

继电保护测试仪用高电压功率放大电路的研制

李付亮^{1,2}, 吴涛², 周有庆²

(1. 湖南水利水电职业技术学院, 湖南 长沙 410131; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对继电保护测试仪的电压功率放大采用集成功率放大芯片价格昂贵, 且易损坏, 提出了一种性价比高、输出功率大的电压功率放大电路设计方案。首先介绍了继电保护测试仪的硬件结构, 并详细分析了电压功率放大电路的原理, 计算了功率管的管耗, 在此基础上对电路进行了仿真分析, 最后对实际电路进行了试验, 结果表明, 电路可输出功率大、线性度好, 可以满足测试仪对电压功率放大的技术要求, 并且具有很广的应用前景。

关键词: 电压功率放大电路; 功率 MOSFET 管; 继电保护测试仪

Design of high-voltage power amplifying circuit in protective relay test device

LI Fu-liang^{1,2}, WU Tao², ZHOU You-qing²

(1.Hunan Water Conservancy and Hydropower Vocational & Technical College, Changsha 410131,China;

2.Department of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082,China)

Abstract: Considering voltage power amplifier used in protective relay test device with an integrated power amplifier chip is expensive and easily damaged, this paper proposes a design of voltage power amplifier with cost-effective and high output power. Hardware structure of protective relay test device is introduced and the voltage power amplifier circuit theory is analyzed in detail, then, the power consumption of amplifier tube is calculated. On the basis of above, the simulation analysis of the circuit is made. Finally, the actual circuit is tested, the results show that the circuit is of many advantages, such as high output power and well linearity. In a word, this high-voltage power amplifying circuit meets the technical requirements of the protective relay test device, in addition, has a wide application.

Key words: voltage power amplifying circuit; power MOSFET; protective relay test device

中图分类号: TM13; TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)11-0078-04

0 引言

新型继电保护测试仪是一种智能电力设备, 可对各种继电器(如电流、阻抗、差动等)和微机保护进行鉴定, 并可模拟各种复杂的瞬时性、永久性故障进行整组试验。测试仪应能根据实验需要正确产生保护所需的各种电压、电流、相位、频率信号。

为了模拟保护二次现场实际情况, 测试仪的电流输出信号必须达到 0~20(有效值)可调, 输出精度要保证 $\leq 0.2\%$; 输出电压信号需达到 0~100(有效值)可调, 输出精度 $\leq 0.2\%$ 。同时保证电压、电流放大的总谐波 THD $\leq 0.5\%$ 。为此, 所设计的功率放大器必须满足小信号输入、大功率精密输出, 同时能承受大电流、高电压的要求。采用集成的电流功率放大芯片可以使电流输出满足要求, 而对于电压信号的输出, 很难找到高电压下的大功率输出集成功率放大芯片, 如 APEX 公司能输出有效值 100 V 的线

性集成功率放大芯片只有几款, 而这些芯片售价都比较贵, 如果在电压信号输出上用上 2 片这样的集成芯片, 那么整个测试仪的成本将大大增加。

因此, 本文着重论述了一种性价比高的电压功率放大电路方案。

1 继电保护测试仪结构

继电保护测试仪的系统结构主要包括主机通信单元、数字信号产生单元、CPLD 逻辑控制单元、D/A 转换单元、功率放大单元、开入开出单元等。系统结构框图如图 1 所示。

主机通信单元负责通过 RS232 与上位机通信, 负责试验参数设置和仿真数据的发送和接收; 数字信号发生单元主要由高速数字信号处理器 TMS320F2812 及其外围电路组成, 负责波形数据的产生、实时信号的控制; CPLD 逻辑控制单元作为逻辑粘合芯片负责将 DSP 产生的多路 16 位数字波

形数据进行并/串转换,同时作为系统控制片选及电平转换; 开入开出单元主要完成从继电保护测试仪到继电保护装置的控制和实时监测, 通过开入开出单元实现对保护装置反馈信号的统一管理; D/A 转换单元使用高精度的串行数字模拟转换器将 CPLD 产生的串行数字信号转换为模拟信号输出, 经低通滤波和多路开关的选择去驱动功率放大电路; 功率放大单元包括电压功率放大和电流功率放大两部分, 分别将模拟小信号进一步放大, 以得到继电保护测试所需的各种交直流电压、电流信号, 电流功率放大电路采用集成的功率放大芯片实现, 如 OPA549, 电压功率放大电路将在下文做重点分析。

