



# 低压差线性电压调整器噪声电压测试方法

罗 军, 刘 焱, 王小强, 罗宏伟

(工业和信息化部电子第五研究所 广东 广州 510610)

**摘 要:** 低压差线性电压调整器在便携应用中除需要实现电压转换功能外,还必须满足专用电路的噪声要求。噪声电压作为低压差线性电压调整器的关键指标之一,它限制电路能够处理的最小信号电平。为适应新型低压差线性电压调整器的低噪声测量需求,该文提出采用电池供电与实时信号分析仪相结合的噪声电压测试方法,该方法通过降低低压差线性电压调整器输入噪声对输出噪声的影响,具有测量精度较高、测试灵活、平台搭建简单等特点。文中对比分析采用直流电源供电与采用电池供电的噪声电压测试方法,实验结果表明:采用电池供电的噪声电压测试方法可以满足  $10\mu\text{V}$  量级的噪声电压测试需求,达到对低压差线性电压调整器噪声电压进行准确考核的目的。

**关键词:** 低压差线性电压调整器;噪声谱密度;噪声电压;测试方法

文献标志码:A

文章编号:1674-5124(2017)11-0022-04

## Noise voltage testing method of low dropout linear regulator

LUO Jun, LIU Yan, WANG Xiaoqiang, LUO Hongwei

(CEPREI, Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** In addition to realizing the function of voltage regulating, the low dropout linear regulator (LDO) shall also meet the noise requirement for specific circuit in portable applications. As a key indicator of LDO, noise voltage limits the minimum signal level that can be processed by the circuit. To meet the requirement of low noise measurement of a new LDO, a noise voltage testing method using real time analyzing (signal analyzer) and battery powering is proposed. The presented method can reduce the effects of input noise of LDO on output noise and has the advantages of high measured accuracy, flexible testing and simple platform constructing. Two noise voltage testing methods, direct-current powering and battery powering, are compared in the paper. Results show that the presented method can measure low noise voltage whose level ups to  $10\mu\text{V}$ , so that it can reach the goal of precise evaluation of low noise voltage of LDO.

**Keywords:** low dropout linear regulator; noise spectral density; noise voltage; testing method

## 0 引 言

集成电路低噪声特性分析获得了越来越多的关

收稿日期:2017-06-12;收到修改稿日期:2017-07-09

作者简介:罗 军(1986-),男,湖南衡南县人,工程师,主要从事集成电路检测、信号处理等相关工作。

注,相关研究结果表明集成电路噪声幅值与电路可靠性有密切关系<sup>[1]</sup>,可以利用集成电路的噪声特性进行故障诊断<sup>[2]</sup>及可靠性预测<sup>[3]</sup>。集成电路的噪声水平及特性直接关系到信号检测灵敏度和电路的可靠性,影响到系统的整体性能,因而对集成电路的噪声进行

测试具有重要的价值。

低压差线性电压调整器(LDO)由于具有体积小、电源纹波抑制比高、功耗小、噪声低及电路简单等特点,在便携式、工业及汽车领域获得了广泛的应用,具有重要的实用价值<sup>[4]</sup>。随着集成电路工艺及设计水平的进步,LDO 的输出噪声电压越来越低。为了设计更低噪声电压的 LDO,国内外对此进行了大量的研究。国外方面,LDO 的噪声电压可达  $15\ \mu\text{V}$ <sup>[5]</sup>。国内在低噪声 LDO 方面也获得了长足进步,如杨寒冰等<sup>[6]</sup>实现了  $26.4\ \mu\text{V}$  的 LDO 输出噪声电压,邹静等<sup>[7]</sup>设计了  $0.1\ \mu\text{V}$  噪声电压的 LDO,阴亚东等<sup>[8]</sup>实现了一种  $37.3\ \mu\text{V}$  输出噪声电压的 LDO,温晓珂等<sup>[9]</sup>设计了  $21.4\ \mu\text{V}$  的低噪声 LDO,JIANG 等<sup>[10]</sup>研制了  $25.5\ \mu\text{V}$  噪声电压的 LDO。随着大量低噪声 LDO 的研制,微伏与纳伏级噪声电压的测量需求越来越迫切。

