

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108411

# 低压系统中的过压欠压保护电路设计\*

赵川粤 冯全源 刘恒毓

(西南交通大学微电子研究所 成都 611756)

**摘要:** 设计了一种应用于低压系统的过压欠压保护电路,通过类似带隙基准的电路结构提高了输出电压阈值精度,通过减少二极管使用实现了低压条件适用,并在电路的欠压保护阈值门限电压中设计了一定迟滞量,防止系统在阈值附近反复关断,其电路的功能正确性在低压电源管理系统应用仿真中进行了验证。基于 SMIC 0.18  $\mu\text{m}$  标准 CMOS 工艺,使用 Cadence 软件对电路进行了设计以及仿真。结果表明,在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度变化区间内,电源电压上升时,系统开始正常工作电压阈值为  $2.431\sim 2.50\text{ V}$ ,阈值精度为  $3.2\%$ ;过压保护阈值为  $4.931\sim 5.22\text{ V}$ ,精度为  $5.7\%$ ;电源电压下降时,欠压检测阈值为  $1.58\sim 1.663\text{ V}$ ,精度为  $4.9\%$ 。系统应用仿真结果表明,在电源电压超出系统正常工作电压阈值时,过压欠压保护电路将控制系统进入关断模式,体现出了正确的保护功能。

**关键词:** 低压系统;欠压保护;过压保护;阈值精度

**中图分类号:** TN432 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3040

## Design of over-voltage and under-voltage protection circuit in low-voltage system

Zhao Chuanyue Feng Quanyuan Liu Hengyu

(Institute of Microelectronics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** An overvoltage and undervoltage protection circuit for low-voltage systems is designed. The output voltage threshold accuracy is improved through a circuit structure similar to a bandgap reference, low-voltage conditions are achieved by reducing the use of diodes, and a certain hysteresis is designed in the undervoltage protection threshold voltage of the circuit to prevent the system repeatedly turning off near the threshold, and the functional correctness of the circuit is verified in the simulation of the low-voltage power management system application. The circuit is designed and simulated using SMIC 0.18  $\mu\text{m}$  standard CMOS process and Cadence software. The results show that when the power supply voltage rises within the temperature range of  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the circuit starts to work normally and the voltage threshold is  $2.431\sim 2.50\text{ V}$ , the threshold accuracy is  $3.2\%$ , the overvoltage protection threshold is  $4.931\sim 5.22\text{ V}$ , the accuracy is  $5.7\%$ , when the power supply voltage drops, the undervoltage detection threshold is  $1.58\sim 1.663\text{ V}$ , the accuracy is  $4.9\%$ . The system application simulation results show that when the power supply voltage exceeds the normal operating voltage threshold of the system, the over-voltage and under-voltage protection circuit will control the system to enter the shutdown mode and realize the protection function.

**Keywords:** low-voltage system; under-voltage protection; over-voltage protection; threshold accuracy

## 0 引言

过压欠压保护电路是低压电子系统及芯片的主要构成单元,是保证供电电压可靠性的关键部分<sup>[1]</sup>。其主要作用是对电源电压进行监测<sup>[2-3]</sup>,防止外部噪声干扰、电源供电操作失误而引发过压、欠压现象<sup>[4]</sup>出现,避免系统或芯片器

件损坏<sup>[5]</sup>。为满足电子系统及芯片的电源电压稳定性需求,国内外研究人员设计了不同的过压、欠压保护电路结构。

文献[6]提出的电路结构采用双门限电压比较器,大量运用运算放大器和电阻,该结构避免了电源开关误动作的产生。文献[7]提出的电路结构基本由电阻与二极管组成,

收稿日期:2021-11-20

\* 基金项目:国家自然科学基金重点项目(62090012,61531016,61831017)、四川省科技支撑计划重点项目(2020YFG0282,2020YFG0028,2020YFG0452)资助

实现了防反接功能。以上两个文献中的电路多适用于高压条件,输出阈值电压精度不高,电路面积功耗较大。文献[8]提出的电路结构采用比较器和外部电流偏置电路,该结构输出阈值电压精度有所提高。文献[9]提出的电路结构具有预调节器,采用了比较器及带隙基准,电压精度也有所提高。此两个文献中的电路不仅结构复杂度增加,且没有过压保护电路结构,保护功能单一。

