

汽车水泵是传统内燃机汽车冷却系统中的一个重要部件，它的主要作用是循环发动机冷却液以保持发动机的工作温度稳定。在新能源汽车中，虽然没有了传统的内燃机，但水泵仍然扮演着重要的角色，尤其是在电动汽车（EVs）和插电式混合动力汽车（PHEVs）中。

新能源汽车中的水泵用途：1) 电池组冷却：2) 电机及逆变器冷却：3) 热管理系统集成：新能源汽车往往具备更加复杂的热管理系统，水泵作为其中的一部分，不仅可以用于冷却，还可以用于加热座舱（例如通过热泵系统），以及预热电池等。

综上所述，尽管新能源汽车的动力系统与传统燃油车不同，但水泵仍然是其热管理系统中不可或缺的组成部分，对于保障车辆性能和延长关键部件的使用寿命具有重要作用。

BLDC 电机工作原理介绍

BLDC 的基本工作原理是，当通电给其中一相定子绕组时，其产生的磁场与转子产生的磁场之间互相影响，转子便可以转动起来。同时，通过位置传感器得到电机位置信号，并把信号传送给主控制器，然后根据转子信号按照一定的顺序开通或关断功率管，使得 BLDC 可以稳定运行。

BLDC 的工作原理图如右图所示，A、B、C 三相定子绕组通过星型连接，并直接与三相逆变器的开关电路连接。Q1 作为电池的防反接保护，三相逆变器包括里六个 MOSFET，上桥臂有 Q2、Q4、Q6，下桥臂有 Q3、Q5、Q7。

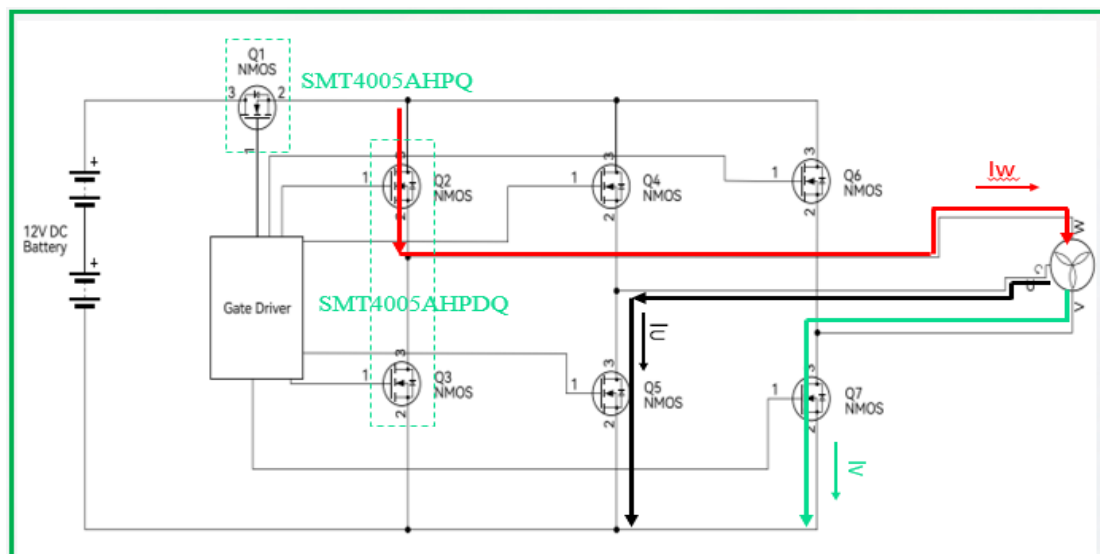


图 1 汽车水泵 MOSFET 驱动系统

● SMT4005AHP (D) Q 技术参数

P/N	VDS_Max (V)	ID_Max (A)	VGS(th)_Typ (V)	RDS(ON)_Max @ VGS = 10V (mΩ)	VGS_Max (V)	EAS_Max (mJ)	Ciss_Typ (pF)	Crss_Typ (pF)	Qg_Typ (nC)	RthJC_Typ (°C/W)	Package
SMT4005AHPQ	40	92	3	3.5	±20	116	982	593	14.0	1.8	PDFN5060-BL
SMT4005AHPDQ	40	68	3	3.6	±20	116	982	593	14.0	2.6	PDFN5060-BL

✚ MOSFET 控制方式

FOC 矢量控制的基本过程为，第一步，通过主芯片的 AD 采样模块得到电机的三相定子电流，位置传感器检测到转子所在的位置及其角度，然后把位置信号和角度信号用于坐标变换，对电流进行解耦。第二步，通过将 Clark 和 Park 变换来完成坐标系的转换。第三步，将设定转速与实际转速反馈量之间的偏值进行 PI 调节，其输出用于 i_d 和 i_q ，经过 PI 调节，其输出的 V_d 和 V_q 相电压经过 Revpark 变换，得到 V_α 和 V_β 相电压。最后，利用 SVPWM 算法，产生 PWM 控制信号，对系统进行 PI 双闭环控制。

