

均流技术在4对电缆结构、高功率以太网（PoE）中的应用

By Steven R. Tom

系统工程师，电源接口产品

摘要

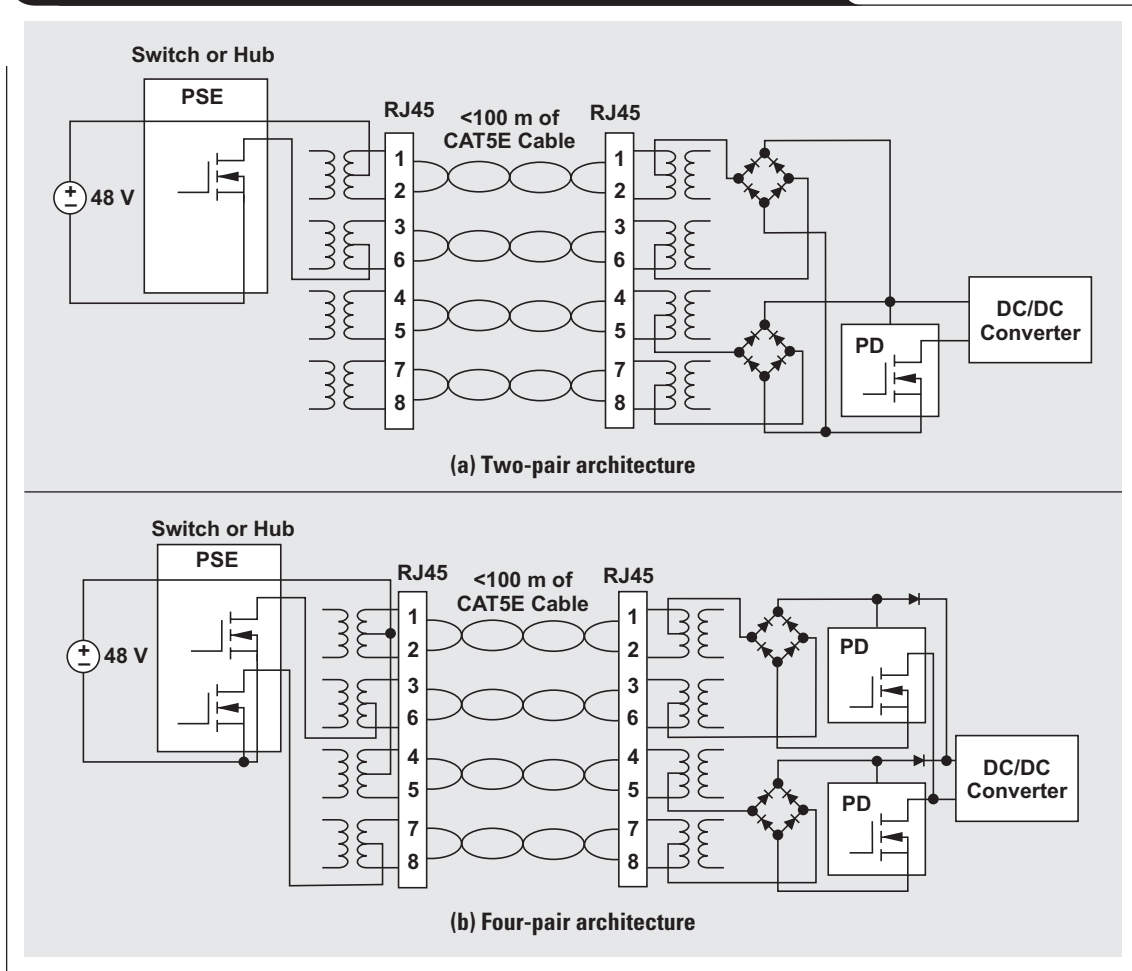
以太网供电（PoE）参数是由IEEE802.3-2005第33条所制定的，它既确定了允许的架构，也同时确定了以太网供电系统可提供的最大电源。现行标准规定两对电缆结构的末端产生最大的电量为12.95瓦特。由于终端设备变得日益复杂，这就要求存在比IEEE标准所允许电源功率更为强大、架构更具有灵活性的电力能源。本文介绍了一种特殊的均流技术，这种技术采用了四对电缆体系构架，使得传输到终端的功率可以达到50瓦特。

对以太网电源两对/四对架构的综述

典型的以太网电源端到端解决方案包括一个被称为“供电设备”（PSE）的电源，一个被称为“电力器件”（PD）的终端设备。供电设备可能以独立或者嵌入的形式存在于路由器或交换机中。现在使用的大多数以太网电缆是5E类（CAT5E）电缆，这种电缆是由四组未屏蔽的铜双绞线构成。

图1显示了可以在CAT5E类电缆上传输电力的可能架构。图示1中a图展示的架构通过两对CAT5E电缆形成的单环路将电力由供电设备传送到电力器件。IEEE标准规定电力可以在单环路的两对电缆中传输，而不能同

Figure 1. Two possible architectures for power delivery to the PD



时在所有四对电缆中传输。图示1中b图在四对电缆中采用两个电流环，这样的结构增加了最终传递给电力器件的功率。四对电缆架构的主要优点在于导线数量的增加，从而降低了功率损耗，并且增加输入到终端设备的功率。而主要的缺点在于成本的提高和为了确保在两个电流环之间的均流所带给系统的复杂性的增加。

