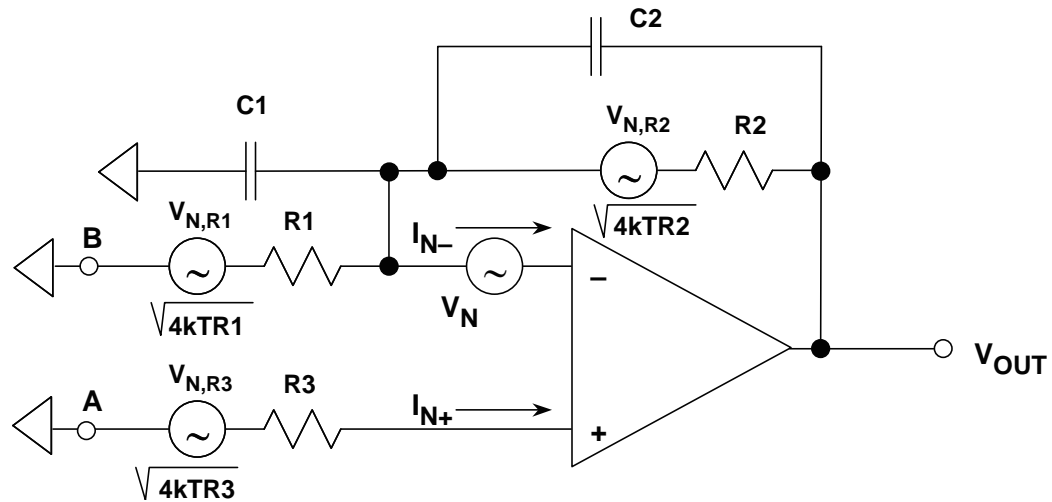


## 二阶系统的运算放大器总输出噪声计算

“[指南MT-049](#)”中分析了单极点系统的总输出噪声。下面图1所示的电路表示一个二阶系统，其中电容C1表示源电容、反相输入的杂散电容、运算放大器的输入电容或这些电容的任意组合。C1会导致噪声增益出现断点，C2则是为取得稳定性而必须添加的电容。



**图1：带电抗元件的运算放大器噪声模型(二阶系统)**

由于存在C1和C2，噪声增益是频率的函数，并在较高频率下有峰化现象(假定选择C2，使该二阶系统处于临界阻尼状况)。只要使 $R1 \times C1 = R2 \times C2$ ，就可以实现平坦的噪声增益。

不过，对于电流电压转换器，R1通常为高阻抗，因此该方法不起作用。在这些情况下，要使信号带宽最大有点复杂，详见“[指南MT-059](#)”。

向输入端A施加直流信号(B接地)时，增益(即低频噪声增益)为 $1 + R2/R1$ 。在较高频率下，从输入端A到输出端的增益变为 $1 + C1/C2$ (高频噪声增益)。

请注意，闭环带宽 $f_{cl}$ 是噪声增益与开环增益相交点的频率。向B施加直流信号(A接地)时，增益为 $-R2/R1$ ，其中高频截止点由 $R2-C2$ 决定。从B到输出端的带宽为 $1/2\pi R2C2$ 。

同相输入端的电流噪声 $I_{N+}$ 流过R3会引起 $I_{N+}R3$ 的噪声电压，与运算放大器噪声电压 $V_N$ 和R3的约翰逊噪声 $\sqrt{4kTR3}$ 一样，该噪声电压会被与频率相关的噪声增益放大。R1的约翰逊噪声会在 $1/2\pi R2C2$ 带宽范围内放大 $-R2/R1$ ，R2的约翰逊噪声则根本不会放大，而是在 $1/2\pi R2C2$ 带宽范围内直接连接到输出。反相输入端的电流噪声 $I_{N-}$ 仅会流过R2，进而在 $1/2\pi R2C2$ 带宽范围内导致放大器输出端出现大小为 $I_{N-}R2$ 的电压。

如果我们考虑这六种噪声贡献，则会发现如果R1、R2和R3很小，那么电流噪声和约翰逊噪声的影响将降至最低，主要噪声将是运算放大器的电压噪声。随着我们增加电阻，约翰逊噪声和噪声电流产生的电压噪声将升高。

如果噪声电流很小，那么约翰逊噪声将取代电压噪声而成为主要的噪声贡献。不过，约翰逊噪声随着电阻平方根增加而升高，电流噪声电压则随着电阻增加而呈线性升高，因此最终随着电阻继续增加，噪声电流引起的电压将成为主要因素。

无论输入端是连接到节点A还是节点B(另一个则接地或连接到其它低阻抗电压源)，上文分析到的这些噪声贡献都不受影响，这也是为何出现在运算放大器电压噪声 $V_N$ 上的同相增益 $(1 + Z2/Z1)$ 会被称为“噪声增益”的原因所在。