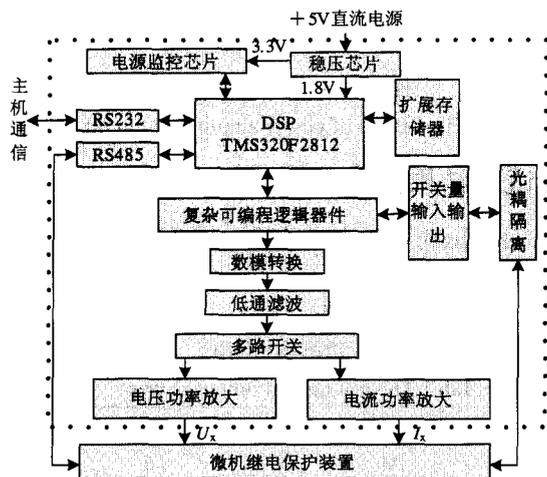


图1 测试仪的系统结构框图

Fig.1 System structure diagram of test device

2 电压功率放大电路的设计

因采用集成功率放大芯片价格昂贵, 故采用分立元件制作功放, 电压功率放大电路原理图如图2所示。Vin 是 D/A 转换再经多路开关后传送过来的模拟小信号输入端, 信号范围是 $\pm 10\text{V}$, Vout 是功放的输出端, 要求放大输出最大有效值可达 $\pm 100\text{V}$ 、电流 1A 。该电路由三部分构成, 分别是前置输入级 (运放 U1)、电压放大级 (Q101、Q102)、功率输出级 (Q103、Q104、T101、T102)。

前置输入级对输入小信号具有缓冲作用, 整个电路的电压串联反馈引至运算放大器 U1 的负输入端, 使电路能够输出稳定的电压信号, 总的放大倍数为: $1+R_{103}/R_{104}$, 并且运算放大器摆率高, 可以消去输出信号的交越失真现象。电压放大级由三级管对管组成, 对运放输出的信号放大。功率输出级起到功率输出的作用, T101、T102 为功率 MOSFET 管 IRFP460, 该 MOS 管漏源级可承受电压 V_{DSS} 为 500V , 漏级电流 I_D 可达 20A , 总耗散功率高达

250W 。三级管 Q103、Q104 是 MOS 管的驱动管, 改变电阻 R119、R121 两端的电压从而改变 MOS 管漏源电压 V_{DS} 以控制 MOS 管导通程度, 达到控制输出电压的目地, 也可以将 Q103、T101 和 Q104、T102 看成一对达林顿对管。

测试仪在某些环境下工作时有可能发生电压输出短路, 为避免输出短路使 MOS 管变得过热甚至烧毁, 必须对功率放大电路添加限流保护及过热保护, Q105、Q106 在电路中就起到限流作用, 以 Q105 为例, 当经 MOS 管 T101 输出的电流高于 $0.7/R_{124}$ (假设 Q105 基极一射级电压为 0.7V) 时, Q105 导通, 从而限制了输出电流。

过热保护可采用集成温度开关芯片连接在散热器上, 测量电压功率放大管在散热器上产生的温度, 如果散热器的温度超过 93°C (这时晶体管的结温度 T_j 靠近 150°C 半导体熔点), 这时应迅速通过逻辑电平的变化来关断功率电源。

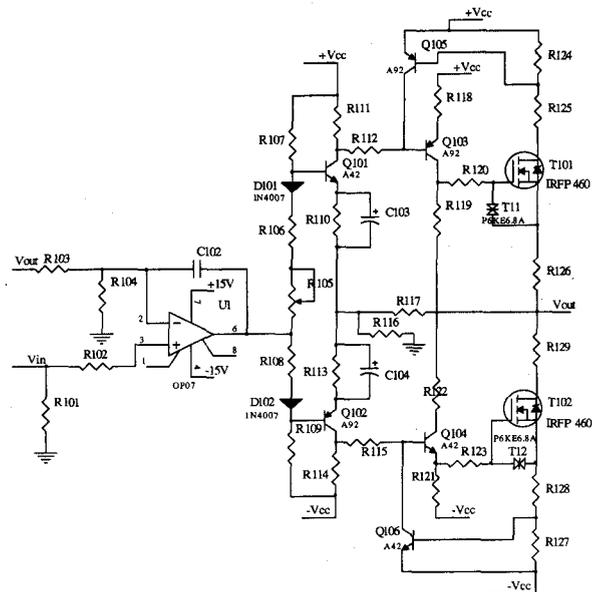


图2 电压功率放大原理图

Fig.2 Schematic circuit of voltage power amplifying

3 管耗计算

考虑到 T101 和 T102 在一个信号周期内各导通约 180° , 且通过两管的电流和两管两端的电压在数值上都分别相等 (只是在时间上错开了半个周期)。因此, 为求总管耗, 只需求出单管的损耗就行了。设输出电压为 $v_o = V_{om} \sin \omega t$, 则 T101 的管耗为:

$$P_{T1} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (V_{cc} - v_o - \frac{v_o}{R_L} R_{TO}) \frac{v_o}{R_L} d(\omega t) \quad (1)$$

