

20kW SiC-Based Three Phase PFC Reference Design

20kW 碳化硅三相 PFC 参考设计

Order Part Number: IVCT-REF00003

目录

1 简介.....	2
2 硬件组成部分	4
3 测量结果	5
4 参数说明	14
5 附录.....	15

1 简介

三相 PFC 是一种高效率大功率无桥功率因数校正电路。它主要用于各种大功率电力电子设备中的第一级。图 1-1 所展示的是三相 PFC 主电路图。这个电路的 Q1~Q6 都是是高速 SiC（碳化硅）MOSFET 管。这一参考设计的额定功率为 20kW。它使用本公司生产的 1200V 50mΩ SiC MOSFET IV1Q12050T4, 以及专用碳化硅 MOSFET 驱动 IC IVCR1401 用于高速桥臂。实物图如图 1-2 所示。

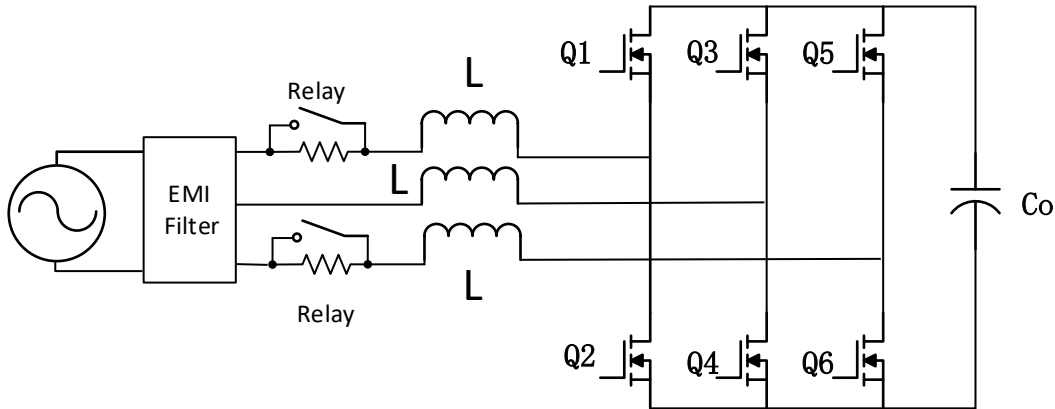


图 1-1 三相 PFC 拓扑结构

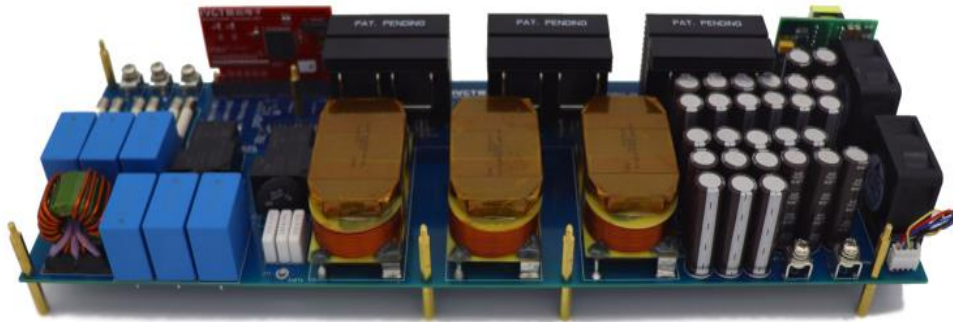


图 1-2 三相无桥 PFC 实物图

1.1 三相无桥 PFC

三相无桥 PFC 是一种大功率 AC-DC 的拓扑结构。本设计的 PFC 是工作在连续模式（CCM）。SiC MOSFET 工作频率在 65kHz。由于碳化硅 MOSFET 有极小的输出电容和接近零的反向恢复，它是硬开关电路的理想开关器件。与传统的 IGBT 应用相比，开关频率得到很大的提升，同时可以保持 98% 的高效率。

1.2 门级驱动

SiC MOSFET 的门级驱动信号使用的是型号为 IVCR1401 的驱动芯片，是一款在 8 管脚封装集成负压驱动，并提供所有必需的保护和通信功能的碳化硅 MOSFET 栅极驱动芯片，具有更快的开关速度，新型碳化硅 MOSFET 专用栅极驱动芯片内部集成了负压电路，在无需外加负压电源的情况下，可以完成输出负压驱

动提供更多的噪声裕量，使系统更稳定运行于各种复杂的应用环境，集成的过饱和/过流保护功能，响应时间可编程，且最快响应仅有数百纳秒，可以更及时的保护碳化硅器件在各种干扰甚至短路情况下不损坏，同时将侦测到的错误信号向控制器汇报，新型碳化硅 MOSFET 栅极驱动芯片还内置了 5V 电源给隔离器供电，简化了配合隔离器芯片的电路设计。IVCR1401 驱动电路示意图如图 1-3。

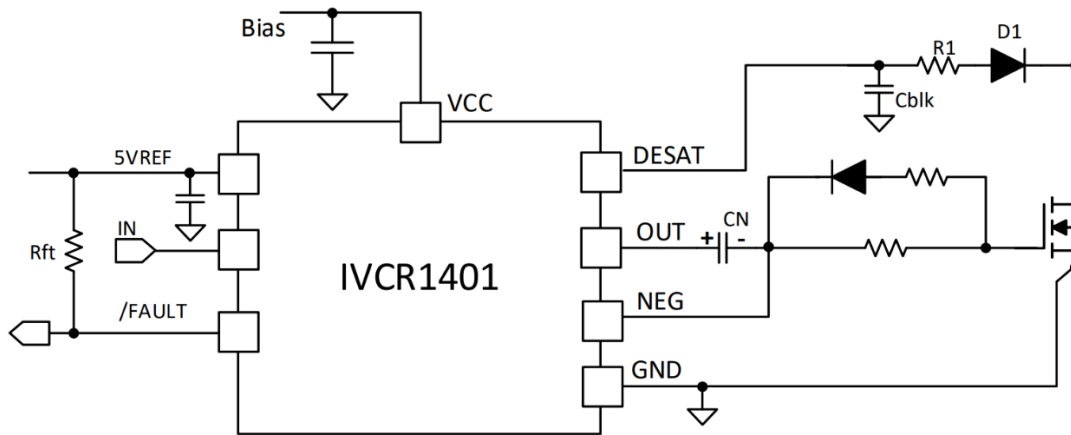


图 1-3 IVCR1401 驱动电路示意图

SiC MOSFET 开关速度非常快，一般可以达到 50V/ns 以上，这么快的 dv/dt 会通过 SiC MOSFET 的 C_{gd} 在栅极电阻上产生一个尖峰电压。这个尖峰电压会导致 SiC MOSFET 误开通或者是负压超压从而导致栅极损坏。为了避免这个问题，在栅极电阻上并联一个背靠背的硅 MOS 管，当该管处于关闭状态时，一定的负压使得左边的 MOS 管体二极管导通，右边的 MOS 处于打开的状态，这样相当于将栅极电阻短路，从而使得米勒电流产生的压降减小。当该管处于打开时，IVCR1401 输出一定的正压，该正压使得两个 MOS 都处于关闭的状态，从而使得栅极电阻不再处于短路状态，处于传统的工作状态。从而使得米勒尖峰电压大大减小。

1.3 辅助电源供电板卡

辅助电源模块是使用 UCC28740 作为反激电路的控制芯片，反激电路以直流电源作为输入，经过反激电路产生一路+5V/1A，一路+12V/1A，其中 5V 电压用于给控制板卡以及驱动电路进行供电，12V 电压用于给风扇提供电源。实物图如图 1-4 所示。它自身是一款 1000V/20W 的参考设计(IVCT-REF00004)，具体信息可到 IVCT 网站下载。

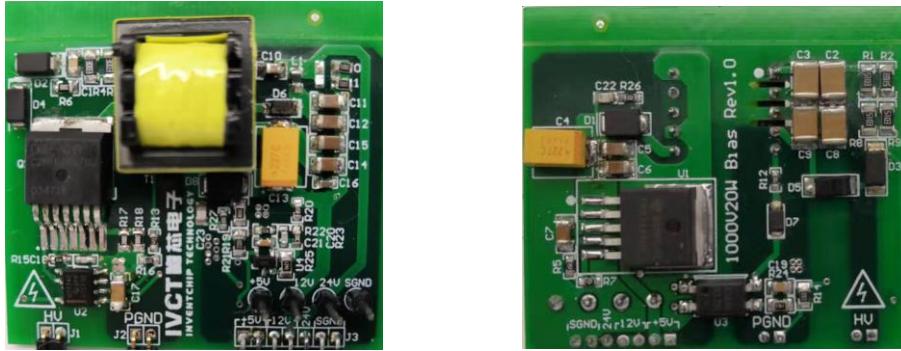


图 1-4 辅助电源板卡

1.4 控制板卡

该板卡的插座的插脚是根据 TI 公司生产的 DSP 板卡 TMDSCNCD280049C 而设计的，它可插 TI 的 DSP 板卡，也可插瞻芯电子生产的 Control Card F280049C (IVCT-REF00008) 或 FPGA 控制卡 (IVCT-REF00009) (使用的是 SPARTAN-6 系列的 FPGA、MCU 以及一块 AD7606 的 AD 数据采集模块所构成的)。FPGA 控制卡如图 1-5 所示。也可插瞻芯电子生产的 Control Card F280049C 使用的是 TI TMDSCNCD280049C 的 DSP，如图 1-6 所示。



图 1-5 控制板卡 1



图 1-6 控制板卡 2

2 硬件组成部分

2.1 基本硬件模块

这一章主要描述了三相无桥 PFC 的硬件组成，如图 2-1 所示，第一排从左至右依次是交流电源输入，控制板卡，SiC MOSFET 及其散热器，辅助电源板卡。第二排从左至右依次是 EMI 输入滤波器，NTC，缓启动继电器，主功率电感，直流母线电容和风扇。

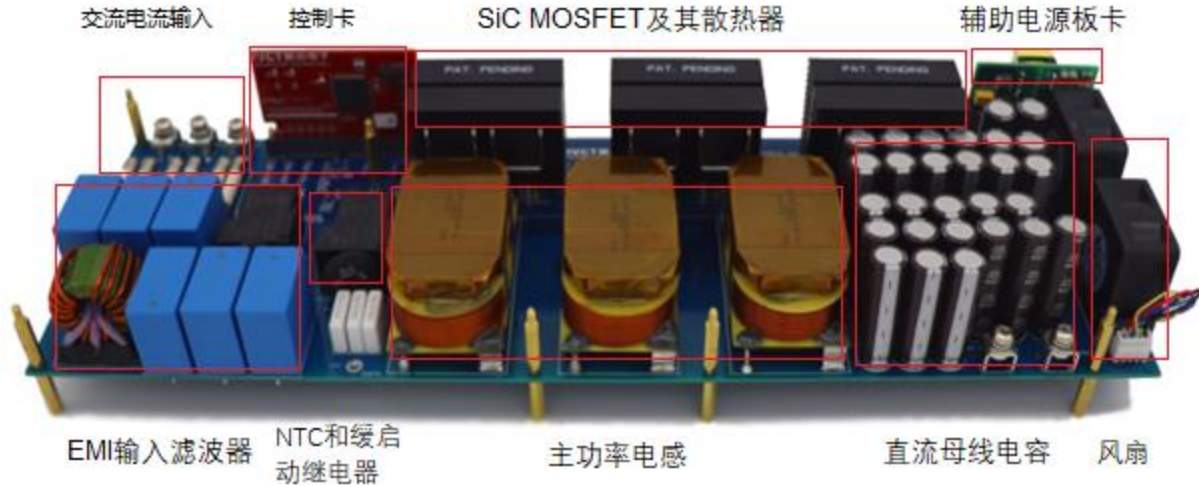


图 2-1 三相无桥 PFC 的硬件组成图

2.2 启动过程

将输入连接至实验室三相交流电源上，输出连接至电子负载上。将实验室三相交流电源的电压有效值不断增大，当交流电源的线电压有效值增加至 305V 时，三相无桥 PFC 开始工作，输出直流电压 600V~800V，不建议在最大负载情况下直接启动并工作。

