

数据中心高效交流配电 与直流配电的量化比较

白皮书 127

修改 2

作者 Neil Rasmussen and James Spitaels

> 摘要

本白皮书对最有效的直流配电与交流配电方法的效率进行了详细的量化比较，并分析了配电效率对制冷功率需求和总耗电量的影响。分析表明，最新的高效交流配电架构与直流配电架构在效率方面几乎相同，因此通过迁移至直流架构来寻求更高效率的做法是没有根据的。

内容

点击内容即可跳转

简介	2
两种高效的配电选择	3
供电线路整体效率的比较	10
对数据中心整体功耗的影响	11
交流系统与直流系统的效率计算器	12
针对北美地区的特殊注意事项	13
结论	18
资源	19

简介



市场对改善数据中心效率的不断诉求，掀起了数据中心供电与制冷技术的创新浪潮。一种被广泛讨论的能源效率方案是将数据中心的电源架构从目前的交流架构转换为直流架构。一些畅销的报刊和技术杂志纷纷发表文章，畅谈直流配电的优点，Intel、APC 和 Sun Microsystems 等公司还参与了相关的技术演示项目。

目前，能真正在数据中心内应用的配电方法共有五种，包括两种基本的交流配电方法，以及三种基本的直流配电方法。与此相关的 APC 第 63 号白皮书数据中心的交流配电与直流配电对这五种类型进行了说明和分析。该白皮书的一个重要发现，是这五种配电方法中有两种方法可提供出众的电气效率，其中一种是交流配电方法，另一种是直流配电方法。已发表的文献也普遍支持这一结论。本白皮书专门针对这两种效率最高的配电方法进行比较。除非数据中心的供电技术发生大幅改进，否则这两种方法中的一种将很可能成为未来数据中心的首选配电方法。

本白皮书在介绍交流配电系统时，所用的效率性能数值均源自可在当今市场上购买到的实际设备。由于目前市场上尚未推出商业直流配电系统，因此直流配电系统的效率数值则基于最新的样本数据、估算数据和计算结果。本白皮书中使用的所有效率数值均辅有相应的例证和参考资料，以便读者对分析结果进行独立测试和验证。

配电效率的变化可影响数据中心的总耗电量。但是，这种影响很难通过数学方式进行量化，原因有两点：

1. 配电效率的变化会影响热量负载，进而影响空调的功耗。
2. 数据中心中有大量的功率负载并不通过所分析的配电系统供电。

本白皮书将详细介绍这些影响，并通过量化方式说明配电效率的提高如何降低总耗电量。

背景

目前，一些现有的数据中心由于采用了较差的架构设计以及旧式的配电技术，运行效率十分低下。APC 发现，数据中心（不包括制冷系统）在运行时的供电系统的效率一般只有 30%，有时甚至更低。由于这种效率低下的状况在很大程度上是可以避免的，因而有大量的电能白白浪费掉了。这种情况主要是由下列因素造成的：

- IT 设备的电源效率低下
- 基于变压器的配电电源 (PDU) 效率低下
- UPS 系统效率低下
- 运行负载远低于系统的额定设计，这进一步增加了以上各项的电能损耗

在过去三年中，IT 设备的电源与 UPS 系统在效率方面得到了显著改进。这意味着，现在安装的交流配电系统通常比五年前安装的系统要高效得多。此外，可扩展的模块化 UPS 系统的问世，使数据中心可以根据负载轻松适当调整 UPS 的容量，有助于避免过去常常因整体利用率不足而造成电力效率低下的情况。基于变压器的 PDU 仍是造成北美很多数据中心出现电能损耗的一个重要根源，但北美之外的地区则没有这种情况。本白皮书中分析的交流系统采用 400/230 V 的欧洲配电标准。有关在北美地区应用 400/230 V 交流配电标准的详细讨论，请参见 APC 第 128 号白皮书使用改进型高密度配电系统提高数据中心的效率。

有人认为，直流配电方法可以实现更高的效率，这基于下面三个假定：

1. 也许可以生产出效率比交流 UPS 更高的直流 UPS
2. 配电单元 (PDU) 中不再有变压器，有助于减少电能损耗
3. 改进 IT 设备电源本身的效率也许比改进交流输入设计更为有效



本白皮书对所有这些设想进行了量化分析，并得出以下结论：

- 新一代交流 UPS 系统的能耗是旧式交流 UPS 的五分之一，没有进一步证据表明，可以研制出效率更高的直流 UPS
- PDU 中的变压器是效率低下的一个重要根源，但北美之外的地区并没有在 PDU 中使用变压器，且新型的高效交流配电架构中也没有变压器
- 在将 IT 设备的电源转换为直流输入后，其效率的实际改进程度要比最初设想的低得多

许多已发表的文章预期，直流配电方法在效率方面可比交流配电方法提高 10% 到 30%。但是，正如您不会将新型服务器技术与十年前生产的服务器进行性能对比一样，将假想的直流配电系统与旧式的传统交流配电系统进行效率对比，也是不恰当的。比较过去与未来的可选方案并没有多大意义，重要的是将现在与未来的可选方案进行对比。

本白皮书中的数据表明，目前最好的交流配电系统已经与假想中的未来直流系统几乎具备相同的效率，那些畅销报刊中关于效率提升的大多数论述都不准确或存在误导，甚至是错误的。与关于这一课题的几乎所有其他文章和论文不同的是，本白皮书中使用的所有量化数据都辅有例证和参考资料。

两种高效的配电选择

正如简介中所述，要建造未来的高效数据中心，目前有两种配电系统可供选择。其中一种系统基于现有的主流 400/230 V 交流配电系统，目前北美和日本之外的所有数据中心几乎都采用这一系统。另一种系统则基于概念型 380 V 直流配电系统，这种系统专为改造成可使用直流电的 IT 设备供电。图 1 和图 2 为这两种系统的图示。

图 1

高效交流配电系统（在北美之外普遍使用）



图 1 表示第一种选择。这是在北美和日本之外普遍采用的一种交流配电系统。请注意，在目前北美地区标准的配电系统中，UPS 电压为 480 V 交流电，因此图示中应添加另一个图块，以表示将 480 V 交流电转换为 208/120 V 交流电的 PDU 变压器。此图中略去了 PDU 变压器及其关联的损耗，因为在向 230 V 的 IT 负载供电时，没有必要降低 UPS 的输出电压。

图 2

高效直流配电系统（假想）



图 2 展示了第二种选择。这是一种假想的 380 V 直流配电方法。为使这一假设成立，需要设计出以 380 V 直流电运行的 IT 设备。文献中曾针对这种系统提出了多种不同的直流电供电电压，例如 300 V、380 V、400 V 和 575 V。但是，文献资料逐渐就此问题达成一致，认为应将 380 V 左右的电压作为首选标准，本白皮书中的分析就是基于 380 V 的直流系统。请注意，对于同一系统而言，380 V 直流电和 400 V 直流电是两个根本不同的概念。