式中： V_{cc} 为电源电压， R_L 为负载电阻， $R_{TO}=R_{124}+R_{125}+R_{126}$ ， R_{124} 、 R_{125} 、 R_{126} 为图 2 中对应的电阻阻值。

将式 (1) 化简得：

$$P_{T1} = \frac{1}{R_L} \left(\frac{V_{cc} V_{om}}{\pi} - \frac{V_{om}^2}{4} - \frac{R_{TO} V_{om}^2}{4R_L} \right) \quad (2)$$

由式 (2) 知，管耗 P_{T1} 是输出电压幅值 V_{om} 的函数，因此可以用求极值的方法求得最大管耗。

令 $dP_{T1} / dV_{om} = 0$,

$$\text{则当 } V_{om} = \frac{2R_L V_{cc}}{\pi(R_{TO} + R_L)} \text{ 时功率管具有最大管}$$

耗，所以，

$$P_{T1m} = \frac{V_{cc}^2}{\pi^2(R_{TO} + R_L)} \quad (3)$$

设电源电压 V_{cc} 为 160 V，电路中 R_{124} 为 0.33 Ω ， R_{125} 、 R_{126} 为 1 Ω ，带 100 Ω 阻性负载时。最大管耗发生在输出电压幅值 V_{om} 约为 99.59 V 时， P_{T1m} 为 25.37 W，此时输出功率为 49.6 W。因此，当输出电压有效值达 100 V 时，输出功率有 100 W，而管耗比 25.37 W 更低，因 IRFP460 在壳温 80℃ 时允许的耗散功率也高达 137.5 W 左右，故功率管的输出功率还能大为提高。

4 功放电路仿真分析

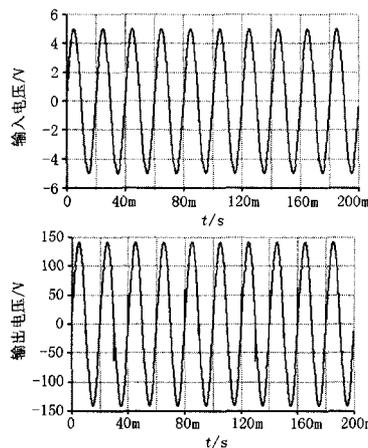


图 3 带 100 Ω 阻性负载时输入输出波形

Fig.3 Input and output waveform with the load of 100 Ω

使用 Multisim2001 对电压功率放大电路进行仿真试验，电源电压取 ± 160 V，放大倍数约为 28.3 倍。图 3 为带 100 Ω 阻性负载时，输入峰值为 5 V，

输出约为有效值 100 V 的波形，此时电路输出功率为 100 W，从仿真图可以看出在输出这么大功率的情况下，输出电压波形仍然较好。

图 4 为电压功率放大电路的幅频响应和相频响应曲线，从图中可知，电路在频率为 10 kHz 的范围内都有很稳定的电压增益，且相位差为 0°。满足保护测试仪输出 10 次谐波的要求。

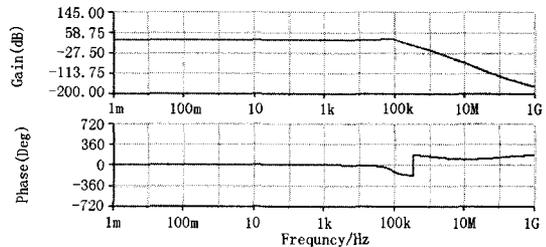


图 4 功率放大电路波特图

Fig.4 Bode of power amplifying circuit

5 试验结果分析

对电压功率放大电路进行试验，给定输入和负载阻值，测得输出电压，并计算输出功率。部分测试数据如表 1 所示。

表 1 功率输出测试

Tab.1 The test data of output power

输入电压 /V	输出电压 /V	放大倍数	负载阻值 / Ω	输出功率 /W
0.35	10.051	28.72	100	1.01
0.69	19.688	28.53	100	3.88
1.77	50.218	28.37	100	25.21
2.47	70.248	28.44	100	49.35
3.54	100.25	28.32	100	100.5

用示波器观测输出电压波形在过零点时叠加有一定的噪声波，可能是两功率管在交替导通时产生的。由测试数据可以得出，输入电压值与输出电压值的比值基本为常数，表明电路具有良好的线性度；在输入电压为 3.54 V，负载为 100 Ω 时，输出功率为 100.5 W，输出电压为 100.25 V，且波形无失真，与计算值基本一致。