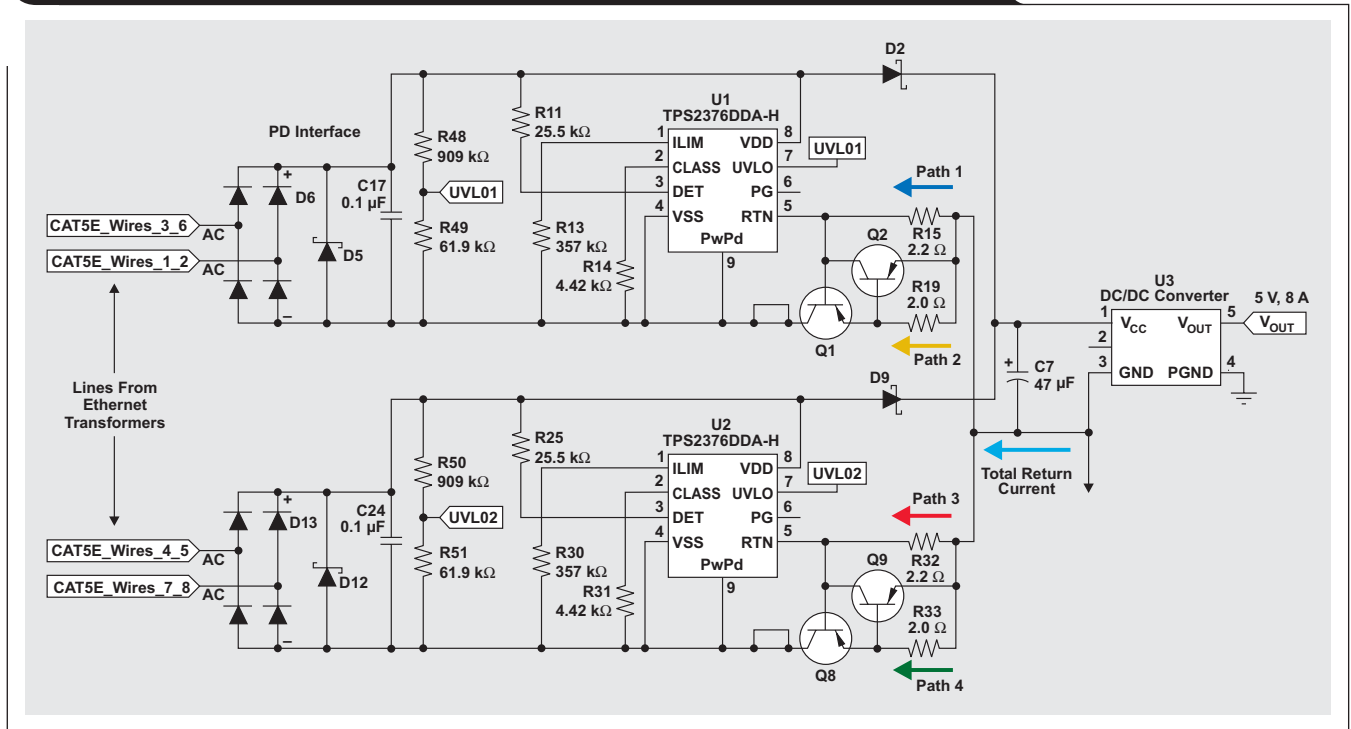
在四对电缆架构中，两个电流回路都进给一个单独的DC/DC转换器。如果每个回路的阻抗是相同的，那么电流的均流就是不必要的，并且每个环路都将给DC/DC转换器提供电流值是所需输入电流一半的电流。然而，电线、连接器和组件之间的不匹配会引起一个回路携带的电荷比另一个回路多。为了确保可靠性，在每个电流回路中的系列元件在设计时都应被设计成能够处理平衡最差的情况，与此同时保持数据的传输。两个电流回

路之间的均流越差，就意味着设计更加庞大（从而成本更高）。最大功率输出可以通过使两个线路上电流均流实现，从而每个线路上的电流都略低于其限制电流。下面的设计实例和分析表明如何确定均流性最差的情况和如何使其最小化。

设计升流电路实例

在一个四对电缆的结构中，电力器件的检测和分类功能必须在每两个电流环上都实现，因此这就需要有两个电力器件控制器。在如下的范例中，当电力器件将能源传递给DC/DC电源时，采用了两个TPS2376-H控制器（见图2）。DC/DC电源在单开关反激拓扑结构中采用UCC3809-2，从而提供一个独立的、负载电流是8A的5V电压。

