

## 一种典型的差分放大电路设计与测试\*

姜鹏, 徐科军

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 简述一种典型的差分输入差分输出放大电路的设计、仿真和测试方法, 讨论其设计原理及需要解决的问题。重点讲述差分滤波器的设计和计算, 指出与单端放大电路在设计和测试中的不同之处, 并结合实际工作中的经验, 就直流信号和交流信号的测试分别给出了一种简易案例。

**关键词:** 差分输入; 差分输出; 放大电路; 差分信号

中图分类号: TM13

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)20-0025-04

## Design and testing of a typical differential amplifier circuit

JIANG Peng, XU Ke Jun

(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The design, simulation and testing of an amplifier with differential input and differential output are briefly described. Its operating principles and some problems in applications are discussed, and the corresponding measures are given. Design calculation of the differential filter is the key point of this paper. The differences between the differential amplifier and the single-ended amplifier are listed in the design and testing aspects. According to experience in practical work, this paper presents a simple case of testing of DC signal and AC signal, respectively.

**Key words:** differential input; differential output; amplifier circuit; differential signal

与普通单端放大器相比, 差分放大器可以有效抑制输入信号中的共模噪声和地线电平电压浮动对电路的影响, 因此, 在工业应用中广受青睐, 差分放大器中以仪表放大器应用最为广泛<sup>[1]</sup>。随着技术的发展, 支持差分输入的 ADC、MCU 越来越多, 由于差分传输能更好地抑制共模干扰, 信号传输距离更远, 越来越多的场合将使用差分传输。但是, 一般的仪表放大器仅支持单端输出。因此, 采用双运放搭建了一种差分输入差分输出放大电路。与普通的单端放大电路相比, 差分放大电路在设计、分析、仿真和测试中有许多不同之处, 而这些知识在一般的模拟电路教材中很少介绍。

## 1 差分放大电路设计

根据被放大信号的不同, 可以将差分放大电路分成两种<sup>[2]</sup>。一种是直流耦合差分放大电路, 其输入端没有隔直电容, 可以同时放大直流和交流信号, 如图 1 所示。另一种是交流耦合差分放大电路, 其输入端有隔直电容, 用来隔离直流分量, 放大信号中的交流成分, 如图 2 所示。

