运算放大器共模抑制比的仿真与测试

黄晓宗，黄文刚，刘伦才，晏开华，何峥嵘，王成鹤，王国强
（中国电子科技集团公司 第二十四研究所，重庆 400060）

摘　要：从运算放大器共模抑制比(CMRR)定义开始，对多种仿真和测试方法进行分析和比较，深入论述辅助元器件(如电阻和辅助放大器)对待测器件(DUT)仿真和测试结果的影响，分别总结出适合于仿真和测试的方法，为运算放大器设计过程中的仿真验证和封装后的测试提供参考。

关键词：运算放大器；共模抑制比；仿真；测试
中图分类号：TN722　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1004-3365(2012)02-0154-05

Simulation and Measurement Techniques for CMRR of Operational Amplifiers

HUANG Xiaozong, HUANG Wengang, LIU Luncai, YAN Kaihua, HE Zhengrong,
WANG Chenghe, WANG Guoqiang
(*Sichuan Institute of Solid-State Circuits, China Electronics Technology Group Corp., Chongqing* 400060, *P. R. China*)

Abstract: Various methods for simulation and measurement of common-mode rejection ratio (CMRR) of operational amplifiers were analyzed and compared. Effects of external elements, such as resistors and auxiliary amplifiers, on the device-under-test (DUT) were discussed in detail. Finally, methods suitable for simulation and measurement were summarized, respectively, which may provide a reference for simulation during design of operational amplifiers and measurement after packaging.

Key words: Operational amplifier; Common-mode rejection ratio (CMRR); Simulation; Measurement
EEACC: 1220

1 引　言

共模抑制比(CMRR)是高精度运算放大器重要的性能参数，表示运算放大器对共模扰动影响的抑制能力。在实际运用中，电路不可能完全对称，电流源的输出阻抗不可能无穷大，因此，共模输入的变化总会或多或少地传递到输出端。通常，公司产品的数据手册仅仅给出直流 CMRR 的值，在附录图表中给出 CMRR 的频率特性，但是并没有给出测试方法。CMRR 的仿真与测试没有完全统一的方法，各种方法均有成立的条件和固有误差缺陷。使用不同的测试方法可能会得到不同的结果[1-5]。文献[6-8]对 CMRR 在频域的性能和仿真测试方法进行了探讨。本文从运算放大器共模抑制比定义开始，对多种方法进行分析和比较，讨论辅助元器件(如电阻和辅助放大器)对待测器件(DUT)仿真和测试结果的影响。最后，总结出分别适用于仿真与测试的方法，为运算放大器设计过程中的仿真验证和封装后的测试提供参考。

本文第 2 节从不同角度对 CMRR 的定义进行解析；第 3 节对直接定义法、匹配信号源法、电源电压法、直流法、匹配电阻法和辅助放大器法等进行分析和比较，讨论了辅助元器件(如电阻和辅助放大器)对结果的影响；第 4 节对本文所述方法进行总结，得出分别适合于仿真和测试的方法。

2 CMRR 定义

CMRR 定义为差模电压增益 A_D 和共模电压增益 A_C 的比值，即：

$$\mathrm{CMRR}=A_D/A_C \tag{1}$$

从应用的角度分析，CMRR 也可以看作输入失调电压随共模输入电压变化的情况。例如，假设共

收稿日期：2011-10-01；定稿日期：2011-12-02

模输入电压为零，需要在放大器的输入端增加足够的电压差，才能使输出电压为零，施加在两输入端的电压差即为失调电压 V_{OS}。假设输入电压差保持恒定，增加共模输入电压 ΔV_{CM}，由于电路结构本身的不对称性和尾电流源的有限阻抗，输出电压将会改变，可得：

$$\Delta V_O = A_C \Delta V_{CM} = A_C v_{CM} \tag{2}$$

要使输入电压差重新变为原来的恒定值，需要输入电压差变为：

$$v_{ID} = \Delta V_{ID} = \frac{\Delta V_O}{A_D} = \frac{A_C v_{CM}}{A_D} \tag{3}$$