3 测量结果

本章提供测量结果曲线图，所有的测量结果均是在温度为 25 摄氏度的环境下，输入三相线电压 305VAC~400VAC 交流电源，输出 600V~800V 直流电，65KHz 的开关频率的情况下进行测量。

3.1 效率曲线

使用 SiC MOSFET 的三相无桥 PFC 最佳的情况可以达到 98%以上的效率，图 3-1 蓝色线展示了瞻芯 (IV1Q12050T4)效率曲线，橘色曲线为英飞凌(IMZ120R045M1)效率曲线，从图中可以看出瞻芯的 50mOhm 管子效率逼近英飞凌 45mOhm 管子效率。

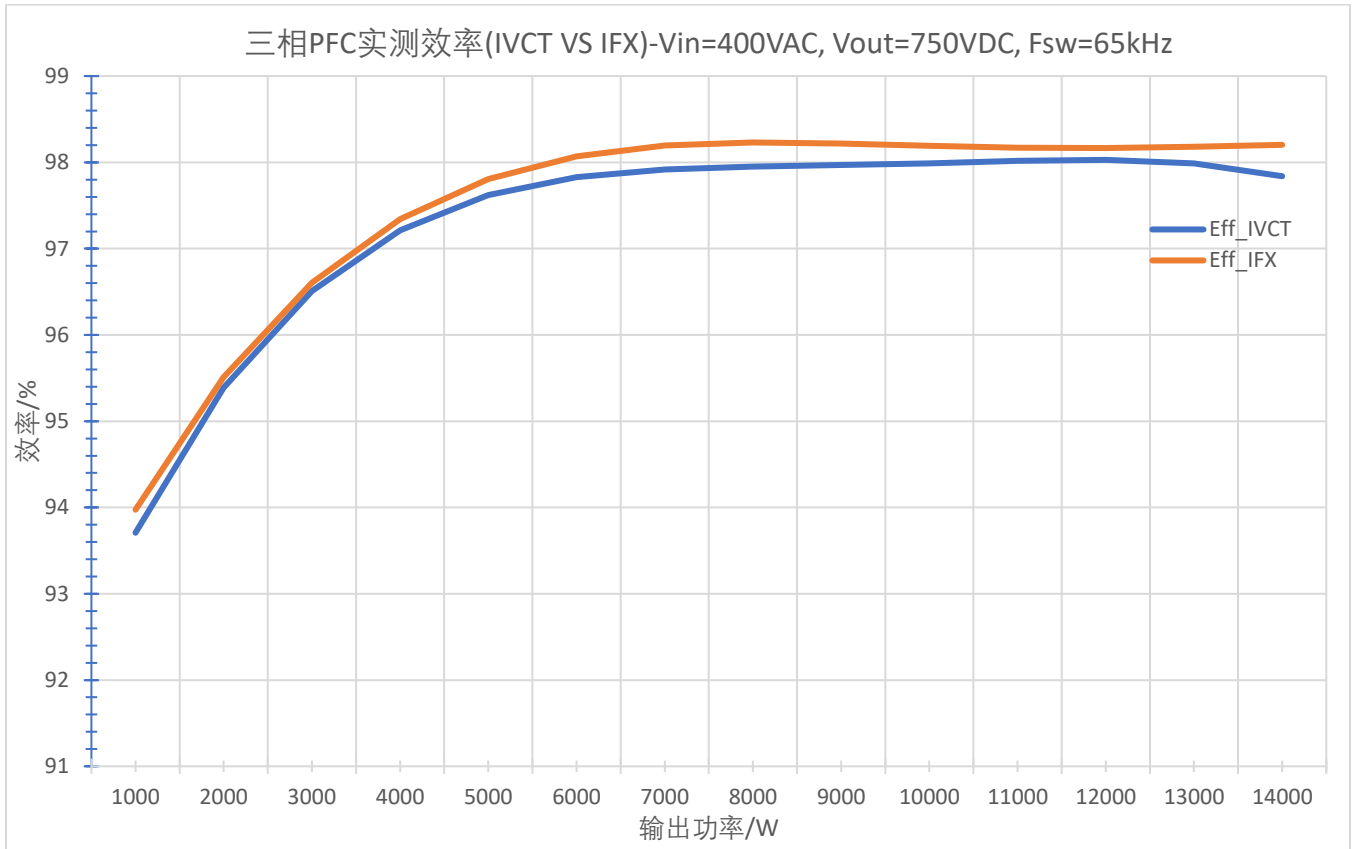


图 3-1 三相无桥 PFC 效率曲线

3.2 功率因数曲线

使用 SiC MOSFET 三相无桥 PFC 功率因数曲线如图 3-2 所示

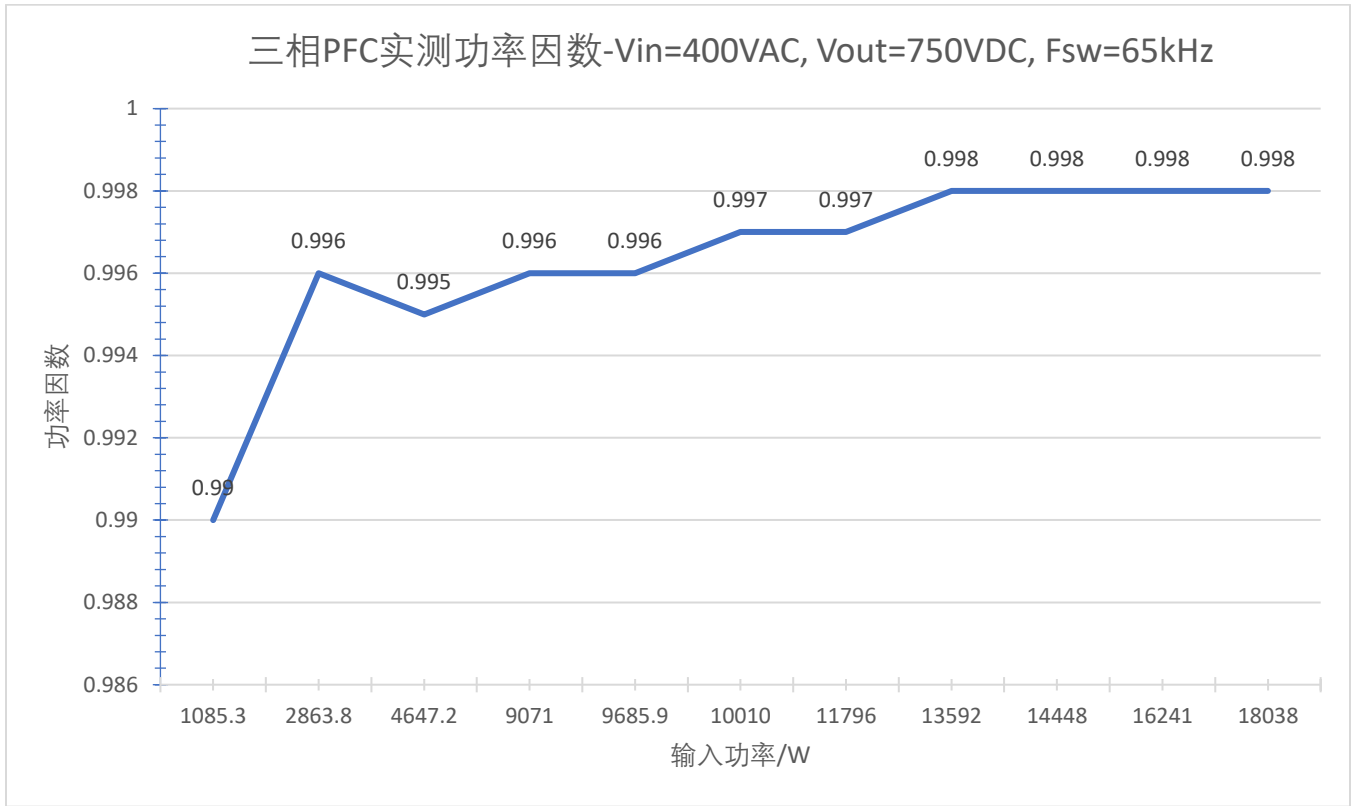


图 3-2 三相无桥 PFC 功率因数曲线

3.3 电流谐波失真曲线

使用 SiC MOSFET 三相无桥 PFC 电流总谐波失真曲线如图 3-3 所示

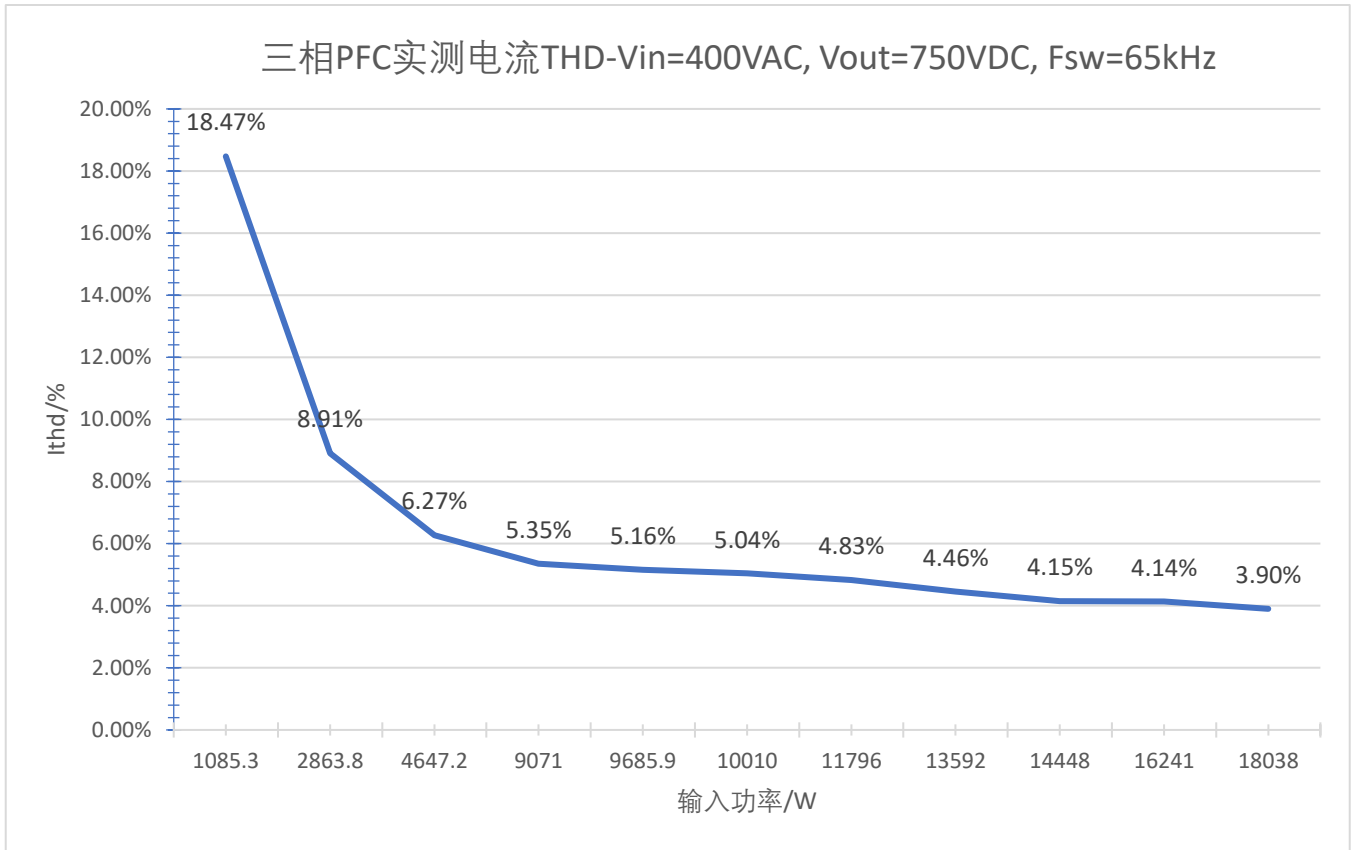


图 3-3 三相无桥 PFC 电流总谐波失真曲线

3.5 开关曲线以及电流波形

图 3-5 展示了输入电压以及输入电流波形，电路工作在连续模式下。其中蓝色线条表示输入线电压，绿色线条表示输入相电流。图 3-6 展示了三相无桥 PFC 工作在输入线电压为正半周期的 SiC MOSFET 开关管驱动波形，其中绿色线条为 A 相下管驱动波形，紫色线条为 B 相下管驱动波形，天蓝色线条为 C 相下管驱动波形。图 3-7 展示了 SiC MOSFET 开关管开通 VDS 波形。图 3-8 展示了 SiC MOSFET 开关管关闭 VDS 波形。