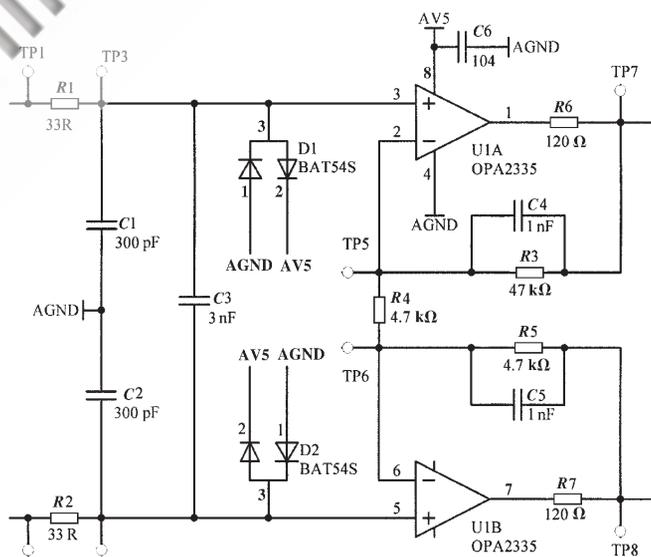


图 1 直流耦合差分放大电路

## 1.1 直流耦合差分放大电路

直流耦合差分放大电路由差分比例放大电路、差分滤波器、保护器件和补偿电阻四部分组成。其输入-输

\* 基金项目: 安徽省高等学校省级教学研究项目(2008JYXM207)和合肥工业大学教学改革研究项目(YJG2008Y01)资助

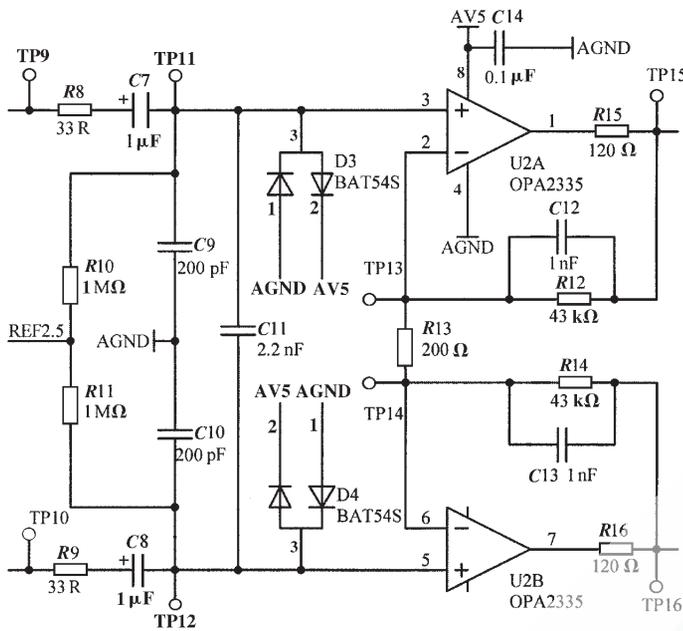


图2 交流耦合差分放大电路

出关系为：

$$V_{TP7} = (V_{TP5} - V_{TP6}) \cdot \left(1 + \frac{R3}{R4}\right) + V_{TP6} \quad (1)$$

$$V_{TP8} = (V_{TP6} - V_{TP5}) \cdot \left(1 + \frac{R5}{R4}\right) + V_{TP5} \quad (2)$$

当信号频率较低时,电容 C1、C2、C3 的容抗很大,差分放大电路的输入阻抗很高,若运放工作在线性放大区,则根据虚短和虚断定理,可得:

$$V_{TP1} = V_{TP3} = V_{TP5} \quad (3)$$

$$V_{TP2} = V_{TP4} = V_{TP6} \quad (4)$$

将式(3)、式(4)代入式(1)和式(2),可得:

$$V_{TP7} = (V_{TP1} - V_{TP2}) \cdot \left(1 + \frac{R3}{R4}\right) + V_{TP2} \quad (5)$$

$$V_{TP8} = (V_{TP2} - V_{TP1}) \cdot \left(1 + \frac{R5}{R4}\right) + V_{TP1} \quad (6)$$

假设 A 为差分放大电路的差分放大倍数,则由式(5)、式(6)可得:

$$A = \frac{V_{TP7} - V_{TP8}}{V_{TP1} - V_{TP2}} = \frac{R3 + R4 + R5}{R4} \quad (7)$$

式(1)~式(7)中所有加减运算均为矢量相加减,式(7)表明该差分放大电路的差分放大倍数 A 由电阻 R3、R4、R5 确定。

该差分放大电路中的滤波器采用了典型差分滤波器的形式,由差模滤波器和共模滤波器组成,主要作用是滤除传感器输出信号高频噪声以及 RFI 噪声。假设传感器差模输出阻抗为  $R_d$ ,共模输出阻抗为  $R_c$ ,C1 与 C2 的串联等效电容为  $C_{S12}$ ,则差模滤波器的截止频率  $f_d$  由  $R_d$ 、R1、R2、 $C_{S12}$  和 C3 确定,共模滤波器的截止频率  $f_c$  由  $R_c$ 、R1、R2、C1、C2 确定。

$$f_d = \frac{1}{2\pi \cdot (R_d + R1 + R2) \cdot (C3 + C_{S12})} \quad (8)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot (R_c + R1) \cdot C1} = \frac{1}{2\pi \cdot (R_c + R2) \cdot C2} \quad (9)$$

由于传感器信号传输线较长,其寄生电感与放大器输入电容容易组成 LC 谐振电路,产生过冲和振荡,为此,在信号线上串联小电阻 R1、R2 作为补偿电阻,以减小或消除振荡<sup>[3]</sup>。图 1 中,电容 C4、C5 分别与电阻 R3、R5 组成一阶低通滤波器,抑制放大器噪声;电阻 R6、R7 对运放进行环内补偿,增加运放带容性负载的能力<sup>[4]</sup>;BAT54S 作为保护器件加在放大器输入端,防止静电放电以及输入电压超出运放最大输入电压范围而损坏运算放大器。

