

DCR 温度补偿

摘要

DCR 电流检测技术，因其具有无损耗之优点，是一个能获得正确电感电流讯息的好方法。然而，金属铜本身具有正温度系数，所以电感的 DCR 值会随温度变化而改变。而随温度变化的 DCR 值，就会使控制器检测到不正确的电流信号。常用的解决方式是在电流检测回路中加上 DCR 温度网络，以避免此温度效应。故此，本应用须知将介绍 DCR 温度补偿的基本概念和电路实现的方法。

目录

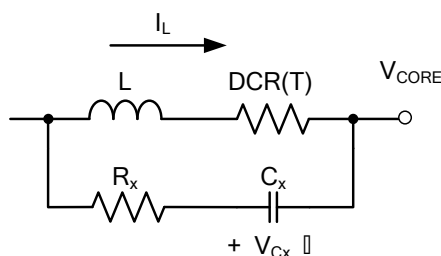
1. 为何需要 DCR 温度补偿网络.....	2
2. DCR 温度补偿之架构.....	2
3. DCR 温度补偿网络之公式推导.....	4
4. DCR 温度补偿网络的设计范例.....	5
5. 实验结果.....	7
6. 结论.....	9
7. 参考数据.....	10
附录 I. DCR 温度补偿网络之公式推导.....	10

1. 为何需要 DCR 温度补偿网络

图一所示为一 DCR 电流检测网络。当时间常数相等，也就是 $C_x R_x = L / DCR$ 时，如式 (1) 所示， V_{cx} 电压可用来取得电感电流信号。然而，DCR 值会以正比随温度增加，如式 (2) 所示，其中参数 TC_{DCR} 是铜的温度系数，且是一正数。当电路在重载条件下工作时，电感的温度也会随之增加。这使得稳压器会因随温度改变的 DCR 值，检测到错误的负载电流值，进而回报不正确的电流讯息。此外，也会使得输出电压无法达到其该有的值，也因此就无法满足在 V_{CORE} 应用中所需要的适应性电压定位 (AVP) 下垂的负载线规格。所以，在此探讨的温度补偿网络就是为了解决这个问题。

