

高效率 LED 驅動電源設計

作者：德州儀器 Robert Kollman

摘要

本文提供 LED 特性及驅動電源優缺點的概要說明。文中將介紹數種常見的電源供應應用電路，並且詳細說明其閉迴路設計。本文亦討論 LED 調光電路，同時介紹兩種調光電路設計方式。

介紹

隨著 LED 生產成本下降，越來越多應用開始採用這類元件，包括手持裝置、汽車電子、和建築照明等。LED 擁有高可靠性、良好效率和超快響應速度，所以很適合做為照明光源。雖然白熾燈泡的成本很低，更換費用卻可能很昂貴。街燈就是很好的例子，更換一個故障的燈泡往往需要出動多位人員和一輛卡車，LED 照明的使用壽命在照明應用中即享有某些成本優勢。也因為如此，儘管 LED 和白熾燈泡的效率大致相等，許多街燈就採用可靠性更高且更省電 LED，捨棄白熾燈泡。

白熾燈雖能發出連續光譜，卻常用於交通號誌等只需綠光、紅光和黃光的場合。這類應用須在白熾燈外加裝一個特定顏色的濾片，但它會造成六成的光能浪費。LED 則能產生特定顏色的光，而且只要接通電源即可立即發亮，不像白熾燈需要 200 毫秒的反應時間，因此汽車產業早就將 LED 用於剎車燈。另外，DLP 視訊應用也以 LED 做為光源，利用高速開關的 LED 取代原有機械組件。

LED 的 I-V 特性

圖 1 是典型 InGaAlP LED 的順向電壓特性。LED 電路模型可表示為一個電壓源串聯一個電阻，這個簡單模型與實際測量結果很吻合。電壓源為負溫度係數，因此順向電壓會隨著接面溫度升高而下降。InGaAlP LED (黃色與琥珀紅) 的溫度係數在 -3.0mV/K 和 -5.2mV/K 之間，InGaN LED (藍、綠和白色) 則介於 -3.6mV/K 和 -5.2mV/K 之間。負溫度係數是造成 LED 很難並聯的原因之一，因為越熱的元件會汲取越多的電流，越多的電流又會讓它的溫度進一步升高，最後就變成熱失控。

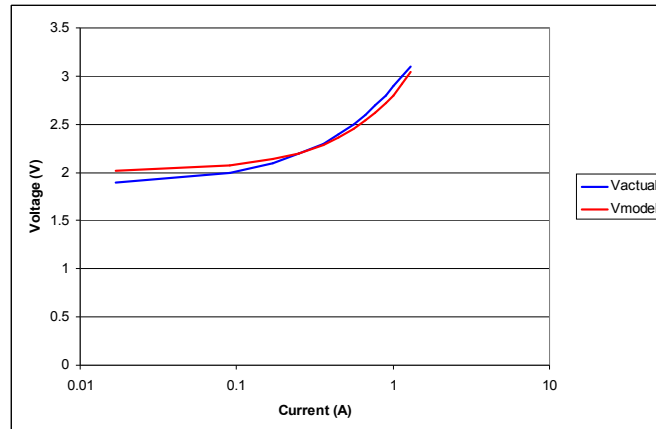


圖 1：以電壓源和串聯電阻做為 LED 電路模型後得到的 I-V 特性曲線

圖 2 是輸出光強度 (光通量) 與操作電流的關係，可以看出輸出光強度與二極體電流的關係很密切，只要改變順向電流就能調整 LED 的亮度。另外，這條曲線在電流較小時很像是一條直線，但其斜率在電流升高時會變得較小。這表示當電流較小時，只要二極體電流加倍就會讓輸出光強度加倍。電流較大時則非如此，此時電流加倍只會讓輸出光強度提高八成。這項特性對 LED 很重要，因為它是由交換式電源所驅動，所以可能會遇到很大的漣波電流。其實電源供應的成本在某種程度上就是由所允許的電流決定：漣波電流越大，電源供應的成本就越低，只不過 LED 的輸出光強度也會受到影響。

