

# 硬件控制的射频电源功率检测电路仿真研究

姚龙\* 马聪伟 侯丽丽  
(季华实验室 佛山 528000)

## Simulation Analysis of RF Power Detection Controlled by Hardware Circuit

YAO Long\*, MA Congwei, HOU Lili  
(Jihua Laboratory, Foshan 528000, China)

**Abstract** Nowadays, the competition in the field of domestic semiconductors largely depends on the competition of semiconductor equipment and core components. The anti-interference ability and stability of the equipment are important criteria for judging the quality of equipment. For the RF power equipment, the accuracy, stability and fast response of the control loop are important indicators that determine the performance of this product. Therefore, this paper designs a pure hardware circuit power signal detection loop based on the related principles of capacitor voltage sampling, current transformer sampling and op-amp circuit, and uses the simulation software Multisim to perform simulation experiments, and the output voltage is numerically equal to experimental results of output power. At the same time, by changing the input power of the bus signal, it is obtained that the output voltage and the input power have a very high linear correlation, so the detection loop has good stability and can be applied to the detection of radio frequency power in a large range.

**Keywords** Linear correlation, Forward power, Multiplier, Operational amplifier

**摘要** 当今,国内半导体芯片领域的竞争很大程度上取决于半导体装备以及核心零部件的竞争。设备的抗干扰能力以及稳定性等特性是衡量设备优劣的重要标准。对于射频电源而言,控制回路的精准、稳定以及快速响应是决定射频电源这款产品性能好坏的重要指标。因此,本文基于电容分压采样、电流互感器采样以及运放电路等相关原理,设计了一款纯硬件电路的功率信号检测回路,并用仿真软件 Multisim 进行模拟仿真实验,得到输出电压在数值上等于输出功率的实验结果。同时,通过改变母线信号的输入功率,得到输出电压和输入功率具有极高的线性相关性,因此该检测回路具有很好的稳定性,能够适用于大量程下的射频电源功率检测。

**关键词** 线性相关 前向功率 乘法器 运放

中图分类号: TM930.1

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202208002

随着社会的快速发展,芯片行业极大影响着人工智能、工业物联网、自动驾驶等新兴领域研究。在中美“贸易战争”的大环境下,国外对国内各种半导体装备技术展开了更为严格的技术和装备封锁,尤其是应用于半导体芯片工艺的高端射频电源领域。其中射频电源可靠性是制约射频电源国产化的重要因素,尤其是在半导体行业,设备故障率高不仅影响产品质量,降低设备的利用率,甚至会影响半导体器件生产厂商整个的工艺线,带来巨大的

成本压力,因此,实现国产化产业链升级就必须提高相关设备的可靠性<sup>[1-3]</sup>。

对于射频电源系统,功率检测模块作为其核心模组,在提高射频系统稳定性上扮演者举足轻重的作用。如今功率检测的方式有很多,可以采用定制芯片实现功率检测,也可以利用软件和硬件相结合的方式实现,还可以采用纯硬件电路进行功率检测<sup>[4-8]</sup>。基于量程及成本考虑,本文设计了一种由纯硬件组成的功率检测电路,适用于 400 kHz 射频电

收稿日期: 2022-08-03

基金项目: 季华实验室青年基金项目 (X220291XA220)

\* 联系人: E-mail: ylong0220@sina.com

源输出功率检测, 并对其进行模拟仿真。

### 1 系统组成

该功率信号检测模组主要由三部分组成: 前向功率检测电路、反向功率检测电路以及电压/电流采

样电路。由于功率与电压和电流相关, 所以必须检测母线电压和电流信号, 这里通过电流互感器采集母线电流信号, 利用电容分压原理采集母线电压信号, 其系统框图如图 1 所示。

