

DCR 溫度補償

摘要

DCR 電流檢測技術，因其具有無損耗之優點，是一個能獲得正確電感電流訊息的好方法。然而，金屬銅本身具有正溫度係數，所以電感的 DCR 值會隨溫度變化而改變。而隨溫度變化的 DCR 值，就會使控制器檢測到不正確的電流信號。常用的解決方式是在電流檢測迴路中加上 DCR 溫度網路，以避免此溫度效應。故此，本應用須知將介紹 DCR 溫度補償的基本概念和電路實現的方法。

目錄

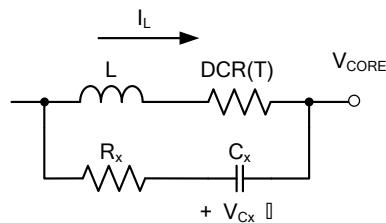
1. 為何需要 DCR 溫度補償網路.....	2
2. DCR 溫度補償之架構.....	2
3. DCR 溫度補償網路之公式推導.....	4
4. DCR 溫度補償網路的設計範例.....	5
5. 實驗結果.....	7
6. 結論.....	9
7. 參考資料.....	10
附錄 I. DCR 溫度補償網路之公式推導.....	10

1. 為何需要 DCR 溫度補償網路

圖一所示為一 DCR 電流檢測網路。當時間常數相等，也就是 $C_x R_x = L / DCR$ 時，如式 (1) 所示， V_{cx} 電壓可用來取得電感電流信號。然而，DCR 值會以正比隨溫度增加，如式 (2) 所示，其中參數 TC_{DCR} 是銅的溫度係數，且是一正數。當電路在重載條件下工作時，電感的溫度也會隨之增加。這使得穩壓器會因隨溫度改變的 DCR 值，檢測到錯誤的負載電流值，進而回報不正確的電流訊息。此外，也會使得輸出電壓無法達到其該有的值，也因此就無法滿足在 V_{CORE} 應用中所需要的適應性電壓定位 (AVP) 下垂的負載線規格。所以，在此探討的溫度補償網路就是為了解決這個問題。