### 1.2 交流耦合差分放大电路

交流耦合差分放大电路如图 2 所示。电容 C9、C10、C11 的值远小于电容 C7、C8 的值,因此,电容 C9、C10、C11 对图 2 中高通滤波器的影响可以忽略,从而可得共模高通滤波器的截止频率  $f_{HPc}$ 。

$$f_{HPc} = \frac{1}{2\pi \cdot (R_c + R8 + R10) \cdot C7} = \frac{1}{2\pi \cdot (R_c + R9 + R11) \cdot C8} \quad (10)$$

假设电容 C7 与 C8 的串联等效电容为  $C_{S78}$ ,则差模高通滤波器的截止  $f_{HPd}$  频率为:

$$f_{HPd} = \frac{1}{2\pi \cdot (R_d + R8 + R9 + R10 + R11) \cdot C_{S78}} \quad (11)$$

电阻 R10、R11 为运放提供偏置电压并为运放偏置电流提供流通路径<sup>[5]</sup>。

### 2 差分放大电路仿真

在完成电路设计后,采用 Multisim 仿真软件对电路进行仿真,以检验电路结构是否合理、器件选择是否恰当、滤波器截止频率设计是否正确等<sup>[6]</sup>。仿真电路原理图如图 3 所示。表 1 所示为虚拟信号发生器 XFG1 参数设置,表 2 所示为虚拟示波器 XSC1 各通道交流信号测量结果以及 XBP1 波特图仿真结果。

表 1 XFG1 参数设置

波形	频率	占空比	振幅	偏置电压
正弦波	100 Hz	50%	10 mVp	2.5 V

表 2 XSC1 和 XBP1 仿真结果

CH1	CH2	CH3	CH4	-3dB 带宽
19.9 mVpp	19.9 mVpp	418 mVpp	418 mVpp	29.6 kHz
0°相位	180°相位	0°相位	180°相位	

假设图 3 中 3、4、9 处的交流信号峰峰值电压分别为  $V_3$ 、 $V_4$ 、 $V_9$ ,则由式(5)可得:

$$V_9 = (V_3 - V_4) \cdot \left(1 + \frac{R5}{R6}\right) + V_4 \quad (12)$$

$$= [19.9 - (-19.9)] \times \left(1 + \frac{47}{4.7}\right) + (-19.9) \text{ mV} = 418 \text{ mV}$$

