

# 估算初级端稳压恒流反激式转换器的输出电流容限(第2部分)

Stéphanie Cannenterre

(安森美半导体, 法国图卢兹)

## 1 前言

本文的第1部分介绍了初级端稳压恒流反激式转换器的分析模型。我们也考虑了通过与实验结果进行对比来验证这个模型的有效性。该模型将使我们能够确定在LED驱动器应用中,在最差的情况下能够实现的反激式输出电流的精度。在第2部分中,我们将通过执行蒙特卡罗分析来估算转换器在最差情况下的输出电流极限。

## 2 最差情况下的电流分析(WCCA)

WCCA让我们能够对给定电路设计的风险和极限进行评估。的确,电子电路是采用特定元件和参数值设计的。但元件并不完美,由于制造容限、以及时间和环境的影响,它们的实际值和参数会有所不同。通常情况下,当运用WCCA时,会考虑初始容限、工作温度和老化等对部件的影响。此外,太空应用还会考虑辐射对部件值的影响。在本文涉及的分析中,对于电阻器、电容器和电感器,我们只考虑初始容限对元件参数的影响。此外,对于控制器,我们仅考虑温度和老化对其的影响,因为其所有参数都规定为 $-40^{\circ}\text{C}$ 至 $125^{\circ}\text{C}$ 范围内的结温,数据表限制包括老化测试。

WCCA同时采用了几组方法来分析系统容限。其中包括<sup>[1,2]</sup>:

- 极端值分析(EVA)
- 灵敏度分析
- 蒙特卡罗分析(MCA)

EVA包括找到最大化和最小化系统/电路输出(这里指输出电流)的参数,并将其效应进行堆叠,找到电路输出的最差值。需要有明确的函数来描述系统输出变量及其参数,以便我们可以推导出参数向哪个方向(最大/最小)变化会导致电路输出的最差值。如果我们对系统有一个简单合理的表达式,这就可以通过检查来完成。但对于更复杂的、可能涉及非线性函数的表达式,要想确定最差的参数集可能非常困难。针对这些较难的情况,我们可能会采用灵敏度分析。

单调系统在最差情况下(最极端)的值会出现在当它所有参数在最大值或最小值处达到峰值时。因此,这种系统的EVA结果代表了其可能的最差性能特征,故结果上可能看起来不乐观。对于非单调系统,当所有参数被推到一个或另一个极端时,不一定能够找到函数的最小/最大解,而当一些参数处于其范围的中间时则可能会被找到。

通过灵敏度分析能够了解每个参数(例如: $V_{\text{REF}}$ 、 $R_{\text{sense}}$ 、 $L_p$ ...)对系统输出变量(例如: $I_{\text{out}}$ )的影

响。电路灵敏度是衡量电路在所有其他参数保持不变时，如何对单个组件参数的增量变化做出反应的度量。实际上，它需要找到与所有考虑到的变量相关的系统输出的区别。当难以或无法通过检查确定最差的电路参数组合用于极限值分析时，通常可采用灵敏度分析。

蒙特卡罗分析是一种统计方法，通常基于电路模拟来评估系统的性能。它是对样本数据系统的置信区间的评估。电路模拟程序（如 SPICE）通常可为蒙特卡罗模拟提供脚本。该模拟包括遵循定义的概率分布（正态或均匀）为每个参数生成随机值，并运行多次模拟，计算系统的输出值。蒙特卡罗模拟通常会生成一个直方图，显示多次运行的输出值散布情况。该直方图通常看似高斯曲线，模拟器也给出输出平均值和标准差。可采用以下两种方法之一对蒙特卡罗模拟的结果进行分析<sup>[3]</sup>：