$$I_L \cdot DCR(T) = V_{cx} \quad (1)$$

$$DCR(T) = DCR \cdot [1 + TC_{DCR}(T - 25)] \quad (2)$$



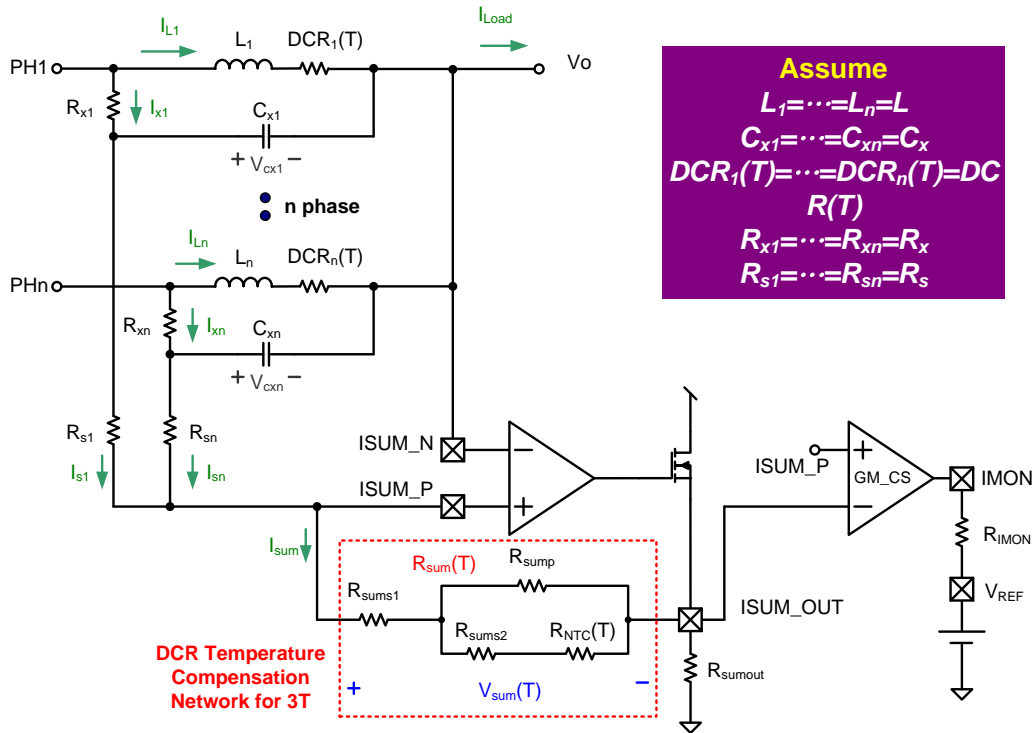
圖一、DCR 電流檢測網路

2. DCR 溫度補償之架構

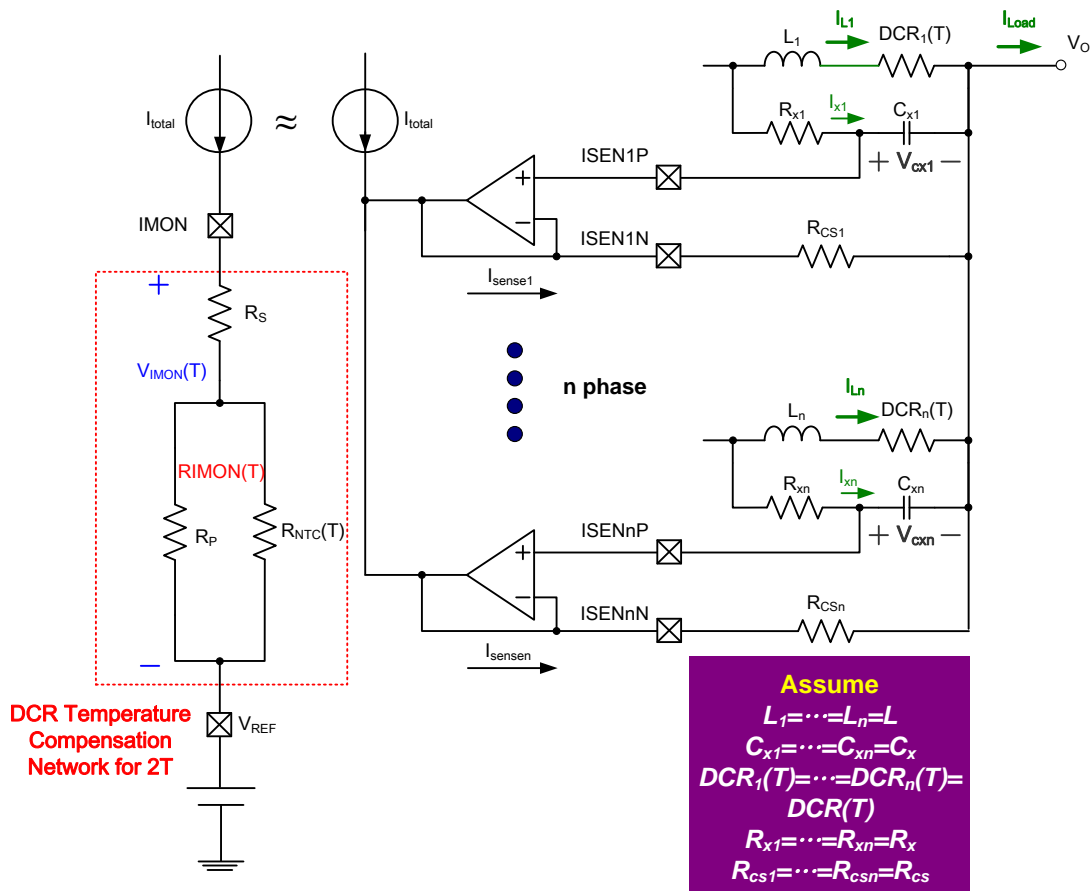
DCR 溫度補償網路的目的就是使 DCR 值不隨溫度改變，因此使得 V_{cx} 電壓只和電感電流有關。因為 DCR 是一具有正溫度係數的電阻，所以就必須在電流檢測迴路中插入一個有負溫度係數的電阻性網路，以補償 DCR 隨溫度的變化。當有 Y 個溫度點需要進行補償，補償網路就需要 Y 個電阻和一個負溫度係數 (NTC) 的熱敏電阻，如此才能在這 Y 個溫度點時，DCR 值的溫度變化均可被抵消。然而，不同的電流檢測架構，DCR 溫度補償網路的設計方式也不同。圖二和圖三分別顯示了總和電流檢測架構 (sum current sensing topology) 和差分電流檢測架構 (differential current sensing topology) 的溫度補償網路，及其電路示意圖。總和電流檢測架構示範的是有三個溫度點作補償的補償網路，而差分電流檢測架構則示範的是有兩個溫度點作補償的補償網路。式 (3) 和式 (4) 可分別作為這兩個電流檢測架構的設計原則。

