

运算放大器电路固有噪声的分析与测量(第四部分)

关键字：运算放大器 噪声 TINA SPICE

作者：Art Kay，德州仪器(TI)高级应用工程师

在本系列的第三部分，我们对简单的运算放大器电路进行了实际分析。在本部分中，我们将采用所谓“TINA SPICE”电路模拟套件来分析运算放大器电路。(您可在 TI 网站 www.ti.com 上通过输入 TINA 搜索，获得 TINA SPICE 的免费版 TINA-TI)。TINA SPICE 能够就 SPICE 套件进行传统类型的模拟（如 dc、瞬态、频率域分析、噪声分析等）。此外，TINA-TI 还配有众多 TI 模拟宏模型。

在本部分，我们将介绍 TINA 噪声分析以及如何证明运算放大器的宏模型能准确对噪声进行建模。重要的是，我们应当了解，有些模型可能不能对噪声做适当建模。为此，我们可以用一个简单的测试步骤来加以检查，并通过用分离噪声源和通用运算放大器开发自己的模型来解决这一问题。

测试运算放大器噪声模型的准确性

图 4.1 显示了用于确认运算放大器噪声模型准确性的测试电路。CCV1 是一种流控电压源，我们用它来将噪声电流转换为噪声电压。之所以要进行这种转换，是因为 TINA 中的“输出噪声分析”需要对噪声电压进行严格检查。CCV1 的增益必须如图所示设为 1，这样电流就能直接转换为电压。运算放大器采用电压输出器配置，这样输出就能反映输入噪声情况。TINA 能够识别到两个输出测量节点“voltage_noise”与“current_noise”，它们用于生成噪声图。由于 TINA 需要输入源才能进行噪声分析，因此我们添加了信号源 VG1。我们将此信号源配置成正弦曲线，但这对噪声分析并不重要（见图 4.2）。

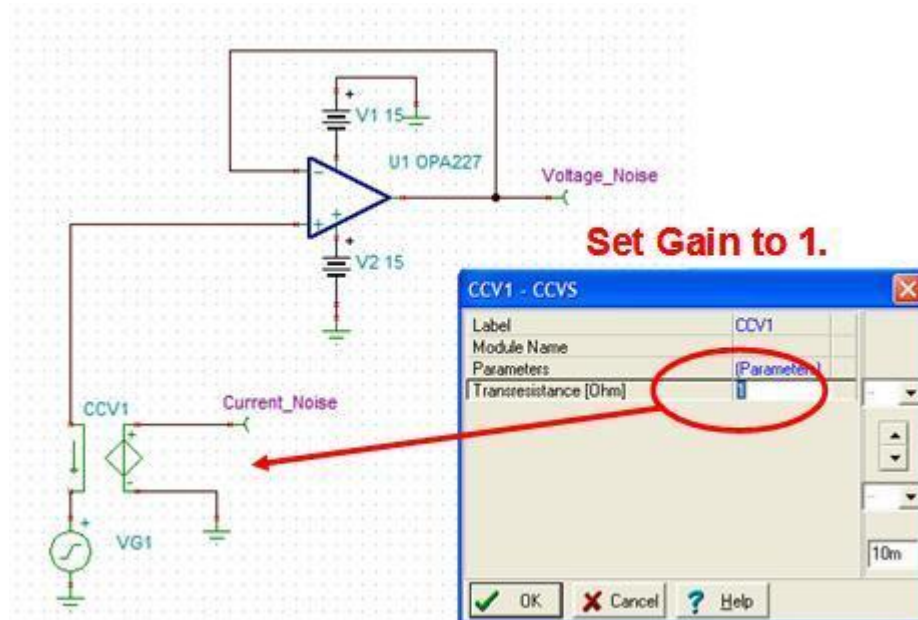


图 4.1：配置噪声测试电路（设置 CCV1 增益为 1）

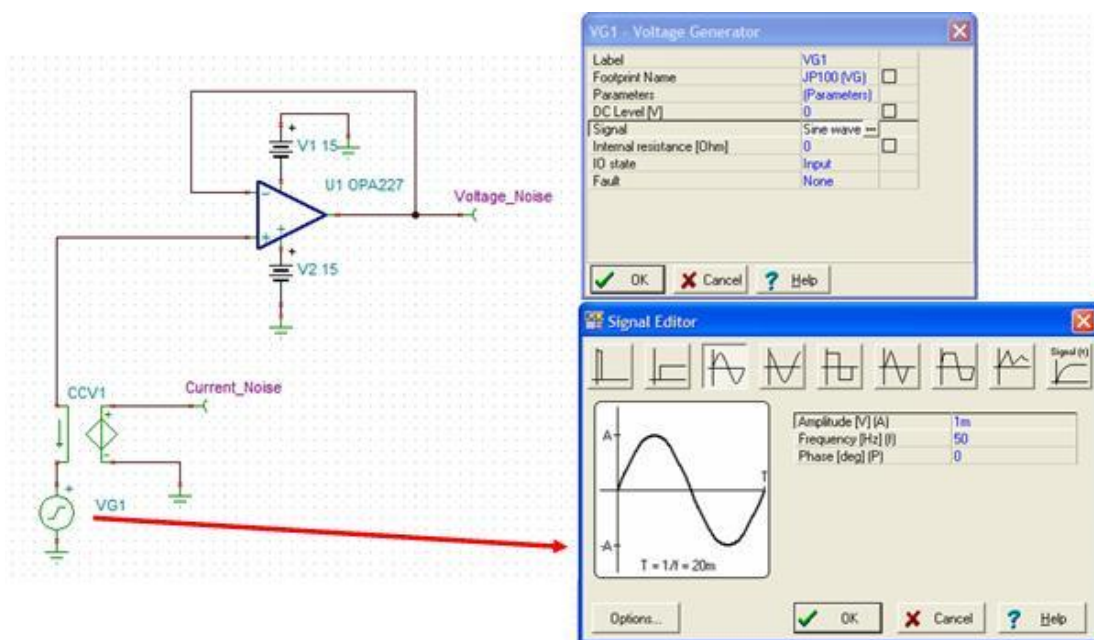


图 4.2：配置噪声测试电路（设置信号源 VG1）

随后，我们可从下来菜单中选择“分析\噪声分析”（如图 4.3 所示），进行噪声分析，这将生成噪声分析表。然后输入需要的起始和终止频率。该频率范围由受测试的运算放大器的规范决定。就本例而言，OPA227 的规范要求频率范围为 0.1 Hz ~ 10 kHz，也就是说，这就是适合本例的频率范围。随后，在“图表”项下选择“输出噪声”选项，便可针对电路中每个测量节点（仪表）生成不同的频谱密度曲线。这样，我们进行分析时，就能获得两个频谱密度曲线图，一个是针对“电压噪声”节点，另一个则是针对“电流噪声”节点。