- 正态分布的容限区间
- 无分布容限区间

对于这两种方法而言，分析结果将是一个输出值的区间，代表与置信水平相关的覆盖率。

如果 SPICE 蒙特卡罗输出不呈高斯分布，则采用无分布容限区间方法。在本文的案例中，这种方法的容限区间取决于抽样进行 N 次测量或模拟得出的最小和最大数据值。测量次数 N 将设定置信水平和覆盖率水平。参考文献[4]给出了计算所需模拟次数的方法，以便将最小和最大结果点作为给定的覆盖率 / 置信水平的容限区间。基于此，结果如下：

- 须进行 2456 次模拟才能获得 99.73 / 99 的覆盖率 / 置信水平
- 须进行 1439 次模拟才能获得 99.73 / 90 的覆盖率 / 置信水平
- 须进行 388 次模

拟才能获得 99/90 的覆盖率 / 置信水平

如果手头只有一个台式电脑可用于模拟，进行 2456 次和 1439 次的模拟就不实际，因为一台台式电脑需要几天的时间才能完成这么多次 PSR 恒流反激模拟。但 388 次模拟是能够实现的。

为我们的系统配备一个分析模型能够带有一个 MCA，比采用 SPICE 模拟器要快得多。事实上，与线性转换器相反，PSR 反激是一个开关模式电源。必须首先进行瞬态模拟，直至达到稳定状态以测量输出电流值。Mathcad<sup>®</sup> 计算输出电流分布只需几秒钟，考虑到 2456 或更多不同的值，而 SPICE 在瞬态分析中运行 2456 次模拟则需要几个小时。

为进行 WCCA，我们需要确定研究中需要考量的参数。上一段中提出的分析模型包含能够影响输出电流的变量。图 1 中总结了这些参数，显示了反激式恒流转换器的原理图，标注蓝色的是研究中纳入考量的元件或参数。另外，还要考量到传播延迟  $t_{prop}$ 。

该研究的目标是计算给定输入电压和输出负载下的输出电流耗散，因此  $V_{in}$  和  $V_{out}$  被视为常量。匝数比  $N_p$  也将被视为常量。对于控制器，我们将参考电压  $V_{REF}$  和至电流转换器  $K_{LFF}$  的线路前馈电压视为可变参数。对于控制器周围的元件， $R_{BOU}$  和  $R_{BOL}$  是线路电压感测电阻器，用于建立通过  $R_{LFF}$  影响电流感测电压的线路前馈偏移电流。