$$V_{sum}(T) = I_{Load} \cdot \frac{R_{sum}(T)}{R_x + R_s} \cdot DCR(T) \quad (3)$$

$$\Delta V_{IMON}(T) = I_{Load} \cdot R_{IMON}(T) \cdot \frac{DCR(T)}{R_{CS}} \quad (4)$$



圖二、總和電流檢測架構之 DCR 溫度補償網路



圖三、差分電流檢測架構之 DCR 溫度補償網路

3. DCR 溫度補償網路之公式推導

在本節中，將以總和電流檢測架構為例，說明如何推導出溫度補償網路。如式 (3)，藉由 V_{sum} 電壓及一個適當的比例，即可得到正確負載電流的訊息；此比例為 R_{sum} 和 $(R_x + R_s)$ 之比，如式 (5) 所示。以 RT8893 例，此值必須設為 4，才能有正常的操作。

$$\frac{R_{sum}}{R_x + R_s} = k \quad (5)$$

而為了消除溫度對 DCR 的影響，必須在 R_{sum} 網路中插入一個 NTC 熱敏電阻，使得 V_{sum} 電壓不會隨溫度改變。NTC 熱敏電阻和溫度之間的關係如式 (6)，其中 β 是 NTC 的溫度係數；不同的 NTC 熱敏電阻， β 值也會不同。

$$R_{NTC}(T) = R_{NTC} \cdot e^{\beta \left[\frac{1}{273+T} - \frac{1}{273+25} \right]} \quad (6)$$

如果是有三個溫度點 (TL、TR 和 TH) 需要進行補償，則在此三個溫度點， V_{sum} 電壓必須相同；也就是如式 (7) 之右側所示之結果，與溫度無關。 $R_{sum}(T)$ 為內含 NTC 熱敏電阻的熱補償網路之等效電阻，其表示式為式 (8)。

$$\frac{R_{sum}(T)}{R_x + R_s} \cdot DCR(T) = \frac{R_{sum}}{R_x + R_s} \cdot DCR = k \cdot DCR \quad (7)$$

$$R_{sum}(T) = R_{sums1} + \frac{R_{sump} \cdot [R_{sums2} + R_{NTC}(T)]}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(T)} \quad (8)$$

因此，由以上公式， R_{sum} 網路之各參數可分別由公式 (9)，(10)，和 (11) 得出。詳細之推導，可參閱附錄 I。

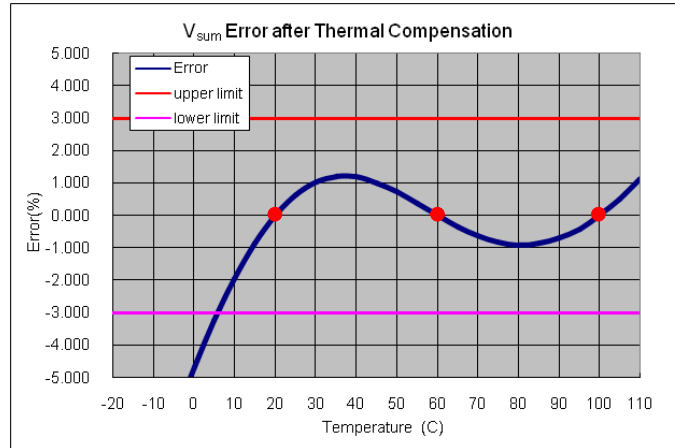
$$R_{sump} = \sqrt{\alpha_2 \cdot [k_R + R_{NTC}(TR)] \cdot [k_R + R_{NTC}(TH)]} \quad (9)$$