Figure 2. Design example of four-pair architecture with current-booster circuit



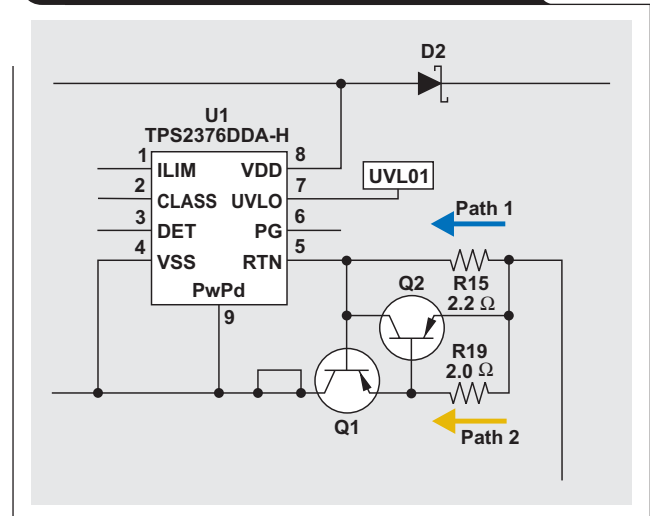
表一显示了预先设计的方案规范被应用于此次设计。可以认为，一个通常可用的供电设备将提供51V到57V的电压调节，而在这个调节范围内都能给每个由两对CAT5E电缆组成的电流环路提供800mA的电流。我们根据经验进行合理假设，假设每两对电缆组成的环路（最大长度100米）的阻值是12.5欧。CAT5E电缆将连接到电力器件的接口，并输入到DC/DC转换器，提供一个负载电流为8A的5V电压。为了简化图形和强调电力器件的接口，在图2中DC/DC电源用一个简单的黑盒子表示。

假设DC/DC转换器的转换效率为85%，那么要求输入的功率将近47W。根据CAT5E电缆的长度和供电设备的电压大小，为了满足输入功率的要求，输入电流需要在0.825和1.2A之间。

TPS2376-H的电流限制在表1中罗列出来，为了在运行过程中不造成意外的关闭，在这两个电流环中的电流都必须不超过这个值。由于TPS2376-H的最小电流为625mA，图3所示的升流电路是对这两个电流环中的输入电流进行升流，将其提高到允许的800mA，从而获得800mA下的全电势。在实际中，电流并没有被升高，它仅仅是在TPS2376-H周围分流了。图3显示了升流器是怎样在其中的一个电流环中起作用的。由于在TPS2376-H管脚5上的回流增加，R15两边的压降就增加了，相应地基极和射基之间的电压降低就使得晶体管Q1开始工作。当 $V_{R15} > 0.7\text{V}$ 时，通过R15的电流会打开晶体管Q1。这使得Q1导通，并分流了TPS2376-H附近的部分返回电流。在短路或者瞬态相应状态下，Q2将会把Q1的基极钳位到它的集电极并迫使其强行关闭，从而Q1提供保护。如果电流持续增大，当 $V_{R19} > 0.7\text{V}$ 时，Q2将会打开，从而分流Q1的基极电流，并最终使Q1关闭。更进一步了解该电路请参阅参考文献3。

	MIN	TYP	MAX
PSE Voltage (V)	51	—	57
Impedance per Two Pairs (Ω)	—	12.5	—
Input Current per Two Pairs (A)	—	—	0.800
V_{OUT} (V)	4.95	5	5.05
I_{OUT} (A)	—	—	8.0
DC/DC Output Power to Load (W)	—	—	40
DC/DC Input Power (W)	—	—	47
DC/DC Efficiency (%)	—	85	—
DC/DC Input Current (A)	0.825	—	1.200
Current Limit (A) (TPS2376-H)	0.625	0.765	0.900

Figure 3. Current-booster circuit for one current loop



使用PSPICE软件对四对电缆架构的仿真

为了确保该设计可以适当的进行分流，有必要使用如PSPICE等仿真工具对四对电缆架构进行仿真。需要仿真的关键元素是每个电流环路中的各种阻抗源。如二极管电桥，CAT5E电缆电阻，TPS2376-H中通过场效应管（FETs）和支持电路的各种电阻。表2是图2中的实际示意图以及图4中的使用PSPICE的方针示意图的相关内容。

在仿真模型中，供电设备（PSE）是一个理想的直流电压源，DC/DC电源供应器是一个理想的直流电流源，CAT5E电缆和电力器件（PD）接口是4个电路路径。图4中的颜色代码路径对应图2中相应的路径。将PSE仿真成一个理想的直流电压源，DC/DC电源供应器仿真成一个理想的直流电流源是合理的假设。这样的假设显著的简化了仿真模型，将分析的重点放在了CAT5E和PD电路的均流上。