所以，在输出电压不变的情况下，CMRR 可以定义为共模输入电压的变化引起输入失调电压的变化，具体量化用公式推导可得[2]：

$$\mathrm{CMRR} = \frac{A_D}{A_C} = \frac{\Delta V_{CM}}{\Delta V_{ID}}\Big|_{V_O=0} = \frac{\Delta V_{CM}}{\Delta V_{OS}} \approx \frac{\partial V_{CM}}{\partial V_{ID}}\Big|_{V_O=0} \tag{4}$$

(4)式也可以理解为，无论共模输入电压如何变化，输出电压始终保持不变，此时输入信号引起的共模和差模信号对输出信号的影响相互抵消。这个概念对于理解是否需要精确匹配电阻十分重要。

3　CMRR 仿真和测试方法分析

3.1　直接定义法

图 1 所示为按照 CMRR 定义直接仿真的方法，左半部分电路得到运算放大器的差模增益 A_D，右半部分电路得到共模增益 A_C，根据定义可以直接得到 CMRR。

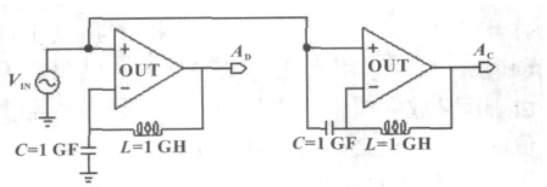

图 1　直接定义法

Fig. 1　Direct definition method

电感和电容形成低通滤波器，起到通直流、阻交流的作用。对于 CMOS 运算放大器，通常采用 $R = 1\ \mathrm{G\Omega}$ 代替电感，但是如果双极型晶体管作为输入级，较大的基极电流在反馈电阻上的压降会导致整个环路直流点的漂移，所以使用时要谨慎。

对于仿真来说，直接定义法在直流和频域上的结果都非常准确。但是对于测试来说，由于要同时得到待测器件的差模增益和共模增益，实现难度较大。正因为如此，多种表征 CMRR 的等效仿真测试方法得到广泛研究。

3.2　匹配信号源法

图 2(a)所示为匹配信号源法，运算放大器输入端加入完全相同的交流信号源 v_{cm}，连接成单位增益反馈形式；图 2(b)所示为该仿真电路的等效小信号模型[1,3]。

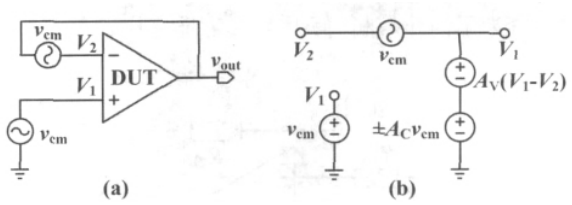

图 2　匹配信号源法

Fig. 2　Matching source method

$$\frac{v_{out}}{v_{cm}} = \frac{A_C}{1 + A_D - (\pm A_C/2)} \approx \frac{A_C}{A_D} = \frac{1}{\mathrm{CMRR}} \tag{5}$$

由于 A_D 通常都远大于 1 和 A_C，所以公式近似成立。仿真电路仅增加了理想匹配的小信号源，得到的结果对直流 CMRR 及其频率特性不会产生影响，因此，该方法对仿真很实用。但是，幅值相等且相位同步的两个交流信号在测试上是很难实现的。

3.3　电源电压法

运算放大器通常仅有 5 个端口，CMRR 表征两个输入端口差模信号和输出信号之间的约束关系，但是两个输入端口的差模信号除了直接产生外，还可以通过电源电压的改变得到。电源电压改变 v_{cm}，DUT 的输出也会增加 v_{cm}，因此可得到[3]：

$$v_{out} - v_{cm} = A_D(V_1 - V_2) + A_C(V_1 + V_2)/2 = -A_D v_{out} + A_C\left(\frac{v_{out}}{2} + v_{cm}\right)$$

$$\mathrm{CMRR} = \frac{v_{cm}}{v_{out}} = \frac{1 + A_D - A_C/2}{A_C + 1} \tag{6}$$

此处应注意与 PSRR 仿真电路的区别，CMRR 电源电压法并不改变 $|V_{DD} - V_{SS}|$ 的绝对大小，而 PSRR 仿真方法是改变其大小，或者施加小信号进行运算。具体仿真电路如图 3(a)所示，图 3(b)所示为其小信号等效电路。