$$R_{sums2} = k_R - R_{sump} \quad (10)$$

$$R_{sums1} = R_{sum}(TR) - \frac{R_{sump} \cdot [R_{sums2} + R_{NTC}(TR)]}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TR)} \quad (11)$$

$$\text{其中 } \alpha_1 = \frac{R_{sum}(TL) - R_{sum}(TR)}{R_{NTC}(TL) - R_{NTC}(TR)} \quad \alpha_2 = \frac{R_{sum}(TR) - R_{sum}(TH)}{R_{NTC}(TR) - R_{NTC}(TH)} \quad k_R = \frac{\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot R_{NTC}(TH) - R_{NTC}(TL)}{1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}$$

在經過溫度補償電路之後， V_{sum} 在這三個溫度點的誤差（例如：20°C, 60°C, 和 100°C）應當為零，如圖四所示。



圖四、DCR 溫度補償後之 V_{SUMsum} 誤差

4. DCR 溫度補償網路的設計範例

以下設計方法所選用的是總和電流檢測架構，並以 RT8893 作為設計範例；所訂的規格是根據英特爾 VR12.5 的設計需求。

VCORE 規格	
輸入電壓	10.8V to 13.2V
相位數	3
Vboot	1.7V
VDAC(MAX)	1.8V
ICCMAX	90A
ICC-DY	60A
ICC-TDC	55A
負載線	1.5mΩ
快速電壓迴轉率	12.5mV/μs
最大開關頻率	300kHz

在 Shark Bay VRTB 桌上型平台指南中，輸出濾波器的設計需求如下所示：

輸出電感：360nH / 0.72mΩ

輸出大型電容：560μF / 2.5V / 5mΩ (max)，4 至 5 個

輸出陶瓷電容：22μF / 0805 (在上層最多可放 18 個)

步驟 1：決定電感的參數

決定電感值。

輸出電感：360nH / 0.72mΩ

決定 DCR 溫度係數，TC_{DCR}。

TC_{DCR} = 3930ppm

因此，受溫度影響的電感 DCR 值，可由式 (2) 算出。下面的計算範例是 60°C 的 DCR 值。

$$DCR(60) = 0.72 \cdot 10^{-3} \cdot \left[1 + 3930 \cdot 10^{-6} (60 - 25) \right] = 0.819 (m\Omega)$$

步驟 2：決定熱補償的 NTC 參數

選用型號 NCP15WL104J03RC 的 NTC 熱敏電阻；該電阻值為 100kΩ，且 β 值是 4485。利用式 (6)，可以計算在不同溫度下的 NTC 電阻值；NTC 熱敏電阻操作於 60°C 時，其電阻值可計算如下：

$$R_{NTC}(60) = 100 \cdot 10^3 \cdot e^{4485 \left[\frac{1}{273+60} - \frac{1}{273+25} \right]} = 21 (k\Omega)$$

步驟 3：設計 DCR 電流檢測網路及 R_x、R_s 和 R_{sum} 之值

如何決定 DCR 電流檢測網路中之電容 C_x 及電阻 R_x 和 R_s，可參閱應用須知 AN033「不同 DCR 電流檢測架構之比較」。

C_x = 1μF, R_s = 3.41kΩ, and R_x = 590Ω

在 RT8893，R_{sum} 和 (R_x+R_s) 之比值必須設為 4，才能有正常的操作。

R_{sum} = 4 • (R_x+R_s) = 16kΩ

步驟 4：設計 R_{sum} 之電阻網路

選定三個作溫度補償之溫度點。

選擇 (TH, TR, TL) = (100, 60, 20)

例如， R_{sum} 在 60°C 下的值可由式 (7) 獲得：

$$R_{sum}(60) = \frac{R_{sum}}{DCR(60)} \cdot DCR = \frac{16 \cdot 10^3}{0.819 \cdot 10^{-3}} \cdot 0.72 \cdot 10^{-3} = 14 (k\Omega)$$