分析概览

以下部分介绍本模型的总体结构，以及为支持这一模型而需要量化的数据。了解这些信息将有助于读者理解本白皮书的内容。

供电线路的三个部分

图 3 显示了典型数据中心在采用高效配电系统时的基本供电线路。请注意，这里没有 PDU，因为要分析的两种配电方法都不需要 PDU。此供电线路分为三个部分：

- UPS
- 布线
- IT 设备的电源 (PSU)

本模型的效率数据

本白皮书的后续部分将分别考察这三个供电线路部分的效率数据并加以量化。其目标是将效率数据建立为负载的函数，从而绘制出供电线路中每个部分的效率曲线（如图 3 底部的形状所示）。随后，这些效率数据将被纳入分析模型，以便对现有电源配置与假想电源配置的效率进行比较。

效率曲线上之所以标出负载为 50% 的位置，是因为本模型中的基准案例将使用负载达到 50% 时的效率数值。

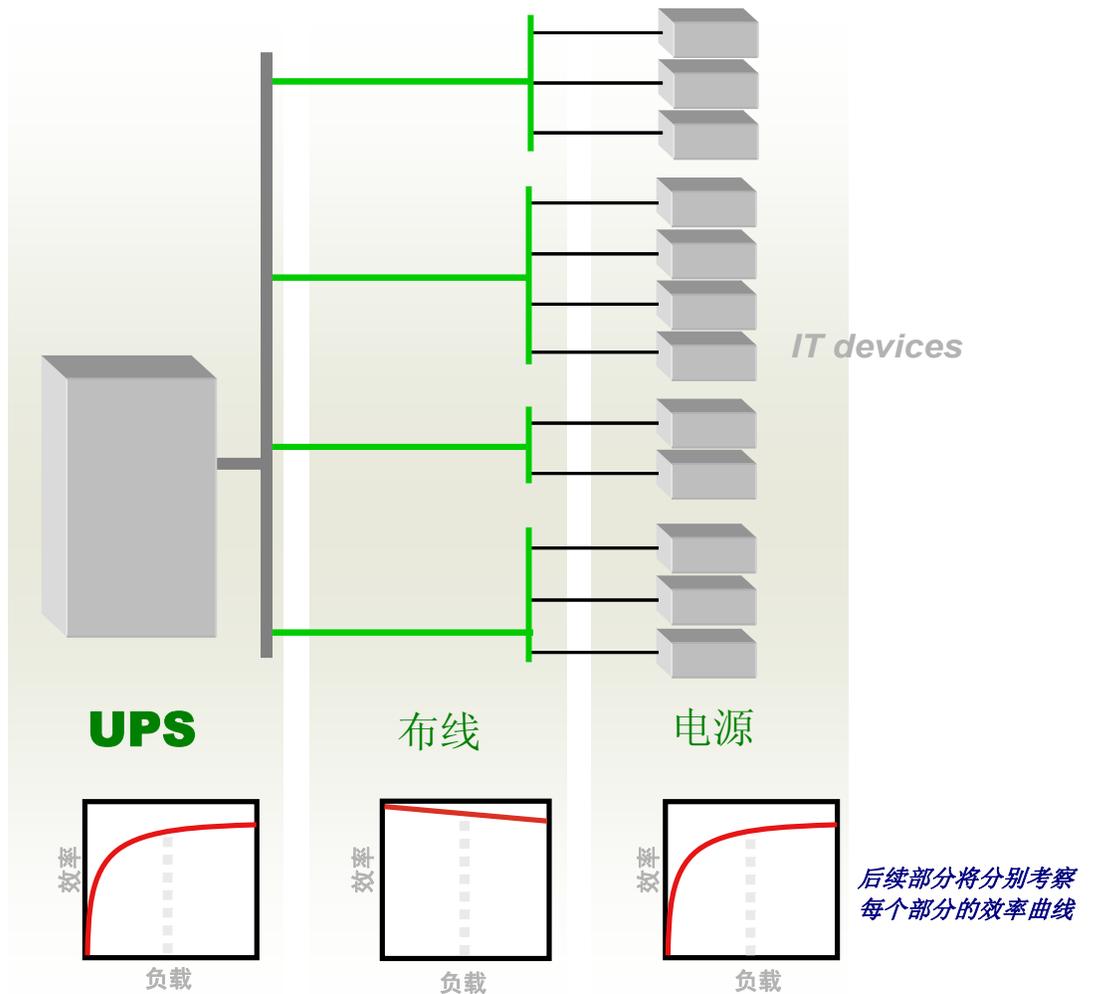


图 3
数据中心的供电线路：三个部分、三条效率曲线

后续部分将分别考察每个部分的效率曲线

本模型的基准运行负载 (50%)

以上数据清楚地表明，配电系统中的设备效率并非一成不变，而是随着所应用负载的变化而变化。这就是效率应表示为一条曲线而不是某个数字的原因。因此，如果不考虑供电线路中每个部分的实际运行负载，则计算出的任何配电效率都将是不全面的。

在配电效率这一课题上，以前的大部分文章都没有说明负载变化的影响，但这部分影响是非常重要的。在本白皮书中，我们将选择一种能代表典型配置的基准负载，然后说明效率如何随负载的变化而变化。通过选择基准运行负载，有助于为比较交流配电与直流配电提供一个参照点，从而简化最初的讨论。但是，这并不会限制实际模型的适用范围，因为它将效率看成是一条随负载一起变化的曲线。在实际配置中，这三个供电线路部分的运行负载（容量的一部分）彼此将是不同的，且在交互模型中还会发生动态变化（请参见图 9）。

以下部分在演示和比较交流配电与直流配电时，将选择 50% 作为基准负载。此基准处于数据中心所有这三个部分的运行限制之内（请参见上面的图 3）。下面分别介绍 50% 的负载与数据中心这三个部分之间的关系：

- **UPS**

对于非冗余 (1N) 系统，50% 是典型的运行负载。对于冗余 (2N) 系统，50% 表示最大运行负载（即在两个 2 个 UPS 之间分担全负载）。

- **布线**

与 UPS 负载类似，50% 是非冗余 (1N) 布线的实际运行负载。

对于双路冗余 (2N) 布线系统，50% 是每路馈电的最大负载（实际上，美国电气标准将负载限制为 80%，从而将每路馈电的负载实际限制为 40%）。需要说明的是，无论在何种情况下，布线的运行负载对整体效率影响甚微，因为目前的布线效率处于一个狭窄的高位区间 99-100%。

- **IT 电源**

IT 设备一般拥有一到两个内置电源。在配备单一电源的服务器中，50% 的运行负载处于运行范围的中间位置（“空闲”负载的典型情况，服务器多数时候处于这一状态）；对于配备双电源的服务器，50% 表示最大运行负载（即在 2 个电源之间分担全负载）。

