

差动放大电路中阻容匹配性研究及应用

唐辉 樊贺斌 屈汝祥 张军波

(湖北三江航天红峰控制有限公司, 孝感 432000)



摘要: 针对某产品差动放大电路共模抑制比超差问题, 从理论上进行了深入分析, 并导出电阻阻值变化、电容容值变化、共模干扰输入、共模干扰输出之间存在函数关系, 提出了不同的解决方案。结合该产品特点选择了一种方案, 成功解决了此超差问题。

关键词: 差动放大; 阻容; 匹配

Research and Application of Resistance-capacitance Matching in Differential Amplifier

Tang Hui Fan Hebin Qu Ruxiang Zhang Junbo

(Hongfeng Control Company of The Sanjiang Space Group, Xiaogan 432000)

Abstract: According to differential amplifier circuit CMRR out-of-tolerance in a product, the paper analyzes the problem deeply in theory, and draws the function containing the following variables: resistance, capacitance, common-mode interference, and the effect of common-mode interference. In addition, it provides several solutions for the problem. Finally, the problem is solved by one of the methods above successfully.

Key words: differential amplifier; resistance and capacitance; matching

1 引言

某产品用于航天员在太空飞行任务中相关生理指标的实时检测, 为航天员医学保障提供依据。就该产品而言, 实现微弱生理信号检测的差动放大电路是整个产品的核心, 而差动放大电路的共模抑制比指标又是衡量产品抗干扰性能的关键。

在该产品的研制过程中, 出现差动放大电路共模抑制比超差问题, 造成产品不能正常工作。为彻底解决此问题, 对该差动放大电路进行了深入分析, 由此提出了差动放大电路的阻容匹配性问题。

2 问题现象

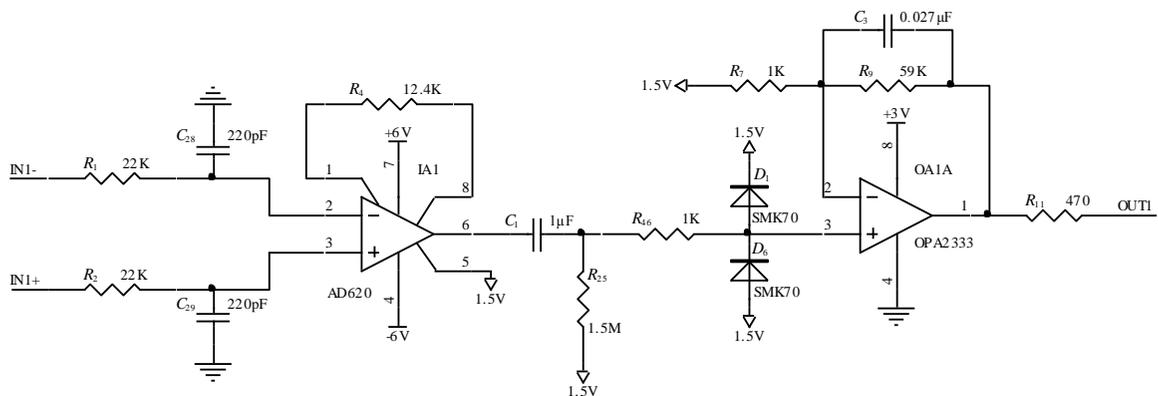


图1 差动放大电路

作者简介: 唐辉 (1983-), 工程师, 测控技术专业; 研究方向: 测试技术、嵌入式技术。

收稿日期: 2012-03-27

某产品放大电路原理如图1所示。电路由两级放大构成，第一级为差动放大，放大倍数为5；第二级为运算放大，放大倍数为60，整个电路放大倍数为300。

从图1可知，AD620差动放大输入正负两端均存在相同的RC滤波电路。其中电阻阻值为22K，电容

容值为220pF。理论上，因差动放大AD620输入两端匹配的电阻阻值、电容容值分别相等，第一级放大电路对共模信号的抑制能力等于放大器AD620对共模信号的抑制能力。但在产品研制过程中，测试7套产品中的5套产品均存在共模抑制比超差(不足80dB)。统计测试结果见表1。

表1 各产品差动放大电路超差测试结果

单元	测试项目	01#	02#	03#	04#	07#
第一路心电	输出幅值/mV	96.8	122.0	80.0	115.0	95.2
	共模抑制比/dB	75.9 (超差)	73.8 (超差)	77.5 (超差)	74.3 (超差)	76.0 (超差)
第二路心电	输出幅值/mV	16.0	102.0	88.0	127.0	32.0
	共模抑制比/dB	91.5 (合格)	75.4 (超差)	76.7 (超差)	73.5 (超差)	85.5 (合格)

电路共模抑制比超差严重降低了产品抗共模干扰的能力。在预期的使用环境中，被检测信号为微弱小信号，电路共模抑制比降低将导致无法正常获取信号，最终产品将无法为其基本使用要求。