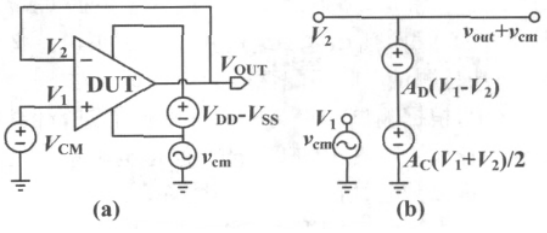

图 3　电源电压法

Fig. 3　Power supply method

3.4 匹配电阻法

匹配电阻法是较为流行的一种仿真方法[5,9-13]，如图 4 所示，其中，R_{1a} 和 R_{1b}，R_{2a} 和 R_{2b} 分别为匹配电阻。输入小信号同时加载输入端，测试输出端的电压（如果 CMRR 为无穷大，那么输出将不会改变）。为了简化分析，假设 V_{REF} 为地电压，有：

$$\mathrm{CMRR}=\frac{\Delta V_{CM}}{\Delta V_{OUT}}\times\frac{R_1+R_2}{R_1} \tag{7}$$

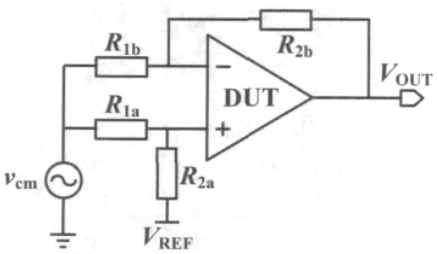

图 4 匹配电阻方法

Fig. 4 Matching resistor method

该电路本身的缺陷是 V_{OUT} 随输入共模电压的变化而变化。根据线性叠加原理，在电阻完全匹配的情况下，当 V_{OUT} 置零时，V_{IN} 的变化不会引入任何差模分量，输入失调电压变化都是源于 V_{OUT} 的变化。但是，如果电阻匹配系数为 α，即 $R_{2b}/R_{1b}=\alpha R_{2a}/R_{1a}$，那么输入电压 V_{IN} 变化 ΔV_{IN} 产生的输入失调电压误差 V_{OS}' 为：

$$\begin{aligned}V'_{OS}&=\left(\frac{R_{2a}}{R_{1a}+R_{2a}}-\frac{R_{2b}}{R_{1b}+R_{2b}}\right)V_{CM}=\\&\left(\frac{R_{2a}}{R_{1a}+R_{2a}}-\frac{\alpha R_{2a}}{R_{1a}+\alpha R_{2a}}\right)V_{CM}=\\&\frac{(1-\alpha)R_{1a}R_{2a}}{(R_{1a}+R_{2a})(R_{1a}+\alpha R_{2a})}V_{CM}\end{aligned} \tag{8}$$

根据(4)式可知，输入失调电压误差 V_{OS}' 会直接影响 CMRR 的运算结果，所以电阻的匹配程度与运算放大器的 CMRR 紧密相关。电阻 0.1% 的失配只能得到 66 dB 的 CMRR（不论运算放大器本身的 CMRR 有多高），电阻的匹配性能需达到 0.0001%，才能测试到大于 100 dB 的 CMRR（匹配性能达到 0.001% 正好能测试到 100 dB 的 CMRR[1]）。通常，运算放大器在直流状态下的 CMRR 为 80～120 dB，所以这种结构对于测试来说意义不大，但却是测试电阻匹配性能的一种好方法[10]。文献[1]中，根据测试结果与电阻匹配性能进行倒推，得到运算放大器真正的 CMRR，但是电阻本身的匹配程度难以判断，所以并不适用。

除去电阻的匹配误差，该方法可用于理想的电路仿真，但是也有限制条件。以上分析中没有计入运算放大器的输出阻抗。电阻 R_1、R_2 和运算放大器的输出阻抗 R_{OUT} 构成前馈通路，计入前馈通路的影响，信号就可以通过三种方式从输入端到输出端，即差模增益、共模增益和前馈通路。输出信号可以表示为[1]：

$$\begin{aligned}&\left\{V_{CM}\times\frac{R_2}{R_1+R_2}-\left[V_{OUT}+\frac{R_1V_{OUT}}{R_1+R_2}+\frac{R_2V_{CM}}{R_1+R_2}\right]\right\}\times\\&A_D+V_{CM}\times\frac{R_2}{R_1+R_2}\times A_C+V_{CM}\times\\&\frac{R_{OUT}}{R_1+R_2+R_{OUT}}=V_{OUT}\end{aligned} \tag{9}$$

