

如何使用適應性電源將 PLC 輸出功耗減半

Ahmed Noeman, systems engineer, precision amplifiers

4-20mA 電流迴路是控制系統的通用訊號機制。現場傳送器以 4-20mA 訊號傳送感測器讀數，可編程邏輯控制器 (PLC) 4-20mA 輸出則可控制許多致動器。增加 PLC 模組的通道數量是主要的工業趨勢，但會因功耗而對 PLC 電流輸出模組帶來挑戰。

圖 1 中所示的 PLC 電流輸出通道的輸出級由供應電壓 (V_S) 供電，並連接至外部負載 (R_L)。如果指定的最大 R_L 為 800Ω ，且假設餘裕電壓 (V_H) 為 4V，要驅動 20mA，則 V_S 必須為 $\geq 20V$ 。

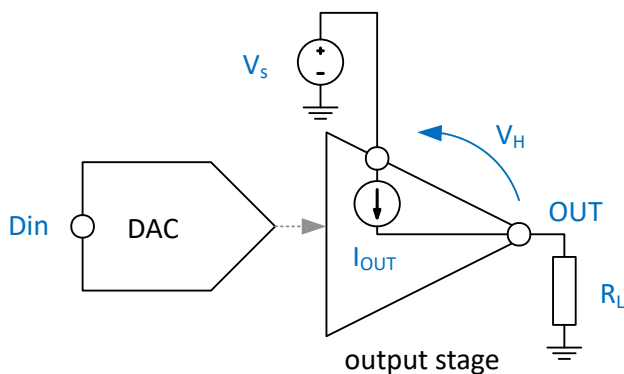


圖 1. 輸出級的功率損耗。

如果您將相同模組連接至小負載或短路，通道內的功率損耗將為 $V_H \times 20mA = 0.4W$ 。此功耗相當高。許多模組會限制最大負載至 600Ω ，以減少整體功率損耗。製造商使用的另一種方法是對模組輸出降額，其中環境溫度決定使用者可啟用的通道數，以及每個通道中的最大電流。

方程式 1 計算輸出級的功率損耗。

$$P_{\text{loss}} = I_{\text{OUT}}(V_S - R_L I_{\text{OUT}}) \quad (1)$$

备注

適應性功率最方便的方法是使用本質上支援適應性功率並整合輸出級的 DAC。TI 的單通道 DAC8771 和四通道 DAC8775 整合每通道降壓升壓轉換器與 12V 至 36V 之間的 V_S ，並在每個通道使用單一外部電感器產生正負可變電源供應（最大跨度為 36V）。

選擇正確的 DC/DC

由於以下要求相互矛盾，尋找適應性電源的正確 DC/DC 轉換器極富挑戰性：

- 低負載時具備高效率 (4-20mA)。由於這通常在脈衝頻率調變 (PFM) 中可行，因此 DC/DC 必須支援此模式。與強制脈衝寬度調變 (PWM) 模式相比，預期效率可提升約 50%。
- 相對較高的峰值電流 ($>0.5A$)，用於快速穩定。峰值電流除以去耦電容，決定了輸出最大電壓變化率。
- V_{OUT} 的範圍為 4V 至 24V，由降壓或升壓轉換器根據輸入電壓實現。
- 相對較小的電感器可縮小解決方案尺寸。需要高切換頻率 ($\geq 300kHz$)。
- 提供小型封裝。

滿足這些要求的部分零件包括：

LMR516xx：65V 輸入、400kHz/1.1MHz 下的 PFM 版本、0.6A/1A 輸出電流

LMR544xx：36V 輸入、1.1MHz 下的 PFM、0.6A/1A 輸出

LMR3650x : 3V-65V 輸入、可調整 200kHz-2.2MHz、0.1A/0.15A 輸出 (若快速穩定並非關鍵)

控制 DC/DC 輸出

非固定 DC/DC 轉換器使用透過高增益放大器維持在恆定參考電壓位準的回饋節點。透過在轉換器輸出電壓和回饋節點之間連接電阻分壓器，您可以控制輸出電壓，如 **圖 3** 中所示。