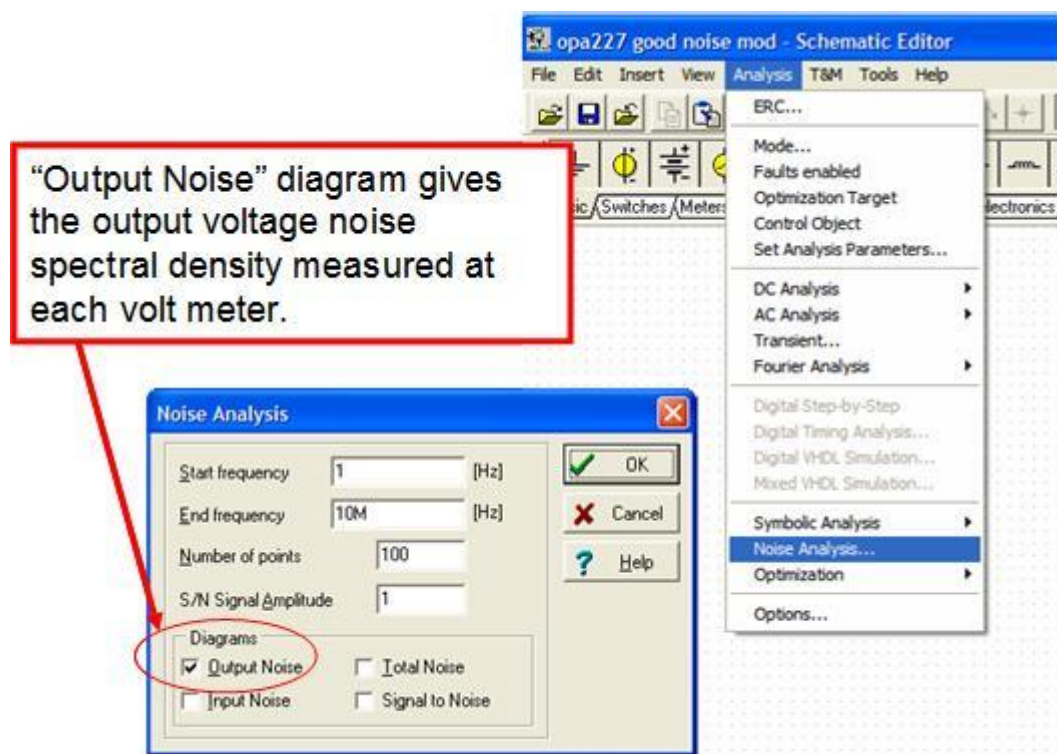


图 4.3：执行“噪声分析”选项

图 4.4 显示了噪声分析的结果。我们可用一些简单的方法来将曲线转换为更有用的形式。首

先，我们点击“视图”菜单下的“曲线分离”，随后，再点击 Y 轴并选择“对数”标度。根据适当范围设置上下限（四舍五入到 10 的 N 次幂）。点数调节为 $1 + \text{Number_of_Decades}$ 。在本例中，我们三个十倍频程（即 $100\text{f} \sim 100\text{p}$ ），因此，我们需要四点（见图 4.5）。

