

电子电路噪声的岔集谱分析法

罗涛 何振亚 辛德胜

(东南大学无线电系,南京 210018) (吉林工业大学应用理科部,长春 130025)

摘要 本文阐明了目前电路噪声理论的不完善性,提出了电子电路岔集谱分析法,使噪声计算的精度和效率有显著提高。作者编制并调试成功了基于此方法的电子电路噪声性能分析和低噪声设计程序,文末给出了实例结果。与实验结果的比较,说明了本文提出方法的正确性。

关键词 电路噪声;岔集谱分析法;低噪声电路设计

1. 引言

电子电路的噪声分析是了解器件或电路噪声性能、研制低噪声器件、合理设计低噪声电路的基础。目前,虽然已有一些程序,如 NOISE, SPICE 等等^[1-3],能进行噪声计算,但它们都是采用相量法。众所周知,噪声的幅值、相位、频率都是随机的时间函数,即噪声是随机过程,因此,采用相量法的噪声计算(如输出噪声、等效输入总噪声和其它噪声指标)必须首先对每个噪声源的贡献单独进行计算。然后,求所有噪声源贡献的平方和再开方(rms和)才能得出结果。由于每个器件(如BJT或FET)都含有多个噪声源,因此,一个电路中将含有大量噪声源,这将使噪声计算量大大地增加。另外,由于对每个噪声源采用独立分析,使噪声相关性无法考虑而忽略,给噪声计算和低噪声设计造成30%最大误差^[4]。

为解决上述问题,本文根据作者提出的电网络岔集分析法^[5],进而提出了电子电路噪声的岔集谱分析法。该方法在计算噪声时,所有的噪声源同时参与计算,并且对噪声相关性给予充分考虑,因而,其计算噪声的效率和精度得到了显著的提高。文末还给出了实例和对比结果。

2. 噪声的岔集谱分析法

回路岔集分析法(简称岔集法)是一种新的电网络分析法,它具有独特的优点^[5]。数学表示如下:

$$Y_{ic}\dot{U}_{ic} = Q[I_s + Y\dot{U}_s] \quad (1a)$$

$$\dot{U}_s = Q^T\dot{U}_{ic} \quad (1b)$$

其中 Q, Y, Y_{ic} 分别为岔集阵,支路导纳阵和岔集导纳阵; I_s, \dot{U}_s 分别为电流源和电压源

1991.10.23收到,1992.04.27完稿。

罗涛 男,1961年生,博士后,主要从事神经网络在随机数字信号处理中应用,电子电路噪声理论及其在微弱信号检测和处理中应用等研究工作。目前从事程控交换技术的开发研究工作。

何振亚 男,1922年生,教授,博士生导师,现主要从事神经网络自适应信号处理,多维数字信号处理等研究工作。

辛德胜 男,1950年生,讲师,现主要从事光电技术在工业检测中的应用等研究工作。

列向量; \dot{U}_{ic}, \dot{U}_b 分别为岔集电压和支路电压列向量。

为推导噪声岔集谱分析方程, 给出下列定义。设电路对应的网络具有 b 条支路, l 个岔集。

定义 1 岔集电压噪声谱矩阵 $S_{ic}(f)$

这是一个 $l \times l$ 矩阵, 第 i 行第 j 列元素表示: 当 $i = j$ 时, 为第 i (或 j) 岔集噪声电压(自)谱密度; 当 $i \neq j$ 时, 为第 i 与第 j 岔集噪声电压互谱密度。

定义 2 支路电压噪声谱矩阵 $S_b(f)$

这是一个 $b \times b$ 矩阵, 第 i 行第 j 列元素表示: 当 $i = j$ 时, 为第 i (或 j) 支路上电压噪声(自)谱密度; 当 $i \neq j$ 时, 为第 i 与第 j 支路电压噪声互谱密度。

定义 3 电流噪声源谱矩阵 $S_{ii}(f)$

这是一个 $b \times b$ 矩阵, 第 i 行第 j 列元素表示: 当 $i = j$ 时, 为第 i (或 j) 支路电流噪声源(自)谱密度; 当 $i \neq j$ 时, 为第 i 与第 j 支路电流噪声源互谱密度。

定义 4 电压噪声源谱矩阵 $S_{vv}(f)$

这是一个 $b \times b$ 矩阵, 第 i 行第 j 列元素表示: 当 $i = j$ 时, 为第 i (或 j) 支路电压噪声源(自)谱密度; 当 $i \neq j$ 时, 为第 i 与第 j 支路电压噪声源互谱密度。