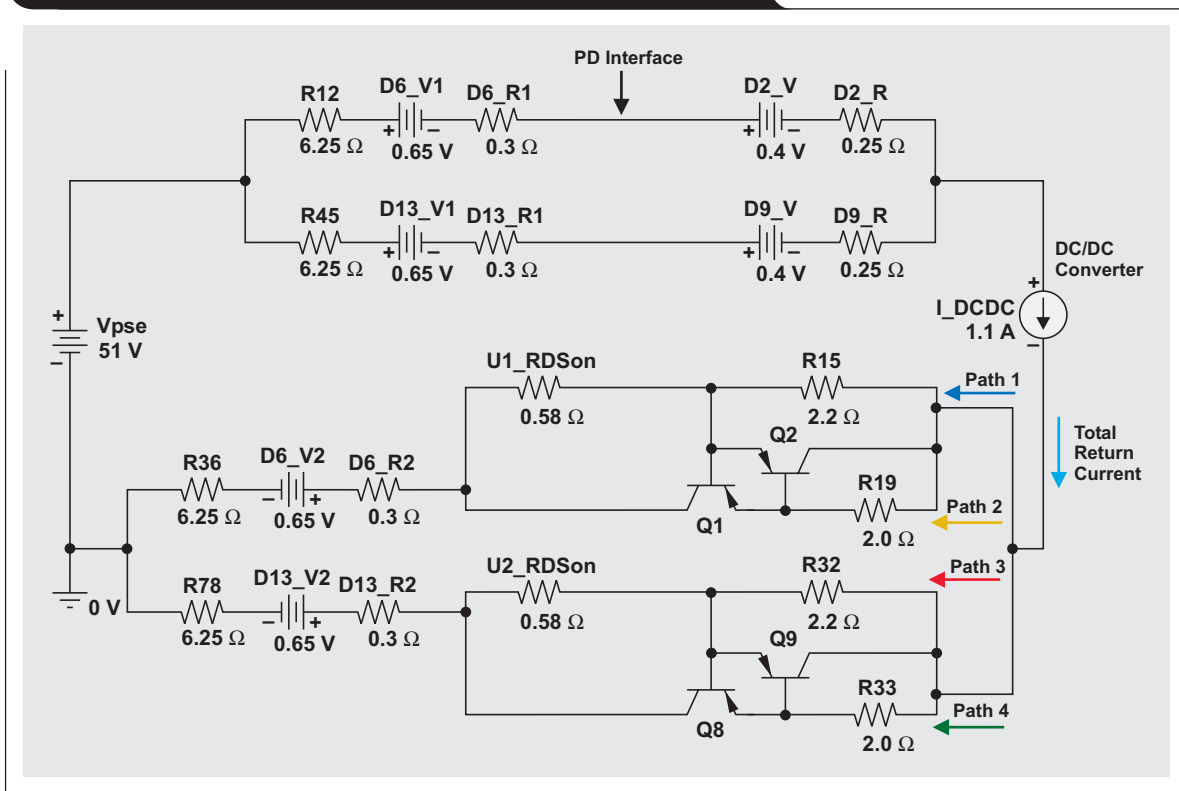
如前所述，在一个理想的电路中，每个路径中的电流都是相等的，因为每个路径的组成部分都是相同的。然而，由于二极管正向电压的下降，电缆电阻以及场效应管的通过电阻的存在，致使电路中相同路径产生不平衡。PSPICE只允许模拟理想情况，即使用相同的元器件，同时每一个电流环路是均衡的。仿真分如

Table 2. Modeling of four-pair architecture

ACTUAL SCHEMATIC (Figure 2)	PSPICE SIMULATION SCHEMATIC (Figure 4)
U1	U1_RDSON (pass FET on resistance)
U2	U2_RDSON (pass FET on resistance)
D6	D6_V1, D6_V2, D6_R1, D6_R2
D13	D13_V1, D13_V2, D13_R1, D13_R2
D2	D2_V, D2_R
D9	D9_V, D9_R
CAT5E cable resistance	R12, R45, R36, R78
PSE input voltage	Vpse
DC/DC power supply	I_DCDC
Q1, Q2, Q8, Q9, R15, R19, R32, R33	Q1, Q2, Q8, Q9, R15, R19, R32, R33

下步骤进行，扫描直流（DC）源电流，直流电压转换（I_DCDC），记录两条电流环路中的每一条的电流值和直流（DC）源的转换功率。直流（DC）源的转换功率指的是DC/DC转换器的输入电流。（如果DC/DC电源供应器的效率是已知的，它可以乘以输入功率来计算向负载供电的实际功率。）在每一条环路内部，必须要确保通过TPS2376-H器件场效应管的电流小于最大电流限—625mA，同时，每一条环路中的总电流不能超过800mA。

Figure 4. Balanced PSPICE circuit for load-share simulation



另一个必须要考虑的变量是CAT5E电缆的长度。IEEE标准允许PD和PSE之间的最长电缆长度为100m。图5给出了当电缆电阻（R12, R45, R36, R78）改动，电缆长度为100m和1m时边角区域的仿真结果。所有的仿真是在最小PSE电压—51V下进行的，因为在该条件下输入电流有最大值。

模拟结果证实，在匹配的条件下，电流环路将向1、3路径和2、4路径均等的供电。随着输入功率增加到超过25W，升流电路将打开，每个电流环中的一部分电流将分流至TPS2376 - H。当DC/DC电源供应器的输入功率为48W并且连接PD和PSE之间的电缆长度为100m时，每一个TPS2376-H器件所能分流的最大电流值是465mA。每一个双层电流环路中的最大电流为599mA（465 mA + 134 mA）。该仿真结果是可以接受的，因为TPS2376-H的最大电流小于625mA的电流限，并且每一个双层电流环路的最大电流小于800mA。

了解环路阻抗不匹配的原因

为了确保性能的可靠性，了解环路阻抗不匹配产生的原因非常重要，这样我们就可以将最坏的失衡情况输入到仿真模型进行模拟。图6的仿真电路将下列变量的最大值纳入考虑范围：二极管正向电压，1%的电阻容限，通过场效应管的最大导通电阻容限。除此以外，3%的最大电缆长度电阻容限也符合IEEE标准。