由於轉換器保持 VREF 固定，因此您可以使用 **方程式 2** 計算 VS。

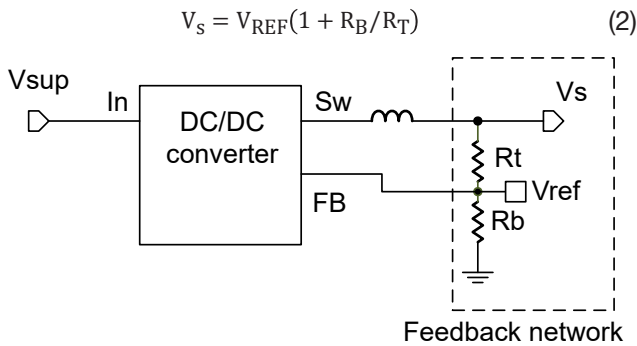


圖 2. DC/DC 轉換器的回饋網路。

輸出電壓的變化需要變更回饋分壓器。**圖 3** 展示了三種改變分壓器的不同方式：可變供應電流 (a)、可變灌電流 (b) 或使用可變電壓來源和電阻器 (c)。**圖 3** 也顯示傳輸函數 (控制變數、電流或電壓與 VS)。

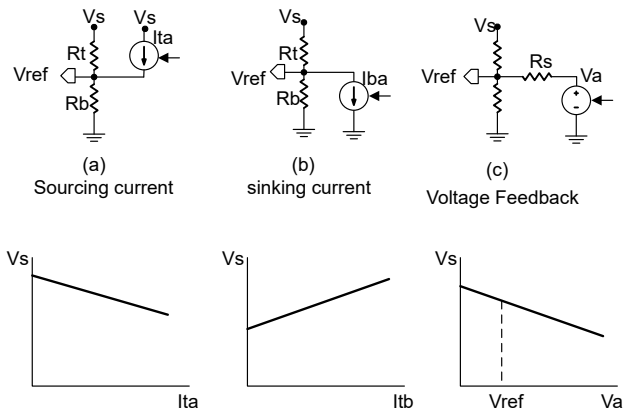


圖 3. 適應性控制電路及其傳輸函數。

在每種情況下，在 VREF 節點上應用克希何夫電流定律可產生案例 a 的傳輸函數：

$$I_{ta} + (V_S - V_{REF})/R_t = V_{REF}/R_b \quad (3)$$

重新排列 **方程式 3** 得出 **方程式 4**：

$$V_S = (1 + R_t/R_b)V_{REF} - I_{ta}R_t \quad (4)$$

方程式 5 顯示案例 b 的類似計算：

$$V_S = (1 + R_t/R_b)V_{REF} + I_{ba}R_t \quad (5)$$

方程式 6 計算案例 c：

$$V_S = (1 + R_t/R_b + R_t/R_s)V_{REF} - R_t/R_s V_a \quad (6)$$

透過回饋針腳上的參考電壓位準和所選的電阻值，簡單的計算可以找出正確的控制變數範圍，以達到所需的 VS 範圍。

使用供應電流的電路範例

圖 4 說明使用運算放大器、PMOS 電晶體 M1 和電阻器的高壓側電流來源構造。方程式 8 計算產生的電流為：

$$I_{ta} = (V_S - V_{OUT})/R_c \quad (7)$$

您需要考慮運算放大器的輸入/輸出和供應範圍，以及 M1 的最大閘極至源極電壓 (VGS)。透過去除運算放大器進一步簡化電路，**方程式 8** 計算產生的電流如下：

$$I_{ta} = (V_S - V_{OUT} + V_{th})/R_c \quad (8)$$

如此可節省電力、成本和面積，但閾值電壓 (Vth) 變化會導致電流不準確。

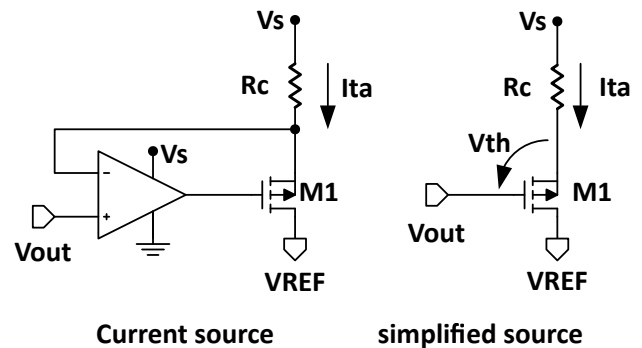


圖 4. 電流來源回饋電路。

TI XTR200 是一款 4-20mA 電流發射器，VS 範圍為 8V 至 60V，VH 為 3V。如果負載高達 800Ω，VOUT 在 20mA 電流下可達 16V。此 VS 必須追蹤輸出。當 VOUT = 0V 時，VS = 8V；當 VOUT = 16V 時，VS = 19V。使用 **方程式 8** 和