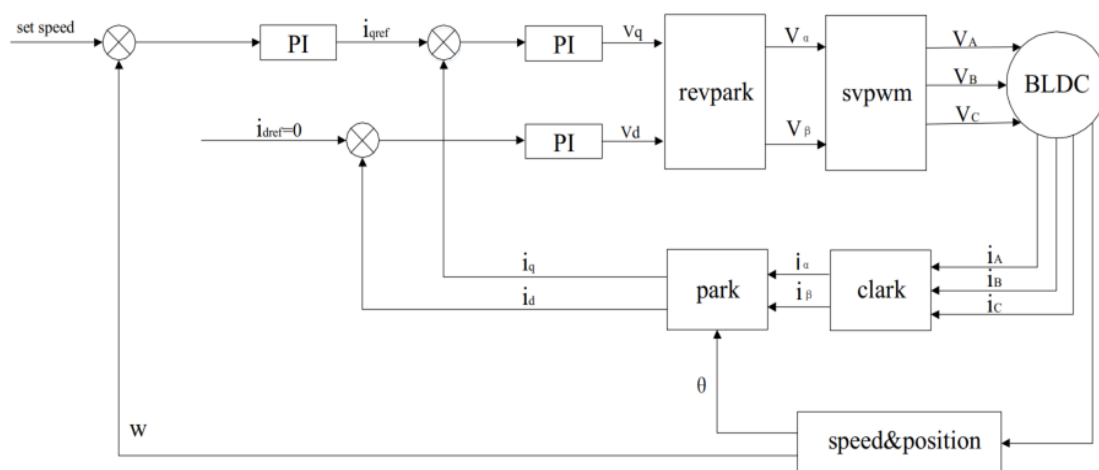


图 2 FOC 控制算法

✚ 实物&测试波形

如右图所示，BLDC 电机满载功率为 70W，工作频率为 20KHZ，水泵为离心泵。



图 3 测试实物

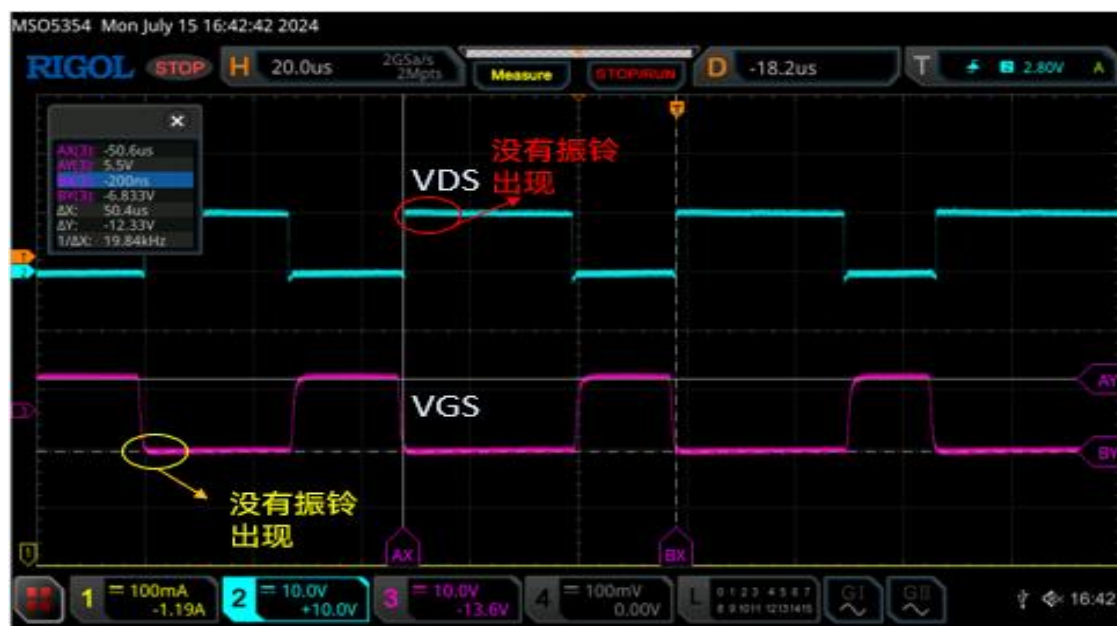


图 4 MOSFET Vds 和 Vgs 电压波形

在汽车水泵电机驱动系统中，为了能够顺利的通过 EMC 实验，一般在测试前，6 个驱动 MOSFET 的驱动电压 Vgs 波形、关断电压 Vds 波形，振铃的幅值和频率都要求越小越好。

V_{gs} 波形

在桥式电路中，V_{gs} 波形振铃的产生，主要有两种根源。

✓ 根源 1: dv/dt 通过米勒电容 C_{gd} 的耦合

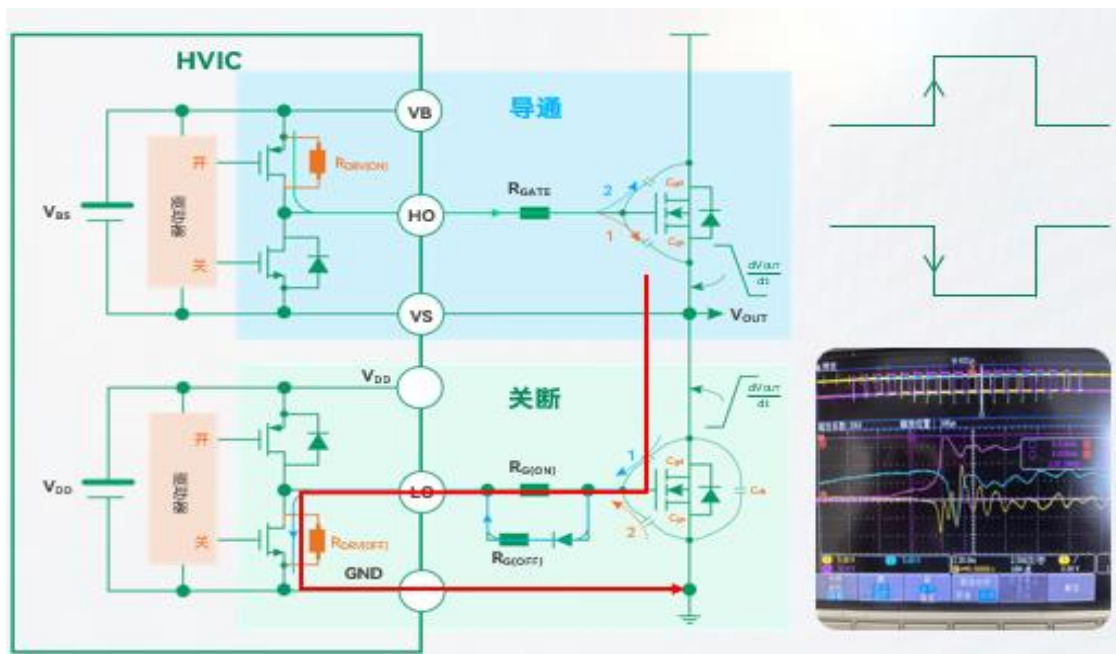


图 5 dv/dt 耦合回路

$$\Delta V_{gs} = \Delta V_{ds} \cdot C_{gd} / (C_{gd} + C_{gs})$$

而 MOSFET 寄生电容之间的关系如下：

$$\text{输入电容 } C_{iss} = C_{gs} + C_{gd}$$

$$\text{输出电容 } C_{oss} = C_{ds} + C_{gd}$$

$$\text{米勒电容 } C_{rss} = C_{gd}$$

因此， $\Delta V_{gs} = \Delta V_{ds} \cdot C_{gd} / C_{iss}$ 。这就意味着，C_{rss}/C_{iss} 的比例越小，V_{gs} 的振铃幅值就越小。SMT4005AHPDQ 的 C_{rss}/C_{iss} 的比值仅为 2.5%。

Dynamic Characteristics ⁽⁷⁾						
Input Capacitance	C _{iss}	V _{DS} = 20V, V _{GS} = 0V, f = 1MHz	-	982	-	pF
Output Capacitance	C _{oss}		-	593	-	pF
Reverse Transfer Capacitance	C _{rss}		-	25	-	pF
Gate Resistance	R _g	V _{GS} = 0V, V _{DS} = 0V, f = 1MHz	-	4.2	-	Ω