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

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



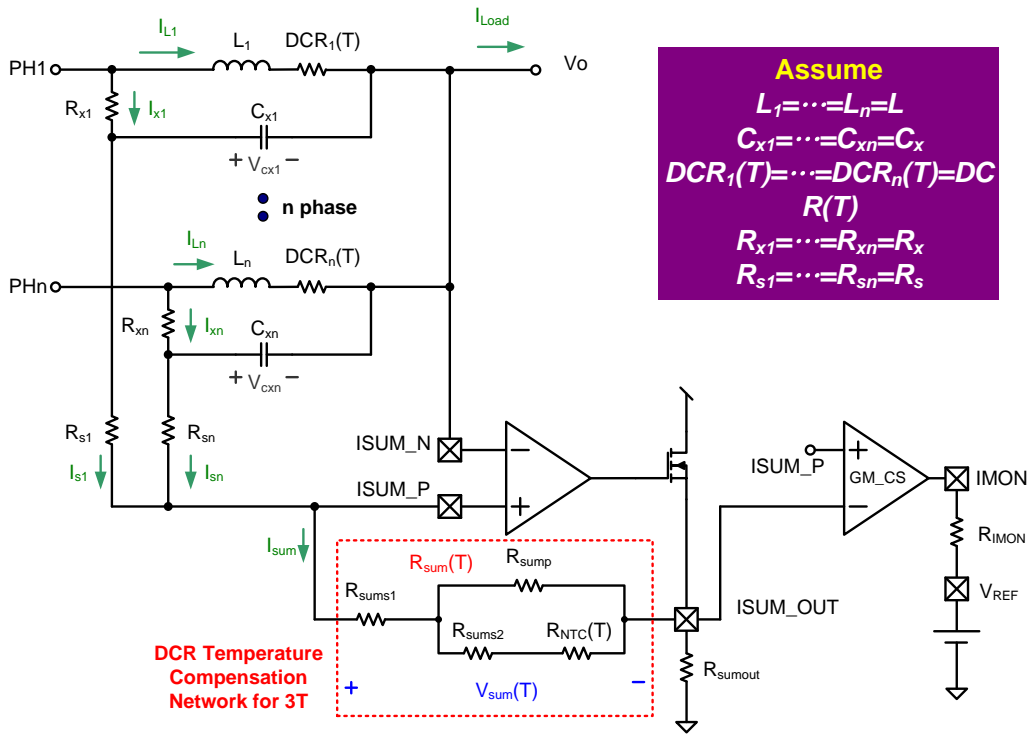
图一、DCR 电流检测网络

2. DCR 温度补偿之架构

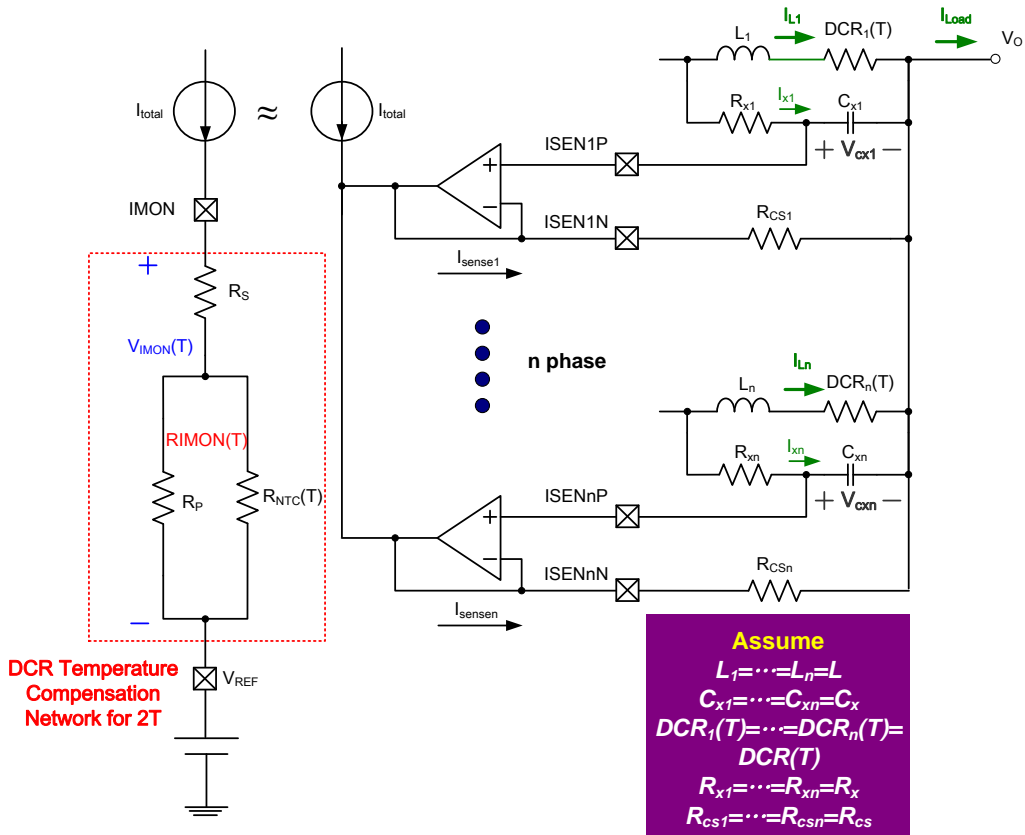
DCR 温度补偿网络的目的就是使 DCR 值不随温度改变，因此使得 V_{cx} 电压只和电感电流有关。因为 DCR 是一具有正温度系数的电阻，所以就必须在电流检测回路中插入一个有负温度系数的电阻性网络，以补偿 DCR 随温度的变化。当有 Y 个温度点需要进行补偿，补偿网络就需要 Y 个电阻和一个负温度系数 (NTC) 的热敏电阻，如此才能在这 Y 个温度点时，DCR 值的温度变化均可被抵消。然而，不同的电流检测架构，DCR 温度补偿网络的设计方式也不同。图二和图三分别显示了总和电流检测架构 (sum current sensing topology) 和差分电流检测架构 (differential current sensing topology) 的温度补偿网络，及其电路示意图。总和电流检测架构示范的是有三个温度点作补偿的补偿网络，而差分电流检测架构则示范的是有两个温度点作补偿的补偿网络。式 (3) 和式 (4) 可分别作为这两个电流检测架构的设计原则。

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

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



图二、总和电流检测架构之 DCR 温度补偿网络



图三、差分电流检测架构之 DCR 温度补偿网络

3. DCR 温度补偿网络之公式推导

在本节中，将以总和电流检测架构为例，说明如何推导出温度补偿网络。如式 (3)，藉由 V_{sum} 电压及一个适当的比例，即可得到正确负载电流的讯息；此比例为 R_{sum} 和 (R_x+R_s) 之比，如式 (5) 所示。以 RT8893 例，此值必须设为 4，才能有正常的操作。

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

而为了消除温度对 DCR 的影响，必须在 R_{sum} 网络中插入一个 NTC 热敏电阻，使得 V_{sum} 电压不会随温度改变。NTC 热敏电阻和温度之间的关系如式 (6)，其中 β 是 NTC 的温度系数；不同的 NTC 热敏电阻， β 值也会不同。

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

如果是三个温度点 (TL、TR 和 TH) 需要进行补偿，则在此三个温度点， V_{sum} 电压必须相同；也就是如式 (7) 之右侧所示之结果，与温度无关。 $R_{sum}(T)$ 为内含 NTC 热敏电阻的热补偿网络之等效电阻，其表示式为式 (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} 网络之各参数可分别由公式 (9)，(10)，和 (11) 得出。详细之推导，可参阅附录 I。

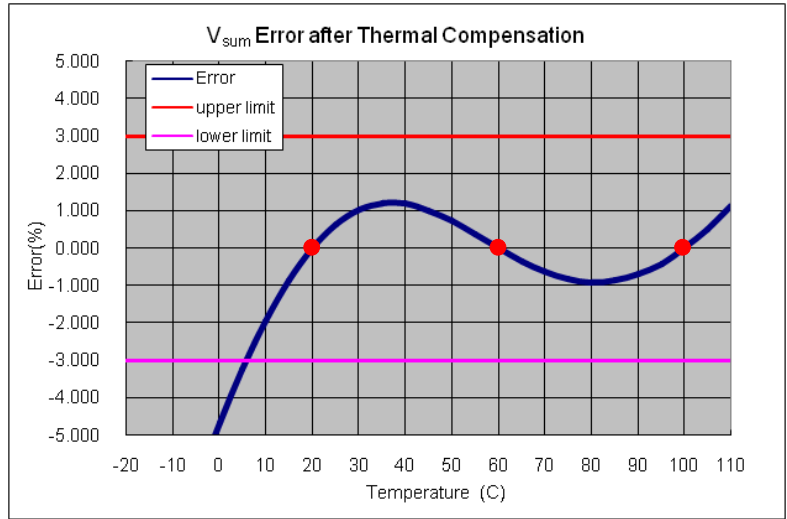
$$R_{sump} = \sqrt{\alpha_2 \cdot [k_R + R_{NTC}(TR)] \cdot [k_R + R_{NTC}(TH)]} \quad (9)$$

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

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

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

在经过温度补偿电路之后， V_{sum} 在这三个温度点的误差（例如：20°C, 60°C, 和 100°C）应当为零，如图四所示。



图四、DCR 温度补偿后之 V_{sum} 误差

4. DCR 温度补偿网络的设计范例

以下设计方法所选用的是总和电流检测架构，并以 RT8893 作为设计范例；所订的规格是根据英特尔 VR12.5 的设计需求。

VCORE 规格	
输入电压	10.8V to 13.2V
相位数	3
Vboot	1.7V
VDAC(MAX)	1.8V
ICCMAX	90A
ICC-DY	60A
ICC-TDC	55A
负载线	1.5mΩ
快速电压回转率	12.5mV/μs
最大开关频率	300kHz

在 Shark Bay VRTB 桌上型平台指南中，输出滤波器的设计需求如下所示：

输出电感：360nH / 0.72mΩ

输出大型电容：560μF / 2.5V / 5mΩ (max)，4 至 5 个

输出陶瓷电容：22μF / 0805 (在上层最多可放 18 个)

步骤 1：决定电感的参数

决定电感值。

输出电感：360nH / 0.72mΩ

决定 DCR 温度系数， TC_{DCR} 。

$TC_{DCR} = 3930\text{ppm}$

因此，受温度影响的电感 DCR 值，可由式 (2) 算出。下面的计算范例是 60°C 的 DCR 值。

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

步骤 2：决定热补偿的 NTC 参数

选用型号 NCP15WL104J03RC 的 NTC 热敏电阻；该电阻值为 100kΩ，且 β 值是 4485。利用式 (6)，可以计算在不同温度下的 NTC 电阻值；NTC 热敏电阻操作于 60°C 时，其电阻值可计算如下：

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

步骤 3：设计 DCR 电流检测网络及 R_x 、 R_s 和 R_{sum} 之值

如何决定 DCR 电流检测网络中之电容 C_x 及电阻 R_x 和 R_s ，可参阅应用须知 AN033 「不同 DCR 电流检测架构之比较」。

$C_x = 1\mu\text{F}$, $R_s = 3.41k\Omega$, and $R_x = 590\Omega$

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

$R_{sum} = 4 \cdot (R_x+R_s) = 16k\Omega$

步骤 4：设计 R_{sum} 之电阻网络

选定三个作温度补偿之温度点。

选择 $(TH, TR, TL) = (100, 60, 20)$

例如, R_{sum} 在 60°C 下的值可由式 (7) 获得:

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

因此, 参数 α_1 , α_2 , 及 k_R 可以计算如下:

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

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

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

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

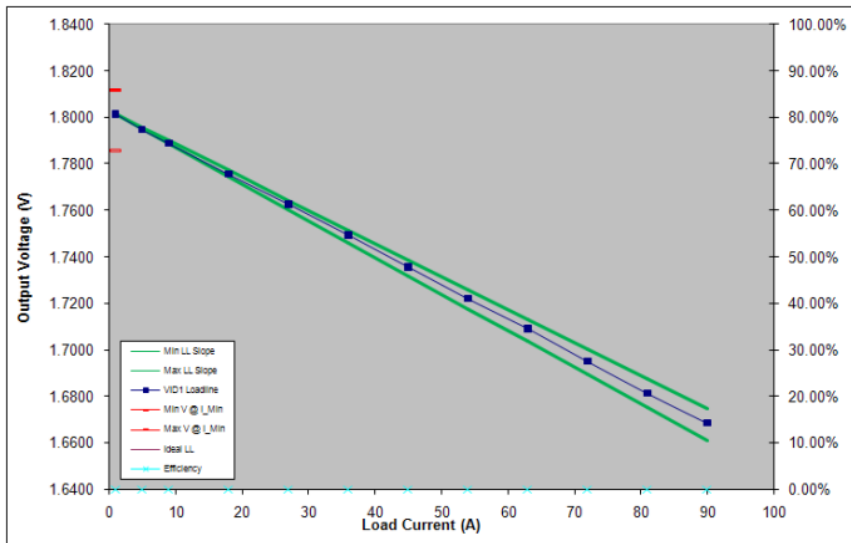
$$R_{sump} = \sqrt{\alpha_2 \cdot [k_R + R_{NTC}(60)] \cdot [k_R + R_{NTC}(100)]} = 12 (k\Omega)$$

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

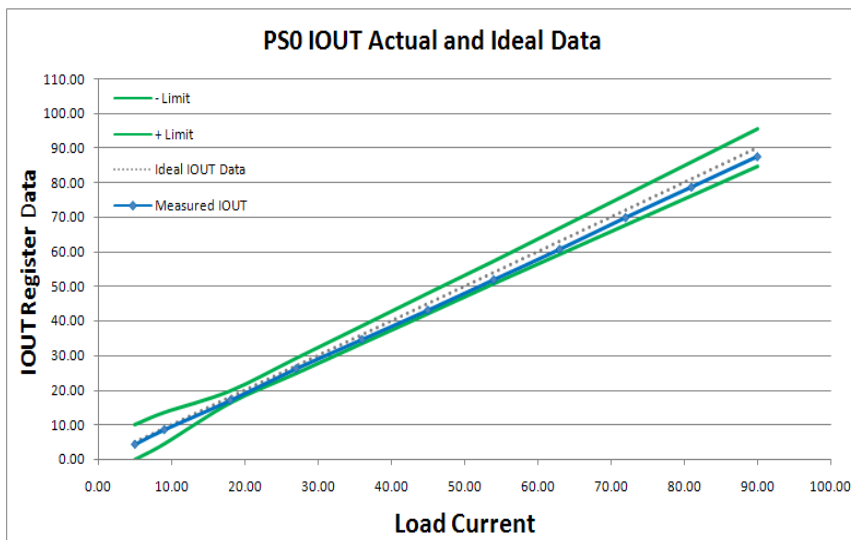
$$R_{sums1} = R_{sum}(60) - \frac{R_{sump} \cdot [R_{sums2} + R_{NTC}(60)]}{R_{sump} + R_{sums2} + R_{NTC}(60)} = 5.27 (k\Omega)$$

5. 实验结果

图五显示了有 DCR 温度补偿之 DCLL 和 DIMON 回报结果。从实验结果来看, DCLL 和 DIMON 回报结果都在容忍范围内。然而, 若无 DCR 温度补偿, 则在重载条件下, DIMON 回报结果会是高估的, 因而造成 DCLL 会无法满足负载线规格, 见图六。