Figure 5. PSPICE simulation of balanced current sharing

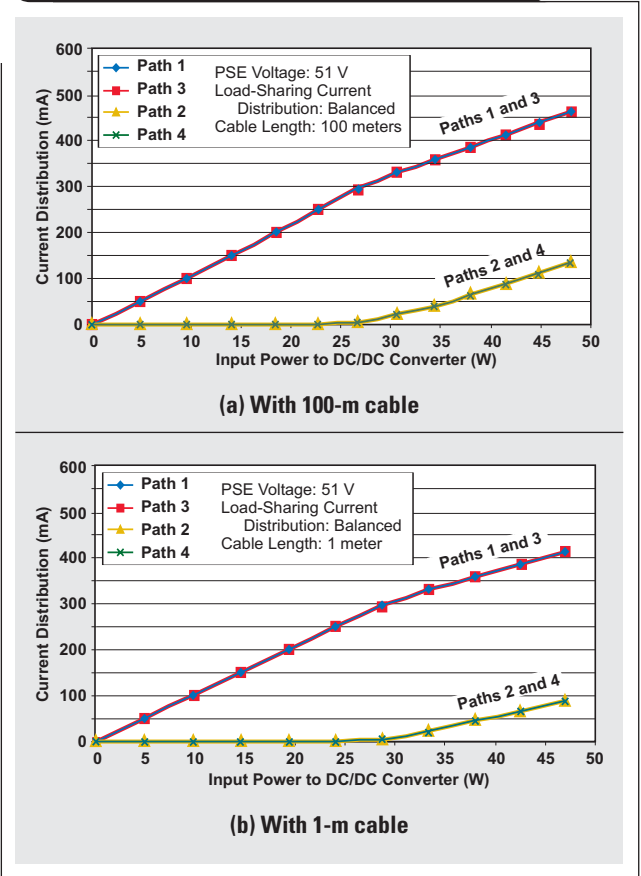
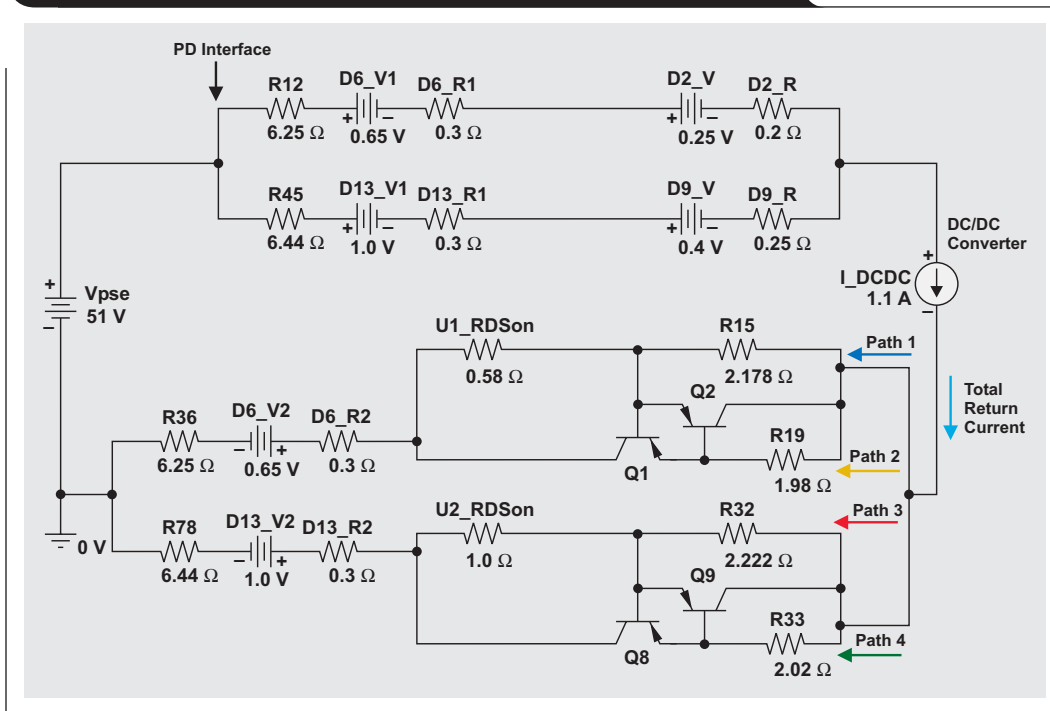


Figure 6. Unbalanced PSPICE circuit for load-share simulation



我们调整了以上变量的值，使阻抗的失配存在于同一个电流回路中，从而引起最大程度的不平衡。再运行一次前面提到的4对电缆架构仿真模型来验证每对电缆中电流的失衡。

如图7所示，使用一根100m长的电缆时，通过每一个TPS2376-H器件的最大电流为488mA；电缆长度为1m时该电流为498mA。电缆长度100m时，最大可用电流（在这个例子中的路径1和路径2）为640mA；电缆长度为1m时为660mA。由于最大失衡电流在TPS2376-H中没有超过625mA在每一条电流回路中也没有超过800mA，所以该设计仍然符合最初的设计规范。

板级结果

我们搭建和测试了一块评估电路板来确认仿真的正确性。图8给出了在恒温25°C的理想实验室环境下每一路回路电流的测量值。该板级结果证明了通过TPS2376-H后产生一个电流失衡，电缆长度100m仅为10mA（2.1%），1m时为1mA（0.2%）。

效仿最坏情况下的条件，将二极管和电阻与R78电流回路的返回路径相串联，重新测试评估电路板。二极管的正向压降（0.7V）和0.5Ω的附加电阻被计算进去，用以补偿最坏情况下二极管前向压降的变化量和系统的电阻容限。通过合理的板级测试来指导测量实际电流回路失衡是可行的。

