

如何使用LTspice 生成LED驱动器的波德图

应用总监Keith Szolusha和 应用工程师Brandon Nghe

摘要

适当的控制环路相位和增益测量应由拥有(昂贵的)设备 和相应经验的工厂专家进行。如果缺少其中一个或两个都 没有,则还有另一种选择。

简介

闭环增益和相位图是用于确定开关调节器控制环路稳定性的常 用工具。正确完成增益和相位测量需熟悉高级网络分析仪。测 量包括断开控制环路、注入噪声,以及测量一定频率范围内的 增益和相位(见图1)。这种测量控制环路的做法很少应用于 LED驱动器。

LED驱动器控制环路相位和增益测量需要采用一种不同的方法 (见图1)——从典型的电阻分压路径到GND电压调节器注入和测 量点的偏差。在这两种情况下,台式控制环路相位和增益测量 是保证稳定性的最佳方法,但并非每个工程师都有所需的设备 和经验丰富的工厂应用程序团队加持。工程师们该怎么办呢?

一种选择是构建LED驱动器,查看它瞬态的响应。瞬态响应观察 需要应用板和更常见的台式设备。瞬态分析的结果缺乏波德图 基于频率的增益和相位数据——可用于保证稳定性,也可作为 一般控制环路稳定性和速度的指示器。

大信号瞬态可用于检查绝对偏差和系统响应时间。瞬态扰动的 形状表示相位或增益裕量,因此可用于了解一般环路稳定性。 例如,临界阻尼响应可能表示45°至60°的相位裕度。或者,瞬 态期间的大尖峰可能表示需要更多的Cour或更快的环路。较长的 建立时间可能表示需要加快环路的带宽(和交越频率)。这些 相对简单的系统检查能够在运行中描绘开关调节器的控制环路,但增益和相位波德图需要进行更深入的分析。

LTspice[®]仿真可用在组装或生产电路之前生成开关调节器输出的 瞬变波形和波德图。这有助于大致了解控制环路的稳定性,以 便开始选择补偿元件和确定输出电容大小。LTspice的使用过程 基于1975年Middlebrook的最初建议(请参阅"LTspice,生成SMPS波 德图的基本步骤")。¹目前,Middlebrook的方法中列出的实际 信号注入位置并不常用,但经过多年的调整,得出了如图1a所 示的常用注入位置。

此外,带有高边检测电阻和复杂交流电阻LED负载的LED驱动器,在反馈路径中应有一个不同于目前的注入点或Middlebrook最 初建议的注入点,LTspice此前未予说明。这里介绍的方法是展 示如何在LTspice和实验室中生成LED驱动器电流测量反馈环路波 德图。

产生控制环路波德图

标准开关调节器控制环路波德图产生三个关键测量值,用于确 定稳定性和速度:

- ▶ 相位裕量
- ▶ 交越频率 (带宽)
- ▶ 増益裕量

一般认为,稳定的系统需要45°至60°的相位裕度,而为保证环 路稳定性则需要-10 dB的增益裕量。交越频率与一般环路速度有 关。图1显示了使用网络分析仪进行这些测量的设置。 LTspice模拟可用在LED的控制环路中创建类似的注入和测量。图 2显示了一个LED驱动器(LT3950),给定频率(f)的理想正弦 波直接注入到负感测线(ISN)的反馈路径中。测量点A、B和C 用于计算注入频率 (f) 下的增益 (dB) 和相位 (°) 。为了绘制整个控制环路的波德图, 必须在大频率扫描范围内重复该测量, 并在f_{sw}/2 (转换器开关频率的一半) 处停止。



图1. 开关调节器控制环路波德图测量,带有网络分析仪,用于 (a) 电压调节器和 (b) LED驱动器。为了进行测量,控制环路断开,正弦波扰动进入 高阻抗路径,同时测量由此产生的控制环路增益和相位,使设计人员能够量化环路的稳定性。



