

# 放大器环路仿真断点分析与开环输出阻抗建模

Sulyn Zhang

Sales and Marketing/East China

## ABSTRACT

放大器的稳定性问题在某些实际应用中重要而又棘手。环路仿真为分析系统稳定性提供了便利，但是进行环路仿真时需要在哪个点断开环路尤为重要，否则可能会导致分析结果不正确。另外对于放大器稳定性分析而言，放大器的开环输出阻抗至关重要而又常常被忽视，更为困难的是有些放大器开环输出阻抗模型不准确，最终也会导致仿真结果无法去协助工程分析。本应用报告结合 LMV844 的一个分析实例，对典型的简化应用电路进行理论分析，引导应该如何去选择合适的断点进行环路仿真，然后对 LMV844 的 Spice 模型的输出阻抗进行优化，最后以实际的分析和实验结果来做验证。

## Contents

1	放大器环路仿真断点选择问题 .....	3
2	放大器的实际开环输出阻抗对稳定性分析至关重要 .....	7
	2.1 LMV844 开环输出阻抗 ( $Z_o$ ) 模型修正 .....	7
	2.2 从闭环输出阻抗反推出开环输出阻抗 $Z_o$ ，基于此数据建模 .....	8
	2.3 验证修正后的输出阻抗模型 .....	11
3	参考文献 .....	13

## Figures

Figure 1.	做 Buffer 用的放大器电路环路断点示意 .....	3
Figure 2.	在 Point #1 处断开环路等效电路 .....	3
Figure 3.	在 Point #2 处断开环路等效电路 .....	4
Figure 4.	在 Point #3 处断开环路等效电路 .....	5
Figure 5.	实际参考电路示意 .....	6
Figure 6.	在不同断点处断开环路分析结果 ( $C4=0pF$ ) .....	6
Figure 7.	在不同断点处断开环路分析结果 ( $C4=5pF$ ) .....	6
Figure 8.	LMV844 的开环增益和相位裕度 TINA 仿真 (基于 TINA 默认模型) .....	7
Figure 9.	基于 TINA 默认模型的开环增益和 PM .....	7
Figure 10.	基于规格书的开环增益和 PM .....	7
Figure 11.	基于 LMV844 的闭环输出阻抗 ( $G=1$ ) TINA 仿真 .....	8
Figure 12.	不准确的 $Z_{out}$ 模型 (基于默认模型) .....	8
Figure 13.	准确的闭环输出阻抗 (基于规格书) .....	8
Figure 14.	反推开环输出阻抗 .....	8
Figure 15.	开环输出阻抗 $Z_o$ 建模原理示意图 .....	9
Figure 16.	$Z_o$ 和 $A_{ol\_Z_o}$ 随频率变化的示意图 .....	10

Figure 17.	Zo 基于无源拓扑级联的建模结果.....	11
Figure 18.	基于修正后的 Zout 模型结果.....	11
Figure 19.	准确的输出阻抗（基于规格书） .....	11
Figure 20.	实际应用电路基于不准确的输出阻抗模型仿真.....	11
Figure 21.	实际应用电路基于修正后的输出阻抗模型仿真.....	12
Figure 22.	实际应用电路实测输出端出现震荡波形.....	12
Figure 23.	实际应用电路基于不准确输出阻抗模型的环路仿真结果（R4=100 欧姆； C2=1nF） .	12
Figure 24.	实际应用电路基于修正后输出阻抗模型的环路仿真结果（R4=100 欧姆； C2=1nF） .	13

## 1 放大器环路仿真断点选择问题

不同复杂程度的系统做环路仿真，环路断点的选择会有区别，但是各种实际情况中，选择断点的一个重要原则就是断开环路的点不要导致丢失重要的零极点。为简化分析并助于理解，Figure 1 以一个简单的放大器接成 buffer 形式作为例子（假设该芯片已经处在正常偏置状态），可以看出有 3 个可能断开环路的点：Point #1，#2 和 #3，那么断开哪个点做环路仿真才是正确的？下面将会分别对各个断点做理论分析：

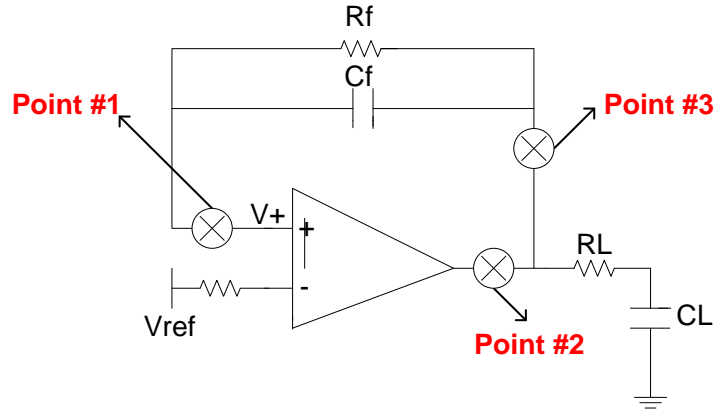


Figure 1. 做 Buffer 用的放大器电路环路断点示意

取 Point #1 为环路断点，考虑到实际放大器输入端的寄生电容  $C_{in}$ ， $R_{in}$  那么实际仿真和等效电路如 Figure 2 所示：