因此，參數 α_1 ， α_2 ，及 k_R 可以計算如下：

$$\alpha_1 = \frac{R_{sum}(20) - R_{sum}(60)}{R_{NTC}(20) - R_{NTC}(60)} = \frac{16 \cdot 10^3 - 14 \cdot 10^3}{129 \cdot 10^3 - 21 \cdot 10^3} = 0.02$$

$$\alpha_2 = \frac{R_{sum}(60) - R_{sum}(100)}{R_{NTC}(60) - R_{NTC}(100)} = \frac{14 \cdot 10^3 - 12 \cdot 10^3}{21 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3} = 0.11$$

$$k_R = \frac{\frac{\alpha_2 \cdot R_{NTC}(100) - R_{NTC}(20)}{\alpha_1}}{1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} = \frac{\frac{0.11 \cdot 5 \cdot 10^3 - 129 \cdot 10^3}{0.02}}{1 - \frac{0.11}{0.02}} = 24.5 (k\Omega)$$

再藉由公式 (9)，(10)，和 (11)，可因此而算出 R_{sump} ， R_{sums2} 和 R_{sums1} 。

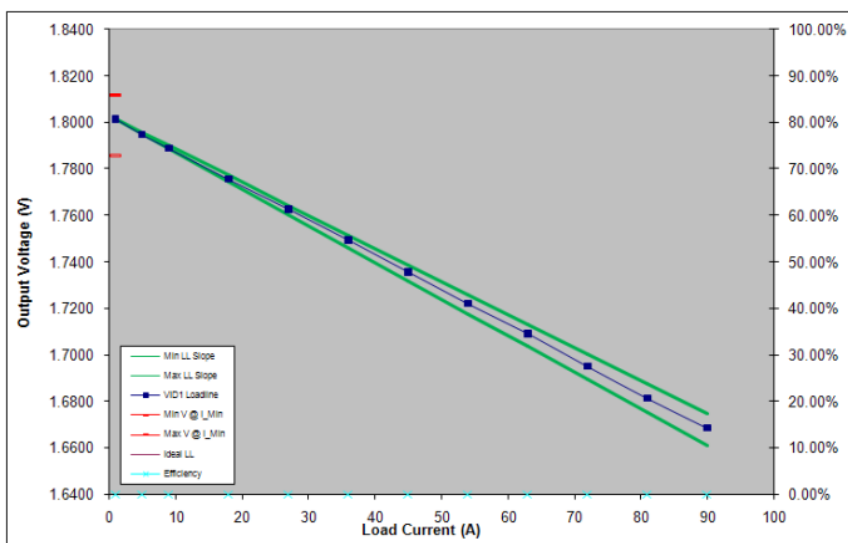
$$R_{sump} = \sqrt{\alpha_2 \cdot [k_R + R_{NTC}(60)] \cdot [k_R + R_{NTC}(100)]} = 12 (k\Omega)$$

$$R_{sums2} = k_R - R_{sump} = 12.5 (k\Omega)$$

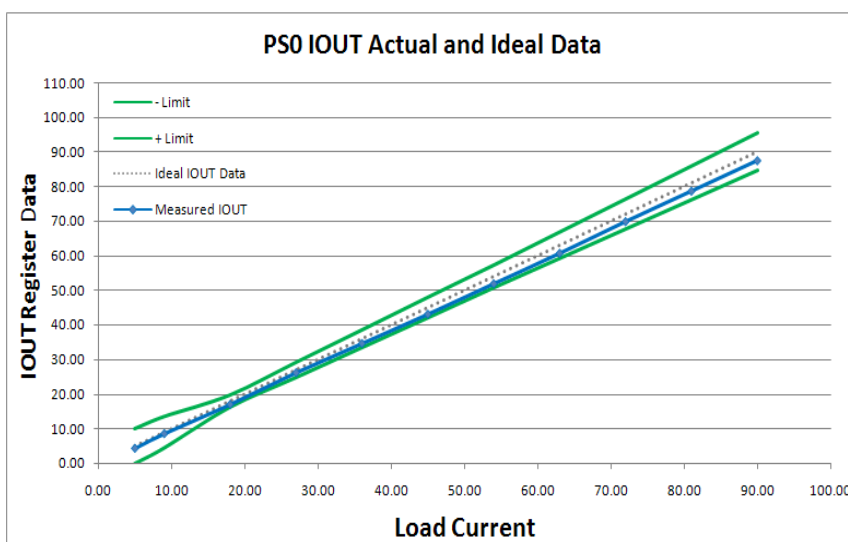
$$R_{sums1} = R_{sum}(60) - \frac{R_{sump} \cdot [R_{sums2} + R_{NTC}(60)]}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(60)} = 5.27 (k\Omega)$$