定义 5 电压噪声源与电流噪声源互谱矩阵 $S_{vii}(f)$

这是一个 $b \times b$ 矩阵, 第 i 行第 j 列元素表示第 i 支路上电压噪声源与第 j 支路上电流噪声源互谱密度。

对 (1a) (1b) 两式分别求共轭转置, 有

$$\dot{U}_{ic}^* = [\dot{I}_c + \dot{U}_b \dot{Y}] Q^T Y_{ic}^{-1} \quad (2a)$$

$$\dot{U}_b^* = \dot{U}_{ic} Q \quad (2b)$$

其中上角标 * 表示共轭转置, T 表示转置。根据随机过程理论^[4], 设 $S_x(f)$, $S_y(f)$ 及 $S_{xy}(f)$ 分别表示广义平稳随机过程 $x(t)$, $y(t)$ 的自功率谱密度及其互功率谱密度, 则有

$$\begin{cases} S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} 2T \overline{x(t) \dot{x}^*(t)} \\ S_y(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} 2T \overline{y(t) \dot{y}^*(t)} \\ S_{xy}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} 2T \overline{x(t) \dot{y}^*(t)} = \dot{S}_{yx}(f) \end{cases} \quad (3)$$

将 (2a), (2b) 两式分别右乘到 (1a), (1b) 两式, 应用 (3) 式, 并注意定义 1—定义 5, 整理得下式

$$S_{ic}(f) = Y_{ic}^{-1} Q \{ S_{ii}(f) + Y S_{vv}(f) \dot{Y} + 2R_c [Y S_{vii}(f)] \} Q^T \dot{Y}_{ic}^{-1} \quad (4a)$$

$$S_b(f) = Q^T S_{ic}(f) Q \quad (4b)$$

(4a)(4b) 两式联合, 就构成了岔集谱(密度)方程。

由公式 (4a)(4b) 可知, 噪声岔集谱方法使得计算电子电路噪声时能同时处理所有噪声源, 并且噪声相关性在此方程中得到充分考虑, 因而噪声计算的精度和效率具有显著提高。

3. 基于岔集谱分析法的电路噪声性能分析和低噪声设计

电子电路噪声性能主要用等效输入噪声电压 E_n , 等效输入噪声电流 I_n , 以及 E_n 与 I_n 之间谱相关系数 γ 来描述^[11,12], 见图 1 所示。

利用岔集谱分析法,可计算得到输出端总噪声,然后除以增益模的平方 $|K(f)|^2$ 即可得到总等效输入噪声。设 $S_e(f)$, $S_i(f)$ 表示等效输入噪声电压 E_n 和等效输入噪声电流 I_n 的功率谱密度,那么,总等效输入噪声电压谱密度为

$$S(f) = S_e(f) + S_i(f)|Z_s|^2 + 2\sqrt{S_e(f)S_i(f)}\text{Re}[\gamma Z_s] \quad (5)$$

式中 Z_s 为源阻抗, γ 为 E_n 与 I_n 的谱相关系数,且 $\gamma = \gamma_1 + j\gamma_2$ 。

给定 4 个不同的源阻抗值,利用岔集谱分析法可分别求得 4 种情况下对应的 $S(f)$,则由(5)式可构成 4 个关于 $S_e(f)$, $S_i(f)$, γ_1 和 γ_2 的方程,解此方程组,即得 $S_e(f)$, $S_i(f)$, γ_1 和 γ_2 ,而 $E_n = \sqrt{S_e(f)}$, $I_n = \sqrt{S_i(f)}$, $\gamma = \gamma_1 + j\gamma_2$ 。

有了 E_n, I_n, γ , 由文献[7],在给定频率点下,其低噪声设计结果为最佳源电阻

$$R_{s,o} = \sqrt{1 - \gamma_2^2} E_n / I_n \quad (6)$$

最佳源电抗

$$X_{s,o} = -\gamma_2 E_n / I_n \quad (7)$$

最小噪声系数

$$NF_{\min} = 1 + (\sqrt{1 - \gamma_2^2} + \gamma_1) E_n I_n / (2KT) \quad (8)$$

对频率参数再进行优化,即可得将频率参数考虑在内的低噪声设计。

根据上述过程,作者编制了计算机辅助分析和设计程序。图 2 给出了对 2N4250 晶体管前置放大器的噪声分析结果。从这些结果可见,当电路参数为: $R_{s,o} = 221k\Omega$, $X_{s,o} = 136k\Omega$, $f = 10kHz$ 时,前置放大器噪声最小,其噪声系数为 $NF_{\min} = 0.377dB$ 。

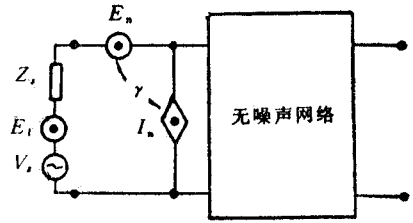
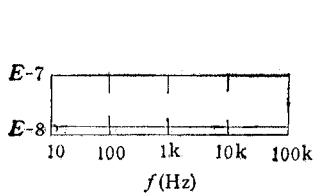
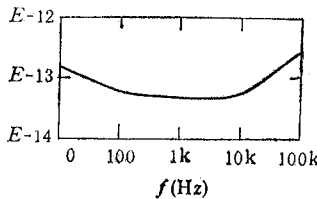


