

如何運用 LTspice 產生 LED 驅動器的波德圖

■作者：Keith Szolusha / ADI 應用總監
Brandon Nghe / ADI 應用工程師

簡介

閉迴路增益和相位點陣圖是用於確定切換調節器控制迴路穩定性的常用工具。正確完成增益和相位測量需熟悉高階網路分析儀。測量包括斷開控制迴路、注入雜訊，以及測量一定頻率範圍內的增益和相位（見圖 1）。這種測量控制迴路的做法很少應用於 LED 驅動器。

LED 驅動器控制迴路相位和增益測量需要採用一種不同的方法（見圖 1）——從典型的電阻分壓路徑到 GND 電壓調節器注入和測量點的偏差。在這兩種情況下，台式控制迴路相位和增益測量是保證穩定性的優質方法，但並非每個工程師都有所需的設備和經驗豐富的工廠應用程式團隊加持。那麼，該如何協助工程師們呢？

一種選擇是建構 LED 驅動器，查看它的瞬態響應。瞬態響應觀察需要應用板和更常見的工作台設備。瞬態分析的結果缺乏波德圖基於頻率的增益和相位資料——可用於保證穩定性，也可作為一般控制迴路穩定性和速度的指示器。

大訊號瞬態可用於檢查絕對偏差和系統響應時間。瞬態擾動的形狀表示相位或增益餘裕，因此可用於瞭解一般迴路穩定性。例如，臨界阻尼回應可能表示 45° 至 60° 的相位邊界。或者，瞬態期間的大尖峰可能表示需要更多的 COUT 或更快的迴路。較長的建立時間可能表示需要加快迴路的頻寬（和交越頻率）。這些相對簡單的系統檢查能夠在運行中描繪切換調節器的控制迴路，但增益和相位波德圖

需要進行更深入的分析。

LTspice 模擬可用在組裝或生產電路之前產生切換調節器輸出的瞬變波形和波德圖。這有助於大致瞭解控制迴路的穩定性，以便開始選擇補償元件和確定輸出電容大小。LTspice 的使用過程基於 1975 年 Middlebrook 的最初建議（請參閱「LTspice：產生 SMPS 波德圖的基本步驟」）。¹ 目前，Middlebrook 的方法中列出的實際訊號注入位置並不常用，但經過多年的調整，得出了如圖 1a 所示的常用注入位置。

此外，具有高邊檢測電阻和複雜交流電阻 LED 負載的 LED 驅動器，在回饋路徑中應有一個不同於目前的注入點或 Middlebrook 最初建議的注入點，LTspice 在此之前未予以說明。這裡介紹的方法是展示如何在 LTspice 和實驗室中產生 LED 驅動器電流測量回饋迴路波德圖。

產生控制迴路波德圖

標準切換調節器控制迴路波德圖產生三個關鍵測量值，用於確定穩定性和速度：

- 相位餘裕
- 交越頻率（頻寬）
- 增益餘裕

一般認為，穩定的系統需要 45° 至 60° 的相位餘裕，而為保證迴路穩定性則需要 -10 dB 的增益餘裕。交越頻率與一般迴路速度有關。圖 1 顯示了使用網路分析儀進行這些測量的設定。

LTspice 模擬可在 LED 的控制迴路中創建類似的注入和測量。圖 2 顯示了一個 LED 驅動器 (LT3950)，給定頻率 (f) 的理想正弦波直接注入到負感測線 (ISN) 的回饋路徑中。測量點 A、B 和 C 用於計算注入頻率 (f) 下的增益 (dB) 和相位 (°)。為了

圖 1: 切換調節器控制迴路波德圖測量，具有網路分析儀，用於 (a) 電壓調節器和 (b) LED 驅動器。為了進行測量，產生不同的增益和相位。總之，為瞭解它的工作原理，可以設定注入頻率，並測量 A-C 和 B-C 的增益和相位。這會產生控制迴路波德圖的單一頻率點。圖 3a 和 3b 顯示了 $10\text{ kHz} \pm 10\text{ mV AC}$ 注入的增益和相

