

doi: 10.7690/bgzdh.2016.06.005

热插拔技术在现场可更换模块中的应用研究

张志鹏, 韩崇伟, 杨刚, 李鹏启, 曹雷

(西北机电工程研究所三部, 陕西 咸阳 712099)

摘要: 为了解决火炮电气控制系统中现场可更换模块在带电状态下的快速更换问题, 提出一种热插拔电路的实现方法。阐述热插拔技术的工作原理, 设计一种基于短针信号的信号热插拔电路和基于 LM5069 芯片的电源热插拔电路, 分别进行电源热插拔和信号热插拔实验。仿真实验结果表明: 该热插拔电路设计具有正确性, 能够成功应用于现场可更换模块中, 有效提高了系统的可靠性和快速维修性。

关键词: 热插拔; LM5069; 火炮电气控制系统

中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Application and Research of Hot Swap Technology in Field Replaceable Module

Zhang Zhipeng, Han Chongwei, Yang Gang, Li Pengqi, Cao Lei

(No. 3 Department, Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xi'an 712099, China)

Abstract: For resolving rapid replacement of field replaceable module of artillery electrical control system under power on situation, put forward a method to realize hot swap circuit. Introduce work principle of hot swap technology, design signal hot swap circuit based on short post signal and power supply hot swap circuit based on LM5069 circuit, carry out power supply hot swap test and signal hot swap test separately. The simulation test result shows that: the hot swap circuit design is correct, it can be used in field replaceable module and it improves the reliability and rapid maintainability of the system effectively.

Keywords: hot-swap; LM5069; artillery electrical control system

0 引言

在火炮电气控制系统中, 为了提高系统的维修快速性和可靠性, 不仅需要对现场可更换模块进行冗余设计, 还需要在系统不断电的情况下插入或拔出模块, 还不能影响系统的正常运行。实现模块的快速更换, 即具有热插拔功能。

一般情况下, 没有热插拔设计的模块不能进行带电插拔。这是因为模块电路中存在电感和电容, 带电插拔会给电源线带来很大的浪涌电流、瞬间电压、静电等危害, 这些危害很可能会损坏模块主板, 造成整个系统崩溃或损坏^[1-3]; 同时, 模块带电插拔时在信号线上产生的瞬变电压, 也可能导致模块主板上的处理器复位或中断, 系统通信异常^[4]; 为此, 笔者将针对热插拔技术在现场可更换模块中的应用进行研究。

1 热插拔工作原理

热插拔指的是在系统带电运行的工作状态下, 将模块插入或拔出系统而不影系统的正常运行^[5]。根据带电插拔的危害, 热插拔包括电源和信号热插

拔 2 个方面。

电源热插拔的目的是将电源线上的浪涌电流控制在合理的水平。当系统无电源热插拔功能时, 瞬态浪涌电流幅度很大, 同时, 高的瞬态电流会造成系统的电压下降, 给系统带来危害; 当系统加入电源热插拔功能时, 这一浪涌电流被限制在合理的水平, 而且不会造成系统电压下降, 从而避免了带电插拔给系统带来的危害, 实现电源热插拔功能。

信号热插拔的目的是将信号线上的瞬变电压控制在合理水平或与系统处理器进行适当“隔离”。当系统无信号热插拔功能时, 信号线上的瞬间电压变化, 可能导致系统通信异常。当加入信号热插拔设计后, 瞬变电压被限制在较低水平, 并提前通知系统终止通信任务, 实现信号热插拔。

综上所述, 电源热插拔可以通过限流来实现。实现方法主要分为 2 种: 一种是正温度系数热敏电阻电阻限流, 该热敏电阻阻抗根据自身电流产生的热量而改变, 从而降低电流的幅度, 但热敏电阻限流法反应速度缓慢, 使用寿命低^[4]; 另一种是 MOS 管法, MOS 管(场效应管)法反应速度快, 且使用寿

命长^[6]。因此笔者选用 MOS 管法和短针信号分别实现电源热插拔和信号热插拔。

2 基于 LM5069 的电源热插拔电路设计

电源热插拔电路主要由采样单元、控制单元和开关单元 3 部分组成。采样单元通过精密采样电阻实现电流采样，开关单元由 N 通道 MOS 管实现通断，控制单元采用电源管理芯片实现。电源热插拔电路示意图见图 1。