本文针对以上问题,整体过压欠压保护电路拟采用类似带隙基准结构,节省比较器与外部偏置电流,减少二极管使用,以达到提高输出阈值电压精度,精简电路结构与降低电路功耗的目的。同时在电路的欠压保护阈值门限电压中设计一定迟滞量,防止系统在阈值附近反复关断。最后将电路在一个低压电源管理系统中进行应用实验,以期在供电电压超出系统正常工作电压范围时,实现对系统的保护功能,进而达到提高系统工作稳定性的目的。

## 1 保护电路应用与设计分析

低压电源管理系统结构如图1所示。过压欠压保护电路在系统中检测电源电压变化,当电源电压高于或低于系统正常工作电压阈值时,电路输出高电平,将系统关断。

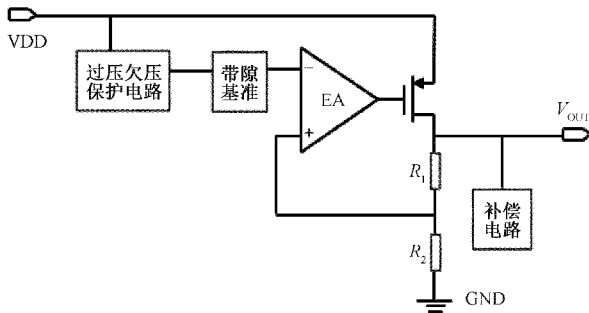


图1 低压电源管理系统结构

### 1.1 过压保护电路

传统过压保护电路结构如图2所示,主要由电阻分压采样部分、比较器部分和二极管构成<sup>[10]</sup>。供电电源通过一串分压电阻进行采样后输入到比较器<sup>[11]</sup>,与基准电压进行比较;当输入电源电压VIN从0上升时,采样电压与基准电压VREF比较后输出高电平,二极管D1截止,当供电电压过压时:

$$V_{ovp1} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3} V_{REF} \quad (1)$$

此时比较器输出低电平,则二极管D1导通,比较器正端口电压为:

$$V_+ = \frac{(V_{REF} - V_D)R_5}{R_4 + R_5} + V_D \quad (2)$$

其中,VD为二极管导通压降。

当供电电压由过压状态转换为正常状态时,比较器输出端输出高电平,二极管D1再次截止,此时供电电压为:

$$V_{ovp-} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3} V \quad (3)$$

此架构在过压保护阈值中设计了迟滞量,可防止系统误关断。二极管的连接方式影响信号上升和下降时间<sup>[12]</sup>,且电路结构较为复杂,实现较难,所需供电电压较大,电路功耗也较大,不适合在低压环境应用。

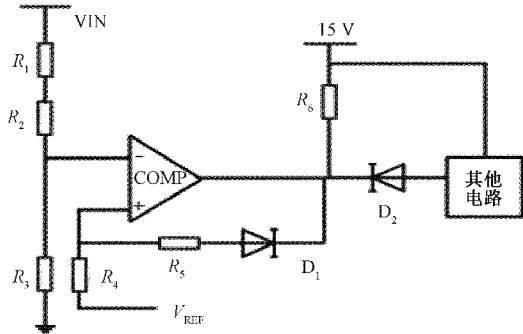


图2 传统过压保护电路结构

### 1.2 欠压保护电路

传统欠压保护电路基本结构如图3所示,架构中一般包含电阻分压网络、比较器、带隙基准电路和电流偏置<sup>[13]</sup>。输入电压VIN通过电阻分压网络进行采样,然后将采样所得的电压VSA与基准电压VREF进行比较。当采样电压VSA大于基准电压VREF时,输出端口UVLO为低电平,后续电路正常工作,当采样电压VSA小于基准电压VREF时,输出端口UVLO为高电平,后续电路关断。整体电路利用电阻分压网络和比较器的反馈特性实现迟滞功能,使得芯片的欠压阈值门限不同,防止芯片重复关断。整体结构较为成熟、原理简单、易于实现,但功耗较大,不利于集成电路低压低功耗设计发展。

