

如何用叠置电感打造大功率、可扩展的POL转换器？

冯文飞 编译

设计高效和紧凑型 DC/DC 转换器的技巧由一群对转换设计所涉及之物理学和支持性数学知识有着深入了解，同时兼具一定程度之工作台经验的工程师负责实行。对于博德图、麦克斯韦方程组的深刻理解以及针对极点和零点的关注融入到了精致的 DC/DC 转换器设计中。然而，IC 设计师通常避开了对令人担忧之热问题的处置，这项工作常常落在封装工程师的身上。

对于负载点 (POL) 转换器而言，热量是个大问题，这类转换器空间紧凑，容纳了很多需要小心对待的 IC。POL 稳压器之所以产生热量，是因为还没有电压转换效率能达到 100%。结构、布局和热阻能使封装发热到什么程度？封装的热阻不仅使 POL 稳压器的温度升高，还使 PCB 及周围组件的温度升高，因此增大了系统散热方案的复杂性、尺寸和成本。

人们主要通过两种方法来减少 PCB 上 DC/DC 转换器封装的热量：

●通过 PCB 散热：如果转换器 IC 能够表面贴装，那么 PCB 中能传导热量的铜质通孔和铜箔层可以从封装底部散出热量。如果封装至 PCB 的热阻足够低，那么用这种方法就能够充分散热。

●增加空气流动：冷的气流可以给封装散热（或者更准确地说，热量传递到了与封装表面接触和温度更低且快速运动的空气分子中）。

当然，存在无源和有源散热方法，为讨论简便起见，我们把无源和有源散热方法都归为上述第二种方法的子集。

当面对组件温度上升问题时，PCB 设计师可以在一些标准散热方法中寻找常用方法：使用更多的铜、散热器或更大、更快的风扇，或者只是更大的空间——增大 PCB 空间和 PCB 上组件之间的距离或加厚 PCB 层。

上述任一方法都可用在 PCB 上使系统保持在安全温度限度内，但是采用这些方法有可能降低最终产品的市场竞争优势。最终产品（例如路由器）也许因此需要更大

的外壳以容许在 PCB 上进行必要的组件分隔，或者也许因为增加更快速的风扇以增强空气流动而变得噪声相对较大。在各公司凭借紧凑性、计算能力、数据传输速率、效率和成本优势参与竞争的市场上，这就可能使最终产品显得较差。

要围绕大功率 POL 稳压器实现成功的热量管理需要选择恰当的稳压器，这需要进行细致的调研。本文展示怎样选择稳压器才能简化电路板设计师的工作。

1 不要仅靠功率密度评判 POL 稳压器

若干市场因素导致需要改进电子设备的热性能。最显然的是：即使产品尺寸在缩小，性能却不断改进。例如，28nm 至 20nm 和低于 20nm 的数字器件消耗更大的功率以提高性能，因为创新性设备的设计师运用尺寸更小的工艺技术制造速度更快、更纤巧、噪声更低和效率更高的器件。从这种趋势可以得出显然的结论，POL 稳压器必须提高功率密度： $(\text{功率}) / (\text{体积})$ 或者 $(\text{功率}) / (\text{面积})$ 。

在有关稳压器的文献中，功率密度常常出现在性能规格的标题中，这并不意外。出色的功率密度能够使稳压器脱颖而出，当设计师在大量可用稳压器之中进行选择时，这样的功率密度成为可引用的规格参数。一个 $40\text{W}/\text{cm}^2$ 的稳压器一定好于一个 $30\text{W}/\text{cm}^2$ 的稳压器。

产品设计师要想在空间更加拥挤的情况下提供更大的功率，出色的功率密度数字会首先闪现在脑海中，成为实现最快、最小、最安静、最高效产品的显然途径，如同用马力比较汽车性能一样。但是，在实现成功的最终设计时，功率密度有多重要？重要性比想象的低。