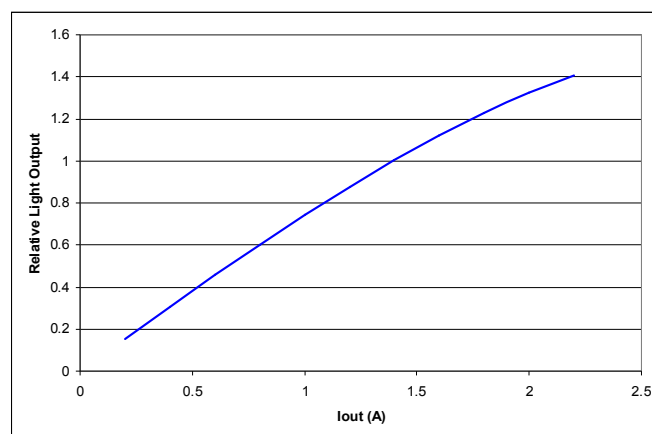


圖 2：LED 效率在電流超過 1A 後開始下降

圖 3 是把三角漣波電流加到直流輸出電流後，輸出光強度減少的情形。由於漣波電流的頻率在多數情形下都遠超過人眼所能分辨的 80Hz，再加上人眼對光強度的反應又呈現指數

關係，只要光強度減少不超過 20%就不會被發現，因此就算 LED 電流的漣波很大，光強度也不會明顯減弱。

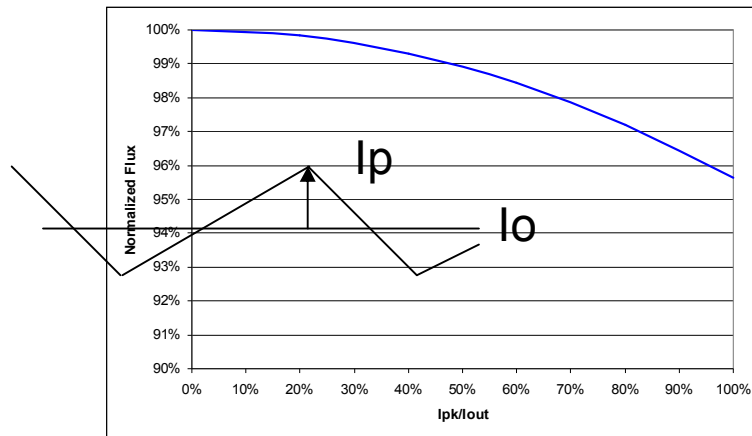


圖 3：漣波電流造成 LED 輸出光強度略為下降

漣波電流還會增加 LED 耗電量，造成接面溫度上升，並對 LED 的使用壽命產生很大影響。圖 4 顯示 LED 輸出光強度與時間及接面溫度的關係，我們設定 80%的輸出光強度為 LED 的使用壽命，則從圖裡可看出當溫度從 74°C降至 63°C時，LED 使用壽命會從 10,000 小時增加為 25,000 小時。