为了测量 LDO 的噪声电压,主要有实时信号分析法和频谱分析法两种方法,都是通过对 LDO 噪声谱密度的测量并计算得到噪声电压值。频谱分析法对测量设备要求高,测试时间较长。实时信号分析法由于成本较低、平台搭建简单等特点而获得业界的青睐。在实时信号分析法中,基于直流电源供电的测试方法难以满足低噪声 LDO 的测试需求。同时,由于相关 LDO 噪声电压测试规范没有对供电方式提出明确要求,从而可能造成对 LDO 噪声电压指标的误考核。

为了解决直流电源供电难以对低噪声 LDO 噪声电压进行准确测量的问题,提出了一种基于电池供电的 LDO 噪声电压测试方法。该方法通过降低输入噪声对 LDO 输出噪声的影响,在基于电池供电的条件下采用实时信号分析仪对 LDO 噪声谱密度进行测量,可以计算出在一定频率范围内的 LDO 输出噪声电压,具有噪声电压测量精度较高、测试灵活、平台搭建简单等特点。实验结果表明采用电池供电的噪声电压测试方法可以满足  $10\ \mu\text{V}$  量级的 LDO 噪声电压测试需求,达到对低压差线性电压调整器低噪声电压的进行准确考核的目的。

## 1 LDO 噪声模型

集成电路的输出噪声来源于器件内在的电子噪声和由于集成电路输入信号而引入的外部环境噪声,其中器件内在的电子噪声主要有热噪声、G-R 噪声、散粒噪声及  $1/f$  噪声 4 大类别。为了对集成电路系统噪声特性进行准确的分析,常采用噪声模型的分析方法。噪声功率叠加原理是集成电路噪声特性分析的基础<sup>[11]</sup>。

LDO 由带隙基准源、误差放大器、调整管、电阻

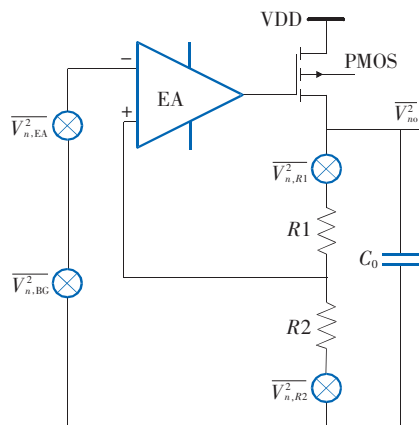


图1 LDO噪声模型电路图

分配网络组成,其噪声模型电路图如图1所示。图中 $\overline{V_{no}^2}$ 为输出电压噪声, $C_0$ 为负载电容。LDO 的噪声构成主要包括带隙基准源的输出等效噪声 $\overline{V_{n,BG}^2}$ ,误差放大器的等效输入噪声 $\overline{V_{n,EA}^2}$ ,电阻 $R1$ 的输出电压噪声 $\overline{V_{n,R1}^2}$ ,电阻 $R2$ 的输出电压噪声 $\overline{V_{n,R2}^2}$ 以及调整管 PMOS 的电流噪声 $I_{n,pmos}^2$ 。由于调整管通常具有比较大的电流及较大的尺寸,因而其热噪声和  $1/f$  噪声都比较小,在输出端的噪声贡献基本可忽略。因此依据噪声功率叠加原理,在 LDO 所关注的频率范围内( $f_1$ - $f_2$ )的输出电压积分噪声如式(1)所示<sup>[9-12]</sup>。从式(1)中可以看出,LDO 的输出噪声主要受电阻  $R1$  与  $R2$  的比值、带隙基准源的输出等效噪声以及误差放大器的输入等效噪声影响。

$$\int_{f_1}^{f_2} \overline{V_{no}^2} df = \int_{f_1}^{f_2} ((\overline{V_{n,EA}^2} + \overline{V_{n,BG}^2}) (1 + \frac{R1}{R2}) + \overline{V_{n,R2}^2} \cdot (\frac{R1}{R2})^2 \overline{V_{n,R1}^2}) df \quad (1)$$

