状态方程可以通过如下方式描述：

$$\dot{x} = A_{on}x + B_{on}u$$

$$y = C_{on}x + D_{on}u$$

上式适用于 $0 \leq t \leq DT$.

$$\dot{x} = A_{off}x + B_{off}u$$

$$y = C_{off}x + D_{off}u$$

上式适用于 $DT \leq t \leq T$.

开关状态方程可以通过如下方式描述：

$$\dot{x} = A_s x + B_s u$$

$$y = C_s x + D_s u$$

$$\dot{x} = [A_{on}d(t) + A_{off}(1-d(t))]x + [B_{on}d(t) + B_{off}(1-d(t))]u$$

$$y = [C_{on}d(t) + C_{off}(1-d(t))]x + [D_{on}d(t) + D_{off}(1-d(t))]u$$

小结

	ON 状态		OFF 状态	
拓扑	A_{on}	B_{on}	A_{off}	B_{off}
Buck	$\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ \frac{L}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

Buck 电路设计指南（基础的控制知识）

1 . PID 控制

施加在对象上的控制器输出为

$$u(t) = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt}$$

这是一个知名的闭环控制器，无需赘述。

2 . 前馈控制

使用前馈控制的理念，可以布置 PID 控制器的抗饱和工作，可以参考 matlab 公司的公开文档辅助设计：

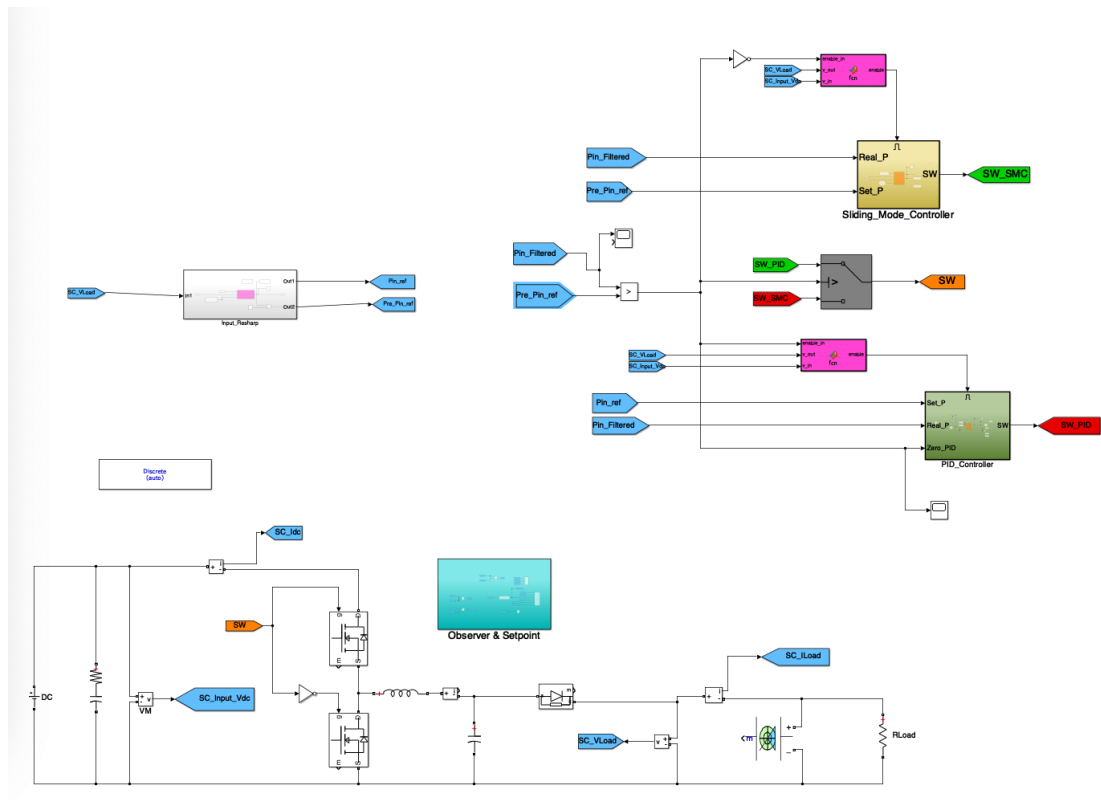
<https://ww2.mathworks.cn/help/simulink/examples/anti-windup-control-using-a-pid-controller.html>