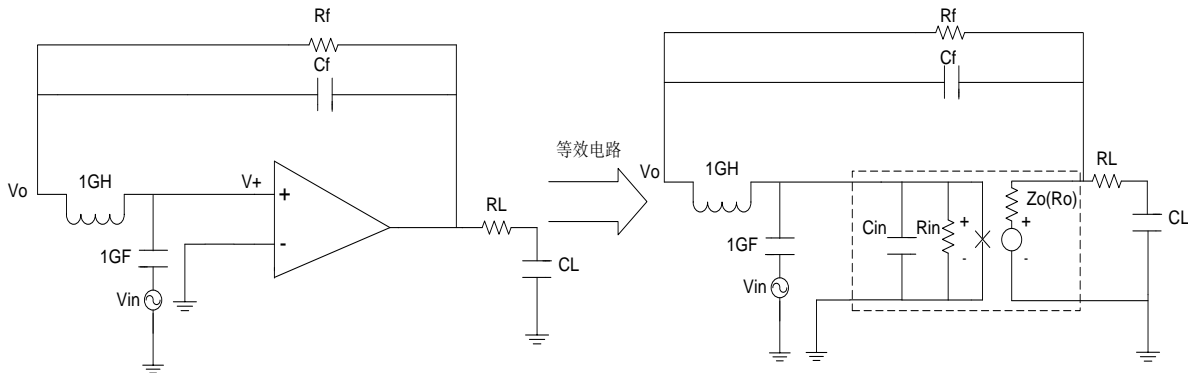


Figure 2. 在 Point #1 处断开环路等效电路

那么可以得到(这里  $V_+ = V_{in}$ ):

$$\frac{AV_{in} - V_o}{Z_o} = \frac{V_o}{Z_L}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \left(\frac{A}{Z_o}\right) \left(\frac{1}{\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_L}}\right) = \frac{A(1 + sR_L C_L)}{[1 + s(R_o + R_L)]C_L}$$

如不考虑运放内部零极点，上式得到环路的零极点为：

$$f_z = \frac{1}{2\pi R_L C_L}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi(R_o + R_L)C_L}$$

取 Point #2 为环路断点，考虑到实际放大器输入端的寄生电容  $C_{in}$ ， $R_{in}$  那么实际仿真和等效电路如 Figure 3 所示：

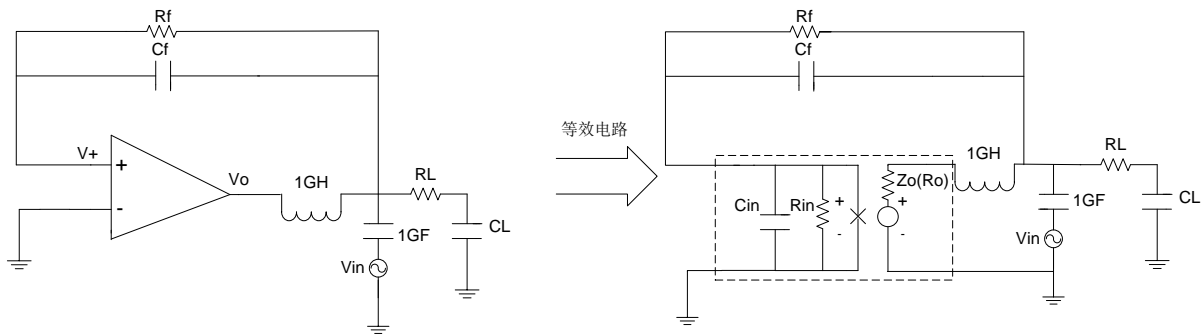


Figure 3. 在 Point #2 处断开环路等效电路

那么可以得到：

$$\frac{V_{in} - V_+}{Z_f} = \frac{V_+}{Z_{in}}$$

$$V_o = AV_+$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \left(\frac{A}{Z_f}\right) \left(\frac{1}{\frac{1}{Z_f} + \frac{1}{Z_{in}}}\right) = \frac{AR_{in}(1 + sR_f C_f)}{R_f(1 + sR_{in} C_{in}) + R_{in}(1 + sR_f C_f)} = \frac{AR_{in} R_f C_f (s + \frac{1}{R_f C_f})}{R_{in} + R_f + sR_{in} R_f (C_{in} + C_f)}$$

如不考虑运放内部零极点，上式得到环路的零极点为：

$$f_z = \frac{1}{R_f C_f}$$

$$f_p = \frac{R_{in} + R_f}{R_{in} R_f (C_{in} + C_f)}$$

如果  $R_{in} \gg R_f$  ( $R_{in}$  为放大器输入阻抗),  $f_p \approx \frac{1}{R_f(C_{in} + C_f)}$

取 Point #3 为环路断点, 考虑到实际放大器输入端的寄生电容  $C_{in}$ ,  $R_{in}$  那么实际仿真和等效电路如 Figure 4 所示:

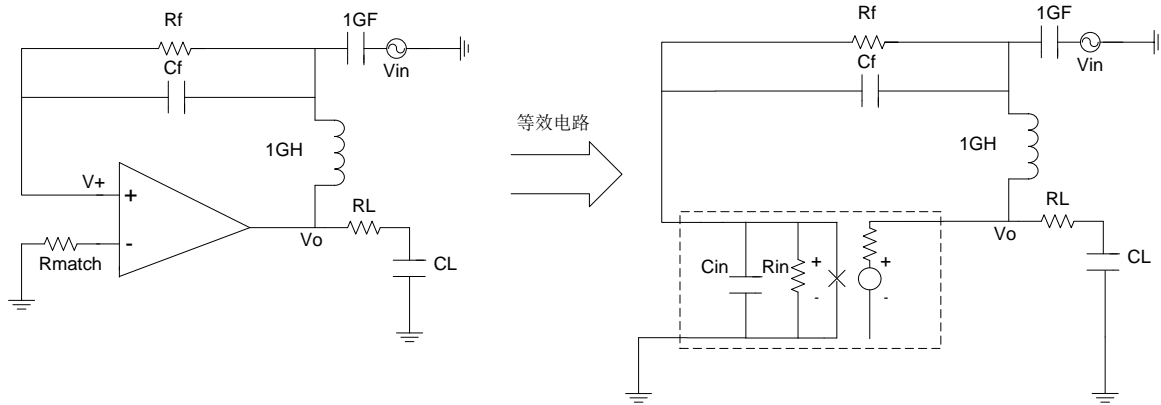


Figure 4. 在 Point #3 处断开环路等效电路

那么可以得到:

$$\frac{V_{in} - V_+}{Z_f} = \frac{V_+}{Z_{in}}$$

$$V_o = AV_+ \times \frac{Z_L}{Z_o + Z_L}$$

$$Z_o = R_o$$

$$Z_f = \frac{R_f}{1 + sC_f R_f}$$

$$Z_{in} = \frac{R_{in}}{1 + sC_{in} R_{in}}$$

$$Z_L = R_L + \frac{1}{sC_L}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{A}{\left(\frac{Z_o}{Z_L} + 1\right) \times \left(\frac{Z_f}{Z_{in}} + 1\right)} = \frac{AR_{in}(1 + sR_L C_L)(1 + sC_f R_f)}{[1 + sC_L(R_L + R_o)][R_f + R_{in} + sR_f R_{in}(C_{in} + C_f)]}$$

如不考虑运放内部零极点, 上式得到环路的零极点为:

$$f_{z1} = \frac{1}{2\pi R_L C_L}$$

$$f_{z2} = \frac{1}{2\pi R_f C_f}$$

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi(R_L + R_o)C_L}$$

$$f_{p2} = \frac{R_f + R_{in}}{2\pi R_f R_{in} (C_{in} + C_f)}$$

综合以上 3 处环路断点分析，可看出 Point #3 对应的环路断点分析最准确，Point #1 和 Point #2 处断开环路分析，推导可得会有丢失的零点或极点，导致环路分析出现错误，这在实际应用中容易被忽视。

下面以简单接成反相比例衰减电路形式的 LMV844 放大器为例，参考电路如下：

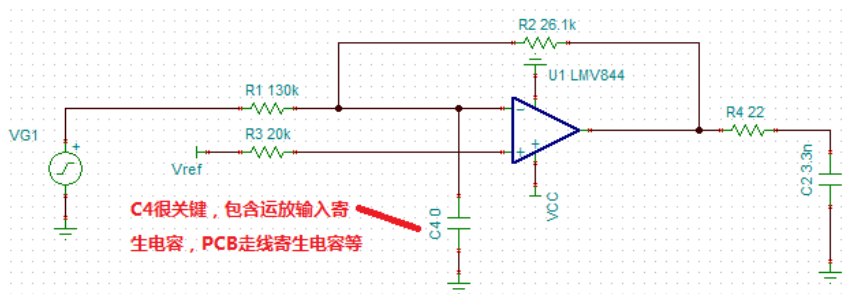


Figure 5. 实际参考电路示意

比如 C4=0pF:

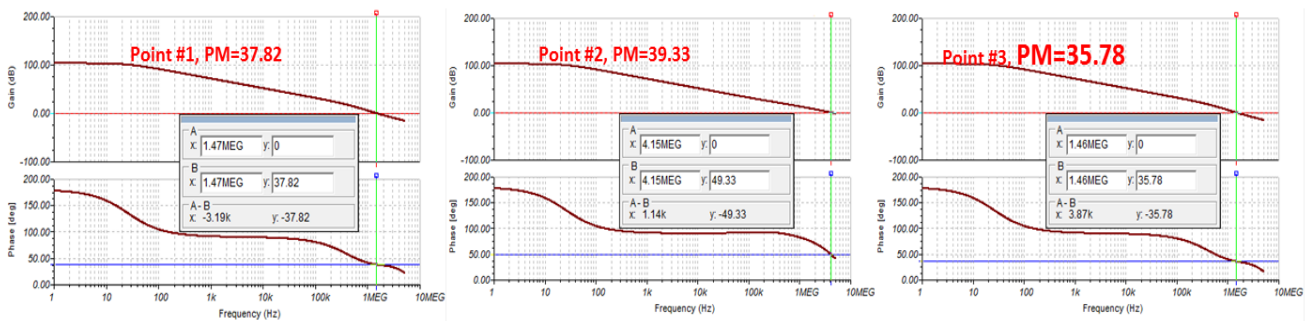


Figure 6. 在不同断点处断开环路分析结果(C4=0pF)

C4=5pF:

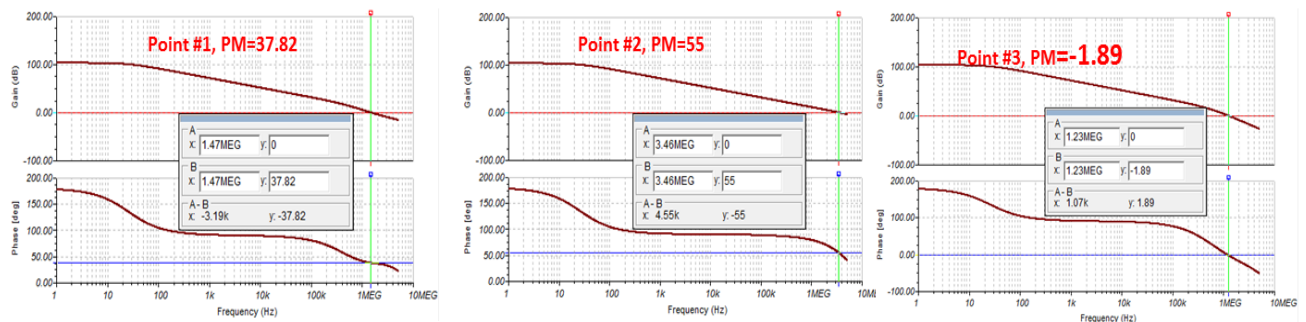


Figure 7. 在不同断点处断开环路分析结果 (C4=5pF)