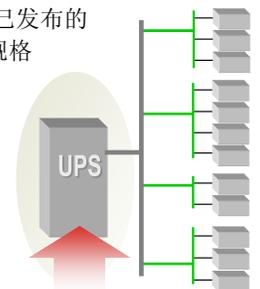
正如本白皮书后面为这三个部分显示的实际效率曲线所示，当运行负载处于 50% 标记附近时，相应的效率并没有太大差异，因此 50% 负载的具体位置并不十分重要。

UPS 的效率

交流配电架构以 UPS 作为起点，以形成交流配电总线；在直流配电架构中，将由直流 UPS（有时称为“直流电厂”或“整流器”）形成直流配电总线。

在目前的交流 UPS 市场中，某些产品的性能是可以核实的，比如查阅它们已发布的效率规格，或对它们的性能进行测量。遗憾的是，APC 发现许多已发布的规格并不准确，并不能代表产品的实际性能。在本次分析中，我们将只采用那些额定效率级别已经过独立实验室测量和认证的知名 UPS 的效率数据。

图 4 显示了几种商用交流 UPS 和直流 UPS 系统的效率。



交流 UPS 与直流 UPS 的效率比较

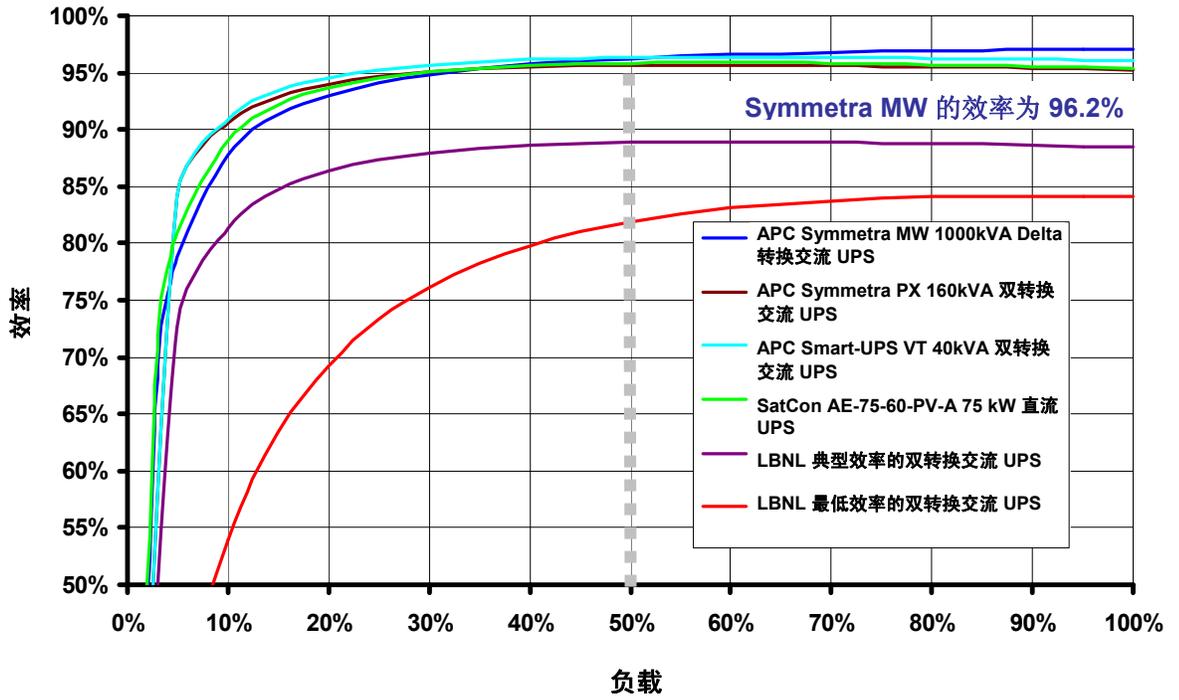


图4 几种商用交流UPS和直流UPS系统的效率

表1 图4中UPS效率数据的汇总

UPS	负载			
	25%	50%	75%	100%
APC Symmetra MW (Delta 转换交流电)	94.1%	96.2%	96.9%	97.0%
APC Symmetra PX (双转换交流电)	94.7%	95.7%	95.6%	95.3%
APC Smart-UPS VT (双转换交流电)	95.3%	96.3%	96.3%	96.0%
SatCon AE-75-60-PV-A (直流电)	94.5%	95.8%	95.6%	95.4%
LBNL 的典型效率 (双转换交流电)	87.3%	88.8%	88.8%	88.4%
LBNL 的最低效率 (双转换交流电)	73.3%	81.9%	84.0%	84.1%

本模型的交流 UPS 效率数值

1,000 kVA APC Symmetra MW Delta 转换 UPS 在负载为 50% 时的效率级别为 96.2%；160 kVA Symmetra PX 双转换 UPS 在负载为 50% 时的效率级别为 95.7%；40 kVA APC Smart-UPS VT 双转换 UPS 在负载为 50% 时的效率级别为 96.3%。所有这些效率值均已经过 TÜV 测试实验室的认证。¹这些级别并不是在节能模式或旁路模式下得出的，而是通过可完全隔离输入和输出的在线式输出逆变器重新生成输出并加以调节后确定的。本次分析将使用 Symmetra MW，其在负载为 50% 时的交流配电效率为 96.2%。

经美国加州能源委员会认证，75 kW SatCon 逆变器的效率值为 95.8%²（包括这款逆变器在内的很多逆变器还可以用作整流器，它们在这两种运行模式下应该可以提供类似的效率，因此也可以将这款逆变器视为直流 UPS）。

其余两条曲线显示的是 LBLN 在 2005 年的一项研究中测量的传统高效双转换 UPS 的效率级别。³

本模型的直流 UPS 效率数值

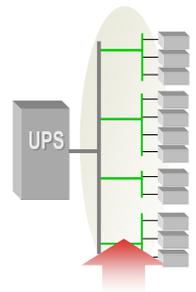
在目前的直流 UPS 市场中，没有产品符合备用电池采用 380 V 直流配电系统的要求。现在有一个重要的技术难题尚未完全解决，即如何将具有不同端接电压的电池连接在稳定的 380 V 配电总线上。不过，Intel 与多家直流电源提供商合作，共同发布了一系列建议的设计，预期效率数值可达 97%；⁴另一家供应商 Netpower Labs 开发出了一款 350 V 直流 UPS，公布的效率数值为 96%；⁵LBNL 公布了针对一款原型直流 UPS 的测量结果，其效率数值为 94%。⁶在这三个已公布的效率值（94%、96% 和 97%）中，我们将选择中间的数值进行本次分析。请注意，Netpower Labs 开发的直流 UPS 的效率 (96%) 可能是最佳数值，因为资料来源并未指定负载百分比。这样，在负载为 50% 时，其效率可能低于 96%。

模型的基准数值 负载为 50% 时的效率

交流 UPS	96.2%
直流 UPS	96.0%

布线的效率

交流 UPS 或直流 UPS 与 IT 负载之间的布线一般都有电能损耗。损耗的大小取决于三个因素：工作电流、布线规格和缆线长度。每个数据中心都有几百条乃至数千条不同的线缆，必须将每条线缆的损耗加在一起，才能计算出总损耗。