一个 POL 稳压器必须满足其应用的需求。在选择 POL 稳压器时，必须确保其能够在 PCB 上完成任务，在 PCB 上，热量处理可能成就该应用，也可能毁了该应用。以下推荐的一步一步选择 POL 稳压器的过程就优先考虑了热性能：

(1) 忽视功率密度数字：功率密度规格忽视了热降额问题，而热降额对有效、真实的“功率密度”有相当大的影响。

(2) 查看稳压器的热降额曲线：一个详细叙述、特征完备的 POL 稳压器应该有一些图形，规定了在不同输入电压、输出电压和气流速度时的输出电流。数据表中应该显示 POL 稳压器在真实工作条件下的输出电流能力，以便按照其热性能和负载电流能力判断该稳压器是否合适。它满足系统的典型和最高环境温度及气流速度要求吗？请记住，输出电流降额与器件的热性能有关。这两点密切相关，同等重要。

(3) 考虑效率问题：是的，效率不是第一个需要考虑的问题。当单独考虑时，效率值可能不代表准确的 DC/DC 稳压器热特性。当然，在计算输入电流和负载电流、输入功耗、功耗及结温时，需要效率数字。但是，效率值必须与输出电流降额以及其他与器件及其封装有关的热量数据结合起来考虑。

例如，效率为 98% 的 DC/DC 降压型转换器是令人印象深刻的；当该转换器还有出色的功率密度数字时，会令人印象更加深刻。你会购买这样的稳压器而不是效率较低、功率密度较低的稳压器吗？一位有实际经验的工程师会问一问看似不重要的 2% 效率损失的影响。在工作时，损失的功率怎样转换成封装温度上升？在 60℃ 环境温度、200LFM 气流时，高功率密度、高效率稳压器的结温是多少？看一看超出所列 25℃ 室温下的典型数字以外的情况。在 -40℃、85℃ 或 125℃ 的极端温度下测得的最大值和最小值是多少？在高功率密度时，封装的热阻上升很高以至于结温急剧上升到超过安全工作温度了吗？一个效率令人印象深刻但是价格昂贵的稳压器需要降额到什么程度？降额的输出电流值限制了输出功率能力以至于器件的高价格不再合理了吗？

(4) 考虑 POL 稳压器是否易于冷却：数据表中提供的封装热阻值是仿真和计算器件的结温、环境温度及外壳温度上升的关键。因为表面贴装封装中的大部分热量是从封装底部流向 PCB 的，所以数据表中必须给出清楚的布局指南并探讨有关热量测量的问题，以在产生系统原型时最大限度减少意外的发生。

一个设计良好的封装应该均匀、高效地通过其表面散出热量，消除会降低 POL 稳压器可靠性的热点。如上所述，PCB 负责吸收和送出表面贴装 POL 稳压器的大部分热量。

但是，在如今组件密集排列的复杂系统中，普遍采用了强制空气流动，一个设计巧妙的 POL 稳压器还应该利用这种“免费”的冷却机会，消除 MOSFET、电感器等发热组件产生的热量。

2 将热量引导到封装顶部并进入空气中

大功率开关 POL 稳压器依靠电感器或变压器将输入电源电压转换成稳定的输出电压。在非隔离式降压型 POL 稳压器中，器件使用一个电感器。该电感器和 MOSFET 等伴随性开关组件在 DC/DC 转换时产生热量。

大约 10 年前，一种新的封装技术进步使得包括磁性组件在内的整个 DC/DC 稳压器电路可以设计成能够放入模制塑料封装中，称为模块或 SiP，模制塑料封装内部产生的热量大部分通过封装底部送到 PCB 中。改进封装散热能力的任何传统方法都会导致封装增大，例如在表面贴装封装顶部附着散热器。

几年前开发出了一种创新性模块封装方法，该方法利用可用气流帮助冷却。这种封装设计将一个散热器集成到模块封装中并完全模制化。在封装内部，散热器底部直接连至产生热量的 MOSFET 和电感器，而散热器顶部是一个裸露于封装顶部的平坦表面。这种新的封装内散热方法使器件能够凭借气流快速冷却。