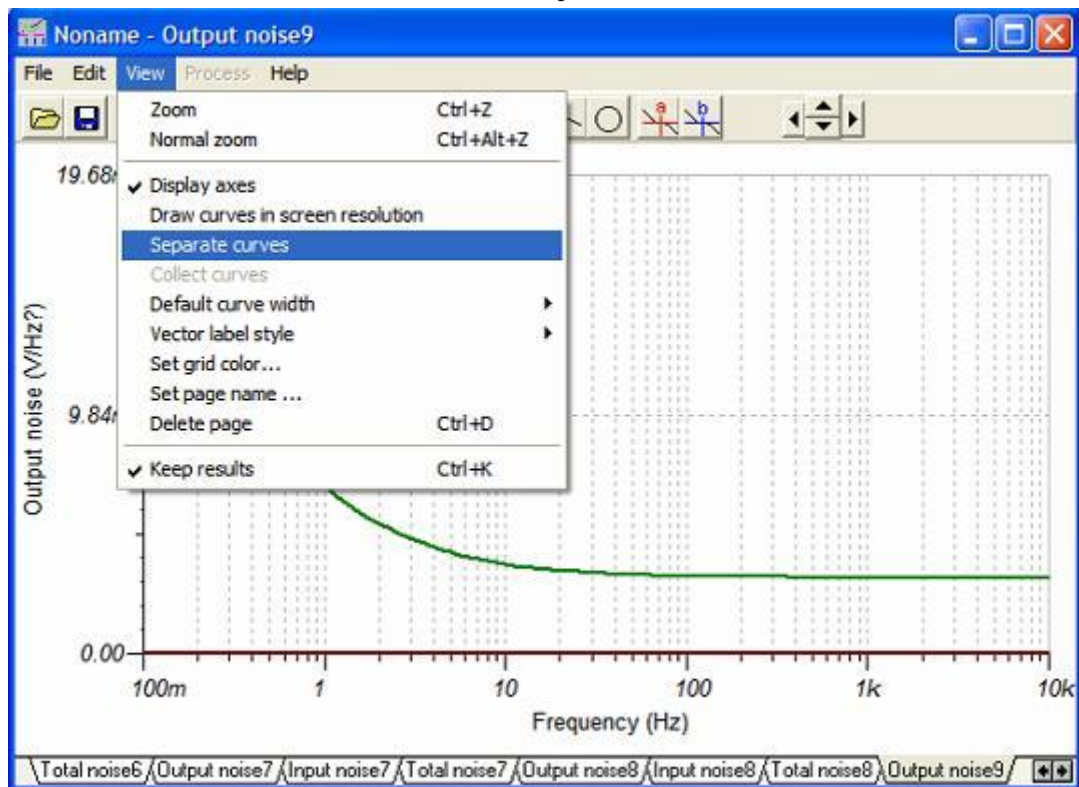


图 4.4：转变为更有用的格式的简单方法（曲线分离）

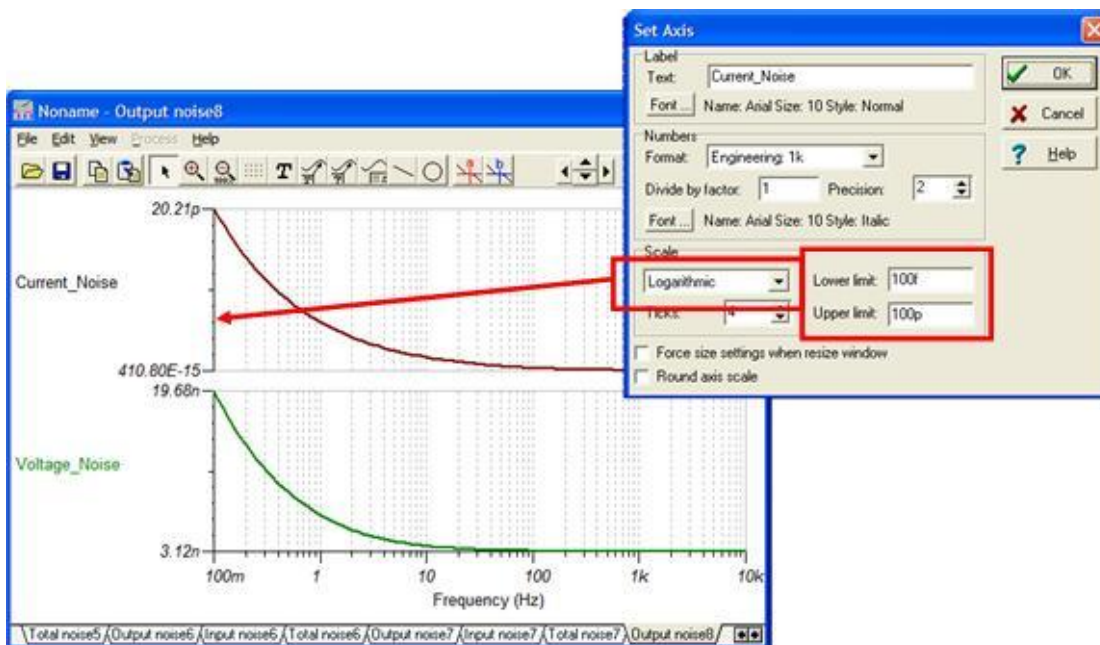


图 4.5：转变为更有用的格式的简单方法（变为对数标度）

我们将模拟结果与图 4.6 中的 OPA227 数据表相比较。请注意，二者几乎相同。这就是说，OPA227 的 TINA-TI 模型能准确进行噪声建模。我们对 OPA627 模型也采用与上述相同的步骤，图 4.7 显示了测试结果，发现 OPA627 模型没能通过测试。OPA627 模型的电流噪声频谱密度约为 $3.5\text{E-}21\text{A/rt-Hz}$ ，而规范要求则为 $2.5\text{E-}15\text{A/rt-Hz}$ 。此外，模型中的电压噪

声未体现 $1/f$ 区。下面，我们将为这款运算放大器建模，实现适当的噪声建模。

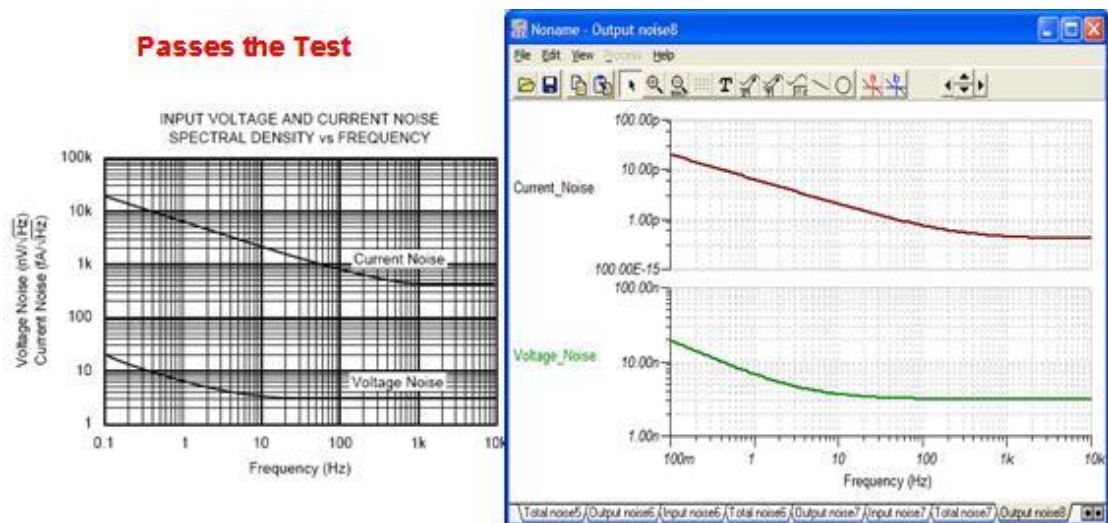


图 4.6：OPA227 通过建模测试

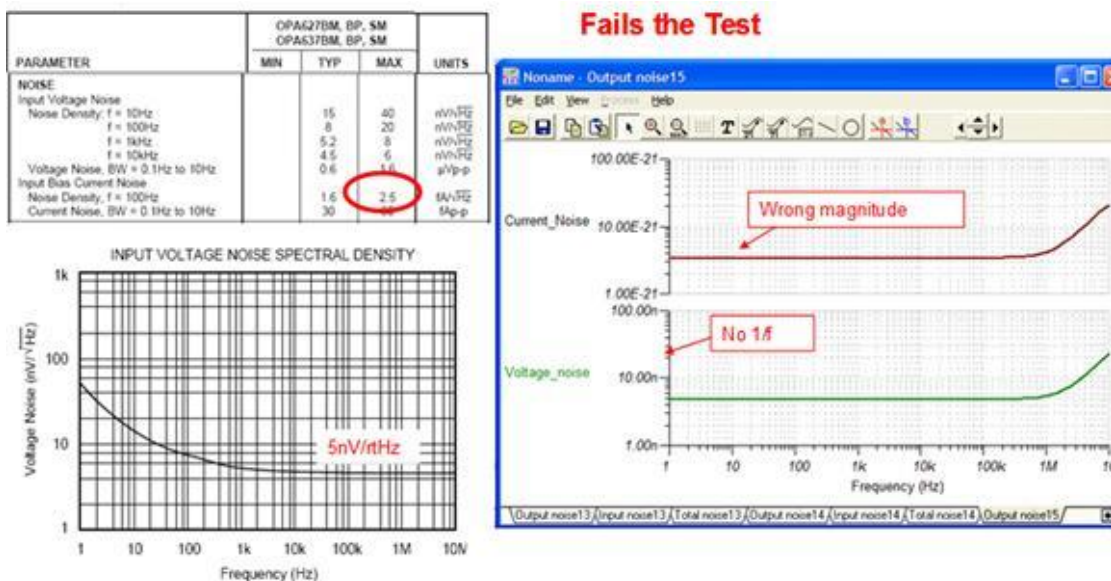


图 4.7：OPA627 未通过建模测试

建立自己的噪声模型

在第二部分中，我们曾介绍过运算放大器噪声模型，它包括运算放大器、电压噪声源和电流噪声源。我们将用分离噪声源和通用运算放大器来构建这一噪声模型。模拟与 Rf 模型 (Analog & Rf models) 公司的 Bill Sands 为 TI 开发了分离噪声源。您可从 TI 网站 www.ti.com 下载这种噪声源，只需搜索“TINA-TI 应用原理图”并查找“噪声分析”文件夹即可。我们还在附录 4.1 和 4.2 中给出了“TINA 宏”列表。

图 4.8 显示了用于创建噪声模型的电路。请注意，这就是我们此前使用的测试电路配置。该电路配置中有一个连接在输入端之间的电流噪声源。严格地说，实际上有两个电流噪声源。不过，我们从产品说明书很难说清楚这些信号源之间的相互关系。而且，在电流反馈放大器中这些信号源的信号幅度不同。我们在以后的文章中 will 更详细地探讨上述问题。我们将对电路加以定制，以便对 OPA627 的噪声特点进行适当建模。

The voltage and current noise source is available at www.ti.com.
Search for "Tina-TI APPLICATION SCHEMATICS" and look in the "Noise Analysis" folder.