Figure 7. PSPICE simulation of unbalanced current sharing

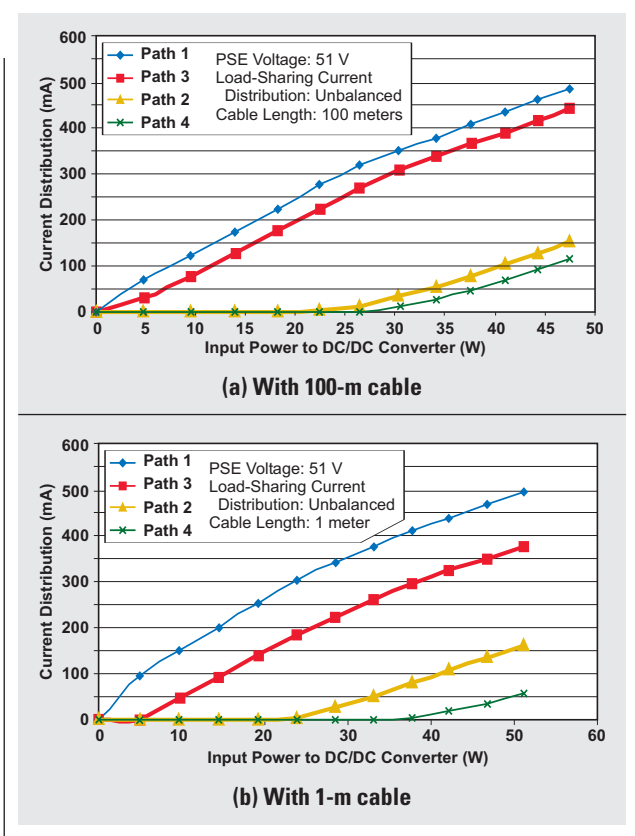
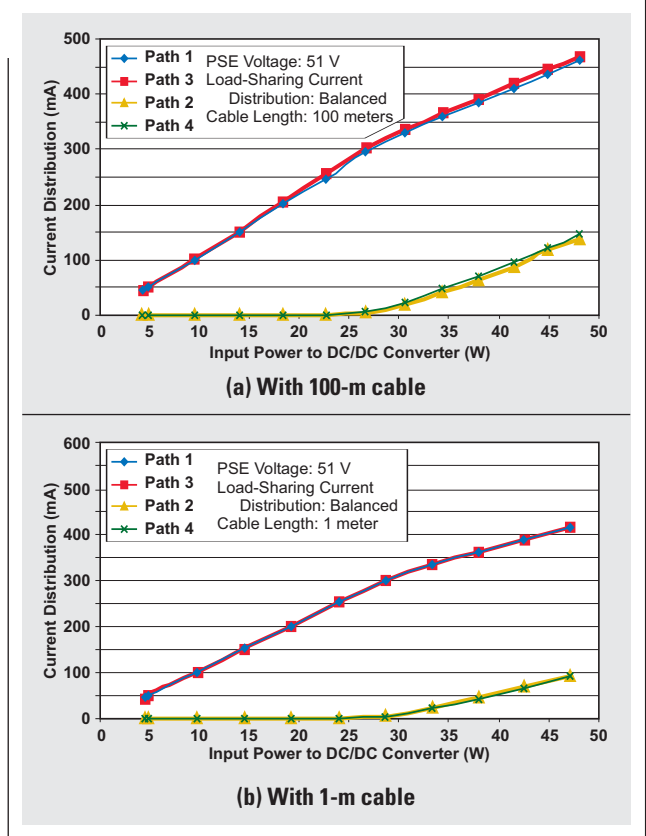


Figure 8. Board-level test results of balanced current sharing



如图9所示，使用一根100m长的电缆时，通过每一个TPS2376-H器件的最大电流为488mA；电缆长度为1m时该电流为484mA。电缆长度100m时，最大可用电流（在这个例子中的路径1和路径2）为648mA；电缆长度为1m时为640mA。由于最大失衡电流在TPS2376-H中没有超过625mA在每一条电流回路中也没有超过800mA，所以该设计仍然符合最初的设计规范。

结论

总的来说，仿真模拟和板级结果都证实，在CAT5E以太网电缆中，通过控制流过每个TPS2376-H的返回电流不超过它的最小电流限并且不超过允许的最大电流，升流电路可以满足均流的最初设计要求。这个附加的均流电路改善了两个电流回路之间的均流性能，这样一来，线路、连接器以及其它器件的容差将不会导致我们的设计超出设计规范。