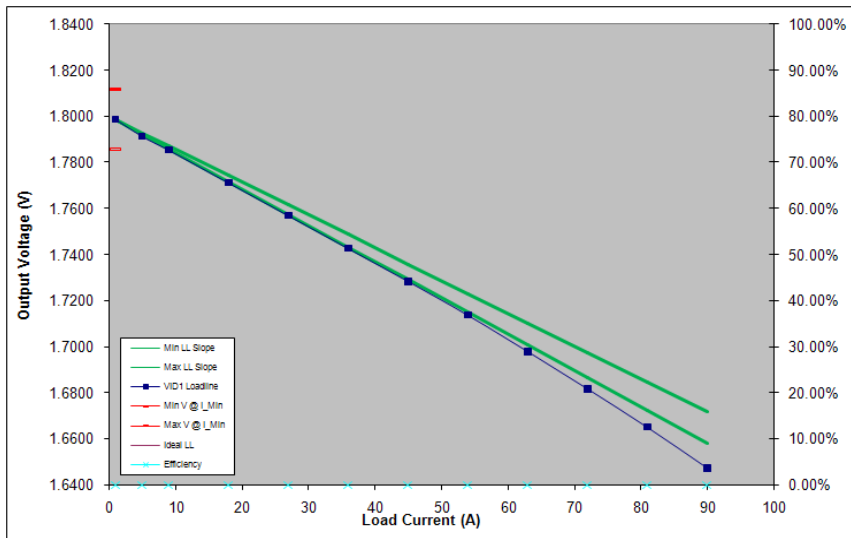


(a) DCLL

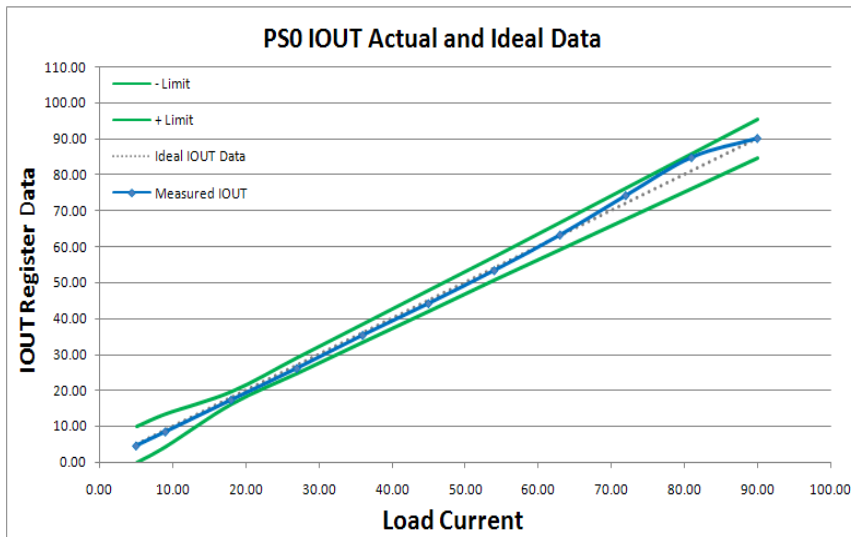


(b) DIMON 回报

图五、有 DCR 温度补偿之 DCLL 和 DIMON 回报结果



(a) DCLL



(b) DIMON 回报

图六、无 DCR 温度补偿之 DCLL 和 DIMON 报告结果

6. 结论

本应用须知提供了 DCR 温度补偿电路的设计方法及实用的设计公式；经由适当的设计，它可以有效地减少因温度变化而对 DCR 值产生的影响，因此能在 DCR 电流检测应用中，提供正确的电流讯息。

7. 参考数据

- [1] 立锜科技 RT8884B 规格书。
 [2] 立锜科技 RT8893 规格书。
 [3] Intel, VR12.5 Pulse Width Modulation (PWM) 规格
 [4] 立锜科技之应用须知 AN033 「不同 DCR 电流检测架构之比较」。

附录 I. DCR 温度补偿网络之公式推导

将三个温度点 (TL, TR, TH) 都代入式 (8), 即可得式 (12) 至式 (14)。而式 (15) 和式 (16) 可分别由式 (12) - 式 (13) 和式 (13) - 式 (14) 得出。

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

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

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

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

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

定义 $k_R = R_{sump} + R_{sums2}$ ，则可进一步将式 (15) 和式 (16) 表示为式 (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) 导出。

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

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

从式 (18), 可得 R_{sump} , 如式 (20)。

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

然后, 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} 可因此推导而得, 如式 (22)。

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

相关资源

立錡科技电子报

[订阅立錡科技电子报](#)

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.