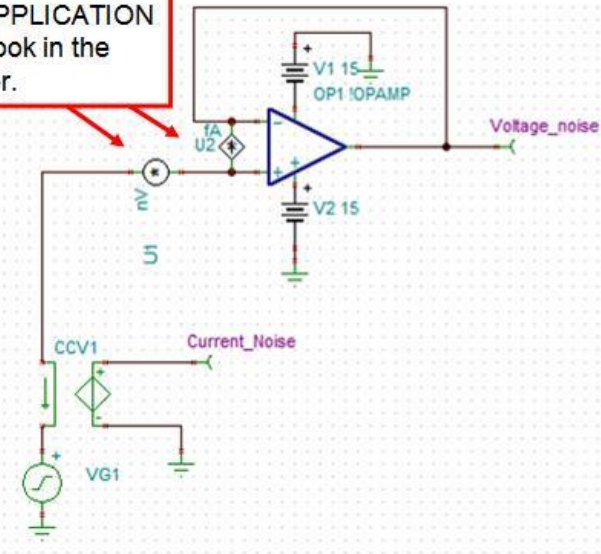


图 4.8：采用分离噪声源的运算放大器噪声模型

Enter magnitude of $1/f$ and broadband noise into the macro.

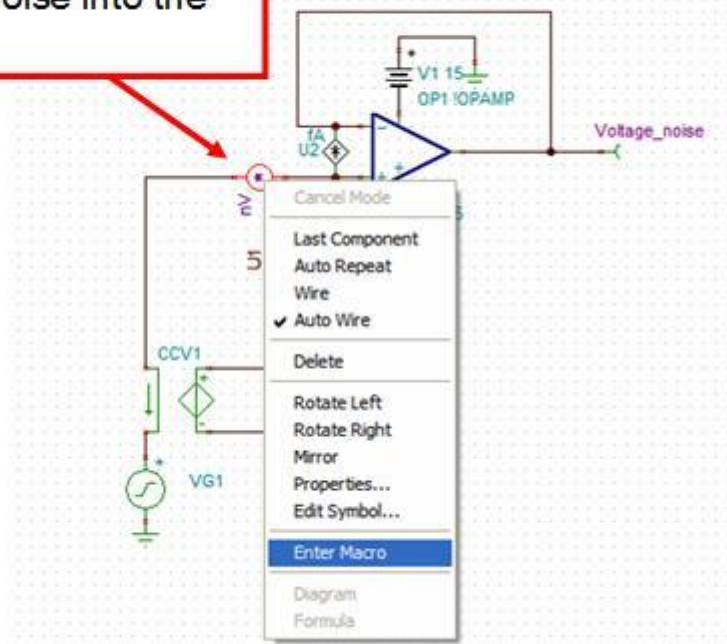
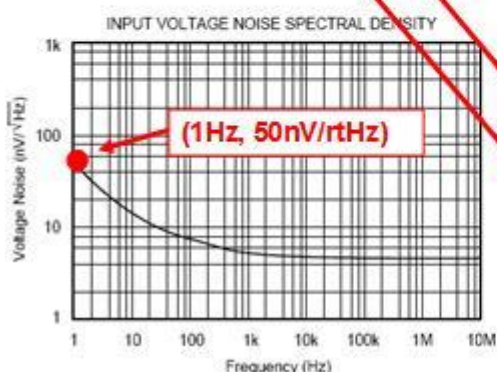


图 4.9：进入宏以配置噪声电压源

1/f Region

Look for a point in the 1/f region. Enter the frequency and magnitude at this point



```

opa627 noise source mod:U1 [MACRO] - Schematic Editor
File Edit Insert View Analysis T&M Tools Help
Basic/Switches/Meters/Sources/Semiconductors/Optoelectronics/Sp

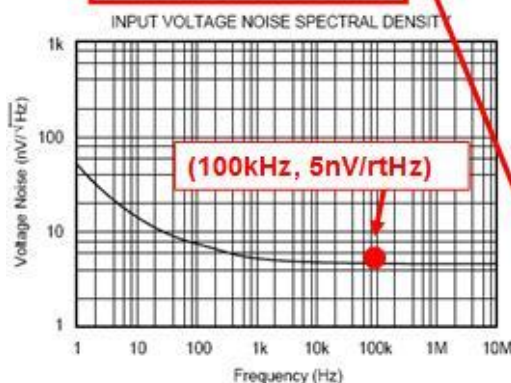
* BEGIN PROG NSE NANOVOLT/RT-HZ
.SUBCKT VNSE 30 40
* BEGIN SETUP OF NOISE GEN - NANOVOLT/RT-
* INPUT THREE VARIABLES
* SET UP VNSE 1/F
* NV/RHZ AT 1/F FREQ
.PARAM NLF=50
* FREQ FOR 1/F VAL
.PARAM FLW=1
* SET UP VNSE FB
* NV/RHZ FLATBAND
.PARAM NVR=5
* END USER INPUT
* START CALC VALS
.PARAM GLF={FLW^0.25*NLF/1164}
.PARAM RNV={1.184*NVR^2}
.MODEL DVN D KF={FLW^0.5/1E11} IS=1.0E-16
    
```

图 4.10：输入 1/f 区数据

随后，我们应输入宽带噪声频谱密度，这里要用到 NVR 参数。请注意，由于宽带噪声强度就所有频率而言都是一样的，因此这里不需要输入频率（见图 4.11）。输入噪声信息之后，我们必须编辑并关闭 SPICE 文本编辑器。点击“校验框”，注意到状态栏会显示“编辑成功”消息。在“文件”菜单下选择“关闭”，返回原理图编辑器（见图 4.12）。

Broadband Region

Look for a point in the broad band region. Enter the magnitude at this point



```

opa627 noise source mod:U1 [MACRO] - Schematic Editor
File Edit Insert View Analysis T&M Tools Help
Basic/Switches/Meters/Sources/Semiconductors/Optoelectronics/Sp

* BEGIN PROG NSE NANOVOLT/RT-HZ
.SUBCKT VNSE 30 40
* BEGIN SETUP OF NOISE GEN - NANOVOL
* INPUT THREE VARIABLES
* SET UP VNSE 1/F
* NV/RHZ AT 1/F FREQ
.PARAM NLF=50
* FREQ FOR 1/F VAL
.PARAM FLW=1
* SET UP VNSE FB
* NV/RHZ FLATBAND
.PARAM NVR=5
* END USER INPUT
* START CALC VALS
    
```

图 4.11：输入宽带区数据

我们对电流噪声源也要采取相同步骤。就此示例来说，电流源没有 1/f 噪声。这时，宽带

频谱密度和 $1/f$ “.PARAM” 均设为 $2.5\text{fA}/\text{rt-Hz}$ 。 $1/f$ 频率通常设为非常低的频率 ,如 0.001Hz (见图 4.13)