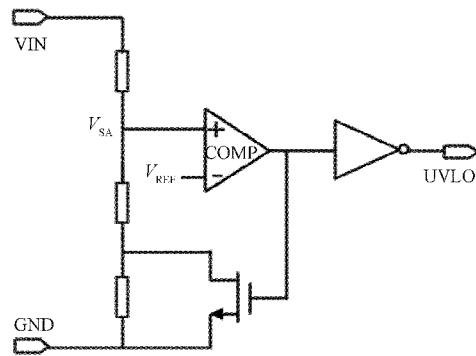


图3 传统欠压保护电路结构

## 2 电路设计

为将电源电压锁定在芯片正常工作电压范围内,防止芯片被损坏,在欠压保护基础上增加过压保护功能,形成过压欠压保护电路。本文所提出的过压欠压保护电路结构如图4所示。图中左半部分为过压保护电路,由电阻R1~R3、PMOS管P1~P2、NMOS管N1~N2、二极管D1~D2组成;

右半部分为欠压保护电路,由电阻  $R_4 \sim R_8$ 、PMOS 管  $P_3 \sim P_7$ 、NMOS 管  $N_3 \sim N_4$ 、三极管  $Q_1 \sim Q_4$ 、反相器、施密特触发器、缓存器组成。

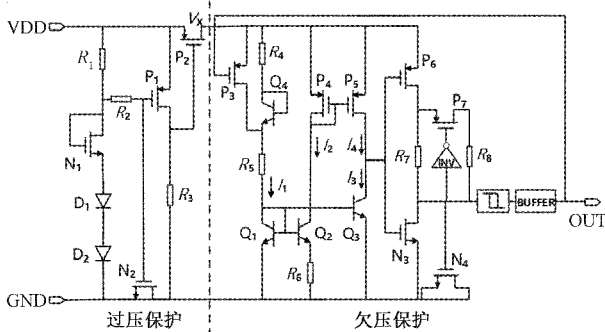


图 4 过压欠压保护电路结构

过压保护电路中, MOS 管  $N_1$  与二极管  $D_1$ 、 $D_2$  决定过压保护阈值,  $R_2$  与 MOS 管  $N_2$  形成简易滤波器。当输入的电源电压  $V_{DD}$  低于二极管支路导通压降时, 二极管  $D_1$ 、 $D_2$  处于截止状态;  $P_1$  栅极电压通过电阻  $R_1$ 、 $R_2$  上拉至电源电压, 此时  $P_1$  栅极源极电位相等, 其栅极源极电位差小于 MOS 管开启电压阈值, 则  $P_1$  处于截止状态;  $P_2$  栅极通过电阻  $R_3$  下拉到地,  $P_2$  导通, 此时  $P_2$  漏极电压  $V_x$  约为电源电压大小, 且作为供电电压输入到后续电路中。当电源电压  $V_{DD}$  大于二极管支路导通电压时, 二极管  $D_1$ 、 $D_2$  导通;  $P_1$  栅极被下拉到地, 此时  $P_1$  栅极源极电位差满足 MOS 管开启条件,  $P_1$  导通;  $P_2$  栅极电压升高, 栅极源极电位差不满足 MOS 管开启条件,  $P_2$  截止, 此时  $P_2$  漏极电压  $V_x$  为 0, 则后续欠压保护电路处于关断状态, 进入过压保护模式。

欠压保护电路中,  $Q_1$ 、 $Q_4$ 、 $R_4$ 、 $R_5$  形成电源电压采样支路;  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $R_6$  构成微电流源;  $P_3$  用于构成外部正反馈回路, 主要实现欠压保护电路的迟滞功能<sup>[14-15]</sup>;  $P_4$ 、 $P_5$  构成 PMOS 管电流镜;  $P_6$ 、 $N_3$ 、 $R_7$  构成反相器,  $P_7$ 、 $R_8$ 、 $N_4$  以及 INV 构成正反馈回路, 可加速反相器翻转, 从而提高电路的响应速度; 施密特触发器用于对电路输出端口输出的控制信号整形, 缓存器 (BUFFER) 用于缓冲输出控制信号, 使电路具有更好的电压传输特性。电路工作过程可分为 3 个不同的阶段, 即电压  $V_x$  为 0, 电压  $V_x$  逐渐上升阶段和电压  $V_x$  下降阶段。当电压  $V_x$  为 0, 小于  $Q_1$ 、 $Q_4$  导通电压时, 欠压保护电路处于关断状态, 输出端口 OUT 为高电平。当电压  $V_x$  逐渐上升, 大于  $Q_1$ 、 $Q_4$  导通电压时,  $Q_1$ 、 $Q_4$  支路产生电流  $I_1$ , 此时  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $R_6$  所构成的微电流源开始工作, 在  $Q_2$ 、 $R_6$  支路会形成电流  $I_2$ , 随后电流  $I_2$  通过  $P_4$ 、 $P_5$  形成的 PMOS 管电流镜复制出电流  $I_4$ , 且电流  $I_1$  通过三极管  $Q_2$  复制出电流  $I_3$ , 一开始  $I_4 > I_3$ ,  $P_5$  的漏极被拉为高电平, 经过整形后输出端口 OUT 为高电平, 此时  $P_3$  截止,  $Q_4$  和电阻  $R_4$  接入电路中; 电压  $V_x$  继续上升, 电流  $I_1$ 、 $I_3$  逐渐增大, 当  $I_3 = I_4$  时,  $P_5$  漏极被拉为低电平, 经过整形后输出端口 OUT 为低电平, 此时  $P_3$  导通, 将  $Q_4$  和电阻  $R_4$  短路。

