



低压差线性电压调整器电源纹波抑制比测试方法

尚 斌, 罗 军, 蔡志刚, 王小强

(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应用广泛, 电源纹波抑制比是反映其性能指标的关键参数之一。为解决传统电源纹波抑制比测试方法测量频率范围较小、测试效率低、难以满足高电源纹波抑制比测试等不足, 提出基于功率分配器和低频网络分析仪相结合的电源纹波抑制比测试方法, 并采用典型低压差线性电压调整器对基于功率分配器和基于电感电容总和节点法的两种测试方法进行测试验证。实验结果表明: 基于功率分配器的电源纹波抑制比测试方法最低测试频率可达 30 Hz, 可满足 70 dB 以上电源纹波抑制比的测试需求, 具有频率测量范围更宽、测试效率高等特点。

关键词: 低压差线性电压调整器; 电源纹波抑制比; 测试方法; 频率范围

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2017)05-0015-05

Power supply rejection ratio testing of low dropout linear regulator

SHANG Bin, LUO Jun, CAI Zhigang, WANG Xiaoqiang

(CEPREI, Guangzhou 510610, China)

Abstract: Low dropout linear regulator (LDO) has wide applications. As a key parameter of LDO, power supply rejection ratio (PSRR) determines the main performance. To overcome the drawback of low frequency band, low efficiency and non-ability to fulfill the high PSRR testing of traditional method, the testing method of PSRR based on power splitter and low frequency network analyzer is proposed. Typical LDO products are used to evaluate the proposed method based on power splitter and the traditional method based on the combination of inductance and capacitance. Experiment results show that the lowest test frequency of the PSRR testing method based on power splitter can reach 30Hz and it can meet the testing requirement of PSRR up to 70dB. Besides, it has a wide range of frequency and high efficiency.

Keywords: low dropout linear regulator; power supply rejection ratio; testing method; frequency range

0 引 言

随着信息科学的快速发展, 电源技术变得越来越重要。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(PSRR)高、功耗小、噪声低以及

收稿日期: 2016-09-11; 收到修改稿日期: 2016-12-30

作者简介: 尚 斌(1982-), 男, 山西运城人, 工程师, 主要从事电磁学计算、科技管理等相关工作。

电路简单等优点应用广泛。近年来 LDO 的相关技术正成为当前电源技术领域的研究热点, 具有重要的理论意义和实用价值^[1]。随着微电子工艺技术的进步, LDO 的发展经历了从传统的采用双极性工艺技术到采用先进的 CMOS 工艺技术。与此同时, LDO 的设计也获得了快速的发展, 近几年来关于不断改进的 LDO 设计层出不穷^[2-5], 研制了一系列高性能的

LDO,使 LDO 具备了长寿命、高负载电流、高 PSRR 及低噪声等特性。

PSRR 是 LDO 的一个关键特性,它表征 LDO 对电源纹波的抑制能力,为获得更高的 PSRR,国内外学者对此进行广泛的研究。国外对 LDO 的研究较早,研制了一些高 PSRR 的 LDO 芯片,如 Harrison 等^[6]实现 57 dB@1 kHz 的 PSRR, Sawan 等^[7]实现 60 dB@1 kHz 的 PSRR, Vahid 等^[8]实现了 70 dB@1 kHz 的 PSRR。国内虽然在 LDO 的工艺技术水平与国外有较大差距,但近年来国内的一些学者或厂商仍取得了较大的进步,如邹静^[9]实现了 54 dB@1 kHz 的 PSRR, JIAN 等^[10]实现了 65 dB@1 kHz 的 PSRR,某型国产 LDO 芯片的 PSRR 可以达到 70 dB@1 kHz 以上等。