3 垂直结构：用叠置电感器作为散热器的 POL 模块型稳压器

POL 稳压器中的电感器的尺寸取决于电压、开关频率、需要处理的电流及其结构。在模块化构成方法中，包括电感器在内的 DC/DC 电路完全模制并密封在一个塑料封装中，就像一个 IC 一样，与其他任何组件相比，电感器对封装的厚度、体积和重量的决定性都更大。电感器也是一个重要的发热源。

上述将散热器集成到封装中的方法有助于将 MOSFET 和电感器的热量传导到封装顶部，然后可以将热量散到空气、冷却板或无源散热器中。相对小型的小电流电感器很容易装入塑料模制封装中，这时这种方法很有效，但是当 POL 稳压器使用较大型、较大电流的电感器时，这种方法就不那么有效了，这时在封装内部放置磁性组件会迫使其他电路组件分隔得更远，从而显著扩大了封装在 PCB 上的占板面积。为了保持很小的占板面积，同时改善

散热，封装工程师开发出了另一种巧妙的方法：垂直、叠置或 3D(图 1) 结构。

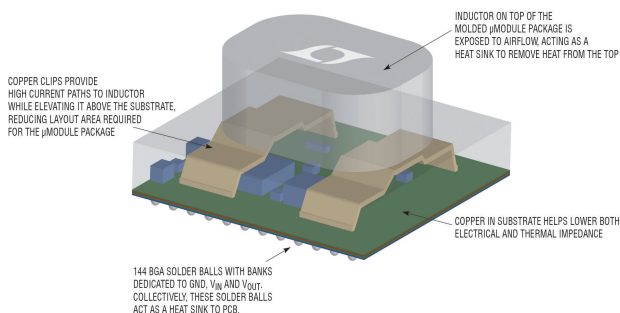


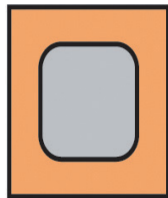
图 1 大功率 POL 稳压器模块用 3D(垂直)封装技术升高了电感器，并使电感器裸露于气流中作为散热器使用。DC/DC 电路安装在电感器之下的衬底上，因此最大限度减小了所需占用的 PCB 面积，同时提高了热性能。

4 具裸露叠置电感器的 3D 封装：保持很小的占板面积、增大功率并改善散热

很小的 PCB 占板面积、更大的功率和更好的热性能，用 3D 封装可以同时获得这 3 种优势，3D 封装是一种新的 POL 稳压器构建方法(图 1)。LTM4636 是一款 μ Module 稳压器，内置了 DC/DC 稳压器 IC、MOSFET、支持性电路和一个大型电感器，以降低输出纹波，并从 12V 输入向精确稳定的 3.3V 至 0.6V 提供 40A 负载电流。4 个并联运行的 LTM4636 器件可均分电流，以提供 160A 负载电流。封装的占板面积仅为 $16\text{mm} \times 16\text{mm}$ 。该系列的另一个稳压器 LTM4636-1 检测过温和输入/输出过压情况，可断开上游电源或断路器以保护自身及其负载。

马力倡导者可以计算 LTM4636 的功率密度，而且所得数字可以安全地标榜为令人印象深刻，但是如上所述，功率密度数字没有讲出完整故事。这种 μ Module 稳压器还为系统设计师带来了其他重要益处：令人印象深刻的 DC/DC 转化器效率带来的卓越热性能和无与伦比的散热能力。

为了最大限度减小稳压器的占板面积($16\text{mm} \times 16\text{mm}$ BGA)，该电感器被升高了，并固定在两个铜引线框架结构上，以便其他电路组件(二极管、电阻器、MOSFET、电容器、DC/DC IC)可以焊接到电感器之下的衬底上。如果电感器放置在衬底上， μ Module 稳压器很容易就能占用超过 1225mm^2 的 PCB 面积，而不是 256mm^2 占板面积(图 2)。

FOOTPRINT OF
LTM4636
3D DESIGN

(INDUCTOR ON TOP)
 256mm^2

FOOTPRINT OF
NON-3D CONSTRUCTION
EQUIVALENT FUNCTIONALITY
(INDUCTOR ON SUBSTRATE)
 $1,255\text{mm}^2$

图 2 LTM4636 的叠置电感器同时作为散热器，该器件作为一个完整的 POL 解决方案，以很小的占板面积实现了令人印象深刻的热性能。

叠置电感器结构为系统设计师提供了紧凑的 POL 稳压器，并额外提供了出色的热性能优势。LTM4636 中的叠置电感器没有像其余组件那样，用塑料完全模制(密封)。相反，电感器直接裸露于气流中。电感器外壳采用了圆角形状，以改善空气动力学特性(实现最小流阻)。

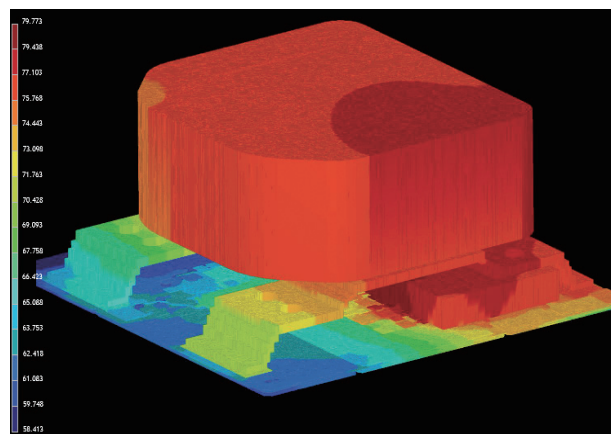


图 3 LTM4636 模制微型模块的热性能显示，热量轻而易举地转移到了裸露于气流中的电感器封装上。

5 热性能和效率

LTM4636 是一款受益于 3D 封装技术或组件级封装(CoP)的 40A μ Module 稳压器，如图 1 所示。封装体是一个完全模制的 $16\text{mm} \times 16\text{mm} \times 1.91\text{mm}$ BGA 封装。LTM4636 的电感器叠置在模制封装的顶部，从 BGA 焊球(总共 144 个)到电感器顶部的总封装高度为 7.16mm。

除了从顶部散热，LTM4636 还设计为从封装底部向

PCB 高效率散热。该器件有 144 个 BGA 焊球成排地专用于大电流流经的 GND、 V_{IN} 和 V_{OUT} 。这些焊球合起来起到向 PCB 散热的作用。LTM4636 为从封装顶部和底部散热而进行了优化。

甚至在 12V 输入 / 1V 输出这么大的转换比以及 40A (40W) 满载电流和标准 200LFM 气流的情况下工作，LTM4636 的封装温度也仅上升至比环境温度 (25°C 至 26.5°C) 高 40°C。图 4 显示了 LTM4636 在这些条件下的热像。