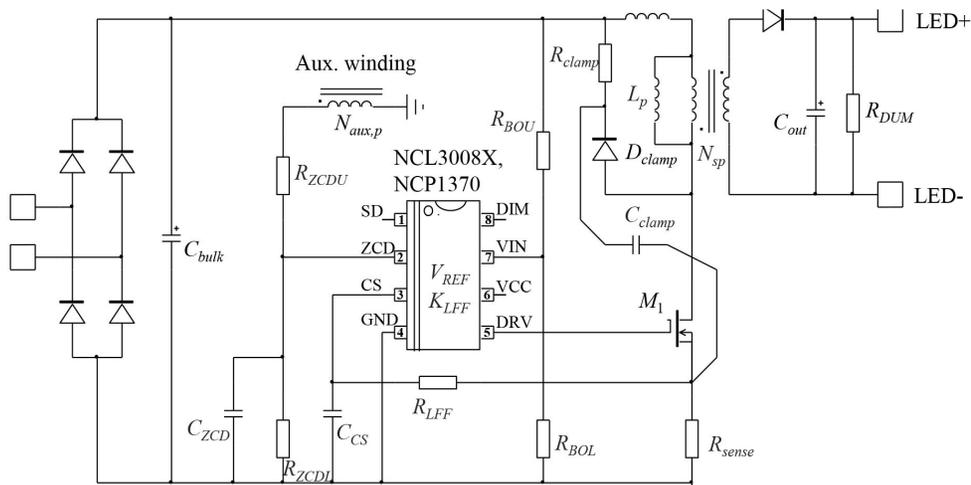


图 1 初级端稳压恒流反激式转换器中用于研究最差情况下分析的元件

反激式变压器的初级电感和漏电感 ( $L_p$ ,  $L_{leak}$ )、以及感测电阻器可直接影响电流设定值,因此它们也属于研究范围内。

如本文第 1 部分所讲的,RCD 钳位电阻器固定了影响输出电流的钳位电压,因此它也是研究所需要的。

此外,本研究只考量了这些参数的初始容限(除上一段中解释过的控制器参数)。目标是提供在转换器使用寿命之初对输出电流的预期范围的估算。

表 1 总结了在研究耗散时需要考量的元件。

表 1 参数变化

参数	描述	典型值	变化率 (%)	变化	分布
$V_{REF}$	恒定电流参考	500 mV	+/- 1.6% ( $T_j = 0$ to $85^\circ\text{C}$ )	$\Delta V_{REF} =$ +/- 8 mV	均匀分布
$R_{sense}$	感测电阻	3 $\Omega$	+/- 1%	$\Delta R_{sense} =$ +/- 30 m $\Omega$	高斯分布
$L_p$	初级电感	1860 $\mu\text{H}$	+/- 7%	$\Delta L_p =$ +/- 130.2 $\mu\text{H}$	高斯分布
$R_{LFF}$	$V_{CS (offset)}$ 参数中的 CS 偏移电阻器	1.6 k $\Omega$	+/- 1%	$\Delta R_{LFF} =$ +/- 16 $\Omega$	高斯分布
$K_{LFF}$	生成 $V_{CS (offset)}$ 所需的控制器参数	17 $\mu\text{A} / \text{V}$	+/- 12% ( $T_j = -40$ to $125^\circ\text{C}$ )	$\Delta K_{LFF} =$ +/- 2.04 $\mu\text{A} / \text{V}$	高斯分布
$R_{BOU}$	欠压电阻 (计算 $V_{CS (offset)}$ 所必需的)	9.9 M $\Omega$	+/- 1%	$\Delta R_{BOU} =$ +/- 99 k $\Omega$	高斯分布
$R_{BOL}$	欠压电阻 (计算 $V_{CS (offset)}$ 所必需的)	100 k $\Omega$	+/- 1%	$\Delta R_{BOL} =$ +/- 1 k $\Omega$	高斯分布
$R_{clamp}$	RCD 钳位电阻	270 k $\Omega$	+/- 5%	$\Delta R_{clamp} =$ +/- 13.5 k $\Omega$	高斯分布
$t_{prop}$	传播延迟	140 ns	+/- 14%	$\Delta t_{prop} =$ +/- 19.6 ns	高斯分布
$R_{ZCDU}$	ZCD 引脚上方电阻器	24 k $\Omega$	+/- 1%	$\Delta R_{ZCDU} =$ +/- 240 $\Omega$	高斯分布
$R_{ZCDL}$	ZCD 引脚下方电阻器	8.2 k $\Omega$	+/- 1%	$\Delta R_{ZCDL} =$ +/- 82 $\Omega$	高斯分布
$C_{ZCD}$	ZCD 引脚电容器	22 pF	+/- 5%	$\Delta C_{ZCD} =$ +/- 1.1 pF	高斯分布
$C_{CS}$	CS 引脚电容器	27 pF	+/- 5%	$\Delta C_{CS} =$ +/- 1.35 pF	高斯分布

下一步包括遵循特定的分布(正态或均匀)为每个参数生成具有随机值的向量。为了能够为每个参数选择正确的分布,我们需要了解组件的制造工艺或生产数据。对于控制器,我们具有这方面的知识,但对电阻器或变压器就不具备了。参考文献[4]表明,当参数的分布函数未知时,应假定为正态分布。另一方面,参考文献[5]建议在开始分析时对所有变量都采用均匀分布。最终,我选择将  $R_{sense}$ 、 $R_{LFF}$ 、 $R_{clamp}$ 、 $R_{BOU}$ 、 $R_{BOL}$ 、 $K_{LFF}$ 、 $R_{ZCDU}$ 、 $R_{ZCDL}$ 、 $C_{ZCD}$ 、以及  $t_{prop}$  指定为正态分布。