MOSFET 内部等效电路图如下：

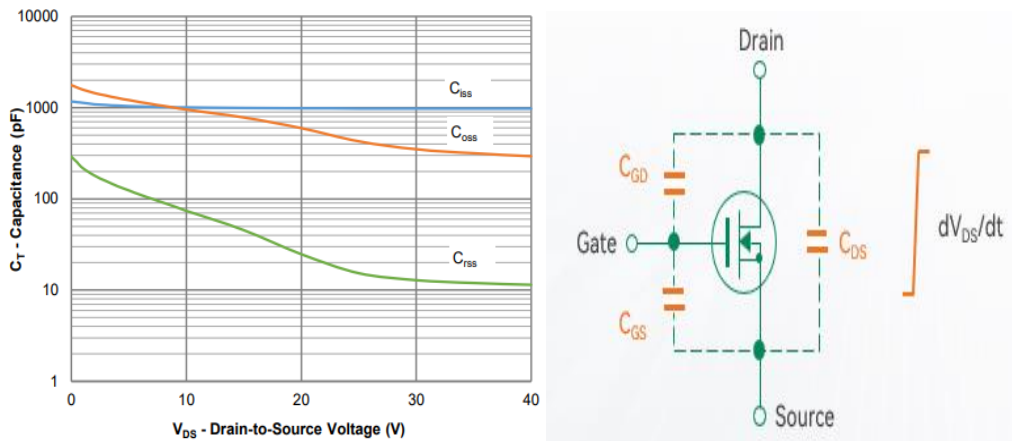
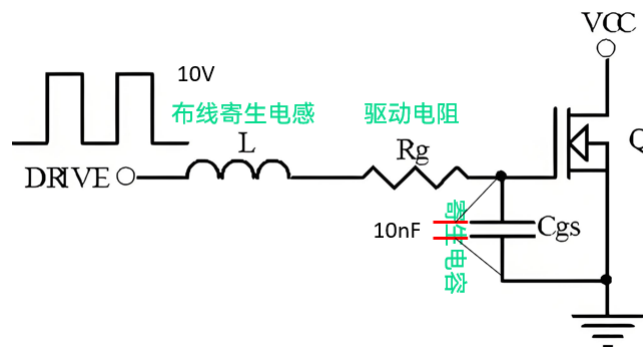


图 6 MOSFET 内部寄生电容及其与电压的关系

✓ 根源 2：驱动回路构成的 RLC 欠阻尼回路

- ◆ RLC 组成串联谐振电路，当 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，系统处于欠阻尼情况，在这种情况下，电路发生振荡；



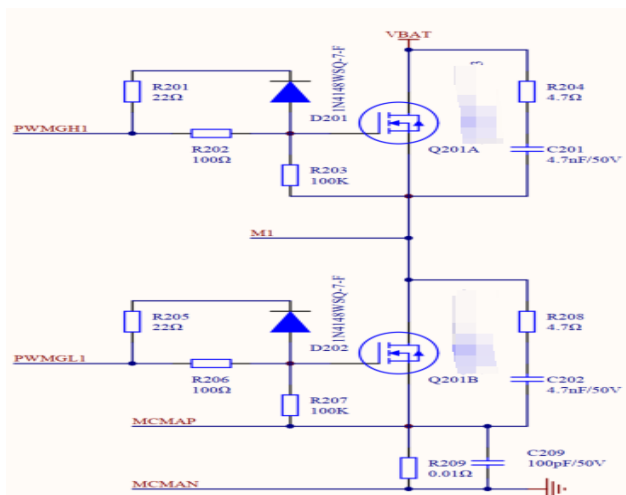
消除振铃的方法：

- 增大驱动电阻 R，使其工作在临界阻尼；
Rg 上限值：为防止 MOS 管关断时产生很大的 dV/dt 使得 MOS 管再次误开通。一般要求 $R_g \leq V_{th} / (C_{gd} \cdot dv/dt)$ ， dV/dt 可以根据电路实际工作时 MOS 的 D、S 间电压和 mMOS 管关断时 D、S 电压上升时间求得。
- MOSFET 栅极的驱动 PCB 走线尽可能的短；
- 在 GS 端并联一个 nF 级的瓷片电容；

在汽车水泵驱动电路中，大部分研发工程师都会做 EMI 优化设计，在 MOSFET D-S 端预留 RC snubber 电路，以顺利通过 EMC 实验，参照《CISPR25》标准。

EMI 设计优化

- SGT MOS 开关速度较快，Qg 通常比较小，关断时，di/dt 通常会 DS 电压波形上形成振铃，对系统的 EMI 造成一定的困扰。
- 为了减轻振铃的影响，帮助客户顺利通过 EMC 试验，通常会在 MOS D-S 端并联 RC snubber 电路。