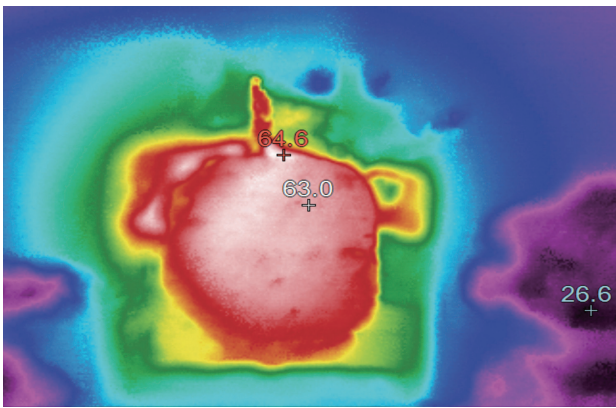


图 4 稳压器在 40W 时的热像显示，温度仅上升 40°C

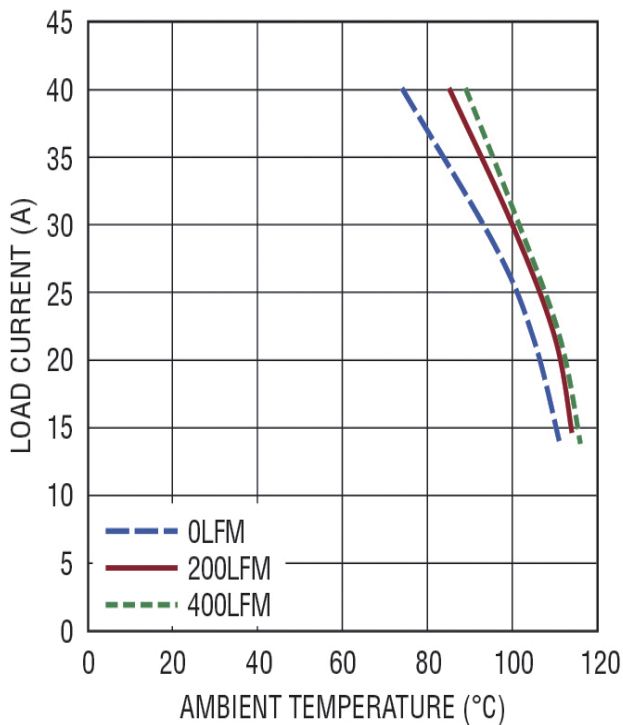


图 5 热降额图形显示，在环境温度高达 83°C 和 200LFM 时，提供 40A 满电流。

图 5 显示了输出电流热降额结果。在 200LFM 时，LTM4636 在环境温度高达 83°C 时，提供令人印象深刻的 40A 满电流。20A 半电流降额仅发生在 110°C 的过高环境温度时。这样一来，只要有一定的气流可用，就允许 LTM4636 以高容量运行。

图 6 所示的高转换效率主要是由高性能 MOSFET 和强大的 LTM4636 驱动器产生的。例如，一个 12V 输入电源降压型 DC/DC 控制器：

- 在 12V 输入至 3.3V、25A 输出时，实现 95% 的效率
- 在 12V 输入至 1.8V、40A 输出时，实现 93% 的效率
- 在 12V 输入至 1V、40A 输出时，实现 88% 的效率

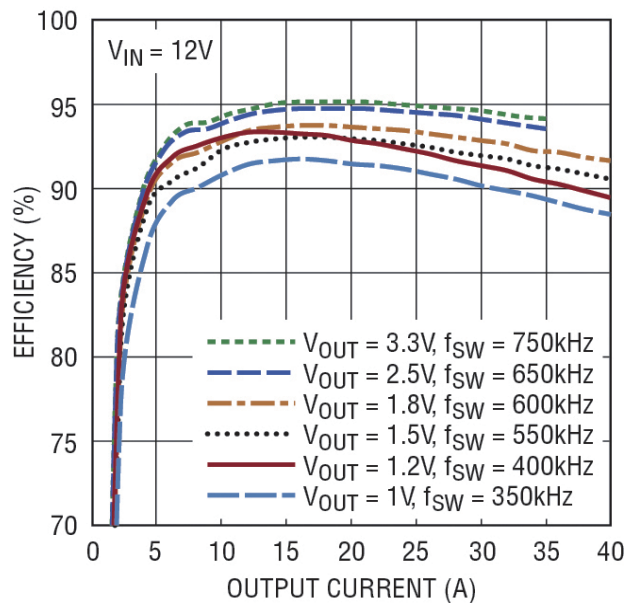


图 6 各种输出电压时的高 DC/DC 转换效率

6 具热平衡的 140W、可扩展 4×40A μ Module POL 稳压器

一个 LTM4636 规定提供 40A 负载电流。两个采用电流均分模式 (或并联) 的 LTM4636 可支持 80A 电流，而 4 个并联的 LTM4636 支持 160A 电流。用并联 LTM4636 扩展电源很容易：简单地拷贝和粘贴单个稳压器布局即可，如图 7 (符号和布局可用) 所示。