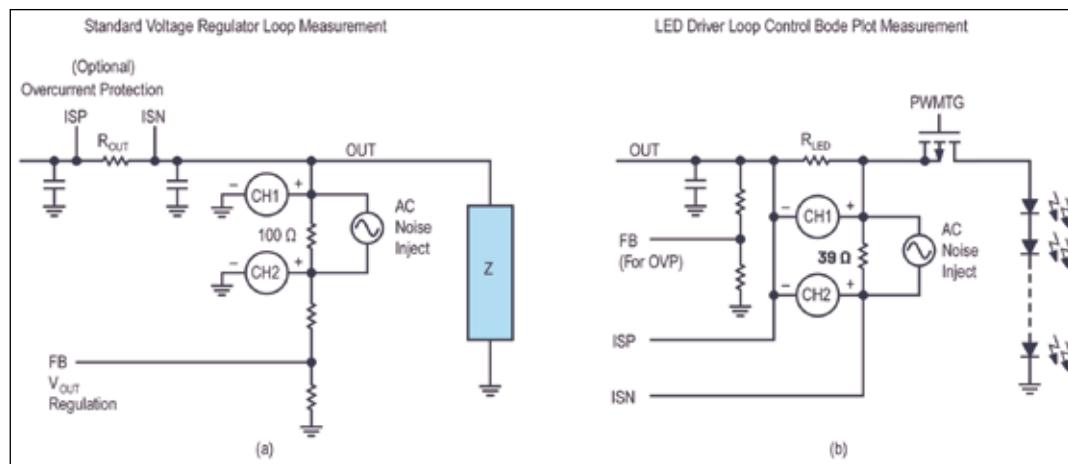
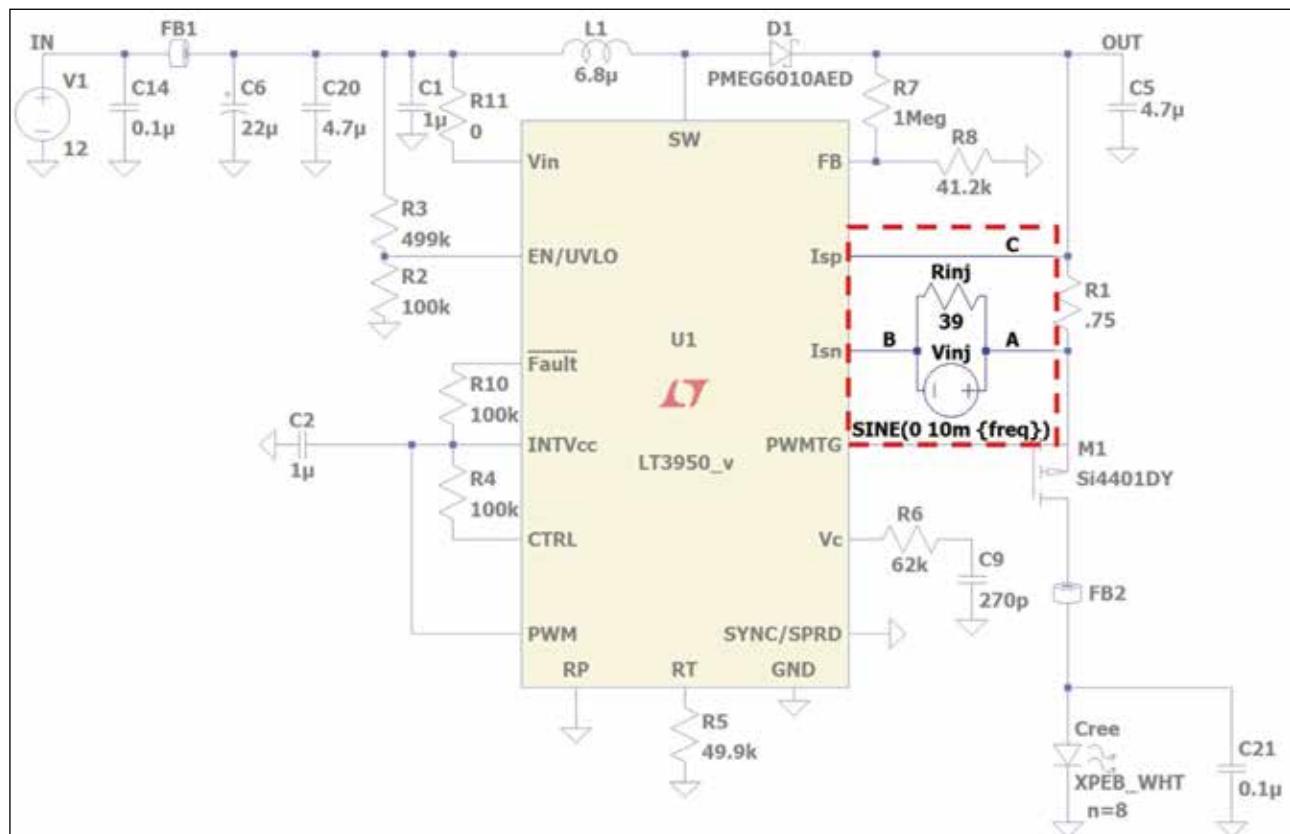