参数  $V_{REF}$  经调整后可为输出电流稳压提供严

谨的参考,因此,均匀分布将受此参数的影响。

我们考虑向量的维数为 2456 个元素,这意味着软件将为每个参数生成一个包含 2456 个随机值的向量。例如,使用 Mathcad®, 命令行 `runif (size, lower_limit, higher_limit)` 返回 `size` (大小) 元素在 `lower_limit` (下限值) 和 `higher_limit` (上限值) 之间均匀分布的矢量。

要采用 Mathcad® 定义正态分布,就需要知道所考量参数的标准差。由于我们将影响电阻器和初级电感的正态分布,因此我们必须从参数的初始容限中提取标准差。图 2 描绘了具有标准正态分布的随机变量的概率密度函数(PDF)。标准正态分布是均数为 0、标准差为 1 的正态分布。可以观察到,从正态分布中抽取的随机值中,约 99.73% 与平均值相差 +/- 3 个标准差 ( $\sigma$ ),即  $3\sigma$  准则。换句话说,随机变量值超出平均值 +/-  $3\sigma$  的概率是 0.0027。我们可以将其作为起点,并将极限设定在 +/-  $3\sigma$ 。基于此,我们可以将  $R_{sense}$  的标准差定义为:

$$\sigma_{R_{sense}} = \frac{\Delta R_{sense}}{3} \quad (1)$$

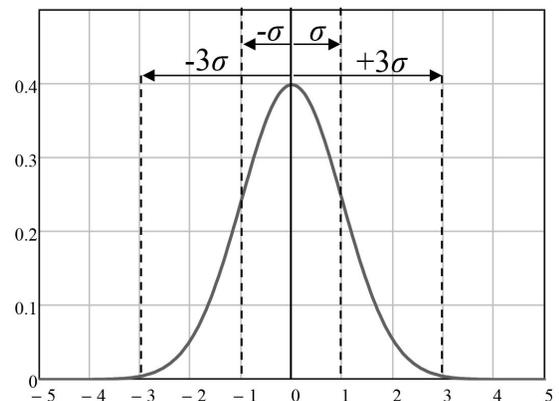


图 2 标准正态分布

采用 Mathcad,使用关键字 `rnorm`,可将正态分布法则与参数相关联。

如果  $R_{sense}$  的随机值遵循高斯分布,则 99.73% 的值在标准差的 +/- 3 倍以内:对于  $R_{sense}$ ,我们得出图 3 中所示的直方图。为绘制直方图, $R_{sense}$  数组中的值被划分为 50 个直方条(术语参见附录 II)。每个直方条的跨度约为 1.4 m $\Omega$ 。垂直轴表示落入特定直

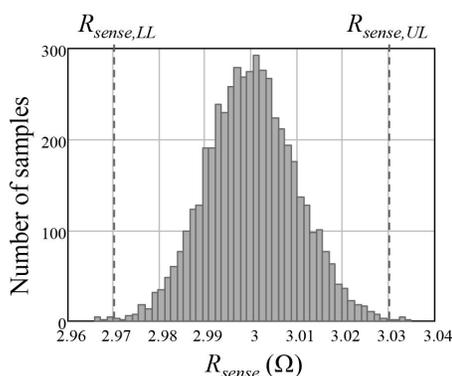


图3 感测电阻器正态分布

方条中的值的数量。例如，约 275 个样本处于 2.9993 Ω 至 3.0007 Ω 的范围内。观察此图表，可以看到直方图中某些值位于  $R_{sense} \pm 1\%$  范围之外，即图中  $R_{sense,LL}$  和  $R_{sense,UL}$  之外的范围。由于制造商的规格也是统计性的，我们不能完全确定电阻值不会超出  $\pm 1\%$  的初始容限范围，除非在生产时对电阻器 100% 都进行测试。如果 100% 的电阻器都经过测试，假设其为截尾正态 PDF 就可能会更精确（图 4）。