布线效率

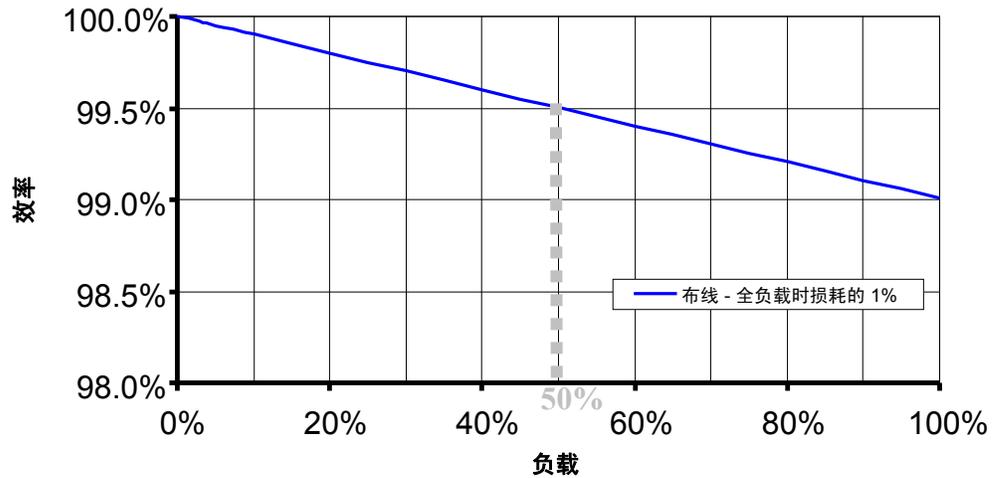


图 5
布线的效率曲线

对于典型配置，一般可以估计出布线的损耗。线缆规格可由电路的额定容量得出，而且线缆的平均长度通常也是知道的。布线损耗的设计数值通常为全负载时负载功率的 1%。布线中的损耗与负载的平方成正比。每当负载降低一半时，布线损耗将减少到原来的四分之一。对于负载为 50% 的数据中心，布线效率一般可达 99.5%。因此，大多数数据中心内的布线损耗都是可以忽略不计的。

请注意，不论是直流配置，还是交流配置，布线损耗都一样。虽然所用铜缆的数目可能稍有不同，但效率并无差别。布线损耗不会导致交流系统与直流系统之间出现任何效率差别。

模型的基准数值

负载为 50% 时的效率

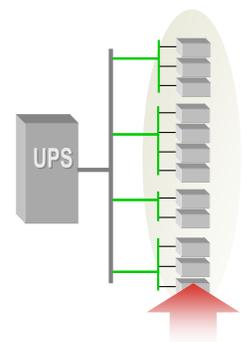
交流电 布线	99.5%
直流电 布线	99.5%

IT 电源的效率

现代的 IT 设备都配有一个或多个内置电源 (PSU)，用于将输入的交流电转换为 12 V 的直流总线，进而为机箱中的各种卡或子系统供电。* 这些 PSU 为改进效率提供了机会。

在早期的服务器中，PSU 在负载为 50% 时的效率大约为 75%（请参见图 6）。

但是，根据 Sun Microsystems（图 7）和 Hewlett-Packard（图 8）公布的电源效率数据，现在大多数最新设计在多种运行负载下的效率一般都是 90% 或更高。



* 在这种“分布式电源系统架构”中，各种卡或子系统将使用板载电源逆变器根据 12 V 总线生成自己特定的本地功率需求（例如 1.1 V、3.3 V、5 V）。PSU 通常是插在机箱中的一个模块，用户可自行更换。

图 6

美国劳伦斯伯克莱国家实验室 (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL) 公布的早期服务器 PSU 的效率⁷