LDO 中主要的噪声源是带隙基准源,因此常在带隙基准源的输出端加一个较大的旁路电容以滤掉大部分噪声,但较大的旁路电容将减慢带隙基准源的启动时间。LDO 中的另一个噪声源是分压电阻网络。由于分压电阻网络连接到误差放大器的输入端,因此其产生的噪声将被控制环路放大。因此分压电阻网络的电阻应尽量小以减少此类噪声。误差放大器也是 LDO 的一个噪声源。由于误差放大器的增益较大,其后面的器件,如通路器件的噪声都将被抑制。误差放大器的噪声不能通过增加外部器件来减小。负载电流与输出电容对 LDO 系统的噪声影响不大。当负载电流较大而输出电容较小时,系统的相位裕度较小,因而系统的闭环幅频特性将在单位增益出现一个尖峰,从而增加系统的输出等效噪声。

## 2 LDO 噪声电压测试方法

噪声在 LDO 器件中通常有两种表示方式,分别为噪声功率谱密度和噪声电压的均方根值,其中噪声电压的均方根值是把噪声功率谱密度在一定频率范围内进行积分。计算 LDO 的噪声时,先将 LDO 各模块的噪声折算到误差放大器的输入端,然后将计算结果乘以反馈回路的反馈系数就得到了 LDO 的输出等效噪声。由于噪声来源于物理量的随机起伏,在任一瞬间不能预知随机变量的精确大小,但是大多数随机变量遵循一定的统计分布规律,所以常用统计方法描述噪声。通常有 3 种表述方法:

1) 噪声电压值或电流值,其为随机噪声在带宽内的均方根值,这是统计求出的噪声电压或电流的均方根(root mean squared,RMS)。

2) 噪声功率谱密度(定义为单位频率带宽内的噪声)。

3) 噪声密度(即噪声谱密度)。

噪声的 3 种表述方法是可以换算的,不妨设噪声谱密度为  $P_f$ ,噪声功率谱密度为  $P_D$ ,噪声电压为  $V_s$ ,则它们之间的换算关系如式(2)~式(4)所示。

$$P_D = P_f^2 \quad (2)$$

$$V_s = P_f^2 \cdot \Delta f \quad (3)$$

$$\Delta f = \frac{f_H - f_L}{N} \quad (4)$$

式中: $N$ ——采样点间隔个数;

$f_H$ ——采样频率上限;

$f_L$ ——采样频率下限。

GB/T 4377—1996 给出了调整器噪声电压的测试原理,如图 2 所示。通过施加相应的激励信号让 LDO 正常工作,然后在输出端测出噪声输出电压。由于噪声一般是很微弱的随机信号,外围电路如负载网络等引入的干扰可能会影响测试的准确性,因而需要对 LDO 电源的供电方式以及输出噪声电压的测试进行分析研究。文中对电源供电与电池供电方式进行了比较,采用实时信号分析的方法对 LDO 输出噪声谱密度进行测量,最后通过式(2)~式(4)计算

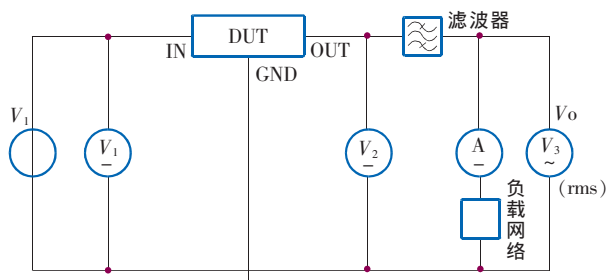


图2 LDO噪声电压测试原理

得到 LDO 的输出噪声电压。

测试系统由 Tektronix RSA5103A(1 Hz~3 GHz) 实时信号分析仪、J2130A 隔直器、BNC 转 SMA 接口线、LDO 测试板、12 V 直流供电电池、IT6721 直流电源组成。基于直流电源供电与基于电池供电的 LDO 噪声谱密度测试平台框架组成如图 3 所示。