## 2 放大器的实际开环输出阻抗对稳定性分析至关重要

通常在使用一些仿真软件去做环路仿真时（比如 TINA），我们会默认软件库里的模型是准确的，但是也有少数情况是模型比较粗糙，不能反映放大器真实的测试结果。而对于运放的稳定性仿真而言，如果开环增益和开环输出阻抗模型不准，仿真结果也没有实际意义。下面还是以 LMV844 这颗芯片为例来介绍如何来根据实际测试的结果构建精确的输出阻抗模型。

### 2.1 LMV844 开环输出阻抗 ( $Z_o$ ) 模型修正

首先，我们来确认下 TINA 里 LMV844 的开环增益模型是否准确：

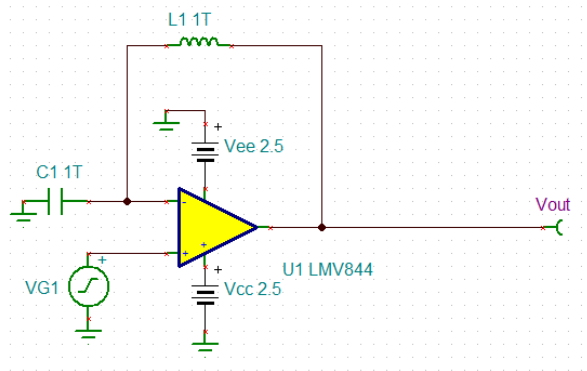


Figure 8. LMV844 的开环增益和相位裕度 TINA 仿真（基于 TINA 默认模型）

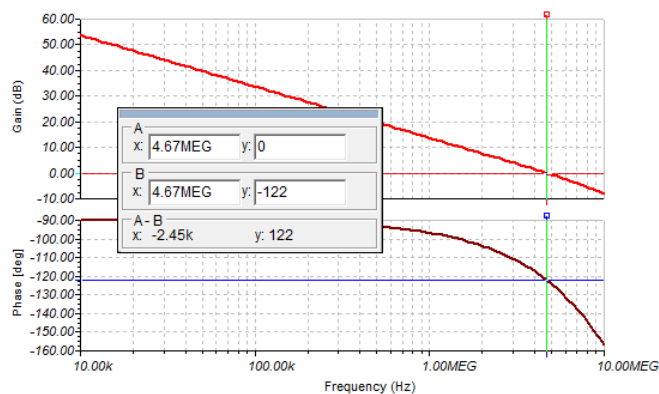


Figure 9. 基于 TINA 默认模型的开环增益和 PM

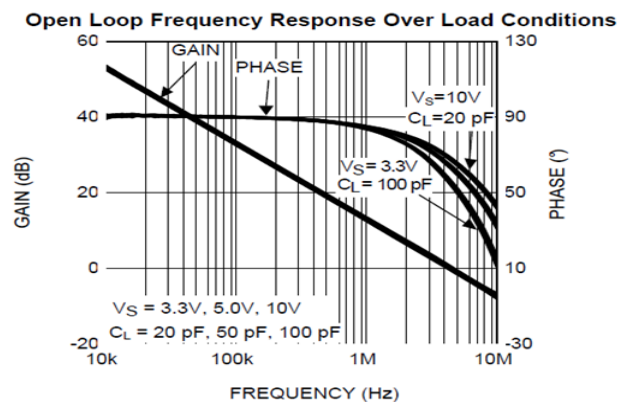


Figure 10. 基于规格书的开环增益和 PM

可以看出 TINA 模型的开环增益和 PM 基本和规格书所给测试数据一致，可以使用。

接下来，更重要的是我们来看 TINA 里面 LMV844 的闭环输出阻抗 ( $Z_{out}$ ) 模型是否准确：

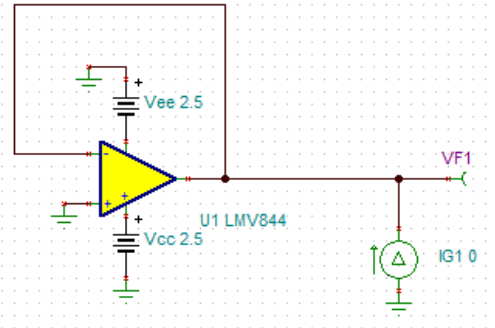


Figure 11. LMV844 的闭环输出阻抗 (G=1) TINA 仿真

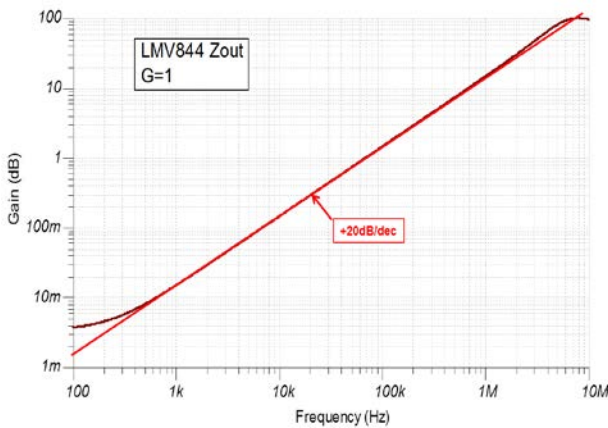


Figure 12. 不准确的 Zout 模型 (基于默认模型)

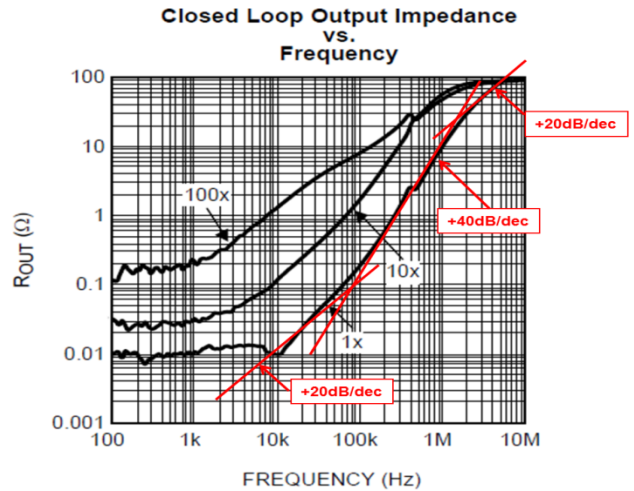


Figure 13. 准确的闭环输出阻抗 (基于规格书)