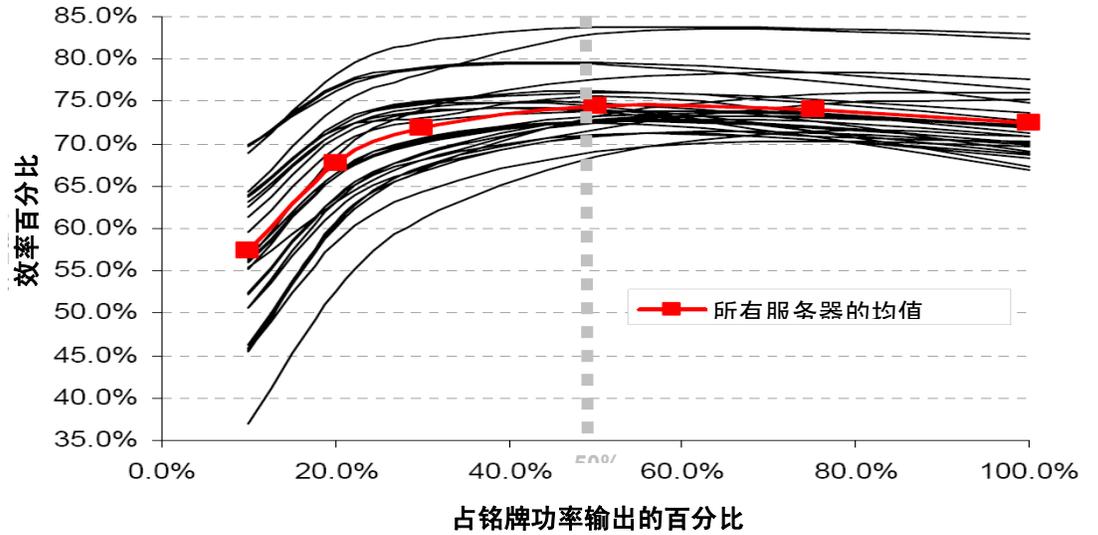


图 7

Sun Microsystems 服务器电源效率与负载的关系曲线，说明了不同输入电压对效率的影响⁸

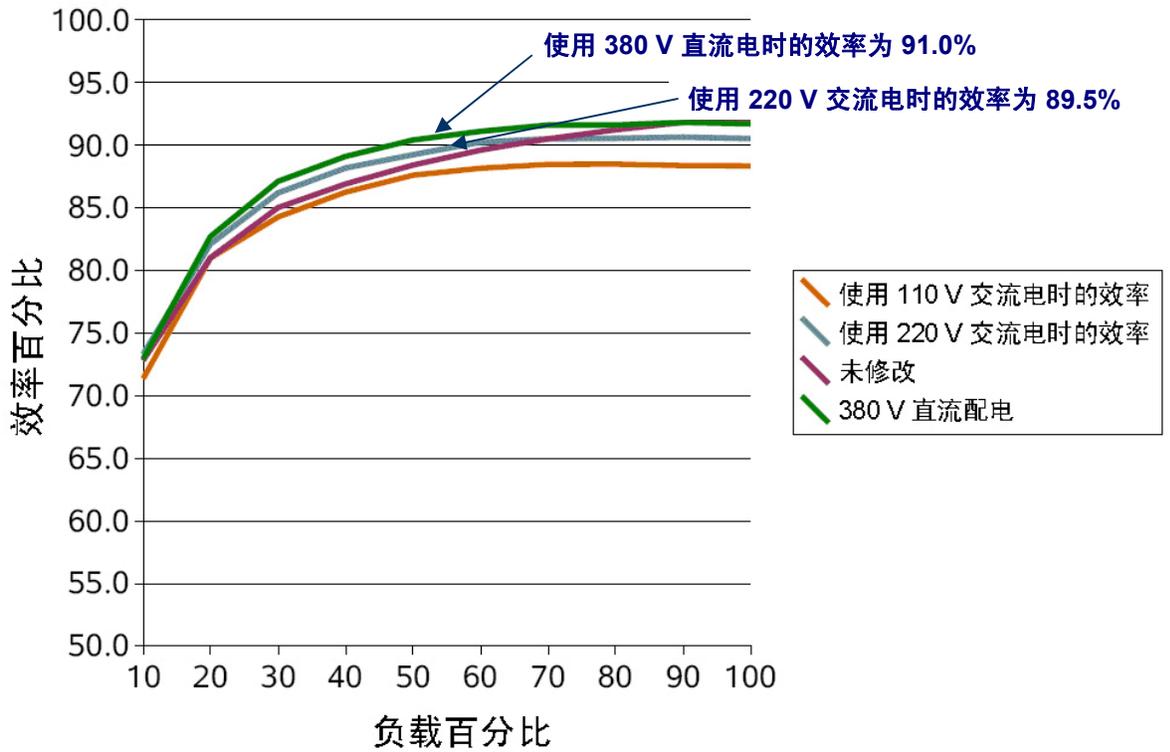
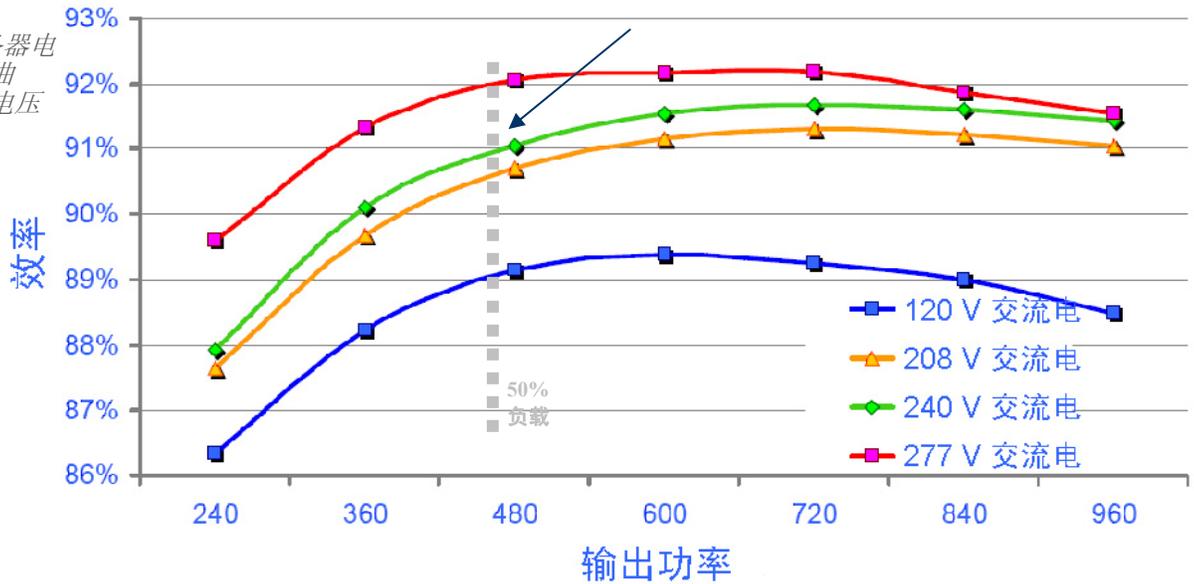


Figure 8

Hewlett-Packard 服务器电源效率与负载的关系曲线，说明了不同输入电压对效率的影响⁹



在 Sun Microsystems 的示例中，负载为 50% 时的交流电源效率是 89.5%，在 Hewlett-Packard 示例中为 91%。鉴于这些电源可作为未来服务器电源的代表（承认 400/230 V 交流电源将使服务器以 230 V 的电压运行），我们取这两个示例的平均值 90.25% 作为本模型中新服务器电源的基准交流供电效率。

在图 7 的 Sun Microsystems 电源效率图中，还包括一条针对转换为提供 380 V 直流电的电源的效率曲线。图中显示，在负载为 50% 时，该曲线比 220 V 交流电源的效率曲线高大约 1.5%。许多研究中都已采用此 1.5% 的效率改进，我们将它与基准的交流电源效率数值 90.25% 相加，从而计算出本模型的直流电源效率数值 91.75%。在本白皮书的后续部分中，我们将对这一改进的可能大小进行详细分析。

具有更高效率（高达 94%）的电源预计在 2008 年初面市。由于有关这些电源的数据尚未公布，因此本研究中无法引证。我们预计，这些电源在以 380 V 直流电进行供电时，效率改进幅度大约会降低 1%。

模型的基准数值
负载为 50% 时的效率

交流电 IT 电源	90.25%
直流电 IT 电源	91.75%

供电线路整体效率的比较

供电线路的整体效率等于上述 UPS 效率、布线效率以及 IT 电源效率之积。这项计算十分简单，如表 2 所示：

表 2

负载为 50% 时的整体配电效率计算比较高效的交流配电方法和 360 V 直流配电方法

	UPS		布线		IT 电源	整体效率
直流配电	96.0%	X	99.5%	X	91.75%	= 87.64%
AC	96.2%	X	99.5%	X	90.25%	= 86.39%

▲ **1.25%**

因此，与高效交流系统相比，高效直流系统在配电效率方面拥有 1.25% 的效率优势。此分析基于所有供电线路上的所有部分的运行负载为 50%。从图中可以看出，效率曲线在负载为 50% 时的形状相对平缓，这说明在 50% 附近的负载范围内，不存在大的效率变化。

这种效率差异针对的只是配电系统，它对数据中心整体功耗的影响还有待进一步分析，详见下一节。

对数据中心整体功耗的影响

配电系统中的任何效率提升百分比都不会直接转化为整个数据中心所节省功耗增加的百分比。通过减少配电损耗，可以降低数据中心的温度，进而降低制冷负载。因此，配电系统中节省的每一瓦电能，实际上可令数据中心的整体功率需求降低一瓦以上。但是，配电效率提升 1%，并不能使数据中心的总体效率提高 1% 以上。实际上，配电效率提升 1%，相应整体效率的提升幅度则只在 1% 以内。