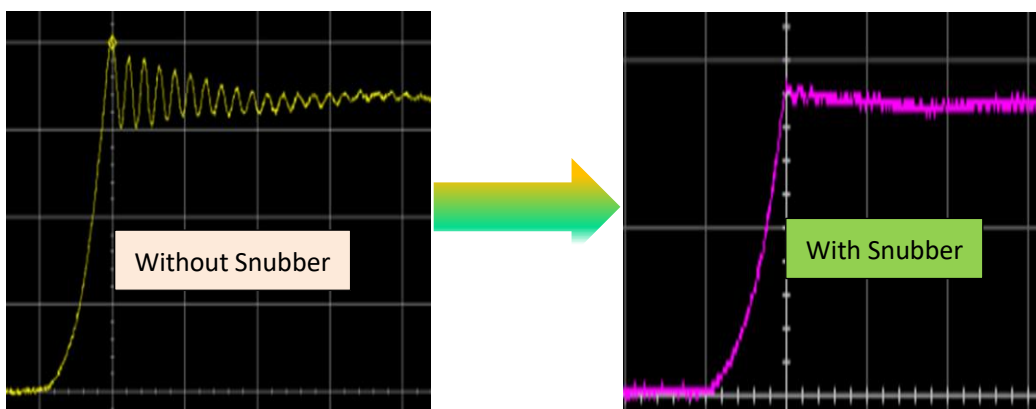
根据过往的工程经验，从功率损耗和尖峰电压的平衡角度，一般取值如下：

$$C_{\text{snubber}} = (1-2) \cdot C_{\text{oss}}$$

$$R_{\text{snubber}} = 1.5 Z_o = 1.5 \cdot \sqrt{\frac{L}{C_s}}$$

其中，L 为电源 Vbat 到 MOSFET Drain 的线感，Cs 为 Csnubber。

- RC snubber 电路增加前后的波形对比：

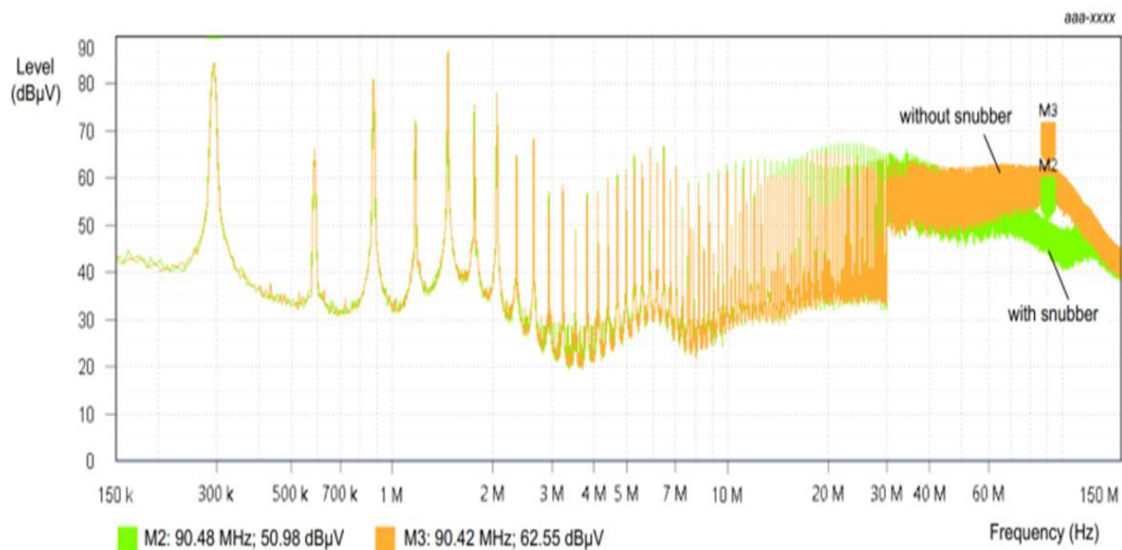


- 在 EMC 实验室，传导辐射（150 kHz - 150 MHz）测试结果对比：

■ M2: 90.48 MHz; 50.98 dBμV

■ M3: 90.42 MHz; 62.55 dBμV