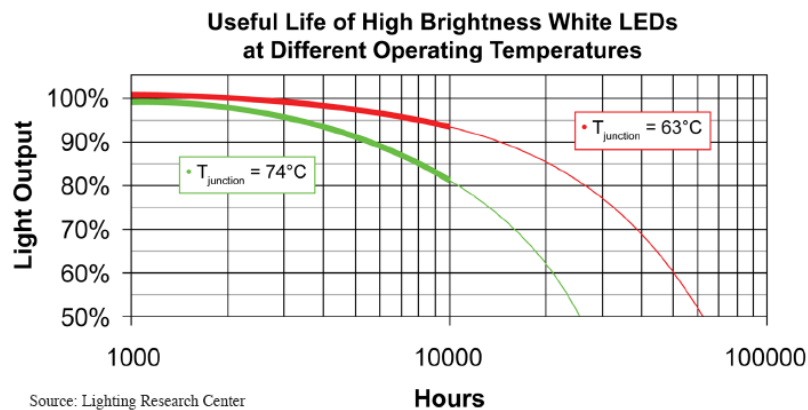


圖 4：接面溫度升高會縮短 LED 的使用壽命

圖 5 是漣波電流造成 LED 功耗增加的情形。由於漣波頻率相較於 LED 的熱時間常數算是很高，因此就算漣波電流很大（以及峰值功耗很大）也不會影響峰值接面溫度 – 這個溫度主要是由平均功耗決定。LED 的大部份電壓降就像是一個電壓源，所以電流波形不會對

功耗造成影響。然而電壓降中仍會有某些電阻分量，這部份的功耗等於電阻值乘以均方根電流的平方。

從圖 5 還能發現就算漣波電流很高，也不會對 LED 功耗造成太大影響。舉例來說，當漣波電流達到輸出電流的一半時，耗電量只會增加不到 5%。但若漣波電流遠遠超出這個水準，設計人員就必須減少電源提供的直流電流，避免接面溫度升高而影響元件壽命。一個簡單的經驗法則是：接面溫度每降低 10°C ，半導體元件壽命就會延長一倍。另外，多數設計由於受到電感的限制，都會儘量降低漣波電流，因為大部份電感只能應付 20% 以下的 I_{pk}/I_{out} 漣波電流比。

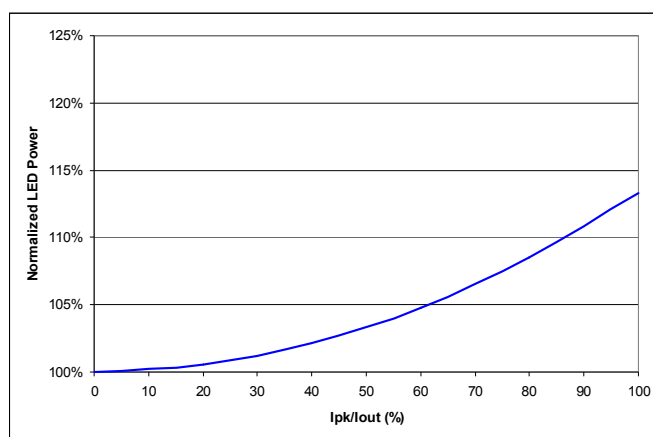


圖 5：漣波電流導致 LED 耗電增加

典型應用

LED 電流常由安定電阻或線性穩壓器控制，但本文主要討論交換式穩壓器。LED 驅動架構基本上可分為降壓、升壓和升降壓等三種類型，實際架構則應由輸入電壓與輸出電壓的關係決定。

如果輸出電壓永遠低於輸入電壓，則可採用圖 6 所示的降壓穩壓器。在此電路裡，輸出濾波電感 $L1$ 的平均電壓是由功率開關的負載週期所控制。TPS5430 內含的 FET 開關導通時會將輸入電壓連接到電感 $L1$ 並產生電流，逆向電壓保護二極體 $D2$ 則會在開關截止時提供另一條電流路徑。 $L1$ 電感可以穩定 LED 電流，因為電路會透過電阻監控 LED 電流，然後比較電阻電壓與控制元件內部的參考電壓以判斷電流大小：如果電流太小，就增加功率開關的負載週期來提高 $L1$ 電感的平均電壓，以便讓 LED 電流升高。這個电路的工作效率