LDO 中 PSRR 性能的提升对测试方法提出了更高的要求,如何提升测试效率、保障测试范围成为一个重要的问题。测试 PSRR 的传统方法有基于电感电容(LC)总和节点法、基于放大器的方法及采用示波器的方法^[11]。为了满足高 PSRR 的 LDO 的测试需求,实现对测试效率及测试频率范围的提升,文中提出了基于功率分配器和低频网络分析仪相结合的 PSRR 测试方法,并从测试原理、步骤、效率、复杂度、成本及频率范围等方面与基于 LC 总和节点法的传统 PSRR 测试方法进行对比分析,实验结果表明基于功率分配器的 PSRR 测试方法具有更大的频率测试范围,最低测试频率可达 30 Hz,相比传统 PSRR 测试方法,频率测试范围扩大了一个数量级。此外,基于功率分配器的 PSRR 测试方法具有测试效率高、平台搭建简单、测试范围宽等优点,其测试结果与理论 PSRR 曲线具有较好的吻合性。

1 LDO 工作原理

LDO 是输出输入压差很小的线性电压调整器,它能在输入电压和负载变化的情况下,保证系统有稳定的输出电压。随着技术的进步,线性电压调整器的结构与技术越来越成熟,其基本结构包括启动电路、参考基准源、误差放大器、功率管和反馈取样电路,如图 1 所示。LDO 的工作原理是参考基准电压和反馈电压分别接在误差放大器的反相端和同相端,误差放大器通过放大这两个电压差来调整场效应功率管电流的大小,从而实现这个负反馈系统输出电压的稳定。工作过程是当输出电压上升时,反馈电压上升,误差放大器同相端电压上升,参考基准不变,导致放大器输出电压变大,调节功率管栅极电压,使得流过功率管的电流减小,于是促使输出电压减小,通过负反馈达到保持输出稳定的目的。同理,当系统

输出电压减小时,通过负反馈同样能实现稳压的目的。

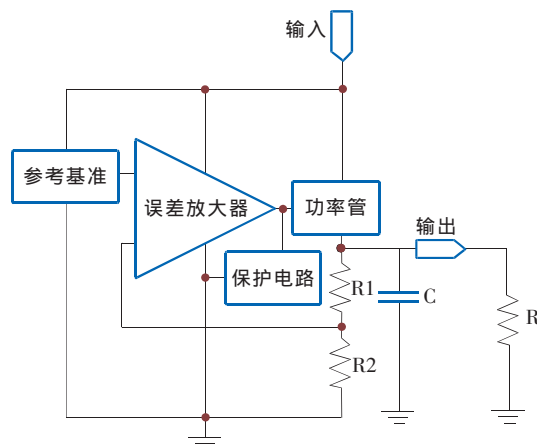


图1 低压差线性电压调整器基本结构

2 PSRR 测试方法

LDO 的电源纹波抑制比是指输出纹波与输入纹波在一个频率范围内的比值,通常为 10 Hz~10 MHz,单位是分贝(dB)。计算 PSRR 的公式为

$$PSRR = 20 \lg \frac{V_{O, ripple}}{V_{I, ripple}} \quad (1)$$

式中: $V_{I, ripple}$ ——输入纹波电压;

$V_{O, ripple}$ ——输出纹波电压。

2.1 基于 LC 总和节点法的 PSRR 测试方法

基于 LC 总和节点法的 PSRR 测试原理如图 2 所示,图中 VDC 为直流供电电源,由 VAC 产生一定频率范围交流电压信号并叠加到直流电压信号作为 LDO 的输入,测量 LDO 的输出与输入纹波电压并依据式(1)计算 PSRR。在采用 LC 总和节点法的 PSRR 测试方法中,电容 C 与电感 L 的值决定了该测试方法的最低频率范围。由于 L 和 C 形成一个针对 VAC 的高通滤波器,限制了该方法测量的 PSRR 的最低频率,该滤波器 3 dB 点由下式决定,低于 3 dB 点的频率将被减弱,使得测量变得困难。

$$f_{min} = 1 / (2\pi \sqrt{LC}) \quad (2)$$

基于 LC 总和节点法的 PSRR 测试平台包含测

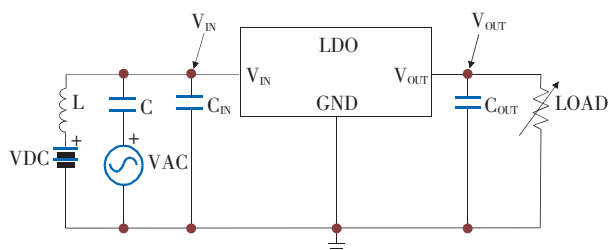


图2 基于LC总和节点法的PSRR测试原理

量设备、直流供电电源、LDO 测试板及连接线缆等组成模块。低频网络分析仪工作在增益-相位模式,测试步骤如下:

- 1)把 LDO 芯片放入测试夹具,采用 BNC 转 SMA 接口线、SMA 接口线连接 E5061B、LDO 测试板。
- 2)LDO 测试板的 12 V 直流电压(VDC)由外部直流电源供电,交流输入信号(VAC)由 E5061B 的 LF OUT 端口输出,VIN 接 E5061B 的 R 端口,VOUT 接 E5061B 的 T 端口。
- 3)设置 E5061B 为 10 Hz~10 MHz 的频率扫描范围,并设置输出功率-10 dBm。
- 4)设置中频带宽为 20 Hz,设置 R 端口和 T 端口的输入阻抗为 1 MΩ。
- 5)打开 LDO 测试板上电源开关,启动测试,记录测试时间,待自动测试完成后,存储测试数据与波形。

2.2 基于功率分配器的 PSRR 测试方法

基于功率分配器的 PSRR 测试原理如图 3 所示。采用低频网络分析仪(E5061B)作为测量设备,其测量频率范围为 5 Hz~3 GHz、具有增益-相位和 S 参数两种测量模式,并且可自带直流电压输出。图中通过功率分配器把 E5061B 的 LF OUT 端口输出信号(可配置为直流偏置)分配接到 LDO 的输入端及 R 端口,测试过程中使用增益-相位模式,同时把 LDO 的输出信号接入 E5061B 的 T 端口。功率分配器需满足低频(10 Hz~10 MHz)的频率范围要求。采用功率分配器的 PSRR 测试方法平台搭建较简单,无需外部直流供电电源,由 E5061B 提供直流电压即可。

在基于功率分配器的 PSRR 测试平台中,E5061B 通过 SMA 接口线缆与 LDO 测试板相连接,同时 LDO 芯片采用夹具与测试板连接,在测试 PSRR 的过程中 LDO 测试板无需外接电源,由 E5061B 通过设置 LF OUT 端口加载直流偏置电压(VDC)供电。测试步骤如下:

- 1)把 LDO 芯片放入测试夹具,采用 BNC 转 SMA 接口线、SMA 接口线连接 E5061B、LDO 测试板及功

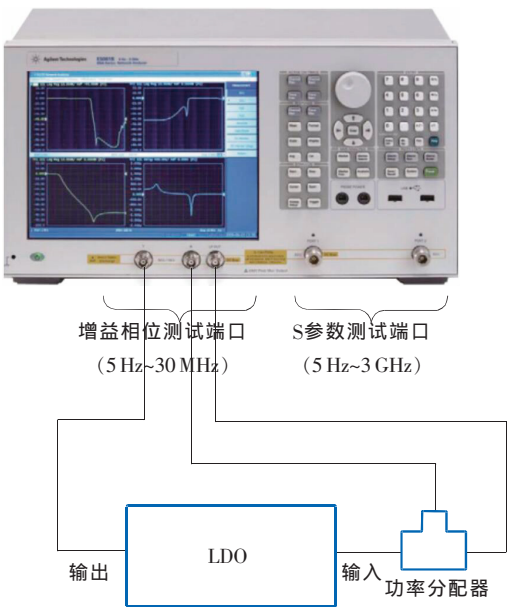


图3 基于功率分配器的PSRR测试原理

率分配器,LDO 测试板上外部供电端口置空,设置 E5061B 提供 10 V 的 VDC 直流电压。

- 2)设置 E5061B 为 10 Hz~10 MHz 的频率扫描范围,并设置输出功率-10 dBm。
- 3)设置中频带宽为 20 Hz,设置 R 端口和 T 端口的输入阻抗为 1 MΩ。
- 4)打开 E5061B 中的“DC Bias”开关,启动测试,记录测试时间,待自动测试完成后,存储测试数据与波形。

