

引用格式:张小琴,蔡小五,曾传滨,等. 一种用于智能高边功率 IC 的负载开路检测电路[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37 (12):17-21. [ZHANG X Q, CAI X W, ZENG C B, et al. An on-state open load detection circuit for intelligent high side power IC [J]. Microelectronics & Computer, 2020, 37(12):17-21.]

一种用于智能高边功率 IC 的负载开路检测电路

张小琴^{1,2,3}, 蔡小五^{1,2}, 曾传滨^{1,2}, 闫薇薇¹,
赵海涛¹, 刘海南^{1,3}, 罗家俊^{1,2,3}

(1 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029; 2 中国科学院大学, 北京 100049;
3 中国科学院 硅器件与技术重点实验室, 北京 100029)

摘 要: 基于 BCD 工艺, 设计了一种用于智能高边功率开关的新型开态负载开路检测电路. 采用双重判决电路, 解决了传统检测方法所带来的额外电压降和小电流检测误差太大的问题, 提高了负载开路检测的精度和可靠性, 且能实现 1 mA~10 mA 的低阈值电流检测. Cadence Spectre 仿真表明, 在开路检测阈值电流为 3 mA 的情况下, 检测精度达 98%; 在电源电压为 24 V 的情况下, 电荷泵输出电压为 27.67 V, 充电时间为 16.89 μ s, 放电时间为 20.3 μ s, 此智能高边功率电路开关时间远远小于英飞凌同类型产品 100 μ s 左右的开关时间.

关键词: 智能功率集成电路; 驱动电路; 电平移位; 开路检测

中图分类号: TN402 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7180(2020)12-0017-05

An on-state open load detection circuit for intelligent high side power IC

ZHANG Xiao-qin^{1,2,3}, CAI Xiao-wu^{1,2}, ZENG Chuan-bin^{1,2}, YAN Wei-wei¹,
ZHAO Hai-tao¹, LIU Hai-nan^{1,3}, LUO Jia-jun^{1,2,3}

(1 Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3 Key Laboratory of Silicon Device Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: A novel on-state open load detection circuit for intelligent high side power switch are presented based on BCD process. By using a double decision circuit, the problem of excessive voltage drop and small current detection error caused by traditional detection method is solved, the accuracy and reliability of open load detection are improved, and low threshold current detection of 1mA~10mA can be achieved. The Cadence Spectre simulation shows that with a threshold current of 3 mA, the open load detection accuracy is 98%. At a supply voltage of 24V, the charge pump output voltage is 27.67V, the charging time is 16.89 μ s, and the discharge time is 20.3 μ s. The switching time of this intelligent high-edge power circuit is far less than that of the same type of infineon products around 100 μ s.

Key words: intelligent power IC; driver circuit; level shift; openload detection

1 引言

智能高边功率开关(Intelligent High Side Power Switch)是一种典型的智能功率集成电路,在工业自动化控制、汽车电子、消费类电子产品等领域具有广泛的应用^[1]. 它将驱动电路、逻辑电路、保护电路、诊断电路和高压功率器件集成在同一个芯片上,不仅具有功率输出驱动能力,还能实现对功率器件的智能保护和自我诊断^[2-4].

在智能功率开关芯片的实际工作中,需要对负载状态进行实时监控,当负载发生开路故障时,及时向系统发出预警信号. 针对开态负载开路检测,即检测开关导通期间负载的状态,常用方法是测量开关中的负载电流^[5-7]. 然而基于分流电阻的电流测量电路会在负载支路上引入额外的电压降,降低输出电压范围. 另外一种测量负载电流的方法是采用一个与主功率开关 MOSFET 成比例的感应 SENSFET,将负载电流按比例镜像后进行检测^[8],这种方法不会给负载支路带来额外的电压降,但是对于很小的负载电流,镜像复制的精度会大大下降,产生的误差可能达到 100%,使得负载开路检测电路不可靠.

本文针对智能高边功率开关,设计了一种新型开态负载开路检测电路. 新型开态负载开路检测电路解决了采用电流检测所带来的额外电压降和小电流检测误差太大的问题,提高了负载开路检测的精度和可靠性.