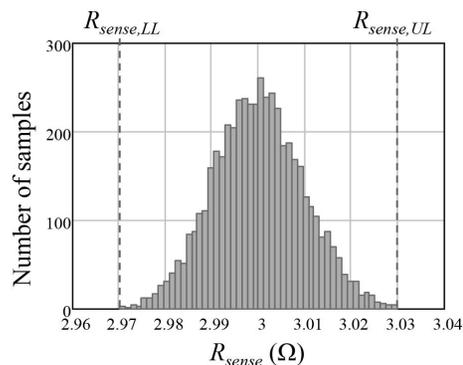


图4 钳位在  $\pm 1\%$  的感测电阻器正态分布

在定义了表 1 中提到的每个参数的矢量之后，我们可以计算  $I_{L,pk}$  和  $V_{clamp}$  的矢量，最后获得表示  $I_{out}$  可能值的直方图，如图 5 所示。我们可以提取  $V_{in} = 162\text{ V}$ 、 $V_{out} = 20\text{ V}$  时的平均输出电流、及最大值和最小值：

$$\begin{aligned} -I_{out,mean} &= 479\text{ mA} \\ -\sigma_{Iout} &= 4.99\text{ mA} \\ -I_{out,min} &= 465.3\text{ mA} \\ -I_{out,max} &= 492.2\text{ mA} \end{aligned}$$

产生的输出电流分布并非高斯分布。因此，我们

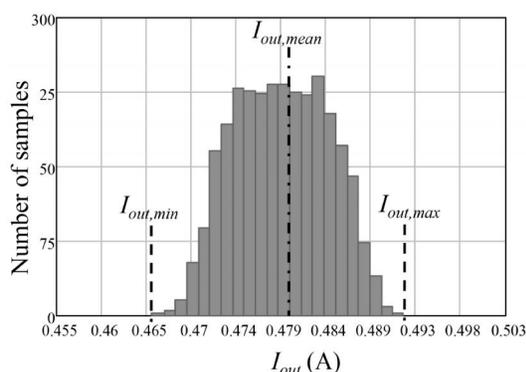


图5 输出电流分布

将采用无分布区间方法来阐释结果。对于 2456 个样本，输出电流的区间为  $[I_{out,min}; I_{out,max}]$ ，覆盖率 / 置信水平为 99.73 / 99。

最初，该设计的目标输出电流为 480 mA:  $I_{out,nom} = 480\text{ mA}$ 。

最后，如果我们将  $I_{out}$  的精度定义为与目标值  $I_{out,nom}$  的偏差，则：

$$\begin{aligned} \delta I_{out-} &= 100 \frac{I_{out,min} - I_{out,nom}}{I_{out,nom}} \\ &= 100 \frac{465.3\text{m} - 480\text{m}}{480\text{m}} = -3.1\% \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \delta I_{out+} &= 100 \frac{I_{out,max} - I_{out,nom}}{I_{out,nom}} \\ &= 100 \frac{492.2\text{m} - 480\text{m}}{480\text{m}} = 2.5\% \end{aligned} \quad (3)$$

考虑到控制器参数的温度范围为 0 到 85℃，输出电流容限约为  $\pm 3\%$ 。为与模拟器进行比较，我们也采用分析模型来获得输出电流分布，为所有相关参数选择了 388 个随机值，从而得到 99/90 的覆盖率 / 置信水平。结果汇总详见表 2。