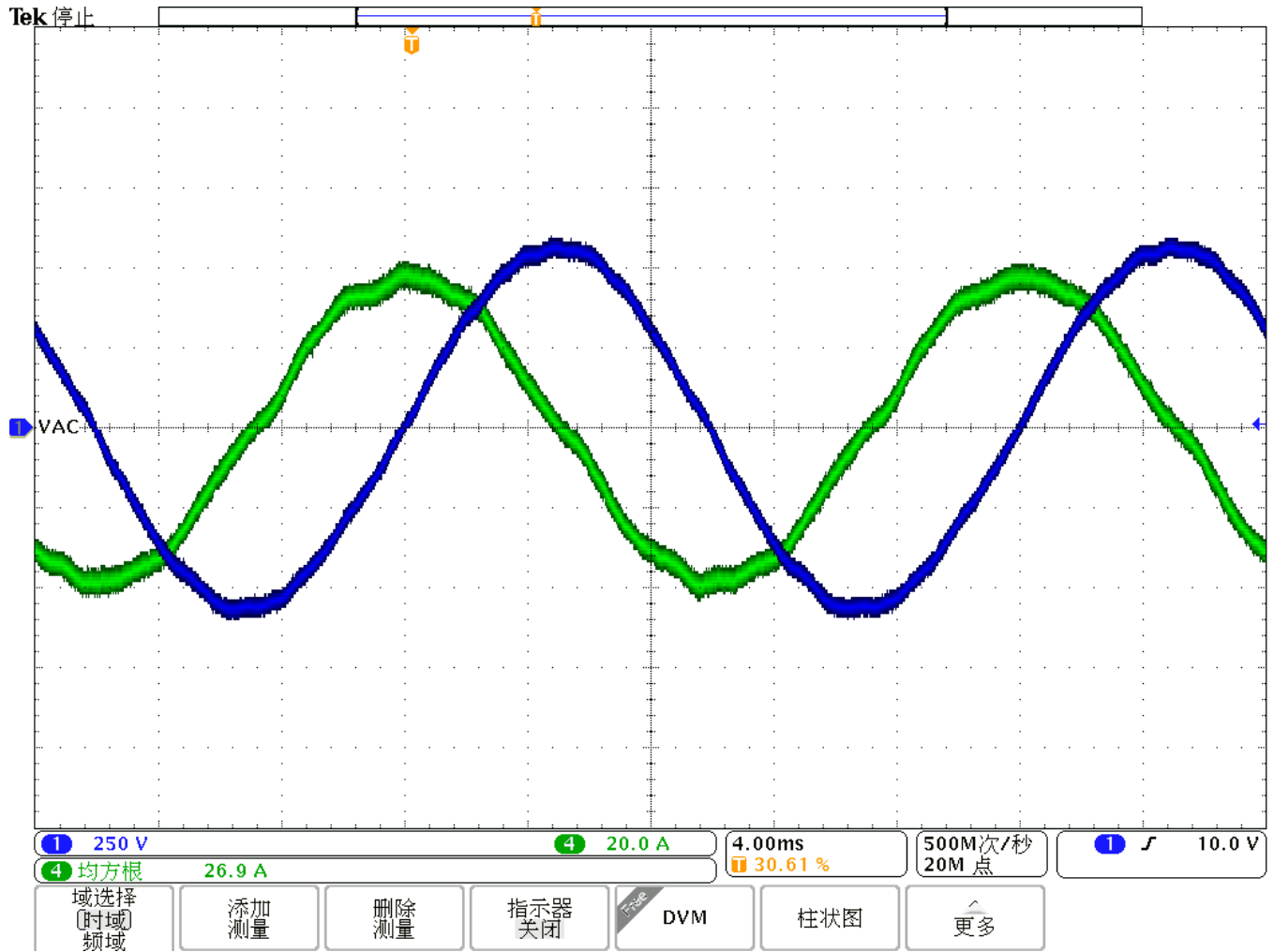


图 3-5 输入线电压以及输入相电流波形

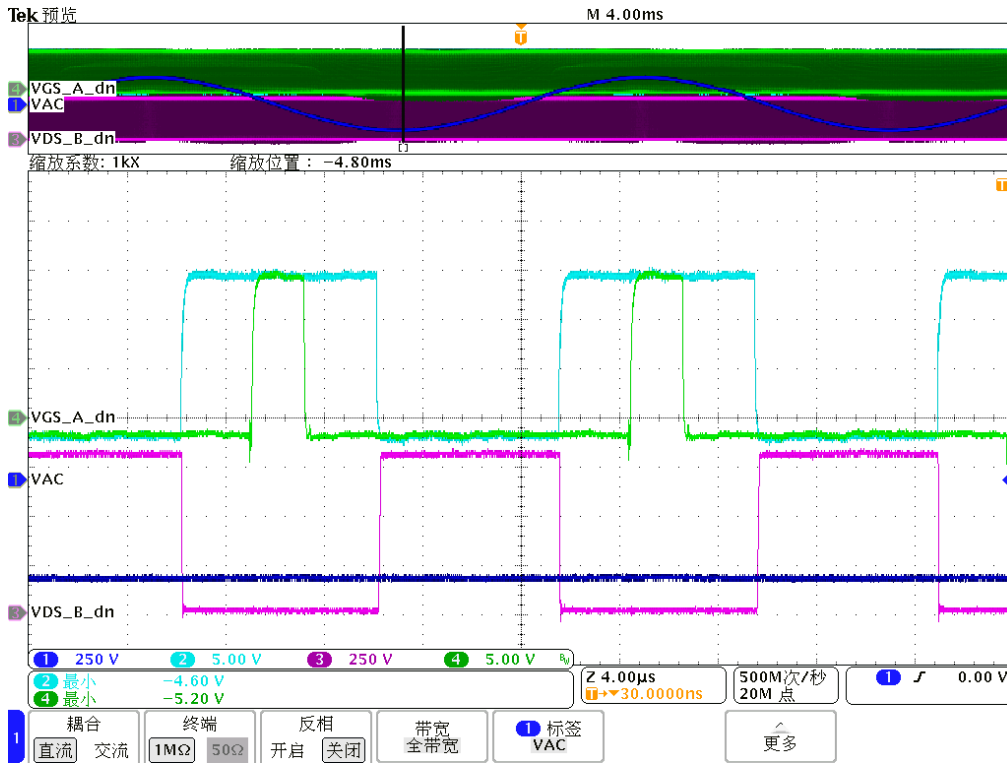


图 3-6 线电压负半周 SiC MOSFET 驱动波形

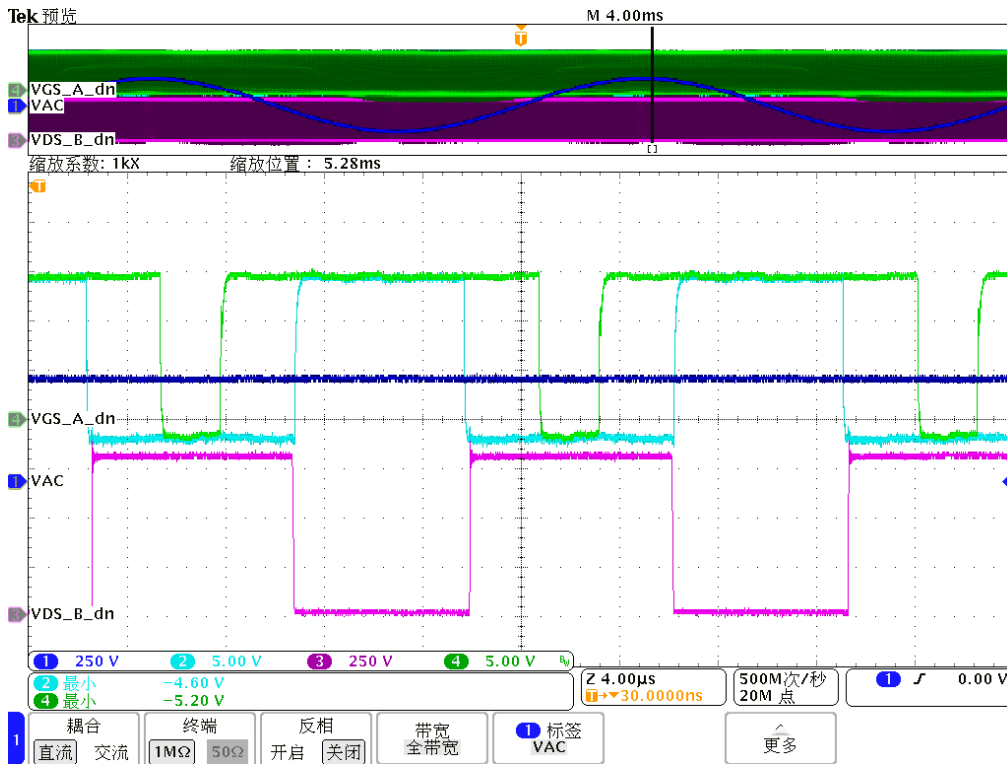


图 3-7 线电压正半周 SiC MOSFET 驱动波形

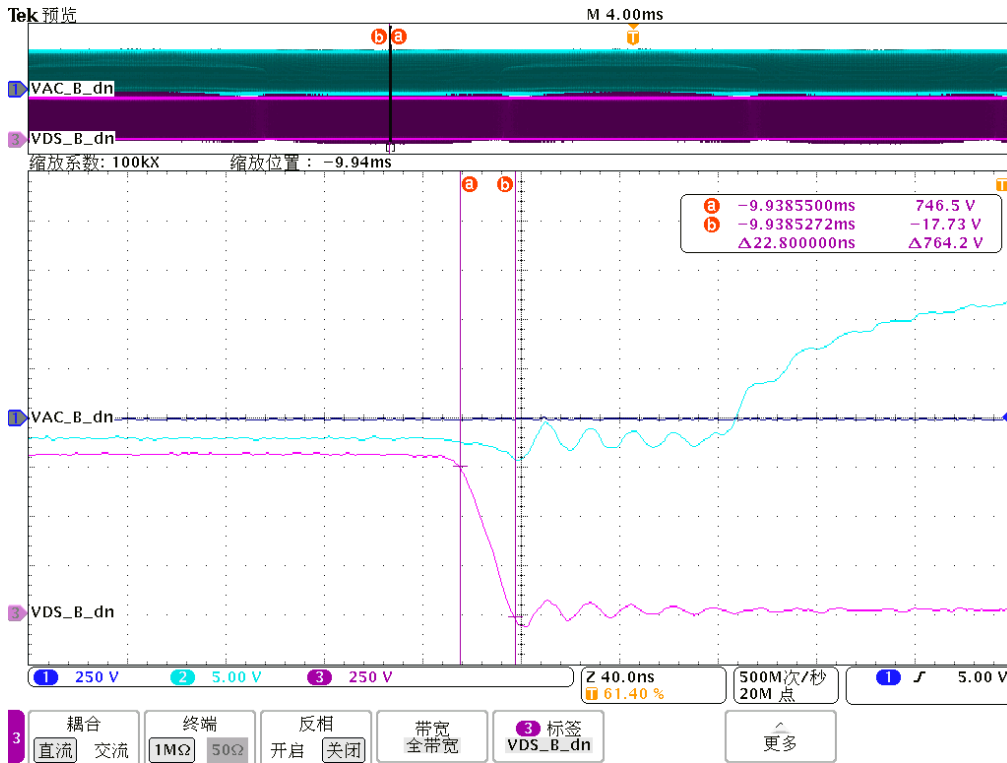


图 3-7 SiC MOSFET 开通 VDS 波形

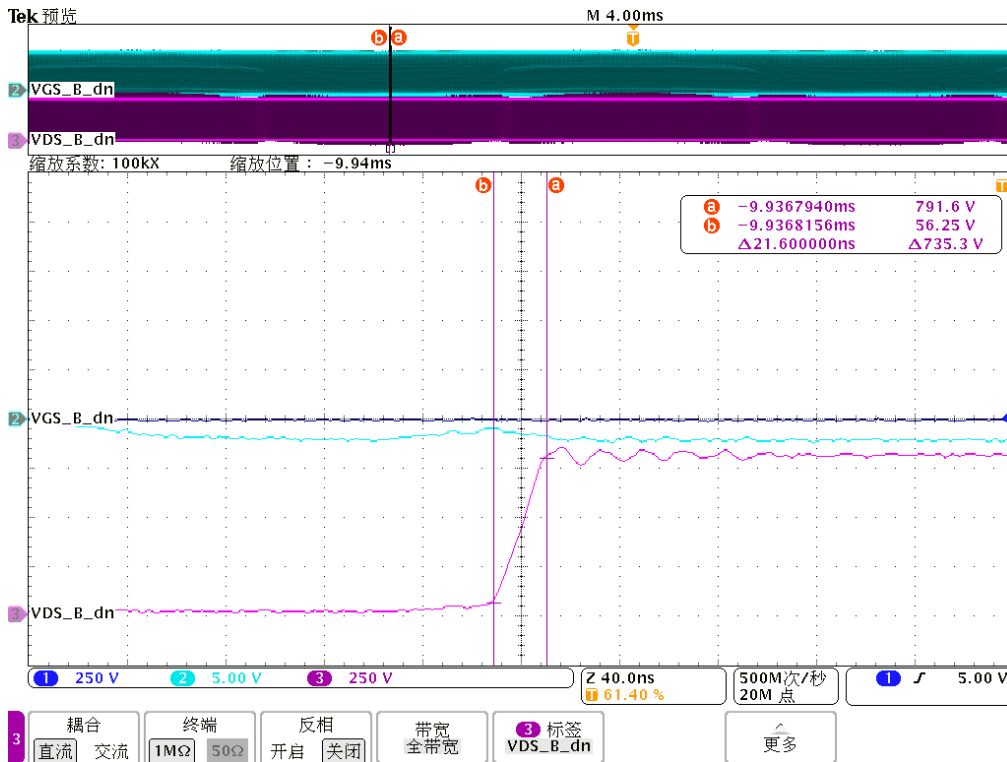


图 3-8 SiC MOSFET 关断 VDS 波形

3.6 SiC MOSFET 驱动电路 Layout 建议

对于 SiC MOSFET 这一类宽禁带器件，其开关速度比传统的 IGBT/MOSFET 快很多，一般可以达到 30~50V/ns，开关过程一般在 25ns 以下。为了达到这么快的开关速度，SiC MOSFET 的驱动电路需要精心设计。SiC MOSFET 驱动电路首先要确定驱动电压，一般根据数据手册的建议值先做初步实验，在满载功率的情况下，调节负压和栅极电阻直到米勒尖峰不超过最大负压值同时保证不会导致米勒误开通。SiC MOSFET 驱动电路的 Layout 一定要保证驱动器尽量靠近 SiC MOSFET 管脚，越近越好。下面以图 3-9 为例，解释 SiC MOSFET 驱动电路的 Layout 注意点。

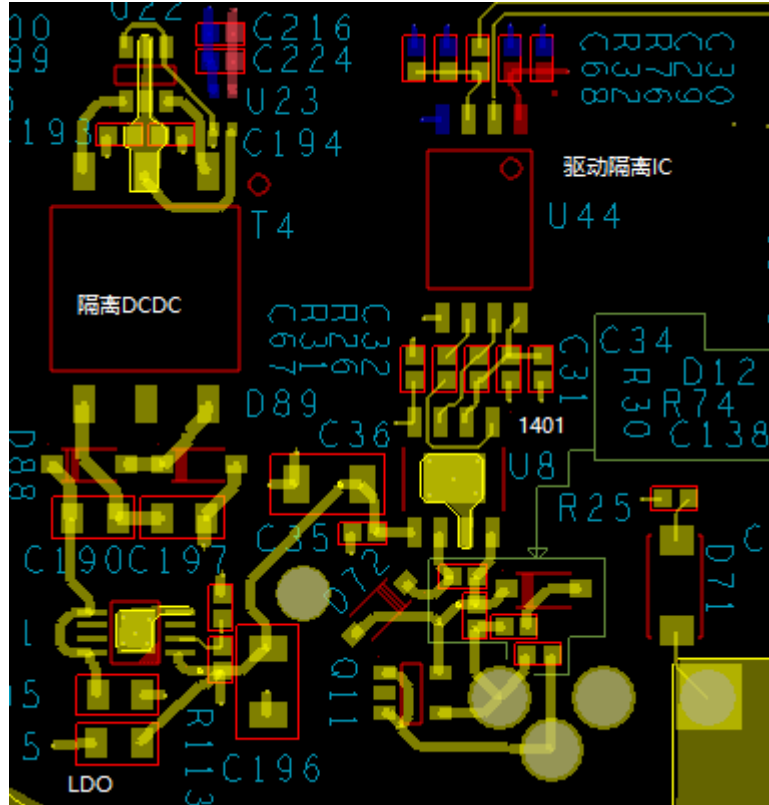


图 3-9 SiC MOSFET 驱动电路 Layout 范例

图 3-9 展示了一个桥臂内下管的 SiC MOSFET 驱动电路实例。左侧为驱动电路供电的隔离电源，采用 SN6505+750313638(变压器)的方式实现隔离供电，同时隔离 DCDC 的输出经过 LDO 进一步稳压到合适的电压，以适配不同的驱动电压需求。