图2. LT3950 DC2788A演示电路LED驱动器LTspice模型,带控制环路噪声注入和测量点。

图2中点A、点B和点C的测量值决定了注入频率(f)下控制环路 的增益和相位。不同的注入频率产生不同的增益和相位。总 之,为了解它的工作原理,可以设置注入频率,并测量A-C和 B-C的增益和相位。这会产生控制环路波德图的单个频率点。图 3a和3b显示了10 kHz ±10 mV AC注入的增益和相位。图3c和3d显示了 40 kHz ±10 mV AC注入的增益和相位。 频率扫描以及B-C和A-C之间的增益和相位测量生成整个闭环波 德图。如摘要中所述,这通常是在工作台上使用一台昂贵的 网络分析仪来完成的。在LTspice中也可进行这种扫描,如图4所 示。通过与使用网络分析仪的台式测试结果进行比较,证实这 些结果(见图8)。



(Waveforms A-C and B-C as well as Sine Wave A-B Demonstrated with Two Different Frequencies: 10 kHz and 40 kHz)

图3.图2中点A、点B和点C的测量值决定了注入频率(f)下控制环路的增益和相位。不同的注入频率产生不同的增益和相位。图3a和3b显示了10 kHz ±10 mV AC注入的增益和相位。图3c和3d显示了40 kHz ±10 mV AC注入的增益和相位。频率扫描以及B-C和A-C之间的增益和相位测量生成闭环波德图。



图4.用LTspice中的LT3950进行波德图测量,显示增益(实线)和相位(虚线)。

在LTspice中创建全部增益和相位扫描和波德图

要在LTspice中为控制环路创建全部波德图、增益和相位的图形 扫描,请按照下列步骤操作。

第1步: 创建交流电注入源

在LTspice中,插入±10 mV AC注入电压源和注入电阻,并标记节点 A,B和C,如图2所示。交流电压源值SINE (0 10m {Freq})设置10 mV峰值并扫描频率。用户可以使用1 mV至20 mV的正弦峰值来进 行计算。注意:许多LED驱动器的感应电压分别为250 mV和100 mV。 较高的注入噪声会产生LED电流调节误差。

第2步:添加Math

在原理图上将测量描述作为.sp(SPICE)指令插入。这些指令执行傅里叶变换公式,并以dB和相位计算LED驱动器的复数开环增益和相位。

各指令如下:

- .measure Aavg avg V(a)-V(c)
- .measure Bavg avg V(b)-V(c)
- .measure Are avg (V(a)-V(c)-Aavg)*cos(360*time*Freq)
- .measure Aim avg -(V(a)-V(c)-Aavg)*sin(360*time*Freq)
- .measure Bre avg (V(b)-V(c)-Bavg)*cos(360*time*Freq)
- .measure Bim avg -(V(b)-V(c)-Bavg)*sin(360*time*Freq)
- .measure GainMag param 20*log10(hypot(Are,Aim) / hypot(Bre,Bim))
- .measure GainPhi param mod(atan2(Aim, Are) atan2(Bim, Bre)+180,360)-180

第3步:设置测量参数

还需要一些小的指令。首先,为进行正确的测量,电路必须处 于模拟的稳定状态(启动后)。调整t0,或测量的开始时间和 停止时间。通过模拟和观察启动时间来估算或得出开始时间。 达到稳定状态后,停止时间定为10/freq,即10个周期,通过对每 个频率的10个周期求平均值来减少误差。

各指令如下:

- ▶ .param t0=0.2m
- ▶ .tran 0 {t0+10/freq} {t0} startup
- ▶ .step oct param freq 1K 1M 3

第4步:设置频率采样步长和范围

.step命令设置执行分析的频率分辨率和范围。本例中,使用每 倍频程3点的分辨率,模拟1 kHz到1 MHz。波德图测量可以精准到 f_{sw}/2,频率上限设置为系统开关频率的一半。显然,点越多, 分辨率越高,仿真时间越长。每倍频程3点是最低的分辨率, 但以最小分辨率运行仿真可节省一些时间。从总体设计周期 看,5分钟的仿真比设计、组装和测试印刷电路板快几个数量 级。基于这点,以更高的分辨率运行,例如每倍频程5点或以 上,生成更完整且更容易查看的结果。

第5步:运行仿真

这会比较直观,但LTspice需要多个步骤制作波德图。第一步是 运行仿真,暂不生成图,只显示正常范围的电压和电流测量 值。按照以下步骤生成波德图。

第6步:制作波德图

右键单击原理图窗口,打开"SPICE错误日志",选择Plot.step/ed.meas data。从"画图设置目录"中选择"可见曲线",然后选择"增益"来绘制数据。或者,可通过单击文件,然后选择将数据导出为文本,产生波德数据的CSV文件,导出测量数据。