5. 實驗結果

圖五顯示了有 DCR 溫度補償之 DCLL 和 DIMON 回報結果。從實驗結果來看，DCLL 和 DIMON 回報結果都在容忍範圍內。然而，若無 DCR 溫度補償，則在重載條件下，DIMON 回報結果會是高估的，因而造成 DCLL 會無法滿足負載線規格，見圖六。

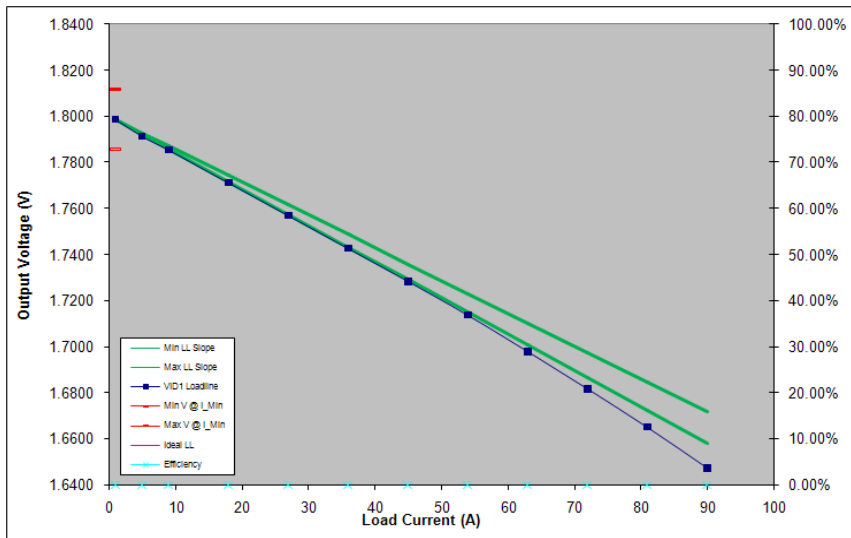


(a) DCLL

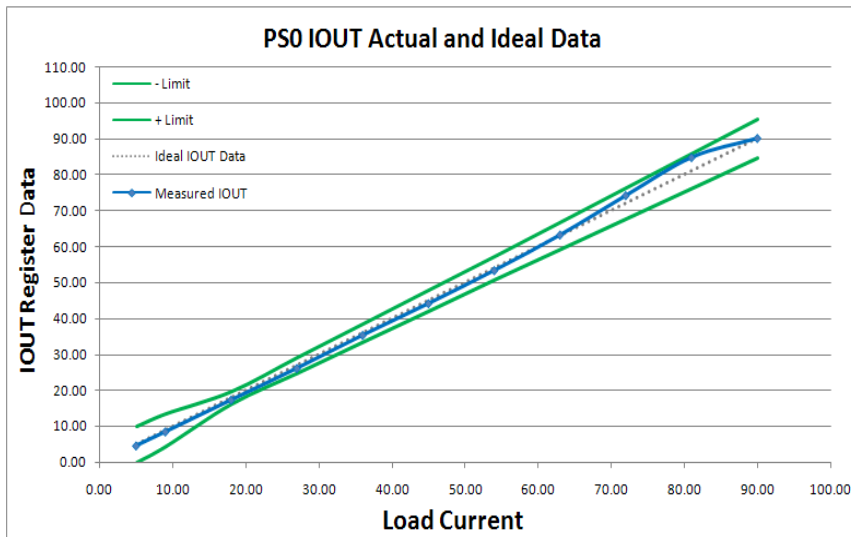


(b) DIMON 回報

圖五、有 DCR 溫度補償之 DCLL 和 DIMON 回報結果



(a) DCLL



(b) DIMON 回報

圖六、無 DCR 溫度補償之 DCLL 和 DIMON 報告結果

6. 結論

本應用須知提供了 DCR 溫度補償電路的設計方法及實用的設計公式；經由適當的設計，它可以有效地減少因溫度變化而對 DCR 值產生的影響，因此能在 DCR 電流檢測應用中，提供正確的電流訊息。

7. 參考資料

- [1] 立錡科技 RT8884B 規格書。
- [2] 立錡科技 RT8893 規格書。
- [3] Intel, VR12.5 Pulse Width Modulation (PWM) 規格
- [4] 立錡科技之應用須知 AN033 「不同 DCR 電流檢測架構之比較」。

附錄 I. DCR 溫度補償網路之公式推導

將三個溫度點 (TL, TR, TH) 都代入式 (8), 即可得式 (12) 至式 (14)。而式 (15) 和式 (16) 可分別由式 (12) - 式 (13) 和式 (13) - 式 (14) 得出。

$$R_{sum}(TL) = R_{sums1} + \frac{R_{sump} \cdot [R_{sums2} + R_{NTC}(TL)]}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TL)} \quad (12)$$

$$R_{sum}(TR) = R_{sums1} + \frac{R_{sump} \cdot [R_{sums2} + R_{NTC}(TR)]}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TR)} \quad (13)$$

$$R_{sum}(TH) = R_{sums1} + \frac{R_{sump} \cdot [R_{sums2} + R_{NTC}(TH)]}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TH)} \quad (14)$$

$$\frac{R_{sump} \cdot [R_{sums2} + R_{NTC}(TL)]}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TL)} - \frac{R_{sump} \cdot [R_{sums2} + R_{NTC}(TR)]}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TR)} = R_{sum}(TL) - R_{sum}(TR) \quad (15)$$

$$\frac{R_{sump} \cdot [R_{sums2} + R_{NTC}(TR)]}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TR)} - \frac{R_{sump} \cdot [R_{sums2} + R_{NTC}(TH)]}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TH)} = R_{sum}(TR) - R_{sum}(TH) \quad (16)$$

定義 $k_R = R_{sump} + R_{sums2}$ ，則可進一步將式 (15) 和式 (16) 表示為式 (17) 和式 (18)。

$$\begin{aligned}
 & \frac{R_{sump} \cdot (R_{sums2} + R_{NTC}(TL))}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TL)} - \frac{R_{sump} \cdot (R_{sums2} + R_{NTC}(TR))}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TR)} = R_{sum}(TL) - R_{sum}(TR) \\
 \Rightarrow & R_{sump} \cdot \left[\frac{R_{sums2} + R_{NTC}(TL)}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TL)} - \frac{R_{sums2} + R_{NTC}(TR)}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TR)} \right] = R_{sum}(TL) - R_{sum}(TR) \\
 \Rightarrow & R_{sump} \cdot \left[\frac{k_R - R_{sump} + R_{NTC}(TL)}{k_R + R_{NTC}(TL)} - \frac{k_R - R_{sump} + R_{NTC}(TR)}{k_R + R_{NTC}(TR)} \right] = R_{sum}(TL) - R_{sum}(TR) \\
 \Rightarrow & R_{sump} \cdot \frac{[k_R - R_{sump} + R_{NTC}(TL)] \cdot (k_R + R_{NTC}(TR)) - [k_R - R_{sump} + R_{NTC}(TR)] \cdot (k_R + R_{NTC}(TL))}{[k_R + R_{NTC}(TL)] \cdot [k_R + R_{NTC}(TR)]} = R_{sum}(TL) - R_{sum}(TR) \\
 \Rightarrow & R_{sump}^2 \cdot \frac{R_{NTC}(TL) - R_{NTC}(TR)}{[k_R + R_{NTC}(TL)] \cdot [k_R + R_{NTC}(TR)]} = R_{sum}(TL) - R_{sum}(TR) \\
 & \alpha_1 = \frac{R_{sump}^2}{[k_R + R_{NTC}(TL)] \cdot [k_R + R_{NTC}(TR)]} = \frac{R_{sum}(TL) - R_{sum}(TR)}{R_{NTC}(TL) - R_{NTC}(TR)} \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{R_{sump} \cdot (R_{sums2} + R_{NTC}(TR))}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TR)} - \frac{R_{sump} \cdot (R_{sums2} + R_{NTC}(TH))}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TH)} = R_{sum}(TR) - R_{sum}(TH) \\
 \Rightarrow & R_{sump} \cdot \left[\frac{R_{sums2} + R_{NTC}(TR)}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TR)} - \frac{R_{sums2} + R_{NTC}(TH)}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TH)} \right] = R_{sum}(TR) - R_{sum}(TH) \\
 \Rightarrow & R_{sump} \cdot \left[\frac{k_R - R_{sump} + R_{NTC}(TR)}{k_R + R_{NTC}(TR)} - \frac{k_R - R_{sump} + R_{NTC}(TH)}{k_R + R_{NTC}(TH)} \right] = R_{sum}(TR) - R_{sum}(TH) \\
 \Rightarrow & R_{sump} \cdot \frac{[k_R - R_{sump} + R_{NTC}(TR)] \cdot (k_R + R_{NTC}(TH)) - [k_R - R_{sump} + R_{NTC}(TH)] \cdot (k_R + R_{NTC}(TR))}{[k_R + R_{NTC}(TR)] \cdot [k_R + R_{NTC}(TH)]} = R_{sum}(TR) - R_{sum}(TH) \\
 \Rightarrow & R_{sump}^2 \cdot \frac{R_{NTC}(TR) - R_{NTC}(TH)}{[k_R + R_{NTC}(TR)] \cdot [k_R + R_{NTC}(TH)]} = R_{sum}(TR) - R_{sum}(TH) \\
 & \alpha_2 = \frac{R_{sump}^2}{[k_R + R_{NTC}(TR)] \cdot [k_R + R_{NTC}(TH)]} = \frac{R_{sum}(TR) - R_{sum}(TH)}{R_{NTC}(TR) - R_{NTC}(TH)} \quad (18)
 \end{aligned}$$

