

高性能降压稳压器解决了 电流环路中发送器电路的 功耗问题

Zhongming Ye, 首席应用工程师
Juan-G. Aranda, 设计经理

摘要

本文介绍如何使用LT8618（一款100 mA的高速同步单片降压型开关稳压器）代替LDO稳压器，为电流环路发送器设计紧凑型电源。我们对其性能进行了评估，并选择符合严格的工业标准的器件。此外还提供了效率、启动和纹波测试数据。

引言

自动化控制在工业和消费类应用中越来越普遍，但即使是一流的自动化解决方案，也要依赖一种古老的技术：电流环路。电流环路是控制环路中普遍存在的组件，可以双向工作：它们将测量结果从传感器传递给可编程逻辑控制器(PLC)，反之，也可将控制输出从PLC传递给工艺调制装置。

4 mA至20 mA的电流环路是通过双绞线将数据从远程传感器准确可靠地传输至PLC的主流行业标准方法。简单、耐用、坚固、成熟可靠的长距离数据传输、良好的抗噪性和低安装成本，使这种接口非常适合长时间的工业工艺控制和在嘈杂环境下对远程物体进行自动监测。传统上，由于前面提到的诸多原因，电流环路的电源是通过线性稳压器提供的。与开关稳压器相比，使用线性稳压器的缺点是效率相对较低，电流容量有限。效率低下会导致散热问题，而有限的电流往往会妨碍添加所需的控制系统功能。

新型高效、高输入电压降压稳压器足够坚固、足够小巧，可替代很多电流环路系统中的线性稳压器。与线性稳压器相比，降压稳压器有很多优点，包括电流容量更高、输入范围更宽、系统效率更高。降压稳压器具有明显的性能优势，在高开关频率下的 t_{on} 时间较短，有助于提供紧凑、鲁棒的解决方案。

背景知识

图1所示的标准4 mA至20 mA电流环路可用于将现场仪器仪表的传感器信息和控制信号传输至工艺调制装置，如阀门定位器或其它输出执行器。它由四个部分组成：

- 电流环路电源：电源电压 V_{DC} 根据应用有所不同（9 V_{DC}、12 V_{DC}、24 V_{DC}等），电位至少比电路中组合部件（如发送器、接收器和导线）的压降高10%。该 V_{DC} 由本地降压型稳压器分接，为传感器和其它部件供电。
- 发送器：发送器的主要部件是传感器或变换器。它将温度、压力、电流、距离或磁场等物理信号转换为电信号。如果转换后的信号是模拟电压，则需要一个电压-电流转换器作为发送器的一部分，将电压转换为4 mA至20 mA的电流信号。对于智能数字输出传感器，则通过DAC将数字信号转换回模拟信号。发送器LDO或降压型稳压器中的本地电源为所有这些模拟、数字和参考电路供电。

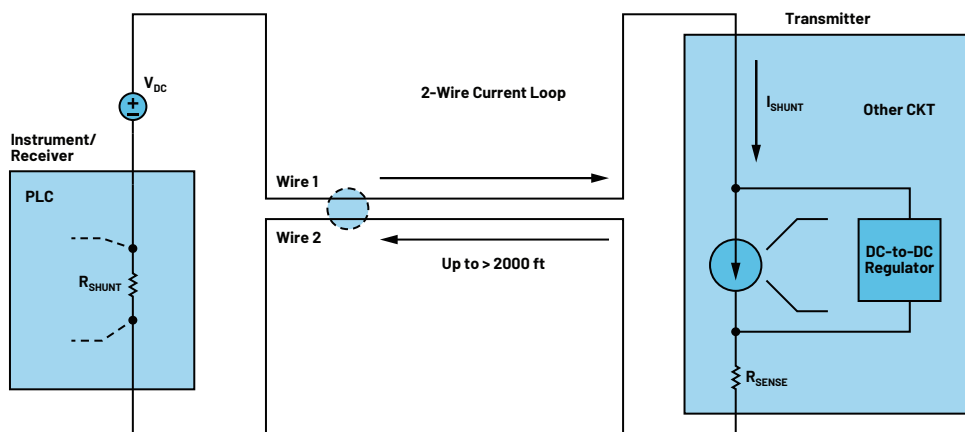


图1. 2线电流环路示意图。

- 接收器或监控器：接收器将4 mA至20 mA的电流信号转换为电压信号，可以进一步处理和/或显示。电流信号通过高精度分路电阻器 R_{SHUNT} 和/或模数转换器或数据采集电路，转换为有用的电压电平。在仪表终端，本地降压型稳压器为接收器电路供电。
- 2线或4线环路：完整的电流环路电路可延伸2000英尺以上，由串联的发送器、电源和接收器组成。在2线4 mA至20 mA电流环路中，电源与电流环路共用同一环路。

例如，要使用远程压力传感器测量0 psi至50 psi的压力，那么4 mA至20 mA电流接收器电路与压力-电流变换器串联。在传感器端，压力为0 psi时读数为4 mA，压力为50 psi时读数为20 mA。在接收器端，从基尔霍夫第一定律可以知道，分路电阻器上会出现相同的电流，并将其转换为电压信号。

工业、炼油厂、公路监控和消费类应用中的自动化操作需要高性能传感器技术和可靠、准确的电流环路来传输传感器信息。电流环路的组件必须在扩展的-40 °C至+105 °C工业温度范围内保持高精度、低功耗和可靠运行，并具备必要的安全性和系统功能。

发送器（传感器）一侧的电源电压在瞬态时可高达65 V，必须将其转换至5 V或3.3 V。由于传感器电路通常设计为直接从电流环路取电（没有额外的本地电源），因此通常限制在3.5 mA。随着发送器功能特性的增加，当使用传统线性稳压器时，这个限制就成了一个问题，因为它不能提供任何额外的电流。此外，在使用线性稳压器的系统中，大部分电量必须在稳压器中消耗掉，从而在封装系统中产生大量热量。

LT8618将输入范围扩大到65 V，并将负载能力扩大到15 mA。在发射器被封装并暴露在恶劣的环境变化中的情况下，它的高效率消除了电流环路系统设计中的热约束。建议使用一个低成本的滤波器来减少电压纹波和电缆侧的电流纹波。本文分析了功率调节器的性能，并提供了元件选型指南，以满足严格的工业要求。此外还提供了效率、启动、纹波等测试数据。

使用具有扩展输入和负载范围的降压转换器闭合电流环路

LT8618是一款紧凑型降压转换器，具有众多功能，可满足工业、汽车及其它不可预测的电源环境的要求。它非常适合4 mA至20 mA的电流环路应用，具有超低静态电流、高效率、宽输入范围、高达65 V的电压和紧凑的尺寸。图2显示了一个完整的发送器电路解决方案，它使用LT8618为MAX6192C高精度电压基准、电压-电流转换以及其它电路供电。

分流电路2SC1623的电流与误差放大器(EA)正输入端施加的电压成正比。2.5 V的基准电压由MAX6192C产生。MAX6192C是一款精密的基准电压源IC，具有低噪声、低压降和最大5 ppm/°C的低温度漂移。对于数字输出与环境变量成比例的智能传感器，DAC可以将数字信号转换为模拟信号，并将其发送至误差放大器。

$$I_{SHUNT} = \frac{(V_{DC1} + V_{REF}) R_{I2}}{R_{I1} R_{SENSE}} \quad (1)$$

因此，通过EA、BJT (2SC1623) 和100Ω (±0.1%) 检测电阻(R_{SENSE})，变换器可将电流环路中的电流从4 mA调制到20 mA，其中4 mA表示非零最小输出，20 mA表示最大信号。即使现场发送器没有过程信号输出，4 mA的非零最小输出或零值以上输出也可以为设备供电。因此，分流电路中的电流与环境变量成正比，比如压力、温度、液位、流量、湿度、辐射、pH值或其它工艺变量。

两根长导线是信息承载电流环路的一部分，也用于从 V_{DC} （接收器侧的电源）向发送器供电。 V_{DC} 的最小电压应足以覆盖导线、分路和发送器的最小工作电压之间的压降。电源电压取决于应用，通常为12 V或24 V，但也可高达36V。

在远程发送器终端，肖特基二极管(D1)可保护发送器免受反向电流的影响。在输入端放置一个齐纳二极管或TVS (D2)二极管可提供进一步的保护，从而限制与电流环路电感成正比的瞬态电压浪涌。LT8618高效单片降压稳压器将环路电压降低至5.5 V或3.3 V，为基准、DAC以及其它功能单元供电。

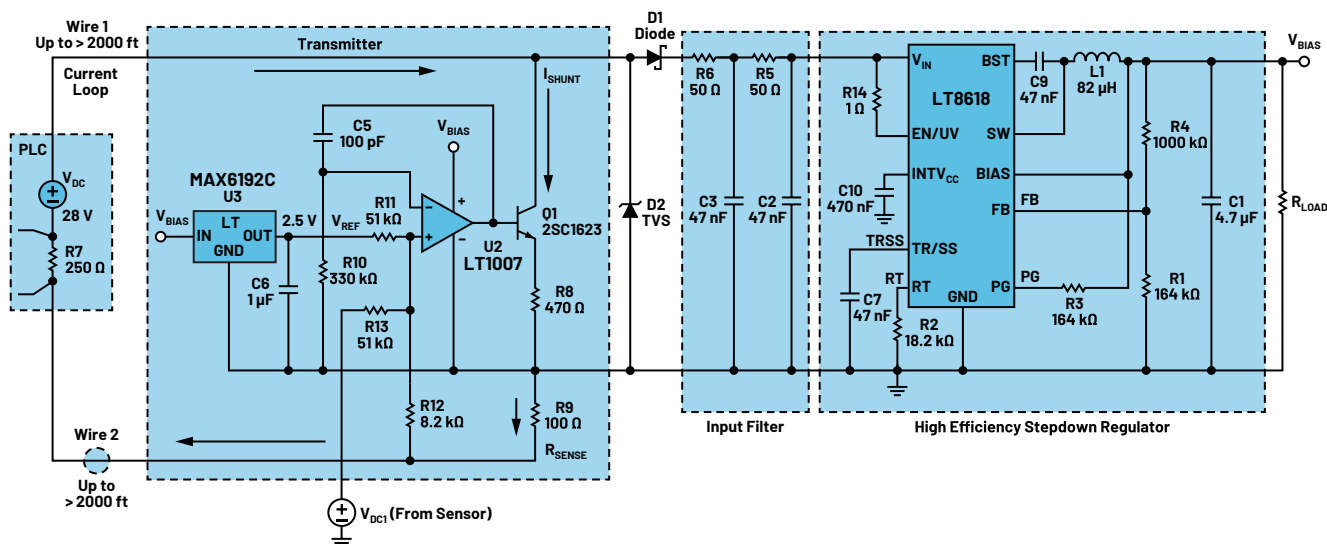


图2. 以LT8618作为直流电源的电流环路。

在图2中， V_{DC} 和发送器之间的接线可以从几英尺到2000英尺不等。电流环路的杂散电感与降压稳压器的输入电容形成一个LC谐振槽。电源侧(V_{DC})的瞬态也出现在远程发送器的输入侧。对于最坏情况下的无阻尼振荡，峰值电压可能是 V_{DC} 的两倍。例如，如果工作输入电压的典型值为24 V，最大规格值为36 V，那么发送器侧的最大电压就有可能超过65 V。如图2所示，可以使用发送器前面的TVS二极管D2轻松地实现保护，以限制瞬态期间的任何浪涌。

另外，还可以通过使用LDO稳压器保护LT8618免受高电压偏移的影响，从而构建一个高效的系统。在这种拓扑结构中，LDO稳压器将调节到输入电压减去其压差，而LT8618则以高效率将~24 V转换为5 V或3.3 V。LDO稳压器的限流值应设置在通常的3.8 mA以下，同时还要保持高效率，并且LT8618的输入电容基本上会使用去耦电容和储能电容。这将支持在电流环路电流消耗最小或无电流消耗的情况下，在后端短时间爆发高负载。由于高压偏移比较短，通常携带的总能量较少，因此在这些瞬变期间，LDO稳压器中产生的功率损失不会影响整体效率；也就是说，LDO稳压器几乎所有时间都处于高降压比之下。

典型的电流环路会限制为整个远程发送器供电的电源电路的输入电流，LDO稳压器的可用负载电流不能超过该输入限流值。另一方面，降压稳压器可以使提供给负载的输入电流成倍增加。图3显示了从24 V输入电压转换为5.5 V输出时LT8618稳压器的输出电流与输入电流的关系。对于3.8 mA的输入限流值，输出电流差不多为15 mA。这部分额外的电力可增加操作余量和启用额外功能单元，简化了系统设计人员的工作。

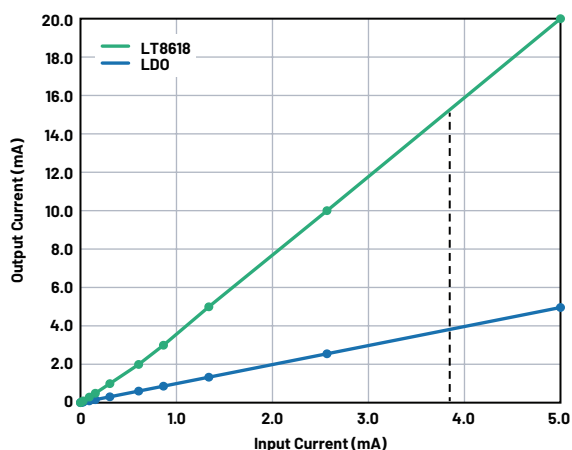


图3. 输出电流与输入电流的关系， $V_{IN} = 24 V$ ， $V_{OUT} = 5.5 V$

突发模式运行可提高轻载时的效率

LDO稳压器的效率与降压比(V_{OUT}/V_{IN})成正比，当输入电压略高于输出电压时，效率会很高。降压比偏高时会出现问题，此时效率非常低，会对系统产生很大的热应力。例如，当输入电压为55 V，输出电压为3.3 V时，LDO稳压器的功率损耗为0.19 W，负载电流为3.8 mA。相比之下，设计合理的降压型稳压器在高降压比下却可以非常高效。此外，与非同步稳压器相比，同步降压型稳压器可以用MOSFET取代续流二极管，从而提高效率。同步降压转换器面临的挑战是在整个负载范围内优化效率，特别是在3 mA至15 mA的轻负载下，此时输入电压可高达65 V。

对于一个典型的同步降压转换器，主要有三种功率损耗：开关损耗、栅极驱动损耗以及与转换器IC控制器逻辑电路相关的损耗。如果降低开关频率，可以大大减少开关和栅极驱动损耗，因此只要以低频率运行转换器，就可以减少轻载时的开关和栅极损耗。

在轻载下，逻辑电路的偏置损耗与相对较低的开关相关损耗相当。偏置电路通常由输出端供电，仅在启动和其它瞬态条件下通过内部LDO稳压器从输入端取电。

在轻载时，LT8618通过运行突发模式(Burst Mode®)来解决逻辑电路损耗问题。这时，电流以短脉冲的形式传递到输出电容，然后进入相对较长的休眠期，在此期间，大多数逻辑控制电路关闭。

为了提高轻载效率，可选用更大值的电感，因为在短开关脉冲期间可以将更多能量传送到输出，降压稳压器也可在这些脉冲之间更长时间地保持休眠模式。通过尽可能地延长脉冲之间的时间，并尽量减少每个短脉冲的开关损耗，LT8618的静态电流可低于2.5 μ A，同时在输入电压高达60 V的情况下保持稳压输出。由于很多发送器电路大多数时候的电流都比较低，与电流消耗高达数十或数百 μ A的典型降压稳压器相比，这种低静态电流节省了大量能源。

图4显示了图2所示的电流环路解决方案的效率，其中5.5 V_{OUT}输出轨与LT8618的BIAS引脚相连。在100 mA满负荷的情况下，峰值效率达到87%，输入电压为28 V，电感为82 μ H。在同样的28 V输入电压下，10 mA负载时的效率可达到或超过77%，表现出众。

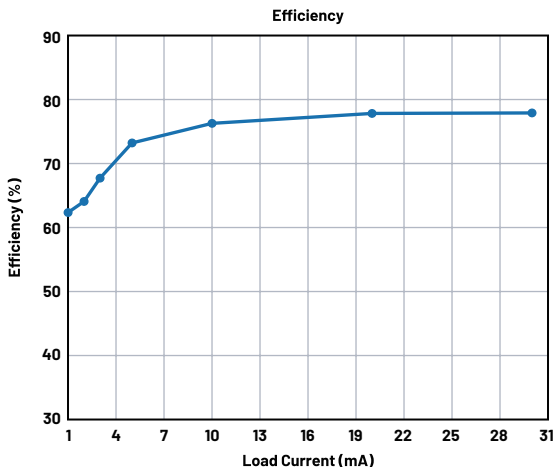


图4. LT8618在轻载时的高效率， $V_{IN} = 28$ V， $V_{OUT} = 5.5$ V， $L = 82$ μ H。

用于限制冲击电流和电流环路纹波的输入滤波器

功率调节器的输入端与电流环路相连，因此，除了稳态限流外，在启动或负载瞬变期间限制纹波电流和冲击电流也很重要。功率转换器启动期间的冲击电流取决于给定软启动时间内输入电容和输出电容的大小。这就需要权衡取舍：尽量减小输入电容，防止产生大的冲击电流，同时又要使其足够大，以保持可接受的低纹波。

降压型转换器的输入电流是脉冲电流，因此，输入电容在为纹波电流提供滤波路径方面起着关键作用。如果没有这个电容，大量的纹波电流将流经较长的电流环路，导致降压行为不可预测。因此，应当有一个最小的输入电容可以满足纹波电流和纹波电压的要求。多层陶瓷电容(MLCC)由于其低ESR和ESL，在纹波电流方面性能优异。

当转换器在突发模式下工作时，电感电流遵循三角形波形。电流环路的阻抗比输入滤波器高得多。因此，输入电容上的纹波电压可通过下面的等式来估算，忽略电容的ESR和ESL，其中 I_{PEAK} 是降压电感中的冲击电流， V_R 是输入电容上的纹波电压（显然，更高的冲击电流需要更大的电容）：

$$C = \frac{I_{PEAK}^2 L}{2V_R V_{IN}} \quad (2)$$

为了尽量减少输入电压纹波，同时保持尽可能小的输入电容，我们倾向于采用较小的降压电感。然而，采用大电感时，突发模式的效率会更高。对于82 μ H电感和1 V纹波，为了避免在任何最小输入情况下触发UVLO，对于使用LT8618的应用，100 nF输入电容就足够了。

大部分纹波电流经过本地去耦电容，而剩余部分与电流环路共享相同的路径。在电缆侧保持较小的电流纹波很重要，因为它将作为电压纹波出现在检流电阻上，并且电压纹波的幅度需要小于ADC读取检流电阻电压的分辨率规格。电流纹波可以通过额外的滤波器进一步减少。RC滤波器是一种很好的设计折衷方案，因为它的输入电流很小，并且与LC滤波器相比成本较低。使用两级或三级级联RC滤波器可以进一步实现更小的纹波电流。

通过LTspice®仿真，我们可以比较三种不同输入滤波器结构在源电缆侧的电流纹波，输入路径中串联的总电阻为100 Ω ，使用LT8618 ($V_{IN} = 28$ V， $V_{OUT} = 5.5$ V) 以及82 μ H电感。电流脉冲相当于被输入滤波器视为LT8618稳压器输入电流的值，此时输出电流为10 mA。

具有100 Ω 和100 nF的单级RC滤波器在源电缆侧具有超过60 μ A的峰峰电流纹波。如果增加电容或级联滤波级，源电缆侧的纹波电流会变小。考虑到降压型稳压器使用更大的直接输入电容时性能更好，并且两级RC滤波器的BOM比三级小，同时源电缆侧的电流纹波类似，我们建议使用两级滤波器，每级选用50 Ω 电阻和47 nF电容。源电缆侧的纹波电流约为30 μ A，相应地在250 Ω 检流电阻上可产生大约7.5 mV的纹波电压，这对8位分辨率的ADC来说差不多足够了。为了进一步降低电缆侧纹波电流，可以在滤波器中使用更大的电容。例如，如果将47 nF电容替换为100 nF的电容，电缆侧纹波电流可降低至仅7 μ A，相应的纹波电压为1.75 mV。

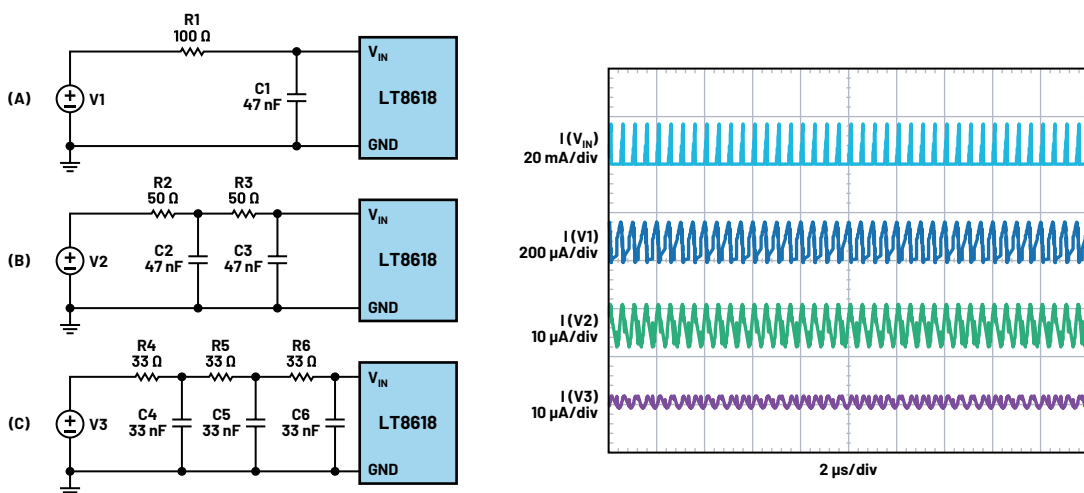


图5. 电流环路电源侧的电流纹波。

在典型的电流环路应用中，客户会指定启动期间的限流值（例如，3.2 mA），但在指定的短时间内可以超过这个限值。在降压转换器中，通常会产生高冲击电流，用于给输入电容充电。输入滤波器的功能有两方面：除了限制电缆源侧的纹波电流外，它还有助于限制启动时的冲击电流。图6显示了输入电压 V_{IN} 为24 V、输出侧负载电流为4 mA时，两级输入滤波器启动期间的输入电流随时间的变化。

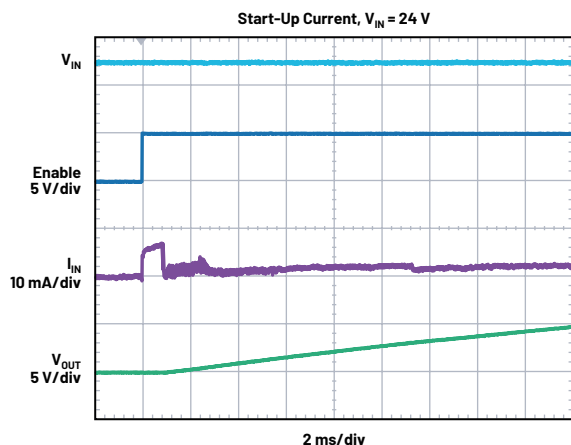


图6. 使用输入滤波器时的启动电流，用于限制冲击电流（从上部开始：输入电压20 V/div，输出电压5 V/div，启用，电缆侧的输入电流，10 mA/div）

结论

电流环路广泛应用于工业和汽车系统中，用于收集传感器信息并将其传输到控制系统，有时要经过相对较长的电线传输。反之，环路将控制器输出和调制指令传输到远程执行器和其它设备。通过改进电流环路中的电源，尤其是用高效降压型稳压器取代传统的线性稳压器，可以显著提高效率和性能，也可以增强电流能力并扩大输入范围。高效率、高输入电压的稳压器采用小型封装，具有较低的最小导通时间，可以实现紧凑的整体解决方案，其尺寸和鲁棒性可与LDO稳压器解决方案相媲美。本文介绍如何在4 mA至20 mA的电流环路发送器中使用LT8618，以满足严格的工业要求。

参考资料

Bryant, James. “[应用工程师问答—10：关于电线。](#)” 模拟对话，第25卷，1991年4月。

作者：Loquinario、Jino和Paul Blanchard. “[AN-1344：高共模电压电流环路发送器前端。](#)” ADI公司，2015年10月。



作者简介

Zhongming Ye是ADI公司的一名电源产品首席应用工程师，工作地点位于美国加利福尼亚州圣克拉拉。他自2009年以来一直在凌力尔特（现为ADI公司的一部分）工作，负责提供各种不同产品的应用支持，包括降压、升压、反激式和正激式转换器。他在电源管理领域的关注点包括面向汽车、医疗和工业应用的高效率、高功率密度和低EMI的高性能电源转换器和稳压器。在加入凌力尔特之前，他在Intersil工作了三年，从事隔离式电源产品的PWM控制器相关工作。他拥有加拿大金斯顿女王大学电气工程博士学位。Zhongming是IEEE电力电子学会的高级会员。



作者简介

Juan-G. Aranda是一名设计经理，在慕尼黑工作。他在16年前加入ADI公司，此后设计多款通用降压稳压器、适合传感器应用的工业线路驱动器、以及用于汽车系统的有源整流器控制器。他最近针对低输出电流应用开发了LT8618和LT8604新型高效降压稳压器系列。Juan拥有西班牙瓦伦西亚理工大学电信工程硕士学位。