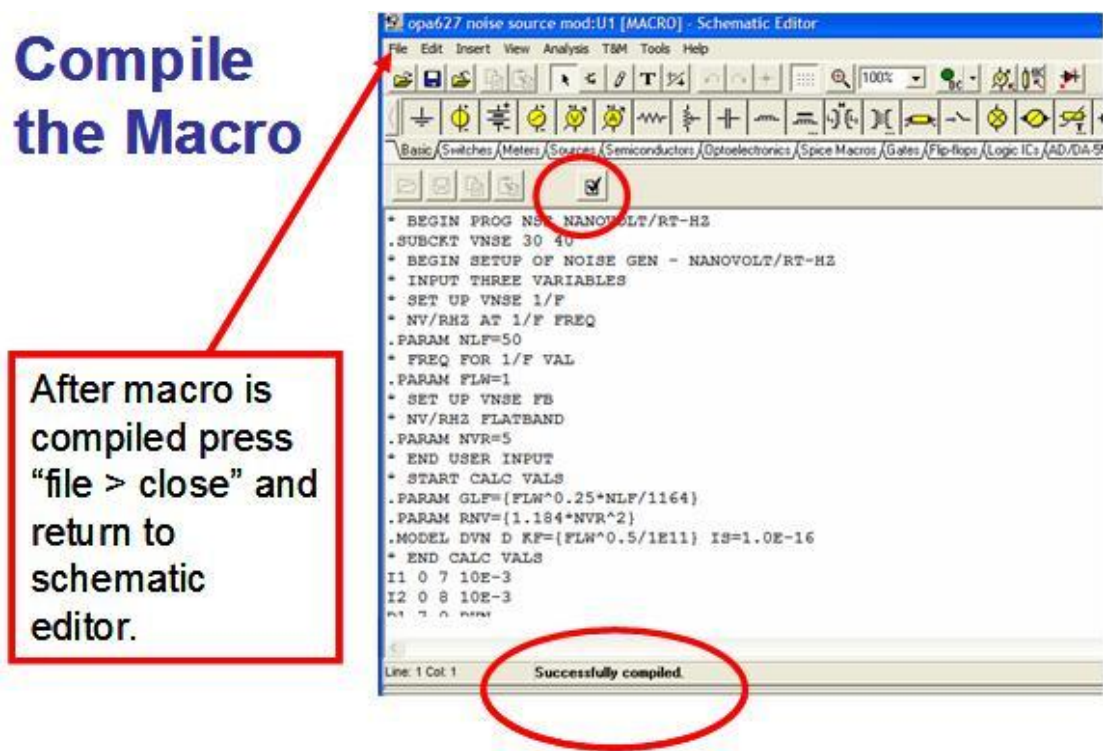


图 4.12：编辑 宏 并 关闭

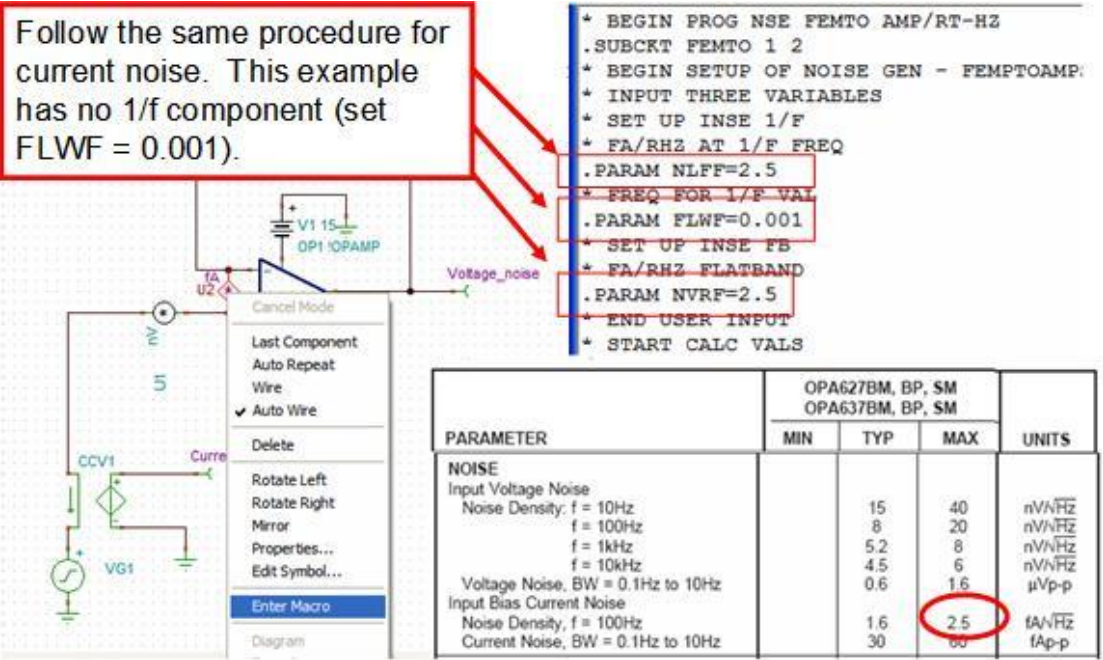


图 4.13：输入电流噪声源数据

现在 ,我们对两种噪声源都进行了适当配置 ,接下来就要编辑通用运算放大器模型中的一些 AC 参数了。具体说来 ,必须输入开环增益和主导极点 ,因为它们会影响放大器的闭环带宽 ,反过来闭环带宽又会影响电路的噪声特性。开环增益在数据表中通常采用 dB 为单位。我们可用方程式 4.1 将 dB 转换为线性增益。我们还可用方程式 4.2 来计算 A_{ol} 曲线中的主导极点。例 4.1 就 OPA627 进行了主导极点计算。图 4.14 给出了主导极点的图示。

$$OLG = 10^{\left(\frac{Ndb}{20}\right)}$$

Where

OLG = the Open Loop Gain in V/V

Ndb = the Open Loop Gain in dB

方程式 4.1：将 dB 转化为线性增益

$$\text{Dominant_Pole} = \frac{GBW}{OLG}$$

Where

Dominant_Pole = the first pole in the op amp Open Loop Gain curve

GBW = The Gain Bandwidth Product

OLG = the Open Loop Gain in V/V

方程式 4.2：计算主导极点

$$OLG = 10^{\frac{Ndb}{20}} = 10^{\left(\frac{120}{20}\right)} = 1 \cdot 10^6 \text{ V/V}$$

OPA627

Data Sheet

$$\text{Dominant_Pole} = \frac{GBW}{OLG} = \frac{16\text{MHz}}{1 \cdot 10^6} = 16\text{Hz}$$



				dB
OPEN-LOOP GAIN				
Open-Loop Voltage Gain	112	120		dB
Over Specified Temperature	106	117		dB
SM Grade	100	114		dB
FREQUENCY RESPONSE				
Slew Rate: OPA627	40	55		V/μs
OPA637	100	135		V/μs
Settling Time: OPA627 0.01%		550		ns
0.1%		450		ns
OPA637 0.01%		450		ns
0.1%		300		ns
Gain-Bandwidth Product: OPA627		16		MHz
OPA637		80		MHz
Total Harmonic Distortion + Noise		0.00003		%
POWER SUPPLY				