由表 2 结果和式(12)可知,差分比例放大部分的设

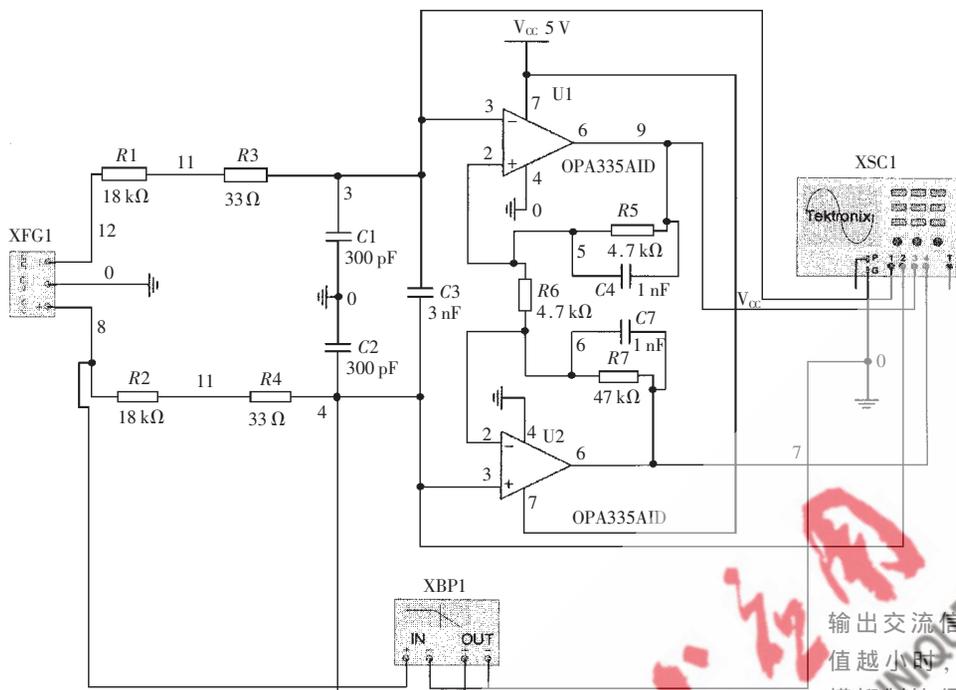


图3 仿真电路原理图

计是正确的。由图3、式(9)和表2结果可知,共模滤波器的设计是正确的。

假设一阶RC低通滤波器通带电压增益为 $A_0$ ,则其幅频响应可以用式(13)表示<sup>[7]</sup>。

$$|A(j\omega)| = \frac{A_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}} \quad (13)$$

式中, $\omega$ 为信号角频率, $\omega_c$ 为差分滤波器截止角频率。表3所示为不同频率信号的仿真结果。由图3、式(8)、式(13)和表3结果可知,差模滤波器的设计是正确的。

表3 不同频率信号的衰减情况

信号频率/Hz	$V_4/mV_{pp}$	理论输出/ $A_0$	实际输出/ $A_0$
100	19.9	0.997	0.995
500	18.8	0.942	0.940
1404	14.1	0.707	0.705

### 3 差分放大电路测试

以直流耦合放大电路为例简要说明测试方法和步骤,测试框图如图4所示。差分输入电压由YOKOGAWA CA100系列小型校验仪产生,差分输出电压由四

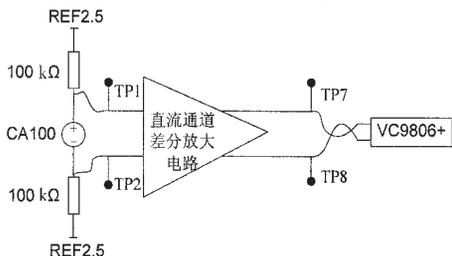


图4 直流信号放大测试框图

位半精度的VC9806+系列数字万用表测量得出。注意,为了使运放工作在线性放大区,需要给运放提供适当的偏置电压<sup>[8]</sup>。表4所示为CA100输出不同电压时VC9806+的测试结果,结果表明直流耦合放大电路的差分比例放大倍数约为21。

在直流电压上叠加交流信号,测试交流信号放大、差分滤波器的设计是否正确。测试框图如图5所示。输入信号由Fluke 282多信道信号发生器产生,输出信号由Tek DPO 4054示波器测量得出。由于Fluke 282信号发生器的输出直流偏置电压受输出交流信号幅值的影响,当交流信号的幅值越小时,直流偏置电压越低,此时,运放共模抑制比很低,而且可能超出运放共模输入

电压范围。因此,采用如下方法:Fluke 282输出两路同相位正弦波信号,信道1信号加在a端,参数设置为1000mV<sub>pp</sub>,10Hz,2.50V偏置电压,0°主模式;信道2信号加在b端,参数设置为900mV<sub>pp</sub>,10Hz,2.50V偏置电压,0°从模式。示波器测量结果如表5所示,其中CH1、CH2、CH3、CH4分别测量TP1、TP2、TP7、TP8处交流信号峰峰值电压和相位,设置CH1相位为0°。

由表5可知, $V_{TP1}=980.0\text{mV}$ , $V_{TP2}=880.9\text{mV}$ ,带入式

表4 直流信号放大测试结果

CA100 DC 输出/mV	VC9806+显示/mV
0.000	0.05
0.100	2.02
1.000	20.79
10.000	208.3
100.00	2084
111.11	2316