很高，因為功率開關、逆向電壓保護二極和電流感測電阻的電壓降都很小。

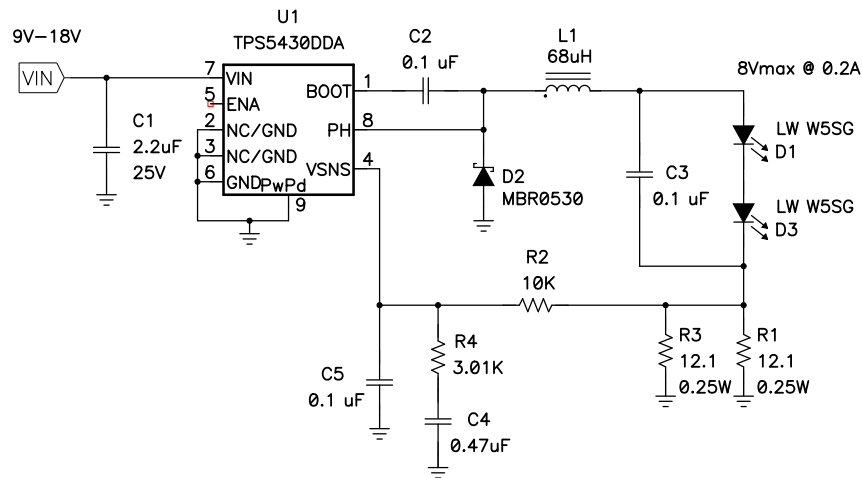


圖 6：降壓式 LED 驅動器會將輸入電壓轉換為較低電壓

如果輸出電壓永遠大於輸入電壓，圖 7 所示的升壓轉換架構就是最佳選擇。這個設計除了控制電路外，同樣會使用內含功率開關的元件 U1。功率開關導通時，電流會通過電感到地。開關截止時，U1 接腳 1 的電壓會上升直到 D1 導通，電感也會經由輸出電容 C3 和多個串聯的 LED 開始放電。多數應用會利用 C3 穩定 LED 電流，若沒有該電容，LED 電流會變成在零與電感電流之間交替切換的不連續電流，不僅會降低 LED 的亮度，還會產生更多熱量而縮短 LED 壽命。此電路也和前面一樣利用電阻感測 LED 電流，再根據結果調整負載週期。注意此架構很大的缺點是沒有提供短路保護，輸出端短路會造成龐大電流通過電感與二極體，將導致電路故障或輸入電壓大幅下降。

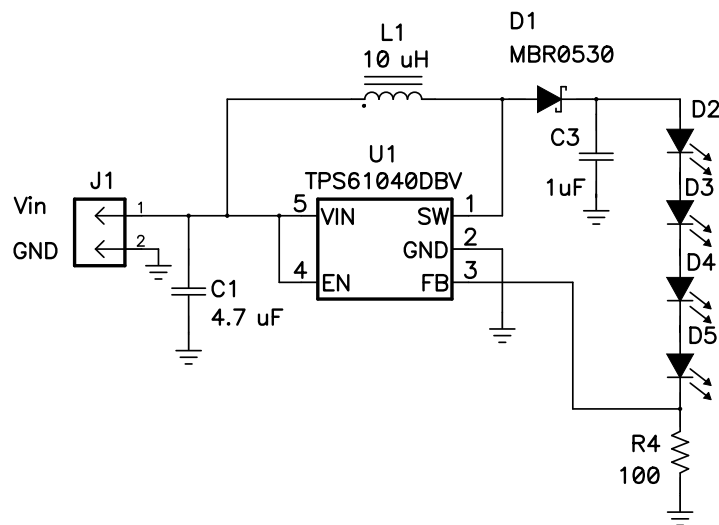


圖 7：整合式升壓 LED 驅動器將輸入電壓轉換為高電壓

如果輸入電壓的變動範圍很大，有時高於輸出電壓，有時又低於輸出電壓，那麼單純的降壓或升壓架構就不適用。除此之外，升壓應用還可能需要短路保護功能。在此狀況下，設計人員應採用圖 8 所示的升降壓架構。這個電路與升壓轉換架構很類似，會在功率開關導通時建立電感電流，等到功率開關停止導通，電感電流就會通過輸出電容和 LED。這種設計與升壓轉換架構的區別在於輸出電壓不是正值，而是負電壓。此架構還能在輸出短路時將開關 Q1 切斷，所以可以避免升壓架構發生的短路問題。此電路的另一特點是儘管輸出為負電壓，感測電路卻不需執行電壓位準轉換 – 因為控制元件的地線連接到負輸出端，並直接測量感測電阻 R100 兩端的電壓。圖 8 雖然只有 1 個 LED，實際應用卻可串聯多顆。另外要注意的是，輸入電壓與輸出電壓的總和不能超過控制元件的最大電壓額定值。