参照 《 CISPR 25 standard 》



电机母线电压，相电流波形

控制算法为FOC，相电流为正弦波，PID 调节。

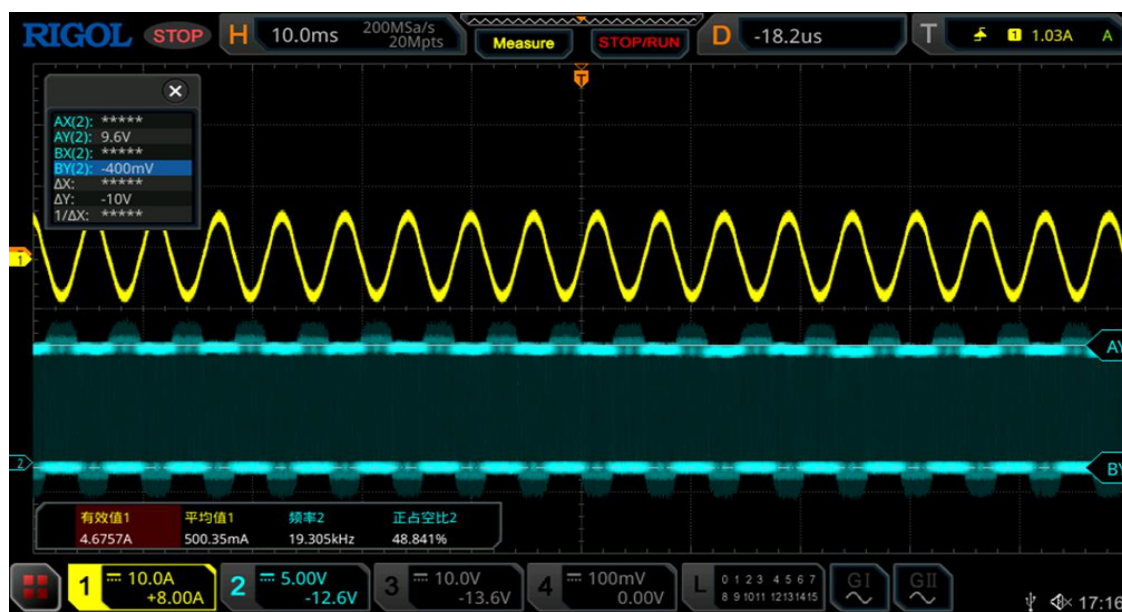


图 7 电机相电流&母线电压波形

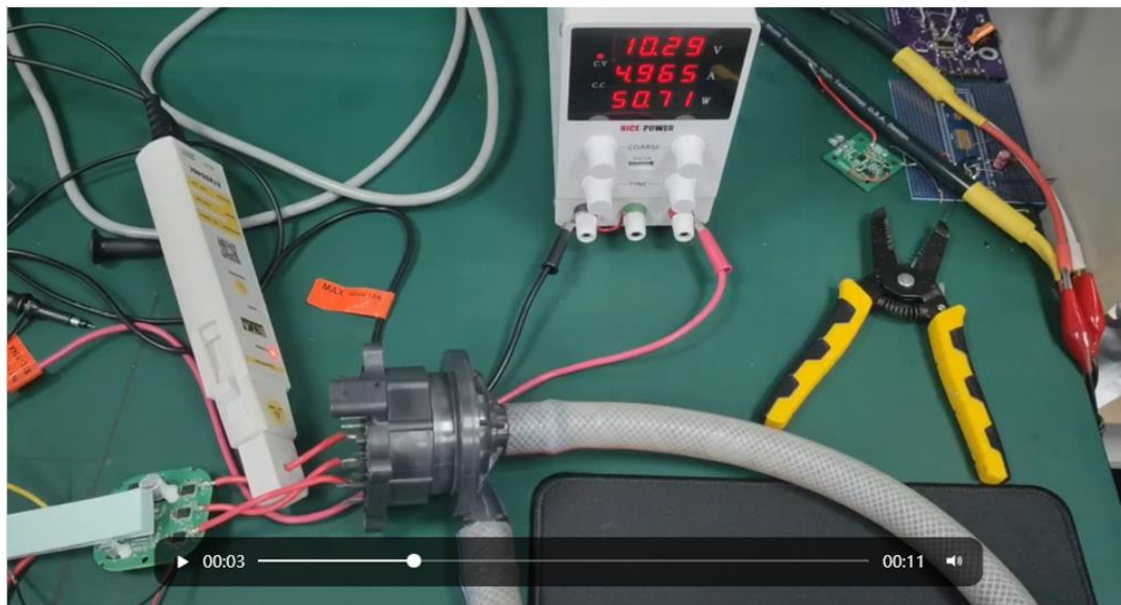
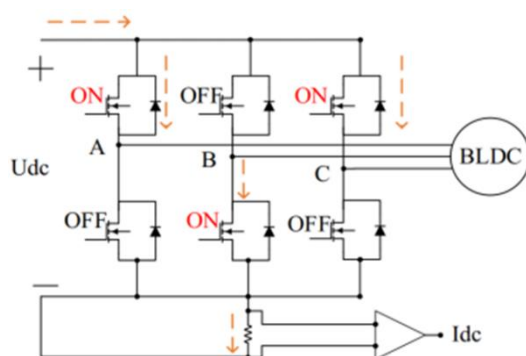
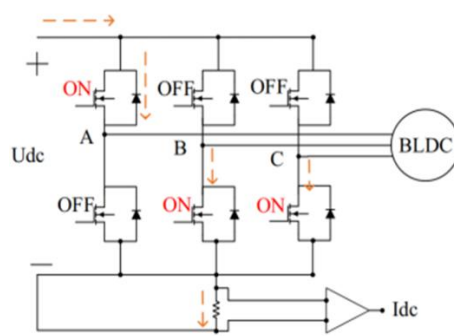


图 8 实验室测试波形

- SVPWM 控制下 MOS 开关状态



V101 状态下电流流向

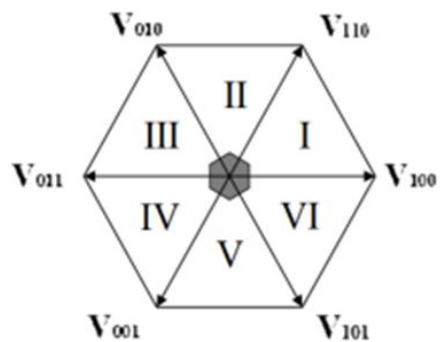
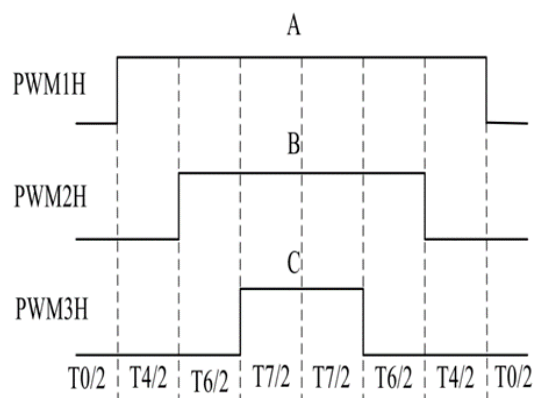