因配电效率变化而导致电能损耗减少幅度的实际计算过程如下：

$$\Delta P = P - P'$$

$$\Delta P = 1 - [(1 - \Delta\eta_{PD}) \times (ITP + PDP + ACPp) + LP + ACFp]$$

其中，P 为基准交流系统功耗（以 1 作为参照），P' 为配电效率变化后的功耗。表 3 对公式中的其他值进行了定义，并提供了它们的典型值。

表 3
计算电力负载下降幅度时使用的变量

变量	说明	典型值
$\Delta\eta_{PD}$	配电效率的变化	输入变量
ITP	IT 负载的功耗在数据中心总功耗中所占的比重（百分比）	45%
PDP	基准配电功耗在数据中心总功耗中所占的比重（百分比）	5%
$ACPp$	空调损耗（随负载变化而变化）在数据中心总功耗中所占的比重（百分比）	25%
LP	照明负载的功耗在数据中心总功耗中所占的比重（百分比）	2%
$ACFp$	固定空调损耗在数据中心总功耗中所占的比重（百分比）	23%

在将这些值输入上面计算数据中心整体功耗下降幅度的公式后，可以算出，最终的整体功耗变化与配电效率变化之比为 0.75 比 1。这意味着，配电效率提高 1%，将导致整体功耗下降 0.75%。数据中心功耗的整体变化小于配电效率的变化。这一结论应该不足为奇，因为数据中心的大部分功耗（尤其是制冷系统）并不是源自配电系统，并且降低配电损耗不会影响制冷损耗的固定部分，而只会影响制冷损耗中的成比例变化部分（随制冷负载的变化而变化）。如果对上一节中得出的交流配电与直流配电的效率结果应用这一计算过程，我们就会发现，因交流电转换为直流电而提高的配电效率 (1.25%) 将使总耗电量降低 0.94%。

如果对上一节中得出的交流配电与直流配电的效率结果应用这一计算过程，我们就会发现，因交流电转换为直流电而提高的配电效率 (1.25%) 将使总耗电量降低 0.94%。

请注意，这一发现明显与其他研究中公布的信息相佐。很多肤浅的分析认为，转换为 380 V 直流电后所节省的每一瓦电能，将对数据中心的整体功耗产生“两倍到四倍的影响”。¹⁰实际上，除了配电系统外，节省的唯一功耗只是空调损耗中随负载一起变化的部分（成比例变化的损耗）。

对于设计已比较完善的现代数据中心，¹¹ 这些可变损耗大约是 IT 负载的 20%，因此配电系统中节省的每一瓦电能，只能使数据中心的整体功耗节省 1.2 瓦。

交流系统与直流系统的效率计算器

图 9 中的 APC Interactive TradeOff Tool™ 用于确定供电线路的效率，以及输入电源在四种不同的方案下减少的整体百分比。借助此工具，可以分析供电线路中不同部分的效率变化对供电线路效率的影响，以及对输入电源损耗整体下降幅度的影响。

基准或传统交流系统代表的是交流 UPS、PDU 和 IT 电源都具有典型效率值的旧数据中心，并假定 IT 电源以 208 V 交流电供电。最佳方案交流系统代表的是配有新一代高效交流 UPS、PDU 和 IT 电源的新数据中心。400 V 交流系统也采用最佳方案交流系统的现代配备，但它没有 PDU（及其关联的变压器损耗），并假定 IT 电源以 230 V 交流电供电，其效率比 208 V 交流系统高 0.5%（图 8 中绿色曲线与黄色曲线之间的距离）。380 V 直流系统采用假想的直流 UPS，它没有 PDU，其 IT 电源的效率比 208 V 交流系统高 1.5%（如图 7 所示）。所有这些方案都假定布线效率相同。

在此效率计算器中，影响效率的所有关键变量均可通过拖动滑块来进行调节。此工具一开始会使用所有变量的默认值，正如本白皮书所述，这些值都基于 50% 的负载。

此计算器工具中提供的默认“每单元热负载的制冷损耗”值均为 50% IT 负载的典型值。当模型中的运行负载接近 100% IT 负载的时，用户应以手动方式向下调节“每单元热负载的制冷损耗”，以反映全负载时制冷效率的提高。