方程式 5 計算電阻器 R_t 、 R_b 和 R_c 。您會發現，如果不增加低 V_{OUT} 空餘空間，就無法保持 $V_H > 3V$ 。

數值 $R_t = 80k\Omega$ 、 $R_b = 3k\Omega$ 和 $R_c = 60k\Omega$ 產生如 **圖 5** 中所示的輸出供應曲線。空餘空間取決於輸出，因為此簡單設計僅使用 R_c 作為設計變數。較複雜的電路可以克服此限制。但即使採用這個簡單的電路，與非適應性案例相比，最大功耗仍會降至一半或更少。任何低功耗軌至軌運算放大器（例如 OPA2990）都可用於取代 U_2 ，如 **圖 6** 中所示。

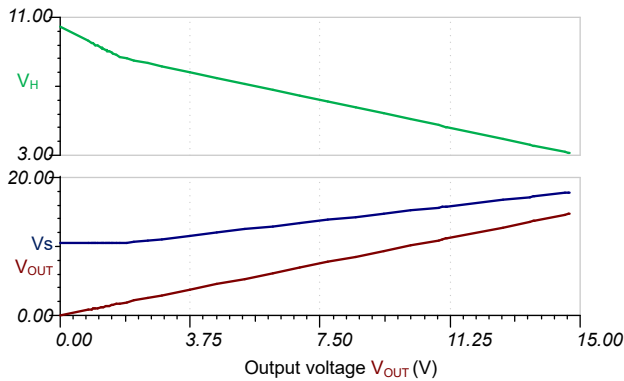


圖 5. V_S - V_{OUT} 、 V_H - V_{OUT} 關係。

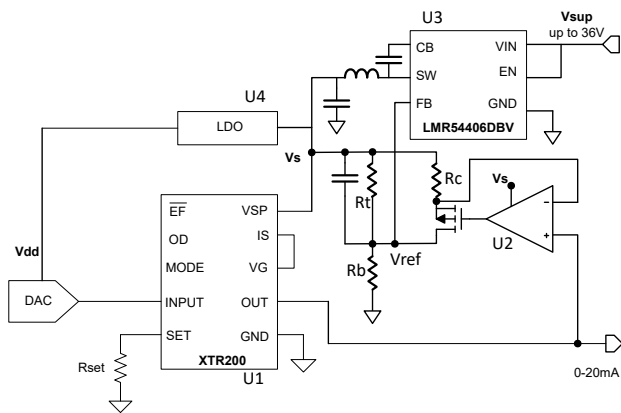


圖 6. 使用 XTR200 和適應性電源的輸出級。

备注

模擬：切換穩壓器模擬時間非常長。以具有類似 V_{REF} 與類似輸入與輸出範圍的低壓降穩壓器 (LDO) 取代 DC/DC，可加快 DC 模擬，並輕鬆建立傳輸函數圖。如果 LDO 具有不同的 V_{REF} ，請在回饋節點和 LDO 的實際回饋節點之間插入電壓控制電壓源 (VCVS)。舉例來說，如果 $V_{REF} = 1.2V$ ，且您想要設計 TI LMR54406 降壓轉換器（其 $V_{REF} = 0.8V$ ），您可新增具 1.5 增益的 VCVS，以將 0.8V 轉換為 1.2V。

使用電壓回饋的電路範例

對於較低的 V_S 應用，請使用我的應用說明「受保護、低雜訊、組合 V-I 輸出級作為類比輸出建構區塊」中所示的輸出級，運作電壓可低至 5V。

圖 7 所示的 LMR51606 DC/DC 簡化電路省略了輸入電容和電磁干擾保護濾波器。降壓轉換器採用最佳化的小型電感器 ($L_1 = 15\mu H$) 和輸出電容 ($22\mu F$)，以提供低漣波並實現快速電源上升。

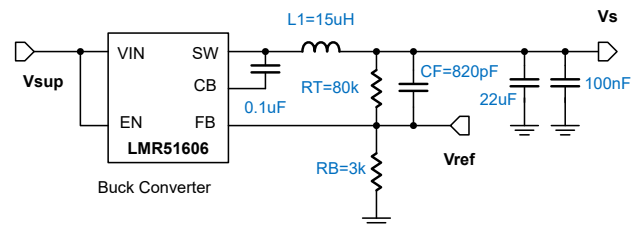


圖 7. DC/DC 電路。

使用 **方程式 2** 計算 R_t 和 R_b 的值，以便在沒有電流注入回饋節點時， $V_S = 20.8V$ ，從而使這些值設定最大供應位準。

為達到更高的效率，**圖 8** 中顯示的差動放大器會感測輸出空餘空間，其中 $V_H = V_S - V_{OUT}$ 。差動放大器的增益為 0.33V/V，因此根據 V_S ，穩定狀態空餘空間介於 3V 至 2.7V 之間。1MΩ 輸入阻抗可將輸出電流的誤差降至低於 0.1%。可以在校準過程中補償此錯誤。