2.3 不同 PSRR 测试方法对比

基于 LC 总和节点法的 PSRR 测试方法(方法 1)与基于功率分配器的 PSRR 测试方法(方法 2)的对比如表 1 所示,表中从测试设备组成、搭建平台复杂度、自动化测试程度、测试平台成本等方面进行了定性比较。从表中可以看出两种不同的测试方法(方法 1 和方法 2)对测试硬件的需求几乎相当,测试自动化程度都较高,方法 2 的测试平台成本相比方法 1 要略低。

表 1 不同 PSRR 测试方法对比

测试方法	测试设备组成	搭建测试平台复杂度	测试自动化程度	测试平台成本
方法 1	E5061B、直流电源、测试板及连接线	一般	较高	较高
方法 2	E5061B、功率分配器、测试板及连接线	一般	较高	一般

不同 PSRR 测试方法在不同中频带宽(IFBW)测试条件下从 10 Hz~10 MHz 频率范围内的 PSRR 测试时间如表 2 所示。测试条件为中频带宽(IFBW),从表中可以看出方法 1 与方法 2 在不同中频带宽下

表 2 不同 PSRR 测试方法的测试效率对比

测试方法	10 Hz	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	70 Hz	100 Hz
方法 1	19.57 s	10.15 s	6.84 s	5.25 s	4.33 s	3.16 s	2.33 s
方法 2	19.5 s	9.8 s	6.8 s	5.25 s	4.35 s	3.08 s	2.29 s

的测试效率几乎一致,这是由于这两种测试方法都是采用相同的测量仪器,测试效率是由测量仪器决定的。

3 测试结果及分析

LDO 的 PSRR 测量值随频率变化的典型理论曲线如图 4 所示^[12],从图中可以看出 LDO 的电源纹波抑制比基本上可分为 3 个频率范围:第 1 个部分(A1)是从直流到基准滤波器的滑落频率,主要影响因素是开环增益和基准源的电源纹波抑制比;第 2 个部分(A2)是从基准滤波器的滑落频率向上延伸至单位增益频率,此区的电源纹波抑制比主要由 LDO 的开环增益决定;第 3 部分(A3)是单位增益频率之上的部分,除了输入到输出的寄生参数外,在此区域反馈环路对这个部分的影响很小。

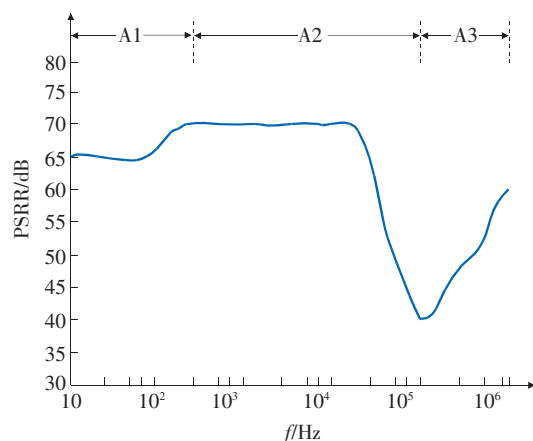


图4 PSRR随频率变化的理论曲线

采用方法 1 及方法 2 的 PSRR 测试结果如图 5 所示,图中展示了 LDO 对 10 Hz~10 MHz 频率范围输入纹波的抑制能力,其中该型 LDO 在 1 kHz 时的电源纹波抑制比可达 80.89 dB。从图中可以看出,方法 1 在 10 kHz 以下的频率范围内具有较大的 PSRR 波动,方法 2 在 30 Hz 以下的频率范围内具有较大的波动。同时,方法 2 的 PSRR 测试结果整体较稳定,并且在大于 10 kHz 的频率范围 PSRR 下降较为平缓。方法 1 在低频范围(<9 kHz)测试的 PSRR 值不稳定的原因是由其 L 和 C 构建的高通滤波器的 3 dB 频率点所限制。理论上,由式(2)可计算出方法 1 可测量的最低 PSRR 频率范围,由 $L=2.2\mu\text{H}$, $C=330\mu\text{F}$, 依据式(2)计算得到 $f_{\min}=5.9\text{kHz}$ 。因此,理论上低于 3 dB 点的频率(<5.9 kHz)将被减弱,使得测量变得困难。从图中可以发现,实测的频率转折点约为 5~9 kHz,与理论的 3 dB 频率点(5.9 kHz)是相吻合的。