在计算减少的输入功耗时，本模型假定照明负载为 2%。如果存在其他的固定负载（例如网络操作中心），则上述所有方案中输入电源损耗减少的百分比还要下降。

> 使用交流系统与直流系统的效率计算器

这是本白皮书中嵌入的一部交互式计算器

需要安装 Flash Player 版本 7 或更高版本—单击此处确定您已安装的版本。

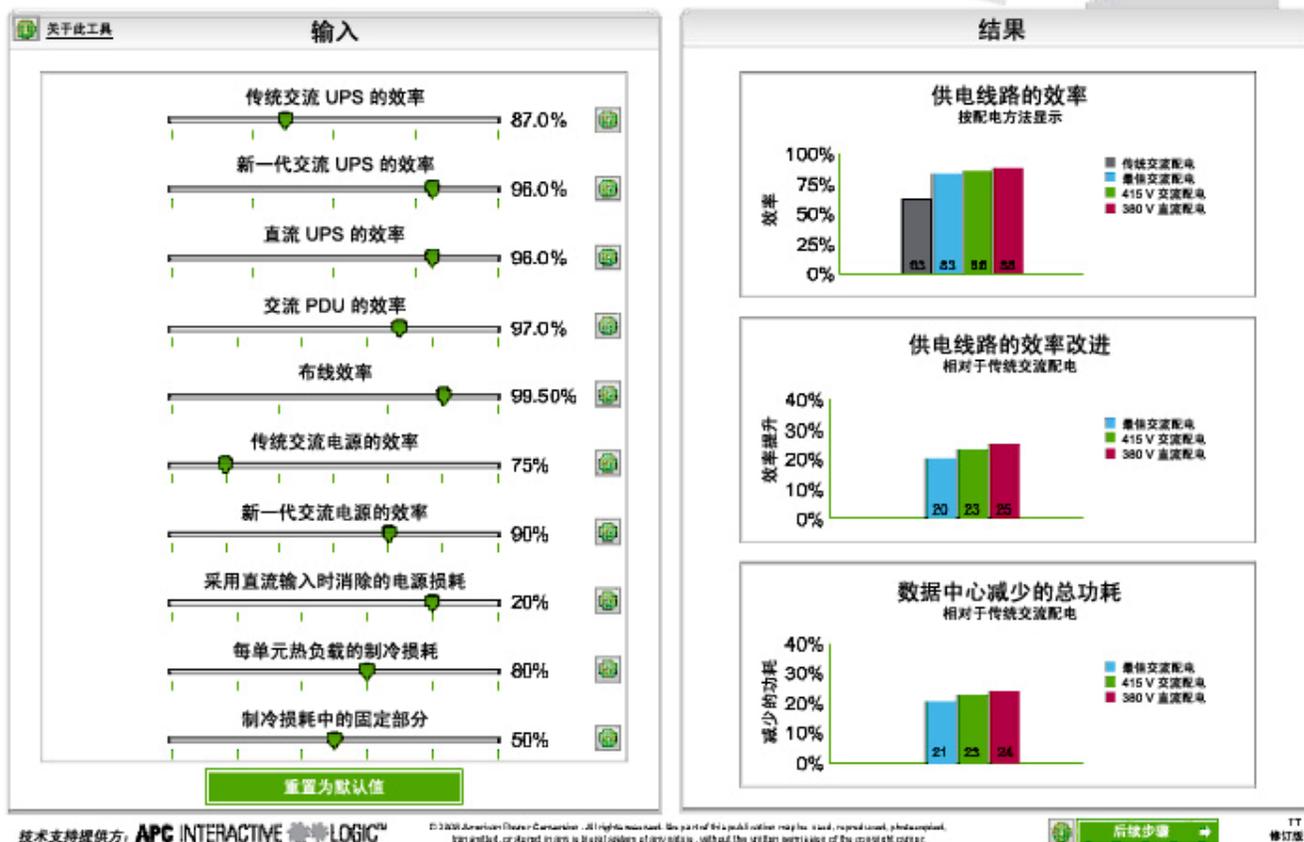
若要下载 Flash Player，请单击此处。

单击图 9 中的图像可访问数据中心交流系统与直流系统计算器。

图9 交流与直流系统计算器工具用于比较不同的配电架构

数据中心交流系统与直流系统计算器

不同交流与直流配电架构对数据中心效率的影响



针对北美地区的特殊注意事项

资源
APC 白皮书 128

Increasing Data Center Efficiency by Using Improved High Density Power Distribution

一般而言，北美地区的数据中心配电效率要低于世界上的其他地区，因为该地区一直在使用基于变压器的配电单元 (PDU)。在北美地区，UPS 电源通常使用三相 480/277 V 交流电，此电压将由 PDU 变压器降至三相 208/120 V 交流电，再传输给各项 IT 负载。与此相比，北美之外的大多数地区都使用三相 400/230 V UPS 电源，此电源可直接为负载供电，而不需要任何降压变压器。在大多数设计中，降压变压器都会造成很大一部分损耗，尤其是因为降压变压器的总额定功率通常比 UPS 的额定功率大得多，这意味着这些变压器未得到充分利用。另外，在高密度的数据中心里，这些变压器还会占据很大一部分地板空间，同时极大地增加了地板所承受的重量。有关此问题以及如何在北美地区采用 400/230 V 配电系统的详细讨论，请参见 APC 第 128 号白皮书使用改进型高密度配电系统提高数据中心的效率。

在北美地区的某些配置中，可能需要安装自耦变压器，以便将现有的 480/277 V 电源调整为 400/230 V 标准。使用自耦变压器意味着，变压器的额定功率 (kVA) 仅为系统额定功率的 17%，从而可使变压器以高效运行。对于北美地区需要使用自耦变压器的系统，配电系统的效率将因为自耦变压器的损耗而有所降低。在北美地区，某些交流配电系统的效率将因此降低大约 1%。但是，OEM 制造商建议扩大电源的输入范围，以使其包括北美 480/277 V 系统中已有的 277 V 交流输入值。如果这一设想能够实现，不仅没有必要使用自耦变压器，而且正如图 8 中的电源效率曲线所示，这还会显著提高电源的效率（红色曲线与黄色曲线之间的距离），进而导致交流配电系统的整体效率与 380 V 直流系统大体相同或略高于后者。

IT 负载变化对效率的影响

本白皮书中进行的供电线路效率比较一直是按 IT 负载为 50% 计算的。配电系统的效率会随 IT 负载的变化而变化，进而导致数据中心的整体效率发生改变。效率和 IT 负载之间的关系可通过模型来准确表示，详见 APC 第 113 号白皮书数据中心的电力效率模型。

本白皮书中的效率比较包括比较 IT 设备中 PSU（供电单元）的效率。当实际数据中心内的总 IT 负载发生变化时，主要是因为 IT 设备的数量发生了变化，而不只是现有 IT 设备的负载发生了变化。因此，数据中心内总 IT 负载的变化将反映在 UPS 和布线系统的负载上，而一般与各个 PSU 的运行负载无关。虽然 UPS 中的电流需要流经布线和 IT 电源才能到达 IT 负载，但这并不意味着，所有这些设备都以额定容量的相同百分比运行（即以相同的运行负载工作）。总电流通常会流入很多乃至数以千计的 IT 设备。

请考虑一个以 5% 的容量运行的数据中心。您可以合理地认为，其 UPS 的运行负载为 5%（即数据中心容量的 5%），但是从这一数字并无法获知任何有关各个下游 IT PSU 的运行负载信息。UPS 上 5% 的负载可能源自以下方面：

- 只有为数不多的几台 IT 设备以其额定输入功率的 100% 运行；或者
- 20 倍于现有数目的 IT 设备以其额定输入功率的 5% 运行；或者
- 100 倍于现有数目的 IT 设备以其额定输入功率的 1% 运行。

UPS 上 5% 的运行负载显然与受其供电的所有 IT 设备的总运行负载有关，但 IT 设备的各个工作负载彼此并不关联，且与 UPS 上 5% 的运行负载的关联程度也不一样。

这意味着，在数据中心供电线路的三个部分中，由于布线对效率的影响甚微（不论负载如何），因此随着 IT 负载（无论使用交流电还是直流电）的变化，UPS 效率的变化将对数据中心的整体效率产生最大的影响。

从上述分析可以得知，IT 负载变化对效率的影响非常小，没有理由认为交流系统或直流系统在不同的 IT 运行负载下比对方有任何优势。

因此，IT 负载变化的影响对本白皮书的分析和结论都不重要。

结论的可信度

用于建立直流与交流配电系统效率模型的数据计算是无可争辩的。另一点毋庸置疑的是，没有哪一台配电设备的效率大于 100%。这就直接限制了假想的直流架构的效率优势，媒体中公布的数据普遍都偏高了。

正如本白皮书所述，只有三个关键值可对效率分析产生重大影响，它们是：

1. 交流 UPS 系统的效率
2. 直流 UPS 系统的效率
3. 通过将 IT 电源 (PSU) 转换为直流供电而可能提高效率

这三个值的不确定性将影响效率比较的结论。因此，我们需要考虑，随着研究的进一步深入或新技术的问世，这些值是否可能会发生显著变化。

交流 UPS 的效率

关于交流 UPS 的效率，本白皮书中使用的数值基于目前市场上的实际产品，其效率性能已经过第三方认证。在 APC，我们可以知道在即将面市的其他产品中，哪些可能实现类似或稍高的性能。现在市场上无疑还有很多旧式的交流 UPS 产品，与其他产品相比，它们的效率要低得多。因此，要建造高效的数据中心，就应当确保采用高效的 UPS。目前，我们预计一流的交流 UPS 的效率在接下来的几年中不会有大幅提升。