从图 12 和 13 可以看出，TINA 默认模型的输出阻抗模型并不准确，如果直接用该模型做环路稳定性仿真，会有问题。

## 2.2 从闭环输出阻抗反推出开环输出阻抗 Zo，基于此数据建模

从 LMV844 规格书上可以近似得到在单位增益下的闭环输出阻抗 Zout 值，进而可以得到近似的开环输出阻抗 Zo，具体如下表所示：

Table 1. LMV844 规格书得到 Zout 和 Zo 值

LMV844 Zout @ Gain=1 (β=1)			Zout = Zo / (Aol*β)
			Zo= Zout * (Aol*β)
f (Hz)	Zout(ohms)	Aol@fx(V/V)	Zo (ohms)
40000	0.04	112.50	4.50
90000	0.10	50.00	5.00
500000	2.00	9.00	18.00
2000000	30.00	2.25	67.50
5000000	90.00	0.90	81.00

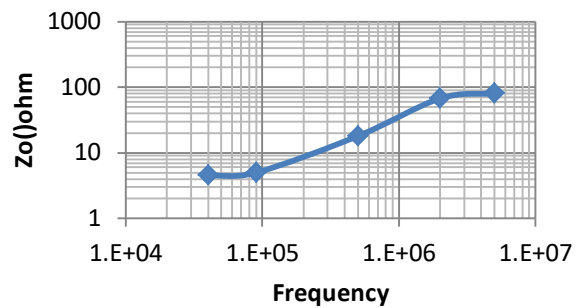


Figure 14. 反推开环输出阻抗



接下来考虑为开环输出阻抗  $Z_o$  建模，如下起始模型（参考文献 4）：

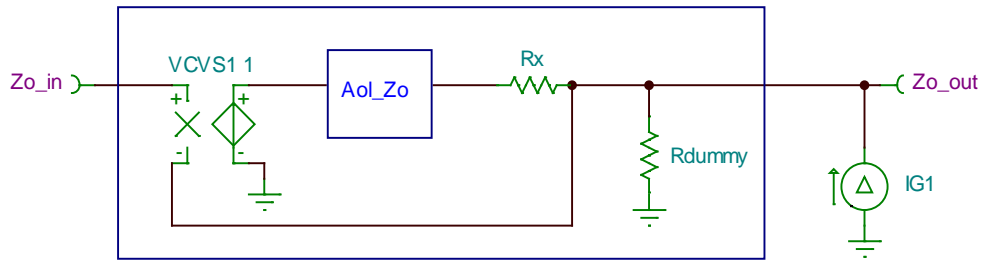


Figure 15.开环输出阻抗  $Z_o$  建模原理示意图

忽略掉  $R_{dummy}$  是该模型中为了提高模型精度而加的 Dummy 电阻（一般很大），可得：

$$Z_o = \frac{Z_{o\_out}}{IG1} = \frac{R_x}{1 + \beta * Aol\_Zo}$$

考虑到  $\beta=1$  可得：

$$Aol\_Zo = \frac{R_x}{Z_o} - 1$$

本建模中采用  $R_x=160k$  欧姆作为示例，也可考虑其他取值。

建模时，考虑到通常各级零极点对离的比较远，所以采用典型无源电路来实现级联，简化建模流程。

Table 2. 无源拓扑和传输函数

零极点位置	采用无源拓扑	传输函数	无源器件值
零点频率 $f_z$ 大于极点频率 $f_p$		$H(s) = \frac{1 + C1 \cdot R2 \cdot s}{1 + (R1 + R2) \cdot C1 \cdot s}$	$R1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C1 \cdot f_p} - R2$ $C1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot f_z}$ R2 需要指定
零点频率 $f_z$ 小于极点频率 $f_p$		$H(s) = \frac{R2 + C1 \cdot R2 \cdot R1 \cdot s}{R1 + R2 + C1 \cdot R2 \cdot R1 \cdot s}$	$R2 = \frac{R1}{(2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot C1 \cdot R1) - 1}$ $C1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot f_z}$ $Gadjust = \frac{R1 + R2}{R2}$ R1 需要指定

考虑到规格书上低频 (<10kHz) 处闭环输出阻抗测试结果已经开始受噪声的影响, 实际已不准确, 对环路稳定性分析意义较小, 为了建模的需要, 近似把 Zo 低频段也按典型三级放大器的开环输出阻抗补充(其实也可以忽略掉超过 LMV844 GBW 以外的零极点 fp4, fz4), 可以近似用下表来表示:

Table 3. 各级无源模型的零极点计算结果

	Aol_Zo	(fz>fp or fz>fp)	fz	fp	R1, R2 and C1 取值
Stage 1	fz1, fp1	fp1<fz1	90mHz	90uHz	取 R2=10k 欧姆; >>R1=9.99M 欧姆; >>C1=176.8uF
Stage 2	fz2, fp2	fz2<fp2	9Hz	2kHz	取 R1=10k 欧姆; >>R2=45.2 欧姆; >>C1=1.77uF; Gadjust=222.22
Stage 3	fz3, fp3	fp3<fz3	2Mz	90kHz	取 R2=10k 欧姆; >>R1=212.2k 欧姆; >>C1=7.96pF;
Stage 4	fz4, fp4	fz4<fp4	9MHz	900MHz	取 R1=10k 欧姆; >>R2=101.01 欧姆; >>C1=1.77pF; Gadjust=100;

