

別讓回饋迴路失效：

正確偏置光耦合器！

■作者：Hermogenes Escala / ADI 應用工程師

光耦合器對開關電源 (SMPS) 設計非常重要，其使得訊號能夠安全、可靠地跨越電氣隔離邊界傳輸。而光耦合器的性能取決於適當的偏置及在回饋控制迴路內的正確整合；配置錯誤會導致不穩定、瞬態響應不佳和調節性能下降。本系列文章分為兩部分來探討 SMPS 中光耦合器的技術實現。第一部分討論關鍵工作原理，包括 LED 和光電電晶體偏置、電流傳輸比 (CTR) 的選擇及補償網路的設計，這些層面對於保持控制迴路精度和訊號完整性非常重要。

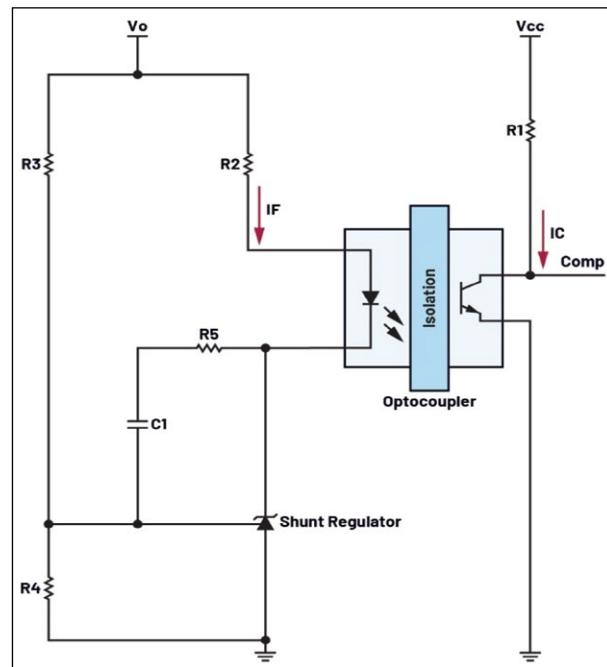
引言

在隔離型開關電源 (SMPS) 架構中，從輸出 (次級) 側到輸入 (初級) 側的回饋必須在不影響電氣隔離的情況下進行傳輸。為了實現此一目標，通常的做法是將光耦合器與精密分流調節器 (如 LT1431) 組合使用。分流調節器透過電阻分壓器來監控 SMPS 的輸出電壓，並根據與期望設定點的偏差，調整流過光耦合器發光二極體 (LED) 的電流。

LED 發出的光與正向電流 (IF) 成比例，光訊號由初級側的光電電晶體進行檢測。該光電電晶體負責調變控制訊號 (通常位於脈寬調變 (PWM) 控制器的補償接腳 (COMP))，進而影響開關控制器的工作週期。這種閉迴路回饋機制可確保輸出電壓在變化的負載和輸入條件下保持穩定。

此迴路的性能對光耦合器的偏置和補償網

圖 1：回饋電路中光耦合器的典型連接



路的設計非常敏感。不適當的偏置可能會引起非線性、飽和或回應遲緩，而補償調整不當可能會導致不穩定或振盪。

什麼是光耦合器偏置？

光耦合器的偏置是指設定正確的工作條件，具體而言是設定流過 LED 的正向電流及光電電晶體的集電極 - 發射極電壓和電流，使得光耦合器在線性區域內工作。這對於回饋系統非常重要，因為光耦合器必須跨越隔離閘準確傳輸類比訊號。在隔離型 SMPS 中，光耦合器是次級側電壓感測與初級側 PWM 控制器之間