基于 LC 总和节点法的 PSRR 测试方法对低频

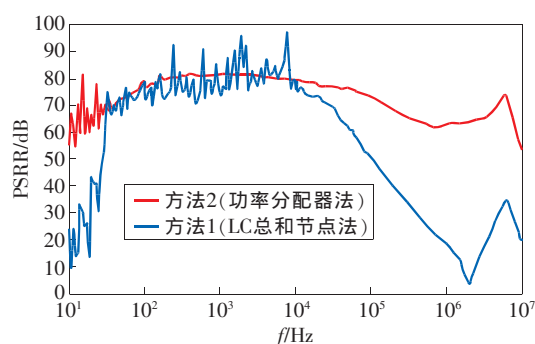


图5 不同测试方法下PSRR随频率变化的测试曲线

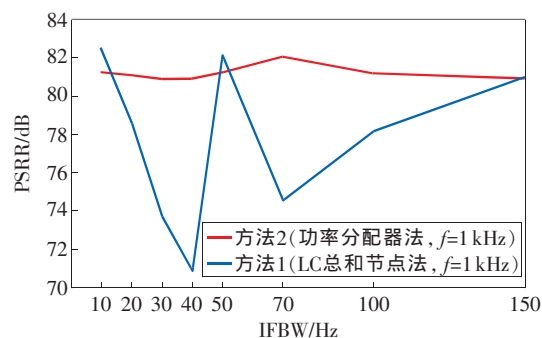


图6 不同中频带宽测试条件下的1 kHz频率点的PSRR测量值

范围 PSRR 测量的不确定度加大,不能真实反映 LDO 对低频范围电源纹波的抑制能力。不同中频带宽测试条件下 1 kHz 频率点的 PSRR 测量值如图 6 所示,从图中可以看出方法 1 在不同 IFBW 测试条件下,1 kHz 频率点的 PSRR 波动较大,其方差达 4.22,而方法 2 在相同条件下的方差仅为 0.37,因此其不同测试条件下的 PSRR 测量结果更具一致性。图 6 的测量结果说明,若采用方法 1 对 1 kHz 频率点的 PSRR 值进行测量,则不能真实反映该 LDO 的电源纹波抑制能力,需采用方法 2 才可测量出准确的 PSRR 值。

通过对比方法 1 与方法 2 可以发现,方法 1 在测量低频范围内的 PSRR 值时有局限,不能真实反映 LDO 的电源纹波抑制能力,其最低频率范围由其 LC 构成的 3 dB 点频率值决定。同时,在高频范围方法 2 也具有更好的测量表现,基于方法 2 的 PSRR 测量结果曲线(图 5 中方法 2)与图 4 中的理论曲线具有更好的吻合度。此外,从图 5 中可以发现方法 2 仅在极低频(<30 Hz)范围内具有较差的稳定性表现。

4 结束语

LDO 广泛应用于各种电子设备的电源领域,PSRR 是 LDO 的关键参数之一,其反映了 LDO 对电

源纹波的抑制能力。不同于传统基于 LC 总和节点法的 PSRR 测试方法,文中提出了基于功率分配器和低频网络分析仪的 PSRR 测试方法,并选用了典型的 LDO 产品进行了测试验证。实验结果表明文中提出的方法可以实现对低频范围内 PSRR 值的有效测量,测试最低频率可达 30 Hz,实现了对 LDO 的 80 dB@1 kHz 以上的 PSRR 测试,并且具有较好的 PSRR 频率测试稳定性。此外,实验结果还表明基于 LC 总和节点法的 PSRR 测量最低频率范围由其 LC 构成的 3 dB 点频率值决定。