在仿真之后,使用网络分析仪进行波德图确认

控制环路的仿真不像真实的那样可靠,它不能完全保证环路的 稳定性和裕度。在设计过程的某个阶段,应在实验室使用网络 分析仪工具验证控制环路。

LTspice中生成的波德图可以与网络分析仪的波德图测量结果比较。类似放真,通过将噪声注入反馈环路并测量和处理A-B和A-C的增益和相位来捕获实际的环路测量结果。测量设置示意图和照片如图5至图7所示。



图5.网络分析仪的LED驱动器控制环路波德图测量设置。



图6. Venable System Model 5060A老式网络分析仪,用于高边浮动噪声注入和 LED驱动器的测量。



图7.LT3950 LED驱动器上的噪声注入和测量点。



图8. DC2788A演示电路板上的LT3950 LED驱动器的波德图。通过LTspice模拟 生成的图 (蓝线) 与使用网络分析仪生成的图 (绿线) 相关性强。

表1. LT3950 LED驱动器的波德图测量数据比较,LTspice vs.网络分析仪

测试设置	交越频率 (Hz)	增益裕量 (dB)	相位裕度 (°)
网络分析仪, 8V _N	16.75	17.47	83.96
LTspice, 8V _№	15.8	13.79	71.23
网络分析仪, 12 V _№	30.41	18.71	83.73
LTspice, 12 V _{IN}	47.36	5.04	62.29

Ltspice仿真结果显示与网络分析仪数据的强相关性,证明LTspice 是LED驱动器设计中的有效工具——产生大概的参考,帮助工程 师缩小元件选择范围。较低频率下的增益和相位与硬件非常相 近,较高频率下的仿真数据和硬件数据之间的差异更大。这可 能代表了对高频极点、零点、寄生电感、电容和等效串联电阻 建模的挑战。

结论

LTspice建模用于测量控制环路增益和相位,生成LED驱动器的波 德图。Ltspice仿真数据的精确度取决于所使用的SPICE模型的精 确度,精确地建模每个元件以解决现实情况会增加仿真时间。 就LED驱动器设计而言,没有完善的元件建模,LTspice数据也可 用于相对较快地缩小元件范围并预测总体电路性能。仿真有助 于在过渡到硬件设计之前指导设计工程师,节省总体设计时 间。粗略地选择元件后,使用内置板和网络分析仪的测量可以 确认或对比仿真结果,作为开发期间硬件验证的一种手段。

参考资料:

¹Gabino Alonso. "LTspice: 生成SMPS波德图的基本步骤。" Analog Devices, Inc.

作者简介

Keith Szolusha是ADI公司应用总监,工作地点位于美国加利福 尼亚州圣克拉拉。自2000年起,Keith任职于BBI Power Products Group,重点关注升压、降压-升压和LED驱动器产品,同 时还管理电源产品部的EMI室。他毕业于马萨诸塞州剑桥 市麻省理工学院(MIT),1997年获电气工程学士学位,1998年 获电气工程硕士学位,专攻技术写作。联系方式:Keith. szolusha@analog.com。

Brandon Nghe是Analog Devices的应用工程师。2020年获得加利 福尼亚理工州立大学电气工程硕士学位。Brandon负责为汽 车应用设计和测试升压、降压-升压和LED驱动器的低电磁 干扰DC/DC变换器。联系方式: <u>brandon.nghe@analog.com</u>。

在线支持社区

► ADI EngineerZone[™]

访问ADI在线支持社区, 中文技术论坛 与ADI技术专家互动。提出您的 棘手设计问题、浏览常见问题 解答,或参与讨论。

请访问ez.analog.com/cn



如需了解区域总部、销售和分销商,或联系客户服务和 技术支持,请访问analog.com/cn/contact。

向我们的ADI技术专家提出棘手问题、浏览常见问题解答,或参与EngineerZone在线支持社区讨论。 请访问ez.analog.com/cn。 ©2021 Analog Devices, Inc. 保留所有权利。 商标和注册商标属各自所有人所有。

"超越一切可能"是ADI公司的商标。



TA22891sc-4/21