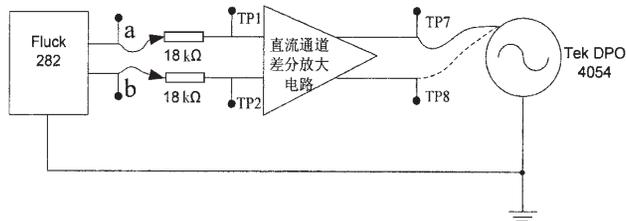


图5 直流耦合通道交流信号测试框图

表5 直流耦合通道交流信号测试结果

TP1	TP2	TP7	TP8
980.0mV <sub>pp</sub>	880.9mV <sub>pp</sub>	1.957V <sub>pp</sub>	101.4mV <sub>pp</sub>
0°相位	0°相位	0°相位	180°相位

表 6 不同频率时 a、b、TP1、TP2 处测量结果

输入信号频率/Hz	a/mVpp	b/mVpp	实际差分输入/mVpp	TP1/mVpp	TP2/mVpp	理论差分输出/mVpp	实际差分输出/mVpp
10	982.5	882.3	100.2	980.0	880.9	100.2	99.1
100	985.4	885.5	99.9	984.0	885.1	99.6	98.9
500	985.5	885.7	99.8	981.7	888.0	94.0	93.7
1000	985.8	886.5	99.3	976.1	895.9	80.9	80.2
1500	986.4	887.1	99.3	970.6	904.0	67.9	66.6

(5)和式(6),可得  $V_{TP7}=1971\text{ mV}$ ,  $V_{TP8}=-100.1\text{ mV}$ , 其中  $V_{TP1}$ 、 $V_{TP2}$ 、 $V_{TP7}$ 、 $V_{TP8}$  的值均为矢量值。表 5 所示峰峰值测量结果表明交流信号的放大是正确的。

表 6 所示为不同频率时, a、b、TP1、TP2 处测试结果,结果显示通过差分滤波,实际信号衰减稍大于理论值,这是由信号发生器输出阻抗及电路板寄生电容引起的。

交流耦合差分放大电路测试方法与交流信号测试方法相似,但是,由于电阻容差、运放输入偏置电流、失调电压及隔直电容漏电流等因素的影响,差分输出端存在一定直流电压差,这与仿真的结果是不同的<sup>[9]</sup>。

该差分放大电路可以看成两路单端同相放大电路的合成。但是,差分放大电路放大差分信号,抑制共模信号;两路输出信号之间存在相位差。因此,采用单端探头测量差分放大电路时,需要同时考虑信号的幅值和相位,以便计算和分析。

使用双运放搭成的具有仪表放大器输入结构的差分输入差分输出放大电路能有效抑制电路温度漂移、零点漂移和共模噪声。在没有差分探头时,使用单端探头对差分放大电路进行测试,并计算输入通道信号矢量差和输出通道信号矢量差来验证差分信号的放大,具有较好的实用价值。

#### 参考文献

[1] 陈淑芳. 仪用放大器简介和应用[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2008,24(05):102-103.

- [2] ARDIZZONI J, PEARSON J. "Rules of the Road" for high-speed differential ADC drivers[J]. Analog Dialogue, 2009,43(05):3-4.
- [3] 邱关源. 电路第四版[M]. 北京:高等教育出版社,1999:210-215.
- [4] CARTER B,MANCINI R. Op amps for everyone third edition [M]. Texas Instruments, 2002:97-119.
- [5] KITCHIN C, COUNTS L. 仪表放大器应用工程师指南,第3版[M]. Analog Devices, 2007.
- [6] 宋效先,王小平等. Multisim 在电子电路的设计和实验研究中的应用[J]. 河北北方学院学报(自然科学版),2006,22(05):23-26.
- [7] 康华光. 电子技术基础模拟部分第四版[M]. 北京:高等教育出版社,1998:352-355.
- [8] 华成英,童诗白. 模拟电子技术第四版[M]. 北京:高等教育出版社,2006:303-310.
- [9] KITCHIN C. Avoid common problems when designing amplifier Circuits[J]. Analog Dialogue, 2007, 41(03):1-7.
- (收稿日期:2010-05-20)

#### 作者简介:

姜鹏,男,1985年生,硕士研究生,主要研究方向:计算机控制技术。

徐科军,男,1956年生,博士,教授,主要研究方向:传感器、自动化仪表、数字信号处理。