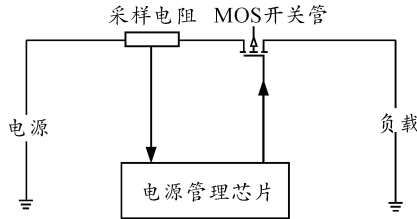


图 1 电源热插拔电路

将采样电阻和 MOS 管串联在电源与负载之间，电源管理芯片根据采样电流的大小以及延时时间来

控制 MOS 管的开通状态和时间^[7]，从而避免浪涌电流的冲击，保证系统的稳定性和安全性，实现了电源热插拔。

某火炮电气控制系统的结构如图 2 所示。根据火炮电气控制系统的技术要求，笔者选用德州仪器公司的 LM5069 电源管理芯片。LM5069 是一种正高压具有可编程电流限制和功率限制的电源管理芯片，具有宽电压输入、欠压保护、过压保护、自动恢复、故障输出等功能，其内部结构如图 3 所示。

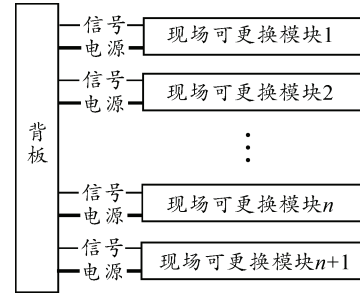


图 2 火炮电气控制系统结构

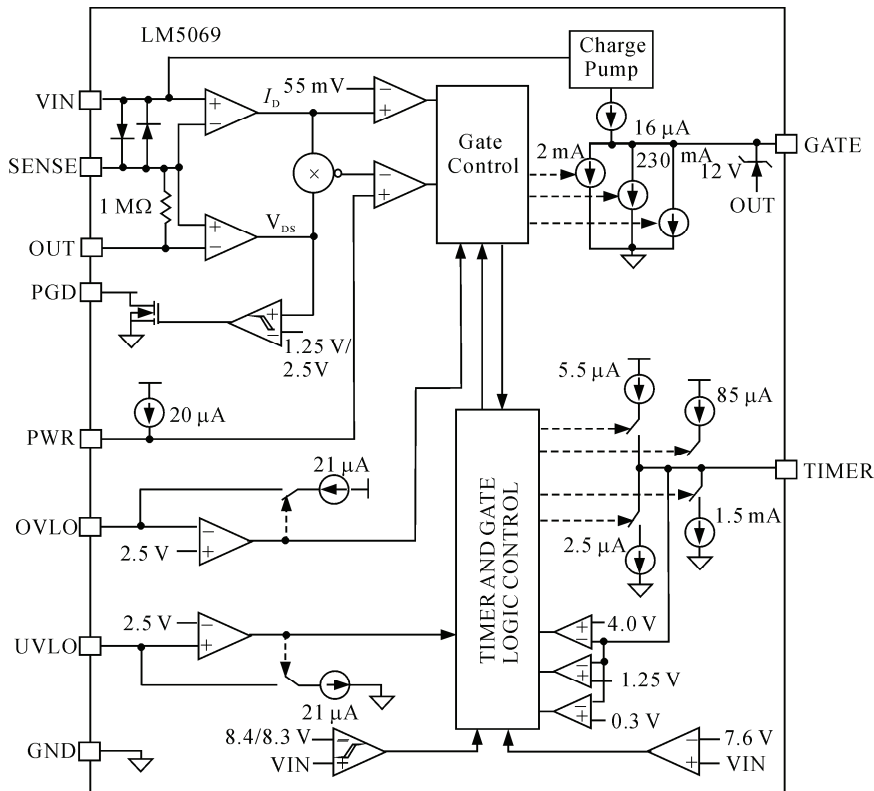


图 3 LM5069 的内部结构

LM5069 芯片的典型应用电路如图 4 所示，输入电压为 24 V，负载电路电流为 1.2 A。

结合图 3、图 4 和图 5，当模块插入带电背板时，输入电压 V_{in} 电压增加，LM5069 芯片内部的 230 mA 下拉电流使 Q_1 保持截止，此下拉电流可防止 MOS 管意外导通。此外，MOS 管 TIME 引脚保持在地电

