



芯干线科技

WWW.X-IPM.COM

宽禁带功率半导体专家

三相图腾柱无桥PFC方案介绍

2024年5月23日

CONTENT



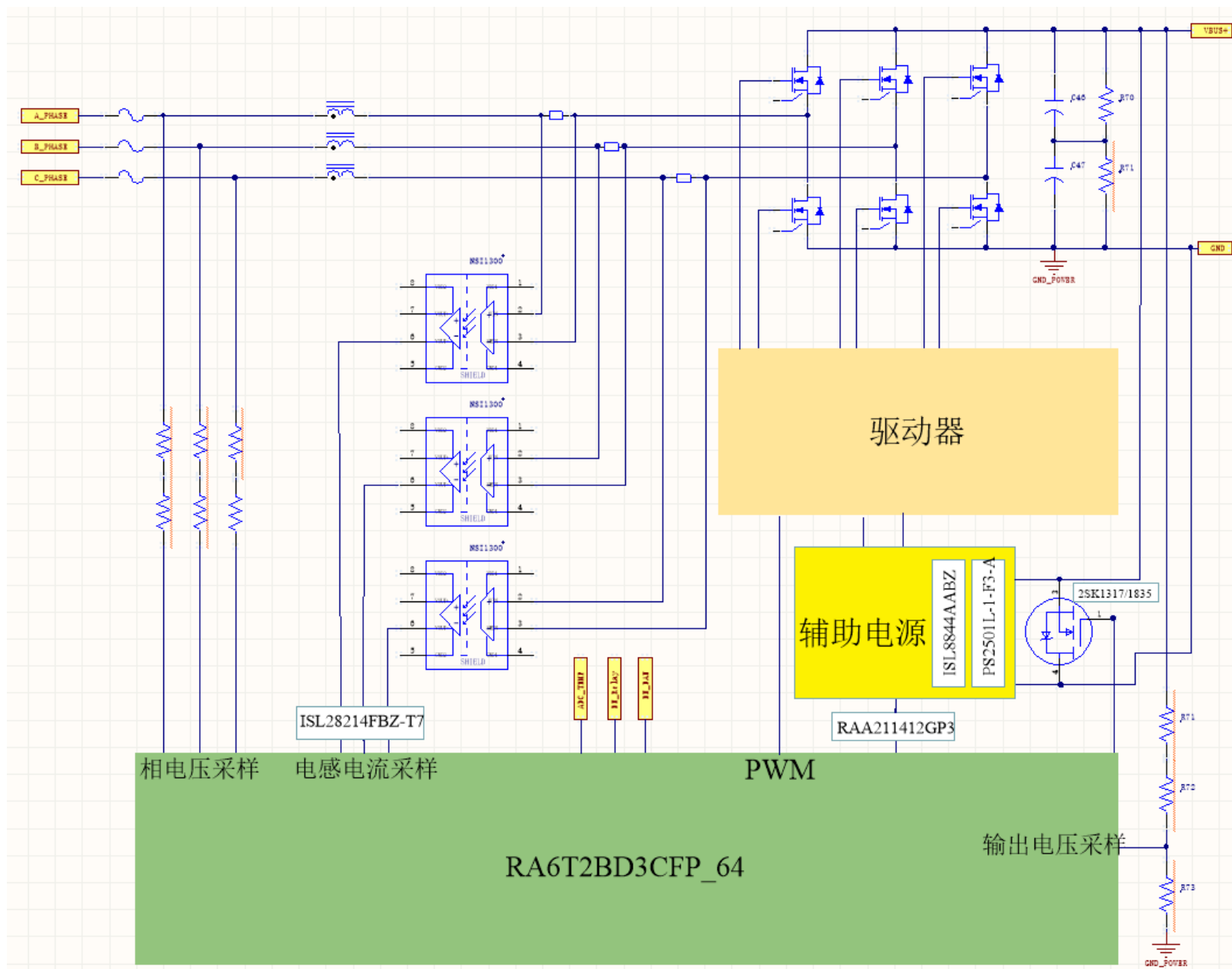
01 ➤ 系统框图

02 ➤ 关键电路

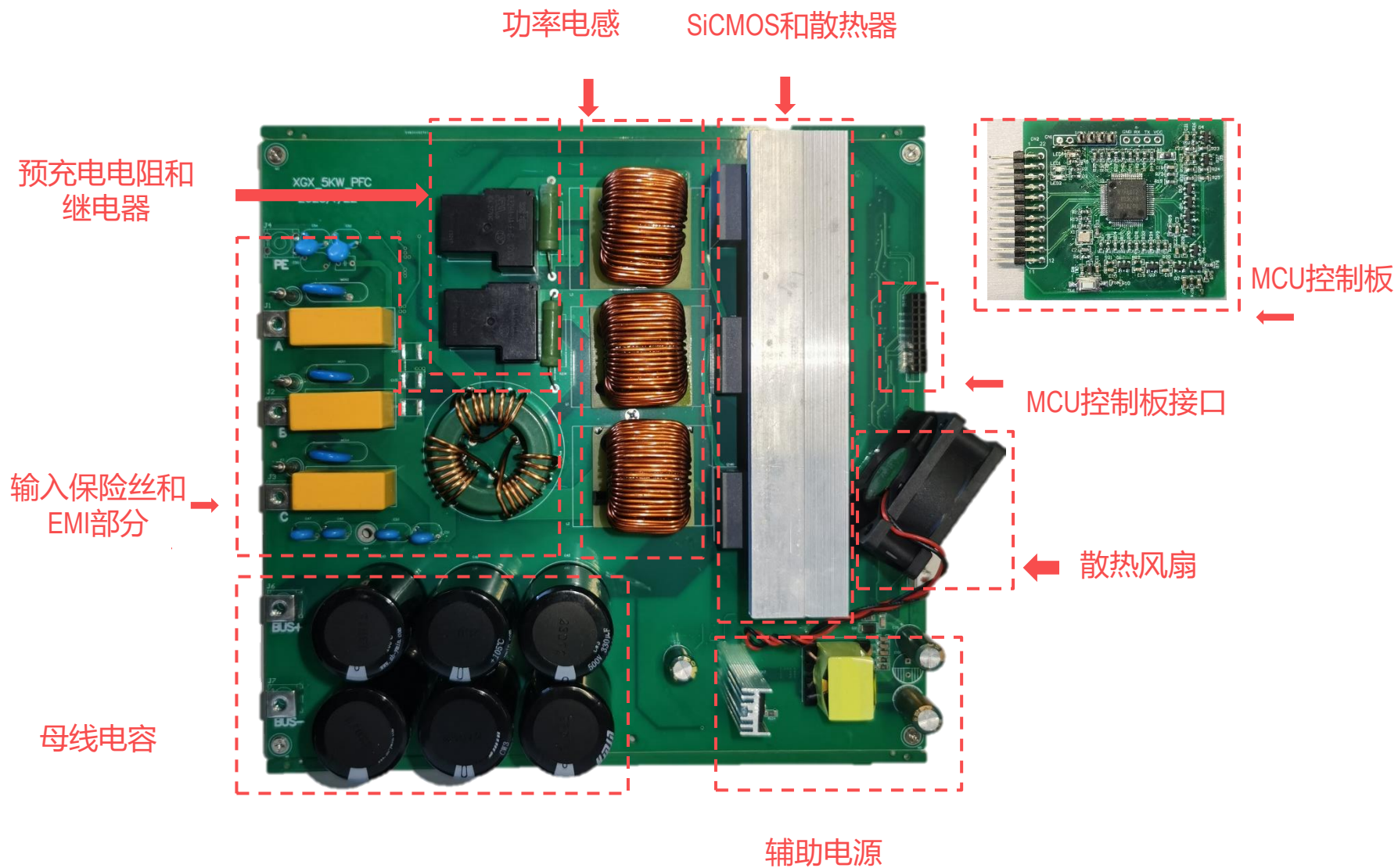
03 ➤ 功率器件

04 ➤ 使用场景

系统构架图



实物正面