得到如下基于 Zo 的开环输出阻抗值 Aol\_Zo 频响图 (绿色为基于规格书测量值的建模准确曲线, 其他低频和高频点依照经验数据近似):

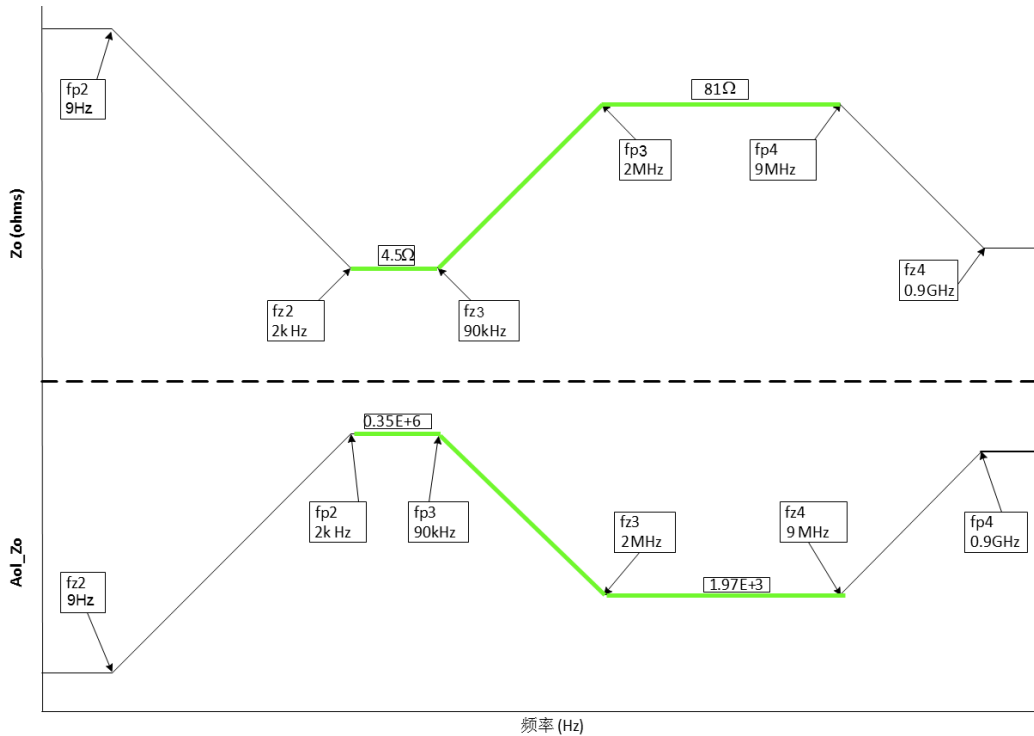


Figure 16. Zo 和 Aol\_Zo 随频率变化的示意图

最终可以得到 LMV844 的 Zo 准确的建模模型：

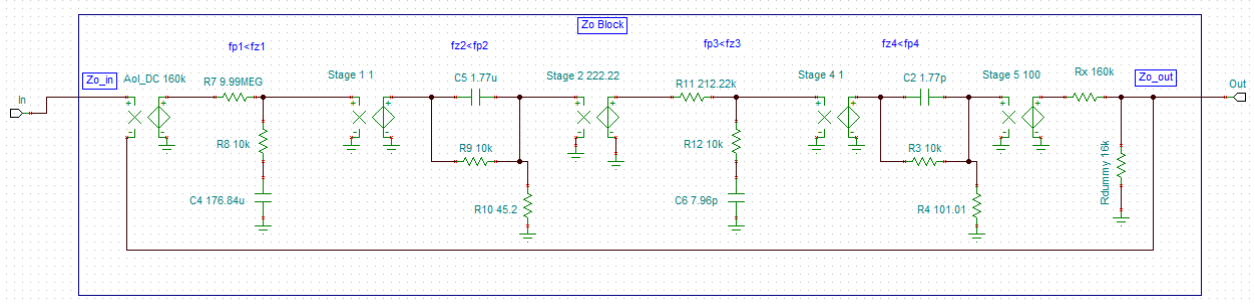


Figure 17. Zo 基于无源拓扑级联的建模结果

### 2.3 验证修正后的输出阻抗模型

采用该模型后，可以得到 LMV844 的实际闭环输出阻抗与规格书上测量所得值吻合较好，模型准确度得到验证。

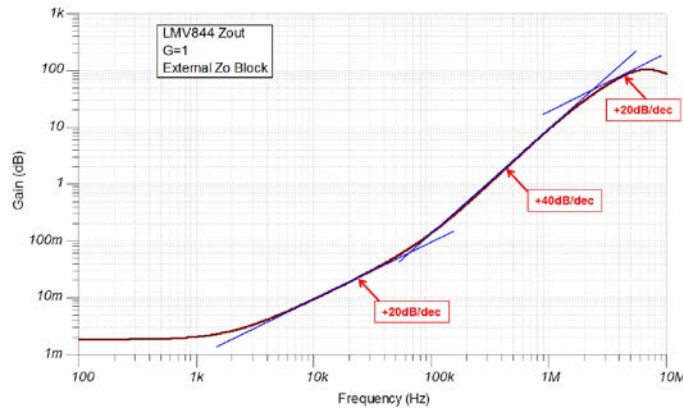


Figure 18. 基于修正后的 Zout 模型结果

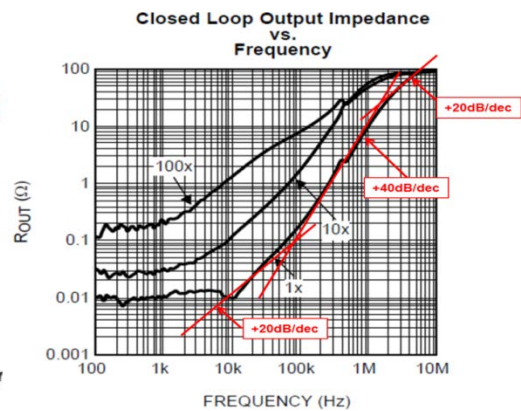


Figure 19. 准确的输出阻抗（基于规格书）

如果采用 TINA 内部自带的模型，针对下面实际应用电路进行环路仿真，可以得到相位裕度 PM 有 38.7 度，虽然仍小于 45 度的经验值，但看起来不是很差：