可简化为：

$$\begin{aligned}&-V_{OUT}\times\frac{R_1}{R_1+R_2}\times A_D+V_{CM}\times\frac{R_2}{R_1+R_2}\times\\&A_C+V_{CM}\times\frac{R_{OUT}}{R_1+R_2+R_{OUT}}=V_{OUT}\Rightarrow V_{CM}\times\\&\left(\frac{R_2A_C}{R_1+R_2}+\frac{R_{OUT}}{R_1+R_2+R_{OUT}}\right)=V_{OUT}\times\\&\left(\frac{R_1A_D}{R_1+R_2}+1\right)\end{aligned} \tag{10}$$

CMRR 的表达式为：

$$\mathrm{CMRR}=\frac{V_{CM}}{V_{OUT}}=\frac{\dfrac{R_1A_D}{R_1+R_2}+1}{\dfrac{R_1}{R_1+R_2}\times A_C+\dfrac{R_{OUT}}{R_1+R_2+R_{OUT}}} \tag{11}$$

其中，可以认为 $A_D\gg1$，分子上的“1”可忽略。

可见，如果 R_{OUT} 与 R_1、R_2 阻值相当，会引入较大误差，所以，R_1 和 R_2 的取值应远大于 R_{OUT}，可以得到接近精确的结果（$\mathrm{CMRR_{sim}}\leqslant\mathrm{CMRR_{theory}}$）。

图 5 所示为 $R=100\ \Omega$，1 kΩ，10 kΩ 和 100 kΩ 时得到的 CMRR。假设所有电阻相等，其中，CMRR_DD 表示采用直接定义法得到的结果。可见，由于运算放大器输出电阻 R_{OUT} 的影响，R_1 和 R_2 阻值的大小不仅会影响低频 CMRR 的仿真精度，还会影响 CMRR 的频率响应。

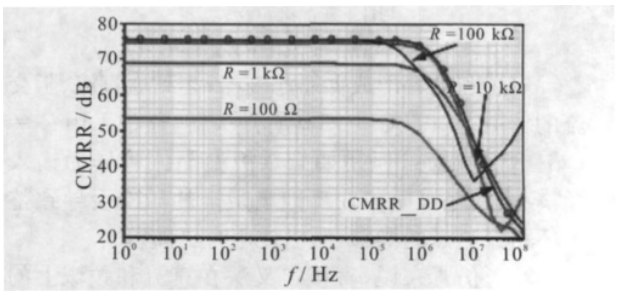

图 5 $R=100\ \Omega$、1 kΩ、10 kΩ 和 100 kΩ 时得到的 CMRR（假设所有电阻相等）

Fig. 5 Simulation results of CMRR for $R=100\ \Omega$, 1 kΩ, 10 kΩ and 100 kΩ (assuming equal resistor value)

为了降低运算放大器输出阻抗对仿真的影响，文献[1]提出增加单位增益缓冲器来降低输出端（系统输出端）阻抗的方法，从而降低输出阻抗对系统的影响，如图 6 所示。但是，DUT 输出电压仍会随着输入共模电压变化，电阻的失配仍然会引入输入失调电压误差，所以还是需要高匹配的电阻，仅适用于电路仿真。

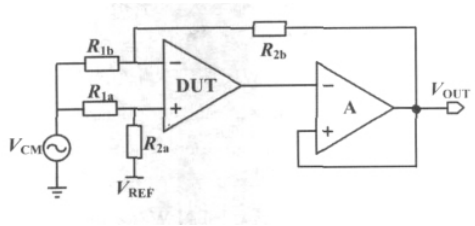

图 6　改进的匹配电阻法[1]

Fig. 6　Improved matching resistor method[1]

3.5　辅助运算放大器法

为了解决电阻匹配，并稳定 DUT 的输出电压在输入共模电压变化时不受影响，引入辅助运算放大器 A，构成环路。具体实现方法如图 7 所示，分为共模输入法(a)和电源电压法(b)，后者原理与前述电源电压法相同。

