

# 運算放大器低功率消耗電路設計攻略

隨著電池供電電子產品的普及，低功率消耗設計成了類比電路設計人員越來越重視的問題。本文中介紹了如何使用低功率消耗運算放大器進行系統設計，同時也分析了具有低電源電壓能力的低功率消耗運算放大器及其應用，並討論如何正確理解運算放大器規格書中的規格參數，綜合考慮電路設計上的節能技術，實現更高效率的元件選型。

■作者：Kevin Chow

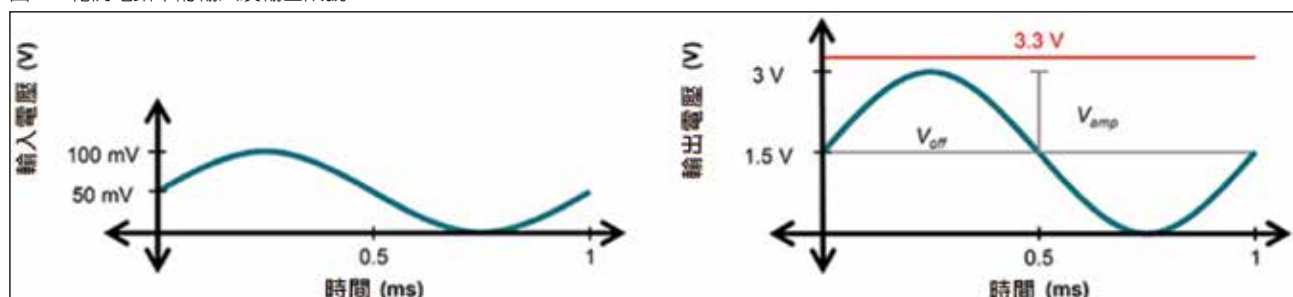
近年來，電池供電電子產品的普及使功率消耗成為類比電路設計人員越來越重視的問題。本文中將介紹如何使用低功率消耗運算放大器進行系統設計，同時也會涉及具有低電源電壓能力的低功率消耗運算放大器及其應用，並討論如何正確理解運算放大器規格書中的規格參數，綜合考慮電路設計上的節能技術，實現更高效率的元件選型。

## 瞭解運算放大器電路中的功率消耗

首先，我們會討論具有低靜態電流 ( $I_Q$ ) 的放大器以及增加回饋網路電阻值與功率消耗的關係。

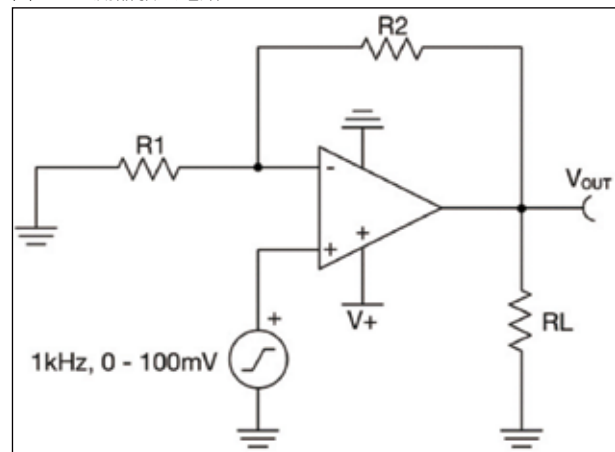
讓我們首先考慮一個可能需要關注功率的範例電路：電池供電的感測器在 1kHz 時產生 50mV 幅度和 50mV 偏移的類正正弦訊號。訊號需要放大到 0V 至 3V 的範圍以進行訊號調節 (圖 1)，同時要盡可能節省電池電量，這將需要增益為 30V/V 的同相放大器配置，如圖 2 所示。那麼，我們應該如何來

圖 1：範例電路中的輸入及輸出訊號



圖片來源：Texas Instruments

圖 2：感測器放大電路



圖片來源：Texas Instruments

最佳化該電路的功率消耗呢？

運算放大器電路的功率消耗由多種因素組成，分別是靜態功率、運算放大器輸出功率和負載功率。靜態功率 (或簡稱  $P_{\text{Quiescent}}$ ) 是保持放大器開啓所需的功率，規格表中一般以  $I_Q$  (靜態電流) 表示，例如下

圖 3：TI OPA391 運算放大器的靜態電流

POWER SUPPLY					
$I_Q$	Quiescent current per amplifier	$V_{CM} = (V_+) - 1.5 V$		24	30
			$T_A = -40^\circ C \text{ to } +125^\circ C^{(1)}$		32
				μA	

圖片來源：Texas Instruments

圖中 Texas Instruments OPA391 規格書中的顯示。

輸出功率 ( $P_{Output}$ ) 是運算放大器輸出級驅動負載時消耗的功率。最後，負載功率 ( $P_{Load}$ ) 是負載本身消耗的功率。

在本例中，我們有一個單電源運算放大器，其正弦輸出訊號具有直流電壓偏移。因此，我們將使用以下等式來計算總平均功率 ( $P_{total,avg}$ )。電源電壓由  $V_+$  表示， $V_{off}$  是輸出訊號的直流偏移， $V_{amp}$  是輸出訊號的幅度， $R_{Load}$  是運算放大器的總負載電阻。需要留意的，平均總功率與  $I_Q$  直接相關成正比，而與  $R_{Load}$  成反比。

$$P_{total,avg} = P_{Quiescent} + P_{Output} + P_{Load} \quad (1)$$

$$P_{Quiescent} = V_+ \times I_Q \quad (2)$$

$$P_{Output} = \frac{(V_+ \times V_{off}) - \frac{V_{amp}^2}{2} - V_{off}^2}{R_{Load}} \quad (3)$$

$$P_{Load} = \frac{\frac{V_{amp}^2}{2} + V_{off}^2}{R_{Load}} \quad (4)$$

$$P_{total,avg} = (V_+ \times I_Q) + \frac{(V_+ \times V_{off}) - \frac{V_{amp}^2}{2} - V_{off}^2}{R_{Load}} + \frac{\frac{V_{amp}^2}{2} + V_{off}^2}{R_{Load}} \quad (5)$$

$$P_{total,avg} = (V_+ \times I_Q) + \frac{(V_+ \times V_{off})}{R_{Load}} \quad (6)$$

## 選擇具有合適 $I_Q$ 的零組件

由於從以上公式 5 和 6 中有多個可變項，在選料時最好只考慮一項。選擇具有低  $I_Q$  的放大器是降低整體功率消耗的最直接策略。當然，在這個過程中有一些權衡。例如，具有較低  $I_Q$  的設備通常具有較低的頻寬、較大的雜訊並且可能更難以穩定。

由於不同類型的運算放大器的  $I_Q$  可能存在倍數級的差異，因此花時間選擇合適的放大器是值得的。以下引用 TI TLV9042、OPA2333、OPA391 和 TLV8802 作比較。單純從數字上的分析，對於需要最大功率效率的應用，TLV8802 將是一個很好的選擇。

## 降低負載網路的電阻值

現在繼續考慮公式 5 和 6 中的其餘項。 $V_{amp}$  項相互抵消，對  $P_{total,avg}$  和  $V_{off}$  沒有影響，通常由應用中預先確定。換句話說，系統無法使用  $V_{off}$  來降低功率消耗。類似地， $V_+$  軌電壓通常由電路中可用的電源電壓設置。另外， $R_{Load}$  也是由應用預先確定的。但是， $R_{Load}$  是包括任何負載輸出的元件，而不僅是負載電阻器  $R_L$ 。在圖 1 所示電路的情況下， $R_{Load}$  將包括  $R_L$  和回饋組件  $R_1$  和  $R_2$ 。因此， $R_{Load}$  將由等式 7 和 8 定義如下。

$$R_{Load} = R_L \parallel (R_1 + R_2) \quad (7)$$

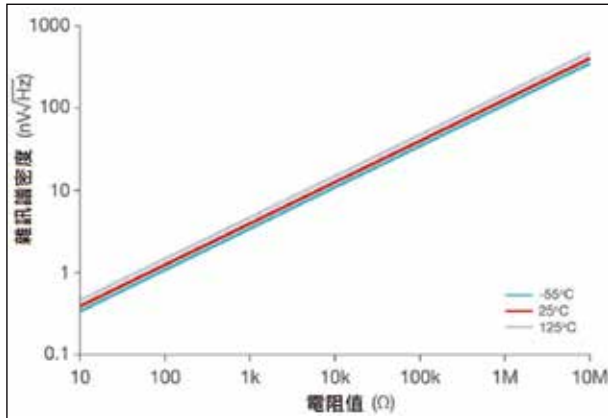
$$R_{Load} = \frac{R_L \times (R_1 + R_2)}{R_L + (R_1 + R_2)} \quad (8)$$

表 1：各類低功率消耗運算放大器比較表

典型規格	TLV9042	OPA2333	OPA391	TLV8802
電源電壓 ( $V_S$ )	1.2V – 5.5V	1.8V – 5.5V	1.7V – 5.5V	1.7V - 5.5V
頻寬 (GBW)	350kHz	350kHz	1 MHz	6kHz
25°C 時每通道的典型 $I_Q$	10μA	17μA	22μA	320nA
25°C 時每通道的最大 $I_Q$	13μA	25μA	28μA	650nA
25°C 時的典型失調電壓 ( $V_{os}$ )	600μV	2μV	10μV	550μV
1kHz 時的輸入電壓雜訊密度 ( $e_n$ )	66nV/√Hz	55nV/√Hz	55nV/√Hz	450nV/√Hz

透過增加回饋電阻的值，系統中放大器的輸出功率亦相應降低。當  $P_{Output}$  支配  $P_{Quiescent}$  時，此技術特別有效，但也有其局限性。如果回饋電阻變得明

圖 4：電阻器熱雜訊



圖片來源：Texas Instruments

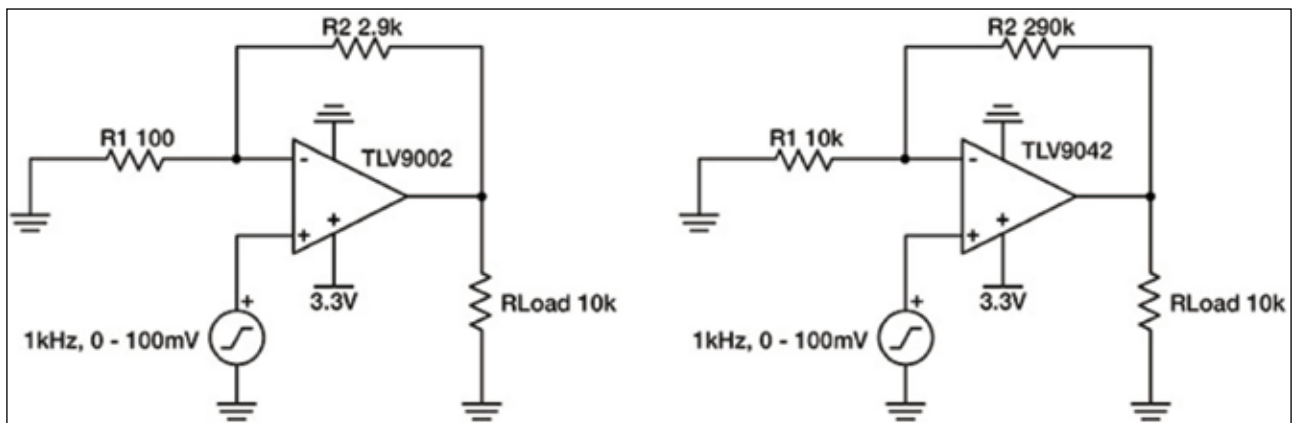
顯大於  $R_L$ ，則  $R_L$  將主導  $R_{Load}$ ，進而使功率消耗停止下降。大回饋電阻器還會與放大器的輸入電容相互作用，使電路不穩定並產生明顯的雜訊。

為了最大限度地減少這些元件的雜訊產生，最好將在每個運算放大器輸入端（見圖 4）看到的等效電阻的熱雜訊與放大器的電壓雜訊頻譜密度進行比較。經驗法則是確保放大器的輸入電壓雜訊密度規格，至少是從放大器的每個輸入端觀察到的等效電阻的電壓雜訊的三倍。

### 現實世界中的例子

使用這些低功率消耗設計技術，讓我們回到最初的問題：在 1kHz 下產生 0 到 100mV 類比訊號的電池供電感測器需要 30V/V 的訊號放大率。下圖 5 比較了兩種設計。左側的設計使用典型的 3.3V 電

圖 5：典型設計與細微的設計



圖片來源：Texas Instruments

源、尺寸不考慮節能的電阻器和 TLV9002 通用運算放大器。右側的設計使用更大的電阻值和更低功率消耗的 TLV9042 運算放大器。請注意，當 TLV9042 反相輸入端等效電阻約為 9.667kΩ 時，雜訊頻譜密度是少於放大器的寬頻雜訊的三分之一，以確保運算放大器的雜訊在電阻器產生的任何雜訊中占主導地位。

使用圖 5 中的值、設計規範和兩款運算放大器的規格，可以利用公式 6 分別得出 TLV9002 設計和 TLV9042 設計的  $P_{total,avg}$ 。結果分別顯示於公式 9 和 10。

$$P_{total,avg} = (V_+ \times I_Q) + \frac{(V_+ \times V_{off})}{R_{Load}} \quad (6)$$

$$P_{total,avg,TLV9002} = (3.3V_+ \times 60\mu A) + \frac{(3.3V)(1.5V)}{10k\Omega \parallel (100\Omega + 2.9k\Omega)} = 2.343mW \quad (9)$$

$$P_{total,avg,TLV9042} = (3.3V_+ \times 10\mu A) + \frac{(3.3V)(1.5V)}{10k\Omega \parallel (10k\Omega + 290k\Omega)} = 0.545mW \quad (10)$$

從以上結果得出，TLV9002 設計的功率消耗是 TLV9042 設計的四倍多。這是較高放大器  $I_Q$  的結果，亦顯示利用高  $I_Q$  的運算放大器，就算嘗試使用低回饋電阻值的情況下，亦不會有顯著的功率消耗節省。以上例子我們有兩個技巧，就是增加電阻值和選擇具有較低靜態電流的運算放大器，這兩種策略在大多數運算放大器應用中都可用。

## 使用低電壓軌省電

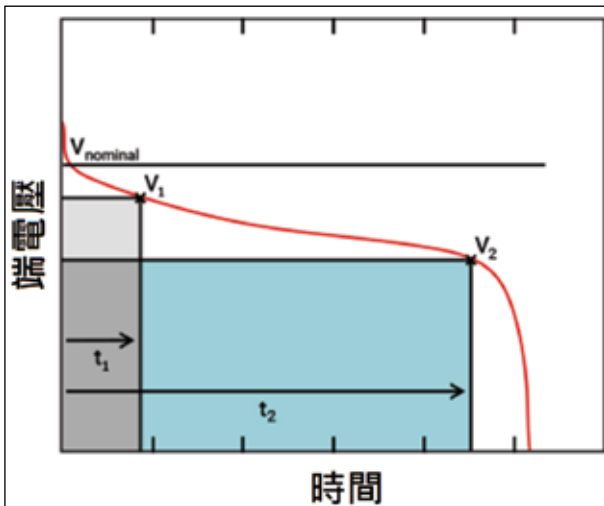
再重溫公式 1 和 6 定義具有正弦訊號和直流偏移電壓的單電源運算放大器電路的平均功率消耗：

$$P_{total,avg} = P_{Qiescent} + P_{Output} + P_{Load} \quad (1)$$

$$P_{total,avg} = (V_+ \times I_Q) + \frac{(V_+ \times V_{off})}{R_{Load}} \quad (6)$$

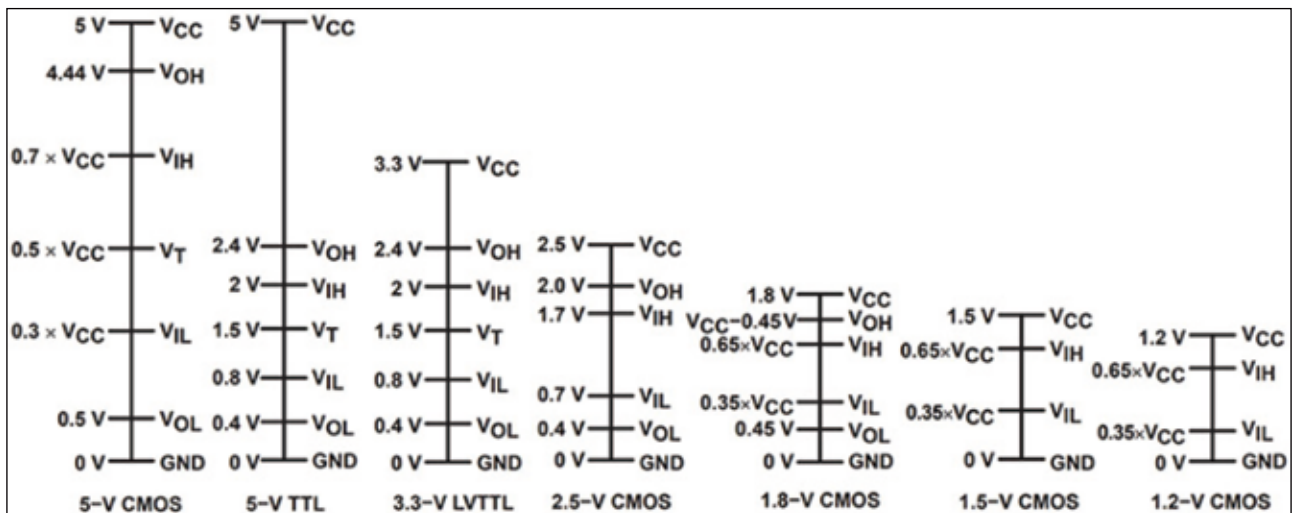
另外，從公式 6 中的  $V_+$  是代表線路的電源軌 ( $V_+$ )，它是直接與功率消耗成正比，所以將電源軌 ( $V_+$ ) 設置為電路中最低可用的電源電壓，這也是一個降低功率消耗的方法。許多運算放大器的最低電

圖 6：單節電池的典型放電曲線



圖片來源：Texas Instruments

圖 7：標準邏輯電平



圖片來源：Texas Instruments

源電壓範圍為 2.7V 或 3.3V。之所以有此限制的原因，與將內部電晶體維持在所需工作範圍內所需的最低電壓有關。一些運算放大器設計用於低至 1.8V 甚至更低的電壓。例如，TLV9042 通用運算放大器可以在 1.2V 電壓軌下工作。

## 電池供電的應用

當今的感測器和智慧型裝置大部份是由電池供電，電池的端電壓在放電時會從其標稱額定電壓降低。例如，一節鹼性 AA 電池的標稱電壓為 1.5V。第一次空載測量時，實際端電壓可能接近 1.6V。隨著電池放電，該端電壓會下降到 1.2V 甚至更遠。

使用能夠在低至 1.2V 的電壓下工作的運算放大器，而不是更高電壓的運算放大器進行設計，可提供以下優勢：

1. 運算放大器電路將繼續工作更長時間，即使電池接近其充電週期的終點並且其端電壓下降。
2. 運算放大器電路可以使用一個 1.5V 電池工作，而不需要兩個電池來形成 3V 電源軌。

要瞭解為什麼較低電壓的運算放大器可以從電池中獲得更長的壽命，請考慮圖 6 中所顯示的電池放電圖。電池通常具有類似於此曲線的放電週期。電池的端電壓將開始接近其標稱額定值。隨著電池隨時間放電，端電壓會逐漸降低。一旦電池接近充電結束，電池的端電壓將迅速下降。如果運算放大器電路僅設計

為在接近電池標稱電壓的電壓下工作，例如  $V_1$ ，則電路的工作時間  $t_1$  將很短。然而，使用能夠在稍低電壓下工作的運算放大器，例如  $V_2$ ，可顯著延長電池的工作壽命  $t_2$ 。

雖然這種影響會因電池類型、電池負載和其他因素而異，不過很明顯，擁有低運作電源的運算放大器比有較長的運作時間。

### 低電壓數位邏輯電平

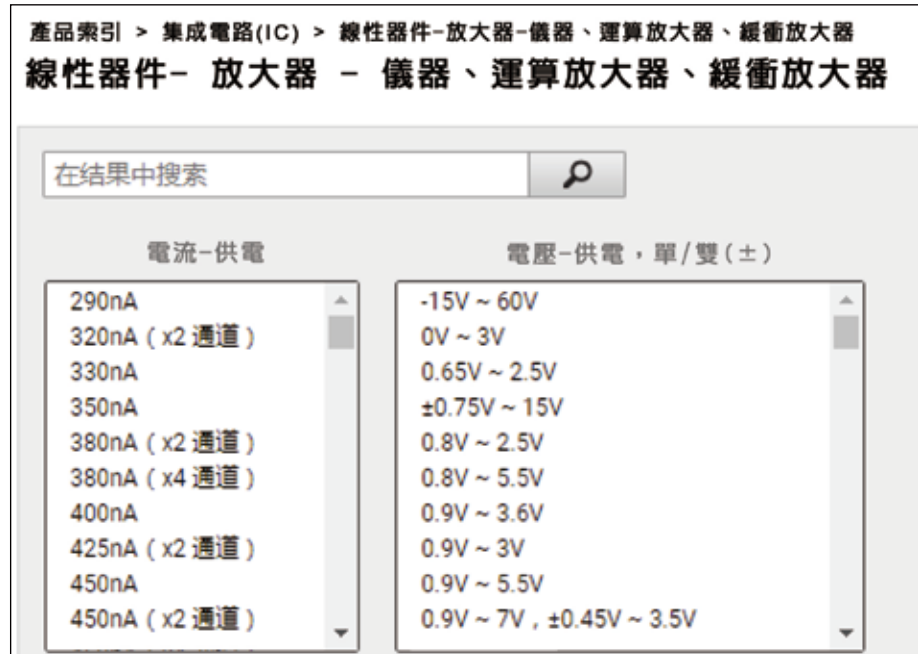
對數位和類比電路使用低電壓軌的應用，也可以利用具有低電源電壓能力的低功耗消耗運算放大器。數位邏輯具有從 5V 到 1.8V 及以下的標準電壓電平（圖 7），與運算放大器電路一樣，數位邏輯在較低電壓下變得更加節能。因此，較低的數位邏輯電平通常更可取。

為了簡化設計過程，您可以選擇為您的類比和數位電路使用相同的電源電壓電平。在這種情況下，具有 1.8V 能力的運算放大器（例如高精度、寬頻寬 OPA391 或成本最佳化的 TLV9001）可以證明是有其優勢的。但需要留意的是，如果要求設計能應用於 1.2V 數位軌，線路系統中必須確保清除任何可能從數位電路洩漏到類比裝置電源接腳的雜訊。

### Digi-Key 官網的運算放大器參數篩選工具


在工程師為系統設計低功耗消耗的運算放大器

圖 8：Digi-Key 官網運算放大器參數篩選工具



時，Digi-Key 官網的參數篩選工具可以協助工程師進行選料，例如：「電流 - 供電」，可以讓工程師瞭解運算放大器所需電流；「電壓 - 供電，單/雙 (±)」，即如文章中所描述的低電源軌要求，在這裡，工程師能夠對電源軌一目了然，心中有數，進而快速完成選型。

### 總結

在本文中，我們介紹了如何利用運算放大器的參數規格快速找出能提供低功耗消耗特性的運算放大器，這些方法包括在頻寬容許下，選擇低靜態電流的運算放大器，以及在回饋電路中選擇較大數值的電阻器。選擇使用低電壓軌及低電壓數位邏輯電平，也是確保運算放大器低功耗時可以考慮的另外兩個因素。 

下期預告

醫療感測器