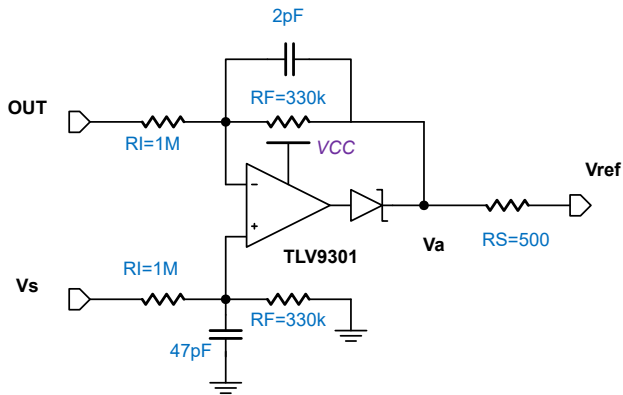


圖 8. 差動放大器。

運算放大器輸出端的二極體可防止供應電流轉為汲取，因此如果運算放大器輸出的電壓低於回饋節點，迴路將會中斷。這將保持由 R_t 和 R_b 設定的 V_S 上限。回饋路徑中的電容器對較大迴路（包含 DC/DC）的動態穩定性至關重要。

圖 9 是簡化的整體電路。

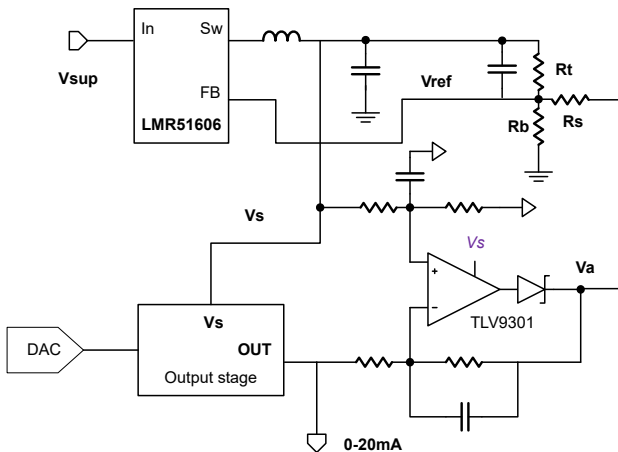


圖 9. 採用差動放大器的簡化適應性電源電路圖。

备注

動態性能：輸出級對 DAC 輸出變化的回應通常很快。相較之下，DC/DC 回應速度則慢得多，且 V_S 無法以相同速度跟隨輸出。限制差動放大器頻寬有助於平順此變化，並讓轉換器適當進行斜坡。此外，若 DAC 本質上不支援電壓轉換速率控制，則需限制 DAC 輸出的電壓轉換速率。您必須在較長期間將大型 DAC 程式碼變更為較小的變更，建立可讓 DC/DC 轉換器在不過衝或振盪的情況下穩定下來的階梯狀 DAC 輸出。

量測與性能

圖 10 顯示不同輸出電流及各種負載的功率損耗。功率損耗的計算方式為 DC/DC 轉換器的輸入功率減去負載的輸出功率。功率損耗絕不超過 180mW，這意味著節能大於 50%。