压水平。当电压 V_{in} 电压达到特定阈值时，TIME 引脚上的延时电容 C_1 由 5.5 μA 灌电流进行充电，而 GATE 引脚上 2 mA 下拉电流使 Q_1 保持截止。当 TIME 引脚电压达到 4 V 时， C_1 充电完成并通过 LM5069 芯片内部 1.5 mA 下拉电流快速放电，此时 GATE 引脚启动 Q_1 ，LM5069 芯片内部的电荷泵灌

出 $16 \mu\text{A}$ 电流对 Q_1 的栅极电容进行充电，此时 Q_1 处于线性工作区。直至电压比源极电压高 12 V ， Q_1 处于饱和区和导通状态，进入正常工作模式。

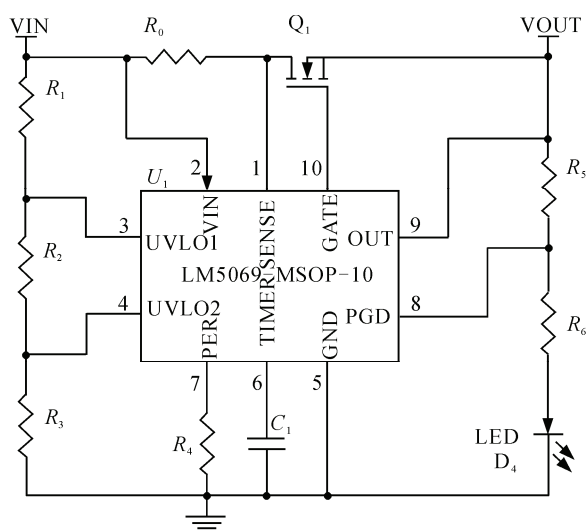


图4 LM5069的典型应用电路

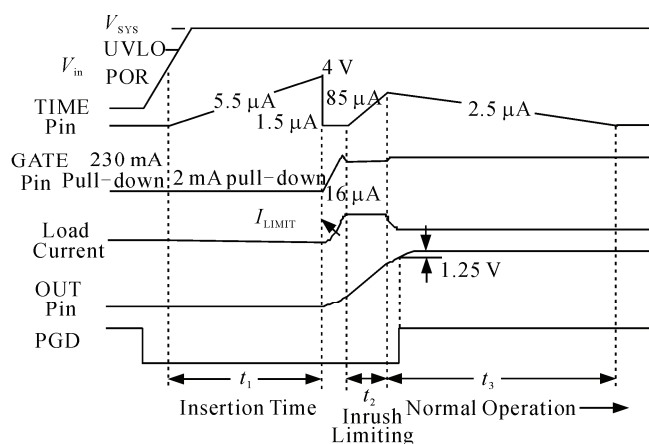


图5 启动过程

在正常工作模式下，当负载电流增加使得 R_0 采样电阻两端电压达到 55 mV 时，控制 Q_1 的栅极防止负载电流进一步增大，使得负载电流保持恒定。当输入电压 V_{in} 升高至 $OVLO$ 阈值以上，或降低至 $UVLO$ 阈值以下， $GATE$ 引脚被 $LM5069$ 芯片内部的 2 mA 下拉电流拉低，使 Q_1 关闭。

2.1 采样电阻计算

如图3所示，采样电阻将负载电流转换成电压与参考电压 55 mV 比较，实现电流限制功能。根据系统需求，额定负载电流为 1.2 A ，最大允许电流 I_{LIM} 为 5 A ，那么采样电阻

$$R_0 = \frac{55 \text{ mV}}{I_{LIM}} = \frac{55 \text{ mV}}{5 \text{ A}} = 11 \text{ m}\Omega \quad (1)$$