3 问题分析

经过分析发现，虽然AD620输入两端电阻、电容均选用了相等的标称值，但电阻、电容的实际值与标称值存在偏差，而正是该偏差最终导致了电路共模抑制比不合格。为找到其中的规律：是电阻的变化影响大？还是电容的变化影响大？或者存在某种关联？需要进行定量的分析。

3.1 理论分析

从图1可知，每只电阻和电容在其精度范围内独立变化，因此AD620差动放大输入端的独立变量有4个。一般情况下，电阻以K为单位， $10^3\Omega$ 数量级；电容以pF为单位， $10^{-12}F$ 数量级。为抽象简化计算，对该差动放大电路电阻电容的指代如图2所示。

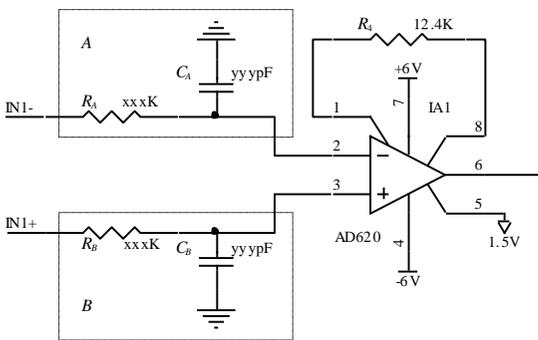


图2 电阻电容名称指代后的差动放大电路

将图2中正端IN1+和负端IN1-短接，并在其与地之间输入在频率为 f (Hz)，幅值为 U (V)的交流共模干扰信号，则在该干扰信号作用下输出的电压幅值 U_o (不考虑器件本身、印制板及其它的共模抑制比能力)为：

$$U_o = \left[\frac{\frac{I}{j\omega C_A}}{\frac{I}{j\omega C_A} + R_A} - \frac{\frac{I}{j\omega C_B}}{\frac{I}{j\omega C_B} + R_B} \right] UM(V) \quad (1)$$

其中： M 为300(心电放大电路增益 5×60)； ω 为 $2\pi f$ (为计算方便，只考虑 $f \leq 2000Hz$)；

理论上电阻 $R_A = R_B$ ，电容 $C_A = C_B$ 。因此式(1)输出为零。但实际上受生产制造等各种因素影响电阻 R_A 与 R_B ，电容 C_A 与 C_B ，不会完全相等，因此式(1)输出不为零。推导式(1)如下：

$$U_o = \left[\frac{1}{j\omega R_A C_A + 1} - \frac{1}{j\omega R_B C_B + 1} \right] UM$$

令 $R_A C_A = A$ ； $R_B C_B = B$ ；则：

$$U_o = \left[\frac{j\omega B + 1 - j\omega A - 1}{[j\omega A + 1][j\omega B + 1]} \right] UM \quad (2)$$

因电阻为 10^3 数量级，电容为 10^{-12} 数量级，故分母中 ωA 、 ωB 为小数项，则式(2)中分母可约等于1，则：

$$U_o \approx UM |j\omega B - j\omega A| = UM \omega |R_B C_B - R_A C_A|;$$

取电阻 R_A 为 $R_a \times 10^3\Omega$ ，电阻 R_B 为 $R_b \times 10^3\Omega$ ，电容 C_A 为 $C_a \times 10^{-12}F$ ，电容 C_B 为 $C_b \times 10^{-12}F$ ，则上式可化为：

$$U_o = UM \omega |R_b C_b - R_a C_a| \times 10^{-9};$$

令 $R_a = R + Rt_{ra} \%$ ， $C_a = C + Ct_{ca} \%$ ；

$$R_b = R + Rt_{rb}\%, C_b = C + Ct_{cb}\% ;$$

其中 $t_{ra}\%$ 、 $t_{ca}\%$ 、 $t_{rb}\%$ 和 $t_{cb}\%$ 分别为 R_a 、 C_a 、 R_b 和 C_b 实际值与标称值的偏差百分比，则：

$$R_a C_a = RC + RCt_{ca}\% + CRt_{ra}\% + Rt_{ra}\% \times Ct_{ca}\% ;$$

$$R_b C_b = RC + RCt_{cb}\% + CRt_{rb}\% + Rt_{rb}\% \times Ct_{cb}\% ;$$

其中， $Rt_{ra}\% \times Ct_{ca}\%$ 和 $Rt_{rb}\% \times Ct_{cb}\%$ 在方程中为小数，对结果影响微小，为计算方便，忽略处理，则：