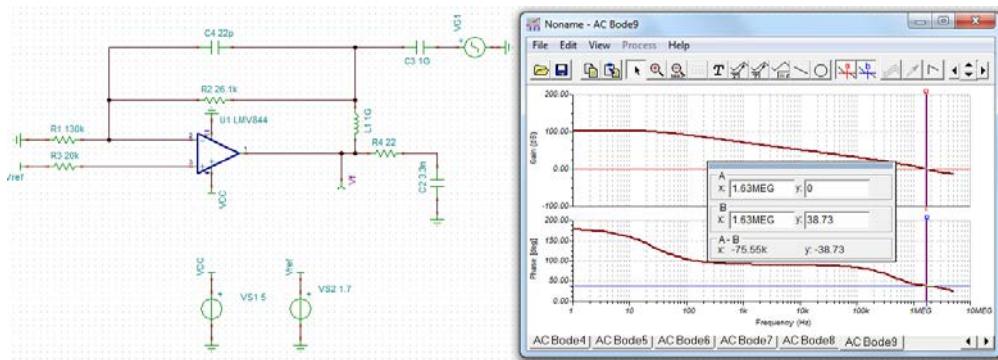


Figure 20. 实际应用电路基于不准确的输出阻抗模型仿真

采用准确的建模模型，针对下面实际电路做环路仿真，可以得到相位裕度 PM 只有 15.5 度，相位裕度非常差，该情况下放大器极有可能会产生震荡，如考虑温度变化，LMV844 产生振荡的可能性更大。

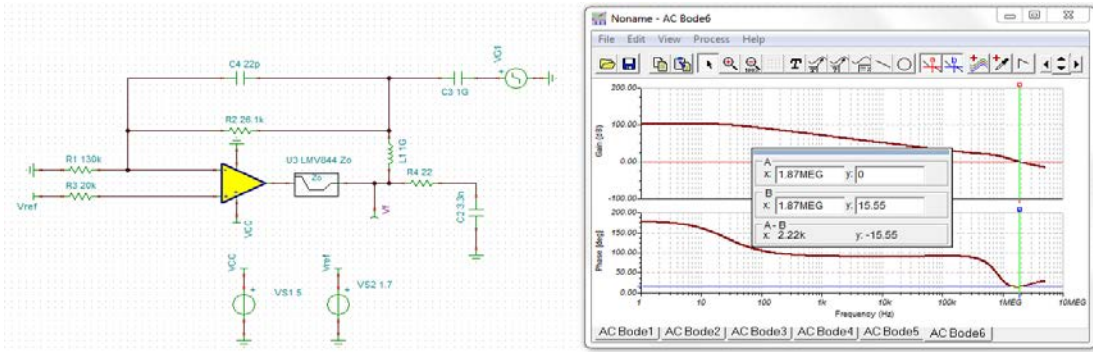


Figure 21. 实际应用电路基于修正后的输出阻抗模型仿真

而实际情况也如我们所料，如下面所示测试结果，LMV844 输出出现震荡波形，温度升高时震荡波形会更明显：

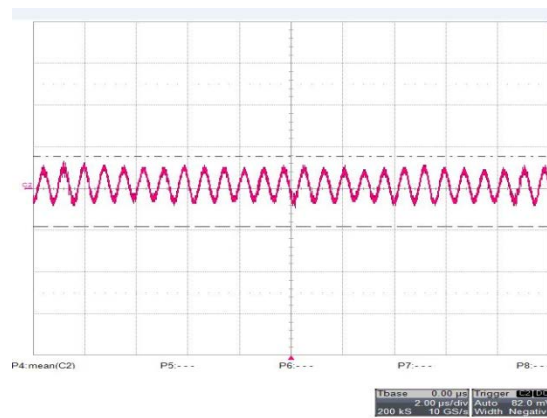


Figure 22. 实际应用电路实测输出端出现震荡波形

纠正了模型之后，解决方法当然比较简单，增加输出隔离电阻阻值和尽可能减小负载电容值，以使相位裕度能够满足要求：

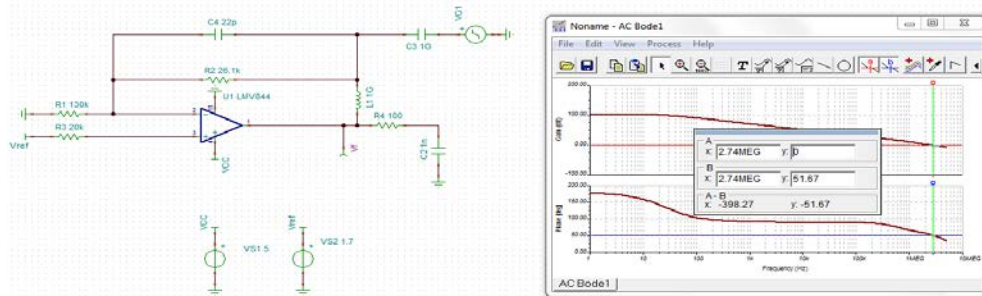
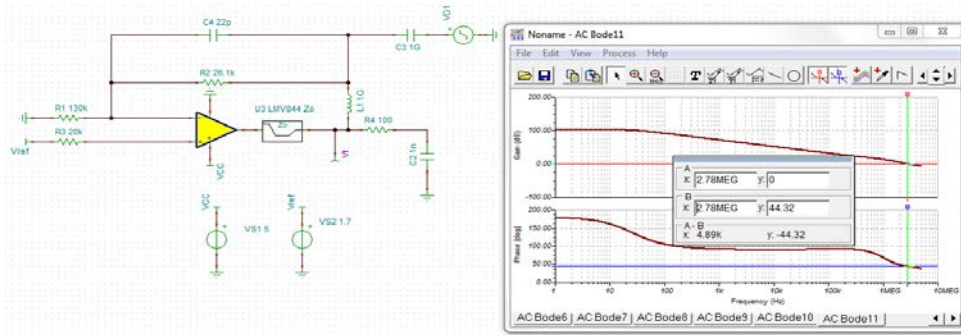