的橋樑。如果偏置不正確，回饋訊號就會失真，導致電壓調節不佳或不穩定。圖 1 展示了光耦合器的內部結構及其在 SMPS 中用於回饋元件時的相關外部元件。

1. LED 側——驅動光訊號 (輸入級)

在採用隔離回饋的 SMPS 中，光耦合器的 LED 側通常由分流調節器驅動，根據輸出電壓來調節 LED 的正向電流。此正向電流是一個關鍵控制參數，其決定了 LED 發射光的強度，進而控制次級側光電電晶體的導通水準。LED 在正偏區域內工作，其光輸出隨 IF 的提高而提高。推薦的工作電流範圍通常為 1 mA 至 10 mA，但不同型號可能有所差異。

工作電流低於此範圍會導致光功率不足，進而造成光電電晶體啓動不充分，回饋調節不佳。另一方面，工作電流超過上限會產生熱應力，縮短 LED 壽命，並因老化加速和接面發熱而降低光學效率。在實際設計中，LED 電流由光耦合器 LED 陽極處的電阻 (R2) 設定；當分流調節器回應輸出電壓的變化而調整其陰極電流時，LED 電流會動態調整。

迴路設計中還必須考慮 LED 的正向壓降，尤其是在計算低壓軌的餘裕時。在高性能或快速瞬變 SMPS 的設計中，為了確保光耦合器回饋路徑的準確性、低雜訊和熱可靠性，保持穩定且精確受控的 IF 非常重要。

2. 電流傳輸比

電流傳輸比 (CTR) 是選擇光耦合器時需要考慮的另一個參數。其指的是光電電晶體輸出電流與 LED 輸入電流之比，通常以百分比表示。例如，100% 的 CTR 表示 1 mA 的 LED 電流會導致光電電晶體輸出 1 mA 的集電極電流。CTR 不是一個固定的值，其隨溫度、LED 電流和元件老化而變化。例如，PC817D 光耦合器

的 CTR 在 50% 至 600% 之間，具體取決於產品型號和工作條件。設計人員必須考慮要保證的最小 CTR，以確保系統在最壞情況下也能可靠運行。

選擇 CTR 時的關鍵考慮因素

針對最小 CTR 進行設計，可確保回饋迴路即使在最壞情況下也能正常工作。CTR 可能因元件不同和時間推移而發生顯著變化，圍繞預計的最小 CTR 進行設計可保證即使光耦合器性能下降或在其規格邊緣運行，光電電晶體也會提供足夠的電流來驅動 PWM 控制器的 COMP 接腳。

溫度漂移是另一個重要因素，因為 CTR 通常隨著溫度升高而降低。如果不考慮這種漂移，回饋迴路在高溫下可能會失去增益，導致回應遲緩，甚至喪失調節功能。設計人員必須確保迴路具有足夠的餘裕，能夠在整個工作溫度範圍內保持控制。

隨著時間推移，老化效應也會導致 CTR 降低，尤其是在以大電流驅動 LED 的情況下。這種退化會導致給定電流下 LED 發出的光量減少，進而削弱回饋訊號。在產品的整個使用壽命期間，這可能會導致補償不足或不穩定，除非初始設計中包含了足夠的餘裕。

最後，線性度對於迴路行為的可預測性十分重要。如果光耦合器工作在非線性區域，即 LED 電流的微小變化會導致光電電晶體電流發生不成比例的變化，回饋訊號就會失真。這種非線性會使補償設計複雜化，並降低輸出電壓調節的精度和穩定性。

設計人員透過仔細考慮這些因素，可確保基於光耦合器的回饋迴路在產品的整個使用壽命期間和不同環境條件下均能保持穩固、準確和穩定。對於回饋應用，更嚴格的 CTR 容差（如 100% 至 200%）是更好的選擇，有助於維持一

致的迴路增益和迴路行為的可預測性。

3. 光電電晶體側——接收訊號(輸出級)

光電電晶體是將內部 LED 的光訊號轉換為電輸出的關鍵元件。光電電晶體通常採用共發射極配置，其發射極接地，其集電極連接到上拉電阻 (R1)，由此決定輸出電壓擺幅。當光耦合器內部的 LED 正偏時，其會發出紅外光，照射到光電電晶體的基極區域，使其導通。產生的集電極電流 (IC) 與 LED 的正向電流和元件的 CTR 成比例。