当电压  $V_x$  逐渐下降时, 工作原理与上述原理近似。

对于一个双极器件, 可以写出:

$$I_C = I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \quad (4)$$

对  $Q_2$ 、 $R_6$  支路进行分析, 且将  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$  发射极面积之比设置为  $1 : n : 1$ , 可得:

$$V_{BE1} = V_{BE2} + I_2 R_6 \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)中可得电流  $I_2$  为:

$$I_2 = \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R_6} = \frac{V_T}{R_6} \ln\left(\frac{n I_1}{I_2}\right) \quad (6)$$

由前面分析可知, 电压  $V_x$  逐渐上升, 当电流  $I_3 = I_4$  时, 即  $I_1 = I_2$  时, 输出端口 OUT 电平会从高电平变成低电平, 后续电路进入正常工作状态, 且此时所对应的电压  $V_x$  大小即为欠压保护电路的复位阈值大小, 可得:

$$I_2 = I_1 = \frac{V_T}{R_6} \ln n \quad (7)$$

再对电阻分压网络支路进行分析, 可得:

$$V_{X11} = (R_4 + R_5) I_1 + V_{BE4} + V_{BE1} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)中, 即可得复位阈值大小为:

$$V_{XH} = \left(\frac{R_4 + R_5}{R_6}\right) V_T \ln n + V_{BE1} + V_{BE4} \quad (9)$$

同样, 由前面分析可知, 当输出端口 OUT 电平为低电平时,  $P_3$  导通, 三极管  $Q_4$  和电阻  $R_4$  短路。电压  $V_x$  逐渐下降到一定程度时, 输出端口 OUT 会从低电平变为高电平, 后续电路会进入关断状态, 此时所对应的电压  $V_x$  大小则为保护电路的欠压检测阈值大小:

$$V_{XL} = R_5 I_1 + V_{BE1} \quad (10)$$

将式(7)代入式(10)中, 即可得:

$$V_{XL} = \frac{R_5}{R_6} V_T \ln n + V_{BE1} \quad (11)$$

由式(9)、(11)可计算得电路阈值门限迟滞量为:

$$\Delta V_x = \frac{R_1}{R_6} V_T \ln n + V_{BE4} \quad (12)$$

### 3 仿真结果及分析

采用 SMIC 0.18  $\mu\text{m}$  标准 CMOS 工艺, 在 Cadence 软件中对设计的过压欠压保护电路进行了瞬态特性仿真, 在低压电源管理系统中对电路进行了功能性仿真。

#### 3.1 保护电路输出信号瞬态仿真

过压欠压保护电路输出端口信号 OUT 瞬态特性如图 5 所示。仿真时, 设置输入电压  $V_{DD}$  为 0~6 V 三角波信号; 不同工艺角下, 温度于  $-40^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$  区间内变化。从仿真曲线可以分析出, 输出端口信号 OUT 在电源电压较低和较高时, 为高电平 3.3 V; 当电源电压在正常范围内时, 为低电平, 说明电路能够检测电源电压变化, 并输出相应高低电平, 电路基本功能实现。同时, 在 FF、SS、TT 三种不同工艺角下的仿真曲线重合度较高, 表明电路受工艺、温度变化影响不大。