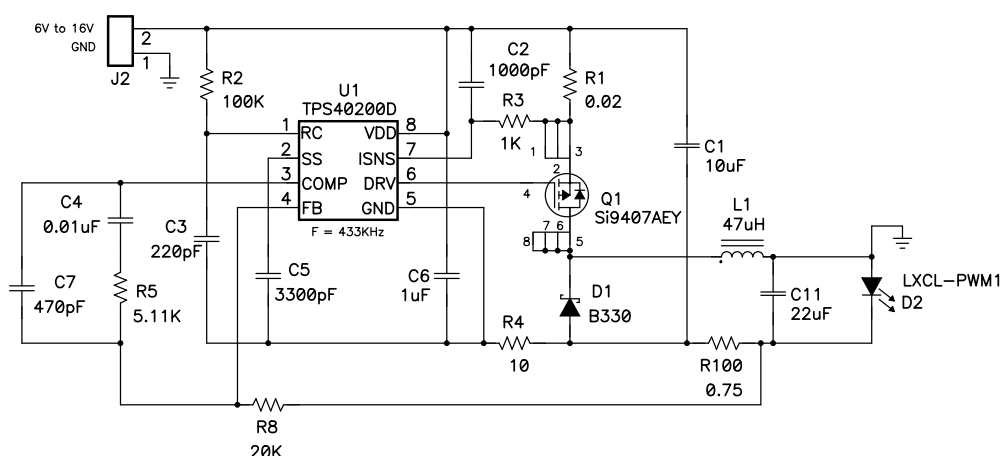


圖 8：升降壓架構支援很大的輸入電壓範圍

控制迴路設計

LED 電源供應的電流迴路設計要比傳統電源供應的電壓迴路簡單。電流迴路的複雜性是由輸出濾波架構決定，圖 9 就是三種常見架構，分別是單純的電感濾波器 (A)、典型的電源供應濾波器 (B) 和改良型濾波器設計 (C)。

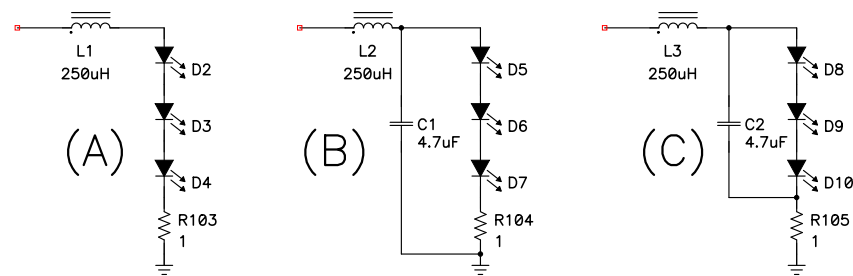


圖 9：三種不同的輸出濾波架構

本文為每個功率級電路建立簡單的 P-Spice 模型，以說明其控制特性的個別差異。其中降壓轉換功率 FET 與二極體的開關動作由一個 10 倍增益的壓控電壓源代表，LED 由一個 3Ω 電阻串聯 6V 電壓源代表，LED 與接地之間還有一個 1Ω 的電流感測電阻。模擬結果則如圖 10 所示。

電路 A 是相當穩定的一階系統響應，其中直流增益是由壓控電壓源、LED 阻抗所構成的分壓器以及電流感測電阻所決定，系統極點則由輸出電感與電路阻抗決定。補償電路設計也很簡單，只要使用第二類放大器即可 (Type 2 amplifier)。

