

# 利用PMBus数字电源系统管理器进行电流检测—第一部分

Michael Peters, 高级应用工程师

本系列文章分为两部分，这是第一部分。第一部分介绍数字电源系统管理器(DPSM)系列，并说明电流检测的主要方法。另外还会介绍LTpowerPlay®并讨论电能计量。第二部分探讨高压或负电源上的电流检测及精度，并重点介绍DPSM系列的数字方面。

## 简介

电路板级设计人员的任务是赋予电路板以生命，监视其健康状况，调整设置，运行诊断，脱机进行检查，在出现问题时排除故障，以及在无事故的情况下有序地关断复杂的电路板。在电源设计和开发的世界里，电源管理可能不仅仅是一种需要，更是一项硬性要求。电源系统管理器聚合了多种功能，例如上电时序管理、故障检测、裕量测试、协调关断、测量电压、测量电流以及收集数据进行分析。使用LTC297x器件测量电源电流是本文的重点<sup>1</sup>。

对于为FPGA、CPU、光收发器等高价值器件供电的电源，测量其从电源轨汲取的电流可能很重要。对于这些关键电源轨，电路板设计人员可以通过此数据深入了解其性能。当电流信息被测量到，且电流值为数字格式，那么器件就可以计算功率和电能，系统主机也可以执行独特的计算、从数据中分析趋势、安排任务等。

围绕电流检测这一主题已有许多技术文章和应用笔记问世，但没有一篇是专门针对DPSM的。本文涵盖了模拟和数字方面，并描述了用于测量低压、高压和负电源轨的各种支持电路。

## LTC297x DPSM系列

本文的重点是内置电流测量功能的电源系统管理器。表1说明了这些器件之间的差异。

LTC2977/LTC2979/LTC2980/LTM2987可配置用来监视电流，但存在一些限制。只有奇数通道支持电流测量，并且测量值以未缩放的单位(V)返回。这在第二部分中有更详细的介绍。

本文重点介绍LTC2971/LTC2972/LTC2974/LTC2975器件，它们能够测量输出电流，并允许系统软件利用READ\_IOUT命令回读以安培(A)为单位的值。

应用笔记AN105：帮助看懂电流的电流检测电路集合介绍了广泛的电路和使用场景。该集合的一部分适用于ADI数字电源系统管理器。

表1. LTC297x DPSM器件系列

	输出电流监视器	输出过流/欠流监控器	输入电流监视器	电能累计	TpowerPlay支持
LTC2971	✓		✓	✓	✓
LTC2972	✓		✓	✓	✓
LTC2974	✓	✓			✓
LTC2975	✓	✓	✓	✓	✓
LTC2977	奇数通道				✓
LTC2979	奇数通道				✓
LTC2980	奇数通道				✓
LTM2987	奇数通道				✓

<sup>1</sup> 除非另有说明，本应用笔记中的LTC297x指LTC2971、LTC2972、LTC2974、LTC2975、LTC2977、LTC2979、LTC2980和LTM2987，而不包括LTC2970。

## PSM基础

电源系统管理器提供关于电源的关键电压和电流读数的数字视图。这是该产品系列的一个强大特性：系统主机或LTpowerPlay可以支持电路板初始启动、调试、验证或收集基线数据，或者寻找趋势。虽然一些电源通道不需要精确的电流读数，但许多关键的输出通道需要高度精确的电流测量。

本文将介绍各种电流检测选项，包括成本、复杂性和精度之间的权衡。

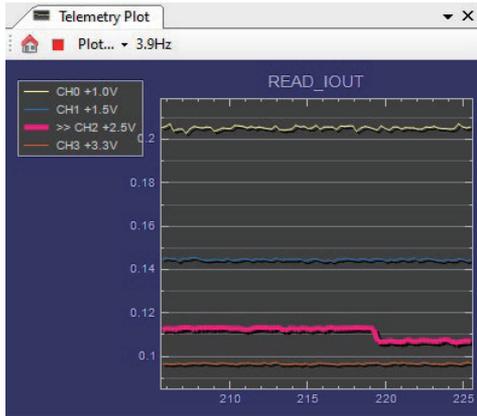


图1. LTpowerPlay 中的 READ\_IOUT 遥测曲线

## 电流检测选项

LTC2971/LTC2972/LTC2974/LTC2975管理器能够精确测量输出电流。应尽可能使用这些器件，因为它们具有专用的电流检测引脚和PMBus命令，可提供以安培为单位的遥测值。