2.2 MOS管选取

MOS管采用美国IR公司的IRF740PBF场效应管，最大功率 125 W ，电压最大为 400 V ，电流最大为 10 A 。

2.3 功率电阻

如图3，将漏电流、漏电压的乘积与功率电阻设定的阈值比较，以实现限制功率功能。根据系统需求，确定限制功率 P_{LIM} 为 28 W ，计算功率电阻

$$R_4 = 1.25 \times 10^5 \times R_0 \times P_{LIM} = 38.45 \text{ k}\Omega \quad (2)$$

2.4 欠过压电阻

如图3所示，将过压、欠压电压分别与 2.5 V 比较，以实现过压欠压保护功能。 R_1 、 R_2 、 R_3 为欠过压电阻，计算公式如下：

$$R_1 = \frac{V_{UVH} - V_{UVL}}{21 \mu\text{A}} = \frac{V_{UV}}{21 \mu\text{A}} \quad (3)$$

$$R_3 = \frac{2.5 \text{ V} \times R_1 \times V_{UVL}}{V_{OVH} \times (V_{UVL} - 2.5 \text{ V})} \quad (4)$$

$$R_2 = \frac{2.5 \text{ V} \times R_1}{V_{UVL} - 2.5 \text{ V}} - R_3 \quad (5)$$

其中： V_{UVH} 为欠压上限； V_{UVL} 为欠压下限； V_{OVH} 为过压上限。取 $V_{UVH} = 9 \text{ V}$ ， $V_{UVL} = 6 \text{ V}$ ， $V_{OVH} = 30 \text{ V}$ ，计算得： $R_1 = 142.8 \text{ k}\Omega$ ， $R_2 = 81.6 \text{ k}\Omega$ ， $R_3 = 20.4 \text{ k}\Omega$ 。

2.5 延时电容计算

由图3可知，延时电容 C_1 通过 $LM5069$ 芯片内部的 $5.5 \mu\text{A}$ 电流充电至 4 V ，完成延时启动。由于 $Q = C \cdot U = I \cdot t$ ，取 $t = 250 \text{ ms}$ 计算如下：

$$C_1 = \frac{t \times 5.5 \mu\text{A}}{4 \text{ V}} = t \times 1.38 \times 10^{-6} = 0.345 \mu\text{F} \quad (6)$$

2.6 其他元件

R_5 为上拉电阻，取 $20 \text{ k}\Omega$ 。 D_1 为热插拔状态信号灯， R_6 为 D_1 的限流电阻，取 $4.7 \text{ k}\Omega$ 。 C_2 、 C_3 为电源滤波电容，分别取 $47 \mu\text{F}$ 、 $0.1 \mu\text{F}$ 。

2.7 电路改进

根据MOS管特性可知，栅极和源极电压上升速率相同，即 $GATE$ 引脚电压与输出电压上升速率相同。而 $GATE$ 引脚电压是由芯片内部 $16 \mu\text{A}$ 的电流为 Q_1 的栅极电容充电提供的，假设 Q_1 栅极电容为 C_g ，栅极电压为 U_g ，由 $Q = C \cdot U = I \cdot t$ 可知：

$$t = \frac{C_g \cdot U_g}{16 \mu A} \quad (7)$$

由于式中 C_g 、 U_g 都为确定值，故 GATE 引脚电压上升速率确定，为实现输出电压上升速率可编程，在 GATE 引脚与地之间串联一个电阻 R_7 、电容 C_4 ：

$$C_4 = \frac{16 \mu A}{U_g} t_1 \quad (8)$$

由式 (8) 可知： C_4 越大， t_1 越大，即 U_g 上升速率越慢。其中， U_g 为 36 V， t_1 取 20 ms，代入式 (8) 得： $C_4=0.008 \mu f$ 。

在图 3 电路中，为了抑制高频振荡，在 TIME 引脚与 Q_1 之间串联一个 10Ω 的电阻 R_8 ；为了获得稳定的输入电压，在电压输入端并联电容 C_2 、 C_3 和 24 V 稳压二极管进行滤波稳压。