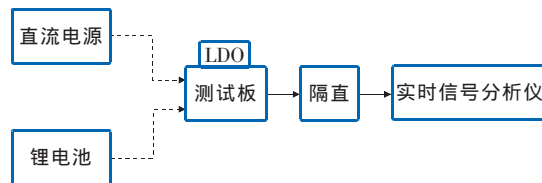


图3 基于不同供电方式的LDO噪声谱密度测试平台框架

搭建好测试平台后,测试流程如图 4 所示。测试过程中供电电压为 12 V,扫描起始频率值为 100 Hz,终点频率值为 100 kHz,采样点为 10401 个。测得 LDO 的噪声谱密度以后,依据式(2)~式(4)计算不同测试条件下的 LDO 输出噪声电压值。为了分析不同电源供电方式对 LDO 噪声电压的影响,分别对基于直流电源供电与基于电池供电的 LDO 噪声谱密度进行了测试与对比。这两种测试方法在测试步骤复杂度、测试效率及自动化程度方面具有相当的效果,其不同点在于供电的方式。供电方式与 LDO 的具体应用有关,因而需予以明确。

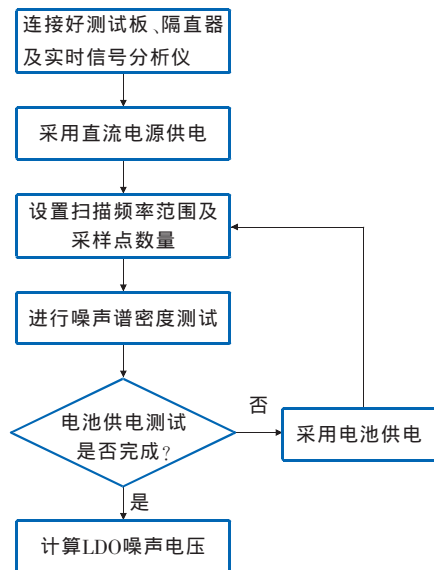


图4 LDO噪声电压测试流程

## 3 测试结果及分析

基于直流电源供电与基于电池供电的 LDO 输出噪声谱密度测试结果如图 5 所示,从图中可以发现采用电池供电的噪声谱密度相比直流电源供电方式要低 2 个数量级,这说明外部供电电源噪声对该款

LDO 的输出噪声电压产生了较大的影响。采用不同的供电方法对 LDO 的噪声谱密度进行测试,并依据式(2)~式(4)计算得到 LDO 的输出噪声电压如表 1 所示。从表 1 中可以看出采用电池供电的噪声电压测试方法可以显著提高 LDO 噪声电压的测量精度,可达  $10\mu\text{V}$  量级。

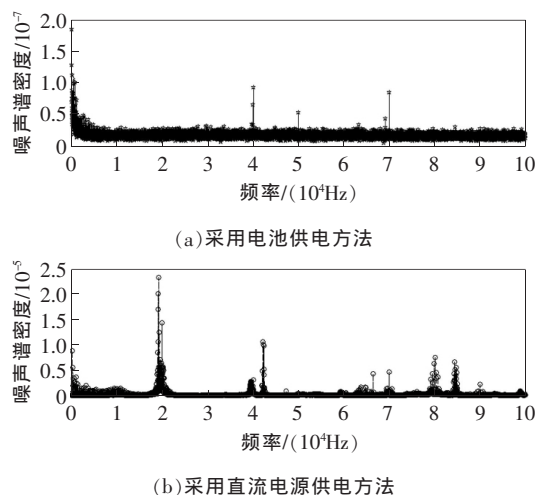


图5 采用不同供电方式的LDO输出噪声谱密度测量结果

表 1 LDO 噪声电压计算结果

样品 编号	测试方法	测试负载条件	频率范围	噪声电压值/ $\mu\text{V}$
1 <sup>#</sup>	采用直流电源 供电方法			131.67
	采用电池供电 方法	输出电流:1 mA 负载电容:10 $\mu\text{F}$	100 Hz~ 100 kHz	5.97
2 <sup>#</sup>	采用直流电源 供电方法			213.63
	采用电池供 电方法			6.11