LTM4636 的电流模式架构在 40A 构件之间实现精

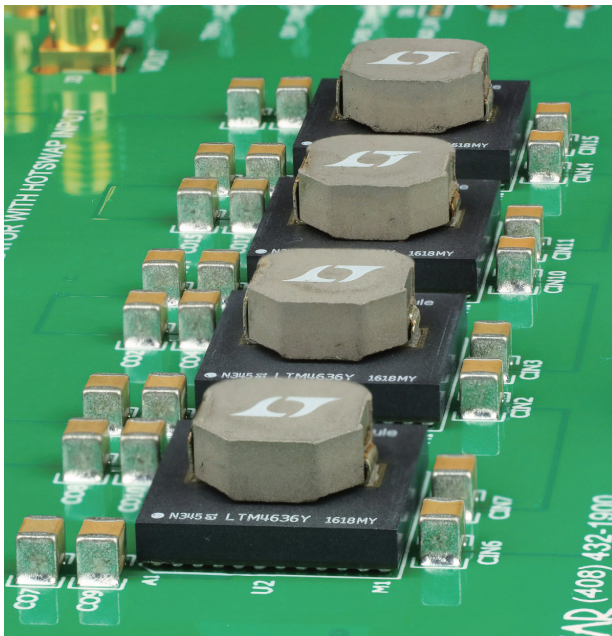


图7 阻放置并联LTM4636很容易。简单地复制单通道布局即可。

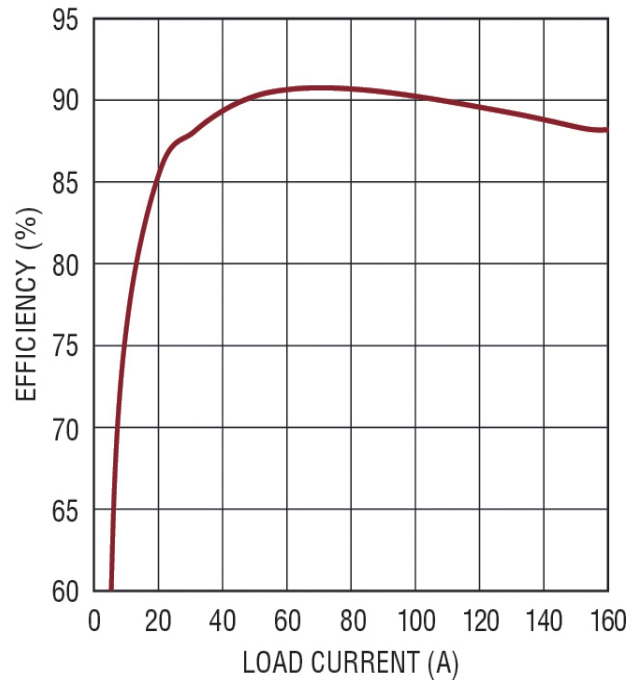


图9 提供140W功率的4个 μ Module稳压器的效率

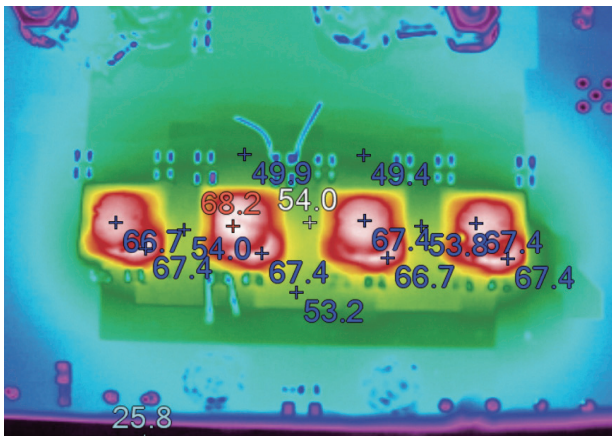


图8 在4个并联运行的LTM4636之间精确均分电流，就160A应用而言温度仅上升40℃。

精确的电流均分。精确的电流均分又产生一个在器件之间均匀分散热量的电源。图8显示，在4个 μ Module组成的160A稳压器中，所有器件运行时相互之间的温度差都在1℃之内，从而确保每个器件都不会过载或过热。这极大地简化了散热。

图10显示了完整的160A设计。请注意，LTM4636相互之间不同相运行无需时钟器件，时钟和相位控制已包含在器件中。多相运行降低了输出和输入纹波电流，减少了所需输入和输出电容器数量。图10中的4个LTM4636以90°相位差运行。

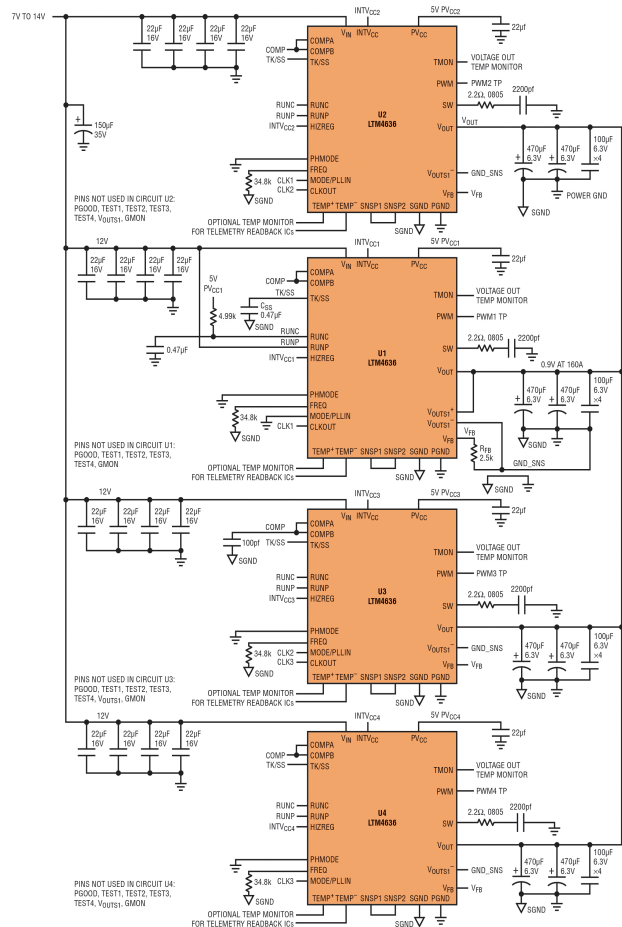


图10 140W稳压器由4个并联运行的LTM4636构成，提供精确的电流均分以及从12V输入至0.9V、160A输出的高效率转换。

7 结论

为组件密集排列的系统选择 POL 稳压器需要严格审查器件电压和电流额定值以外的规格参数。对封装热特性的评估是必不可少的，因为这一特性决定了冷却成本、PCB 成本和最终产品的大小。3D(又称为叠置、垂直、CoP)技术的进步允许大功率 POL 模块型稳压器占用很小的 PCB

上接164页

导体、即电容器的构造相同而产生的。该线间电容是主要电容，对谐振点有很大影响(见图 7(B)所示)。Q 是表示电感性能的指标。用 R (Rac) 除 X (= ωL) 的值表示对于频率有多少损耗。由公式可知，当 R (Rac/ 铁损) 小时 Q 变大。通过频率与电阻 / 阻抗的图表来表示电感的基本特性。这是 6mm 见方、高度 2mm 的 4.7 μ F 电感例。红线为 Rac/ 铁损。蓝线为阻抗，绿线为 X (ωL)。如前所述，由于具有电容，因此有谐振点。绿线 X 在谐振点之后的频率表示电容器主体的特性，频率越高阻抗越低。Rac 随频率上升而增加。Rdc 为直流(零 Hz)时的 Rac。