要计算二阶运算放大器系统的总输出rms噪声，需要将这六个噪声电压分别乘以相应的增益，然后在相应的频率上进行积分，如图2所示(下图)。

NOISE SOURCE EXPRESSED AS A VOLTAGE	MULTIPLY BY THIS FACTOR TO REFER TO OUTPUT	INTEGRATION BANDWIDTH
Johnson noise in R3: $\sqrt{4kTR3}$	Noise Gain as a function of frequency	Closed-Loop BW
Non-inverting input current noise flowing in R3: $I_{N+}R3$	Noise Gain as a function of frequency	Closed-Loop BW
Input voltage noise: $V_N$	Noise Gain as a function of frequency	Closed-Loop BW
Johnson noise in R1: $\sqrt{4kTR1}$	$-R2/R1$ (Gain from B to output)	$1/2\pi R2C2$
Johnson noise in R2: $\sqrt{4kTR2}$	1	$1/2\pi R2C2$
Inverting input current noise flowing in R2: $I_{N-}R2$	1	$1/2\pi R2C2$

图2: 二阶系统折合到输出端的噪声源

然后，所有输出贡献因素的和方根即代表总rms输出噪声。幸运的是，多数情况下，适当假设并识别主要噪声贡献因素，可以极大简化这个复杂繁琐的过程。

典型二阶系统的噪声增益如下面的图3所示。虽然两步内即可很容易地完成电压噪声积分，但请注意，由于存在峰化现象，因此输入电压噪声引起的输出噪声主要由噪声增益为 $1 + C1/C2$ 的高频部分决定。这是二阶系统的典型响应类型。反相输入电流噪声、 $R1$ 和 $R2$ 引起的噪声仅在 $1/2\pi R2C2$ 带宽上积分。

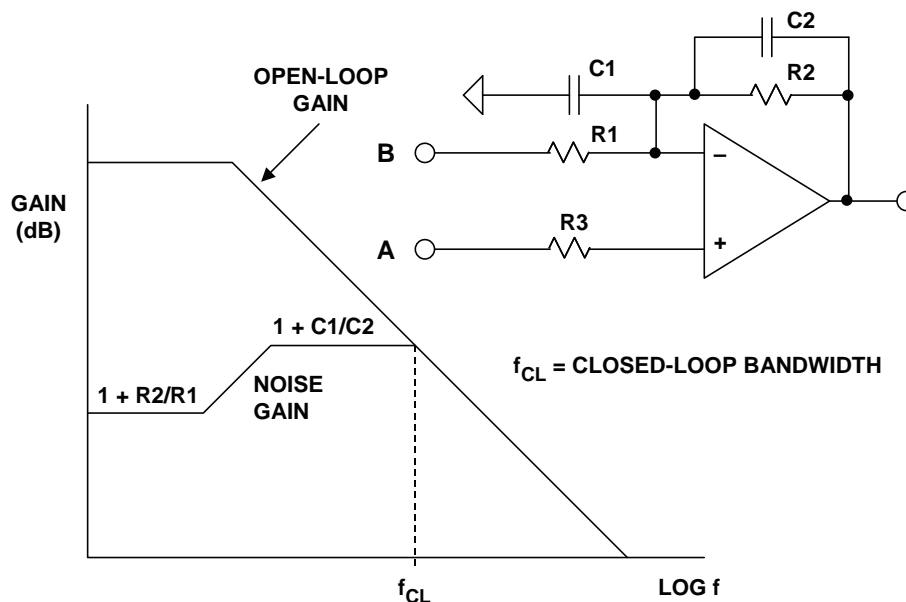


图3：典型二阶系统的噪声增益

### 参考文献

1. Hank Zumbahlen, *Basic Linear Design*, Analog Devices, 2006, ISBN: 0-915550-28-1. Also available as [Linear Circuit Design Handbook](#), Elsevier-Newnes, 2008, ISBN-10: 0750687037, ISBN-13: 978-0750687034. Chapter 1.
2. Walter G. Jung, *Op Amp Applications*, Analog Devices, 2002, ISBN 0-916550-26-5, Also available as [Op Amp Applications Handbook](#), Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7844-5. Chapter 1.

Copyright 2009, Analog Devices, Inc. All rights reserved. Analog Devices assumes no responsibility for customer product design or the use or application of customers' products or for any infringements of patents or rights of others which may result from Analog Devices assistance. All trademarks and logos are property of their respective holders. Information furnished by Analog Devices applications and development tools engineers is believed to be accurate and reliable, however no responsibility is assumed by Analog Devices regarding technical accuracy and topicality of the content provided in Analog Devices Tutorials.