左侧上半部分为隔离 DCDC，下半部分为 LDO，右上部分为驱动信号的隔离 IC，下半部分为瞻芯特有的集成负压功能的 SiC MOSFET 专用驱动器 IVCR1401。最右下方是 TO247-4 封装的 SiC MOSFET。为了减小驱动回路的寄生电感，需要驱动器 IVCR1401 尽可能的靠近 SiC MOSFET 的引脚，在图 3-9 中可以看到，驱动器 IVCR1401 的输出引脚离 SiC MOSFET 的栅极只有一个 0603 封装的长度和宽度距离之和(C34 的宽度加上 R30 的长度)。这么短的距离可以保证驱动回路寄生电感极低，使得 SiC MOSFET 的栅极电阻 R_g 可以尽可能小，从而使得 SiC MOSFET 以尽可能快的速度开关，从而最大程度发挥 SiC MOSFET 的性能。

为了减小主功率电路对驱动电路的干扰，在 IVCR1401 的下方邻近层需要增加一层接地平面，该接地平面需要连接到 SiC MOSFET 的 Kelvin Source 引脚上。详见图 3-10 中墨绿色平面。驱动电路还需要注意一点是，务必保证主功率回路尽量远离驱动电路，该参考设计采用了功率和控制分区布局，功率回路和驱动控制电路分别在 PCB 的不同位置，以尽可能减少主功率回路对驱动和控制电路的干扰。PCB 区域分布请见图 3-11。图 3-11 中左侧为交流输入及 EMI 滤波器部分，右下方为主功率回路，右上方为驱动及控制电路。由于功率回路远离驱动和控制电路，从而减小了对驱动和控制电路的干扰，实测的驱动波形也反映了这一点，实测的驱动波形(图 3-6)除了有米勒尖峰以外，看不到其他毛刺或者尖峰电压，反映了功率回路对于驱动电路几乎没有影响。

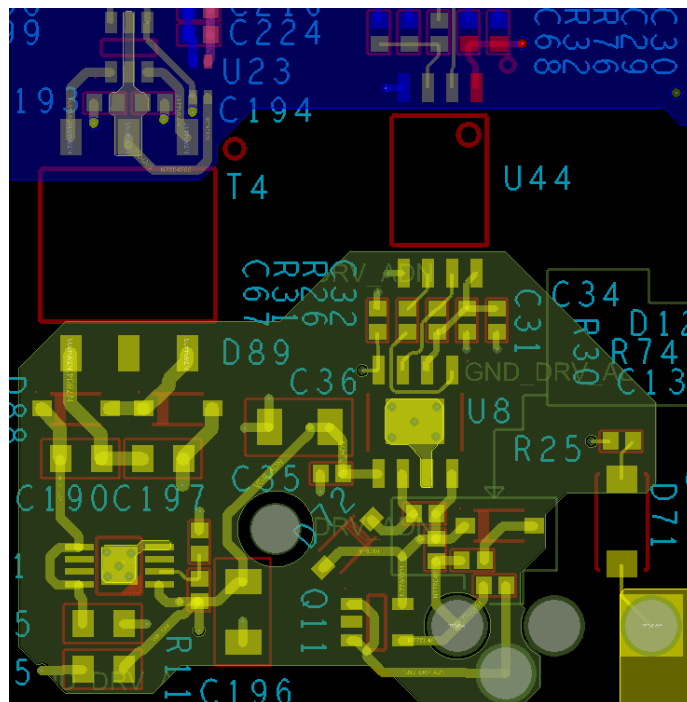


图 3-10 SiC MOSFET 驱动电路接地平面

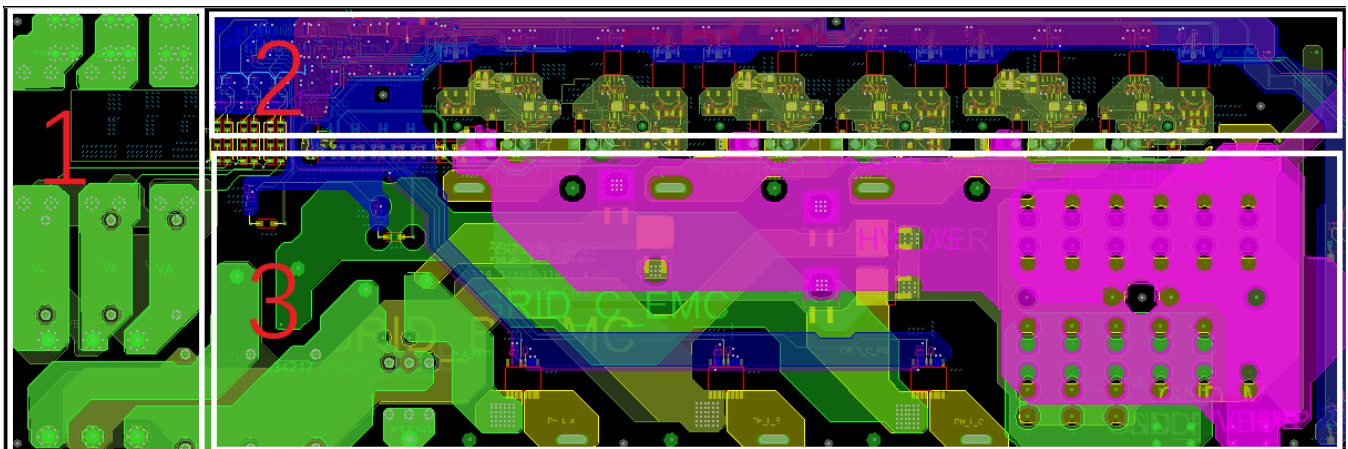


图 3-11 PCB 分区布局

4 参数说明

说明：所有测量实验均是在实验室温度为 25 摄氏度时进行。

输入交流电压 $V_{in} = 400 \text{ Vrms}$ (线电压)