6 结论

电压功率放大电路对于小信号和较大信号均能无失真放大，将电路仿真试验和实际电路调试时从示波器观察到的波形相比较可以看出，两种情况下输出电压波形基本一致，并由实验数据表明所设计的电路可以满足测试仪对电压功率放大的技术要求。该电压功率放大电路不仅可以用于继电保护测试仪，而且还可以应用于其它需要高电压、大功率

输出的装置中, 例如可以用在电子式互感器驱动系统继电保护的场合等。

参考文献

- [1] Jacob J M. 功率电子学原理与应用[M]. 蒋晓颖, 译. 北京: 清华大学出版社, 2005.
Jacob J M. Power Electronics Principles and Application[M]. JIANG Xiao-ying, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [2] 欧阳帆, 周有庆, 彭红海. 信号发生装置中两种电流放大电路的设计及比较[J]. 中国仪器仪表, 2005, (8): 98-100.
OUYANG Fan, ZHOU You-qing, PENG Hong-hai. Two Types of Current Amplifying Circuit in Signal Generator and Their Comparison[J]. China Instrument, 2005, (8): 98-100.
- [3] 陈铸华, 周有庆, 吴桂清. 高精度信号发生装置[J]. 中国仪器仪表, 2007, 188 (7): 48-51.
CHEN Zhu-hua, ZHOU You-qing, WU Gui-qing. Design

of High Accuracy Signal Generator Device[J]. China Instrument, 2007, 188(7): 48-51.

- [4] 李胜利. 微机型继电保护测试仪的设计[J]. 继电器, 2006, 34 (19): 68-70.
LI Sheng-li. Design of the Test Instrument for Microcomputer-based Relay Protection[J]. Relay, 2006, 34(19): 68-70.

收稿日期: 2008-07-18; 修回日期: 2008-08-14

作者简介:

李付亮 (1974-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事教学与电气信息、电力系统微机保护及水电站自动化方面的研究;

E-mail: lfliang_@163.com

吴涛 (1984-), 男, 硕士, 研究方向为电气信息、电力系统微机保护及变电站自动化;

周有庆 (1944-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电气信息、电力系统微机保护及变电站自动化方面的研究。

(上接第 18 页 continued from page 18)

参考文献

- [1] 荆勇, 李立涅, 任震. 天广交直流系统并联运行的稳定控制[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(1): 49-52.
JING Yong, LI Li-cheng, REN Zhen. Stability Control of TIAN-GUANG AC and DC Parallel Transmission System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(1): 49-52.
- [2] 王晶芳, 王智冬, 李新年, 等. 含特高压直流的多馈入交直流系统动态特性仿真[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 97-102.
WANG Jing-fang, WANG Zhi-dong, LI Xin-nian, et al. Simulation to Study the Dynamic Performance of Multi-infeed AC/DC Power Systems Including UHVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 97-102.
- [3] Dhaliwal N S, Recksiedler L D, Tang D T Y. Operating Experiences of the Nelson River HVDC System[A]. In: Transmission and Distribution Conference, Proceedings, IEEE[C]. 1996. 174-180.
- [4] Asplund G. Application of HVDC Light to Power System Enhancement[A]. In: Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE[C]. 2000. 2498 - 2503.
- [5] Kim Chan-Ki, Jang Gilsoo, Jeong-Boo K, et al. Transient Performance of Cheju-Haenam HVDC System[A]. In:

Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE[C]. 2001. 343 - 348.

- [6] LI Peng, WU Xiao-chen, ZHANG Yao, et al. Analysis of Modulation Controllers of Multi-infeed HVDC for CSG in 2008[A]. In: Power Con International Conference on Power System Technology[C]. 2006: 1-7.
- [7] 赵晓君. 高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
ZHAO Wan-jun. HVDC Transmission Engineering Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. 122-136.
- [8] 陈潜, 张尧, 钟庆, 等. ± 800 kV 特高压直流输电系统运行方式的仿真研究[J]. 继电器, 2007, 35(16): 27-32.
CHEN Qian, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. Simulation of ± 800 kV UHVDC System Under Different Operation Modes[J]. Relay, 2007, 35(16): 27-32.

收稿日期: 2009-04-16

作者简介:

陈文滨 (1984-), 男, 研究生, 主要研究方向电力系统运行与控制; E-mail: wenbin306296234@126.com

严兵 (1972-), 男, 工程师, 从事高压直流保护系统软件设计;

张尧 (1948-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统的稳定运行与控制。