最终设计的基于 LM5069 芯片的电源热插拔电路如图 6 所示。

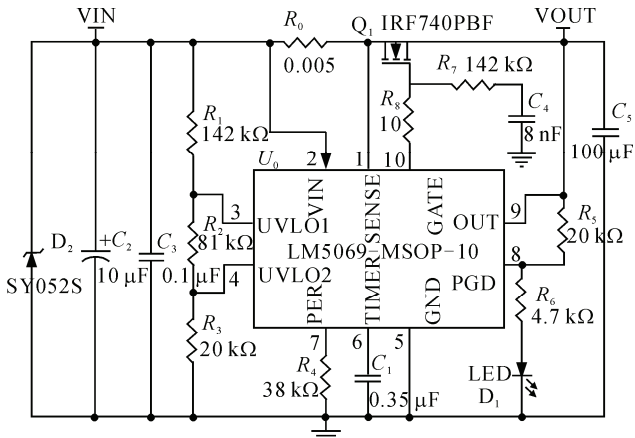


图 6 基于 LM5069 芯片的电源热插拔电路

3 基于长短针的信号热插拔设计

信号热插拔主要通过短针信号和软件来实现，短针比长针短 3 mm 左右，短针信号电路如图 7 所示。其中电阻取 4.7 kΩ，VCC 取 3.3 V 电压源，Hotswap 为短针信号。如果短针没有连接，Hotswap 为高电平；如果短针连接，Hotswap 为低电平。

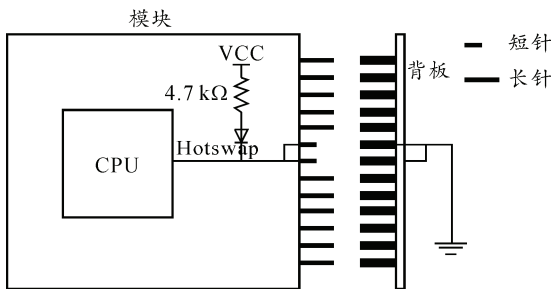


图 7 短针信号电路

当模块插入时，长针先连接，模块通电；继续

插入到短针连接时，产生“准备好”信号，模块加载驱动，完全工作，确保了连接器完全连接后才开始通信。当模块拔出时，短针先断开，产生“拔出”信号，模块卸载驱动，暂停通信；继续拔出到长针断开时，模块断电，停止工作，确保了在模块断电之前，通信终止，实现信号热插拔。信号热插拔的过程见图 8 和图 9。

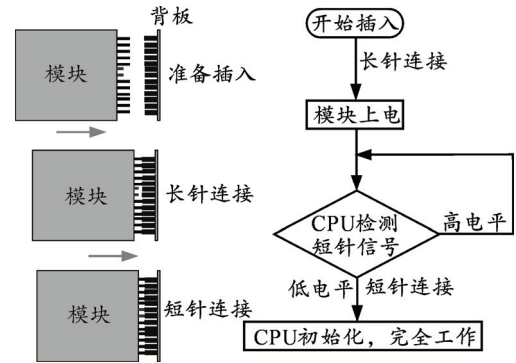


图 8 模块插入过程及流程

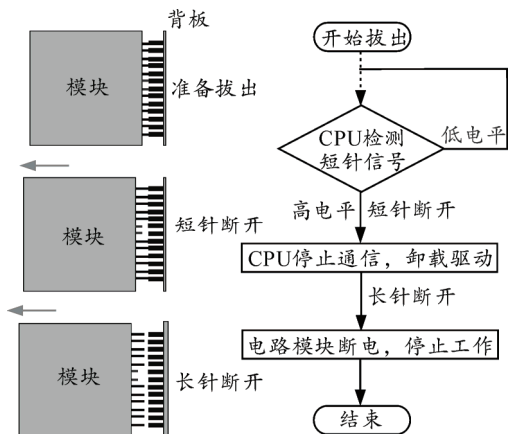
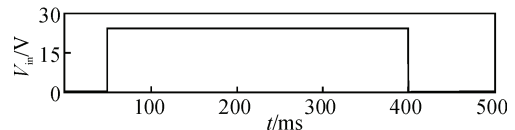


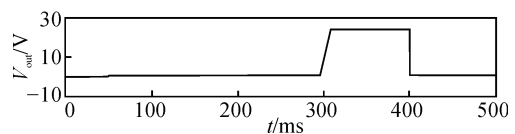
图 9 模块拔出过程及流程

4 仿真与实验验证

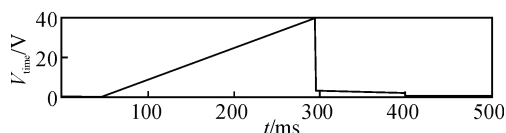
根据热插拔电路设计，首先使用电路仿真软件 TINA-TI 对图 6 所示的电源热插拔电路进行电路仿真，图 10 分别为负载电流 1 A 情况下输入电压 V_{in} ，延时电容电压 V_{TIME} 、输出电压 V_{out} 以及 MOS 开关管驱动电压 V_{GATE} 的仿真波形图。



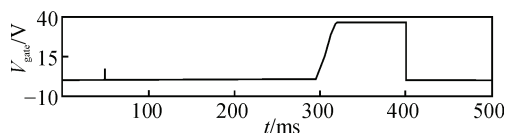
(a) 输入电压 V_{in} 仿真波形



(b) 输出电压 V_{out} 仿真波形



(c) 延时电容电压 V_{time} 仿真波形



(d) MOS 开关管驱动电压 V_{gate} 仿真波形

图 10 电源热插拔仿真波形

图 10 的仿真波形与第 2 章节理论分析一致, 0~50 ms 期间模块没有插入, V_{in} 、 V_{out} 电压都为 0 V; 第 50 ms 时模块开始慢慢插入, V_{in} 瞬间增至 24 V, MOS 管在 LM5069 芯片内部的 230 mA 下拉电流下保持截止状态, V_{out} 为 0 V, 此刻延时电容 C_1 由 5.5 μ A 灌电流开始充电, V_{time} 线性上升; 第 300 ms 时刻 V_{time} 达到 4 V, 延时电容 C_1 充电完成。LM5069 芯片内部的电荷泵灌出 16 μ A 电流对 Q_1 的栅极电容进行充电, V_{gate} 和 V_{out} 电压开始以相同斜率上升, 大约 20 ms 后 V_{out} 上升至 24 V, 此后保持不变; V_{gate} 继续上升至 36 V, 此后保持不变, 与输出电压压差约 12 V。第 400 ms 时刻模块拔出, V_{out} 电压迅速降至 0 V。

图 11 为负载电流 1 A 条件下, 加入和未加入电源热插拔设计时的电流仿真波形图。图 11 波形表明, 当未加入电源热插拔时, 系统上电后电源线上会产生大约 11 A 的瞬间浪涌电流, 可能会对系统电路造成损坏; 当加入电源热插拔时, 系统上电后, 延迟大约 250 ms 才开始有输出电流, 电流上升至 3.5 A 后开始缓慢下降, 大约 40 ms 后电流下降至 1 A, 整个插入过程浪涌电流始终被限制在 3.5 A 以内, 远低于未加入电源热插拔时的 11 A 浪涌电流。

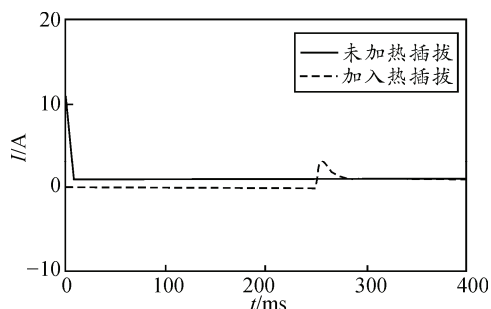


图 11 电流仿真波形

为了研究以上热插拔电路的实际效果, 笔者分别对现场可更换模块进行电源和信号热插拔实验。

在电源热插拔实验中, 将未加入和加入热插拔电路的两块现场可更换模块分别插入 24 V 通电背板, 用示波器分别捕捉 2 块模块插入过程中背板电压 V_b , 输入电压 V_{in} , 负载电压 V_{out} 和负载电流 I_{out} 的动态响应波形, 如图 12 和图 13。