V100 状态下电流流向

- 电机相电压波形



- 第一扇区 PWM 波形



 MOSFET 温升

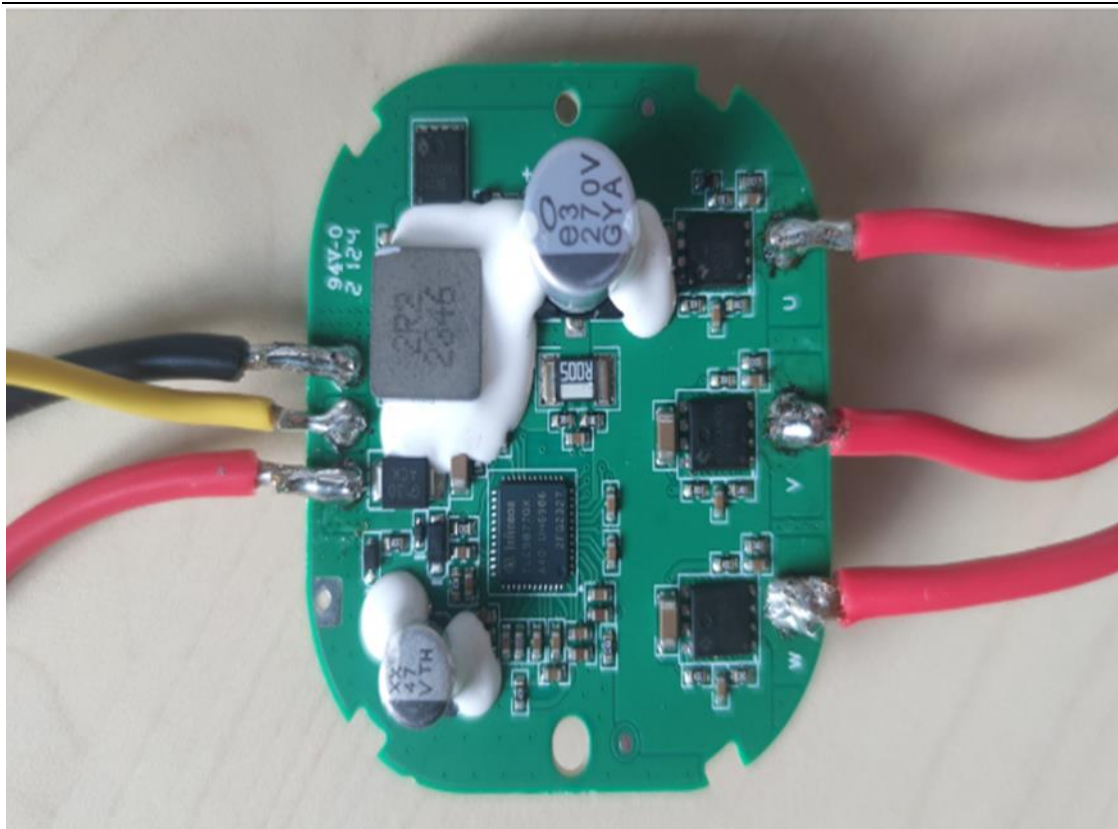


图 9 汽车水泵电驱 PCB

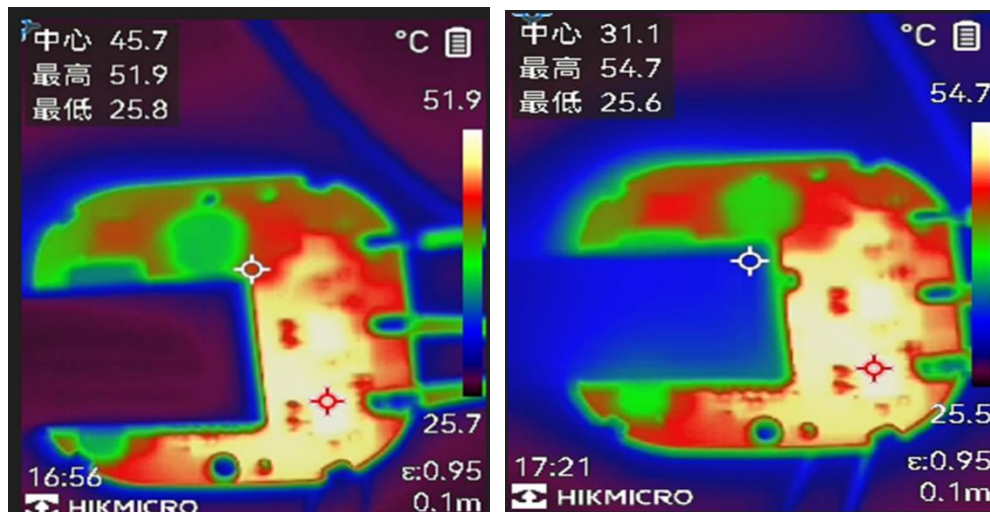


图 10 MOSFET 稳态温升



图 11 实验室温度，即环境温度

MOSFET 的温升最高为 54.7°C，器件整体损耗较小，所以温升不高；在 72%负载输出时，系统整体效率超过 90%。此外，BLDC 电机应用，FOMg 代表器件的整体损耗大小。

	$R_{DS(on)}$	Q_g	FOM
SMT4005AHPDQ	4.6(mΩ)	14 (nC)	64.4

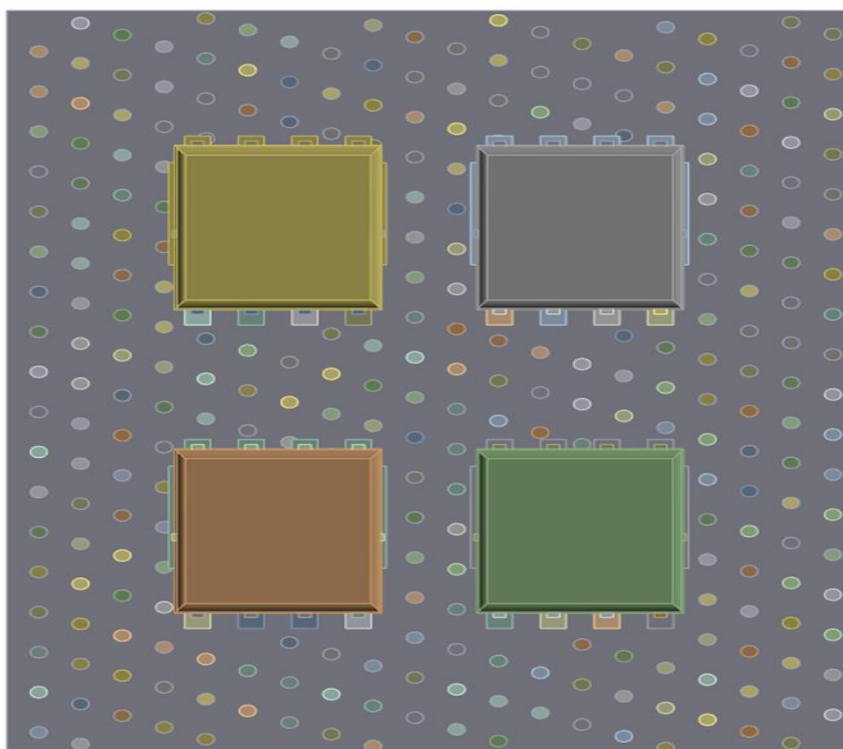


图 12 PCB TOP View

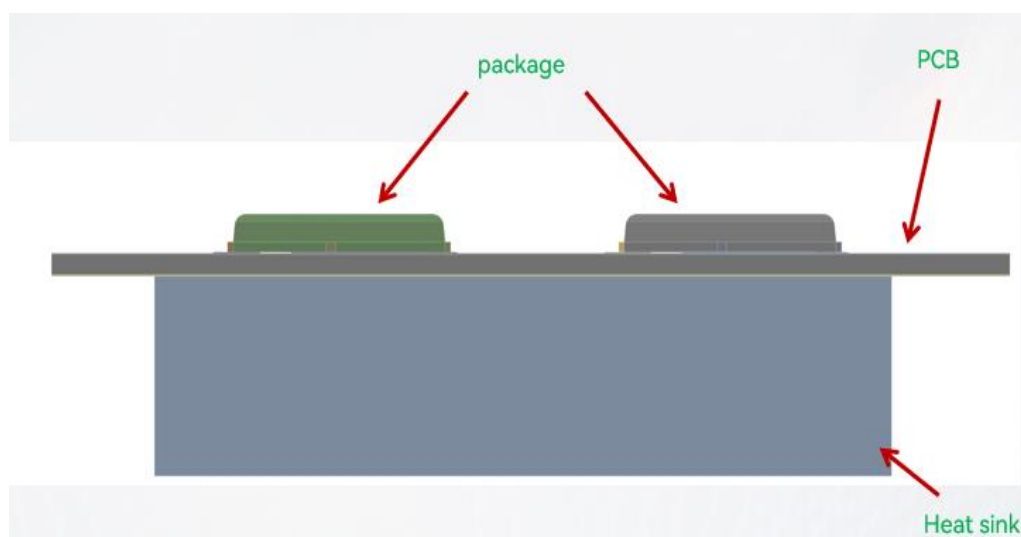


图 13 PCB Side View

- ◎ 2 layers PCB, 35μm 铜;
- ◎ PCB板面积为20mm*26mm,厚度为0.5mm;
- ◎ 通孔孔径为 0.2mm, 直径为0.4 mm; 间距约为1mm;
- ◎ Package 间距横向2mm, 纵向4mm;
- ◎ 散热器尺寸15mm*20mm,厚度5mm