隨著 LED 照度的增強，光電電晶體的導電水準會提高，集電極電壓下降，進而產生低位準輸出訊號。這種行為在隔離型回饋系統中非常重要，例如在 SMPS 中，集電極通常與 COMP 接腳或 PWM 控制器的回饋端相連。此節點的電壓會直接影響控制器的工作週期，進而調節輸出電壓或電流。集電極上的上拉電阻不僅設定電晶體關斷時的高位準輸出電壓，還影響回饋迴路的動態回應。較低的電阻值可以改善回應時間，但可能會降低電壓擺幅，而較高的電阻值會提高擺幅，但代價是轉換速度較慢。此外，光電電晶體的開關速度、飽和特性和關斷狀態下的漏電流都是重要的設計考慮因素，尤其是在高頻或精密應用中。

SMPS 回饋系統中光耦合器的正確偏置，對於確保跨隔離屏障準確傳輸類比訊號非常重要。LED 側必須在其最佳電流範圍內驅動，以保持線性光輸出，避免因過熱而性能下降。在輸出側，光電電晶體必須配置為將光訊號轉換為穩定的電訊號，以便有效控制 PWM 控制器。所選的光耦合器應具有適當且嚴格規定的 CTR，以確保即使在溫度變化和老化的情況下，其也能保持一致的迴路增益。總之，這些考量可確保設計在電源的整個使用壽命期間保持穩

固、穩定、精確的電壓調節。工程師透過遵循產品手冊建議、對迴路進行模擬並在全溫度範圍內進行測試，可確保設計方案性能穩健且可預測。

簡而言之，光耦合器偏置並非只是點亮 LED 燈那麼簡單，而是涉及高速控制系統中關鍵類比鏈路的調校。只有掌握這一點，才能確保 SMPS 設計不僅正常工作，而且可靠高效。

補償網路的設計

在 SMPS 中，補償網路連接到並聯調節器，成為誤差放大器。其對於塑造回饋系統的開迴路頻率響應產生關鍵作用，主要目的是在變化的負載和線路條件下，確保迴路穩定、瞬態響應快速且電壓調節精準。

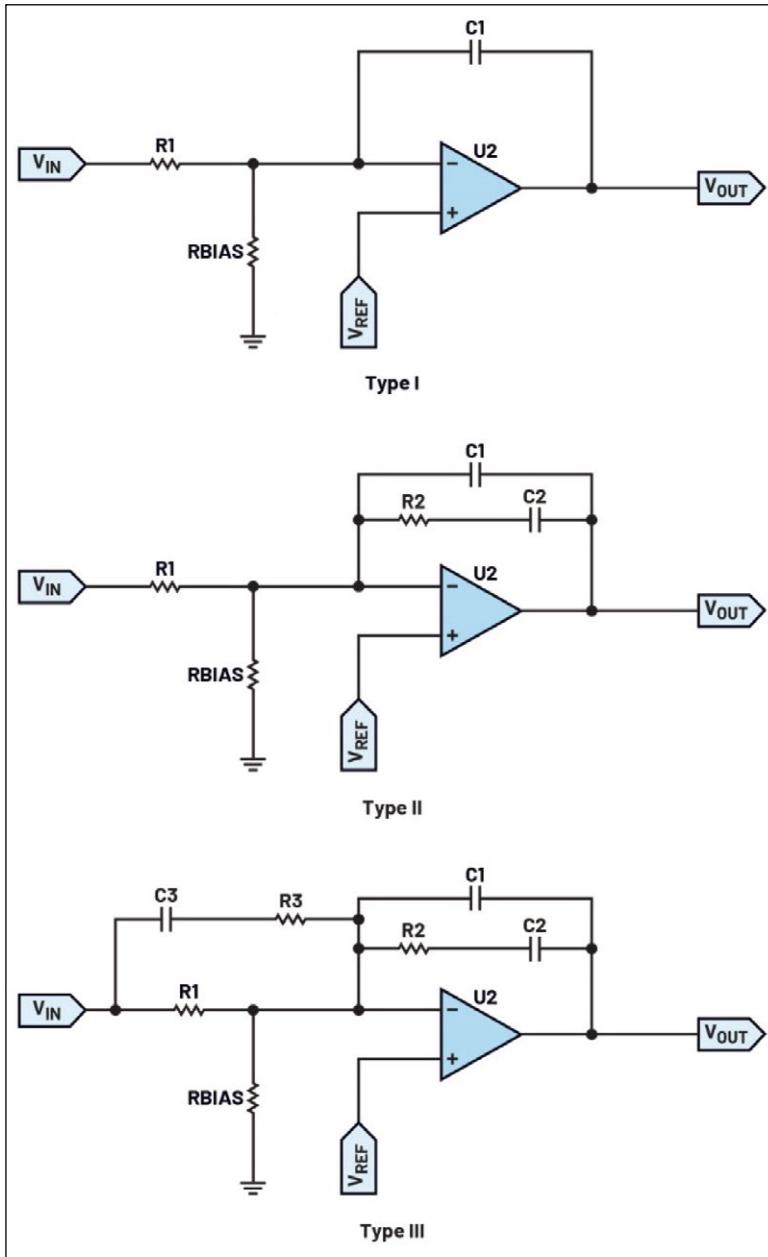
在使用光耦合器和分流調節器的隔離型回饋系統中，回饋路徑會引入額外的動態因素，必須加以謹慎管理。在電源應用中，通用光耦合器的頻寬通常在 20 kHz 至 500 kHz 的範圍內，這會為系統帶來一個低頻極點。同時，分流調節器會增加增益；如果偏置不當，可能會產生非線性行為。這些特性會降低系統的相位餘裕，並可能導致系統不穩定。