2 开态负载开路检测电路

2.1 传统开态负载开路检测电路

对于用作开关的功率 MOSFET(如 LDMOS、VDMOS 等),为了降低开关的通态损耗,其导通电阻必须非常小,通常在数毫欧姆至几十毫欧姆之间. 检测功率开关管导通时负载是否发生开路通常有两种方式,一是检测功率开关管两端的导通压降,若负载处于开路状态,则功率开关管两端的导通压降低于某一个正常阈值. 由于功率 MOSFET 的导通电阻非常小,且导通电阻随负载电流和温度的变化会产生较大的变化,使得导通压降的值不仅非常小(只有几毫伏)且波动较大,难以检测. 因此通常采用检测负载电流的方式来检测负载是否发生开路,当负载电流小于某一个特定阈值时,认为发生负载开路. 传统的基于负载电流的开路检测电路如图 1 所示.

TP 为功率 MOSFET, TS 为检测管 SENSFET, TP 所包含的元胞数是 TS 的 M 倍($20 \sim$

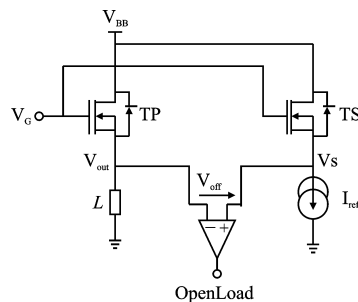


图 1 传统负载开路检测方法

2000). TS 的源端接一个大小为 I_{REF} 的参考电流源,通过比较 TP 和 TS 源端的电位来检测负载电流,阈值电流: $I_{L0} = M \cdot I_{REF}$. 当负载电流 I_L 小于 I_{L0} 时,输出负载开路故障信号. 然而,由于实际比较器不可避免的会有一定的失调,从而限制了阈值电流 I_{L0} 不能太小,具体分析如下:

$$V_{out} - V_s = V_{off} \quad (1)$$

$$V_{out} = V_{BB} - R_{onP} \cdot I_{L0} \quad (2)$$

$$V_s = V_{BB} - R_{onS} \cdot I_{REF} \quad (3)$$

得到:

$$I_{L0} = (R_{onS}/R_{onP}) I_{REF} - V_{off}/R_{onP} \quad (4)$$

由于 $R_{onS}/R_{onP} = M$, 带入式(4) 得到:

$$I_{L0} = M \cdot I_{REF} - V_{off}/R_{onP} \quad (5)$$

为了保证检测精度,减小失调的影响, $M \cdot I_{REF}$ 必须比 V_{off}/R_{onP} 大,取 $M \cdot I_{REF} = 3V_{off}/R_{onP}$, 则能检测到的最小阈值电流为:

$$I_{L0} = 2V_{off}/R_{onP} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,所能检测到的最小阈值电流与主功率管 TP 的导通电阻成反比,假设 $R_{onP} = 50 \text{ m}\Omega$, $V_{off} = 2 \text{ mV}$, 则最小阈值电流为 80 mA . 对于大多数的实际应用,负载开路对应的阈值电流通常在 $1 \sim 10 \text{ mA}$ 左右,为了达到检测精度,一方面限制了功率开关管的导通电阻不能太小,另一方面,还必须对比较器进行精密的失调消除设计,尽可能降低失调电压,这将大大增加电路设计的复杂度.

2.2 新型开态负载开路检测电路

基于以上分析,为了解决负载开路检测精度不高、检测电流阈值太大的问题,提出一种新型负载开路检测方法,如图 2 所示.

TP 为功率 MOSFET, TS 为检测管, TP 与 TS 的元胞数之比为 $100 : 1$. 比较器 OP1 检测 TP 管和 TS 管上的导通压降 V_{on} , 比较器 OP2 检测流过 TS 管的电流. $V_{on} = R_{on} \cdot I_L$, R_{on} 为功率管的导通电阻,当电路处于正常工作状态,即负载未发生开路时,负载电流 I_L 较大,因此导通压降 V_{on} 也较大(假设 V_{on}