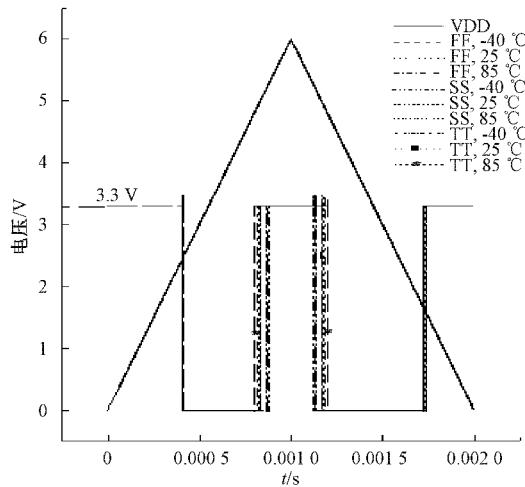


图5 输出端口信号 OUT 瞬态特性

表1为电路工艺-温度-阈值仿真数据。仿真结果表明,在TT工艺角下,温度为25℃时,迟滞量为810 mV;相同工艺角,不同温度下,整体电路测试出的迟滞量最大偏差为50 mV;输出阈值电压精度高。

表1 工艺角-温度-阈值仿真结果

工艺角	温度/℃	$V_{\text{HII}}/\text{V}$	$V_{\text{OL}}/\text{V}$	$V_{\text{XL}}/\text{V}$
TT	-40	2.46	5.16	1.60
	25	2.43	5.07	1.62
	85	2.43	4.93	1.66
SS	-40	2.50	5.22	1.58
	25	2.45	5.20	1.62
	85	2.43	5.17	1.66
FF	-40	2.43	4.98	1.61
	25	2.42	4.95	1.62
	85	2.42	4.93	1.64

本文与参考文献电路结构数据对比如表2所示。相比于文献[6]所检测的过压阈值19.4 V,本文电路结构检测的过压阈值降低为5 V;相比于文献[8]的检测精度5.34%,本文的检测精度提升为3.2%;相比于文献[9]的功耗119  $\mu\text{W}$ ,本文电路结构功耗为18.172  $\mu\text{W}$ 。因此,本文所设计结构更适用于低压系统,电路检测阈值精度提升,功耗得到降低。

### 3.2 系统功能性仿真

低压电源管理系统在电源电压为0~6 V三角波信号下的输出电压曲线如图6所示。通过仿真曲线可以分析出,当电源电压低于系统正常工作电压范围时,保护电路输出信号OUT为高电平,并将系统关断,系统此时进入欠压保护模式,系统输出电压 $V_{\text{OUT}}$ 为0;当电源电压高于系统正常工作电压阈值时,保护电路输出信号OUT同样为高电平,并将系统关断,防止系统中器件被击穿烧毁,系统此

表2 文献数据分析对比

参数	文献[6]	文献[8]	文献[9]	本文
电源电压/V	—	5	10	3.3
工艺/ $\mu\text{m}$	—	0.25	0.18	0.18
温度/℃	25	-40~80	-40~150	-40~85
高阈值/V	22.7	3.79	—	2.44
过压阈值/V	32.5	—	—	5
低阈值/V	19.4	1.77	—	1.62
精度/%	—	5.34	—	3.2
功耗/ $\mu\text{W}$	—	17.3	119	18

时进入过压保护模式,系统输出电压 $V_{\text{OUT}}$ 也为0;当电源电压处于上述两种情况之间时,保护电路的输出信号OUT为低电平,系统在延迟约0.8~1  $\mu\text{s}$ 后开始正常工作,输出电压 $V_{\text{OUT}}$ 为1.202 V的直流电压,系统性能达到预期目的。同时,通过曲线可以分析出系统进入欠压保护模式时的两节点电压不同,保护电路中所设计的欠压阈值迟滞量得到体现。

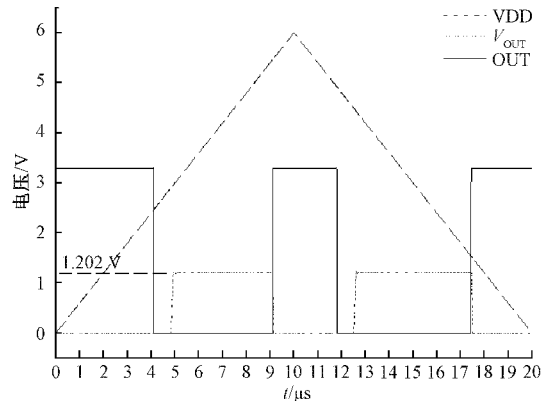


图6 系统输出电压曲线

## 4 结 论

本文基于SMIC 0.18  $\mu\text{m}$ 标准CMOS工艺设计了一种过压欠压保护电路,提高了输出阈值精度,简化了电路结构,在电路中设计的欠压保护阈值迟滞量可防止系统在欠压阈值附近反复关断,其过压欠压保护功能正确性在低压电源管理系统的应用仿真中得到验证。仿真结果表明,在温度-40℃~85℃的变化区间内,在电源电压下降过程中,电压低于1.62 V时,电路输出高电平,系统进入欠压保护模式;在电源电压上升过程中,电压在2.431~5.07 V之间时,电路输出低电平,系统进入正常工作模式;在电源电压超过5.07 V时,电路输出高电平,系统进入过压保护模式。当电路工作在3.3 V电源电压工作条件下,功耗低至18.172  $\mu\text{W}$ ,满足低电压低功耗设计要求。但本设计在过压保护阈值中未设计迟滞量,过压阈值对温度与电压变化的敏感度还有待降低。

## 参考文献

- [1] 王晨苑,何怡刚,王传坤,等. 高压多芯片并联 IGBT 模块故障监测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10):98-106.
- [2] 张商州,袁训锋,楚冰清,等. 基于 DSP 的蓄电池储能效率测试系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(8):145-149.
- [3] 郭敏,庄信武,高飞. 电池管理系统 BMS 性能测试装置方案设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(11):43-46.
- [4] 王莉. 一种过电压欠电压保护提示电路的设计[J]. 电子制作, 2014(21):21.
- [5] 安书董,李亚锋,王昭. 基于 FPGA 的具有过压保护功能数据采集电路设计[J]. 长江信息通信, 2021, 34(3): 96-98.
- [6] 田普涛,徐晓伟. 蓄电池供电系统的过压欠压保护电路设计[J]. 电子世界, 2020(1):147-148.
- [7] 骆训卫,宋金华,俱强伟. 一种实用的过欠压防反接多功能保护电路[J]. 电子产品世界, 2021, 28(7):46-50.
- [8] 郭仲杰,韩晓,何帅,等. 无带隙基准的超低功耗欠压检测技术研究[J]. 固体电子学研究进展, 2021, 41(5): 394-398.
- [9] GROBE J, HANHART M, MAUL F, et al. Design of a flexible bandgap based high voltage UVLO with Pre-Regulator [C]. 2020 27th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems(ICECS), 2020: 1-4.
- [10] 周维瀚,张文杰,朱志宇,等. 一种应用于 CAN 总线芯片的过压保护电路设计[J]. 半导体技术, 2019, 44(3): 171-176, 200.
- [11] 陈超. 基于 BCD 高压工艺的过压过流保护开关芯片设计[J]. 科学技术创新, 2021(19):7-9.
- [12] THOMAS B. 对敏感型电子的信号输入实施过压保护之可靠新方法[J]. 中国集成电路, 2019, 28(11):85-86.
- [13] 李宏杰,李立. 一种应用于电源管理芯片的欠压锁定电路[J]. 电子世界, 2018(24):121-122.
- [14] TIAN L, LAI X Q. Symmetrical structure strong drive capability optocoupler sensor [J]. Sensors and Transducers, 2013, 159(11): 319-323.
- [15] ZHANG Y W, ZHU J, SUN W F. A novel UVLO circuit with current-mode control technique for DC-DC converters [J]. Advanced Information and Computer Technology in Engineering and Manufacturing, Environmental Engineering, 2013, 765-767: 2534-2537.

## 作者简介

赵川粤, 硕士研究生, 主要研究方向为模拟集成电路设计。

E-mail: 1714324034@qq.com

冯全源(通信作者), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为集成电路设计、功率器件设计、移动天线与智能天线设计等。

E-mail: fengquanyuan@163.com

刘恒毓, 硕士研究生, 主要研究方向为模拟集成电路设计。

E-mail: 790814313@qq.com