References

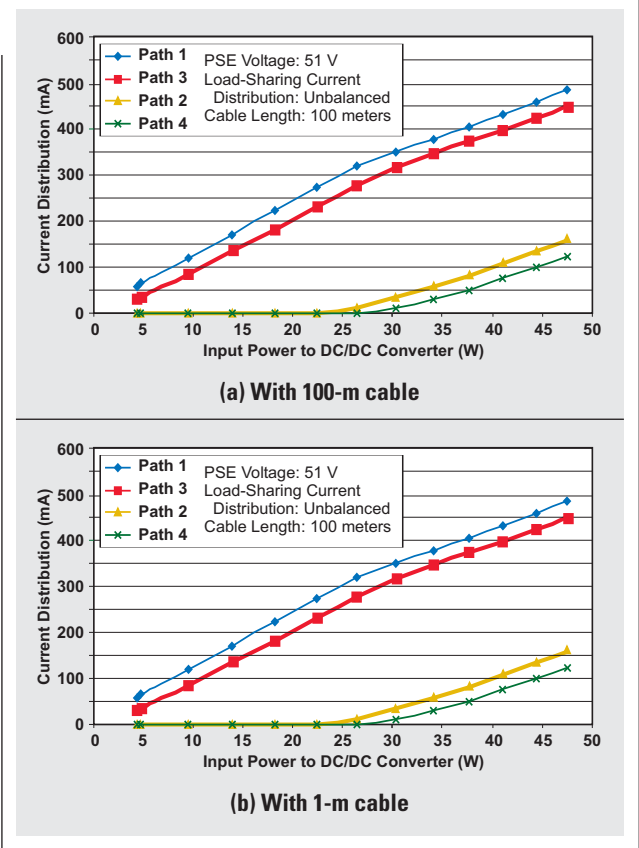
For more information related to this article, you can download an Acrobat Reader file at www-s.ti.com/sc/techlit/litnumber and replace “litnumber” with the **TI Lit. #** for the materials listed below.

Document Title	TI Lit. #
1. IEEE 802.3 standard, http://standards.ieee.org/getieee802/802.3.html	—
2. “IEEE 802.3af PoE High Power PD Controller,” TPS2376-H Datasheetslvs646	
3. Martin Patoka, “High-Power PoE PD Using TPS2375/77-1,” Application Reportslva225	

Related Web sites

- power.ti.com
- www.ti.com/sc/device/TPS2376-H
- www.ti.com/sc/device/UCC3809-2

Figure 9. Board-level test results of unbalanced current sharing



样片及品质信息



免费样片索取

您是否正没日没夜的忙于工作而又急需一块免费的 TI 产品样片？那就请立刻登录 TI 样片中心，马上申请吧！

数千种器件，极短的递送时间，高效的反馈速度：

- 8000多种器件及各种封装类型任君选择
- 一周 7*24 小时网上随时申请
- 两个工作日内得到反馈
- 已经有成千上万的客户通过申请样片，优质高效地完成了产品设计。

立即注册 **my.TI** 会员，申请免费样片，只需短短几天，样片将直接寄到您所指定的地址。

<http://www.ti.com.cn/freesample>

电话支持——如果您需要帮助如何选择样片器件，敬请致电中国产品信息中心 **800-820-8682** 或访问

www.ti.com.cn/support

品质保证

持续不断的专注于品质及可靠性是 TI 对客户承诺的一部分。1995 年，TI 的半导体品质系统计划开始实施。该全面的品质系统的使用可满足并超越全球客户及业界的需求。

TI 深信促进业界标准的重要性，并一直致力于美国 (U.S) 及国际性自发标准的调整。作为活跃于诸多全球性的业界协会的一员，以及 TI 对环境保护负有强烈的使命感，TI 引领其无铅 (lead[Pb]-free) 计划，并逐渐成为了该方向的领导者。该计划始于上世纪 80 年代，旨在寻求产品的可替代原料，时至今日，绝大多数的 TI 产品均可提供无铅及绿色 (Green) 的封装。

如果您对“无铅”抱有任何疑问，敬请访问：

www.ti.com.cn/quality

Safe Harbor Statement:

This publication may contain forward-looking statements that involve a number of risks and uncertainties. These "forward-looking statements" are intended to qualify for the safe harbor from liability established by the Private Securities Litigation Reform Act of 1995. These forward-looking statements generally can be identified by phrases such as TI or its management "believes," "expects," "anticipates," "foresees," "forecasts," "estimates" or other words or phrases of similar import. Similarly, such statements herein that describe the company's products, business strategy, outlook, objectives, plans, intentions or goals also are forward-looking statements. All such forward-looking statements are subject to certain risks and uncertainties that could cause actual results to differ materially from those in forward-looking statements. Please refer to TI's most recent Form 10-K for more information on the risks and uncertainties that could materially affect future results of operations. We disclaim any intention or obligation to update any forward-looking statements as a result of developments occurring after the date of this publication.

Trademarks:

The platform bar is a trademark of Texas Instruments. All other trademarks are the property of their respective owners.

Real World Signal Processing, the balck/red banner, C2000, C24x, C28x, Code Composer Studio, Excalibur, Just Plug It In graphic, MicroStar BGA, MicroStar Junior, OHCI-Lynx, Power+ Logic, PowerPAD, SWIFT, TMS320, TMS320C2000, TMS320C24x, TMS320C28x, TMS320C6000, TPS40K, XDS510 and XDS560 are trademarks of Texas Instruments. All other trademarks are the property of their respective owners.

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries (TI) reserve the right to make corrections, modifications, enhancements, improvements, and other changes to its products and services at any time and to discontinue any product or service without notice. Customers should obtain the latest relevant information before placing orders and should verify that such information is current and complete. All products are sold subject to TI's terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgment.

TI warrants performance of its hardware products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are used to the extent TI deems necessary to support this warranty. Except where mandated by government requirements, testing of all parameters of each product is not necessarily performed.