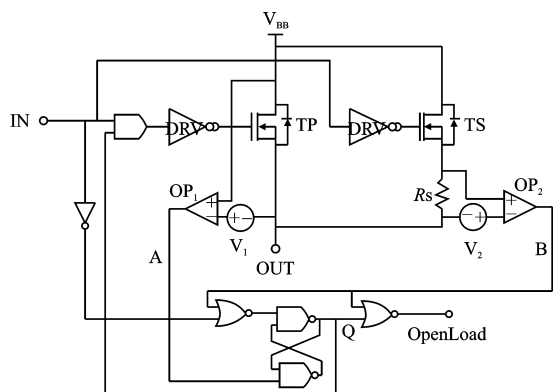


图2 新型负载开路检测电路

大于某一个阈值 V_{OLTH}), 通过检测导通压降可以判断负载是否发生开路。然而, 由于导通电阻随温度和流过功率管的电流会发生较大的变化, 使得单一采用导通压降作为判据的检测结果不可靠。因此, 本方法采用两重判决电路, 首先检测导通压降 V_{on} , 若 $V_{on} < V_{OLTH}$ (V_{OLTH} 为正常工作状态下的导通压降), 则有可能发生了负载开路, 为了确定是否真的发生了开路, 进一步检测此时的负载电流, 若 $I_L < I_{OLTH}$ (I_{OLTH} 为负载开路时对应的阈值电流), 说明负载确实开路了; 若 $I_L > I_{OLTH}$, 则负载并未发生开路。具体工作过程如下:

当输入信号 IN 为高电平时, TP 管和 TS 管都处于导通状态。比较器 OP1 检测 TP 管和 TS 管上的导通压降 V_{on} , 当流过功率管的电流过低时, 功率管上的导通压降减小, 输出端 OUT 的电压升高。当 $V_{on} < V_{OLTH}$ ($V_{OLTH} = V_1$) 时, 比较器 OP1 的输出信号 A 由高电平变为低电平, 作用于 RS 锁存器的复位端, Q 被置为低电平, 反馈到功率管 TP 的栅极, 将功率管 TP 关断。此时, 所有电流通过检测管 TS 和检测电阻 R_s 所在支路流向负载。通过比较器 OP2 检测此时的负载电流, 若负载电流 I_L 小于开路阈值电流 I_{OLTH} ($I_{OLTH} = V_2 / R_s$), 则比较器 OP2 的输出 B 变为低电平, 此时, RS 锁存器处于保持状态, 输出 Q 保持低电平, Q 与 B 经过一个或非门使得 OpenLoad 信号变为高电平, 指示发生负载开路故障。若 $I_L > I_{OLTH}$, 说明负载并未发生开路, 此时 B 变为高电平, 经过或非门产生一个低电平作用于触发器的置位端, 使 Q 变为高电平, 将功率管 TP 重新打开。OpenLoad 输出信号保持低电平, 表明未发生负载开路故障。为了保证检测电路的正常工作, 需要使第二重判断发生在第一重判断之后, 即当 $V_{on} < V_{OLTH}$ 时, 才进行第二重判断, 因此需要满足: $V_{OLTH} >$

$I_{OLTH} \cdot [R_{onP} \parallel (R_{onS} + R_s)]$ 。当输入信号 IN 为低电平时, 不进行开路检测, 锁存器置位端为低电平, Q 被置为高电平, 经过一个或非门, 使得 OpenLoad 信号保持低电平。

比较器电路结构如图 3 所示。 M_1 - M_8 组成 2 级差分电压比较器。比较器的同相输入端和反向输入端分别接电阻 R_1 、 R_2 。 M_{12} 、 M_{13} 、 M_{14} 构成电流镜, $(W/L)_{12} = (W/L)_{13} = (W/L)_{14}$, $R_1 = R_2$, 因此 $I_1 \cdot R_1 = I_1 \cdot R_2$, 电阻 R_1 、 R_2 控制输入电平处于合适范围, 以保证比较器中各个 MOS 管工作在饱和区, 同时 R_1 、 R_2 将比较器的输入端与电源电压隔离开, 当电源电压波动时, 在电阻 R_1 和 R_2 上产生的影响相同, 不会对比较器的差模输入电压造成影响, 降低了对电源电压和工艺的敏感度。 M_{11} 为使能控制管, IN_L 为电平移位电路的输出信号。当输入信号为高电平时, IN_L 为 $V_{BB} - V_z$, 使得 M_{11} 导通。 M_{11} 管控制比较器只有在输入信号为高电平时才会产生输出, 即只有在功率开关管处于导通状态时才进行负载开路检测。