為了抵消這些影響，需設計補償網路以引入零點和極點，進而塑造迴路增益和相位。極點和零點較少的補償網路通常適合於中等頻寬和電流模式控制應用。對於需要更高頻寬或採用電壓模式控制的設計，更複雜的補償網路能夠提供更大的相位餘裕，並提升整體設計性能。

補償網路的類型及其影響

在 SMPS 控制迴路中，補償網路用於塑造迴路增益和相位回應，以確保穩定性和快速瞬態性能。這些網路通常在分流調節器中實現；而在非隔離型應用中，則透過 PWM 控制器的

圖 2: 補償網路的類型



COMP 接腳實現。具體的設計基於控制方法(電流模式或電壓模式)及功率級和回饋路徑的動態特性。

如圖 2 所示，在 SMPS 控制設計中，補償技術對於確保迴路穩定性、快速瞬態響應和精準電壓調節非常重要。I 型補償由單個積分器組成，由於其相位提升能力有限且瞬態性能不足，

在 SMPS 中很少使用。其主要適用於本身具有穩定動態特性的系統，例如線性穩壓器，此類系統只需極少的相位校正。II 型補償在積分器旁引入一個零點，非常適合電流模式控制架構。在此類系統中，內部電流迴路貢獻一個主導極點，進而簡化外部電壓迴路。增加的零點可提升相位餘裕並減輕輸出濾波器極點的失穩影響，進而改善迴路頻寬和穩定性。III 型補償包含兩個零點和兩個極點，最為彈性，廣泛用於電壓模式控制系統。其能夠透過精確的迴路整形，實現高交越頻率、嚴格的輸出調節和穩健的穩定性餘裕。通常，零點用於抵消 LC 輸出濾波器形成的雙極點，而極點會衰減高頻增益，進而維護相位餘裕並抑制雜訊。

交越頻率(此時迴路增益等於 1)通常設定為開關頻率的十分之一，以避免與開關諧波相互作用，並保持至少 45° 的相位餘裕。有效的補償可確保回饋迴路迅速回應負載瞬變，而不會出現過沖或振盪，進而在不同工作條件下保持精準調節。此外，迴路頻寬需要精心平衡：既要夠寬以回應負載或輸入電壓的動態變化，又要夠窄以避免放大高頻雜訊或引起不穩定。