输出功率 $P_{out} = 1 \text{ kW to } 20\text{kW}$

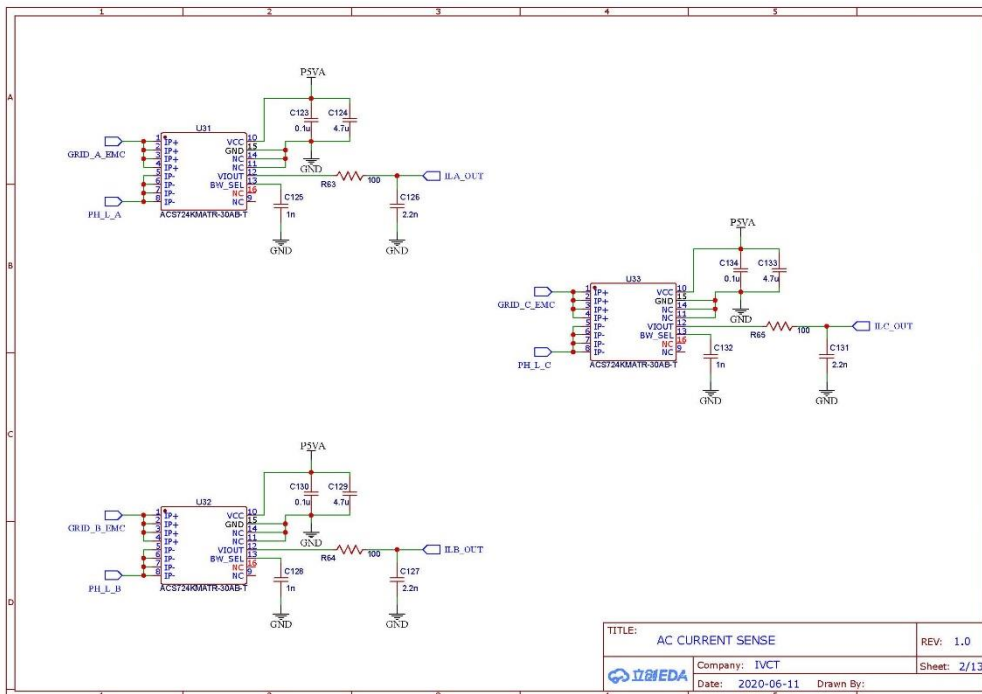
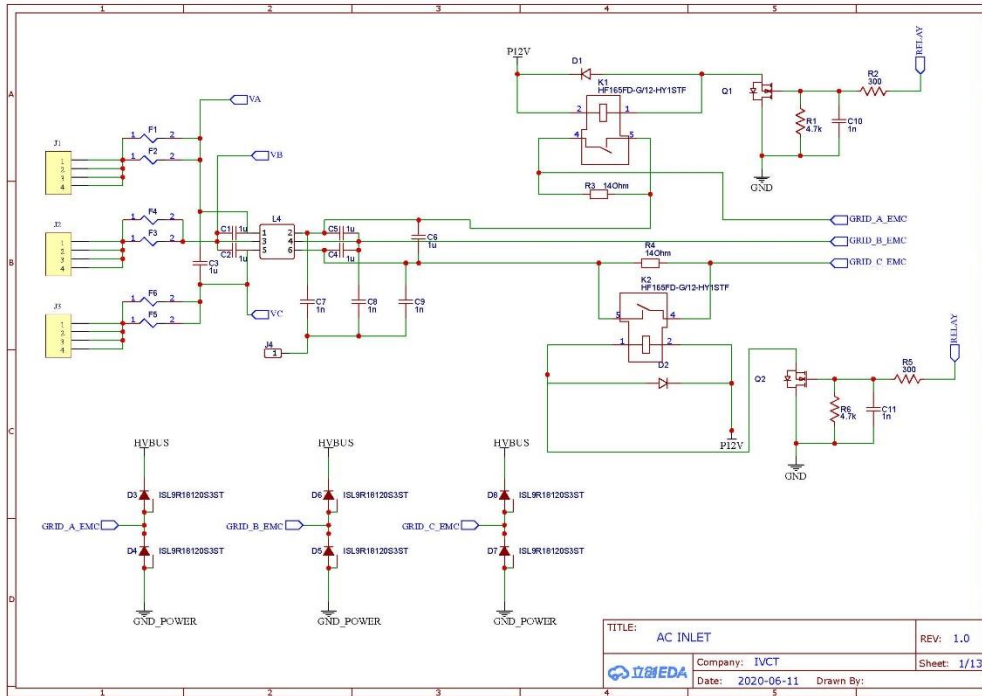
开关管控制频率 $F_{sw} = 65 \text{ kHz}$

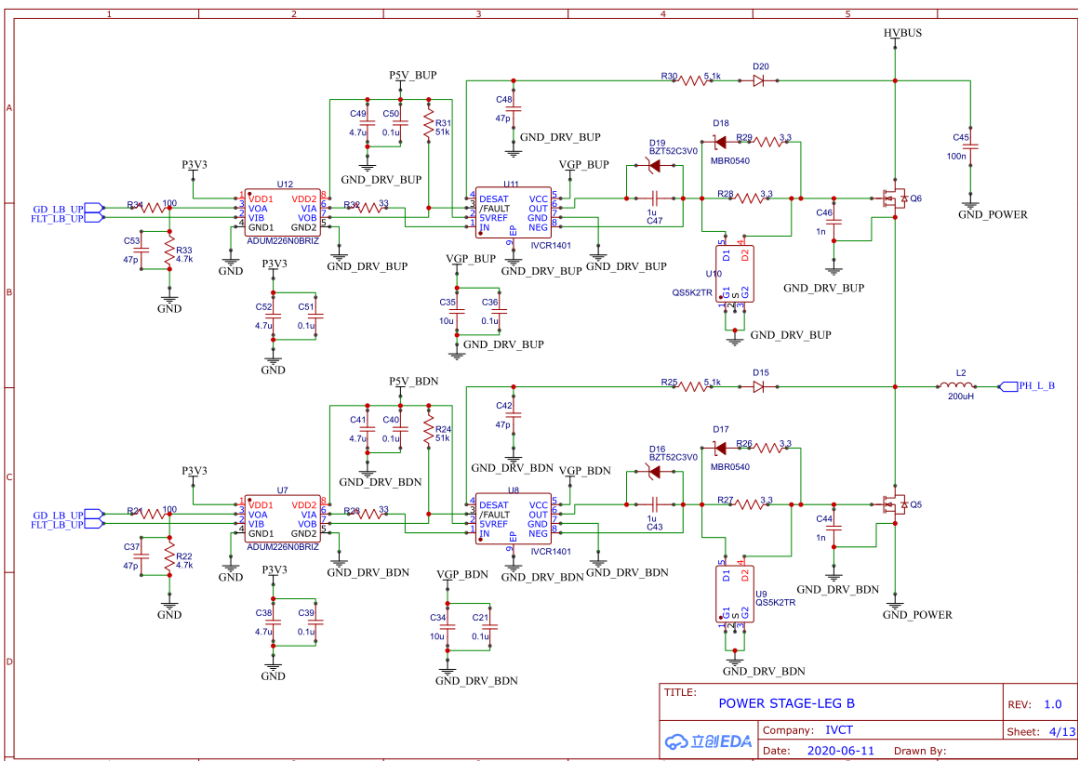
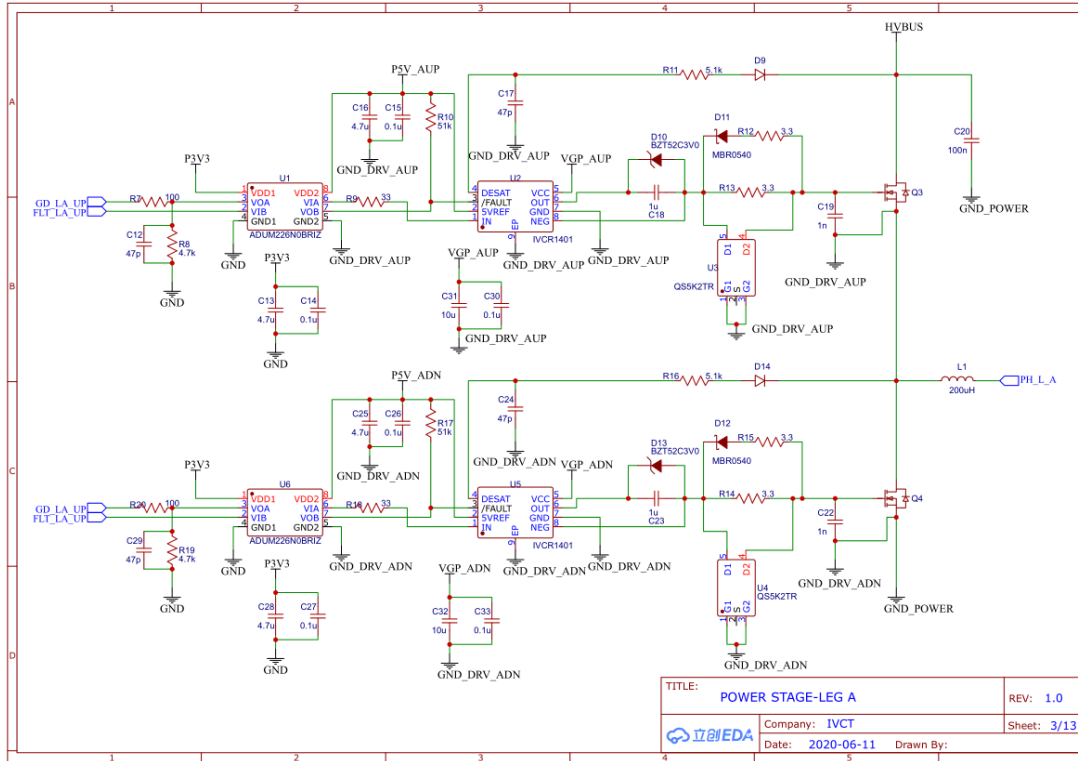
测试温度 $T = 25^{\circ}\text{C}$