● 仿真输入

- 对两个工作器件不断施加 1.5W 负载, 总功耗为 3W;
- 环境温度 25°C;
- 气流为自然静态;
- 瞬态热仿真结构

 仿真结果

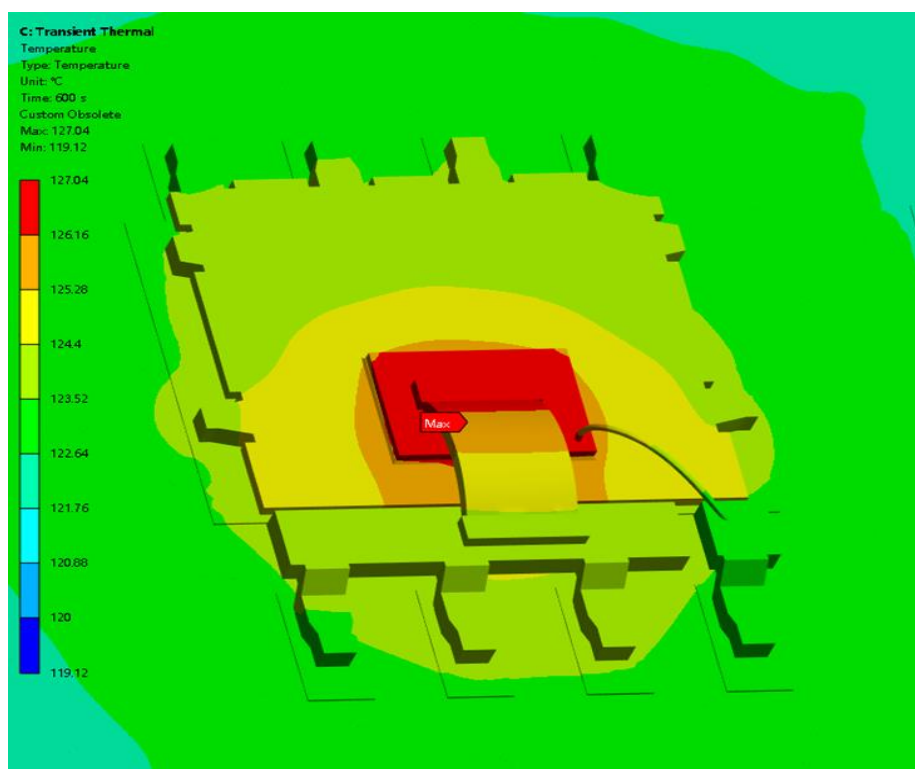


图 14 “1”号 MOSFET 温升

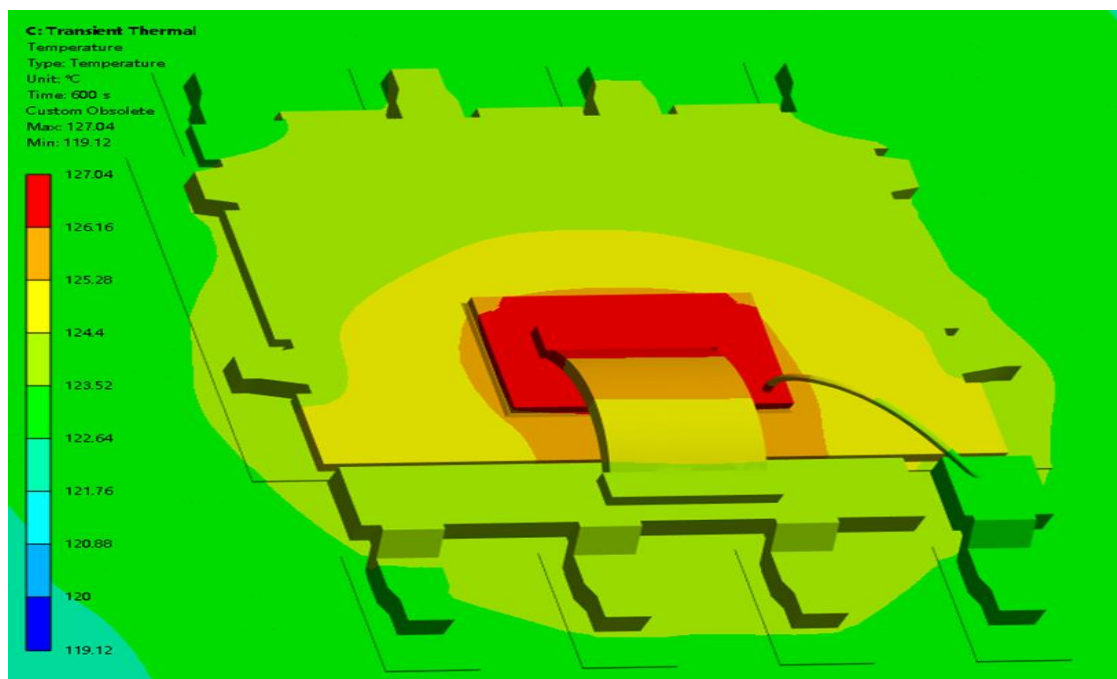
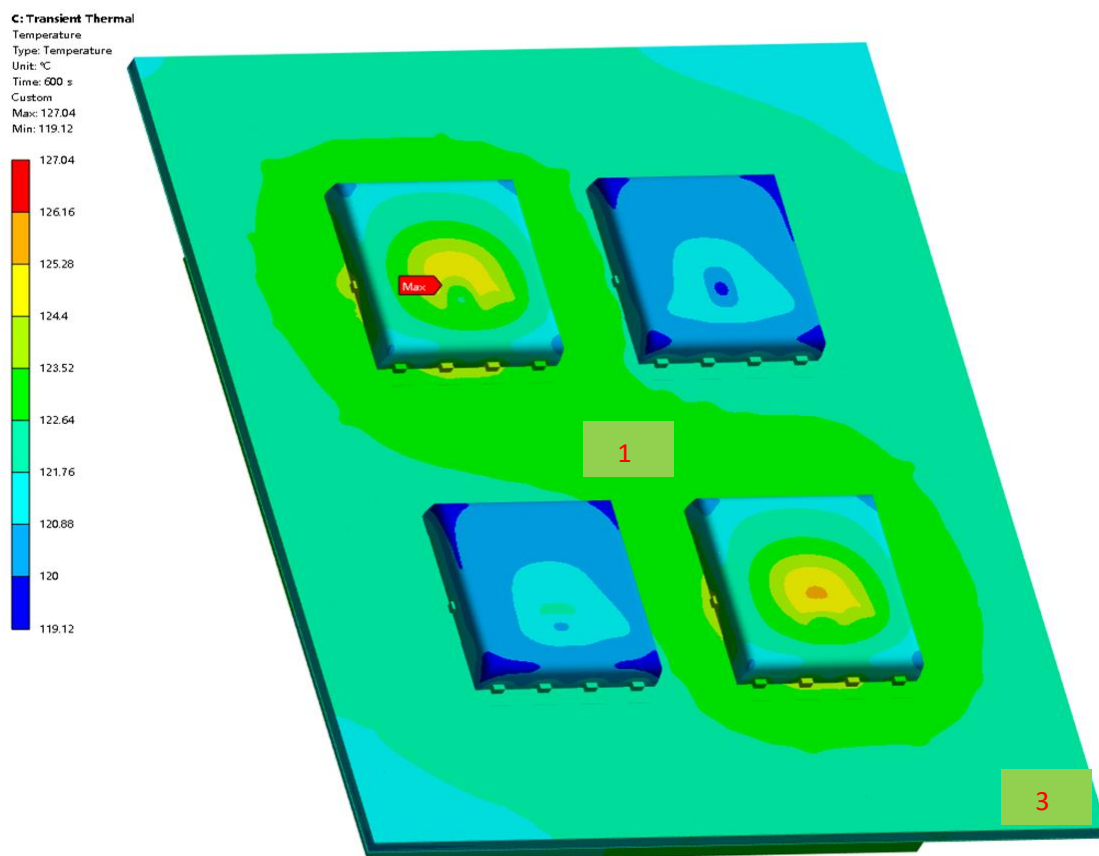
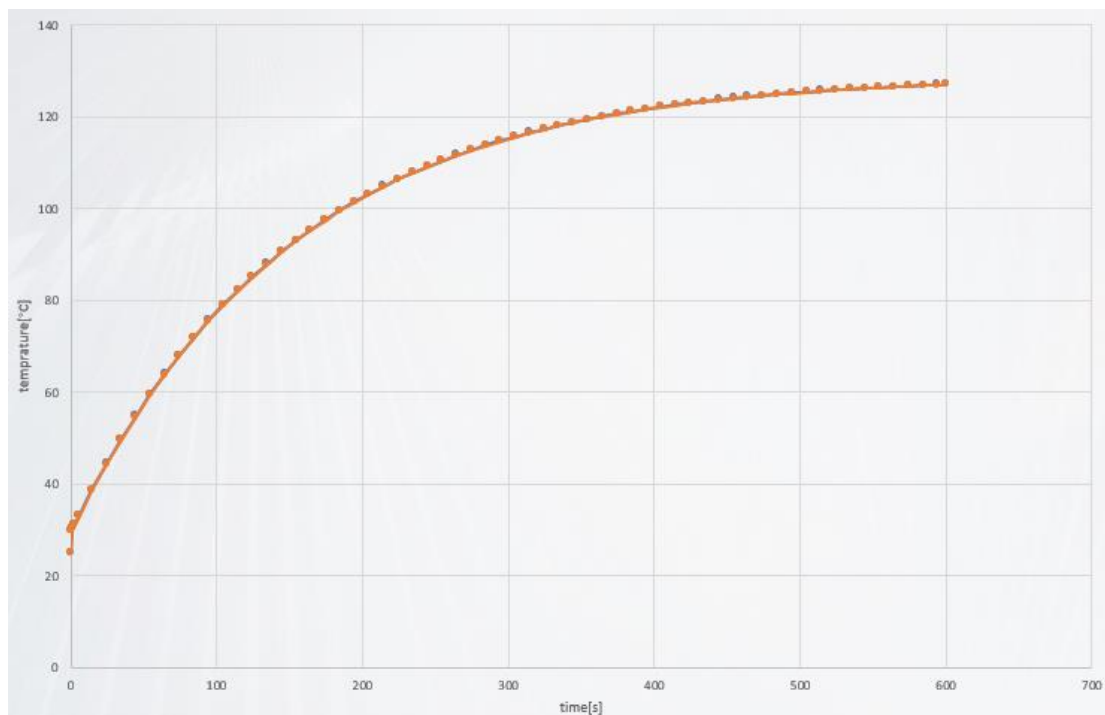