Figure 23. 实际应用电路基于不准确输出阻抗模型的环路仿真结果（R4=100 欧姆；C2=1nF）



**Figure 24. 实际应用电路基于修正后输出阻抗模型的环路仿真结果（R4=100 欧姆；C2=1nF）**

此案例中将隔离电阻 R4 从 22 欧姆增加到 100 欧姆，负载电容从 3.3nF 减小到 1nF，下面是基于修正后输出阻抗模型的环路仿真结果，可以看到有大概 44.3 度的相位裕度。采用此方案后，解决了实践中出现的震荡问题。

对于 TI 的一些放大器，TINA 输出阻抗模型不准确，且规格书上只给出了闭环输出阻抗测量值的，可以借助以上修正放大器开环输出阻抗的方法来进行修正，以提高仿真验证结果对工程实践的指导意义。

### 3 参考文献

1. *LMV844 datasheet (SNOSAT11)*
2. *Tim Green and Collin Wells. "Solving op amp stability issues," TI E2E™ Community Precision Amplifier Forum, October 14, 2015.*
3. *Collin Wells and Miro Oljaca. Modeling the output impedance of an op amp for stability analysis (SLYT677)*
4. *Tim Green. Operational Amplifier Stability Part 11 of 15: Modeling Complex Zo for Op Amps.*



## IMPORTANT NOTICE FOR TI DESIGN INFORMATION AND RESOURCES

Texas Instruments Incorporated ("TI") technical, application or other design advice, services or information, including, but not limited to, reference designs and materials relating to evaluation modules, (collectively, "TI Resources") are intended to assist designers who are developing applications that incorporate TI products; by downloading, accessing or using any particular TI Resource in any way, you (individually or, if you are acting on behalf of a company, your company) agree to use it solely for this purpose and subject to the terms of this Notice.

TI's provision of TI Resources does not expand or otherwise alter TI's applicable published warranties or warranty disclaimers for TI products, and no additional obligations or liabilities arise from TI providing such TI Resources. TI reserves the right to make corrections, enhancements, improvements and other changes to its TI Resources.

You understand and agree that you remain responsible for using your independent analysis, evaluation and judgment in designing your applications and that you have full and exclusive responsibility to assure the safety of your applications and compliance of your applications (and of all TI products used in or for your applications) with all applicable regulations, laws and other applicable requirements. You represent that, with respect to your applications, you have all the necessary expertise to create and implement safeguards that (1) anticipate dangerous consequences of failures, (2) monitor failures and their consequences, and (3) lessen the likelihood of failures that might cause harm and take appropriate actions. You agree that prior to using or distributing any applications that include TI products, you will thoroughly test such applications and the functionality of such TI products as used in such applications. TI has not conducted any testing other than that specifically described in the published documentation for a particular TI Resource.

You are authorized to use, copy and modify any individual TI Resource only in connection with the development of applications that include the TI product(s) identified in such TI Resource. NO OTHER LICENSE, EXPRESS OR IMPLIED, BY ESTOPPEL OR OTHERWISE TO ANY OTHER TI INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT, AND NO LICENSE TO ANY TECHNOLOGY OR INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT OF TI OR ANY THIRD PARTY IS GRANTED HEREIN, including but not limited to any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI products or services are used. Information regarding or referencing third-party products or services does not constitute a license to use such products or services, or a warranty or endorsement thereof. Use of TI Resources may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

TI RESOURCES ARE PROVIDED "AS IS" AND WITH ALL FAULTS. TI DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES OR REPRESENTATIONS, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING TI RESOURCES OR USE THEREOF, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ACCURACY OR COMPLETENESS, TITLE, ANY EPIDEMIC FAILURE WARRANTY AND ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, AND NON-INFRINGEMENT OF ANY THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

TI SHALL NOT BE LIABLE FOR AND SHALL NOT DEFEND OR INDEMNIFY YOU AGAINST ANY CLAIM, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY INFRINGEMENT CLAIM THAT RELATES TO OR IS BASED ON ANY COMBINATION OF PRODUCTS EVEN IF DESCRIBED IN TI RESOURCES OR OTHERWISE. IN NO EVENT SHALL TI BE LIABLE FOR ANY ACTUAL, DIRECT, SPECIAL, COLLATERAL, INDIRECT, PUNITIVE, INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL OR EXEMPLARY DAMAGES IN CONNECTION WITH OR ARISING OUT OF TI RESOURCES OR USE THEREOF, AND REGARDLESS OF WHETHER TI HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES.

You agree to fully indemnify TI and its representatives against any damages, costs, losses, and/or liabilities arising out of your non-compliance with the terms and provisions of this Notice.

This Notice applies to TI Resources. Additional terms apply to the use and purchase of certain types of materials, TI products and services. These include; without limitation, TI's standard terms for semiconductor products (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>), [evaluation modules](#), and [samples](http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm) (<http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm>).

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated