了解下一代光学模块的电力输送需求

Thomas Hoffman
Marketing engineer, switching regulators

简介

更高的数据速率意味着需要更大的布板空间，在高速可插拔光学模块中更是如此。网络正从 400Gbps 和 800Gbps 迈向 1.6Tbps 和更高速率，而四通道小型双密度和八通道小型可插拔等标准化外形尺寸仍受到严格限制。随着处理能力和电流要求的提高，电源管理元件必须在相同的固定尺寸内处理散热问题。

光学模块的核心是数字信号处理器 (DSP)，该处理器可以数兆位元速度将电气信号转换为光学信号，并再次将光学信号转换回电气信号。现代 DSP 可在低于 1V 的内核电压下运行，同时消耗大量电流，而这些需求随着每一代光学模块的发展而不断增加，使得在不增加损耗、热量或电磁噪声的情况下，在更小空间内提供更高电流变得更加困难。

有一种方法是将磁性元件直接集成到电源封装中，以便同时应对多种设计挑战。采用集成磁性元件封装技术的电源模块使用金属模塑化合物作为封装结构的一部分。因此，功率级已不再是事后才考虑的问题：它已成为整个系统架构的一部分。

系统架构和电源要求

光学模块汇集多种功能，包括 DSP、时钟和数据恢复电路、变速箱、激光驱动器、光电二极管、互阻抗放大器、电源管理和控制电子产品。其中，DSP 内核电源通常是要求最为苛刻的电压轨，其内核电压范围为 0.4V 至 1.0V，电流则可达数十安。这些负载可通过高电流（>10A，红圈）和低电流（2A/4A/6A，蓝圈）电源模块 (**图 1**) 来解决。

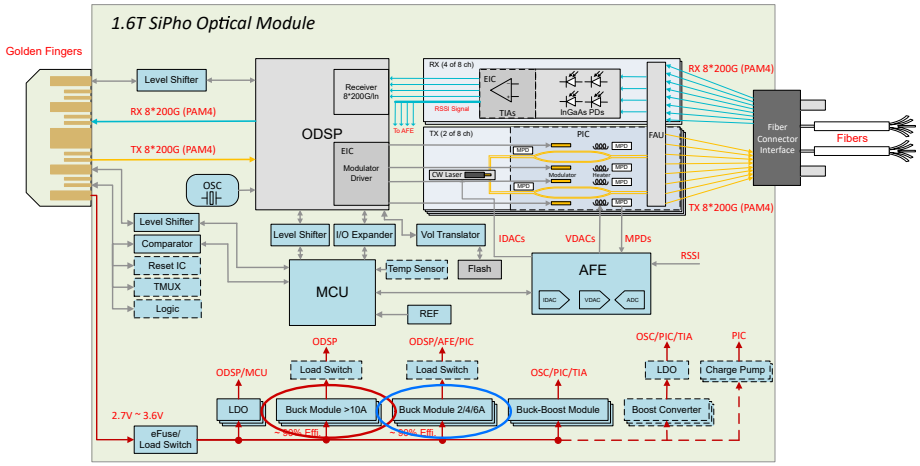


图 1. *1.6Tbps 光学模块的系统方框图*

在此等功耗水平下，零点几瓦在较大系统中可能微不足道，但在紧凑型光学模块内却并非如此，光学模块通常气流受限量，且多个发热元件紧密封装在一起。

降低功耗的一种方法是根据工作条件调整 DSP 电源电压。有些系统使用在表征期间选择的固定电压，而另一些系统则支持动态电压调节 (DVS)。当信号质量较差或温度较高时，DSP 可在高压下工作；条件允许时则可在较低电压下工作。其影响可能非常显著：若将 15A 内核电压轨从 0.9V 降至 0.5V，即可将负载功耗降低 6W。当模块的总功率预算只有几十瓦时，这是相当大的缩减。

DVS 还意味着稳压器可能不单单需要简单的电压转换。例如，I^2C 接口允许系统控制器在运行期间调整输出电压或工作模式。然而，仅靠控制灵活性并不能解决在可用空间内安装功率级的设计难题。

为什么需要关注电感器

在传统降压 DC/DC 转换器中，稳压器集成电路 (IC) 和功率电感器是独立的元件。电感器通常代表功率级中最大的元件之一。它会占用电路板面积并增加高度，因此需要谨慎放置。此外，开关节点与电感器之间的连接还需承载快速的高电流波形。在尺寸较大的印刷电路板 (PCB) 上，管理由此产生的损耗和电磁干扰 (EMI) 辐射非常简单，但在光学模块中却是一项重大挑战。

在光学模块中，每一平方毫米都至关重要。多个电源轨可能已在与高速信号布线和敏感模拟电路争夺空间。虽然将电感器集成到电源模块中可以减少外部元件数量，但物理实现方式至关重要。传统的集成模块可能会将电感器放在器件旁边或上方，这样做可能会被迫在尺寸、封装高度或热流方面做出妥协。

将磁性元件直接集成到封装中有助于完善这种集成。采用 TI MagPack™ 技术的电源模块使用金属模塑材料作为封装结构的一部分，包裹在半导体裸片和开关电路周围。对于系统设计人员而言，确保将开关节点集成在封装内部有助于省却外部电感器选择和布线的需要，从而简化整个电源模块设计。

6A **TPSM82866C** 模块的尺寸为 2.3mm x 3mm x 1mm，可提供高达 6A 的持续输出电流。这一完整解决方案仅占用 6.9mm^2 的 PCB 空间，可实现每 1mm^2 近 1A 的电流密度。与前几代产品相比，该解决方案的尺寸减小了 50%。

为了满足光学模块日益增长的功率和散热需求，TI 的下一代 50A 电源模块显著提升了电流能力。虽然 30A **TPSM8287B30** 可实现 450mA/mm^2 的密度，并且可以满足广泛需求，而 **TPSM8287C50** 可以类似的外形尺寸提供 50A 电流 (590mA/mm^2) (**图 2**)。这使设计人员能够在不显著扩大功率级占用空间的情况下将总电流输出提高 30%，从而满足 1.6Tbps 及更高的电流密度要求。

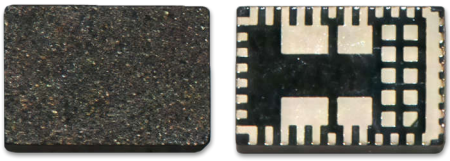


图 2. *TI 的 TPSM8287C50 电源模块能以 4.5mm× 6.7mm× 2.85mm 的尺寸，提供高达 50A 的持续输出电流*

小尺寸只有在能够散热的情况下才有用

将更大电流注入更小区域，会提高热密度。紧凑型转换器只有在效率和热性能与尺寸缩减同步优化时，才能发挥作用。同时优化集成封装中的磁性元件与器件本身，有助于减少直流和交流损耗，而封装本身也有助于将热量从裸片中传导出去。

在光学模块中，这两项优势都很重要。DSP、激光器和模拟电路已经产生热负载，而固定的外形尺寸限制了散热方案的选择。如果功率级运行温度过高，可选方案将十分有限：降低性能、改进机械散热路径，或在高温下接受更小的运行裕度。

仅凭额定电流并不能判断转换器能否在光学模块中正常工作。设计人员还需要关注实际工作点的效率、温升和安全工作区 (SOA)。问题不在于转换器能否提供电流，而在于它能否在模块真实的热环境中做到这一点。**图 3** 展示了 TI 30A TPSM8287B30 电源模块在输入电压为 5.0V 的 SOA 曲线。

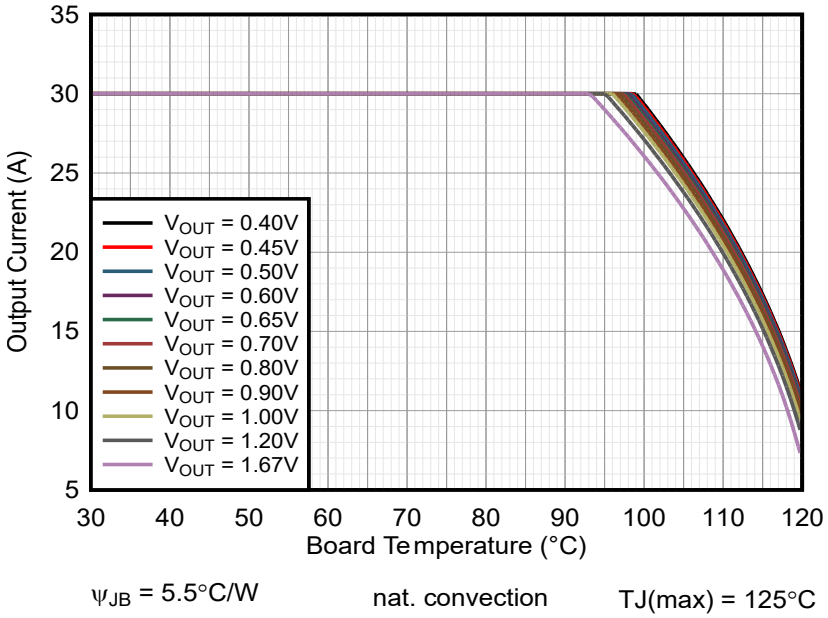


***图 3.** TPSM8287B30 电源模块在 V_{IN} = 5.0V 时的 SOA 曲线*

同时考虑 EMI

造成散热问题的相同密度也会引起潜在的 EMI 问题。光学模块可将高电流开关电源放置在敏感的发送和接收电路附近。在分立式降压转换器中，开关节点与外部电感器之间的路径是主要的噪声来源；在高电流和开关频率下，即使环路面积很小，也会产生大量意外辐射。虽然添加屏蔽、滤波或将电源远离敏感电路可以缓解这一问题，但每种方法都会消耗额外的布板空间或元件数量。

集成磁性封装可以通过将裸片、电感器和开关节点封装在单一屏蔽封装内，来大幅减小内部开关环路面积，从而应对这些 EMI 挑战。**图 4** 表明，采用 MagPack 技术的 6A 电源模块可在 30MHz 到 1GHz 范围内，将辐射发射保持在远低于 CISPR（国际无线电干扰特别委员会）32 A 类和 B 类 (3m) 限值的水平。

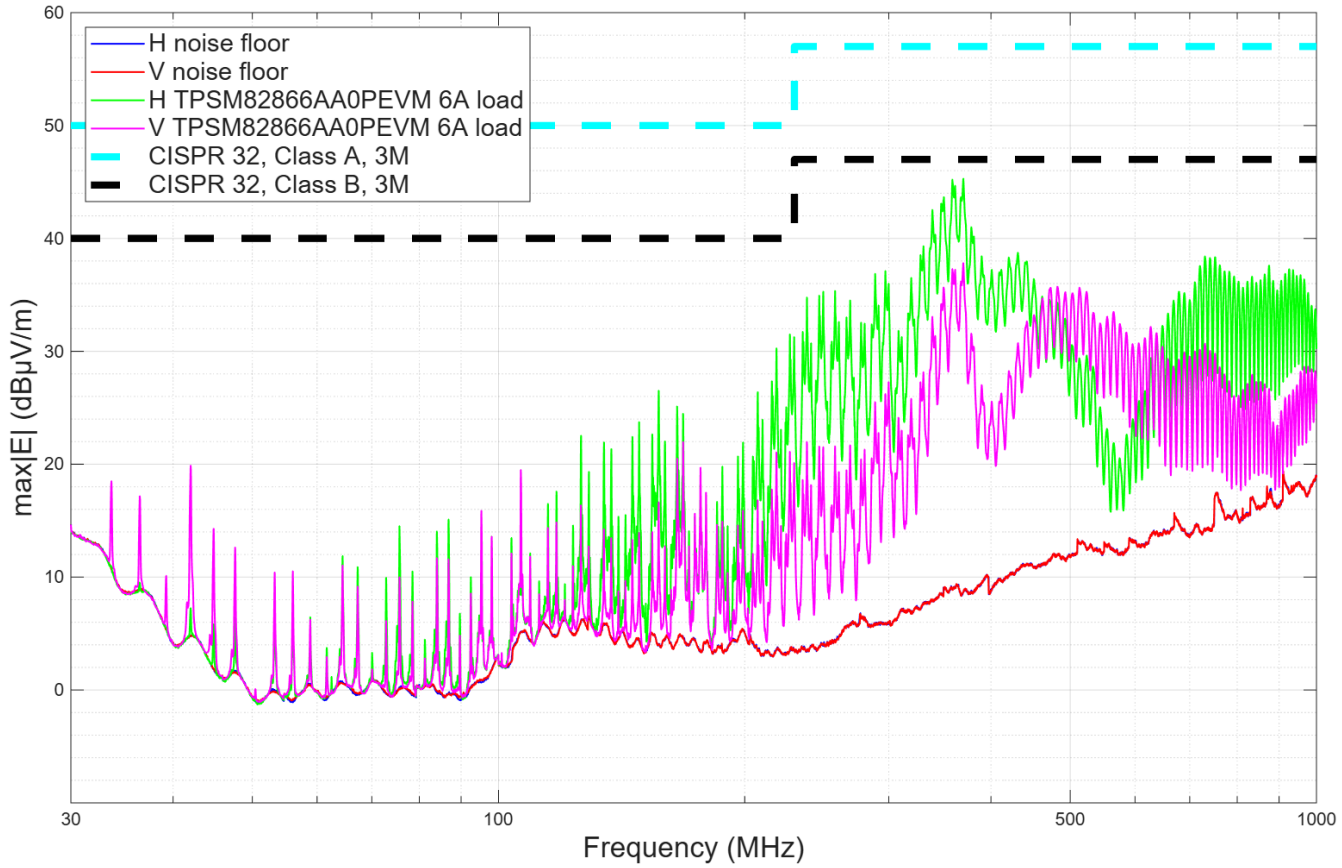


图 4. *采用 MagPack 技术的 6A 电源模块在 30MHz 至 1GHz 的辐射 EMI 性能，符合 CISPR32 A 类和 B 类限值要求*

降低辐射十分有用，但由此带来的放置灵活性可能同样重要。如果稳压器可以进一步靠近 DSP，则电源和负载之间的高电流路径会变得更短，从而降低电阻式压降和寄生阻抗。当内核电压降至 1V 以下时，这两个因素对于保持稳压精度变得愈发重要。EMI 会影响放置位置，而放置位置会影响电源完整性，两者都会影响模块留给自身其余部分的电路板面积，这正是无法独立看待设计限制因素的一个示例。

结语

随着光学模块的数据速率日渐增高，电力输送与模块的机械、热和电气设计之间的耦合变得更加紧密。MagPack 技术等集成式磁性封装通过减小功率级的尺寸、缩短开关路径并提高热性能和 EMI 性能，来应对这些挑战。

然而，集成磁性封装并不能取代全面设计与验证的必要性。电流能力、开关频率、补偿、控制策略、无源器件和 PCB 放置仍需仔细优化。设计人员必须验证最终外壳内的热行为和 EMI 性能，而非仅依赖评估板的结果。

随着下一代光学模块数据速率的提高，主要限制因素可能不再是 DSP 或光学元件，而是能在可用空间和热预算范围内，以低噪声、高效率的方式向其输送多少功率。

关于作者

Thomas Hoffman 是一名营销工程师，专注于数据中心和数据通信模块。他在电子行业拥有超过 30 年的经验，涉猎范围涵盖硬件设计、产品定义和产品推广。Thomas 拥有位于德国伍珀塔尔的伍珀塔尔大学 (BUGH) 的电气工程硕士学位。

其他资源

- 阅读应用简报“**在紧凑的降压电源模块中实现高导热性能**”和应用手册“**了解在高输出电流和高温下工作的 SOA 曲线**”。
- 这些技术文章介绍了 MagPack 技术：“**MagPack 技术：可帮助您在更小空间内提供更大功率的新款电源模块的四大优势**”和“**电源模块封装类型及其优势**”。
- 观看视频“**TI 的电源模块采用 MagPack 封装技术，以实现更佳 EMI 性能**”和“**密度翻倍：采用 MagPack 技术重塑电源模块**”。

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

MagPack™ is a trademark of Texas Instruments.
所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2026 Texas Instruments Incorporated

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月