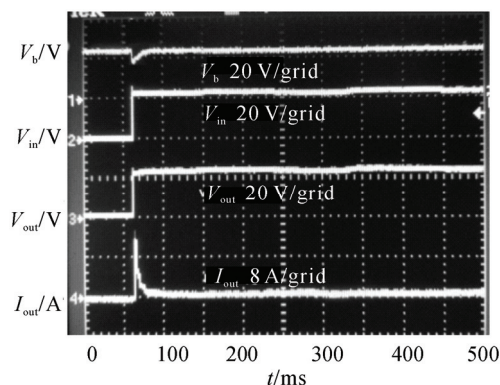


图 12 未加电源热插拔实验波形

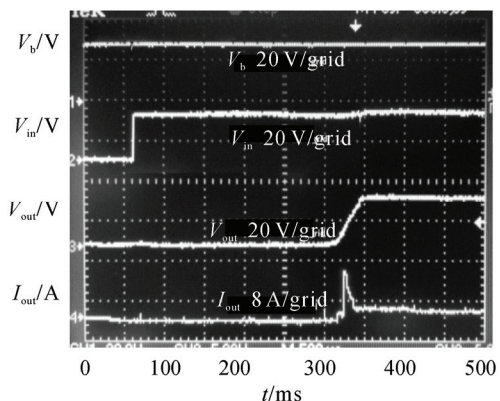
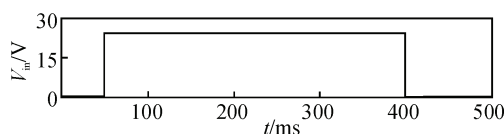


图 13 加入电源热插拔实验波形

由图 12 可知: 未加入电源热插拔时, 模块插入背板上电, 背板电压 V_b 有 7 V 的电压跌落, 输入电压 V_{in} 、输出电压 V_{out} 迅速上升, 出现 12 A 左右的浪涌电流。由图 13 可见: 加入电源热插拔时, 实验与仿真波形相符, 模块上电后, LM5069 芯片通过电容 C_1 延迟 250 ms 后开始供电, 整个插入过程浪涌电流限制在 4 A 以内, 实现了电源热插拔。

图 14 为图 7 电路中去掉电容 C_4 后的仿真波形。由仿真波形可知: 增加 C_4 电容后, 输出电压上升速率变缓, 下降速率未受影响; 图 15 和图 16 分别为增大电容 C_4 后的仿真和实验波形, 结果表明, 增大 C_4 值后, 输出电压上升速率更缓, 浪涌电流更低, 下降速率未受影响, 与理论分析一致。



(a) 输入电压 V_{in} 仿真波形(未加 C_4 电容)

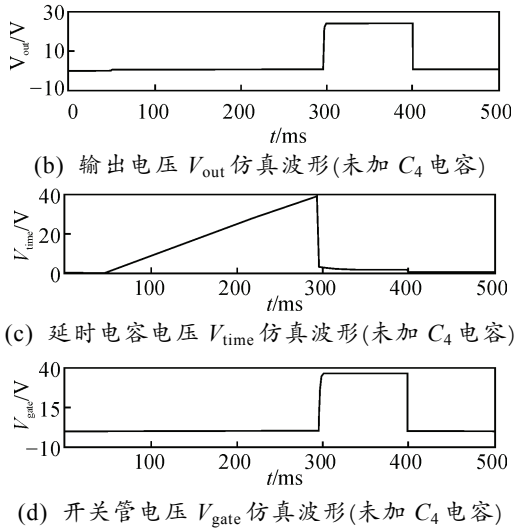


图 14 电源热插拔仿真波形图(未加 C_4 电容)

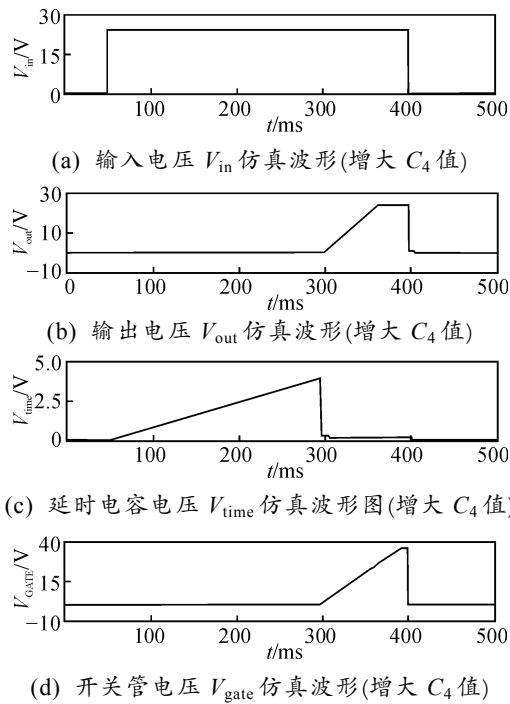


图 15 电源热插拔仿真波形(增大 C_4 值)