圖 2: LT3950 DC2788A 演示電路 LED 驅動器 LTspice 模型，具有控制迴路雜訊注入和測量點。



繪製整個控制迴路的波德圖，必須在大頻率掃描範圍內重複該測量，並在 $f_{SW}/2$ (轉換器切換頻率的一半) 處停止。

圖 2 中點 A、點 B 和點 C 的測量值決定了注入頻率 (f) 下控制迴路的增益和相位。不同的注入頻率

和相位。總之，為瞭解它的工作原理，可以設定注入頻率，並測量 A-C 和 B-C 的增益和相位。這會產生控制迴路波德圖的單一頻率點。圖 3a 和 3b 顯示了 $10\text{ kHz} \pm 10\text{ mV AC}$ 注入的增益和相

圖 3: 圖 2 中點 A、點 B 和點 C 的測量值決定了注入頻率 (f) 下控制迴路的增益和相位。不同的注入頻率產生不同的增益和相位。圖 3a 和 3b 顯示了 $10 \text{ kHz} \pm 10 \text{ mV AC}$ 注入的增益和相位。圖 3c 和 3d 顯示了 $40 \text{ kHz} \pm 10 \text{ mV AC}$ 注入的增益和相位。頻率掃描以及 B-C 和 A-C 之間的增益和相位測量產生閉迴路波德圖。