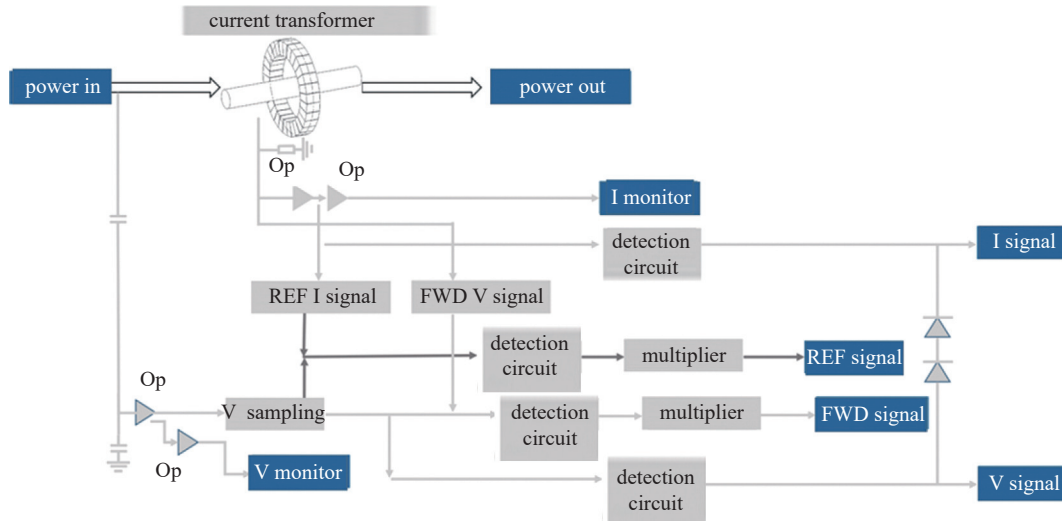


图1 检测电路系统框图

Fig. 1 RF Detection circuit system diagram

#### 1.1 电压采样电路

对于母线射频电压信号, 利用电容“隔直通交”的特性, 基于电容分压原理对该电压信号进行采样<sup>[9]</sup>。其中, 为了避免后端电路等效阻抗对采样电容的影响, 利用运放电路的“虚短虚断”功能, 设计电压跟随器电路, 保证采样电容上电压信号能精准的传输到后级电路用于前向/反向功率计算, 其原理框图如图 2 所示。

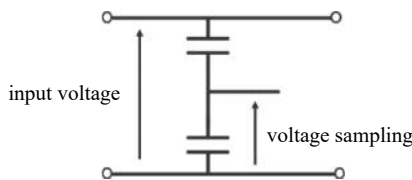


图2 电容分压原理

Fig. 2 Principle of capacitive voltage division

#### 1.2 电流采样电路

电流采样电路采用电流互感器对射频输入电流信号进行信号采样<sup>[10]</sup>。基于法拉第电磁感应原理, 将单芯导线均匀缠绕在一个环形骨架上, 母线信号通过环形骨架, 利用电磁感应原理对被测电流信号进行采样。同时, 通过高精度采样电阻将采样电流

信号转换为电压信号用于前向/反向功率计算, 其原理如下图 3 所示。

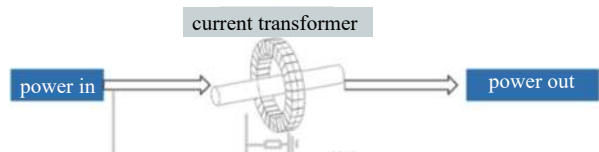


图3 电流采样原理

Fig. 3 Principle of current sampling

#### 1.3 前向/反向功率检测电路

预设母线电压为  $U_0$ , 母线电流为  $I_0$ , 在已知线路特征阻抗  $Z_0$  下, 由传输线方程可以得到:

$$U_0 = U_f + U_r \tag{1}$$

$$I_0 = I_f - I_r \tag{2}$$

式中  $U_f$  为前向电压,  $U_r$  为反向电压,  $I_f$  为前向电流以及  $I_r$  为反向电流。从而可以得到前向电压和反向电压的表达式:

$$U_f = \frac{U_0 + I_0 * Z_0}{2} \tag{3}$$

$$U_r = \frac{U_0 - I_0 * Z_0}{2} \tag{4}$$

进而可以得到前向功率计算  $P_f = \frac{U_f^2}{Z_0}$ , 以及反向

功率计算  $P_r = \frac{U_r^2}{Z_0}$ 。

## 2 系统原理

在本次设计方案中,以母线信号为功率 3 kW 的 400 kHz 正弦信号。考虑到传输线的特征阻抗为 50  $\Omega$ ,从而得到母线电压有效值为 387.3 V,峰值电压为 547.6 V,母线峰值电流为 10.95 A。