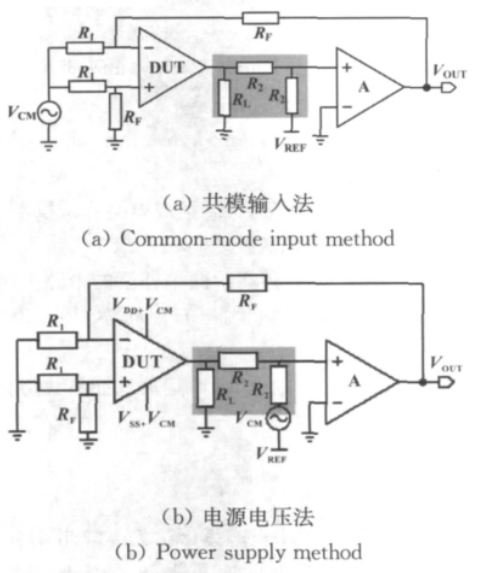

图 7　辅助运算放大器法

Fig. 7　Auxiliary operational amplifier methods

在输入端分别输入 V_{CM+} 和 V_{CM-}，相应的输出信号分别为 V_{OUT+} 和 V_{OUT-}，根据(4)式的定义，ΔV_{OS}为输入分别为 V_{CM+} 和 V_{CM-} 时输入端信号差模信号的差值，即 $\Delta(V_{I+}-V_{I-})$。匹配电阻法中已分析，在输出信号不变的情况下，输入 V_{CM} 不会引入任何差模信号，所以 ΔV_{OS} 仅由 V_{OUT} 的变化引起，可以得到：

$$\mathrm{CMRR}=\frac{\Delta V_{CM}}{\Delta V_{OS}}=\frac{V_{CM+}-V_{CM-}}{(V_{OUT+}-V_{OUT-})\dfrac{R_1}{R_1+R_F}}=\frac{V_{CM+}-V_{CM-}}{V_{OUT+}-V_{OUT-}}\frac{R_1+R_F}{R_1} \tag{12}$$

同样，可以在输入端输入交流小信号 ΔV_{CM}，得到相应的小信号输出 ΔV_{OUT}，可得：

$$\mathrm{CMRR}=\frac{\Delta V_{CM}}{\Delta V_{OS}}=\frac{\Delta V_{CM}}{\Delta V_{OUT}}\frac{R_1+R_F}{R_1} \tag{13}$$

图 7(b)所示为电源电压法，电源电压改变为 $V_{DD}+\Delta V_{CM}$ 和 $V_{SS}+\Delta V_{CM}$，观察整个系统的输出端信号 V_{OUT}，应注意输出端信号应与电源电压改变幅度相同，保持运算放大器相同的工作状态，有：

$$\mathrm{CMRR}=\frac{\Delta V_{CM}}{V_{OUT}}\frac{R_1+R_F}{R_1} \tag{14}$$

输出端信号 V_{OUT} 随电源电压变化，施加信号源会增加测试的难度。图 8 所示[10]方法可以有效控制，DUT 输出端信号在电源电压切换时改变为 ±10 V。

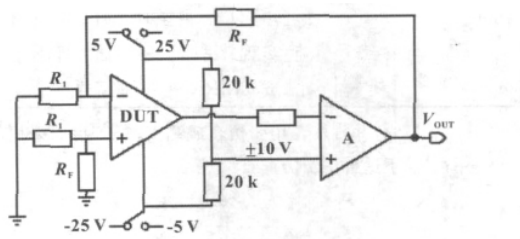

图 8　辅助运算放大器电源电压法[10]

Fig. 8　Power supply method with auxiliary operational amplifier

注意图 7 中的阴影部分，CMRR 仿真和测试条件中规定了特定的负载，例如 2 kΩ，10 kΩ 等，很容易将 R_L 误认为负载电阻。但对于辅助运算放大器测试来说，情况并不是这样。以图 7(a)为例，由于辅助运算放大器的正输入端为虚地，所以此时 DUT 的负载电阻为 $R_L \parallel R_2 \parallel R_2$，应合理设置电阻值，才能得到正确的负载情况。