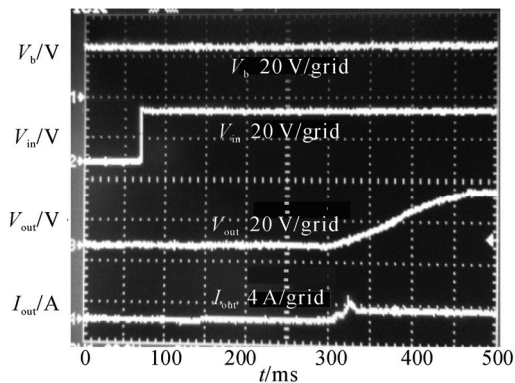


图 16 电源热插拔实验波形(增大 C_4 值)

在现场可更换模块进行 RS485 通信过程中,使

用示波器捕捉模块拔出时对应的负载电压 V_{out} 和 RS485 通信信号波形,完成信号热插拔实验,实验波形如图 17 所示。图 17 波形表明:实验波形与理论分析符合,可更换模块拔出之前终止模块与系统的 RS485 通信,拔出后 V_{out} 迅速下降至 0 V。

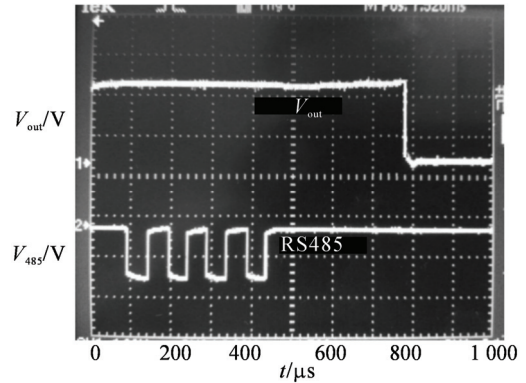


图 17 信号热插拔动态响应波形

5 结束语

笔者首先介绍了带电插拔的危害和热插拔的工作原理,阐述了在火炮电气控制系统中加入热插拔,既能实现可更换模块的带电插拔和快速更换,又能提高系统的可维修性和可靠性。通过分析带电插拔产生危害的原因及过程,设计出一种基于长短针的信号热插拔电路和基于 LM5069 芯片的电源热插拔电路,通过限流和“隔离”的方式实现了电源和信号热插拔功能,通过电路建模和仿真,验证了热插拔电路的正确性,通过实验验证了该热插拔电路的实用性和可行性,并成功应用于火炮电气控制系统中,大大提高了系统的可靠性和维修快速性。

参考文献:

- [1] 赵继成. 电源热插拔技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011(1): 1-40.
- [2] 何耿明. 基于 LTC4215 的 I2C 热插拔控制电路的设计[J]. 机电工程, 2006, 23(8): 47-49.
- [3] 章丹艳, 赵梦恋, 吴晓波, 等. 一种热插拔控制芯片及其控制策略的设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(7): 1137-1140.
- [4] 宋飞, 姚信安, 胡世平. 刀片式插件板热插拔控制策略研究[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(8): 93-98.
- [5] 卫朝霞, 徐艳. 通信设备热插拔硬件方案设计[J]. 电子测试, 2013, 4(7): 153-154.
- [6] Schulz A. A Hot-Swap Controller Amplifier Module for Active Magnetic Bearings With Supreme Reliability Electronic Circuitry and Error Detection Strategies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics. 2009, 18(3): 844-856.
- [7] 杨腾飞, 周文华, 张岳. 直接驱动式共轨系统可控针阀升程的驱动电路研究[J]. 机电工程, 2015, 32(1): 78.