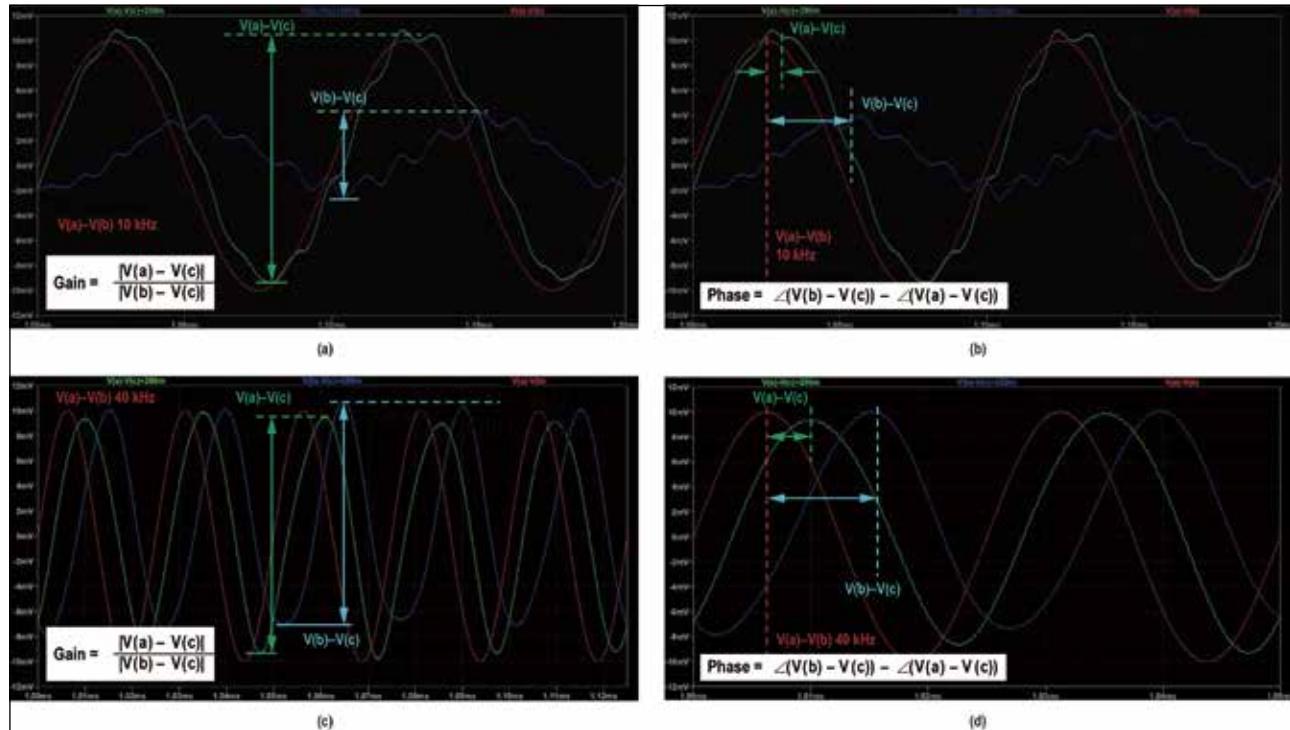
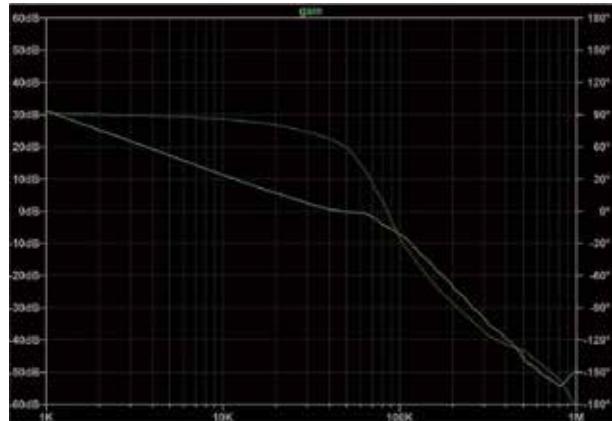


圖 4: 用 LTspice 中的 LT3950 進行波德圖測量，顯示增益 (實線) 和相位 (虛線)。



位。圖 3c 和 3d 顯示了 $40 \text{ kHz} \pm 10 \text{ mV AC}$ 注入的增益和相位。

頻率掃描以及 B-C 和 A-C 之間的增益和相位測量產生整個閉迴路波德圖。如摘要中所述，這通常是在工作台上使用一台昂貴的網路分析儀來完成的。在 LTspice 中也可進行這種掃描，如圖 4 所示。透過與使用網路分析儀的工作台測試結果進行

比較，證實這些結果 (見圖 8)。

在 LTspice 中創建全部增益和相位掃描和波德圖

要在 LTspice 中為控制迴路創建全部波德圖、增益和相位的圖形掃描，請按照下列步驟操作。

第 1 步：創建交流電注入源

在 LTspice 中，插入 $\pm 10 \text{ mV AC}$ 注入電壓源和注入電阻，並標記節點 A，B 和 C，如圖 2 所示。交流電壓源值 SINE (0 10m {Freq}) 設定 10 mV 峰值並掃描頻率。用戶可以使用 1 mV 至 20 mV 的正弦峰值來進行計算。注意：許多 LED 驅動器的感應電壓分別為 250 mV 和 100 mV。較高的注入雜訊會產生 LED 電流調節誤差。