表 2 分析模型与 SPICE 模拟器的 MCA 结果对比

	Spice 模拟器	分析模型	
	388 次运行	388 个样本	2456 个样本
覆盖率/置信水平 (% / %)	99 / 90	99 / 90	99.73 / 99
$I_{out,mean}$ (mA)	479.2	479.1	479
$\sigma_{Iout}$ (mA)	4.94	5.00	4.93
$I_{out,min}$ (mA)	466.5	467.5	465.3
$I_{out,max}$ (mA)	492.8	493.8	492.2
$I_{out,tolerance} \delta I_{out-}; \delta I_{out+}$ (%; %)	-2.8; +2.7	-2.6; +2.9	-3.1; +2.5

为进行比较,采用 Simplis<sup>®</sup> 执行了相同的操作,Simplis<sup>®</sup> 是专门用于处理开关电源模拟难题的模拟程序。Simplis<sup>®</sup> 与 SPICE 类似,其工作主要在元件级别,但其分段线性(PWL)建模方法使其能够以 10 到 50 倍的速度对开关电路进行瞬态分析。

开发 PSR 控制器(NCL30082)的行为模拟模型是为了执行瞬态模拟以寻找输出电流稳态值。蒙特卡罗分析会运行 388 次瞬态模拟。每次模拟都会将从正态分布或均匀分布中选出的随机值分配给研究相关的参数。计算每次瞬态模拟的 50 个开关周期的平均输出电流,最终得到如表 2 所示的结果。模拟器直接计算 388 次模拟的输出电流的平均值和标准差值。蒙特卡罗模拟持续大约 2 小时,而分析模型只需要不到 1 分钟就能获得 388 或 2456 个随机值的结果。

可以看出 Simplis<sup>®</sup> 的结果与分析模型得出的结果非常相近。

### 3 结论

在构建特定的转换器时,很重要的一点是要检查性能波动,了解电路中所用元件的自然扩展情况。如果从主电源给 LED 串供电看似简单,那么要确保这些 LED 在最终用户使用时能够获得经调节的、稳定的电流,则需要进行大量的统计分析。要想确保最高的产品质量,运行此分析至关重要。

本文的第 1 部分介绍了在恒定电流下工作的 PSR 反激式转换器的分析模型。通过 NCL30082 对

10W 反激式 LED 驱动器进行实验测量,对该分析模型进行了验证,其结果显示出良好的一致性。此外,第 1 部分还探讨了蒙特卡罗分析,这是最差情况下电路分析技术的一部分,用于估算 PSR CC 反激式转换器的输出电流容限。

该蒙特卡罗分析显示,输出电流变化大致在平均输出电流的  $\pm 3\%$  内,覆盖率 / 置信水平为 99.73%/90%。

本文的第 3 部分将介绍 PSR CC 反激的极端值分析和灵敏度分析。**CC**

### 参考文献

- [1] G. G. Mircea I. Mihaiu, "Electronics Designs Verification by Worst Case Circuit Analysis Method".
- [2] B. A. Lenertz, "Electricla Design Worst-Case Circuit Analysis: Guidelines and Drafft Standard (REV A)," Space Systems Group, 2013.
- [3] C. Hymowitz, "Methods of WCCA Analysis," AEI Systems Internal Document, 2001.
- [4] "e-Handbook of Statistical Methods," NIST/SE-MATECH, [Online]. Available: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/prc/section2/prc265.htm>. [Accessed 4 November 2016].
- [5] N. E. Walker, The Design Analysis Handbook, Butterworth-Heinemann, 1998.
- [6] "Tolerance Intervals for Normal Distribution," [Online]. Available: <http://statpages.info/tolintvl.html>.

## 空气产品公司亚洲技术研发中心升级启幕

近日,空气产品公司宣布其位于上海张江高科技园区内的亚洲技术研发中心 2.0 正式启用。

中心 2.0 拥有更全面的研发能力、更先进的实验设施和资深的科研及应用专家团队,将进一步增强公司在中国的科技创新能力,利用先进应用技术支持中国及亚洲地区快速增长的市场。(来自空气产品公司)