$$|R_b C_b - R_a C_a| = RC [(t_{cb}\% - t_{ca}\%) + (t_{rb}\% - t_{ra}\%)] ;$$

因 $t_{cb}\% - t_{ca}\% = \Delta t_c\%$ ； $t_{rb}\% - t_{ra}\% = \Delta t_r\%$ ；其中， $\Delta t_c\%$ 、 $\Delta t_r\%$ 分别为两端电容偏差与电容标称值的百分比（以下简称：两电容偏差百分比）、两端电阻偏差与电阻标称值的百分比（以下简称：两电阻偏差百分比），则：

$$U_o = UM\omega RC |\Delta t_c\% + \Delta t_r\%| \times 10^{-9} (V) \quad (3)$$

3.2 分析结论

由式 (3) 可以得出以下结论：

a. 要使输出 U_o 最小（等于零），除了差动放大电路输入端两电阻实际值完全相等、电容完全相等的常规条件外，保证两电阻偏差百分比与两电容偏差百分比为相反数，即 $\Delta t_r\% = -\Delta t_c\%$ ，也可以达到要求。

b. 电阻、电容的变化对输出 U_o 都存在影响，该影响与两电阻、两电容偏差百分比有直接关系，而与各个电阻、电容偏差值的大小无直接关系。如：两电阻的偏差数值远远大于两电容的偏差数值，而两电阻偏差百分比小于两电容偏差百分比时，输出受电容的影响大。

c. 在两电阻、两电容实际值存在偏差时，输出 U_o 与电阻标称阻值、电容标称容值成正比， R 、 C 越大，输出 U_o 越大。

d. 输入交流成份幅值越大，输出 U_o 越大，频率越高，输出 U_o 越大。

4 应对策略

经过问题分析得知，在直流共模干扰下，差动放大电路中两电阻 R 、两电容 C 不会使该共模信号产生衰减，即不会发生输入两端衰减形成的偏差被后级放大电路放大而干扰输出信号，因此，差动放大电路本身的共模抑制能力不会被减弱，直流共模干扰信号能够被有效抑制；在周期共模干扰下，差动放大电路中两电阻 R 、两电容 C 会使该共模信号中交流成份产生衰减，而两电阻 R 、两电容 C 数值因实际值与标称值存在偏差，导致输入两端衰减产生的偏差被后级放大

而干扰输出信号，因此，差动放大电路本身的共模抑制能力被大大减弱，导致电路的性能下降。针对差动放大电路对阻容匹配较高的要求，结合不同的应用情况，找到合适的解决方法，是非常必要的。

4.1 策略一

因差动放大电路对输入端的两电阻 R 、两电容 C 匹配要求高，采用“鱼和熊掌不可兼得”的思想，去掉电容，只留电阻。修改后的差动放大电路如图 3 所示。修改后，该电路因没有电容对信号衰减，不会发生 AD620 输入两端衰减形成的偏差被后级放大电路放大而干扰输出信号，因此，差动放大电路本身的共模抑制能力不会被减弱，交直流共模干扰能够被有效抑制。

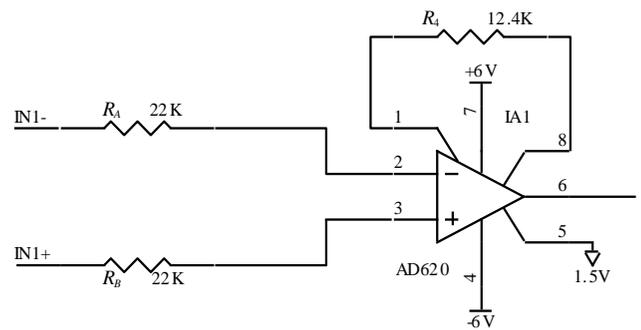


图 3 电容 C 去掉后的差动放大电路

但由于去掉电容后，电路输入端抗 RF （射频）干扰的能力减弱，工作过程中容易受到 RF 干扰造成输出信号失控。所以一般情况下，去掉电容后的差动放大电路只能用于无 RF 干扰的地测或工装设备，不能用于飞行产品，使用范围大大受限。

4.2 策略二

经分析可知，在周期共模干扰下，差动放大电路两电阻 R 、两电容 C 因存在偏差，导致输入两端衰减产生的偏差被后级放大而干扰输出信号，造成差动放大电路本身的共模抑制能力被大大减弱。如果有方法能够适度减小差动放大电路输入两端衰减产生的偏差，即使后级电路对该偏差进行放大，也会在合格的范围内，那么就能降低两电阻 R 、两电容 C 的匹配要求。按照该思路对电路进行改进，改进后的差动放大电路如图 4 所示。

改进后的图 4 中，在输入两端增加了一个电容 C^* （要求高 Q 值）。增加电容 C^* 后，差动放大电路输入两端衰减产生的偏差能够被有效减小，从而降低了该偏差对输出信号的影响。同时，增加电容 C^* 后，