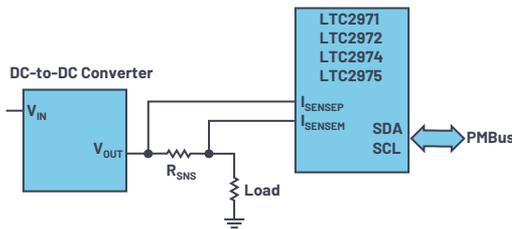


图2. 使用串联分流器进行电流检测

例如，将I\_SENSE线连接到分流器，配置几个寄存器，剩下的工作由芯片完成。芯片会将测得的电压转换为电流值。LTpowerPlay将电流实时显示为数值和遥测曲线。

Output Current Calibration	
IOUT_CAL_GAIN	4.102 mOhms
IOUT_CAL_OFFSET	0.0000 A
MFR_IOUT_CAL_GAIN_TC	3900 ppm/°C
MFR_IOUT_CAL_GAIN_TAU_INV	0.00
MFR_IOUT_CAL_GAIN_THETA	10.000 °C/W

图3. 用于输出电流测量的 PMBus 寄存器设置

也可以使用LTC2977/LTC2979/LTC2980/LTM2987来测量输出电流，但是，READ\_IOUT命令返回的是电压，必须由系统主机或LTpowerPlay将其转换为安培。实践中，这意味着固件（而不是芯片）必须存储串联分流器的值。

串联分流电阻并非检测电流的唯一方法。表2总结了DPSM系列可用的电流检测选项及其权衡。精度、成本、电路板空间和其他因素也需要考虑。

## 表2. 电流检测选项总结

	分流电阻	电感DCR	IMON
精度	非常好	良好	良好，但一般不指定轻载精度
输出路径	有损（IR压降）	无额外损耗	无损
滤波器	每引脚一个单极点滤波器	每引脚一个双极点滤波器	单RC
其他			几乎没有共模限制，某些器件上的IMON引脚上有偏移电压

## 分流电阻检测

最常见的检测方法是使用分流电阻，有时也称为检流电阻。无论DC-DC转换器是开关稳压器还是线性稳压器，分流电阻都与输出串联。反馈电阻分压器连接到输出节点，使得分流器位于反馈环路内，这样当施加负载电流时，稳压器就能补偿分流电阻的IR压降，从而显著提高负载调整率。

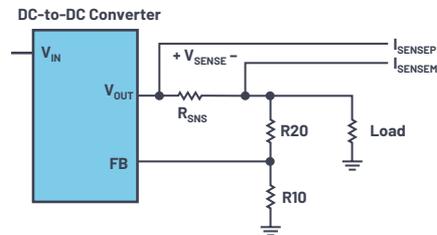


图4. 反馈回路内的检测电阻

用于将电压转换为电流的PMBus命令称为IOUT\_CAL\_GAIN。这是分流电阻的标称电阻。芯片通过I\_SENSE引脚测量分流电阻上的小电压降，在内部执行转换，并使用READ\_IOUT命令返回输出电流。芯片检测到的实际电压可通过MFR\_IOUT\_SENSE\_VOLTAGE命令获得。芯片使用以下公式计算输出电流：

$$\text{Output Current} = \frac{\text{MFR\_IOUT\_SENSE\_VOLTAGE}}{\text{IOUT\_CAL\_GAIN}} \quad (1)$$

使用阻性分流器时，将MFR\_IOUT\_CAL\_GAIN\_TC值设置为制造商的规格以补偿温度变化。通常，大于10 mΩ的分流器具有较低的温度系数：<100 ppm/°C。

数据手册规格中列出了I\_SENSE引脚上产生的最大差分检测电压。大多数LTC297x器件的差分电压以±170 mV为限，这为大多数应用提供了足够的范围。最大检测电压计算如下： $V_{\text{SENSE}} = R_{\text{SNS}} \times I_{\text{OUT(MAX)}}$ 。通常，首先确定最大检测电压， $R_{\text{SNS}}$ 电流检测电阻计算如下： $R_{\text{SNS}} = V_{\text{SENSE}} / I_{\text{OUT(MAX)}}$ 。选择的最大检测电压应是一个足够大的信号，但又不会在输出路径中造成功耗问题或IR压降。50 mV至80 mV是一个很好的最大检测电压。选择电流检测电阻的物理尺寸，其功耗额定值应大于检测电阻的计算功耗： $P_D = R_{\text{SNS}} \times (I_{\text{OUT(MAX)}})^2$ 。

一种相关方法是增加一个以地为基准的电流检测放大器(CSA)，其提供单端输出，该输出被馈送到管理器的电流检测引脚。这种方法通常用于对高于大多数LTC297x管理器的6 V限值的电压轨进行电平转换。CSA应具有良好的高端共模性能。通常从被检测的电压轨和GND为此类器件供电。本文第二部分会详细介绍这种方法。

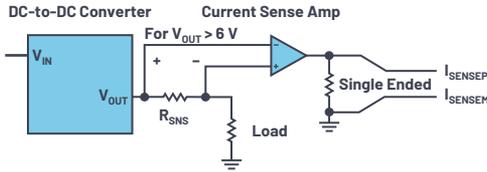


图 5. 用于更高电压轨的电流检测放大器

ADI公司提供了许多易于使用且小尺寸的非PSM  $\mu$ Module<sup>®</sup>器件。PSM管理器是很好的配套器件，可控制上电时序并实施监控。大多数 $\mu$ Module器件都有内置电感，但有些还集成了上方反馈电阻，因此无法在反馈环路内添加外部分流电阻。应当选择允许使用外部上方反馈电阻以获得最高电压精度的 $\mu$ Module器件。

### 电感DCR检测

DCR检测是一种通过降压稳压器的输出电感检测电流的方法。电感可以用理想电感和一个称为DCR的串联电阻来建模（见图6）。这通常是高电流(>20 A)电源轨的首选方法。增加的阻性分流器是一个额外的元件，会消耗功率并产生热量。

要在电感上进行检测，必须能够接触到电感的两端，并且必须在检测点和LTC297x检测引脚之间插入一个滤波器网络。滤波器网络是一个两级差分RC低通滤波器。为了方便和减小尺寸，可以使用4元件电阻阵列。电阻值的选择应使IR压降足够小，以防止LTC297x输入电流造成误差，同时又足够大，以使电容值小于1 $\mu$ F。

LTC2971/LTC2972/LTC2974/LTC2975数据手册提供了关于选择RC值的指南。

示例:

假设 $L = 2.2 \mu\text{H}$ ,  $\text{DCR} = 10 \text{ m}\Omega$ ,  $f_{\text{sw}} = 500 \text{ kHz}$

令 $R_{\text{cm}1} = R_{\text{cm}2} = 1 \text{ k}\Omega$

$$C_{\text{cm}1} = \frac{L}{\text{DCR} \times R_{\text{cm}1}} = \frac{2.2 \mu\text{H}}{0.01 \times 1 \text{ k}\Omega} = 220 \text{ nF} \quad (2)$$

$$C_{\text{cm}2} = \frac{L}{2\pi \times \left(\frac{f_{\text{sw}}}{10}\right) \times R_{\text{cm}2}} = \frac{1}{6.28 \times 50 \text{ kHz} \times 1 \text{ k}\Omega} = 3.2 \text{ nF} \quad (3)$$

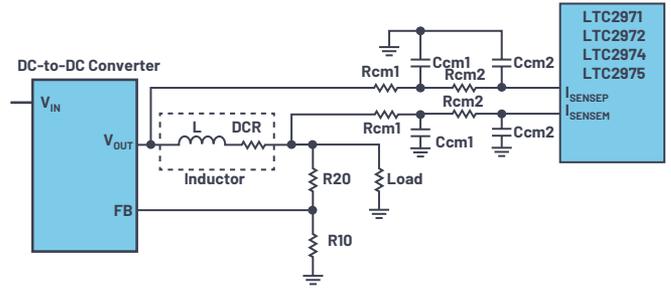


图 6. 使用 2 极点低通滤波器的 DCR 电感检测

DCR检测可实现电流的无损测量，但由于电感绕组电阻或DCR的差异，精度会受到影响。电感DCR规格高达 $\pm 10\%$ 或只有一个最大值的情况并不少见。实际的DCR值会因电感和批次而异。

另一种滤波方案仅使用两个电阻和两个电容，因而元件数量从八个减少到四个，但滤波器的性能不如图7所示的好。

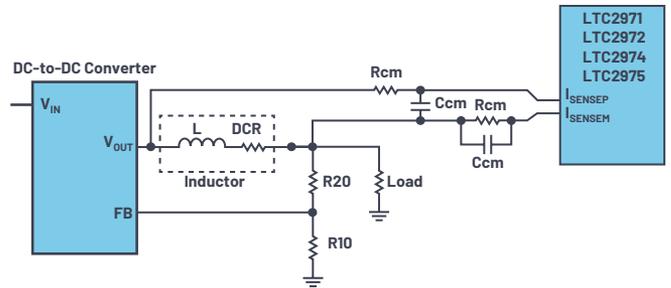


图 7. 使用简化低通滤波器的 DCR 电感检测

### PMBus配置

要利用PMBus命令配置LTC297x，可使用IOUT\_CAL\_GAIN命令设置分流电阻或电感DCR的标称值。对于铜线缠绕的电感，DCR会随着电感温度升高而增加，这会在READ\_IOUT读数中引入误差。使用MFR\_IOUT\_CAL\_GAIN\_TC命令设置铜的温度系数可补偿此误差。在数据手册中，该值的默认值为3900 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 。用户可能需要调整该值以匹配电感，因为当导线是合金而非纯铜时，此参数可能会大幅改变。MFR\_IOUT\_CAL\_GAIN\_THETA表示热时间常数，可对其进行设置。LTC297x数据手册详细介绍了这些内容。

必须将温度传感器（二极管连接的双极性晶体管）靠近电感放置，以实现更准确的电流温度补偿。LTC2971/LTC2972/LTC2974/LTC2975器件具有连接到传感器的 $I_{\text{SENSE}}$ 引脚。

### IMON

IMON引脚在许多稳压器（包括开关和线性）中越来越受欢迎。这些稳压器有一个电流检测输出引脚，藉此可监视稳压器的负载电流。IMON方法的优点在于它是无损的，并且无需担心共模电压，因为LTC297x  $I_{\text{SENSE}}$ 引脚不连接到 $V_{\text{OUT}}$ 。IMON引脚是单端输出信号，代表输出电流的一小部分，它可以是电压输出或电流输出，需要一个电阻连接到GND。电流输出IMON引脚允许用户选择电阻值，从而设置最大满载电压。

单端电压可以是比电流分流器或电感DCR两端产生的电压大得多的信号。LTC2972和LTC2971器件甚至有一个配置位来支持更大的信号电平，它被称为`imon_sense`位。该位位于MFR\_CONFIG命令中，是一个分页命令。

MFR_CONFIG_LTC2972	(0x0180) Expand for Detail...
track_en	<input type="checkbox"/> 0x0 (Channel is not a slav.
cascade_on	<input type="checkbox"/> 0x0 (This channel's contro.
controln_sel	<input checked="" type="radio"/> 0x0 (CONTROL0 is Selected)
	<input type="radio"/> 0x1 (CONTROL1 is Selected)
fast_servo_off	<input type="checkbox"/> 0x0 (fast-servo enabled)
supervisor_reso...	<input type="checkbox"/> 0x0 (Supervisor is HI-RES)
RESERVED9	<input type="checkbox"/> 0x0 (Reserved)
imon_sense	<input checked="" type="checkbox"/> 0x1 (imon buffered current)
servo_continuous	<input checked="" type="checkbox"/> 0x1 (Continuously servo VO

图 8. MFR\_CONFIG 寄存器中的 IMON 位

选择的IMON电阻值应使得在所有负载条件下都能提供宽动态范围。一般情况下，IMON精度在中负载和重负载电流条件下较好，但在轻负载下会下降。有关更多详细信息，请查阅稳压器的数据手册规格。

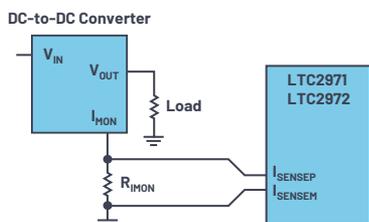


图 9. PSM 利用 IMON 测量电流

一些稳压器将限流功能与IMON引脚结合在一起，该引脚可称为IMON/ILIM。请注意，所选的IMON电阻值不应使得IMON电压在满载时会激活限流电路。示例包括线性稳压器，例如LT3072和LT3086。其他例子有LT3094和LT3045等，一个ILIM引脚起到限流作用，可用作输出电流监视器。对于某些开关稳压器，该引脚可称为IMON，内置的限流功能可能并不明显。示例包括LT8652S和LT8708。限流电路具有折返功能，不会关闭输出。若要关闭输出，LTC298x会检测过流状况并将VOUT\_EN拉低，从而禁用稳压器输出。

## 输入电流检测

一个电源系统可能有一个输入电源，其为多个下游稳压器供电。输入电源电流可由LTC2971、LTC2972或LTC2975进行测量。使用LTC2971/LTC2972/LTC2975测量IIN非常简单，因为这些器件原本就有将引脚连接到V<sub>IN</sub>电流路径中的检测电阻R<sub>SNS</sub>的能力。IIN\_SNS引脚的直接接线以V<sub>IN</sub>电源为限，对于LTC2972/LTC2975而言，该值<15V；对于LTC2971而言，该值<60V。

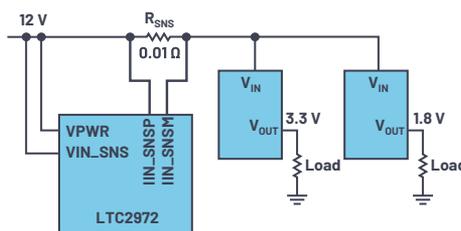


图 10. V<sub>IN</sub> 电流和电压检测

无论是测量输出电流还是输入电源电流，都有一个用户可编程PMBus寄存器可将检测电压转换为电流。测量输入电源电流时，使用PMBus寄存器MFR\_IIN\_CAL\_GAIN，然后便可从READ\_IIN寄存器读取输入电源电流。

Input Current Calibration		
MFR_IIN_CAL_GAIN	10.000	mOhms
MFR_IIN_CAL_GAIN_TC	0	ppm/°C

图 11. 用于 V<sub>IN</sub> 电流测量的 PMBus 寄存器

我们不仅可以测量电流，还可以测量电压。PMBus命令分别为READ\_IIN和READ\_VIN。利用电流、电压和时基，LTC2971/LTC2972/LTC2975还能计算输送给系统的功率和电能。蓄能器将在下一节中描述。

LTC2971能够检测60V电源轨上的输入电源电流。IIN\_SNS引脚可以直接连接到电源输入上的检测电阻。对于24V以上的电源电压，建议使用降压稳压器通过VPWR引脚为LTC2971供电，这样可节省功率并避免LTC2971自发热。由于V<sub>PWR</sub> × I<sub>PWR</sub>会产生功耗，可能导致芯片温度升高到预期以上。ADP2360具有一个固定5 V选项，可为降压稳压器提供低成本、小尺寸的解决方案。

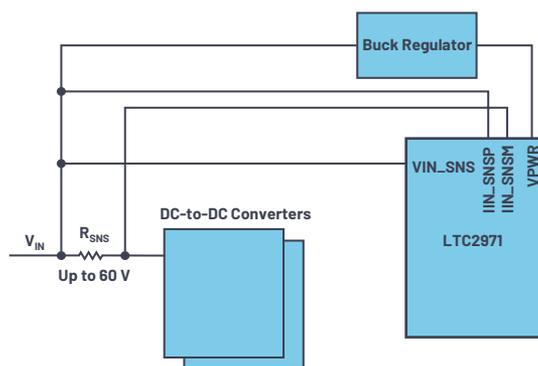


图 12. 使用 LTC2971 检测高压 V<sub>IN</sub> 电流和电压

## 电能计量

监视电能使用可能很重要。无论输入电源是开关稳压器、太阳能电池板输出还是电池电源，了解系统消耗的总电能可能很有用。LTC2971/LTC2972/LTC2975能够检测输入电源的高端电流。此特性允许管理器测量输入电源电流。LTpowerPlay对于探索与输入电源电流和电能读数相关的特性非常有用。选择READ\_EIN命令后，遥测窗口就会显示电能累计结果的实时曲线。

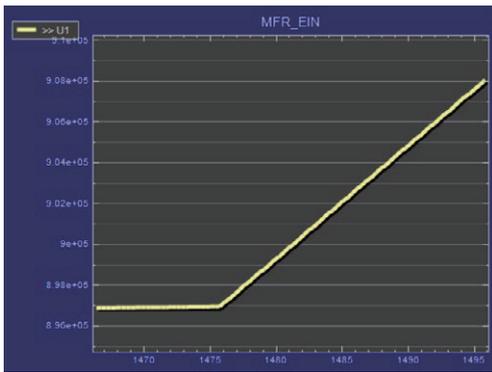


图 13. LTPowerPlay 绘制的实时电能图

电表还会测量输入电源电压，因此也能够报告输入功率。由于电能是功率和时间的乘积，因此累计电能是根据管理器的内部时钟提供的。GUI 右上角显示的仪表提供了更多信息。指针是输入功率（以瓦特为单位）的实时指示器，较小的五个刻度盘显示总累计电能，类似于家用电表。为方便起见，还提供了数字读数。

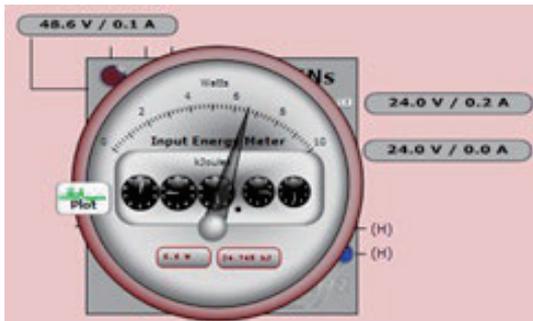


图 14. LTPowerPlay 中的电表

LTPowerPlay 提供一个简单易懂的界面，其中汇集了输入和输出电流、电压、功率、电能读数。

输入电流、输入电压、输入功率和输入电能可以表格形式查看，这些值显示在 GUI 的遥测部分。MFR\_EIN 寄存器保存累计电能值（以毫焦耳为单位）。还有一个电能累计器处于活动状态的总时间，显示为 MFR\_EIN\_TIME 寄存器。当单位从 mJ 变为 J 再到 kJ 时，GUI 会自动更新所显示的 SI 前缀。



## 作者简介

Michael Peters 是 ADI 公司电源系统管理器件方面的高级应用工程师。他在模拟和数字电路领域拥有 30 多年的经验，包括在以前的公司从事存储器件工作的经验。他毕业于密歇根大学安娜堡分校，获电气工程学士学位。联系方式：[michael.peters@analog.com](mailto:michael.peters@analog.com)。

Telemetry -- Input Voltage	
MFR_VIN_PEAK_LTC	48.5000 V
READ_VIN	48.5000 V
MFR_VIN_MIN_LTC	48.5000 V
Telemetry -- Input Current	
MFR_IIN_PEAK	0.0118 A
READ_IIN	0.0115 A
MFR_IIN_MIN	0.0001 A
Telemetry -- Input Power	
MFR_PIN_PEAK	0.573 W
READ_PIN	0.559 W
MFR_PIN_MIN	0.007 W
Telemetry -- Input Energy	
MFR_EIN	1.044 kJ
MFR_EIN_TIME	0 days, 00h : 31m : 39...
MFR_EIN_WATTS	0.551W

图 15. 与输入电源电压、电流、功率和电能相关的遥测视图

表 3 总结了可以从 LTC297x 回读的所有遥测数据。寄存器是 I<sup>2</sup>C/PMBus 字读取，但 MFR\_EIN 寄存器除外，它是块读取。

表 3. 遥测总结

寄存器名称	LTC2971/LTC2972/LTC2975	LTC2974	LTC2977/LTC2979/ LTC2980/LTM2987
READ_IOUT	✓	✓	
READ_VOUT	✓	✓	✓ <sup>1</sup>
READ_POUT	✓	✓	
READ_IIN	✓		
READ_VIN	✓	✓	✓
READ_PIN	✓		
MFR_EIN	✓ <sup>2</sup>		

1. 如果设置了 adc\_hires 位，则 READ\_VOUT 值以 mV 为单位返回，LTI 格式。
2. 块读取，包括以 mJ 为单位的电能值和以 ms 为单位的经过时间。