例 4.1：查找 OPA627 的线性开环增益和主导极点

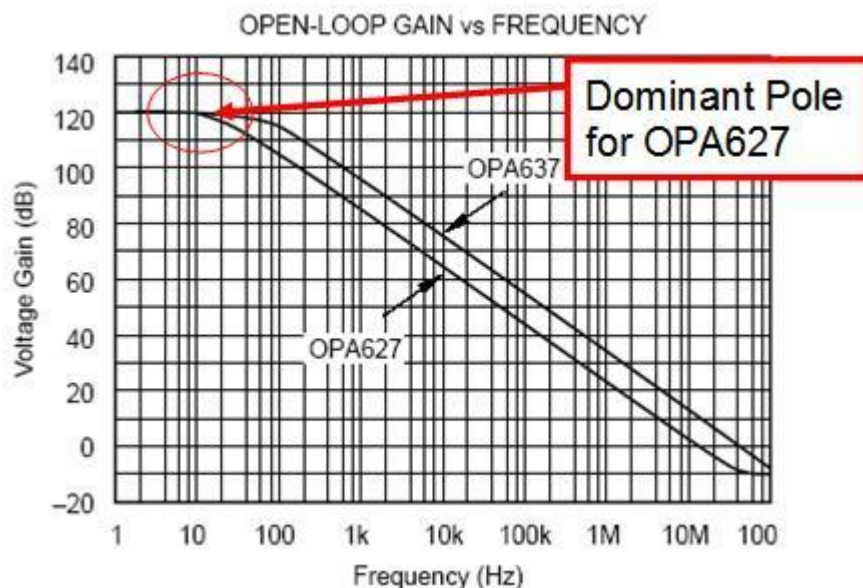


图 4.14：增益主导极点与频率关系图

下面，我们应编辑通用运算放大器模型，其中包括开环增益和主导极点。只需双击运算放大器标志并按下“类型”按钮即可，这将启动“目录编辑器”。在“目录编辑器”中，我们要修改“开环增益”以匹配于我们在例 4.1 中计算所得的结果。图 4.15 概述了相关步骤。

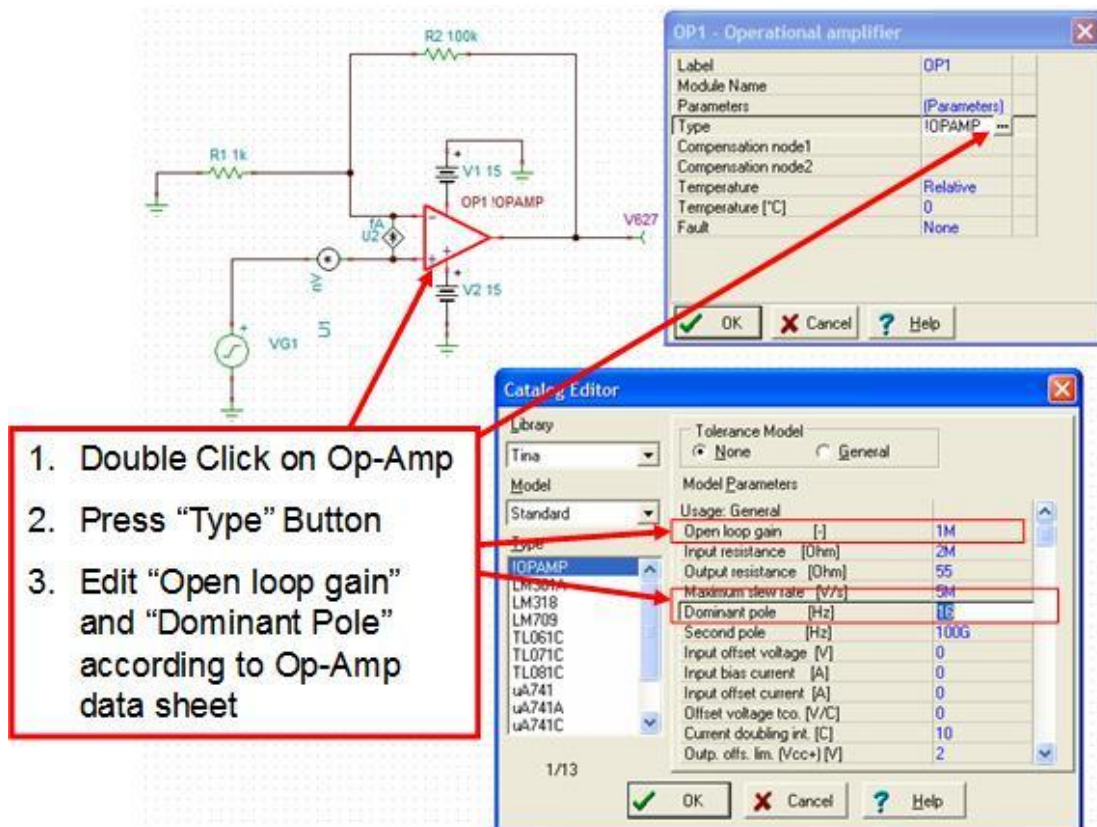


图 4.15：编辑通用运算放大器

现在，运算放大器的噪声模型已经构建完毕。图 4.16 显示了模型上运行测试的过程及结果。正如我们所期望的那样，新模型与数据表刚好匹配。

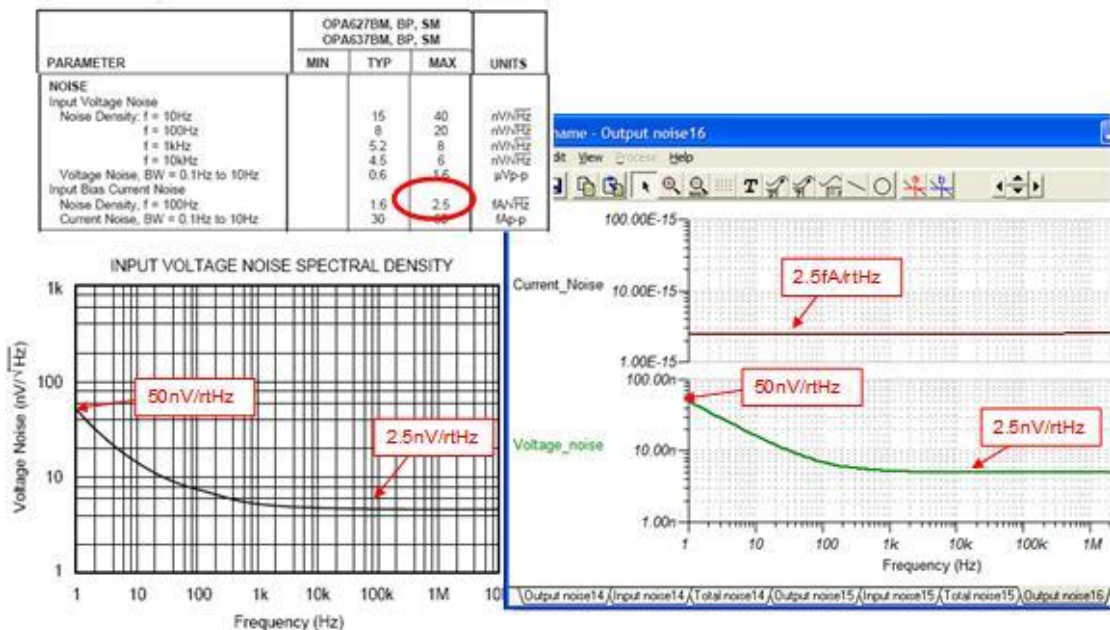


图 4.16：手工构建的新模型顺利通过模型测试

用 TINA 分析第三部分中的电路

图 4.17 显示了采用 Tina SPICE 的 OPA627 建模原理图。请注意，第四部分讨论了通过用分离噪声源和通用运算放大器开发自己的模型来对噪声进行适当建模的方法，此外，电阻 R_f 和 R_1 匹配于第三部分中的示例电路。