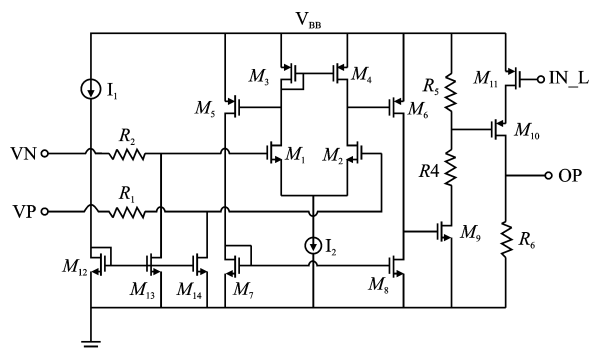


图3 比较器电路结构

这种新型负载开路检测电路的优点是: (1) 阈值电流的检测与功率管的导通电阻无关, 因此不受温度和负载电流的影响; (2) 检测电阻 R_s 不在主通路上, 不会产生额外的压降, 降低输出电压范围; (3) 所能检测的电流阈值不受比较器失调电压的限制, 可以做到 1~10 mA; (4) 采用双重判断, 避免了因负载电流和温度的波动可能产生的伪故障信号, 提高了检测的可靠度和系统的稳定性。

3 新型开态负载开路电路应用于整体电路

如图 4 所示是本文设计的新型开态负载开路检测电路在智能高边功率 IC 整体电路中的应用。由于用作开关的功率 MOSFET 在开启时具有极低的导通电阻, 开启时其源极电位接近于漏极电位, 为了保

证功率开关管 LDMOS 的有效开启,必须利用驱动电路将栅极电压抬升到漏极电压之上,驱动电路主要由电平移位电路、振荡器、电荷泵等模块组成. 负载开路检测电路在输入信号为高电平时监测负载的状态,当负载发生开路时,通过逻辑电路对故障信号进行处理,并反馈到驱动电路,控制功率管的关断,同时输出开路故障诊断信号 ST,向系统发出警报.

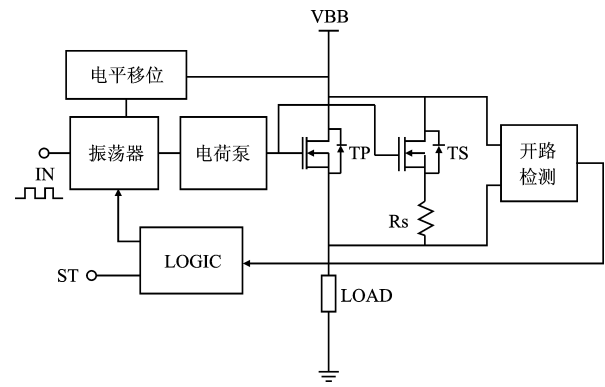


图 4 整体电路结构

4 仿真结果

采用 BCD 工艺模型,在 Cadence 环境下用 Spectre 对电路进行仿真. 电源电压 V_{BB} 为 24V.

如图 5 所示为负载开路检测电路仿真结果. 随着负载电阻的增大,负载电流减小,功率开关管两端的导通压降也逐渐减小. 当功率 MOSFET 两端的导通压降低于正常值 150 mV 时,比较器 OP₁ 的输出 A 变为低电平,此时,由于检测到的负载电流大于开路阈值电流 3 mA,比较器 OP₂ 的输出 B 保持高电平,因此 OpenLoad 信号保持低电平,表明未发生负载开路. 随着负载电阻的继续增大,负载电流进一步减小,当检测到负载电流小于 3 mA 时,比较器 OP₂ 的输出 B 变为低电平,此时 OpenLoad 信号才会发生翻转,输出负载开路故障信号.

如图 6 所示为振荡器的输出波形. 时钟频率为 2.94 MHz,时钟信号处于 19.2~24 V 之间,信号幅度为 4.8 V.

在耦合电容 C_1 为 100 pF 的情况下,电荷泵电路输出电压 VCP 波形如图 7 所示. VCP 稳定电压达到 27.67 V,高于电源电压 3.67 V,能保证功率开关管的有效开启. 栅极电压从 0 V 升高到 27.5 V 所需时间为 16.89 μ s. 当输入信号变为低电平时,使功率 MOSFET 关断所需的放电时间为 20.3 μ s.