不会改变原电路抗共模干扰的频率带宽，也不会减弱抗 RF 干扰的能力，能够满足抗周期共模干扰的要求。

但由于增加了电容 C^* ，电路输入的差分周期信号或差分突变信号会被衰减，同时对应差分信号的频率带宽会降低，降低情况满足 RC 电路规律（电阻 R_A 、 R_B 与电容 C^* 之间），具体可根据使用情况自行推导。

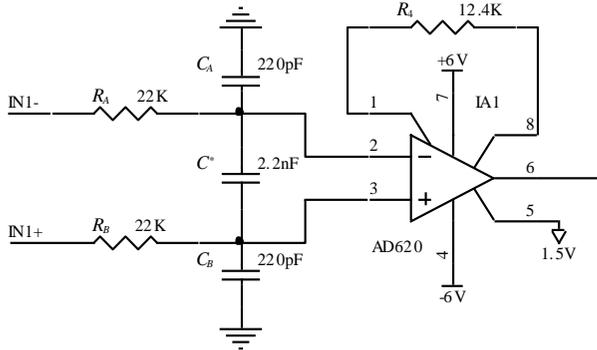


图 4 增加电容 C^* 衰减偏差后的差动放大电路

4.3 策略三

采用两电阻 R 、两电容 C 筛选配对的方法，使两电阻偏差、两电容偏差在一定范围内，这样既保证了该放大电路共模抑制比满足要求，状态变化小，又能满足生产进度要求。该方案虽然对所有差动放大电路都适用，但对电阻和电容的匹配要求高，会增加筛选成本，若不是存在特殊情况，一般情况不建议使用。

5 解决效果

本产品用于微弱周期信号的检测，且在飞行器中使用，存在射频干扰，所以，会降低差分周期信号幅值及带宽的策略二和不能抗射频干扰的策略一均不满足要求，只能采用筛选配对的策略三。

经测试计算，超差产品的差动放大电路中，输入端两电阻 R 偏差百分比（取绝对值）见表 2。

表 2 各产品差动放大电路两电阻偏差百分比测试情况

各路电阻偏差百分比		01#	02#	03#	04#	07#
第一路	$ \Delta t_r, \%$	0.26%	0.01%	0.05%	0.01%	0.34%
第二路		0.43%	0.42%	0.09%	0.17%	0.37%

为了确保所有产品性能一致性满足要求，这里两电阻的偏差百分比 $|\Delta t_r, \%$ 取所有产品的最大值，即 $|\Delta t_r, \%|_{\max}$ 。

从表 2 中可以看出，所有产品中 $|\Delta t_r, \%|_{\max}$ 不超过 0.5%，则根据式 (3) 有：

$$U_o = UM\omega RC|\Delta t_c, \% + 0.5\%| \times 10^{-9} (\text{V})$$

因输入的共模干扰幅值 $U=2000\text{mV}$ 、 $\omega=50 \times 2\pi$ 、电路的放大倍数 $M=300$ 、电阻值 $R=22$ 、电容 $C=220$ ，则有：

$$U_o = 2000 \times 300 \times 50 \times 2\pi \times 22 \times 220 \times 10^{-9} \times |\Delta t_c, \% + 0.5\%| (\text{V})$$

从产品共模抑制比要求值折算出最大输出应为 60mV，具体折算原理本文不必详述。则有：

$$U_o = 912.318419 \times |\Delta t_c, \% + 0.5\%| < 60 (\text{mV})$$

同样，为了使该批次所有产品都能满足要求，这里两电容偏差百分比 $\Delta t_c, \%$ 按绝对最大值取，即取 $\Delta t_c, \%$ 为 $|\Delta t_c, \%|_{\max}$ 。

$$\Rightarrow |\Delta t_c, \%|_{\max} < 6.07\% \quad (4)$$

从式 (4) 可以看出，在忽略器件、印制板分布电容、走线及接触电阻等参数的影响下， $\Delta t_c, \%$ 应小于 6.07%。即两电容的偏差应小于 13.37pF。为抵消其它因素的影响，留出足够的裕量，最终实际要求两电容的偏差应小于 3pF。按照该要求对产品上电容进行解焊，配对焊接后，差动放大电路共模抑制比参数测试合格见表 3，测试结果均满足要求，超差问题得到彻底解决。

表 3 各产品差动放大电路阻容匹配后测试结果

单元	测试项目	01#	02#	03#	04#	07#
第一路	输出幅值/mV	10.0	19.6	25.9	9.2	11.6
	共模抑制比/dB	95.6 (合格)	89.7 (合格)	87.3 (合格)	96.3 (合格)	94.3 (合格)
第二路	输出幅值/mV	12.8	13.4	33.7	9.6	32.2
	共模抑制比/dB	93.4 (合格)	93.0 (合格)	85.0 (合格)	95.9 (合格)	85.4 (合格)

(下转第 31 页)