式 (19) 可由式 (18) / 式 (17) 導出。

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{\frac{R_{sump}^2}{[k_R + R_{NTC}(TR)] \cdot [k_R + R_{NTC}(TH)]}}{\frac{R_{sump}^2}{[k_R + R_{NTC}(TL)] \cdot [k_R + R_{NTC}(TR)]}} = \frac{k_R + R_{NTC}(TL)}{k_R + R_{NTC}(TH)}$$

$$\Rightarrow k_R = \frac{\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot R_{NTC}(TH) - R_{NTC}(TL)}{1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \quad (19)$$

從式 (18)，可得 R_{sump} ，如式 (20)。

$$\begin{aligned} R_{sump}^2 &= \alpha_2 \cdot [k_R + R_{NTC}(TR)] \cdot [k_R + R_{NTC}(TH)] \\ \Rightarrow R_{sump} &= \sqrt{\alpha_2 \cdot [k_R + R_{NTC}(TR)] \cdot [k_R + R_{NTC}(TH)]} \end{aligned} \quad (20)$$

然後，可得 R_{sums2} ，如式 (21)。

$$\begin{aligned} R_{sump} + R_{sums2} &= k_R \\ \Rightarrow R_{sums2} &= k_R - R_{sump} \end{aligned} \quad (21)$$

R_{sums1} 可因此推導而得，如式 (22)。

$$\begin{aligned} R_{sum}(TR) &= R_{sum}(TR) + \frac{R_{sump} \cdot [R_{sums2} + R_{NTC}(TR)]}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TR)} \\ \Rightarrow R_{sums1} &= R_{sum}(TR) - \frac{R_{sump} \cdot [R_{sums2} + R_{NTC}(TR)]}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(TR)} \end{aligned} \quad (22)$$

相關資源

[立錡科技電子報](#)

[訂閱立錡科技電子報](#)

Richtek Technology Corporation

14F, No. 8, Tai Yuen 1st Street, Chupei City

Hsinchu, Taiwan, R.O.C.

Tel: 886-3-5526789

Richtek products are sold by description only. Richtek reserves the right to change the circuitry and/or specifications without notice at any time. Customers should obtain the latest relevant information and data sheets before placing orders and should verify that such information is current and complete. Richtek cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Richtek product. Information furnished by Richtek is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Richtek or its subsidiaries for its use; nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Richtek or its subsidiaries.