

适用于恶劣汽车环境的综合电源系统设计占用极小空间, 节省电池电量, 并提供低EMI特性

作者: Bin Wu和Zhongming Ye

汽车技术的进步大大增加了现代汽车中的电子内容, 以便提高安全性, 改善驾驶体验, 丰富娱乐功能, 并使电力和能源多样化。我们持续投入工程资源来改善汽车市场的电源管理解决方案。这种努力在技术上结出了累累硕果, 推动电源效率、紧凑性、鲁棒性和EMI性能取得显著进步。

在恶劣条件下, 汽车应用电源必须能够无故障运行——设计人员必须考虑所有的紧急情况, 包括抛负载、冷启动、蓄电池极性接反、双蓄电池跨接、尖峰箝位和LV 124、ISO 7637-2、ISO 17650-2、TL82066定义的其他瞬变状态, 以及机械振动、噪声、极宽的温度范围等。本文主要讨论汽车电源规范的关键要求以及满足汽车规范的解决方案, 包括:

- ▶ 汽车输入瞬变
- ▶ 输入电压范围
- ▶ 输出电压/电流
- ▶ 低静态电流(I_0)
- ▶ 电磁干扰(EMI)

本文展示了几个示例解决方案, 说明了高性能器件组合如何轻松解决汽车电源难题。

恶劣的汽车环境

图1显示了一个完整的电源解决方案, 其满足汽车应用的苛刻要求。在前端, LT8672充当理想二极管, 保护电路免受引擎盖下残酷环境的影响, 防止发生破坏性故障, 例如极性接反。理想二极管之后是一系列低静态电流(I_0)降压型稳压器, 它们具有宽输入范围——工作电压从低至3 V到高达42 V——可为内核、I/O、DDR和外设需要的其他电源轨提供稳定电压。

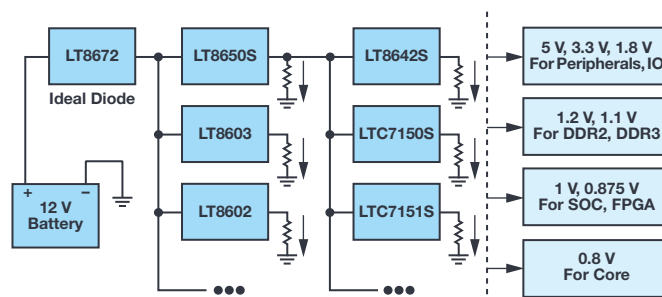


图1. ADI公司满足汽车电子瞬变抗扰度要求的Power by Linear解决方案概览

这些稳压器具有超低静态电流, 可延长永远在线系统的电池运行时间。低噪声电源转换技术最大限度地减少了耗资不菲的降低EMI的需求, 并缩短了满足严格汽车EMI标准的设计和测试周期。对于许多必须穿越冷启动事件的关键功能, LT8603多通道低 I_0 降压型稳压器内置预调节升压控制器, 可实现具有至少三个稳压电压轨的紧凑型解决方案。LT8602可提供四个稳压电压轨来满足许多高级驾驶辅助系统(ADAS)应用的需求, 例如碰撞预警、缓冲刹车和盲点监视。

图2显示了一个传统汽车电气系统，其中发动机驱动交流发电机。交流发电机本质上是一个三相发电机，其交流输出由一个全二极管电桥整流。此整流器的输出用于为铅酸电池充电，并为12 V电路和设备供电。典型负载包括ECU、燃油泵、制动器、风扇、空调、音响系统和照明。越来越多的ADAS被添加到12 V总线，包括外设、I/O、DDR、处理器及其电源。

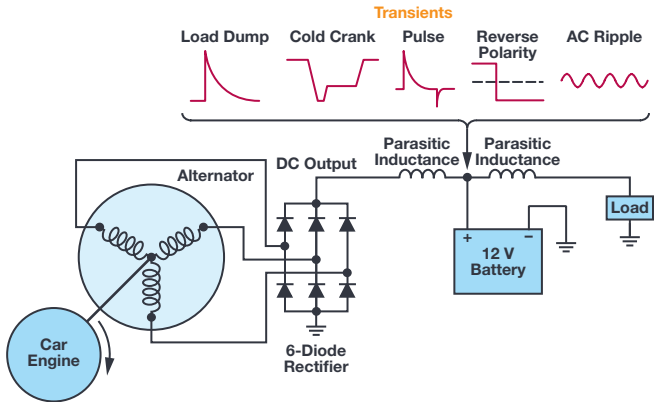


图2. 汽车中的典型电气系统

电动汽车在一定程度上改变了上述画面。发动机被电动机代替，DC-DC转换器将400 V高压锂离子(Li-Ion)电池组电压转换为12 V，而不是交流发电机。然而，传统的12 V交流发电机设备及其瞬态脉冲（包括快速脉冲）仍然存在。

发动机在很窄的转速范围内以峰值效率运行，因此在大多数情况下（下面会有更多说明），交流发电机的稳态输出和电池电压相对稳定，比如大约为13.8 V。每个直接由汽车电池供电的电路必须在9 V至16 V的范围内可靠运行，但鲁棒的汽车电子设计也必能在异常情况（这在最麻烦的时候不可避免地会发生）下运行。

表1. 支持汽车应用的Silent Switcher和Silent Switcher 2单片降压型稳压器

器件	输出数	V _{IN} 范围(V)	输出电流	峰值效率 f _{SW} = 2 MHz V _{IN} = 12 V V _{OUT} = 5 V	12 V时的I _Q 输入(TYP) (μA)	EMI特性	封装
LT8650S	2	3至42	两个通道均为4 A 任一通道为6 A	94.60%	6.2	Silent Switcher 2	6 mm × 4 mm × 0.94 mm LQFN
LT8645S	1	3.4至65	8 A	94%	2.5	Silent Switcher 2	6 mm × 4 mm × 0.94 mm LQFN
LT8643S	1	3.4至42	6 A连续 7 A峰值	95%	2.5	Silent Switcher 2外部补偿	4 mm × 4 mm × 0.94 mm LQFN
LT8640S	1	3.4至42	6 A连续 7 A峰值	95%	2.5	Silent Switcher 2	4 mm × 4 mm × 0.94 mm LQFN
LT8609S	1	3至42	2 A连续 3 A峰值	93%	2.5	Silent Switcher 2	3 mm × 3 mm × 0.94 mm LQFN
LT8641	1	3至65	3.5 A连续 5 A峰值	94%	2.5	Silent Switcher	3 mm × 4 mm 18引脚 QFN
LT8640 LT8640-1	1	3.4至42	5 A连续 7 A峰值	95%	2.5	Silent Switcher LT8640; 跳脉冲 LT8640-1: 强制连续	3 mm × 4 mm 18引脚 QFN
LT8614	1	3.4至42	4 A	94%	2.5	Silent Switcher低纹波 突发工作模式	3 mm × 4 mm 18引脚 QFN
LT8642S	1	2.8至18	10 A	95%	240	Silent Switcher 2	4 mm × 4 mm × 0.94 mm LQFN
LT8646S	1	3.4至65	8 A	94%	2.5	Silent Switcher 2	6 mm × 4 mm × 0.94 mm LQFN

虽然交流发电机的输出名义上是稳定的，但其稳定性并未达到无需调理便可为车辆其他系统供电的程度。意外的电压尖峰或瞬变对下游电子系统有害，如果处理不当，可能会导致这些系统发生故障或造成永久性损坏。在过去几十年中，为了定义汽车电源所面对的尖峰和电压瞬变，并设定设计的预期目标，出现了许多汽车标准，例如ISO 7637-2、ISO 16750-2、LV 124、TL82066。

最重要且最具挑战性的高压瞬变之一是抛负载。在汽车电子中，抛负载是指在电池充电时车辆电池与交流发电机断开连接。在抛负载瞬变期间，由于时间常数很大，交流发电机的励磁场仍会很高——即使没有负载，交流发电机仍然输出高功率。电池是一个大电容，通常会吸收额外的能量，但当端子松动或其他问题导致电池断开连接时，它就无法再提供这项服务。因此，所有其他电子设备都会看到电压浪涌，必须能够承受抛负载事件。一次未受抑制的抛负载事件可以产生100 V以上的电压。庆幸的是，现代汽车交流发电机使用雪崩额定整流二极管，抛负载电压被限制在35 V——这与常态相比仍有很大偏离。抛负载事件最长可持续400 ms。

另一种高压事件是跨接启动。一些拖车使用两个串联电池来确保跨接启动有效，激活汽车电量耗尽的电池，因此汽车的电路必须能够承受双倍标称电池电压(28 V)几分钟。很多Power by Linear™高压降压型稳压器，如Silent Switcher®和Silent Switcher 2系列，包括LT8650S和LT8640S（表1），工作电压最高可达42 V，超出了上述要求。相比之下，额定电压较低的器件则需要箝位电路，这会增加成本并降低效率。某些Power by Linear稳压器，例如LT8645S和LT8646S，额定电压为65 V，支持卡车和飞机应用（其中24 V系统是标准配置）。

当驾驶员发动汽车时，起动器会从电池汲取数百安培的电流，因而又会发生一次电压瞬变。这会在短时间内拉低电池电压。对于传统汽车，只有当汽车由驾驶员启动时才会发生这种情况；例如，启动汽车开到超市，然后再次启动开回家。现代汽车具有启停功能以节省燃料，在往返超市的行程中，可能会多次发生启停事件——例如每遇到一个停车标志和每遇到一个红灯。与传统汽车相比，额外的启停事件给电池和起动器带来的压力大大增加。

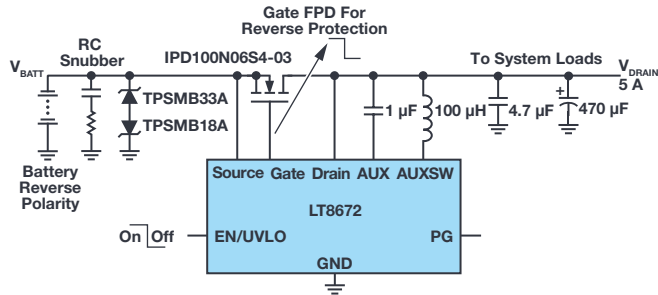


图3. LT8672响应电池极性接反

此外，如果在寒冷的早晨启动汽车，起动器汲取的电流要大于环境温度较高时汲取的电流，电池电压降至3.2 V或更低并持续大约20 ms——这称为冷启动。即使在冷启动条件下，有一些功能也必须保持有效。好消息是，此类关键功能在设计上通常不需要很大的功率。集成解决方案，例如多通道转换器LT8603，即使其输入电压降至3 V以下也能保持稳压。

ISO 7637-2和TL82066定义了许多其他脉冲。有些不仅具有较高的正电压或负电压，还有较高的源阻抗。与上述事件相比，这些脉冲的能量相对较低，并且可以通过适当选择输入TVS进行滤波或箝位。

理想二极管满足汽车抗扰度规范

有源整流控制器LT8672具有高输入电压额定值（+42V、-40V）、低静态电流、超快瞬态响应速度、超低外部FET压降控制等特性，可在12 V汽车系统中提供保护，其功耗极低。

电池极性接反

每当电池端子断开连接时，汽车电池极性就有可能因失误而接

反，电子系统可能会因负电池电压而受损。阻塞二极管通常与电源输入串联以防止电源反向，但阻塞二极管会有压降，导致系统效率低下并降低输入电压，尤其是在冷启动期间。

LT8672是无源二极管的理想替代品，可保护下游系统免受负电压影响，如图3所示。

在正常情况下，LT8672控制外部N沟道MOSFET，形成理想二极管。GATE放大器检测DRAIN和SOURCE，驱动MOSFET栅极，将正向电压调节至20 mV。在负载阶跃和过压情况下，D1在正方向上保护SOURCE。当输入端出现负电压且SOURCE变为负值时，GATE被拉至SOURCE，关断MOSFET并将DRAIN与负输入隔离。凭借快速下拉(FPD)功能，LT8672可以快速关断外部MOSFET。

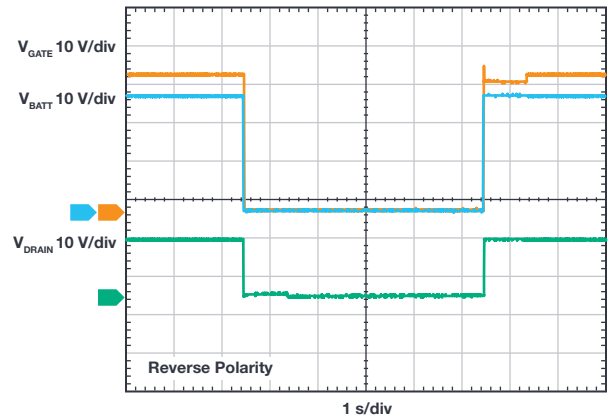


图4. LT8672对极性接反的响应波形

叠加交流电压

电池轨上的常见干扰是叠加的交流电压。这种交流分量可以是整流交流发电机输出的伪像，或者是高电流负载（例如电动机、灯泡或PWM控制的负载）频繁切换的结果。根据汽车规范ISO 16750和LV 124，ECU可能会受其电源上叠加的交流纹波（频率可达30 kHz，幅度可达6 V p-p）的影响。在图5中，高频交流纹波叠加在电池线路电压上。典型的理想二极管控制器的响应速度太慢，但LT8672能产生高达100 kHz的高频门控脉冲，可根据需要控制外部FET来抑制这些交流纹波。

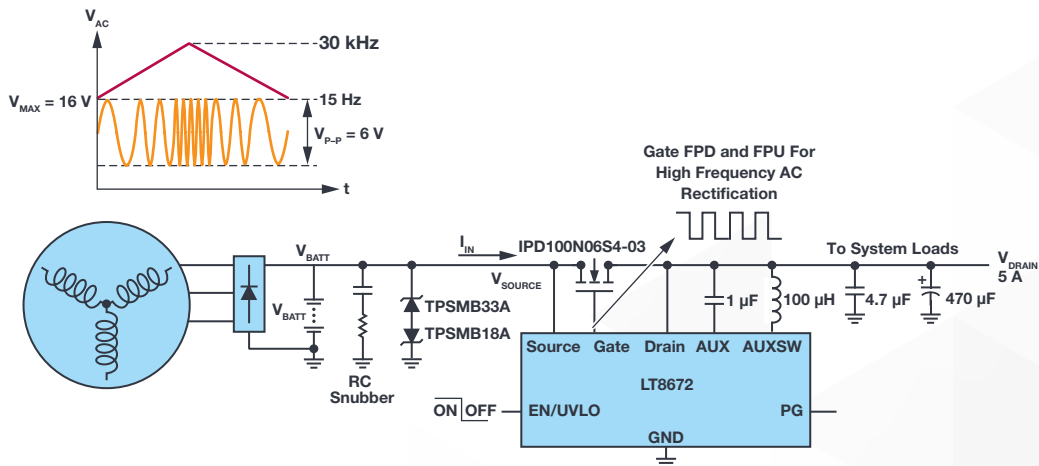


图5. LT8672对叠加交流电压的响应波形

LT8672抑制电源轨上常见交流成分的独特能力，是其快速上拉(FPU)和快速下拉(FPD)控制策略及其强大的栅极驱动能力的结果，栅极驱动器由集成升压型稳压器供电。与电荷泵栅极电源解决方案相比，该升压型稳压器使LT8672能够保持稳定的11 V电压，外部FET保持导通，同时提供很大的栅极拉电流来降低高频交流纹波整流的开关损耗。其50 mA拉电流能力支持FET的超快速导通，使功耗最低；其300 mA灌电流能力支持快速关断，使反向电流传导最小。此外，这还显著降低了输出电容中的纹波电流。叠加交流电压的典型整流波形如图6所示。

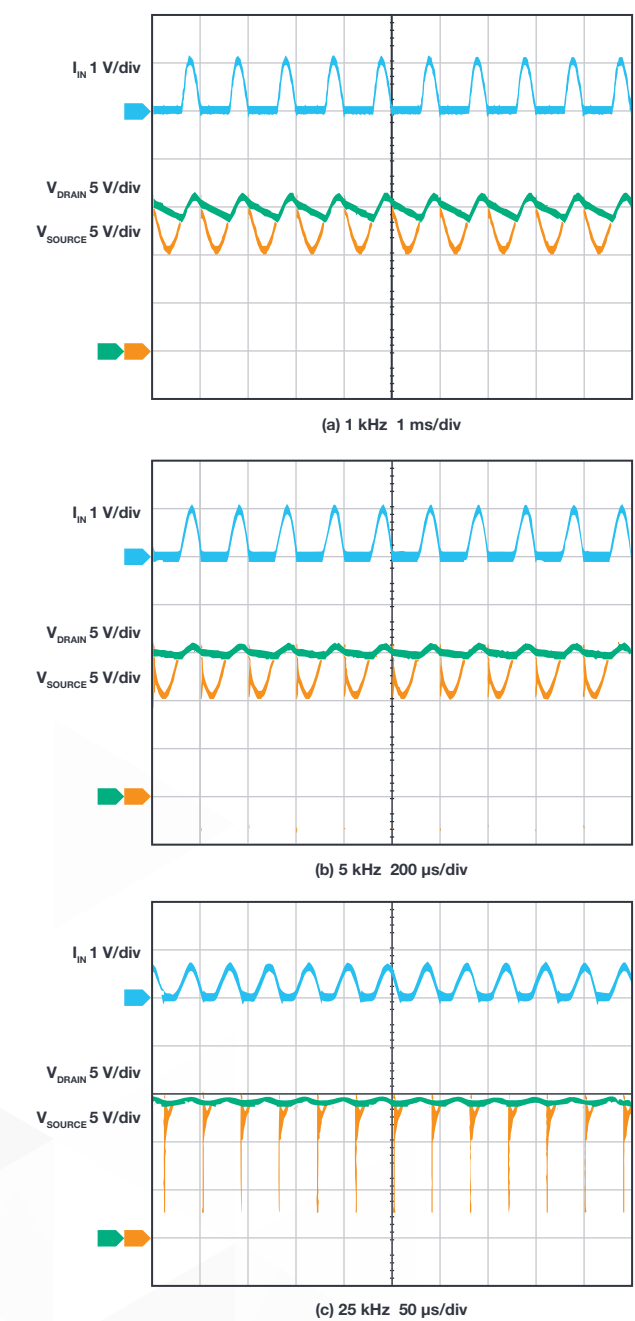
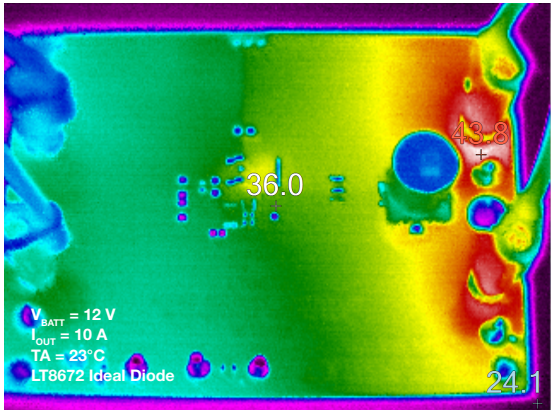


图6. LT8672对叠加交流电压的响应波形

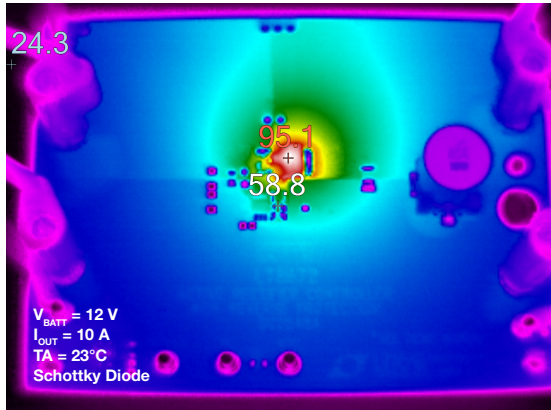
此外，与相同负载条件下的传统肖特基二极管解决方案相比，LT8672有效降低了传导损耗。如图7的热图像所示，使用LT8672的解决方案比传统的基于二极管的解决方案温度要低近20°C。它不仅提高了效率，而且无需大型散热器。

汽车电子系统输入端出现的高峰值窄脉冲通常有两个来源：

- ▶ 在串联或并联了感性负载的情况下断开输入电源；
- ▶ 负载的切换过程影响线束的分布电容和电感。



(a) LT8672 Controlled System



(b) Schottky Diode System

图7. 热性能比较

其中的某些脉冲可能有高电压峰值。例如，ISO 7632-2中定义的脉冲3a是峰值电压超过-220 V的负尖峰，而脉冲3b的最大峰值电压为150 V加上电池的初始电压。虽然它们有很大的内部阻抗和非常短的持续时间，但如果遇到这些脉冲，下游电子设备很容易损坏。

为了抑制这种尖峰，前端安装了两个大小合适的TVS。事实上，一些低能量脉冲可以由输入电容和寄生线电感的滤波器效应直接吸收。

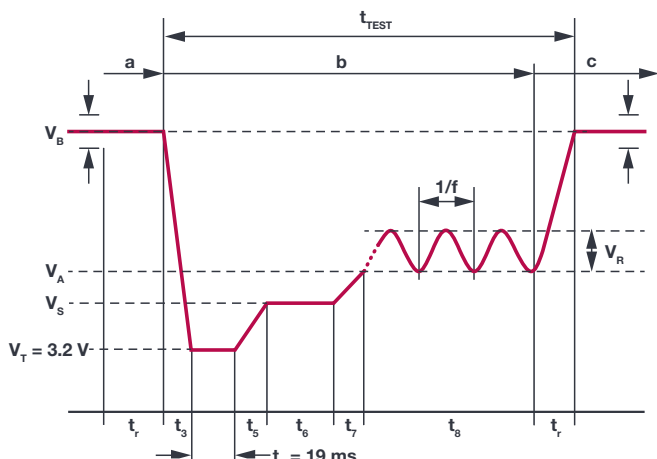
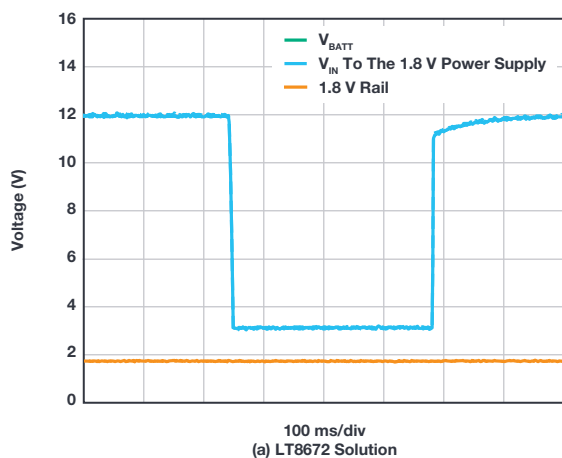
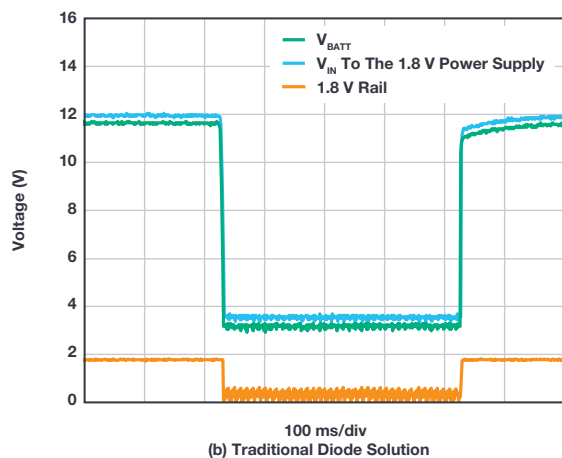


图8. LV 124中定义的12 V系统的严重冷启动事件



(a) LT8672 Solution



(b) Traditional Diode Solution

图9. 冷启动事件

多轨稳压器穿越冷启动事件

LT8602是一种紧凑型解决方案，可提供多达四个稳压轨（例如5V、3.3V、1.8V、1.2V），输入电压范围为5V至42V，适用于冷启动期间不一定需要开启的功能。对于冷启动期间也必须运行的功能，例如火花塞控制器或报警，应使用LT8603之类的解决方案，其输入电压可低至3V（或更低）。

LV 124定义了冷启动的最坏情况，如图8所示。它指出，在汽车启动时，最低电池电压可以低至3.2 V并持续19 ms。当面临传统（非理想二极管）解决方案中电池反向保护引起的额外二极管压降时，该规范要求应用以低至2.5 V的电压保持运行。无源二极管保护方案可能需要降压-升压稳压器，而不是复杂度更低、效率更高的降压型稳压器，以提供许多微控制器常常需要的稳定3V电源。

LT8672控制器的最小输入工作电压为3V V_{BATT} ，支持有源整流器以输入和输出之间的最小压降(20 mV)穿越冷启动脉冲。冷启动期间的下游电源输入电压不低于3V，这样便可使用最小工作电压为3V且有低压差特性的降压型稳压器（如LT8650S）来产生3V电源。

同LT8650S一样，ADI公司的许多Power by Linear汽车IC的最小额定输入电压为3V。

图9比较了采用LT8672和采用传统二极管的1.8V电源。降压型稳压器工作电压低至3V。如图所示，采用传统二极管时，当电池电压 V_{BATT} 降至3.2V时，降压稳压器的 V_{IN} 降至2.7V左右，原因是二极管的高压降触发下游开关稳压器UVLO关断，其1.8V输出崩溃。相比之下，LT8672输出电压在冷启动期间几乎保持恒定，下游降压稳压器能够保持1.8V输出。

众多关键功能需要稳定的5V和3.3V电源轨，以及低于2V的电压轨，用以为模拟和数字IC中的元器件、处理器I/O和内核供电。当直接由 V_{BATT} 供电时，如果 V_{BATT} 低于其输出或 V_{IN} (MIN)，纯降压型稳压器将失去稳压能力。但是，此类关键功能通常不需要太多功率，因此可以使用高集成度紧凑型解决方案，例如6 mm×6 mm、四路输出、三通道单片降压转换器和升压控制器LT8603。

LT8603的集成升压控制器的工作电压可低于2V，是其它三个降压型稳压器的理想预调节器。图10显示了针对这些应用的Power by Linear先进的解决方案，它可以穿越冷启动事件。两个高压降压型稳压器由预升压转换器供电。当 V_{BATT} 降至8.5V以下时，升压控制器开始切换，输出(OUT4)被调节至8V。一旦启动，输出电压就会保持稳定，而输入电压可以低至3V。因此，两个高压降压稳压器可以穿越冷启动状况，同时提供恒定的5V和3.3V输出，如图11所示。一旦 V_{BATT} 从冷启动状况恢复到8.5V以上，升压控制器就像直通二极管一样工作。高压降压稳压器可以处理高达42V的 V_{BATT} 。低电压降压稳压器由OUT2供电，在冷启动事件中提供1.2V电压。

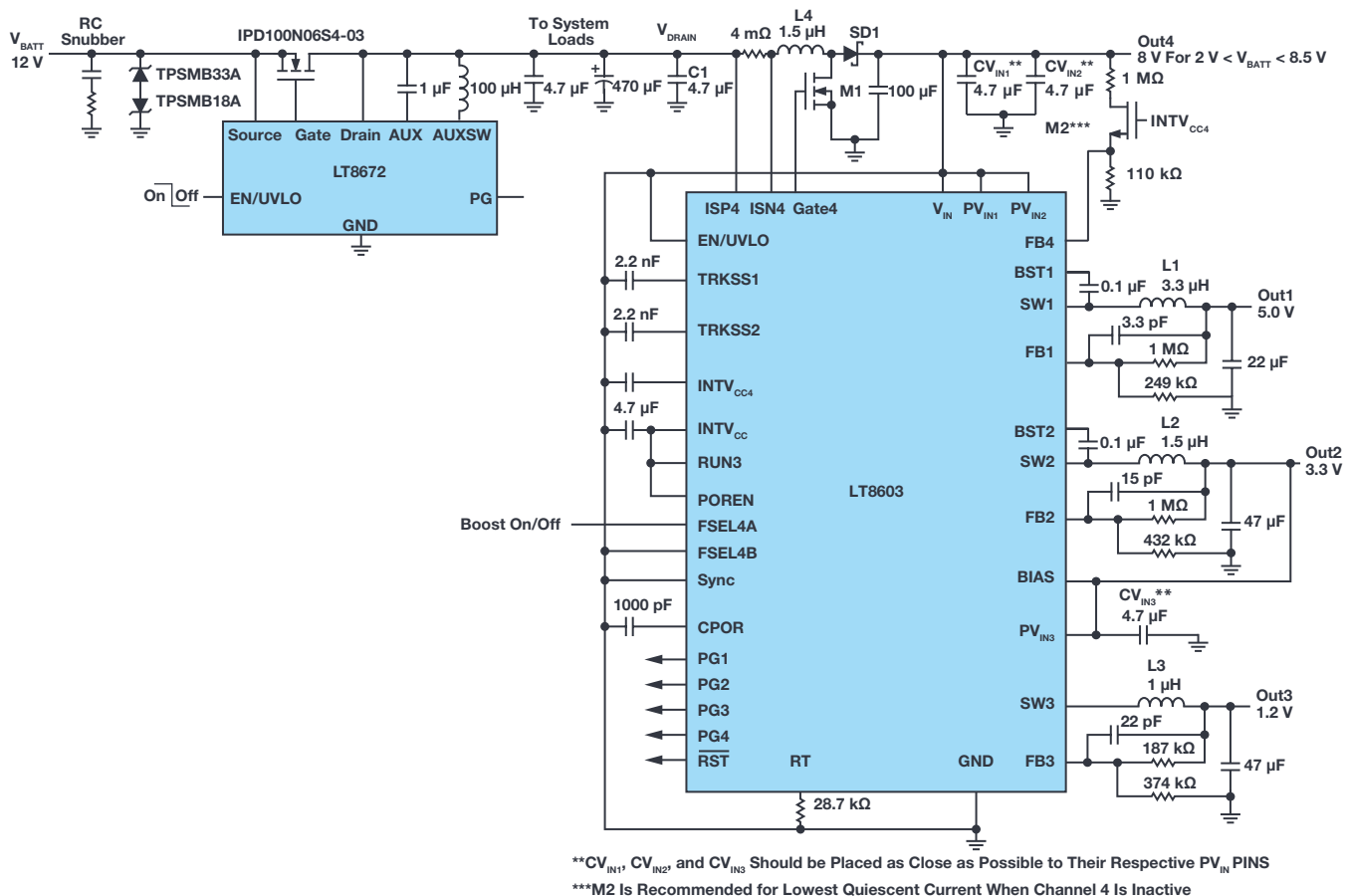


图10. LT8672和LT8603解决方案可以承受并穿越冷启动事件

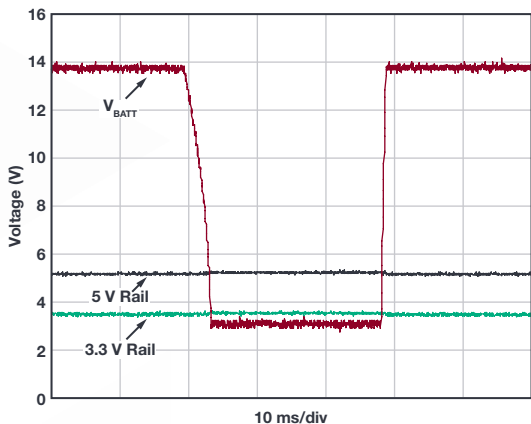


图11. LT8672和LT8603组合可产生5 V和3.3 V输出，从而穿越冷启动事件

超低 I_0 延长永远在线系统的电池运行时间

对于连接到 V_{BATT} 工作数周或数月而电池不充电的永远在线系统，轻负载和无负载效率有时候比满负载效率更重要。Power by Linear系列超低静态电流(I_0)器件可保护电池电量，同时能承受挑

战性的瞬态状况并支持宽输入电压范围（3 V至42 V）和宽温度范围。为了优化效率并在轻负载和无负载时保持稳压，稳压器应提供Burst Mode®（突发）工作模式。在两次突发操作之间，所有与控制输出开关相关的电路都关断，输入电源电流减小到几微安。相比之下，典型的降压稳压器为了在空载情况下保持稳压，可能需要从 V_{BATT} 汲取数百微安，电池电量消耗速度会快几个数量级。

给定轻负载下的突发模式效率主要受开关损耗的影响，开关损耗与开关频率和栅极电压有关。由于接通和关断MOSFET以及让内部逻辑保持活动状态需要一定的能量，所以降低开关频率可降低栅极电荷损耗并提高效率。开关频率主要由突发模式电流限值、电感值和输出电容决定。给定负载电流时，增加突发电流限值可以提高每个开关周期中输送的能量，相应的开关频率会更低。给定突发电流限值时，较大值的电感比较小值的电感能储存更多的能量，开关频率也会更低。出于同样的原因，更大的输出电容会储存更多的能量，需要更长的时间来放电。

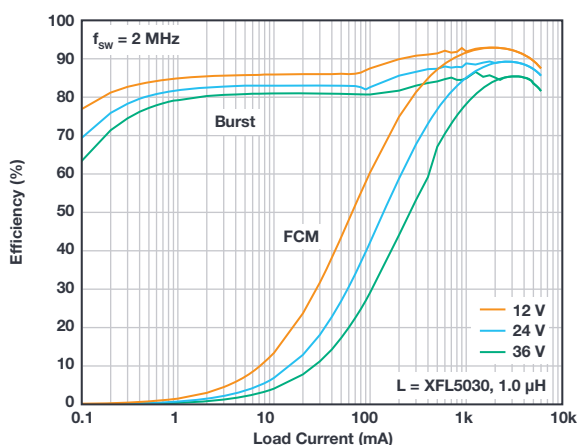
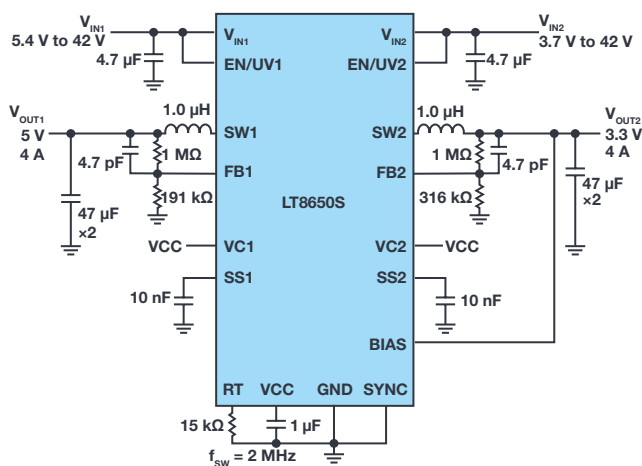


图12. 低 I_Q LT8650S能维持非常高的轻载效率以支持永远在线应用，而不会大幅消耗电池电量

图12显示了超低 I_Q 同步降压型稳压器LT8650S用在一个高效率、宽输入电压和负载电流范围的应用中。利用集成MOSFET，此器件可在3.3 V或5 V的固定输出电压下提供高达8 A的总输出电流。尽管整体设计和布局已经很简单，但该转换器还包含了可用于优化电池供电系统特定应用性能的其他选项。

表1列出了适用于汽车市场的低 I_Q 单片稳压器，其输入电压最高可达42 V或65 V。得益于ADI公司开发的低 I_Q 技术，这些器件的典型静态电流仅为2.5 μA。最短导通时间为35 ns，在开关频率为2 MHz时，这些稳压器可从42 V输入提供3.3 V输出电压，这样的应用在汽车行业很常见。

Silent Switcher产品组合使EMI设计不再复杂

汽车应用要求系统不产生可能干扰其他汽车系统正常运行的电磁噪声。例如，开关电源是高效率电源转换器，但会产生不受欢迎的可能影响其他系统的高频信号。开关稳压器噪声发生在开关频率及其谐波处。

纹波是输出和输入电容上出现的噪声分量。低ESR和ESL电容以及低通LC滤波器可以减小纹波。功率MOSFET快速开关引起的更高频率噪声分量要难以处理得多。由于设计专注于小尺寸解决方案和高效率，开关工作频率现已推高到2 MHz，以减小无源元件尺寸并避免可听频段。此外，通过降低开关损耗和占空比损耗，开关转换时间已缩短到纳秒级以提高效率。

封装和PCB布局中的寄生电容和电感对噪声分布起着重要作用，如果存在噪声，则很难将其消除。开关噪声覆盖从几十MHz到超过GHz的范围，导致EMI预防变得非常复杂。受此类噪声影响的传感器和其他仪器可能会运行不正常，引起可闻噪声或严重的系统故障。因此，人们建立了严格的标准来管制EMI。最常用的标准是CISPR 25 Class 5，它详细说明了150 kHz至1 GHz频率下的可接受限值。

要在大电流下达到EMI要求，通常会涉及复杂的设计和测试程序，包括在解决方案的尺寸、总效率、可靠性和复杂性等众多方面进行权衡。传统方法通过减慢开关边沿或降低开关频率来控制EMI，由此带来的弊端是效率降低，最小开关时间增加，解决方案尺寸增大。替代缓解方案包含庞大复杂的EMI滤波器、缓冲器或金属屏蔽，这会显著增加电路板空间、元件和装配方面的成本，并使热管理和测试复杂化。

我们的Silent Switcher技术以创新方式解决了EMI问题，使高频、高功率电源中实现出色的EMI性能。第二代Silent Switcher 2器件通过将热环路电容集成到封装中，简化了电路板设计和制造。对于42 V/4 A LT8650S之类的降压型稳压器，热环路包括一个输入电容以及顶部和底部开关。其他噪声环路包括栅极驱动电路和升压电容充电电路。在Silent Switcher 2器件中，热环路和温环路电容集成在封装中，并以最小化EMI的方式布局。这就降低了最终电路板布局对EMI的影响，简化了设计和制造。使用这些器件中集成的可选展频特性，可以进一步降低峰值EMI，使其更容易符合严格的EMI标准。

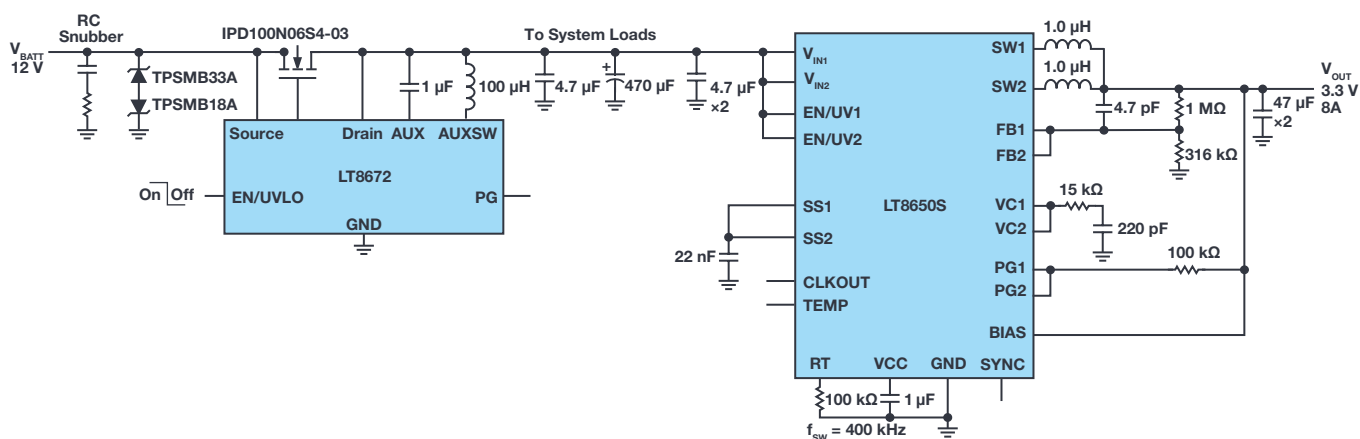


图13. LT8672和LT8650S配置用于高输出电流

图13展示了一种低 I_o 、低噪声解决方案，支持汽车I/O和外设的高电流应用。前端的LT8672保护电路免受电池反向故障和高频交流纹波的影响，正向压降只有几十mV。LT8650S的开关频率为400 kHz，输入范围为3 V至40 V，两个通道并联工作时输出能力为8 A。两个去耦电容靠近LT8650S的输入引脚放置。由于采用 Silent Switcher 2技术，即使没有安装EMI滤波器，高频EMI性能也十分出色。该系统符合CISPR 25 Class 5峰值和均值的限值要求，而且裕量很大。图14显示了在30 MHz至1 GHz范围内的垂直极化的辐射EMI均值测试结果。完整解决方案具有原理图简单、总元件数非常少、尺寸紧凑等特点，而且EMI性能不受电路板布局变化的影响（图15）。

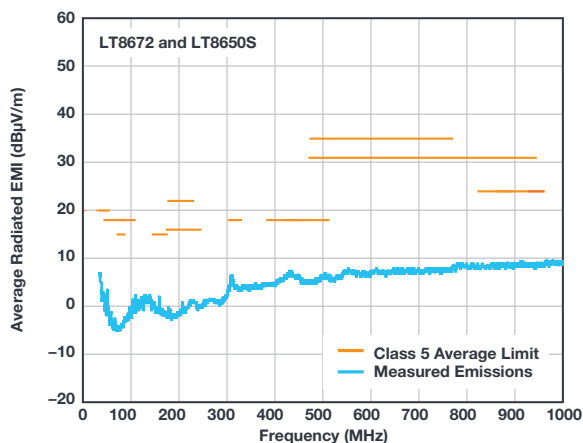


图14. LT8672和LT8650S EMI性能：30 MHz至1 GHz

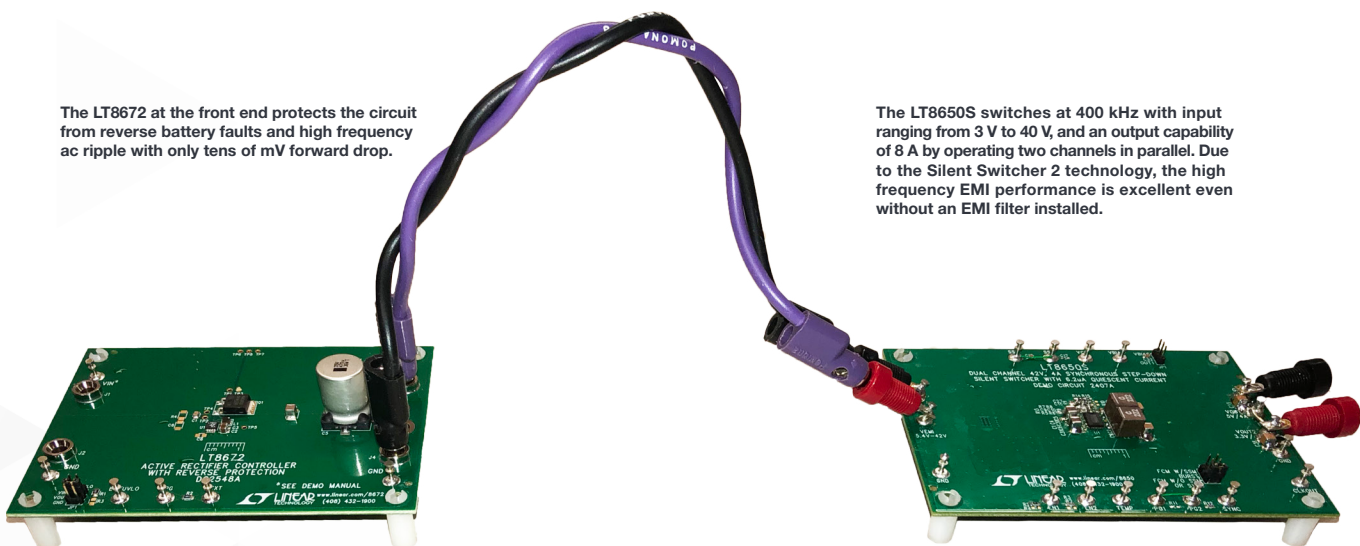


图15. 完整电源解决方案，从汽车电池获得3.3 V和5 V输出

结论

汽车应用需要低成本、高性能、可靠的电源解决方案。恶劣的引擎盖下环境要求电源设计人员提出稳健的解决方案，考虑各种潜在的破坏性电气和热事件。连接到12 V电池的电路板必须精心设计，实现高可靠性、小尺寸解决方案和高性能。Power by

Linear器件目录包含专门针对汽车要求的创新解决方案：超低静态电流、超低噪声、低EMI、高效率、宽运行范围、小尺寸和宽温度范围。通过消除复杂性并提高性能，Power by Linear解决方案可缩短电源设计时间，降低解决方案成本，并加快产品上市时间。



作者简介

Bin Wu (S'14) 1985年生于中国浙江。他2016年4月毕业于加州大学尔湾分校，获电气工程博士学位。2016年4月至2017年7月，他在马里兰大学帕克分校从事博士后研究。之后，他在Maxim Integrated, Inc.工作。自2017年11月起，他成为ADI公司（圣何塞）的应用工程师。他的兴趣包括电动车辆动力架构、高功率密度升压/降压DC-DC转换器、开关电容转换器、建模和可再生能源集成系统。联系方式：bin.wu@analog.com。



作者简介

Zhongming Ye是ADI公司的一名电源产品高级应用工程师，工作地点位于美国加利福尼亚州米尔皮塔斯。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。联系方式：zhongming.ye@analog.com。