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. Customers are responsible for their products and applications using TI components. To minimize the risks associated with customer products and applications, customers should provide adequate design and operating safeguards.

TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any TI patent right, copyright, mask work right, or other TI intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI products or services are used. Information published by TI regarding third-party products or services does not constitute a license from TI to use such products or services or a warranty or endorsement thereof. Use of such information may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

Reproduction of TI information in TI data books or data sheets is permissible only if reproduction is without alteration and is accompanied by all associated warranties, conditions, limitations, and notices. Reproduction of this information with alteration is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for such altered documentation. Information of third parties may be subject to additional restrictions.

Resale of TI products or services with statements different from or beyond the parameters stated by TI for that product or service voids all express and any implied warranties for the associated TI product or service and is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for any such statements.

TI products are not authorized for use in safety-critical applications (such as life support) where a failure of the TI product would reasonably be expected to cause severe personal injury or death, unless officers of the parties have executed an agreement specifically governing such use. Buyers represent that they have all necessary expertise in the safety and regulatory ramifications of their applications, and acknowledge and agree that they are solely responsible for all legal, regulatory and safety-related requirements concerning their products and any use of TI products in such safety-critical applications, notwithstanding any applications-related information or support that may be provided by TI. Further, Buyers must fully indemnify TI and its representatives against any damages arising out of the use of TI products in such safety-critical applications.

TI products are neither designed nor intended for use in military/aerospace applications or environments unless the TI products are specifically designated by TI as military-grade or "enhanced plastic." Only products designated by TI as military-grade meet military specifications. Buyers acknowledge and agree that any such use of TI products which TI has not designated as military-grade is solely at the Buyer's risk, and that they are solely responsible for compliance with all legal and regulatory requirements in connection with such use.

TI products are neither designed nor intended for use in automotive applications or environments unless the specific TI products are designated by TI as compliant with ISO/TS 16949 requirements. Buyers acknowledge and agree that, if they use any non-designated products in automotive applications, TI will not be responsible for any failure to meet such requirements.

Following are URLs where you can obtain information on other Texas Instruments products and application solutions:

相关产品链接:

- DSP - 数字信号处理器 <http://www.ti.com.cn/dsp>
- 电源管理 <http://www.ti.com.cn/power>
- 放大器和线性器件 <http://www.ti.com.cn/amplifiers>
- 接口 <http://www.ti.com.cn/interface>
- 模拟开关和多路复用器 <http://www.ti.com.cn/analogswitches>
- 逻辑 <http://www.ti.com.cn/logic>
- RF/IF 和 ZigBee® 解决方案 <http://www.ti.com.cn/radiofre>
- RFID 系统 <http://www.ti.com.cn/rfidsys>
- 数据转换器 <http://www.ti.com.cn/dataconverters>
- 时钟和计时器 <http://www.ti.com.cn/clockandtimers>
- 标准线性器件 <http://www.ti.com.cn/standardlinearde>
- 温度传感器和监控器 <http://www.ti.com.cn/temperatureensors>
- 微控制器 (MCU) <http://www.ti.com.cn/microcontrollers>

相关应用链接:

- 安防应用 <http://www.ti.com.cn/security>
- 工业应用 <http://www.ti.com.cn/industrial>
- 计算机及周边 <http://www.ti.com.cn/computer>
- 宽带网络 <http://www.ti.com.cn/broadband>
- 汽车电子 <http://www.ti.com.cn/automotive>
- 视频和影像 <http://www.ti.com.cn/video>
- 数字音频 <http://www.ti.com.cn/audio>
- 通信与电信 <http://www.ti.com.cn/telecom>
- 无线通信 <http://www.ti.com.cn/wireless>
- 消费电子 <http://www.ti.com.cn/consumer>
- 医疗电子 <http://www.ti.com.cn/medical>

重要声明

德州仪器 (TI) 及其下属子公司有权在不事先通知的情况下, 随时对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权随时中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的 TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的硬件产品的性能符合 TI 标准保修的适用规范。仅在 TI 保修的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非政府做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 产品或服务的组合设备、机器、流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的数据手册或数据表, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。在复制信息的过程中对内容的篡改属于非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。

在转售 TI 产品或服务时, 如果存在对产品或服务参数的虚假陈述, 则会失去相关 TI 产品或服务的明示或暗示授权, 且这是非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类虚假陈述不承担任何责任。

可访问以下 URL 地址以获取有关其它 TI 产品和应用解决方案的信息:

产品

放大器	http://www.ti.com.cn/amplifiers
数据转换器	http://www.ti.com.cn/dataconverters
DSP	http://www.ti.com.cn/dsp
接口	http://www.ti.com.cn/interface
逻辑	http://www.ti.com.cn/logic
电源管理	http://www.ti.com.cn/power
微控制器	http://www.ti.com.cn/microcontrollers

应用

音频	http://www.ti.com.cn/audio
汽车	http://www.ti.com.cn/automotive
宽带	http://www.ti.com.cn/broadband
数字控制	http://www.ti.com.cn/control
光纤网络	http://www.ti.com.cn/optical network
安全	http://www.ti.com.cn/security
电话	http://www.ti.com.cn/telecom
视频与成像	http://www.ti.com.cn/video
无线	http://www.ti.com.cn/wireless

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2006, Texas Instruments Incorporated