電路 B 由於包含輸出電容，所以會有二階響應。增加輸出電容是因為某些應用在電磁干擾或散熱因素的考量下，不能容忍 LED 出現太大的漣波電流，因此需要輸出電容來消除漣波電流。這個電路的直流增益與前面的電路相同，但它會在輸出電感和電容所決定的頻率點上產生一對複數極點。由於濾波電路的總相位移為 180° ，因此補償電路設計必須謹慎以免系統不穩定。補償電路設計與採用第三類放大器的傳統電壓模式電源供應很類似，但比電路 A 多出兩顆零件和輸出電容。

電路 C 則會重新安排輸出電容的位置，使電路補償更容易。LED 兩端的漣波電壓與電路 B 很類似，只不過電感漣波電流會通過電流感測電阻 R105，這在計算功耗時必須列入考慮。此電路的補償設計幾乎和電路 A 同樣簡單，直流增益也與前面兩種電路相同。電路共有 1 個零點和 2 個極點，零點由電容和 LED 串聯電阻產生，第一個極點由輸出電容和電流感測電阻決定，第二個極點由電流感測電阻和輸出電感決定。當頻率很高時，此電路的響應與電路 A 相同。

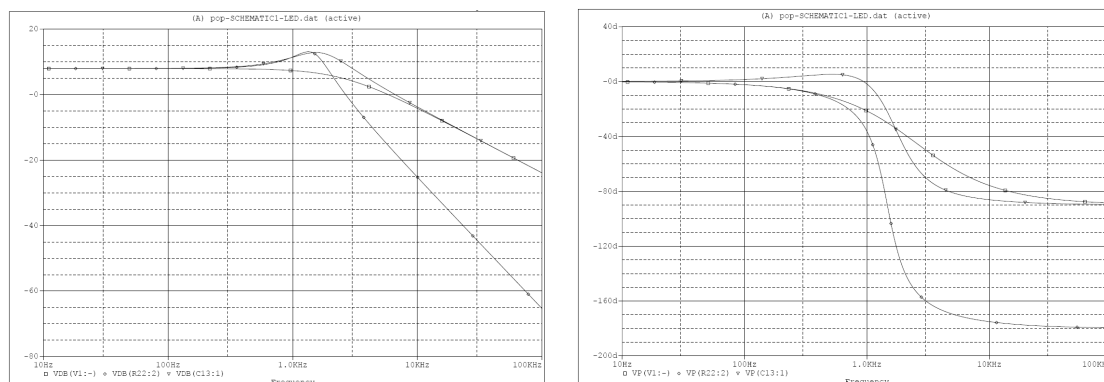


圖 10：三種濾波器架構的增益與相位圖

調光

許多應用都需要 LED 調光功能，像是顯示器亮度控制和建築照明調整。LED 調光方式有兩種，一種是減少 LED 電流，另一種是讓 LED 快速導通和截止。由於輸出光強度不全然與電流成正比，LED 光譜在電流低於額定值時還常會移動，所以減少 LED 電流不是很有效率的做法。另外，人類的亮度感受還與光強度成指數關係，需大幅改變電流才能達到調光效果，這對電路設計造成很大影響，例如電路容差 (circuit tolerance) 就能讓 3% 的滿負載電流誤差在 10% 負載時變為 30% 以上的誤差。

電流波形脈衝寬度調變 (PWM) 雖然提供更精確的亮度調整，但響應速度要特別注意，譬如照明和顯示器應用就必須讓 PWM 速度超過 100Hz，否則看起來會有閃爍的感覺。假設 PWM 頻率為 100Hz，那麼 10% 的脈衝寬度就已進入毫秒範圍，是故電源供應必須提供 10kHz 以上的頻寬。圖 9 的 A 和 C 簡單迴路都能輕易達到此要求。圖 11 是包含 PWM 調光功能的降壓轉換功率級電路，會不停接通和切斷 LED 與電路的連線。這種架構讓控制迴路永遠處於工作狀態，故能提供非常快速的暫態響應 (圖 12)。