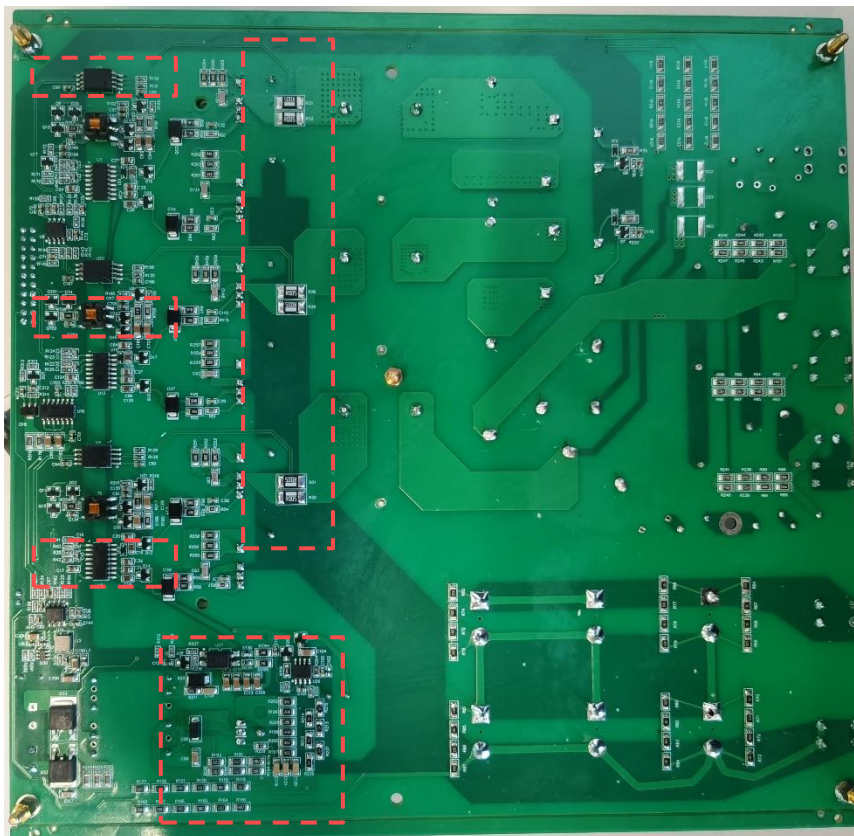
实物反面

电流采样电阻

相电流采样

隔离变压器

隔离驱动器



辅助电源控制

部分关键物料

- MCU: RA6T2BD3CFP
- SiC MOS: X2M120075T4
- 隔离驱动器: NSI6602B-DSPNR
- 隔离运放: NSI1300
- 通用运放: MC33171
- MCU供电芯片: LA1631
- 辅助源控制器: UC2844