3 . 滑膜控制

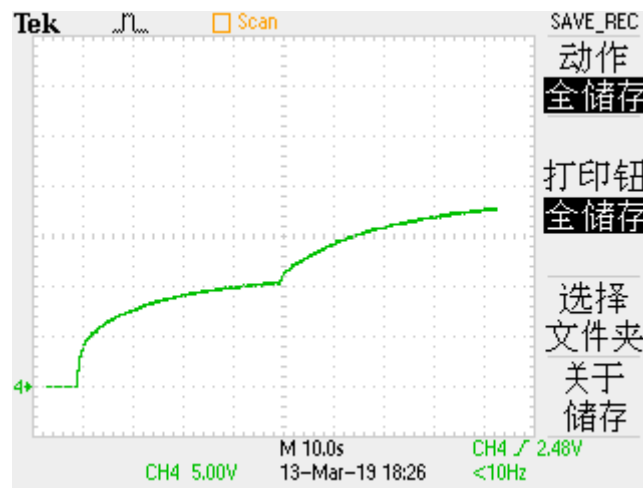
滑膜控制是一种非常著名的非线性设计工具，其强迫相轨迹在有限时间内到达滑动流形，并在之后保持在相图中的滑动流形上。这种控制算法的设计流程可以归纳为：选择合适的滑动流形，选择控制输入并将其中的非线性符号函数用其饱和函数逼近，证明稳定性并进行测试。

Buck 电路设计指南（仿真与实际结果）

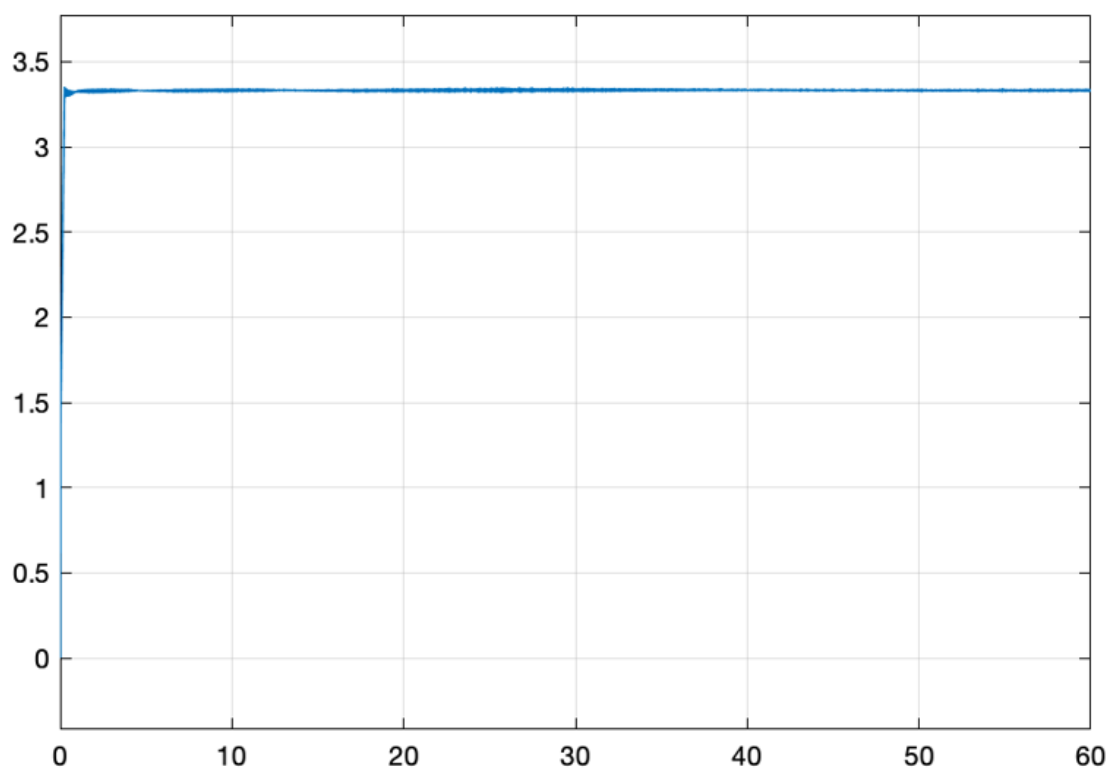
仿真是确认一个电力电子系统设计合理性与安全性的必要途径，通过 Simulink 与 Matlab 混合编程，使得最接近底层的输出结果得以呈现并确认，是一个合理的设计的必备途径。