通过选取合适的电容  $C_1$  和  $C_2$  进行分压采样,以及设计匝比为 40 的电流互感器采样如图 4 所示,得到采样电压和采样电流为:

$$U_v = \frac{U_0}{133} \quad (5)$$

$$U_i = \frac{R_2 * U_0}{40 * Z_0} \quad (6)$$

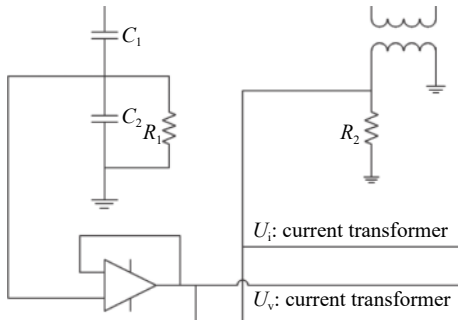


图4 电容分压和电流互感器采样电路

Fig. 4 Capacitive voltage divider and current transformer sampling circuit

选取适宜带宽的运放器件,设计精密检波电路<sup>[11-15]</sup>,并选取合适的电阻  $R_3$ 、 $R_4$  以及  $R_9$ ,得到输出电压为:

$$U_{f1} = -\left(\frac{R_9}{R_4} V_v + \frac{R_9}{R_3} V_i\right) \quad (7)$$

其中  $U_{f1}$  和前向电压  $U_f$  具有相同的形式。

再利用减法电路以及 RC 低通滤波电路得到表征前向电压的直流信号  $U_{f2}$ ,如图 5 所示。

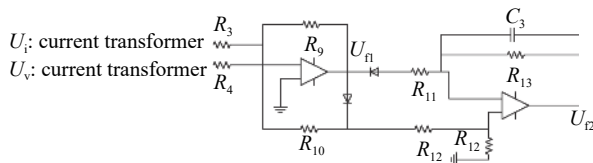


图5 精密检波整流电路

Fig. 5 Precise detection rectifier circuit

利用乘法器芯片 RC4200AN 的 1、2 引脚电流乘积等于 3、4 引脚电流乘积功能,即  $I_4 * I_3 = I_1 * I_2$ ,设计如图 6 的乘法器电路<sup>[16-17]</sup>。

$$I_1 = \frac{V_{\text{reff}}}{R_{14}} + \frac{U_{f2}}{R_{14}} \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{V_{\text{reff}}}{R_{14}} + \frac{U_{f2}}{R_{14}} \quad (9)$$

$$I_4 = \frac{V_{\text{reff}}}{R_{14}} \quad (10)$$

$$I_3 = \frac{V_{\text{reff}}}{R_{14}} + \frac{U_{f2}}{0.5R_{14}} + I_x \quad (11)$$

其中  $I_x$  为流过电阻  $R_{15}$  的电流值,根据式(8)、式(9)、式(10)和式(11)得到:

$$I_x = \frac{U_{f2}^2}{R_{14} * V_{\text{reff}}} \quad (12)$$

从而得到:

$$U_f = \frac{R_{15} U_{f2}^2}{R_{14} * V_{\text{reff}}} \quad (13)$$

其中  $U_f$  电压在数值上等于输出的前向功率值。利用此原理可以将大功率信号通过分压,数值处理后,以电压的形式实时输出到显示器上,方便后续采样和监测。

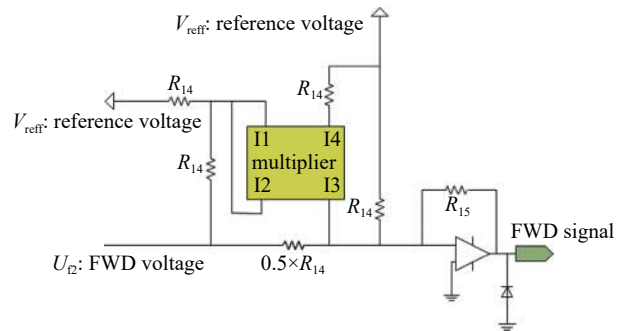


图6 乘法器外围电路

Fig. 6 Peripheral circuit of multiplier

## 3 系统仿真

根据上面的电路原理设计检测电路,并对电路进行仿真,仿真所用的软件为 Multisim。该软件作为电路设计开发工具,提供了一个非常丰富的元器件数据库,并提供用于信号监控的完备工具系统,如示波器、功率计以及电压电流表等,极大方便了工程师进行模块化电路设计。

### 3.1 精密检波整流电路

精密检波电路如图 7 所示。输入信号经运算放大器  $U_1$  和二极管  $D_1$ 、 $D_2$  组成的检波电路之后,利用二极管的单向导通性,在二极管  $D_1$  阳极处得到输入信号负半轴的信号,而在二极管  $D_2$  阴极处得到输入信号正半轴的信号,再经过  $U_2A$  组成的减

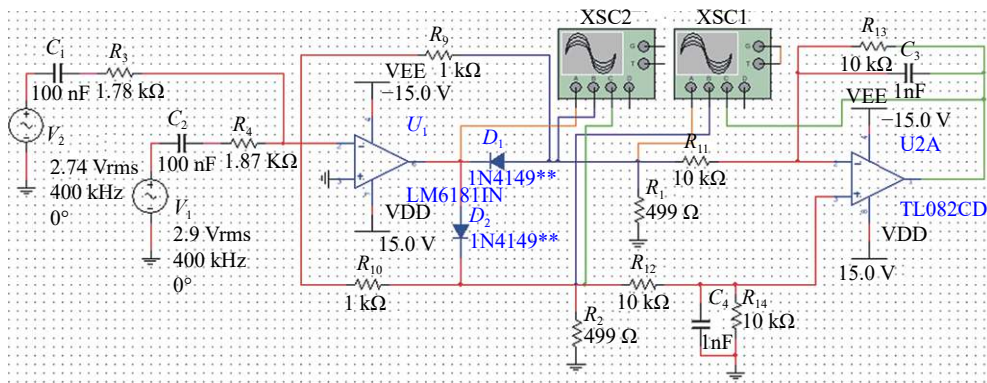


图7 精密检波整流电路仿真

Fig. 7 Simulation of precise detection rectification circuit

法电路则可以得到全为正信号的整流信号 $U_{i2}$ 。

仿真结果如图 8 和图 9 所示:

$U_1$  和  $U_2$  的有效值对应 3 kW 功率输出的母线电压和母线电流的采样值。可以看到信号经过二

极管检波之后, 正半轴信号流入减法器正输入端, 而负半轴信号流入减法器负输入端。由减法器原理可知, 输出信号为减法器正输入端信号减去负输入端信号。这样便可以得到一个正半轴馒头波, 经过电容  $C_3$  和  $C_4$  滤波便可得到正比于  $U_{i2}$  的直流信号。

可以得到  $U_{i2}$  的有效值为 2.76 V, 再利用乘法器芯片 RC4200AN, 选取合适的  $R_{15}$ 、 $R_{14}$  以及  $V_{ref}$ , 其中:  $R_{15}=2 \cdot R_{14}$ ,  $V_{ref} = 5 \text{ V}$ 。代入式(13)得到表征前向功率电压  $U_f$  为 3 V。因此,  $U_f$  在数值上可以表示为 3V 代表 3 kW 的前向功率。同理可以得到反向功率的计算。