CONTENT



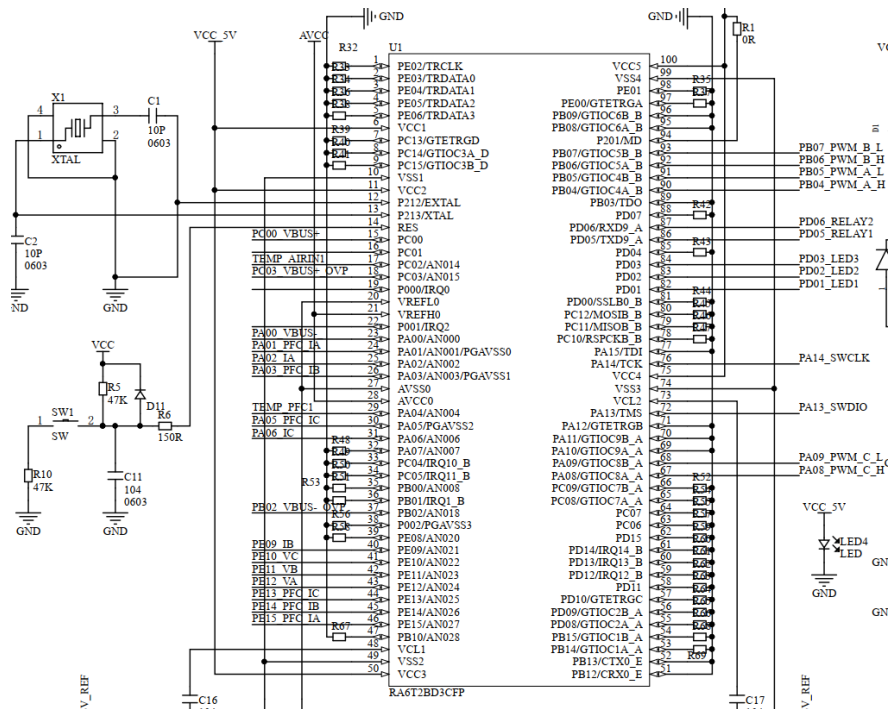
01 ➤ 系统框图

02 ➤ 关键电路

03 ➤ 功率器件

04 ➤ 使用场景

MCU



资源分配

- 6个PWM输出
- 3个比较器，相电流过流保护。
- 3个POE，关断PWM输出。
- 3个DAC，设置参考电压。
- 12个ADC通道,利用瑞萨特色ADC分组功能。

使用RA6T2BD3CFP 64PIN

定时器GPT

GPT

√ Module g_timer0 Timer, General PWM (r_gpt)	
√ General	
Name	g_timer0
Channel	0
Mode	Triangle-Wave Symmetric PWM
Period	80
Period Unit	Kilohertz
√ Output Disable POEG Trigger	
Dead Time Error	<input type="checkbox"/>
GTIOCA and GTIOCB High Level	<input checked="" type="checkbox"/>
GTIOCA and GTIOCB Low Level	<input type="checkbox"/>
POEG Link	POEG Channel 0
GTIOCA Disable Setting	Level Low
GTIOCB Disable Setting	Level Low
√ Interrupts	
Callback	GPT3_callback
Overflow/Crest Interrupt Priority	Priority 5
Capture A Interrupt Priority	Disabled
Capture B Interrupt Priority	Disabled
Underflow/Trough Interrupt Priority	Disabled

功能分析

- 定时器GPT设置输出PWM频率为80KHz。模式选择三角波对称。GPT1,GPT2与GPT0相同。
- 定时器GPT0于POEG0连接，当GPT0输出的PWM同时为高电平和POEG触发时会关闭GPT0的PWM输出。GPT1,GPT2与GPT0相同。
- 设置定时器GPT3的频率为40KHz，并且打开中断，程序中所有计算都在中断中执行。



ADC

ADC

▼ GPT Trigger Enable

GPT Channel 0 Request A	<input type="checkbox"/>
GPT Channel 1 Request A	<input type="checkbox"/>
GPT Channel 2 Request A	<input type="checkbox"/>
GPT Channel 3 Request A	<input checked="" type="checkbox"/>
GPT Channel 4 Request A	<input type="checkbox"/>
GPT Channel 5 Request A	<input type="checkbox"/>
GPT Channel 6 Request A	<input type="checkbox"/>
GPT Channel 7 Request A	<input type="checkbox"/>

```
if(p_args->group_mask == ADC_GROUP_MASK_0)
{
    scan0_complete_flag = true;
    R_ADC_B_Read(&g_adc0_ctrl,channel_IA, &ADC_REG.IA);
    R_ADC_B_Read(&g_adc0_ctrl,channel_IB, &ADC_REG.IB);
    R_ADC_B_Read(&g_adc0_ctrl,channel_IC, &ADC_REG.IC);
    R_ADC_B_Read(&g_adc0_ctrl,channel_VC, &temp);
    ADC_REG.VC = temp;
}

if(p_args->group_mask == ADC_GROUP_MASK_1)
{
    scan1_complete_flag = true;
    R_ADC_B_Read(&g_adc0_ctrl,channel_VA, &temp);
    ADC_REG.VA = temp;
    R_ADC_B_Read(&g_adc0_ctrl,channel_VB, &temp);
    ADC_REG.VB = temp;
    R_ADC_B_Read(&g_adc0_ctrl,channel_VBUS_1, &temp);
    ADC_REG.VBUS1 = temp;
}
```

功能分析

- 利用GPT3输出的PWM触发ADC采样。
- ADC总共采样七个点，分别为三相交流电的电流，电压和输出电压。

比较器与DAC

比较器与DAC

Analog Input Voltage Source (IVCMP)	AN012 (channel 0 only)
Reference Voltage Input Source (IVREF)	DA0 (channel 0 only)

Analog Input Voltage Source (IVCMP)	AN013 (channel 1 only)
Reference Voltage Input Source (IVREF)	DA1 (channel 1 only)

Analog Input Voltage Source (IVCMP)	AN014 (channel 2 only)
Reference Voltage Input Source (IVREF)	DA2 (channel 2 only)

```
R_ACMPHS_Open(&g_comparator0_ctrl, &g_comparator0_cfg); //打开和配置比较器, 比较器相关配置在.xml文件
R_ACMPHS_OutputEnable(&g_comparator0_ctrl); //使能比较器输出
R_DAC_Open (&g_dac0_ctrl, &g_dac0_cfg);
R_DAC_Write (&g_dac0_ctrl, 2860); //比较器0的一段链接到DA0处, 产生3V的比较电压用于保护 3722-3V 0xE8A
R_DAC_Start(&g_dac0_ctrl);
```

```
R_GPT_POEG0->GTONCWP = 0xA500; //关闭 GTONCCPRA寄存器 写保护
R_GPT_POEG0->GTONCCR_b.NFS = 0x0; //比较器0
R_GPT_POEG0->GTONCCR_b.NFV = 0x1; //停止信号输出, 请求GPT停止输出
R_GPT_POEG0->GTONCCR_b.NE = 0x1; //检测信号直接使用为停止信号
R_GPT_POEG0->GTONCWP = 0xA501; //开启 GTONCCPRA寄存器 写保护
```

功能分析

- 比较器0, 1, 2分别另三相交流电的A,B,C电流与DAC0, 1, 2进行比较。
- DAC设置2860输出3V电压用于电流过流保护。
- 利用POEG进行关闭

软件部分特色功能

ADC分组和POE

Settings	属性	值
API Info	<ul style="list-style-type: none"> > Interrupts > Digital Filter > Sample and Hold > Programmable Gain Amplifier > User Offset Table > User Gain Table > Limiter Clipping ▼ Virtual Channels 	
	<ul style="list-style-type: none"> ▼ Virtual Channel 0 	
	<ul style="list-style-type: none"> Scan Group Channel Select Sampling State Table ID Channel Gain Table Channel Offset Table Add/Average Mode Add/Average Count Limit Clip Table Id Conversion Data Format Select Digital Filter Selection > Virtual Channel 1 > Virtual Channel 2 > Virtual Channel 3 > Virtual Channel 4 > Virtual Channel 5 	<ul style="list-style-type: none"> Scan Group 0 AN012 AN000 AN001 AN002 AN003 AN004 AN005 AN006 AN007 AN008 AN009 AN010 AN011 AN012 AN013 AN014

▼ Common	
Parameter Checking	Default (BSP)
▼ Module g_poeg0 Port Output Enable for GPT (r_poeg)	
▼ General	
▼ Trigger	
GTETRQ Pin	<input type="checkbox"/>
GPT Output Level	<input checked="" type="checkbox"/>
Oscillation Stop	<input type="checkbox"/>
ACMPHS0	<input checked="" type="checkbox"/>
ACMPHS1	<input type="checkbox"/>
ACMPHS2	<input type="checkbox"/>
ACMPHS3	<input type="checkbox"/>

功能分析

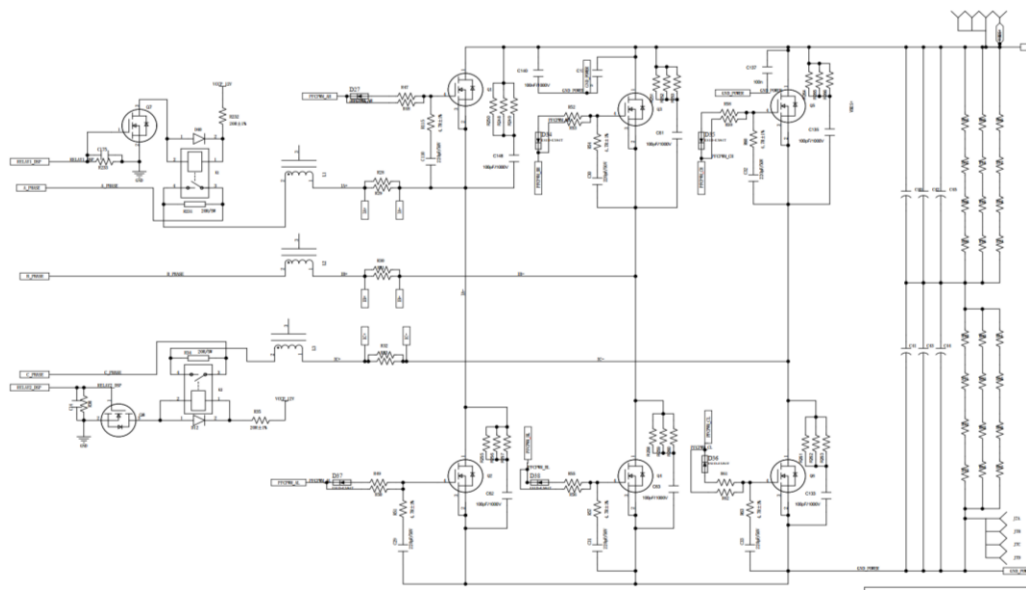
- 28个ADC通道通过虚拟通道，将需要的通道分到一组。
- POE触发选择定时器输出PWM电平和比较器，在没有CPU的干预下直接关闭定时器输出。

为什么使用ADC分组功能和POE?



功率部分

主功率拓扑图



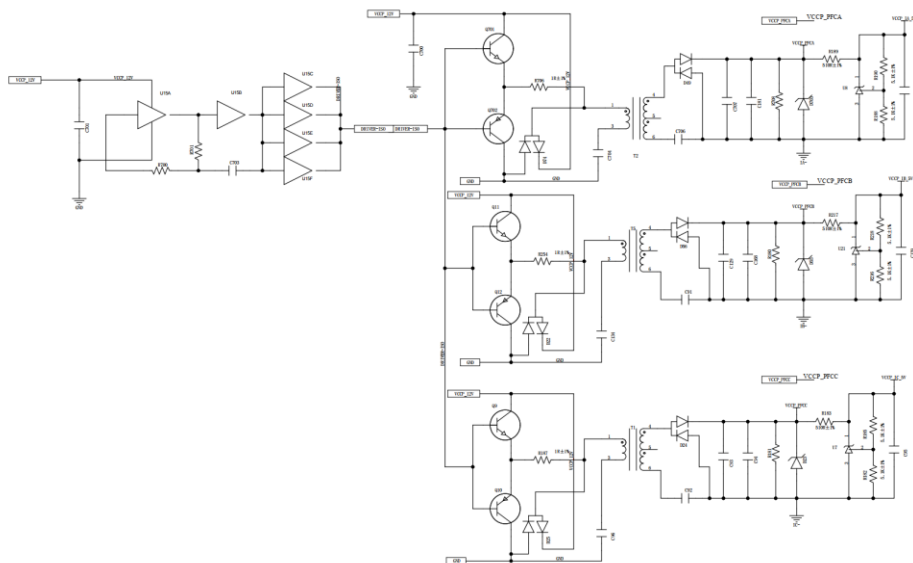
一些关键点

- 三个半桥，六个桥臂。
- 使用第三代半导体，碳化硅器件。
- 相电流使用隔离运放采样。

为什么使用碳化硅器件？

驱动器及隔离运放供电

驱动器及隔离运放供电



一些关键点

- 隔离开环的变压器。
- LDO稳压。
- 驱动供电电压22V，隔离运放供电5V。

驱动供电为什么是22V?

CONTENT



- 01 ➤ 系统框图
- 02 ➤ 关键电路
- 03 ➤ **功率器件**
- 04 ➤ 使用场景

碳化硅MOS vs. 硅IGBT硬开关损耗

Hard-Switched Power Losses

SiC MOSFET vs. Si IGBT

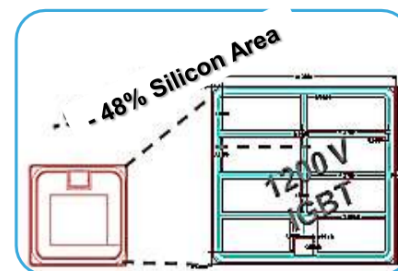
SiC MOSFET vs. trench gate field-stop IGBT

Parameters & Conditions	Die size (Normalized)	V _{on} typ. (V) @ 25°C, 20A	V _{on} typ. (V) @ 150°C, 20A	E _{on} (μJ) @ 20A, 800V 25°C / 150°C	E _{off} (μJ) @ 20A, 800V 25°C / 150°C	E _{off} 25°C / 150°C difference (%)
SiC MOSFET	0.52	1.6	1.8	500 / 450*	350 / 400	+15% from 25°C to 150°C
IGBT	1.00	1.95	2.2	800 / 1300**	800 / 1900	+140% from 25°C to 150°C

* Including SiC intrinsic body diode Q_{rr} ** Including the Si IGBT copack diode Q_{rr}

SiC MOSFET

- Data measured on SiC MOSFET engineering samples;
- SiC MOSFET device : 1200V, 34A (@100°C), 80mΩ, N-channel
- Si IGBT device: 25A(@100°C) 1200V ST trench gate field-stop IGBT (T_{j-max}=175°C)
- SiC switching power losses are considerably lower than the IGBT ones
- At high temperature, the gap between SiC and IGBT is insurmountable



SiC die size compared to IGBT

➤ SiC MOSFET is the optimal fit for High Power, High Frequency and High Temperature applications

在可比的电流能力下，碳化硅MOS芯片面积比硅IGBT小一半以下

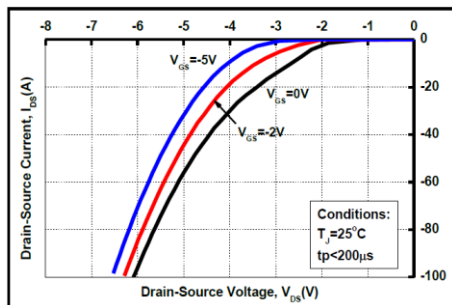
碳化硅MOS开关损耗远小于IGBT

碳化硅MOS更适合高功率密度，高频率，及高温应用领域

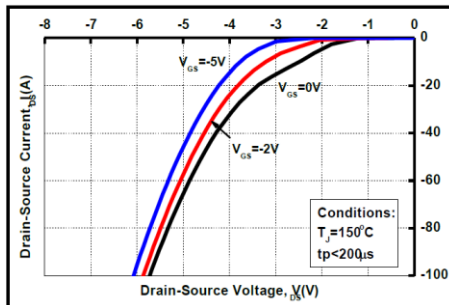
碳化硅MOS第三象限导通

第三象限导通 $V_{GS} < 0$

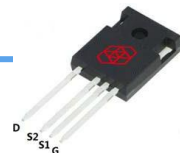
1200V SiC MOSFET with 25mΩ TO-247-4



3rd Quadrant, $V_{GS} < 0$ @ 25°C



3rd Quadrant, $V_{GS} < 0$ @ 150°C

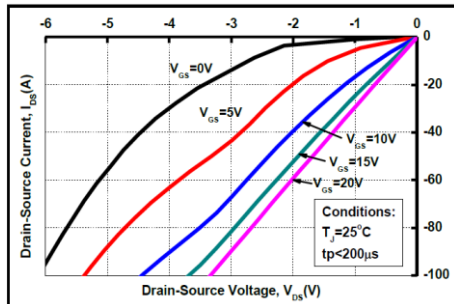


第三象限导通 $V_{GS} < 0$

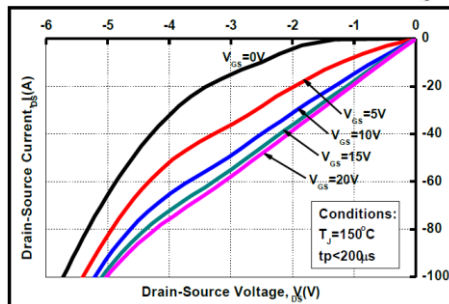
- 门极负压越小，SD导通压降越大。
- 导通压降是负温度系数，即温度越高，压降越小。
- 碳化硅MOS体二极管导通， T_{rr} 通常只有十几到几十ns，远小于硅器件的几百ns。

第三象限导通 $V_{GS} > 0$

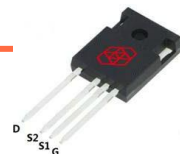
1200V SiC MOSFET with 25mΩ TO-247-4



3rd Quadrant, $V_{GS} > 0$ @ 25°C



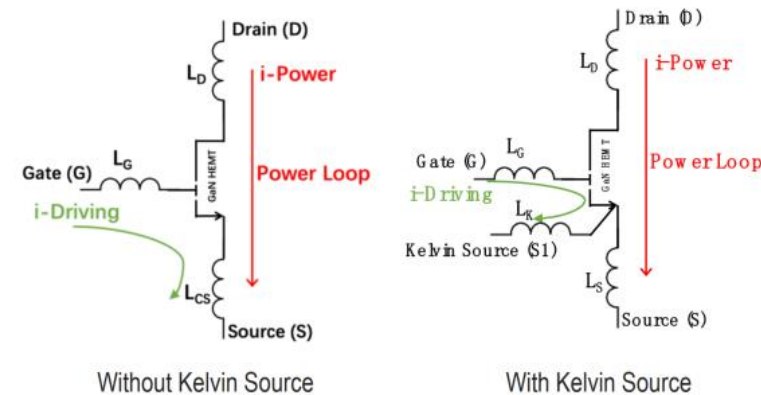
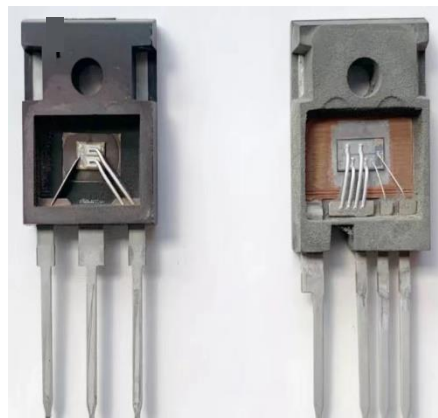
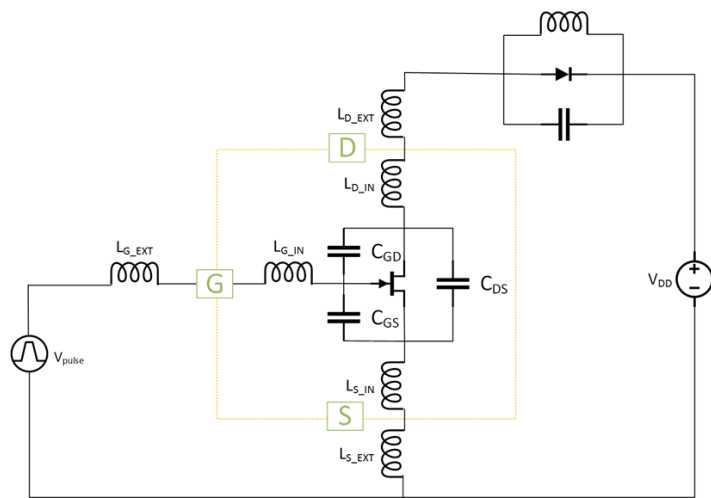
3rd Quadrant, $V_{GS} > 0$ @ 150°C



第三象限导通 $V_{GS} > 0$

- 沟道与体二极管同时导通。
- 导通压降是正温度系数。

高 di/dt 下寄生电感影响



功率器件的源极引脚存在共源极寄生电感（CSI），器件中的导通电流变化率 di/dt 太高会感应 $L \cdot di/dt$ 电压

共源极寄生电感

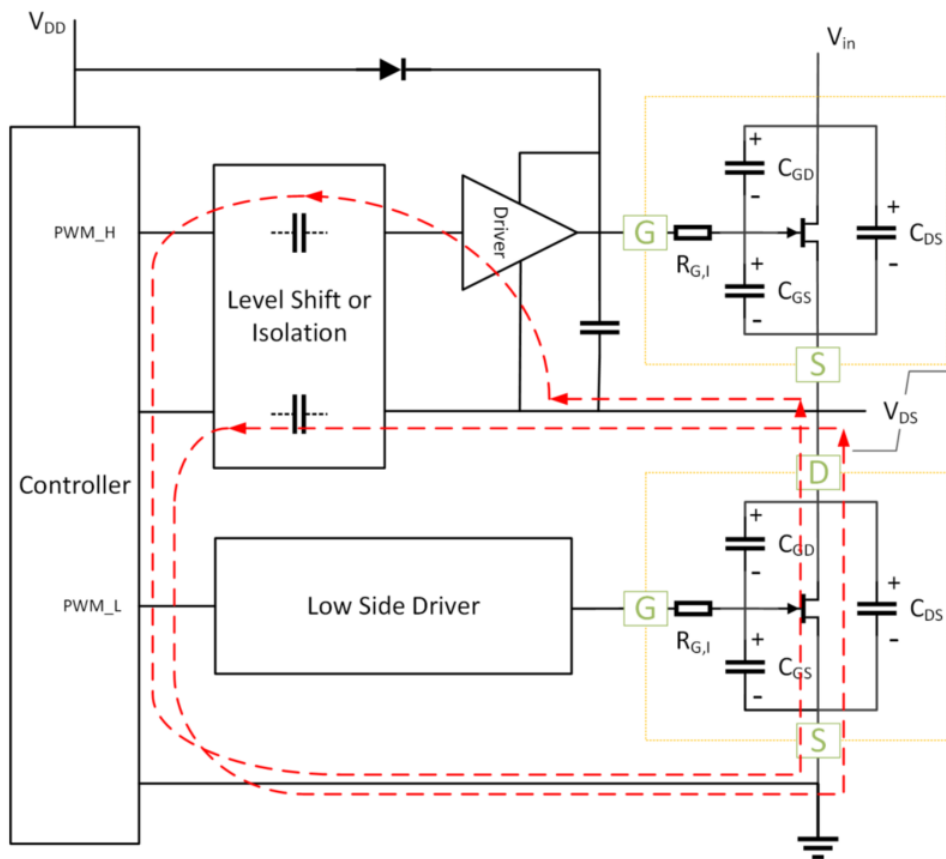
共源极电感上所感应的电压（ $L \cdot di/dt$ ）会对门极驱动电压造成负面影响；极端情况下可能会导致器件的误开通和炸机

$L \cdot di/dt$

因为需要高频使用，最新的氮化镓功率器件几乎都会提供开尔文源极（KS），降低CSI对驱动的影响

开尔文源极（KS）

高dv/dt下桥臂串扰问题



驱动回路示意图

- 碳化硅的高dv/dt及di/dt变化率会导致共模电流流过电平转换器或者**隔离器**。
- 共模电流可能会导致接地跳动甚至改变信号逻辑状态。
- 电平转换器或者隔离器需要尽可能小的寄生电容来实现更高的共模瞬态抗扰性。

减小回路电感是减小振荡的有效方法。



驱动特点

驱动要求高

- 驱动电路需要能够提供足够的驱动能力，抑制米勒振荡。
- 半桥电路中串扰严重，半桥中间点 dv/dt 大，串扰严重，存在误导通导致桥臂直通问题。

✓ 可能需要额外的抑制串扰电路。

PCB布局需要紧凑

- 为了抑制振荡，尽快的减小PCB布局带来的寄生电感和电容。
- 尤其注意共源电感。

✓ 选择具有开尔文封装的器件或在PCB布局上，将驱动地与功率地分开。

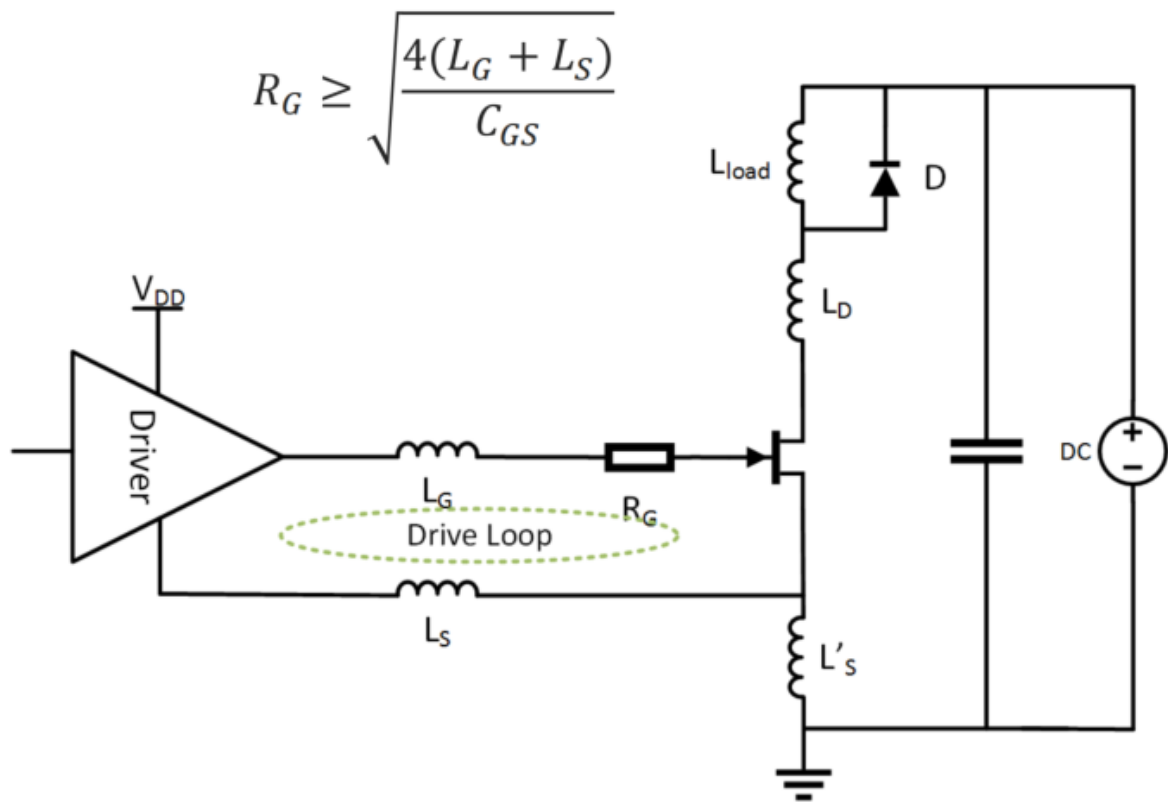
共模干扰

- 高 dv/dt 带来的共模干扰，导致出现不正确的电平逻辑。

✓ 注意共模回路，使用隔离芯片等。

驱动的计算及调试

为了避免驱动振荡，需要驱动电阻如下：



驱动回路示意图

1, 外部电阻为0R时，记录驱动振荡的频率Fr。
根据手册中的 C_{ISS} 的值，可以计算出驱动电路中的 $L_G + L_S$

$$L_G + L_S = \frac{1}{C_{ISS}(2\pi Fr)^2}$$

2, 取品质因数 $Q=0.5$, 确定驱动电阻:

$$R = \frac{\omega (L_G + L_S)}{Q}$$

3, 实际外部电阻取值需要减去器件门极内阻和驱动器内阻:

$$R_{int} = R - R_g - R_{drive}$$

如果器件门极内阻和驱动器内阻足够大，则不需要上述步骤。
根据EMI特性，调节外部驱动电阻R。
减小回路电感是减小振荡的有效方法。



驱动信号的测量



- 底边驱动使用低压探头最小环焊接的方式

探头相当于是天线，用地线夹的方式会引入干扰



- 高边驱动使用高共模抑制比探头。

示波器去PE线，用低压探头测上管驱动测试的结果不准确

CONTENT

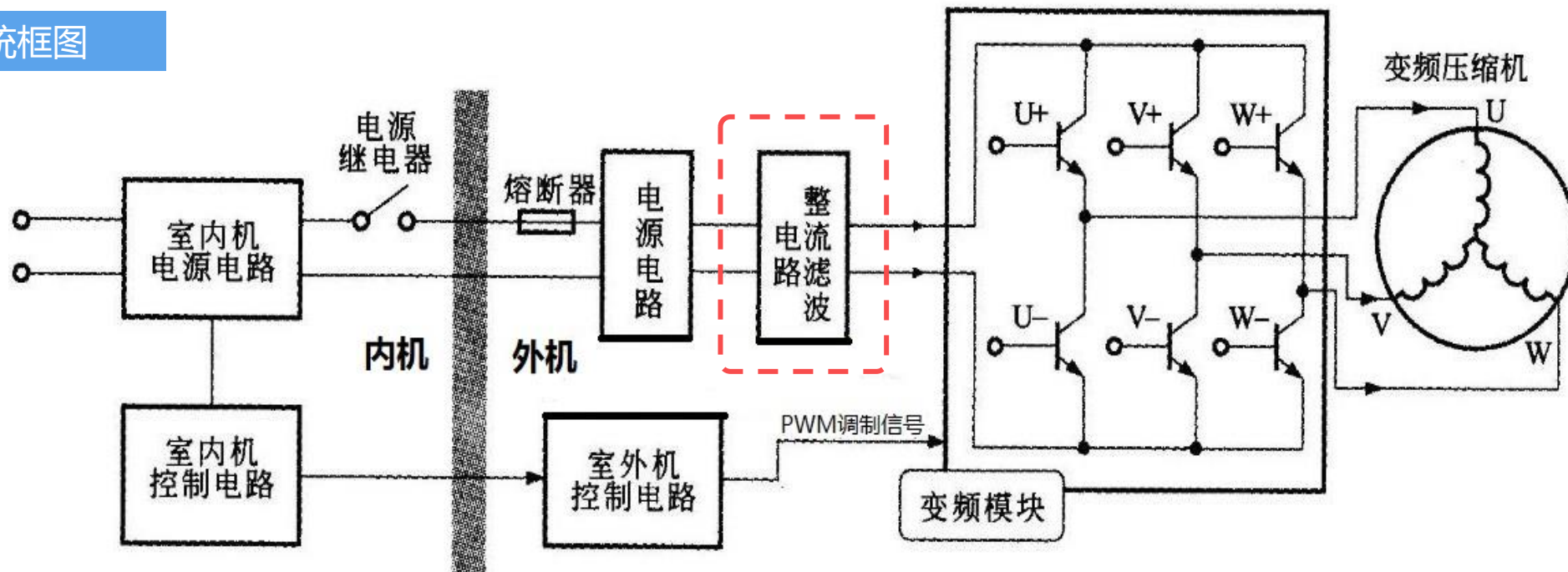


- 01 ➤ 系统框图
- 02 ➤ 关键电路
- 03 ➤ 功率器件
- 04 ➤ 使用场景



三相5KW PFC模块在变频空调中的应用

空调系统框图



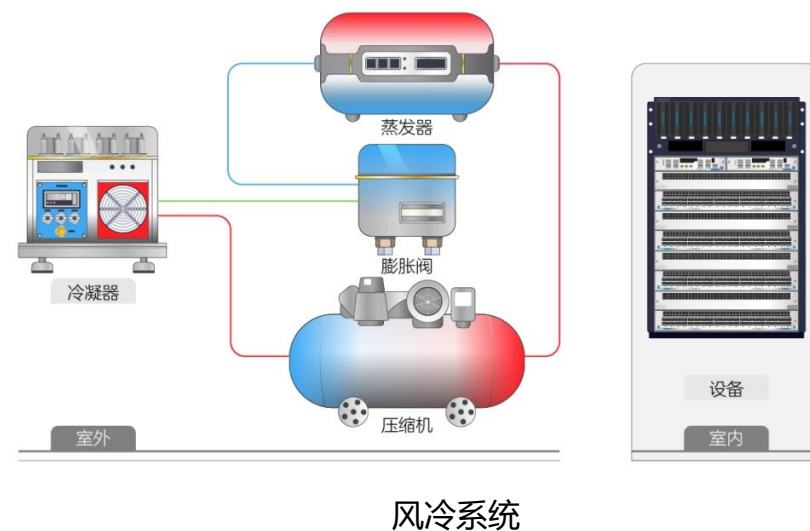
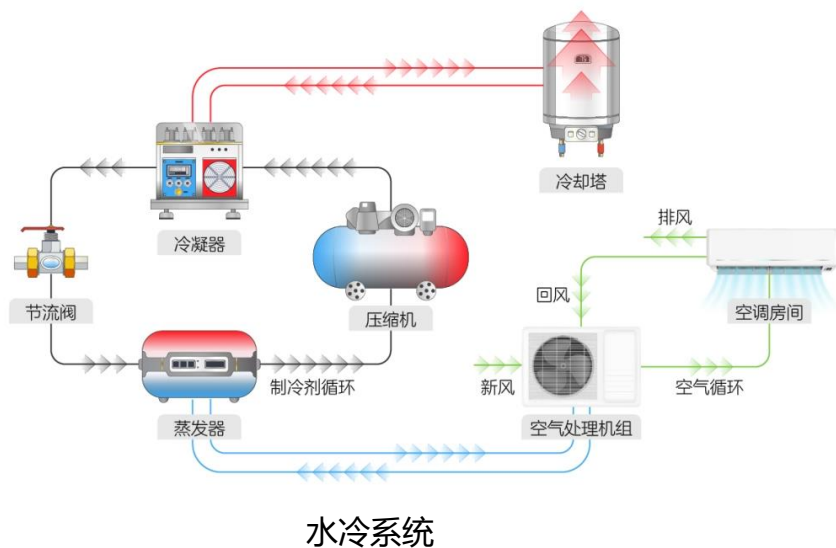
应用场景

- 商用空调：外机使用PFC模块进行整流稳压



三相5KW PFC模块在数据中心中的应用

数据中心的制冷系统



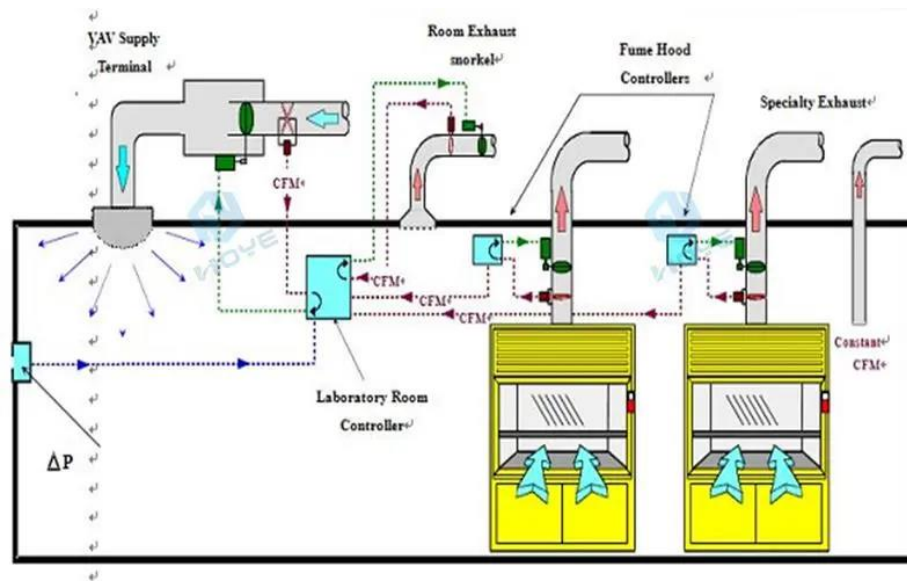
应用场景

- 压缩机，风扇等的供电。



三相5KW PFC模块在通风系统中的应用

通风系统



通风系统

应用场景

- 工厂、人防工程、隧道、养殖业等场景的通风系统。



芯干线科技

WWW.X-IPM.COM