利用辅助放大器来测试运算放大器直流参数的主要优点是通过开关的不同组合即可测出电路的各个直流参数，易于构成集成运放的自动测试装置。在没有集成运算放大器参数测试仪器时，采用这种电路进行测试也很方便[6,9]。

表 1 对比了前述各种方法用于仿真或测试的情况。可以看出，所有方法都适用于仿真。但是，从实施难度和精度上仍然需要折中，有的方法成立条件较为苛刻，例如匹配电阻法，要求电阻匹配精度很

高，这在测试中很难实现，所以不适合用于测试。

表 1 CMRR 仿真和测试方法对比

Table 1 Comparison of CMRR simulation and measurement methods

方法	仿真	测试	评价
直接定义	+	×	根据定义直接得到 CMRR，无论直流幅度还是频率特性，都能很好地表征运算放大器的性能。
匹配信号源	++	×	电路结构简单，适合运算放大器仿真，但要求两个完全一样的小信号源，在实际测试中难以实现。
电源电压	+	+	间接测试 CMRR，通常不单独使用，多与辅助运放法相结合，用于测试。
匹配电阻	++	+	电路结构较简单，但仿真受阻值大小的影响，同时，由于对电阻匹配性能要求过高，不推荐用于测试。
辅助运算放大器	+	++	需要额外的运算放大器辅助测试，仿真较复杂，具有不要求高匹配电阻，并且在测试中可以通过开关切换实现多种性能测试，但不能用于测试 CMRR 的频率特性。

注："++"适合并且推荐用于仿真或测试；"+"可以采用但不常用；"×"不适合用于仿真或者测试。

4 结束语

本文对运算放大器共模抑制比的多种仿真和测试方法进行了理论分析和比较，深入论述了各种方法中辅助元器件（如电阻和辅助放大器）对仿真和测试结果的影响，并总结出适合于仿真和测试的方法，对运算放大器设计过程中的仿真验证和封装后测试具有重要的参考意义。

参 考 文 献：

[1] ZHOU J, LIU J. On the measurement of common-mode rejection ratio [J]. IEEE Trans Circ Syst II: Express Briefs, 2005, 52(1): 49-53.

[2] GRAY P R, HURST P J, LEWIS S H, et al. Analysis and design of analog integrated circuits [M]. 4th Ed. Beijing: Higher Education Press, 2001: 421-432.

[3] ALLEN P E, HOLGERG D R. CMOS 模拟集成电路设计 [M]. 第二版. 北京：电子工业出版社，2006：259-274.

[4] 吴贵能，周玮. 一种两级 CMOS 运算放大器电源抑制比提高技术 [J]. 重庆邮电大学学报（自然科学版），2010，22(2)：209-213.

[5] PALLIS-ARENY R, WEBSTER J G. Common mode rejection ratio in differential amplifiers [J]. IEEE Trans Instrument Measurement, 1991, 40(1): 669-676.

[6] VAN GRIEKEN C , SANSEN W. A test set for automatic characterization of op-amps in the frequency domain [C] // IEEE Int Conf Microelec Test Structures. Sitges, Spain. 1993, 6: 83-88.

[7] Ray Stata. User's guide to applying and measuring operational amplifier specification, AN-356 [Z]. 1967.

[8] BRINSON M E, FAULKNER D J. New approach to measurement of operational amplifier common-mode rejection ratio in the frequency domain [J]. IEEE Circ Dev Syst, 1995, 142: 247-253.

[9] Intersil, recommended test procedures for operational amplifier [EB/OL]. http://www.intersil.com/data/an/an551.pdf, 1996.

[10] ADI. Op-amp common-mode rejection ratio (CMRR), MT042 [Z]. 2008.

[11] 高成，张栋，王香芬. 最新集成电路测试技术 [M]. 北京：国防工业出版社，2009：72-85.

[12] 刘涛，李儒章. 一种高阶曲率补偿的带隙电压基准 [J]. 重庆邮电大学学报（自然科学版），2007，19(6)：674-677.

[13] 芯海科技有限公司. CMOS 运放性能参数仿真规范 [Z]. 2004.

作者简介：

黄晓宗（1984—），男（汉族），四川南充人，2009 年 7 月毕业于天津大学微电子与固体电子学专业，主要从事运算放大器和数模混合信号集成电路的设计。