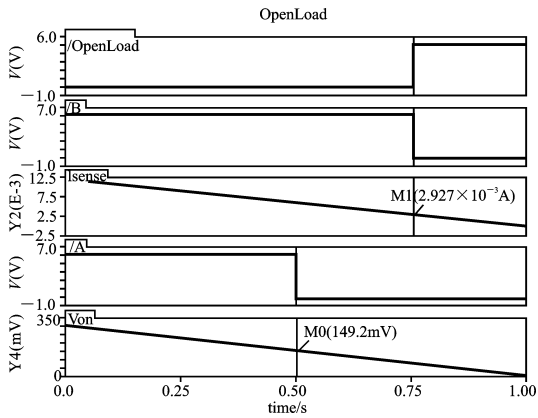


图 5 负载开路检测仿真结果

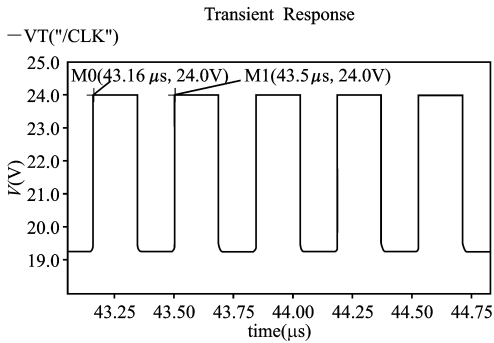


图 6 振荡器仿真波形

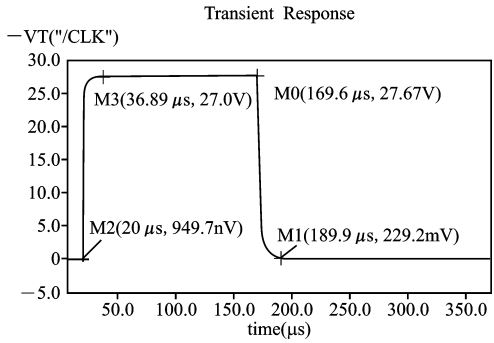


图 7 电荷泵输出电压 VCP

5 结束语

本文设计了一种用于智能功率集成电路的新型开态负载开路检测电路,采用双重判决电路,提高了检测电路的可靠性,避免了由于温度和电流的波动可能产生的伪故障信号;无需采用额外的失调消除设计,就可以达到小阈值检测电流的要求. 开路检测阈值电流为 3 mA 时,检测精度为 98%,很好的满足了智能高边功率集成电路的设计要求.

表 1 列出了本文设计的负载开路检测电路与参考文献性能对比,与其他相关文献对比,本文设计具

有良好的综合性能.

表 1 本文与其他负载开路检测电路对比

	文献[5]	文献[7]	文献[8]	本设计
阈值电流/mA	130	900	3	3
检测精度/%	—	98	90	98
开关形式	高边	高边	高边	高边

参考文献:

[1] JAYANT B. An overview of smart power technology [J]. IEEE Transactions on Electron Devices,1991,38 (7):1568-1575.

[2] DEL CP, HADZIV J, MELDT B, et al. Configurable high side power switch in smart power technology [C] // 2007 14th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. Ciechocinek, Poland,2007;570-573.

[3] CREOSTEANU L. Automotive high side power switch driver circuit [C]//2008 International Semiconductor Conference. Sinaia,Romania,2008;415-418.

[4] WILLIAM C. Driving and protection of high side NMOS power switches [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1992(1): 26-30.

[5] DAVIS B, WELLNITZ K. Intelligent diagnostic features available for high side power switching[C] // Proceedings of 1994 IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation. Dearborn,MI,USA, 1994; 23-31.

[6] TERCARIOL W L. High and low side high voltage switch with over voltage and over current protection

[C] // 2013IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI). Natal,Brazil,2013;177-181.

[7] GIVELIN P, BAFLEUR M, LAOPOULOS T, et al. On-chip overcurrent and open load detection for a power MOS high-side switch: a CMOS current mode approach [C] // 1993 Fifth European Conference on Power Electronics and Applications. Brighton, UK, 1993;197-200.

[8] GARIBOLDI R. A 70 mΩ intelligent high side switch with full diagnostics [C] // Twenty-first European Solid-State Circuits Conference. Lille, France, 1995; 262-265.

作者简介:

张小琴 女,(1994-),硕士研究生,研究方向为模拟集成电路设计.

蔡小五 男,(1979-),研究员,博士生导师. 研究方向为智能功率集成电路设计.

曾传滨(通讯作者) 男,(1979-),研究员,硕士生导师. 研究方向为高可靠集成电路设计与工艺.
E-mail;zengchuanbin@ime. ac. cn

闫薇薇 女,(1986-),硕士,助理研究员. 研究方向为功率集成电路设计.

赵海涛 男,(1983-),硕士,助理研究员. 研究方向为功率集成电路设计.

刘海南 男,(1979-),研究员. 研究方向为集成电路的高可靠性设计.

罗家俊 男,(1973-),研究员,博士生导师. 研究方向为可靠性集成电路与器件设计.