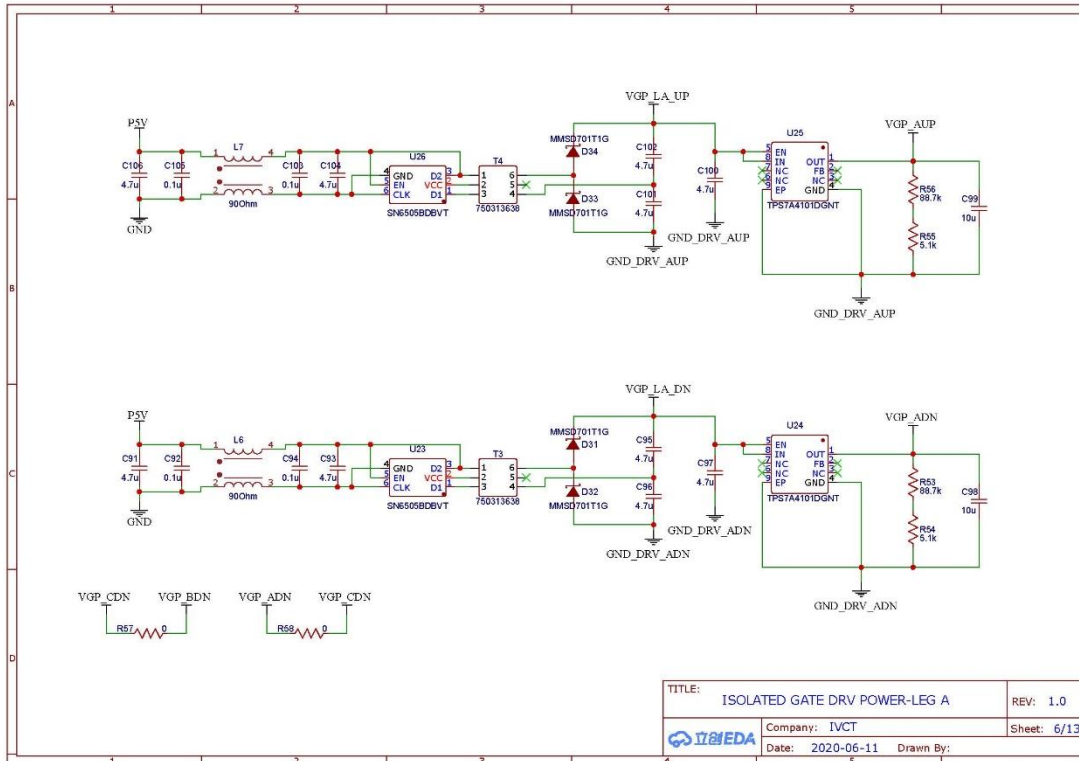
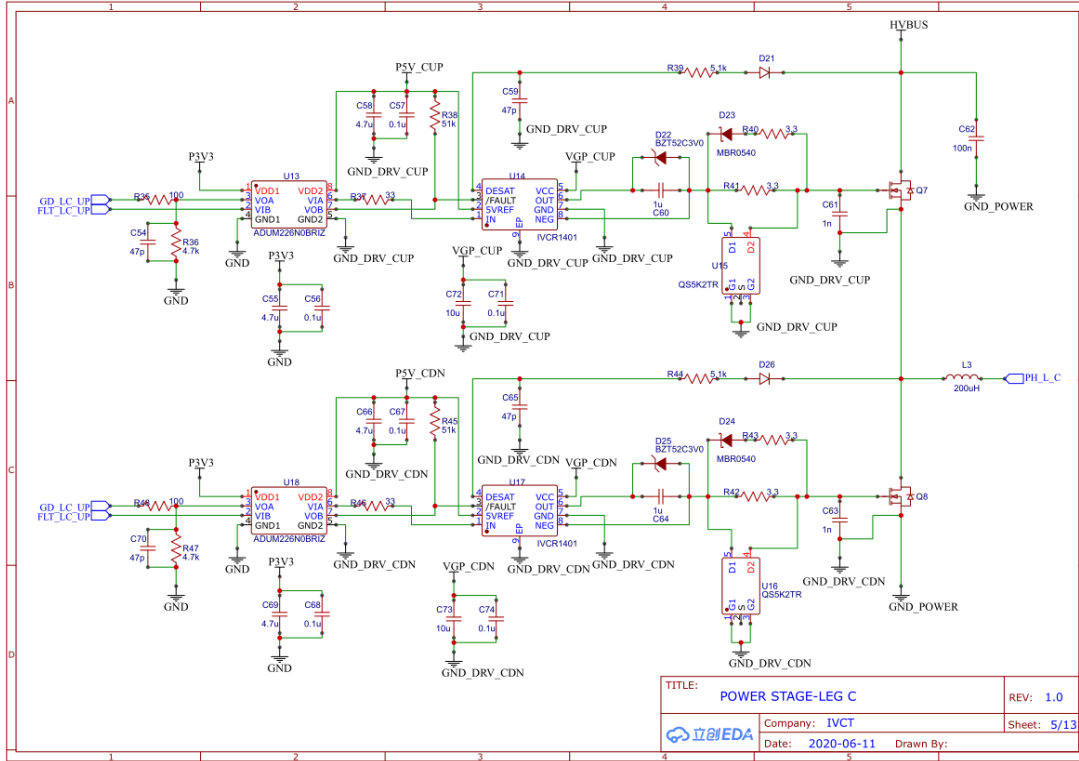
输出电压 $V_{out,nom} = 750 \text{ VDC}$

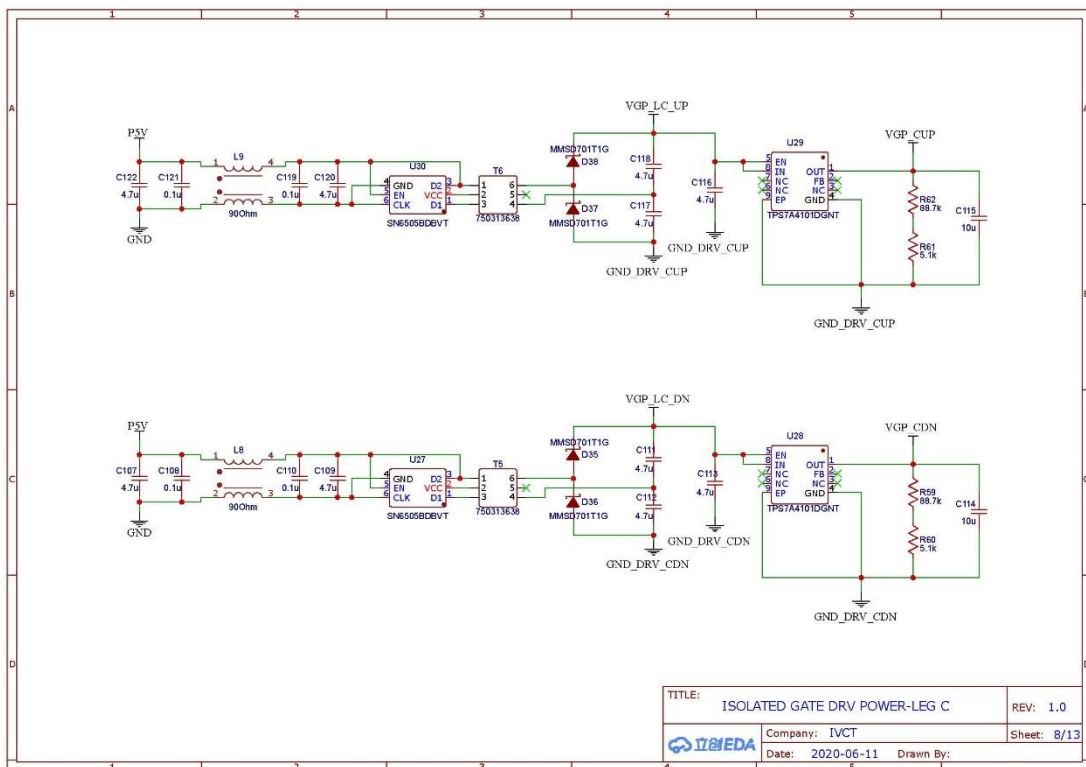
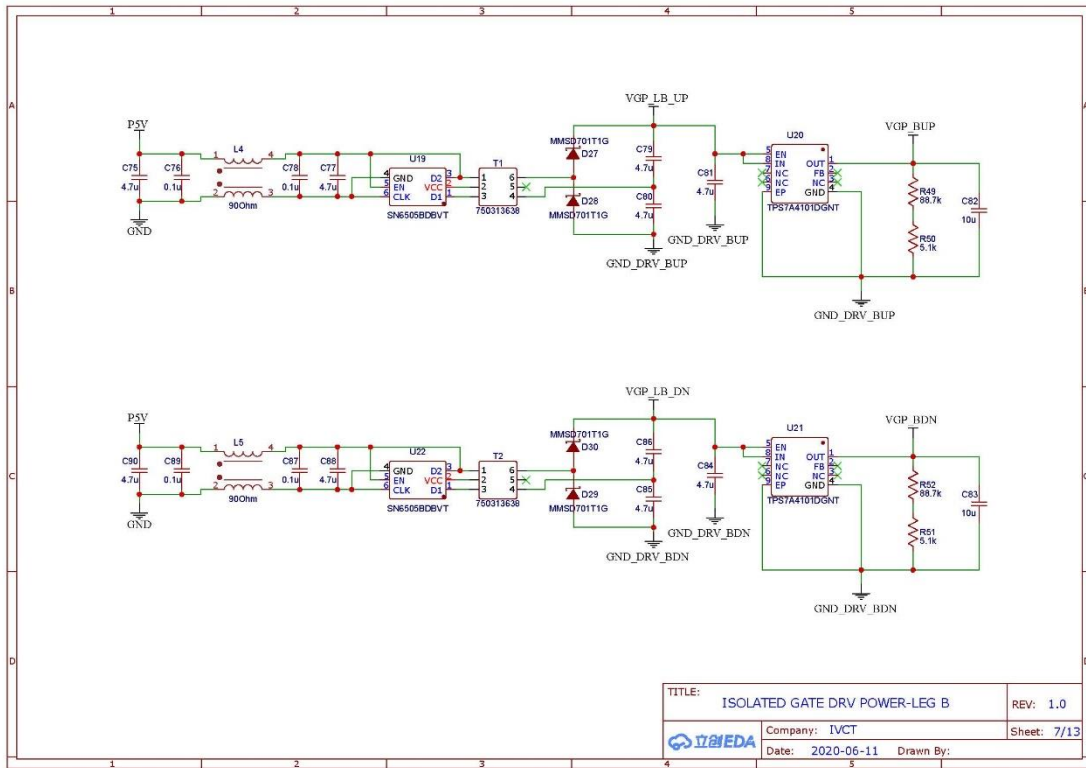
5 附录