参考文献

- [1] 马洪涛,沙占友,王彦鹏. LDO 和 VLDO 的设计原理及性能测试[J]. 电源技术应用,2009,9(10):26-29.
- [2] 彭晓宏,朱治鼎,侯立刚,等. 大电流低功耗小体积单片 LDO 的设计与实现[J]. 现代电子技术,2013,36(13):150-153.
- [3] 田楠,张国俊. 一种带过温过流过压保护的 LDO 设计[J]. 微电子学与计算机,2013,30(4):139-142.
- [4] 万辉,刘聚川. 一种新颖的 LDO 线性稳压器[J]. 微电子学,2013,43(3):359-363.
- [5] 程红丽,王冠军. 一种带阻抗补偿的低功耗低压差线性稳压器[J]. 半导体技术,2014,39(1):28-32.
- [6] HARRISON R R, WATKINS P T, KIER R J, et al. A low-power integrated circuits for a wireless 100-electrode neural recording system[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits,2007,42(1):123-133.
- [7] SAWAN M, HU Y, COULOMBE J. Wireless smart implants dedicated to multichannel monitoring and microstimulation[J]. IEEE Circuits and Systems Magazine,2005,5(1):21-39.
- [8] VAHID M K M S, ALEXANDRE S C D, YUSUF L. A fully on-chip LDO voltage regulator with 37dB PSRR at 1 MHz for remotely powered biomedical implants[J]. Analog Integration Circuit Signal Processing,2011(67):157-168.
- [9] 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.
- [10] JIAN P G, KA N L. A 25mA CMOS LDO with -85dB PSRR at 2.5MHz[C]//IEEE Asian Solid-State Circuits Conference,2013:381-384.
- [11] SANJAY P, SCOT L. LDO PSRR 测量简化说明[Z]. TEXAS INSTRUMENTS,2009:1-4.
- [12] 张娜娜. 高电源抑制比低压差线性稳压器的设计与研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2007.

(编辑:刘杨)

(上接第 14 页)

点为目标函数,通过简单数据融合方法将通过约束关系得到的运动参数与通过运动轨迹解算的运动参数进行有效融合,完成了移动式像机平台的实时外参数标定与修正。实验结果表明,该方法可以实现大型结构形变的动态全局测量,且使全局测量自动化程度明显提高。但同时方法也存在以下不足:1)由于像机分辨率较高,受到帧率的影响,像机在移动过程中进行图像采集时会产生一定的模糊,影响标识点匹配的精度,进而影响测量结果精度。2)本文采用固定位置标记标识点、固定时间进行图像采集的方法,对标记点位置及相机采集图像时间间隔要求较高,后续工作可以考虑采用图像识别方法进行测量区域自动识别。

参考文献

- [1] 于起峰,尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京:科学出版社,2009:53-55.
- [2] 于起峰,尚洋,伏思华,等. 大型结构变形及形貌摄像测量技术研究进展[J]. 实验力学,2011,26(5):479-490.
- [3] 苑云,张小虎,朱肇昆,等. 大型风力发电叶片变形的摄像测量方法研究[J]. 计算机应用,2012,32(增刊 1):114-117.
- [4] 苑云. 大型结构形变的组网摄像测量方法研究[D]. 长沙:国防科技大学,2013.
- [5] 张小虎,邱慧,周剑,等. 一种单像机对运动目标定位的新方法[J]. 国防科技大学学报,2006,28(5):114-118.
- [6] 孙军华,张广军,魏振忠,等. 基于平面靶标的视觉测量数据拼接方法[J]. 机械工程学报,2006,42(7):192-195.
- [7] 戴相龙. 三维非接触式测量中编码标志的研究与应用[D]. 西安:电子科技大学,2014.
- [8] 杨根齐,汤宝平,蒋恒恒. 基于圆环点的亚像素摄像机自标定方法[J]. 中国测试,2009,35(3):107-109.
- [9] 张浩鹏,王宗义,吴攀超,等. 摄像机标定的棋盘格模板的改进和自动识别[J]. 仪器仪表学报,2014,33(5):1102-1109.
- [10] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence,2000,22(11):1330-1334.
- [11] 张刘,支帅. 双目测量系统目标相对位置误差分析[J]. 红外与激光工程,2014,43(增刊 1):116-122.
- [12] 张军. 视觉测量[M]. 北京:科学出版社,2008:146-152.
- [13] HARTLEY R. In defense of the eight-point algorithm[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1997,19(6):580-593.

(编辑:李妮)