第2步：增加 Math

在原理圖上將測量描述作為 .sp (SPICE) 指令插入。這些指令執行傅立葉變換公式，並以 dB 和相位計算 LED 驅動器的複數開迴增益和相位。

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：設定測量參數

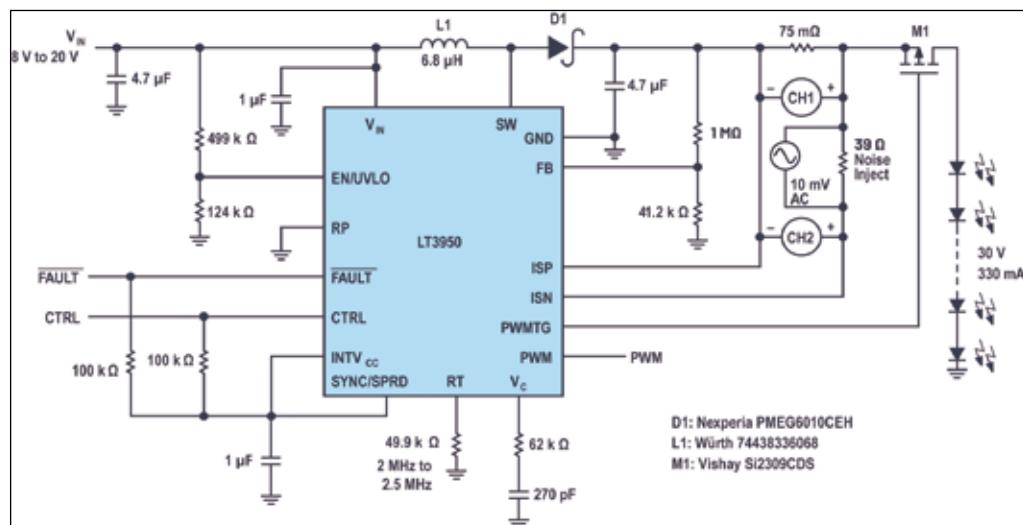
還需要一些小的指令。首先，為進行正確的測量，電路必須處於模擬的穩定狀態（啓動後）。調整 t0，或測量的開始時間和停止時間。透過模擬和觀察啓動時間來估算或得出開始時間。達到穩定狀態後，停止時間定為

圖 5: 網路分析儀的 LED 驅動器控制迴路波德圖測量設定。

10/freq，即 10 個週期，透過對每個頻率的 10 個週期求平均值來減少誤差。

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：設定頻率採樣步長和範圍

step 命令設定執行分析的頻率解析度和範圍。本例中，使用每倍頻程 3 點的解析度，模擬 1 kHz 到 1 MHz。波德圖測量可以精準到 fSW/2，頻率上限設定為系統切換頻率的一半。顯然，點越多，解析度越高，模擬時間越長。每倍頻程 3 點是最低的解析度，但以最小解析度運行模擬可節省一些時間。從總體設計週期看，5 分鐘的模擬比設計、組裝和測試印刷電路板快幾個數量級。基於這點，以更高的解析度運行，例如每倍頻程 5 點或以上，產生更完整且更容易查看的結果。

第5步：運行模擬

這會比較直覺，但 LTspice 需要多個步驟製作波德圖。第一步是運行模擬，暫不產生圖，只顯示正常範圍的電壓和電流測量值。按照以下步驟產生成波德圖。

第6步：製作波德圖

按右鍵原理圖視窗，打開「SPICE 錯誤日誌」，選擇 Plot .step'ed .meas data。從「畫圖設定目錄」中選擇「可見曲線」，然後選擇「增益」來繪製資料。或者，可透過按一下檔案，然後選擇將資料匯出為文本，產生波德資料的 CSV 檔，匯出測量資料。

在模擬之後，使用網路分析儀進行波德圖確認

控制迴路的模擬不像真實的可靠，它不能完全保證迴路的穩定性和餘裕。在設計過程的某個階段，應在實驗室使用網路分析儀驗證控制迴路。

LTspice 中產生的波德圖可以與網路分析儀的波德圖測量結果比較。類似放真，透過將雜訊注入回饋迴路並測量和處理 A-B 和 A-C 的增益和相位來捕捉實際的迴路測量原理圖和照片如圖 5 至圖 7 所示。