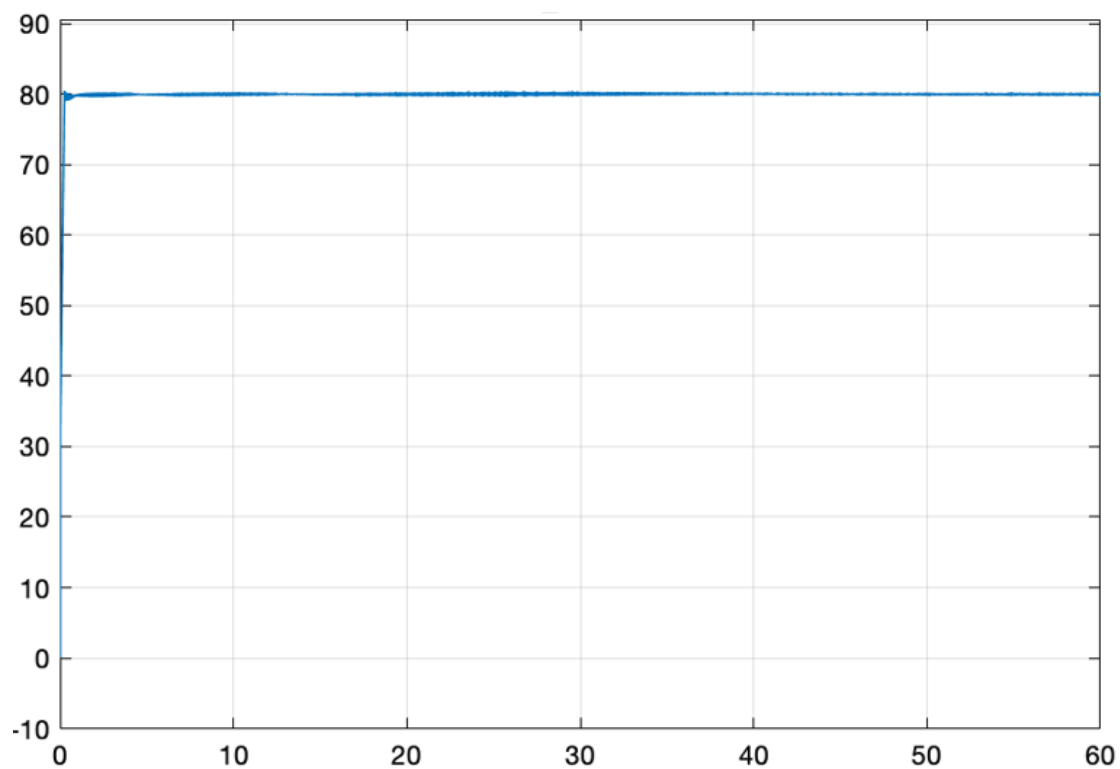
控制程序框图



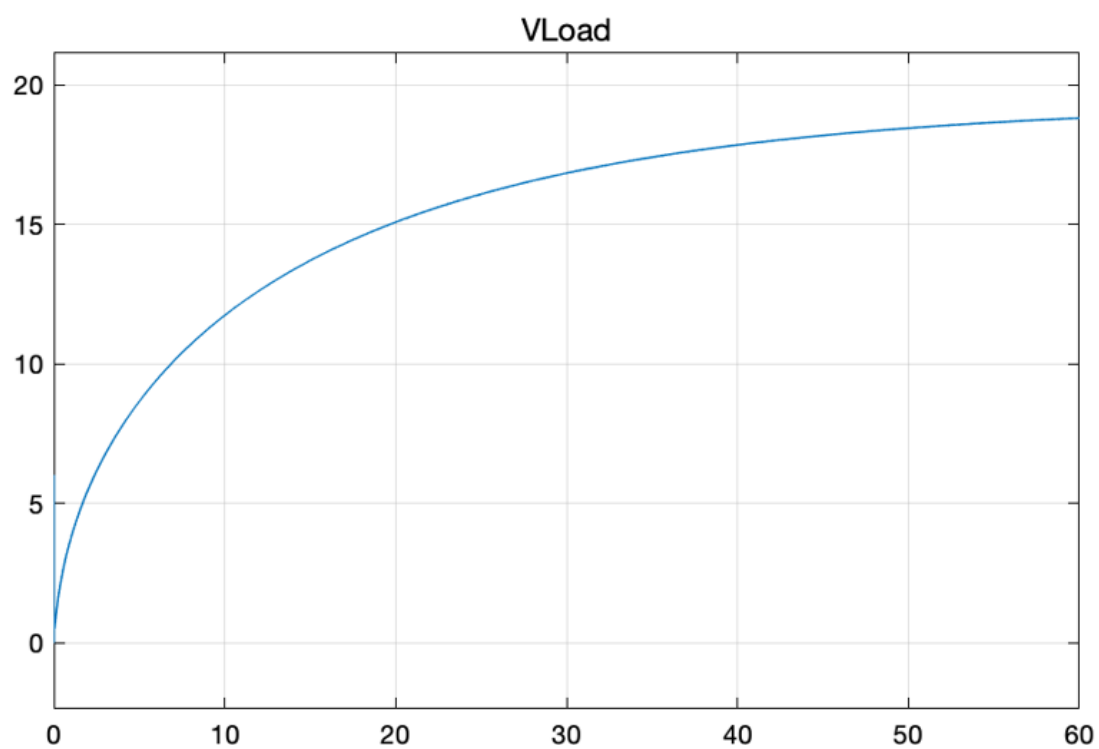
在充电过程中进行功率切换的实际测试波形（实测）



80W 恒功率模式下带 5Ω负载的输入电流 (y 轴单位 A, x 轴单位 s, Simulink 仿真)



80W 恒功率模式下带 5Ω负载的输入功率 (y 轴单位 W, x 轴单位 s, Simulink 仿真)



80W 恒功率模式下带 5Ω负载的充电电压 (y 轴单位 V, x 轴单位 s, Simulink 仿真)