表 1 是不同功率下, 模拟仿真得到的表征前向功率  $U_f$  数值。可以看到, 在小于 5 kW 的功率范围内, 其数值线性度非常好, 近似达到 1 : 1 的关系<sup>[18-19]</sup>。

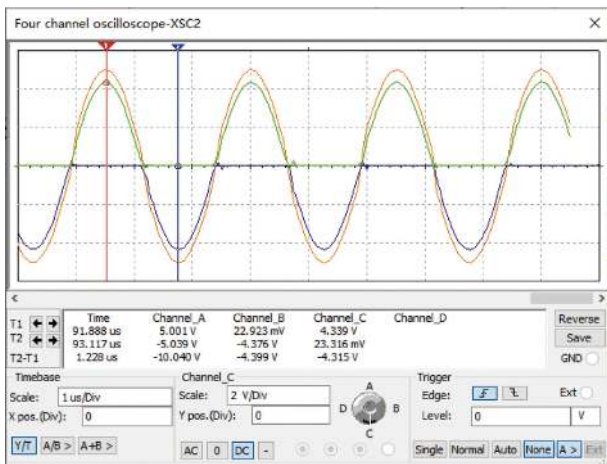


图8 输出端经检波二极管输出

Fig. 8 Detector diode output signal

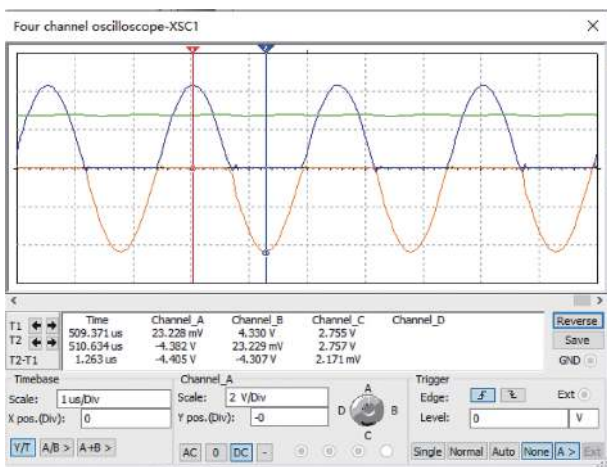


图9 检波后信号经减法器输出

Fig. 9 Subtractor output signal

表 1 不同功率下的检测结果

Tab. 1 Test results under different power

功率/ kW	$U_{i2}/\text{V}$		$U_f/\text{V}$ (peak)	$U_r/\text{V}$ (peak)	$U_f/U_r$
	$U_{rms}$	$U_{peak}$			
1.0	223.6	316.0	2.37	2.24	0.998
2.0	316.0	447.0	3.36	3.12	2.007
3.0	387.3	547.6	4.11	3.88	3.07
4.0	447.0	632.0	4.754	4.49	4.096
5.0	500.0	707.0	5.31	5.02	5.12

## 4 结论

设计该型号功率检测电路相较于利用定向耦合器作为前向/反向功率检测, 具有电路简单, 维护方便, 经济实惠等优势。同时适用范围广, 通过合适的物料选型可以得到零到数十千瓦的检测量程, 非常适合在射频电源中作为输出信号的监测回路。

## 参 考 文 献

- [1] 雷震霖. 泛半导体装备与零部件[C]/第四届粤港澳大湾区真空科技创新发展论坛暨2020年广东省真空学会学术年会. 佛山: 广东省真空学会, 2020: 1
- [2] 张勇. 通信系统中射频功率测量的应用[J]. *科技传播*, 2015, 7(7): 96, 91
- [3] He C, Luo F G, Li B. Dispersion measuring technique based on second order lowest power of radio frequency signal[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(2): 169-173 (贺成, 罗风光, 李斌. 基于射频信号2阶零功率的链路色散测量技术[J]. *激光技术*, 2017, 41(2): 169-173(in chinese))
- [4] Huang C, Ye R F. A de-embedding RF measurement technique[J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2008, 13(2): 132-134, 35 (黄成, 叶荣芳. 一种去嵌入射频测量技术[J]. *电路与系统学报*, 2008, 13(2): 132-134, 35(in chinese))
- [5] 齐家红. 20 W线性预失真功率放大器的研究[D]. 成都: 电子科技大学
- [6] He H H. Application of RF power measurement in communication systems[J]. *Radio Engineering*, 2002, 32(10): 54-59 (和宏海. 射频功率测量在通信系统中的应用[J]. *无线电工程*, 2002, 32(10): 54-59(in chinese))
- [7] Jiang Z, Meng J, He F M, et al. Design of a RF power sensor circuit based on the AD8307[J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2014, 34(10): 74-76 (蒋振, 孟进, 何方敏, 等. 基于AD8307的射频功率测量电路设计[J]. *船电技术*, 2014, 34(10): 74-76(in chinese))
- [8] Sha Z Y, Xue S Q, An G C. The technology and application of RF power measurement[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2005, 42(8): 9-11 (沙占友, 薛树琦, 安国臣. 射频功率测量技术及其应用[J]. *电测与仪表*, 2005, 42(8): 9-11(in chinese))
- [9] 刘晓芳. 射频功率测量方法研究与电路设计[D]. 郑州大学, 2007.
- [10] 屠丽华, 于纪良. 电流互感器专业基础知识问答[J]. *上海计量测试*, 2003, 30(003): 46-47
- [11] Chang L. Study on principle and distortion of diode envelope detection circuit[J]. *Electronic Test*, 2013(17): 34-36 (常亮. 二极管包络检波电路原理及失真探究[J]. *电子测试*, 2013(17): 34-36(in chinese))
- [12] Ma X P, Cheng X Y, Hou W Z. Simulation of diode peak value envelope detector based on Multisim 10.1[J]. *Experimental Technology and Management*, 2012, 29(2): 85-87 (马兴平, 程秀英, 侯周周. 基于Multisim 10.1的二极管峰值包络检波仿真[J]. *实验技术与管理*, 2012, 29(2): 85-87(in chinese))
- [13] 郑昊祖. 二极管包络检波电路的仿真分析[J]. *成功(教育)*, 2008(11): 214
- [14] Li X, Zheng H J. Selection principle and applied technologies of the operational amplifiers[J]. *Instrumentation Technology*, 2005(3): 67-68 (黎昕, 郑宏军. 集成运算放大器的选择策略与应用技术[J]. *仪表技术*, 2005(3): 67-68(in chinese))
- [15] 刘邦彦. 集成运算放大器的选择[J]. *世界电子元器件*, 2001(2): 63-66
- [16] Liu S Y. A simplified analysing method of analog multiplier[J]. *Journal of EEE*, 2002, 24(5): 56-57, 60 (刘淑英. 模拟乘法器的简易分析方法[J]. *电气电子教学学报*, 2002, 24(5): 56-57, 60(in chinese))
- [17] Qiu J X, Liu Y. Analysis of operational principle of integrated analogue multiplier[J]. *Journal of Xi'an United University*, 2003, 6(4): 95-97 (邱军兴, 刘鹰. 集成模拟乘法器工作原理的一种分析方法[J]. *西安文理学院学报(社会科学版)*, 2003, 6(4): 95-97(in chinese))
- [18] Yu Z K, Qu W Y. Error analysis on high power RF measurement[J]. *Journal of Microwaves*, 2006, 22(3): 55-57, 61 (余振坤, 曲文英. 射频大功率测量误差分析[J]. *微波学报*, 2006, 22(3): 55-57, 61(in chinese))
- [19] Zhang X H, Wu W, Sun H M. Analysis of errors on testing RF power and the method of improving measurement accuracy[J]. *Modern Radar*, 2003, 25(2): 50-53 (张新好, 武文, 孙合敏, 等. 射频功率测量误差分析及其精度改善方法[J]. *现代雷达*, 2003, 25(2): 50-53(in chinese))