Ltspice 模擬結果顯示與網路分析儀資料有很強的相關性，證明 LTspice 是 LED 驅動器設計中的有效工具——產生大概的參考，幫助工程師縮小元件選擇範圍。較低頻率下的增益和相位與硬體非常相

圖 6: Venable System Model 5060A 老式網路分析儀，用於高邊浮動雜訊注入和 LED 驅動器的測量。



圖 7: LT3950 LED 驅動器上的雜訊注入和測量點。

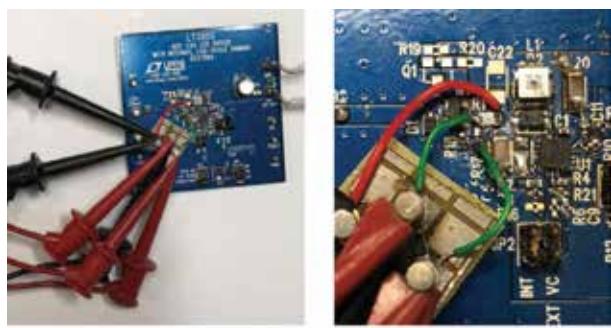
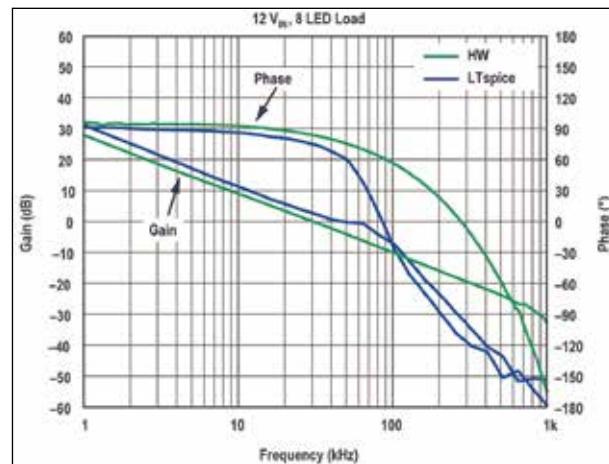


表 1: LT3950 LED 驅動器的波德圖測量資料比較，LTspice vs. 網路分析儀

測試設定	交越頻率 (kHz)	增益餘裕 (dB)	相位邊界 (°)
網路分析儀，8 V _{IN}	16.75	17.47	83.96
LTspice，8 V _{IN}	15.8	13.79	71.23
網路分析儀，12 V _{IN}	30.41	18.71	83.73
LTspice，12 V _{IN}	47.36	5.04	62.29

圖 8: DC2788A 展示電路板上的 LT3950 LED 驅動器的波德圖。透過 LTspice 模擬產生的圖(藍線)與使用網路分析儀產生的圖(綠線)相關性強。



近，較高頻率下的模擬資料和硬體資料之間的差異更大。這可能代表了對高頻極點、零點、寄生電感、電容器和等效串聯電阻建模的挑戰。

結論

LTspice 建模用於測量控制迴路增益和相位，產生 LED 驅動器的波德圖。Ltspice 模擬資料的精準度取決於所使用的 SPICE 模型的精準度，精準地建模每個元件以解決現實情況會增加模擬時間。就 LED 驅動器設計而言，沒有完善的元件建模，LTspice 資料也可用於相對較快地縮小元件範圍並預測總體電路性能。模擬有助於在轉換到硬體設計之前指導設計工程師，節省總體設計階段。大致選擇元件後，使用內建板和網路分析儀的測量可以確認或對比模擬結果，並以此作為開發期間硬體驗證的一種手段。

參考電路

¹ Gabino Alonso. "LTspice : 產生 SMPS 波德圖的基本步驟 ." Analog Devices, Inc: <https://www.analog.com/cn/technical-articles/ltspace-basic-steps-in-generating-a-bode-plot-of-smps.html> CTA