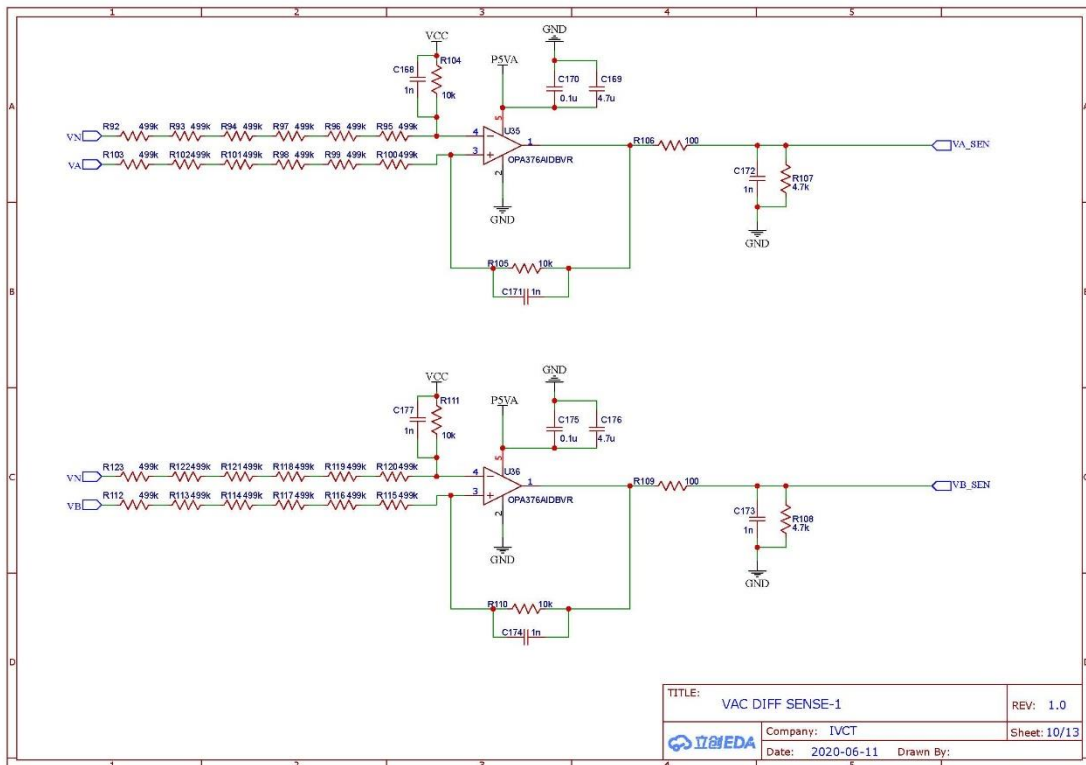
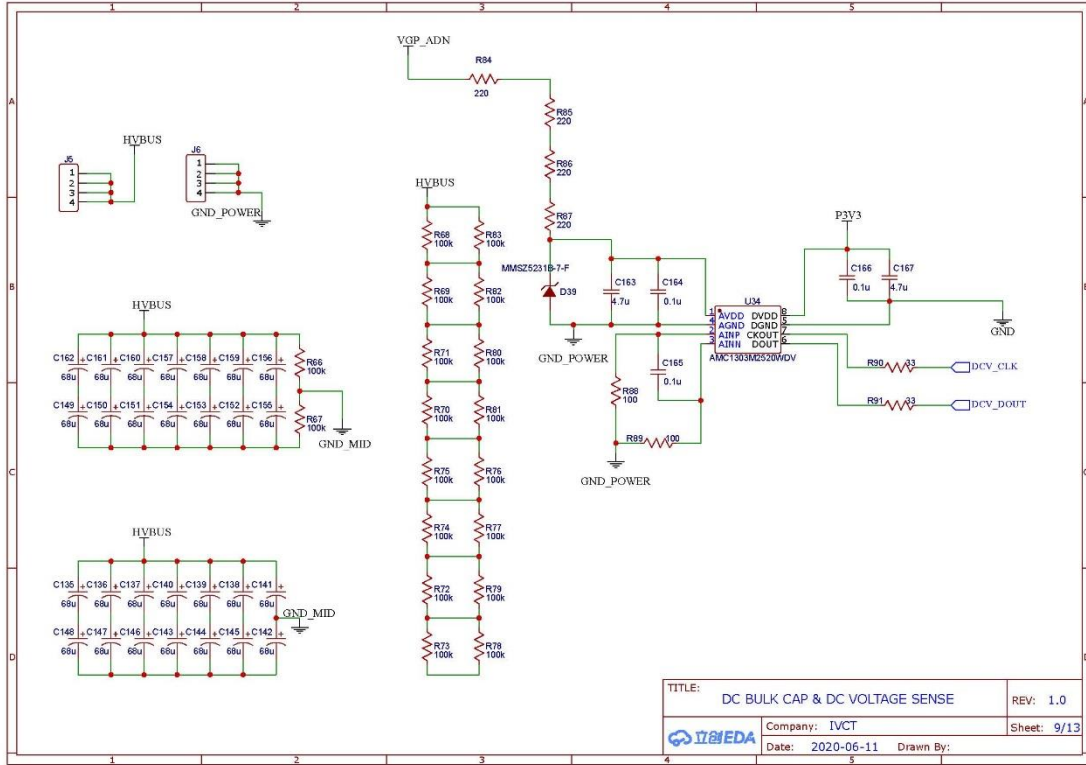
5.1 主电路原理图

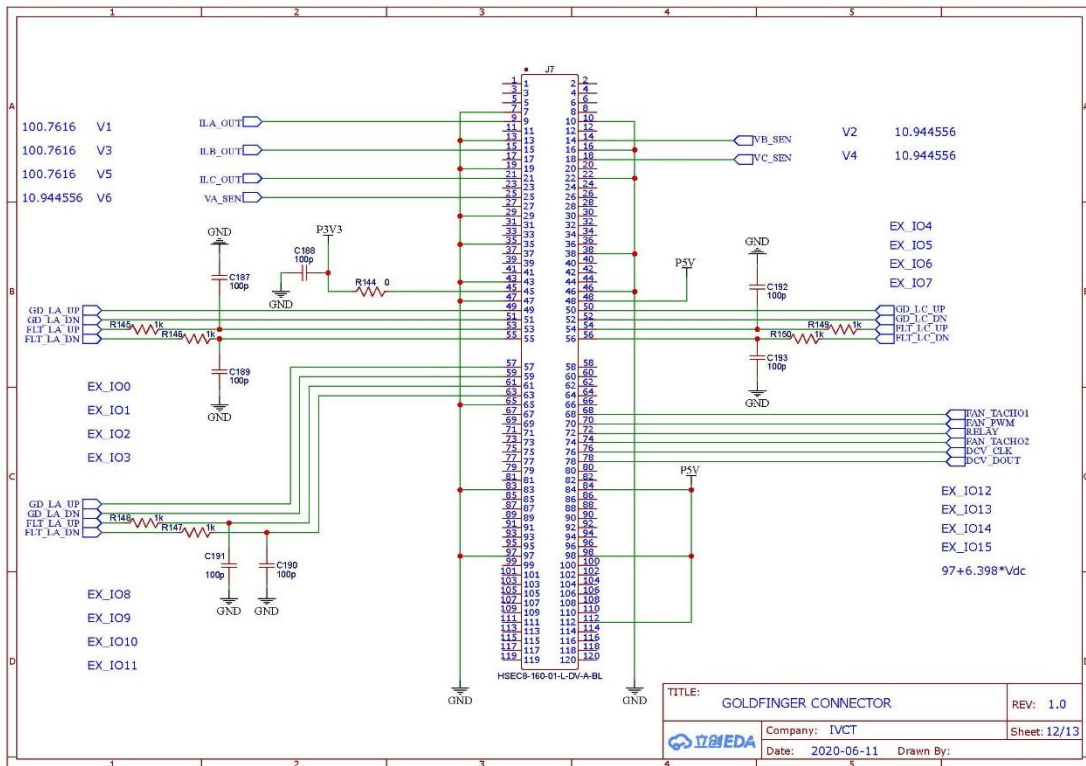
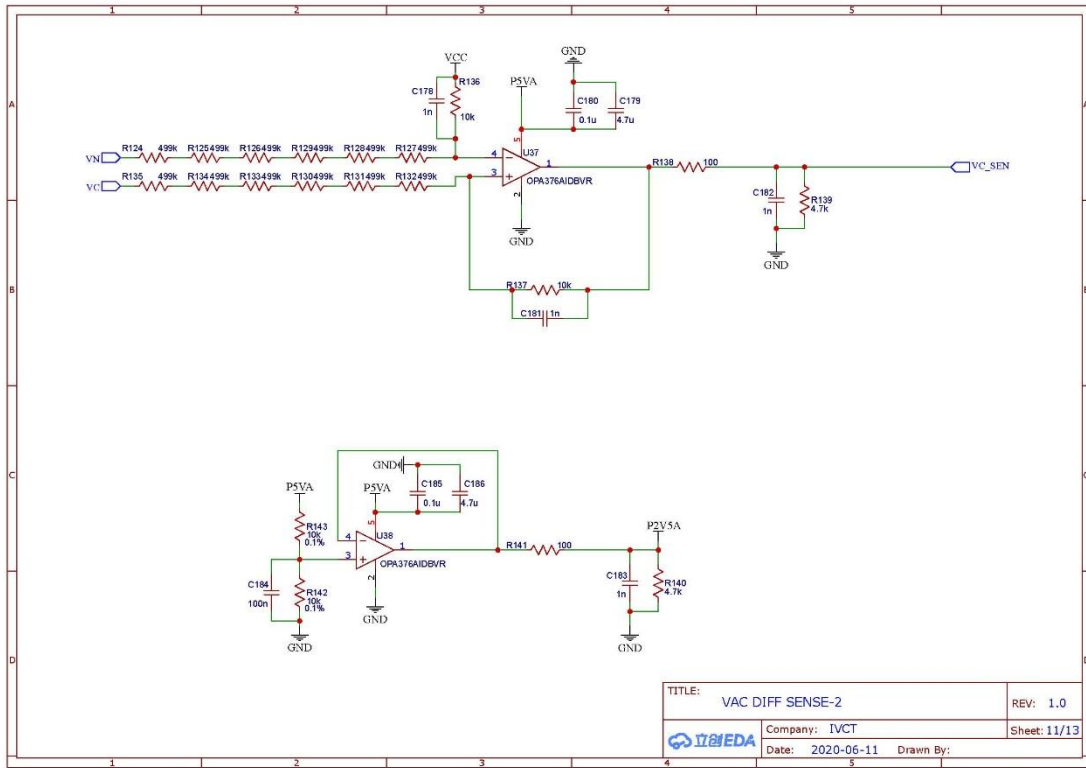


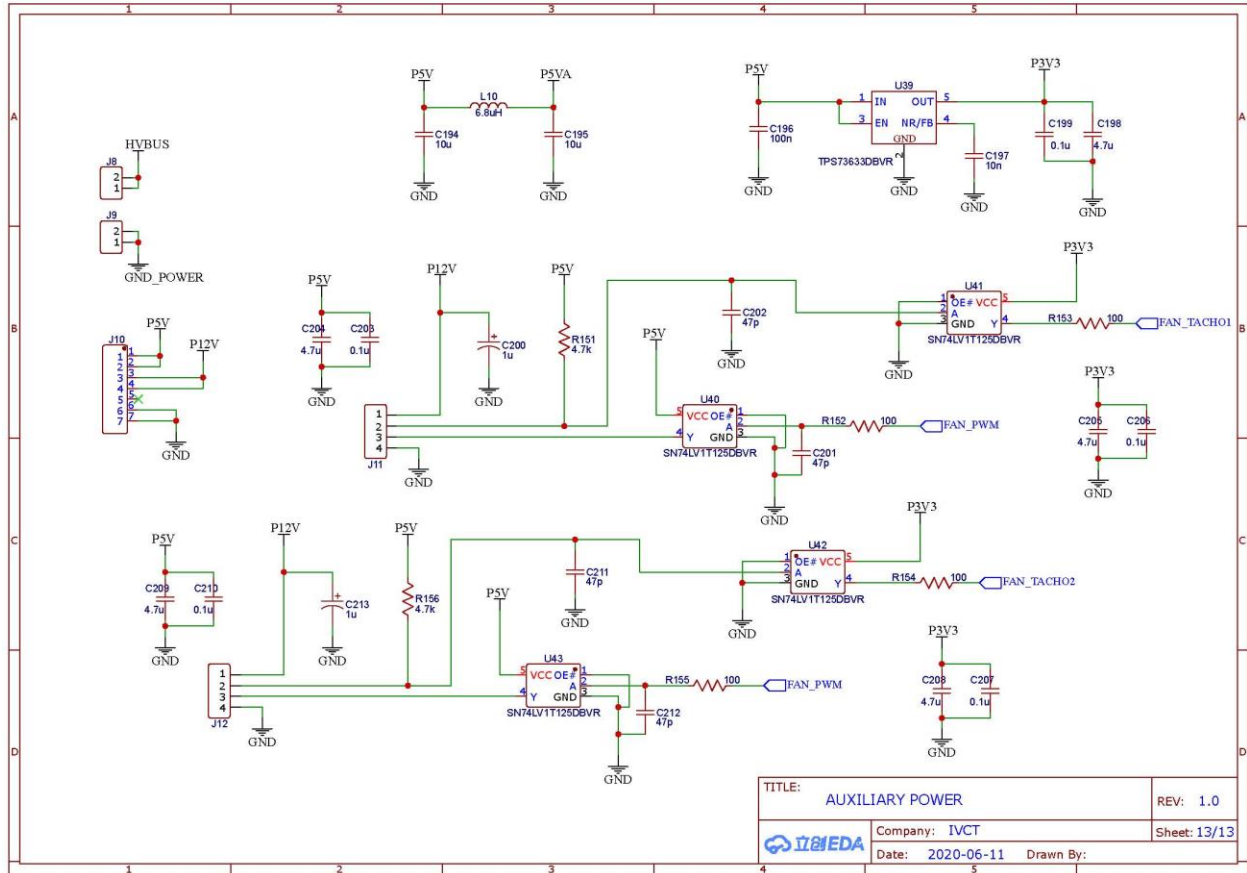












5.3 Bill of Materials (BOM)

Item Number	Quantity	Part Reference	Description	Manufacturer
1	28	C4 C5 C276 C277 C278 C279 C280 C281 C282 C283 C284 C285 C286 C287 C288 C289 C290 C291 C292 C293 C294 C295 C296 C297 C298 C299 C300 C301	NZE450VB68M12.5*40_3.5LB,Cap,AL,450V,68uF,20%,12.5X40mm	SAMYOUNG
2	37	C10 C30 C31 C41 C50 C56 C89 C93 C139 C146 C149 C156 C159 C166 C169 C176 C179 C186 C191 C194 C199 C202 C207 C210 C215 C218 C223 C226 C232 C235 C247 C248 C253 C258 C304 C307 C310	Cap,Ceramic,16V,X7R,10%	FH
3	51	C11 C29 C32 C34 C35 C42 C51 C88 C94 C105 C140 C142 C145 C147 C150 C152 C155 C157 C160 C162 C165 C167 C170 C172 C175 C177 C180 C182 C185 C187 C192 C193 C200 C201 C208 C209 C216 C217 C224 C225 C230 C231 C234 C246 C249 C250 C252 C257 C303 C306 C309	Cap,Ceramic,50V,X7R,10%	MURATA
4	12	C17 C18 C99 C101 C103 C243 C251 C254 C255 C256 C259 C260	Cap,Ceramic,50V,C0G,5%	MURATA
5	18	C21 C22 C23 C190 C195 C197 C198 C203 C205 C206 C211 C213 C214 C219 C221 C222 C227 C229	Cap,Ceramic,50V,X5R,10%	HEC
6	12	C36 C148 C158 C168 C178 C188 C189 C196 C204 C212 C220 C228	Cap,Ceramic,50V,X7R,10%	SAMSUNG
7	3	C52 C233 C236	Cap,Ceramic,50V,X7R,10%	FH
8	16	C67 C68 C85 C141 C144 C151 C154 C161 C164 C171 C174 C181 C184 C305 C308 C311	Cap,Ceramic,50V,NP0,5%	YAGEO
9	2	C80 C302	16TQC150MYF,Cap,TANT,POSCAP,16V,150uF,20%,7343mm	PANASONIC
10	2	C87 C108	Cap,Ceramic,50V,X7R,10%	CCTC
11	2	C95 C96	Cap,Ceramic,16V,X5R,10%	SAMSUNG
12	2	C104 C107	Cap,Ceramic,6.3V,X5R,20%	TAIYO YUDEN
13	6	C106 C113 C263 C264 C265 C266	Cap,Ceramic,50V,X7R,10%	YAGEO
14	1	C111	Cap,Ceramic,16V,X7R,10%	YAGEO
15	9	C138 C143 C153 C163 C173 C183 C273 C274 C275	Cap,Ceramic,50V,C0G,5%	WALSIN
16	3	C237 C238 C239	PME295RB4100MR30,Y1,440VAC,1nF,2pin,18x5.5x12.5mm,15mm Pitch,-40 TO 115C	KEMET
17	6	C267 C268 C269 C270 C271 C272	B32914A5105M,X1,530VAC,1uF,2pin,31.5x18x27.5mm,27.5mm Pitch,-40 TO 110C	TDK
18	3	C312 C313 C314	Cap,X7R,1KV,10%	HEC

19	6	D2 D98 D99 D100 D102 D103	ISL9R18120S3ST,General Purpose Diode,1200V,18A,TO263,-55 TO 175C	ON
20	12	D5 D6 D88 D89 D90 D91 D92 D93 D94 D95 D96 D97	MMSD701T1G,Schottky Diode,70V,0.2A,SOD123	ON
21	6	D12 D74 D77 D80 D83 D86	MBR0540,Schottky Diode,40V,0.5A,SOD123	MCC
22	2	D15 D104	RSFJL R3, Fast Recovery Diode,50V,0.5A,SMA	TS
23	6	D71 D73 D76 D79 D82 D85	STTH112A,1200V,1A,UltraFast Diode,SMA	ST
24	6	D72 D75 D78 D81 D84 D87	BZT52C3V0,Zener,3.0V,0.5W,SOD123,-55 TO 150C	MDD
25	1	D101	MMSZ5231B-7-F,5.1V Zener,0.5W,SOD123	DIODES
26	6	F1 F2 F4 F5 F8 F9	0324030.MXP,30A,250VAC, with LEAD	Littelfuse
27	5	J1 J2 J3 J12 J13	PCB-7, Dimension 11.1*9mm,60A	
28	2	J4 J14	HEADER4,2.54mm pitch,4pin	
29	1	J6	HSEC8-160-01-L-DV-A-BL,120 pin	SAMTEC
30	1	J8	HEADER 7,2mm SPACE	CJT
31	2	J9 J10	HEADER 2,2mm SPACE	CJT
32	1	J11		
33	3	L1 L2 L3	IVCT_TP_PFC_IND	
34	1	L4	CM_IND,33mm*33mm*34mm	
35	1	L5	NLCV32T-6R8M-PF,6.8uH,0.53A,0.27Ohm@25C	TDK
36	6	Q2 Q3 Q4 Q5 Q6 Q7	IV1Q12050T4,50mOhm,1200V,TO247-4	IVCT
37	2	Q8 Q9	N-MOSFET,0.1A,60V,SOT233,3Ohm	HOTTECH
38	6	Q10 Q11 Q12 Q13 Q14 Q15	QS5K2TR,2CH NMOS.COMMON SOURCE,30V,2A,100mOHM,SOT235	ROHM
39	14	R1 R6 R32 R83 R90 R97 R104 R111 R132 R134 R166 R177 R189 R216	Res,Chip,1/10W,1%	RALEC
40	17	R2 R76 R81 R88 R95 R102 R109 R123 R126 R129 R165 R172 R184 R192 R217 R218 R219	Res,Chip,1/10W,1%	YAGEO
41	6	R19 R112 R114 R116 R118 R120	Res,Chip,1/16W,1%	UNIOHM
42	12	R20 R25 R77 R84 R91 R98 R105 R113 R115 R117 R119 R121	Res,Chip,1/16W,1%	UNIOHM
43	6	R26 R78 R85 R92 R99 R106	Res,Chip,1/16W,1%	YAGEO
44	12	R30 R74 R79 R80 R86 R87 R93 R94 R100 R101 R107 R108	Res,Chip,1/16W,5%	FH
45	8	R31 R82 R89 R96 R103 R110 R159 R160	Res,Chip,1/10W,1%	YAGEO
46	36	R65 R66 R67 R68 R75 R162 R163 R164 R168 R169 R170 R171 R173 R174 R175 R176 R180 R181 R182 R183 R185 R186 R187 R188 R193 R194 R195 R196 R197 R198 R199 R200 R201 R202 R203 R204	Res,Chip,1/8W,0.1%	VIKING
47	2	R70 R191	Res,Chip,1/16W,0.1%	YAGEO
48	6	R73 R161 R167 R178 R179 R190	Res,Chip,1/10W,1%	UNIOHM
49	2	R131 R133	Res,Chip,1/10W,1%	YAGEO

50	4	R137 R138 R139 R140	Res,Chip,1W,1%	UNIOHM
51	16	R141 R142 R143 R144 R145 R146 R147 R148 R149 R150 R151 R152 R153 R154 R155 R156	Res,Chip,0.4W,0.1%	SEI
52	2	R157 R158	Res,Chip,1/16W,0.1%	VIKING
53	1	R205	Res,Chip,1/10W,1%	YAGEO
54	6	R206 R207 R208 R209 R210 R211	Res,Chip,1/10W,1%	UNIOHM
55	2	R212 R213	Res,TH,5W,5%	UNIOHM
56	2	R214 R215	Res,Chip,0.125W,1%,0805	UNIOHM
57	2	RL1 RL2	HF165FD-G/12-HY1STF,SPST-NO,5A/250VAC,40A/250VAC,12V,1H	HF
58	2	RV2 RV3	SL22 14007,14Ohm,7A,D*T=22*6mm,TimeConst=144Sec	Ametherm
59	6	T3 T4 T5 T6 T7 T8	750313638, Push-Pull Transformer for iso power,1.3:1,Lm=340uH,350mA rating,VT=11Vus,-40 to 125C	
60	1	U2	TPS73633DBVR,LDO,1.7V~5.5V IN,3.3V OUT,0.4A,SOT235,-55 TO 150C	TI
61	6	U4 U21 U24 U27 U30 U33	TPS7A4101DGN,LDO,50V Vinmax,1.175V~48Vout,50mA,-40 TO 125C	TI
62	6	U8 U10 U12 U14 U16 U18	4-A HIGH SPEED LOW- SIDE MOSFET DRIVER	IVCT
63	6	U19 U22 U25 U28 U31 U34	SN6505BDBVR/SN6505BDBVT, 1A TRANSFORMER DRIVERS FOR ISO POWER,SOT236,-55 TO 125C	TI
64	6	U20 U23 U26 U29 U32 U35	ACM2012-900-2P-T002,90-Ohm@100MHz, Rdc=0.19Ohm, 0.4A, 50Vmax	TDK
65	3	U40 U41 U42	Hall Effect Current Sensor with CM-Rejection,120KHz,+ - 65A,30.75mV/A,SOIC16 Wide,-40 TO 125C	ALLEGRO
66	6	U43 U44 U45 U46 U47 U48	ADUM226N0BRIZ,Dual-CH ISOLATORS,150Mbps,5000Vrms,849Vpk Working Voltage,-40 TO 125C,SOIC8_IC	ADI
67	1	U49	AMC1303M2520DWV,Isolated Sigma-Delta Modulator,VIORM=2121Vpk,SOIC8,-40 TO 125C	TI
68	4	U50 U51 U52 U53	OPA376AIDBV,Low noise,Low Iq,Precision OPA,Single Supply,2.2V to 5.5V,SOT235	TI
69	4	U57 U58 U59 U60	SN74LV1T125DCK,1 BIT LOGIC LEVEL SHIFT,5V VCC MAX,SC70-5	TI