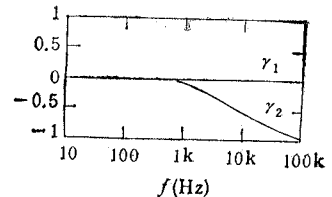
图1 电子电路噪声模型



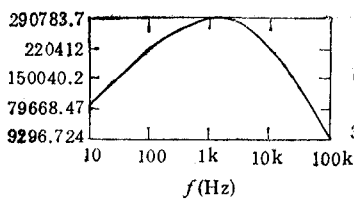
(a) 等效输入噪声 E_n (V/\sqrt{Hz})



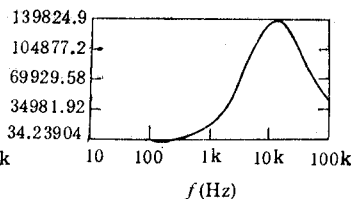
(b) 等效噪声电流 I_n (A/\sqrt{Hz})



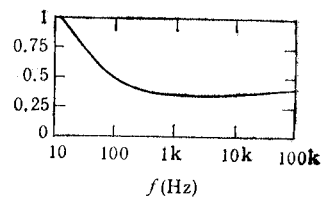
(c) E_n 和 I_n 的谱相关系数 γ



(d) 最佳噪声源电阻 R_{s0} (Ω)



(e) 最佳噪声源电抗 X_{s0} (Ω)



(f) 最小噪声系数 NF_{\min} (dB)

图2 晶体管 2N4250 前置放大器的噪声分析和设计结果

为了实际验证,表 1 和表 2 给出了图 3 所示电路的基于本文理论的计算结果与实验结果的数据对比。从这些数据分析可知,两者吻合令人满意,这证明了本文提出的方法是正确的。

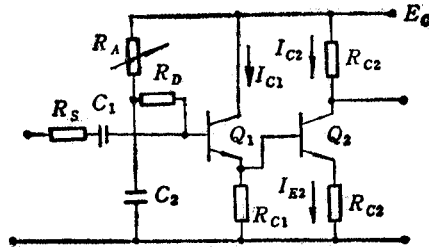


图 3 射极耦合放大电路

表 1 等效输入噪声电压 E_e 的理论计算与实测数据对照表

频率 (Hz)	1	10	100	1k	10k	100k	单位
理论值	7.0×10^{-7}	2.26×10^{-7}	7.05×10^{-8}	2.28×10^{-8}	0.866×10^{-8}	5.52×10^{-9}	V/\sqrt{Hz}
实测值	7.07×10^{-7}	1.25×10^{-7}	5.03×10^{-8}	2.37×10^{-8}	1.13×10^{-8}	1.37×10^{-8}	V/\sqrt{Hz}

表 2 等效输入噪声电流 I_n 的理论计算与实测数据对照表

频率 (Hz)	1	10	100	1k	10k	100k	单位
理论值	2.2×10^{-11}	7.03×10^{-12}	2.4×10^{-12}	1.2×10^{-12}	1.02×10^{-12}	9.98×10^{-13}	A/\sqrt{Hz}
实测值	1.35×10^{-11}	5.689×10^{-12}	1.70×10^{-12}	0.98×10^{-12}	0.82×10^{-12}	9.4×10^{-13}	A/\sqrt{Hz}

参 考 文 献

- [1] C. D. Mothenbacher, F. C. Fitchen, Low-Noise Electronic Design, John Wiley & Sons, Inc. (1973), Chapter 8.
- [2] L. W. Nagel, SPICE 2: A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits, Memorandum No. ERL M520 College of Engineering University of California, Berkeley. (1975).
- [3] R. Rother, IEEE J. of SC, SC-6(1971)4, 204—213.
- [4] 戴逸松,电子科学学刊,2(1980)4,158—168.
- [5] 温书田,罗涛,电子科学学刊,10(1988)4,297—304.
- [6] Alder Van Der Ziel, Noise Sources, Charaterization, Measurement, Prentice-Hall, Inc., (1970), Chapter 2.
- [7] 戴逸松,电子系统噪声及低噪声设计方法,吉林人民出版社,长春,1984年,第二、三、四章。

A BRANCH SET SPECTRAL METHOD FOR ELECTRONIC NOISE ANALYSIS

Luo Tao He Zhenya

(*Southeast University, Nanjing 210018*)

Xin Desheng

(*Jilin University of Technology, Changchun 130025*)

Abstract The imperfection in noise circuit theory is discussed, and then a branch set spectral analysis method for electronic noise is given. It makes the accuracy and efficiency of noise calculation remarkably improved. Based on this method, a computer program for noise performance analysis and low noise design is made out. Finally, a computing example is given.

Key words Circuit noise; Branch set spectral method; Low noise circuit design