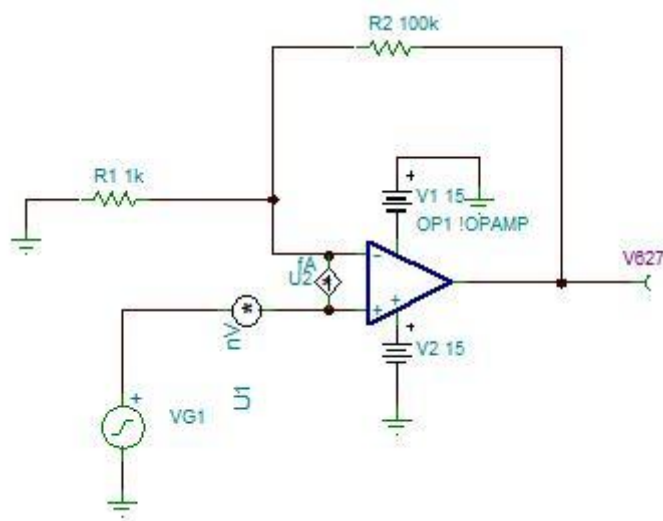


图 4.17：OPA627 电路示例

我们可从下来菜单中选择“分析\噪声分析”，进行 Tina SPICE 噪声分析，这将生成噪声分析表。我们可在噪声分析表上选择“输出噪声”和“总噪声”选项。“输出噪声”选项将针对所有测试点（即带仪表的节点）生成噪声频谱密度图。“总噪声”将生成功率谱密度曲线图积分结果。我们可通过总噪声曲线明确电路的均方根输出噪声电压。图 4.18 显示了如何执行噪声分析。

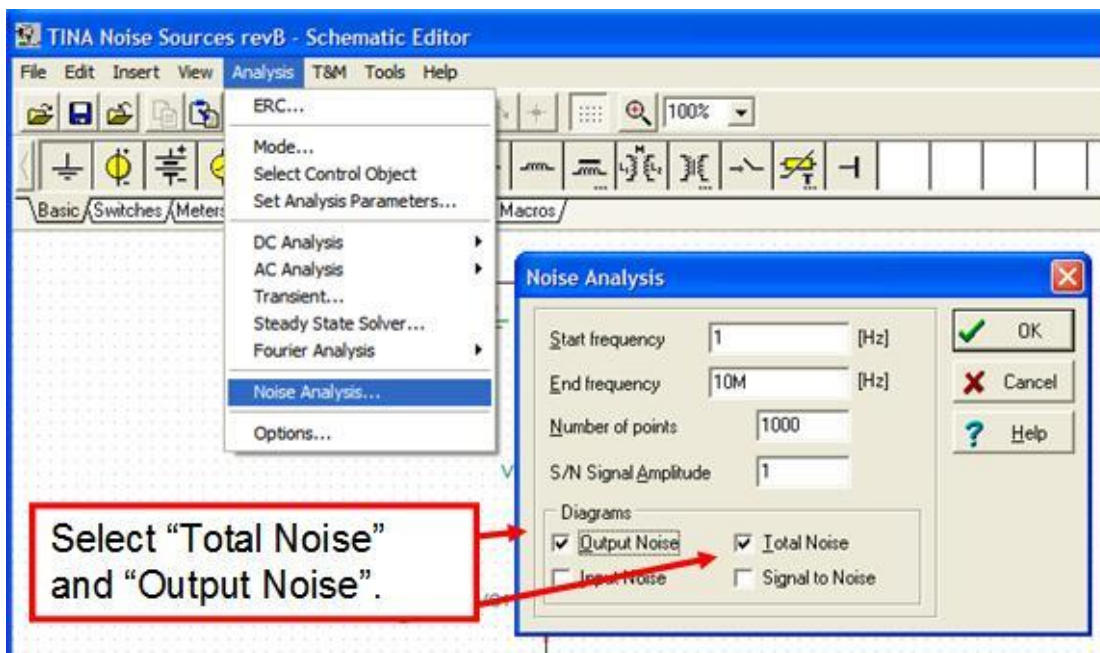


图 4.18：运行噪声分析

图 4.19 和图 4.20 显示了 TINA 噪声分析的结果。图 4.19 给出了放大器输出处的噪声频谱密度（即输出噪声）。该曲线结合了所有噪声源，并包括噪声增益的效果和噪声带宽。图 4.20 显示了给定带宽下放大器输出处的总噪声。我们也可以求功率频谱密度曲线的积分（即电压频谱密度的平方），从而推导出该曲线。请注意，该曲线在高频下为常量，即 $323\mu\text{Vrms}$ 。这一结果与第三部分中计算得出的均方根噪声相匹配（我们计算所得的噪声为 $324\mu\text{V}$ ）。还要注意，该噪声为常量，这是由于运算放大器的带宽限制使然。