設計人員還必須考慮實際存在的非理想因素，例如光耦合器電流傳輸比變化、溫度漂移和元件容差，所有因素都可能顯著影響迴路動態特性和長期可靠性。

實用設計技巧

■利用伯德圖(Bode plot)工具或 SPICE 模型對迴路進行模擬，以檢查增益和相位餘裕，

並在實際電路板設計中進行驗證。

- 應考慮光耦合器頻寬，其會引入低頻極點並限制迴路速度。
- 為元件容差和老化效應預留餘裕。
- 確保交越頻率遠低於開關頻率（通常為 $1/10$ ），以避免其與開關諧波相互作用。
- 使用軟啓動和過電流保護特性，防止啓動期間或故障情況下迴路不穩定。

本系列文章的第二部分將繼續研究隔離型正馳式轉換器中 PWM 控制器和 LT1431 並聯調節器在瞬態負載條件下的動態回應。LTspice 模擬可清晰展現光耦合器偏置和 CTR 對回饋精度和迴路穩定性的影響。文章還將介紹 Coupler i 技術，其是一種高性能替代方案，適合最新的隔離和回饋應用。

結語

光耦合器偏置是隔離型 SMPS 設計中一個關鍵但常被忽視的方面。確保光耦合器的 LED 側和光電電晶體側正確偏置，對於維持線性操作、精準訊號傳輸和長期可靠性非常重要。必須精心考慮正向電流、CTR 和溫度漂移等關鍵參數，以避免不穩定、非線性和性能下降。

補償網路的設計同樣重要，其決定回饋迴路的頻率響應，並確保迴路在變化的負載和線路條件下始終穩定。無論使用 II 型還是 III 型補償，設計人員都必須平衡頻寬、相位餘裕和抗噪能力，實現穩健且靈敏的調節。

掌握光耦合器偏置和補償技術有助於工程師打造出優秀的 SMPS 系統，不僅具備電氣隔離特性，而且還可在實際工況下保持精確性、高效率和強韌性。

Bluetti 新款低碳戶外行動電源採用科思創部分生物基材料

無論是戶外露營、休旅車旅行或露營車生活，行動電源解決方案已從簡單的應急備用電源發展成為各種戶外活動的必備裝備。行動電源和家用儲能品牌鉑陸帝 (Bluetti) 首次發表低碳版本的 Elite 100 戶外行動電源。該產品外殼由含 25% 循環生物質原料的科思創拜本蘭 RE 聚碳酸酯製成，碳足跡較傳統型號減少超過五分之一。此次合作展示了先進材料如何塑造性能、外觀與永續性兼具的新一代行動電源產品。

對鉑陸帝而言，打造與內部零件使用壽命相匹配的設備外殼是一項重大挑戰。其全新磷酸鐵鋰電池可循環充電超過 4000 次，使用壽命長達十年。這意味著其外殼材料即使在極端溫度和紫外線照射等惡劣環境下，依然能夠有效抵禦老化、脆裂和性能退化。安全性方面同樣不容忽視，材料需要在設備運行時耐受高溫，不產生火災隱患。與此同時，鉑陸帝堅定致力於降低產品碳足跡，進一步要求所選材料在滿足上述嚴苛性能標準的基礎上，還需具備出色的永續性。

科思創的拜本蘭聚碳酸酯能夠同時滿足這兩項要求。該材料即使在低溫環境下也能提供優異的抗衝擊強度，並符合 UL 94 V-0 阻燃標準，確保設備安全運行。新款 Elite 100 充電站採用的拜本蘭 RE 不僅具備出色的性能表現，還包含經質量平衡法分配的來自生物廢棄物和生物殘渣的可再生原料，有效減少產品碳足跡。拜本蘭 RE 也是科思創 CQ (循環智慧) 產品系列的一員，帶有 CQ 標識的科思創產品的替代性原材料含量至少為 25%。