实验结果表明直流电源供电对 LDO 的输出噪声电压影响较大,相比电池供电达到了约 10 倍的差距。不同电源供电方式造成 LDO 输出噪声电压差异的原因主要是由 LDO 自身的设计局限决定的。由于电池的纹波噪声较小,因而可以为更高精度的 LDO 噪声电压测试提供条件,避免电源噪声对 LDO 输出噪声的干扰。另一方面,为了提升采用直流电源供电方法的 LDO 噪声电压测量精度,可以从两个方面进行优化改进。1)改进 LDO 内部电路的设计,增加抑制电源噪声干扰的滤波电路;2)可以在 LDO 的外部增加滤波电路,但该方法具有不确定性,并不能完全抑制电源噪声的干扰。然而,不论对采用直流电源供电的方法进行何种改进设计,采用电池供电的方法由于从源头对电源噪声进行了抑制,因而适应于高精度的噪声电压测试。

由于不同的供电方法会对 LDO 的输出噪声电

压测试结果造成较大的影响,因而需要在 LDO 的设计阶段以及考核阶段对电源噪声的干扰及影响加以考虑。文中提出的基于电池供电的 LDO 噪声电压测试方法可以方便地应用于低噪声 LDO 的测试,避免由于 LDO 的相关规范及标准中没有明确噪声电压参数的测试条件及方法,从而对 LDO 造成误考核,进而对用户的使用造成不利影响。

#### 4 结束语

为了适应新型低噪声 LDO 输出噪声电压的测量需求,避免电源噪声对 LDO 输出噪声电压的干扰,提出了采用电池供电与实时信号分析仪相结合的 LDO 噪声电压测试方法。通过对比分析不同供电方法对 LDO 噪声电压测量的影响,表明采用电池供电方法可满足  $10\mu\text{V}$  量级的噪声电压测试需求。基于电池供电的 LDO 噪声电压测试方法可方便地应用于 LDO 的检测考核,避免由于 LDO 相关规范标准中未明确测试条件及方法而造成误考核。

#### 参考文献

- [1] 刘远,吴为敬,李斌,等. 非晶钼锌氧化物薄膜晶体管的低频噪声特性与分析[J]. 物理学报,2014,63(9):098503.
- [2] ZHI H Q, XIAO M Z, YI S D. A methodological approach to fault location of IC modules[C]//Proc 15th World Conference on Non-Destructive Testing. Rome: Via A Foresti,2000.
- [3] JONES B A, XU Y Z. Excess noise as an indicator of digital integrated circuit reliability [J]. Microelectronics Reliability,1991,31(2/3):351-361.
- [4] 尚斌,罗军,蔡志刚,等. 低压差线性电压调整器电源纹波抑制比测试方法[J]. 中国测试,2017,43(5):15-19.
- [5] RAVEESH M R. Design techniques for ultra-low noise and low power low dropout regulators[D]. Phoenix:Arizona state university,2014.
- [6] 杨寒冰,李学建. 一种低噪声 LDO 的设计[J]. 机电工程技术,2016(Z2):295-298.
- [7] 邹静,杨维明,蒋师,等. 一种低噪声高 PSRR 的 LDO 线性稳压器[J]. 湖北大学学报(自然科学版),2012,34(3):360-364.
- [8] 阴亚东,阎跃鹏. 一种低噪声高电源抑制比 CMOS 低压差线性稳压器[J]. 固体电子学与进展,2013,33(6):571-576.
- [9] 温晓珂,谈熙,闵昊. 用于射频 SOC 芯片的低噪声高电源抑制比 LDO[J]. 固体电子学与进展,2011,31(3):274-279.
- [10] JIANG P W, JIN Q J, XI F Z. Less occupied and ultra-low noise LDO design[J]. Analog Integration Circuit Signal Processing,2014(81):453-459.
- [11] 钱志鸿. 集成电路噪声模型算法及其矩阵表达[J]. 东北师大学报(自然科学版),2003,35(2):41-46.
- [12] 朱勤为,唐宁,吴鹏,等. LDO 低输出噪声的分析与优化设计[J]. 电子器件,2009,32(5):875-879.

(编辑:刘杨)