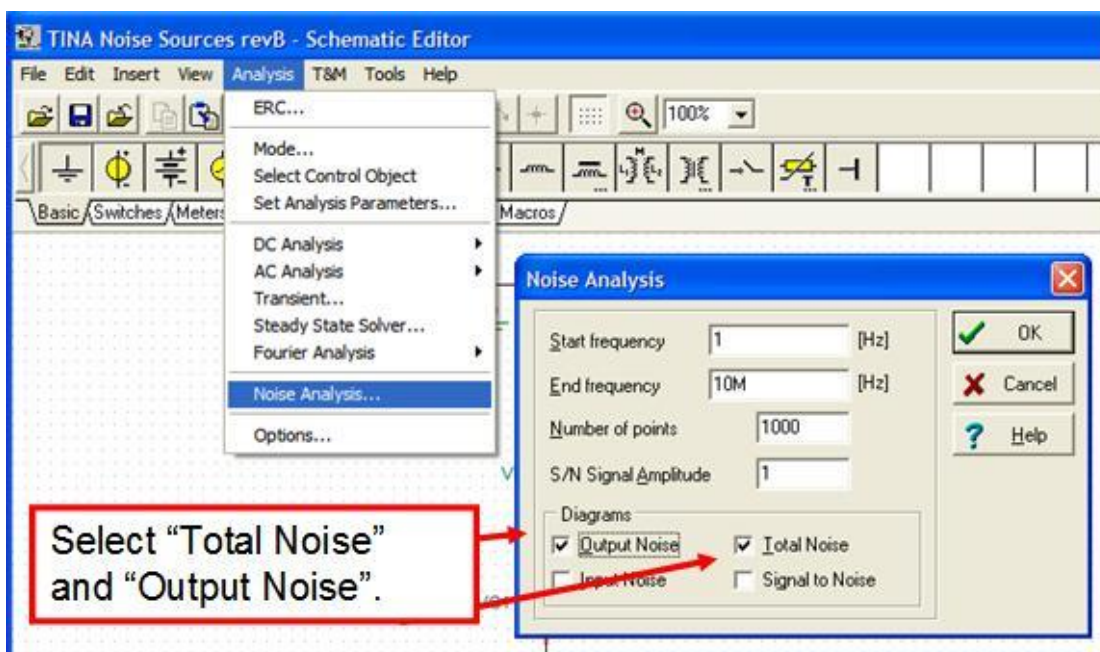


图 4.19：输出噪声图结果

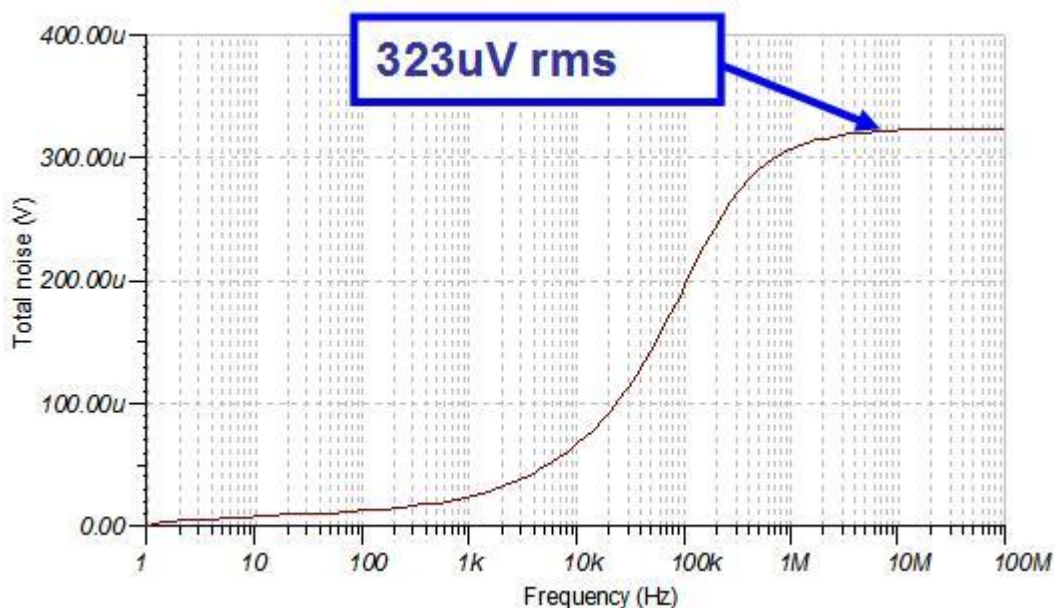


图 4.20：总噪声图结果

本文总结和下文内容提要

在本文中，我们介绍了称作 TINA SPICE 的电路模拟套件。我们用 TINA 开发了一套简单的测试步骤来检查运算放大器模型是否可以准确对噪声进行建模。在某些情况下，有的模型不能通过测试，因此，我们就用分离噪声源和通用运算放大器开发出了我们自己的模型。我们还用 TINA 来计算第三部分实际分析中所用的示例电路的噪声。在第五部分，我们将分析测试噪声的方法，特别是要对此前章节中的噪声计算结果进行物理测量。

致谢！

特别感谢以下 TI 人员提供的技术意见：

Rod Bert，高级模拟 IC 设计经理；

Bruce Trump，线性产品经理；

Tim Green，应用工程设计经理；

Neil Albaugh，高级应用工程师；

Bill Sands，模拟与 Rf 模型 (Analog & Rf models) 公司技术顾问；

参考书目

1.)Robert V. Hogg 与 Elliot A Tanis 共同编著的《概率与统计推断》，第三版，麦克米兰出版公司 (Macmillan Publishing Co.) 出版；

2.)C. D. Motchenbacher 与 J. A. Connelly 共同编著的《低噪声电子系统设计》，Wiley-Interscience Publication 出版。

关于作者：

Arthur Kay 是 TI 的高级应用工程师。他专门负责传感器信号调节器件的支持工作。他于 1993 年毕业于佐治亚理工学院 (Georgia Institute of Technology)，并获得电子工程硕士学位。

附录 4.1：电压噪声宏

```
* BEGIN PROG NSE NANO VOLT/RT-HZ
```

```
.SUBCKT VNSE 1 2
```

```
* BEGIN SETUP OF NOISE GEN - NANO VOLT/RT-HZ
```

```
* INPUT THREE VARIABLES
```

```
* SET UP VNSE 1/F
```

```
* NV/RHZ AT 1/F FREQ
```

```

.PARAM NLF=15
* FREQ FOR 1/F VAL
.PARAM FLW=10
* SET UP VNSE FB
* NV/RHZ FLATBAND
.PARAM NVR=4.5
* END USER INPUT
* START CALC VALS
.PARAM GLF={PWR(FLW,0.25)*NLF/116?}
.PARAM RNV={1.184*PWR(NVR,2)}
.MODEL DVN D KF={PWR(FLW,0.5)/1E11} IS=1.0E-16
* END CALC VALS
I1 0 7 10E-3
I2 0 8 10E-3
D1 7 0 DVN
D2 8 0 DVN
E1 3 6 7 8 {GLF}
R1 3 0 1E9
R2 3 0 1E9
R3 3 6 1E9
E2 6 4 5 0 10
R4 5 0 {RNV}
R5 5 0 {RNV}
R6 3 4 1E9
R7 4 0 1E9
E3 1 2 3 4 1
C1 1 0 1E-15
C2 2 0 1E-15
C3 1 2 1E-15
.ENDS
•END PROG NSE NANOV/RT-HZ

```

附录 4.2 : 电流噪声宏

```

* BEGIN PROG NSE FEMTO AMP/RT-HZ
.SUBCKT FEMT 1 2
* BEGIN SETUP OF NOISE GEN - FEMPTOAMPS/RT-HZ
* INPUT THREE VARIABLES
* SET UP INSE 1/F
* FA/RHZ AT 1/F FREQ
.PARAM NLFF=2.5
* FREQ FOR 1/F VAL
.PARAM FLWF=0.001
* SET UP INSE FB
* FA/RHZ FLATBAND
.PARAM NVRF=2.5

```

```
* END USER INPUT
* START CALC VALS
.PARAM GLFF={PWR(FLWF,0.25)*NLFF/116?}
.PARAM RNVF={1.184*PWR(NVRF,2)}
.MODEL DVNF D KF={PWR(FLWF,0.5)/1E11} IS=1.0E-16
* END CALC VALS
I1 0 7 10E-3
I2 0 8 10E-3
D1 7 0 DVNF
D2 8 0 DVNF
E1 3 6 7 8 {GLFF}
R1 3 0 1E9
R2 3 0 1E9
R3 3 6 1E9
E2 6 4 5 0 10
R4 5 0 {RNVF}
R5 5 0 {RNVF}
R6 3 4 1E9
R7 4 0 1E9
G1 1 2 3 4 1E-6
C1 1 0 1E-15
C2 2 0 1E-15
C3 1 2 1E-15
.ENDS
* END PROG NSE FEMTO AMP/RT-HZ
```