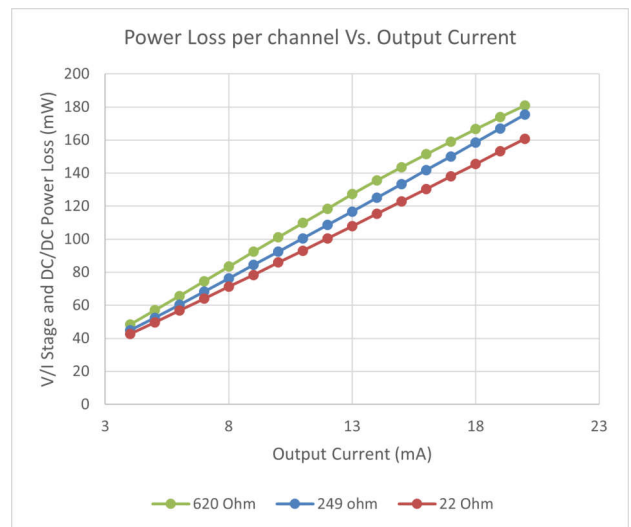


圖 10. 功率損耗與輸出電流的關係。

圖 11 顯示不同電流和負載的效率。DC/DC 轉換器的效率計算方式為轉換器的輸出功率除以輸入功率。效率範圍介於 75% 與 90% 之間。

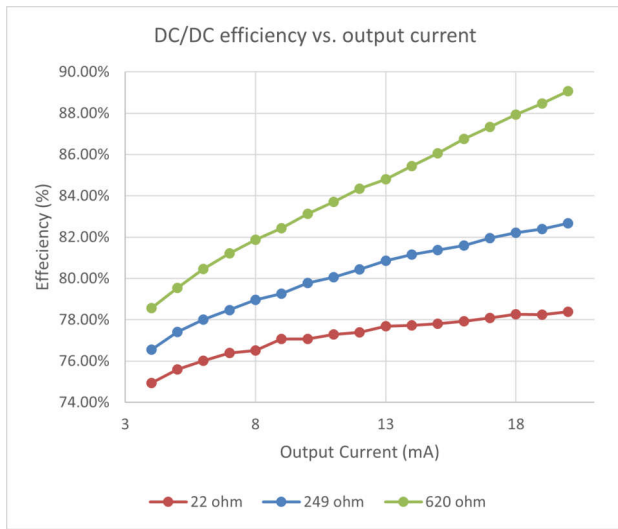


图 11. DC/DC 效率與輸出電流的關係。

精密度與雜訊

高解析度類比轉數位轉換器可測量 DC/DC 漣波對輸出的影響，分別以 4mA 和 20mA 電流、640Ω 負載下轉換 16,000 個取樣。

表 1 總結了雜訊計算和對應的精密度。

輸出	4mA	20mA	單位
平均值	4.019	20.17	mA
均方根 (RMS) 雜訊	325	530	nA
峰間雜訊	2.78	3.51	μA
RMS 解析度	18.2	17.5	位元

表 1. 適應性電路的雜訊性能。

結果顯示，適應性功率不會影響輸出級性能，且可支援 16 位元輸出解析度。

安定時間和動態性能

安定時間和適應性電源迴路的穩定性極為重要。图 12 顯示 200μs 中輸入上升至全刻度，利用輸出級輸入的簡易步進即可獲得穩定的輸出。

图 12 說明 560Ω 負載中的 10V 步進，而至輸出級的全刻度輸入電壓則會超過七個步進至全刻度 2.5V。圖中還顯示了安定時間 <200μs。

由於去耦與輸出電容器需要在電路和外部負載中放電，因此下降邊緣會變緩慢。這不會影響性能，也不重要。

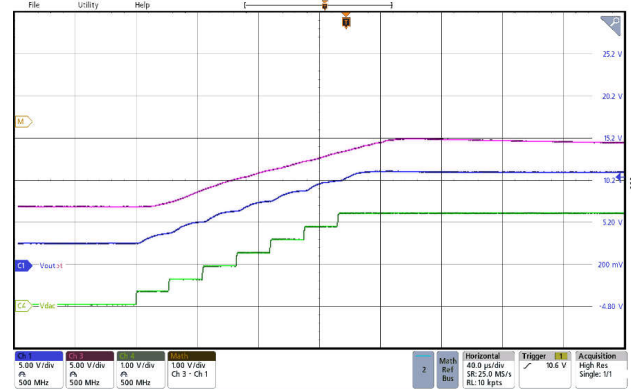


图 12. 輸出級和適應性電源的穩定性能。

結論

測量結果證明，與固定電源實作相比，適應性電源技術可實現電源節約 50% 以上，進而提供切實效益。從 17.5 到 18.2 位元的 RMS 解析度可以證明熱管理改進不會犧牲訊號品質。隨著 PLC 模組持續將更多通道封裝為更小的尺寸，此處介紹的技術會從最佳化策略轉變為新一代工業自動化系統的實用必需品。

其他資源

- 請參閱 TI 開發人員大會示範文稿「[使用動態電壓調節實現系統節能](#)」。
- 查看具有適應性電源管理、功耗低於 1W 的四通道類比輸出模組參考設計。
- 如需更深入了解前饋電容器在增強動態性能方面所起的作用，請閱讀應用報告「[最佳化含前饋電容器的內部補償 DC/DC 轉換器之暫態響應](#)」。

作者簡介

Ahmed Noeman 是德州儀器的系統工程師，專注於為工業應用定義整合解決方案。Ahmed 在半導體領域擁有超過 20 年的經驗，涵蓋系統設計、IC 設計與 IC 驗證等領域。Ahmed 獲得埃及 Ain Shams 大學電氣工程專業的理學碩士 (M.S.) 和理學學士 (B.S.) 學位。

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商標均為其各自所有者的財產。

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](#) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025