图 15 “3”号 MOSFET 温升

最高温度: 127.04°C

 仿真结果：温度上升过程（最高温度）



重要通知

对本文档的内容，SiNESEMI 公司不作任何形式的明示或暗示的保证，包括但不限于对特殊目的的适销性和适合某一特定用途的暗示保证（以及等同性质的任何司法管辖区的法律）。

SiNESEMI 公司及其子公司有权利对文档进行修改、增强、改进、更正或其他更改，而无需进一步告知本文档以及本文档所述任何产品的变化。SiNESEMI 公司不承担本文件或本文件所述任何产品的应用或使用本文件所产生的任何责任；SiNESEMI 公司也不根据其专利或商标权向用户授权任何许可，也不授以其他人的权利。任何使用本文件或本文件中所述产品的用户应承担此类使用的所有风险，并同意维护 SiNESEMI 公司和任何使用 SiNESEMI 公司网站上产品的所有公司的权利，使其免受损失。

SiNESEMI 公司不保证或接受任何有关透过未经授权的销售渠道购买的产品造成的法律责任。

如果客户购买或使用 SiNESEMI 公司的产品用于任何意外或未经授权的应用中，客户应保障并赔偿 SiNESEMI 公司及其成员受到的债务、破坏、成本和费用，包括但不限于索赔、诉讼或任何原因造成的法律程序中产生的法律费用，使其免受直接或间接因这种意外或未经授权的应用造成有关的任何人身伤害或死亡索赔。

生命支持

SiNESEMI 公司的产品在未经 SiNESEMI 公司首席执行官的明确书面批准下，不得作为生命维持装置或系统的关键部件而使用。仅使用如下：

A. 生命维持装置或系统是指以下设备或系统：

1. 为了植入体内，或
2. 支持或维持生命，如果按照标签中所提供的使用说明正确使用，也有可能对使用者造成重大伤害。

B. 关键部件是指生命维持装置或系统中的部件，其操作失效可以被合理地预期到，它会导致生命维持装置的失效或影响其安全性或有效性。

客户陈述在生命支持设备或系统的安全和监管影响方面拥有所有必要的专业知识，承认并同意他们完全对与其产品有关的所有法律、监管和安全方面的要求，以及在这种对安全性要求苛刻的生命维持设备或系统中 SiNESEMI 公司产品的任何使用进行负责，尽管 SiNESEMI 公司可能提供任何与设备或系统有关的信息或支持。此外，客户必须保障并赔偿 SiNESEMI 公司及其成员因使用 SiNESEMI 公司产品而造成的任何损害，包括在对安全性要求苛刻的生命维持设备或系统中使用所造成的任何损害。

版本号@2024, SiNESEMI 公司

研发中心一应用技术部