这也是某电感的特性，而电感的材料和结构不同，这些寄生成分也会发生变化。

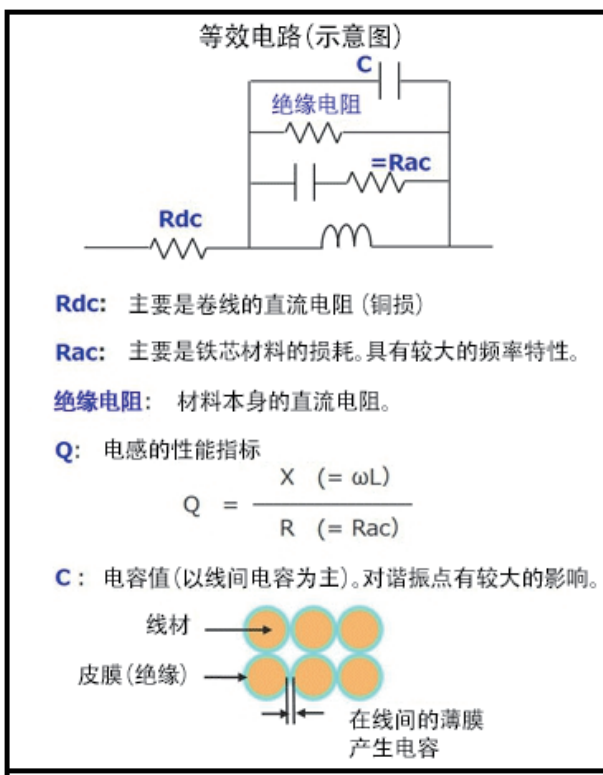


图 7 (A) 为电感等效示意图

面积，但更重要的是，实现了高效率冷却。LTM4636 是第一个受益于这种叠置封装技术的 μ Module 稳压器系列的首款器件。作为一款以叠置电感器为散热器的 40A POL μ Module 稳压器，该器件提供 95% 至 88% 的效率，满负载时温度仅上升 40 $^{\circ}$ C，占用 16mm \times 16mm PCB 面积。

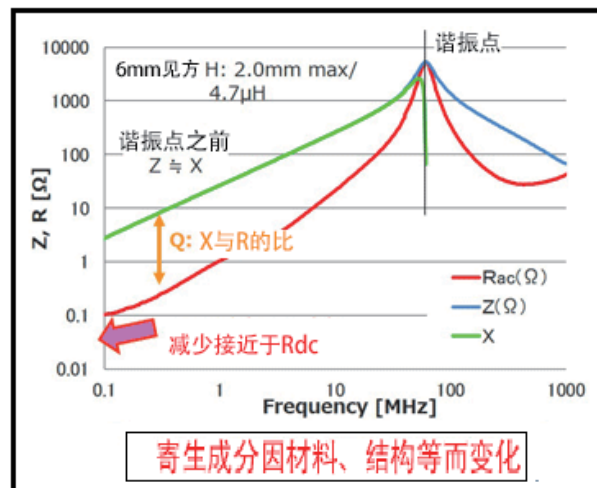


图 7 (B) 为电感等效谐振电路特性示意图

4 后话

上述是电感的基本特性对电源特性有怎样的影响。随着电源的发展金属电感的使用日益增加的情况、以及包括材料在内的金属电感的特征。这与针对近年来的小型化要求，开关频率高的电源需求增加密切相关。首先，金属的磁导率 μ 低，因此是电感值很难提高的材料。然而，饱和磁通密度高，即直流叠加容许电流高，饱和也非常平缓。因此，如果直流叠加容许电流相同，则可比铁氧体的尺寸小。此外，还具有电感值对温度几乎无变化的特性。

为实现小型化，提高电源电路的开关频率，使用电感值小的电感、即尺寸小的电感的案例增加了。IC 随着工艺的微细化发展，电源电压也越来越低，而电源电流日益增大，也被表述为“低电压大电流化”。关于电感，要流过大电流，需要电感值小，作为电源电路，要以小的电感值工作，需要开关频率高。而原本被认为特性上很难实现大电感值的金属电感，只要在电感值小的条件下，在特性和尺寸两方面均具优势。