直流 UPS 的效率

关于直流 UPS 的效率，本白皮书中使用的数值均源自一家制造商公布的数据，事实上并没有一种已知的直流 UPS 可使数据中心的配电系统获得更高的效率。尽管如此，探讨是否存在具有更高效率的直流 UPS 系统，仍具有重要意义。直流 UPS 必须将交流电转换为直流电，它必须能提供稳定的输出，并向市电提供经功率系统校正的输入。在这些限制下，可以认为设计出效率高于 96% 的直流 UPS 系统是可能的，但这些想法无一得到证实。目前，实际中最类似于直流 UPS 的商用设备的例子是光电设备交互式逆变器，这种逆变器的效率已经过优化，从技术角度而言，它们是使用逆电流运行的直流 UPS。通过分析美国加州能源委员会公布的一份数据发现，这些逆变器在负载为 50% 时的效率处于 94% 到 96%（最高效率）之间。本模型中假定直流 UPS 的效率为 96%，上述数据无疑为这一假设的有效性提供了重要佐证。

不过，APC 的研究发现，最终使直流 UPS 系统的效率略高于 96% 是可能的。因此我们认为，经过优化的直流 UPS 可以提供与商用交流 APC 同样的高效率。如果实现这一设想，那么最佳的直流与交流配电系统将具有基本相同的效率，唯一的区别在于 IT 电源因转换为直流供电而可能会使效率有些许提高。

通过将 IT 电源转换为直流供电而可能提高效率

普遍认为，通过将 IT 电源 (PSU) 转换为 380 V 直流输入可以提高效率。正如本白皮书所述，新型交流电源的效率数值在较大的负载范围内均可达到 90% 以上。实际上，某些将在 2008 年面市的型号已达到了 94% 的效率峰值。这意味着，即使直流电源的效率为 100%，直流电源的最大理论效率优势也只有 6% ($100\% - 94\% = 6\%$)。

本白皮书在分析时采用的效率提升数值为 1.5%，这是基于 Sun Microsystems 的结论而确定的。实际上，这些效率提升数值的获取并没有回答以下问题：1.5% 的效率提升是否处于预期之内，或可能实现多大幅度的改进。关于电源在转换为直流供电后可使效率提升多大幅度，以下讨论为这一问题的确定提供了理论基础。

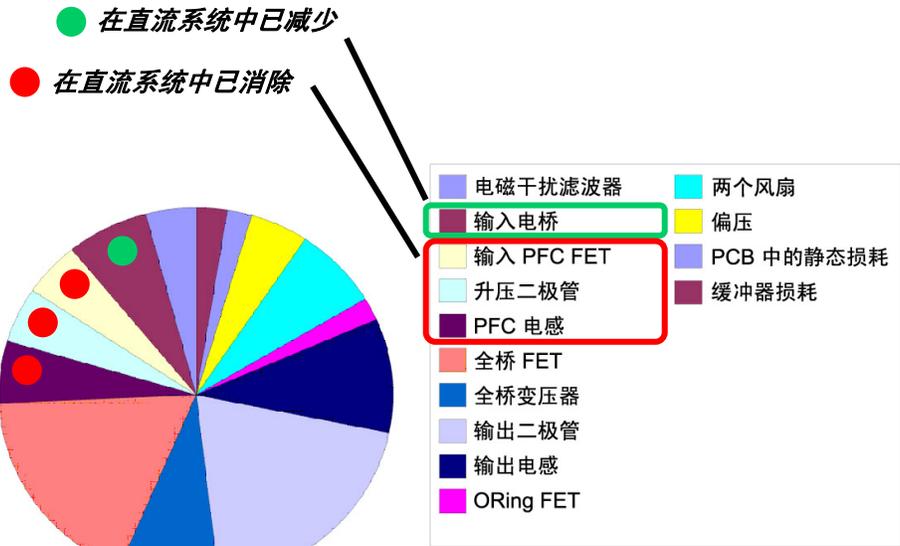
PSU 主要有两项功能：

- 在计算电路与输入电源之间提供安全隔离
- 将输入的交流电转换为稳定的 12 V 直流电

采用直流配电系统后，同样需要进行安全隔离，以及提供稳定的 12 V 直流电。但是，如果采用了直流配电系统，将可以省去 PSU 中负责将交流电转换为直流电的部分电路。最近，Sun Microsystems 公布了一份资料，其中对 PSU 在从交流输入转换为直流输入后可能实现的效率提升进行了量化分析。图 10 显示了有关服务器 PSU 中电力使用情况的明细。标记为“在直流系统中已消除”的项是指在 PSU 转换为直流输入后，可以确定消除的一些部件的损耗。标记为“在直流系统中已减少”的项是指在 PSU 转换为直流输入后，因需要反向馈电保护而无法完全消除，但最多可以减少一半的损耗。

Figure 10

服务器供电单元(PSU)中的损耗明细,说明在转换为直流输入后可以消除或减少的损耗¹²



资料来源: Sun Microsystems

从图 10 中可以看出,通过转换为直流输入,可以消除 PSU 中大约 20% 的损耗。若要确定这些减少的损耗可使电源效率提升多大幅度,可以采用下列计算方法:

$$\begin{aligned}
 \Delta\eta &= \eta' - \eta \\
 &= (1 - \text{损耗}') - \eta \\
 &= (1 - (1 - \eta) \times (1 - \text{PSLR})) - \eta \\
 &= (\eta + \text{PSLR} - \eta \times \text{PSLR}) - \eta \\
 &= \text{PSLR} \times (1 - \eta)
 \end{aligned}$$

其中, η 是交流电源的效率, η' 是改为直流输入后的效率, PSLR 是因转换为直流输入而减少的电源损耗。鉴于最佳电源效率为 91.5%, 而转换为直流输入后减少的电源损耗为 20%, 因此效率的提升幅度为 1.58%。

需要说明的是,效率提升主要受电源启动效率的影响;因此,对于效率较低的电源,其在转换为直流输入后的效率提升幅度可能更大。但是,对于未来高效的数据中心,我们必须承认其中会不可避免地采用高效电源,因此相应的效率提升幅度也就只有 1.5% 左右。

新一代 IT 设备的 PSU 效率都在 90% 以上,因此通过计算可以看出,将 IT 设备的电源转换为直流输入后的效率提升幅度预计在 1.6% 左右。此发现与 Sun Microsystems 在近期一次演讲中的结论是一致的,该结论指出,“直流/直流电源的效率通常比交流/直流电源高 1-3%”。¹³此外,这一发现与 LBNL 在直流供电数据中心演示项目中的结论也是一致的,该结论表明,采用直流系统后的效率提升幅度大约为 2%。¹⁴

可信度总结

本白皮书在比较交流与直流配电系统时所用数值的可信度极高。预计直流与交流 UPS 的效率数值与所用效率数值之差不足 1%。布线损耗非常少,可以忽略不计。无论采用交流系统还是直流系统,电源效率预计均可提高 4% 或更多。对于效率为 90% 的电源,从交流输入转换为直流输入后的效率提升幅度被限制在 1.6% 左右;对于效率为 94% 的电源,该效率提升幅度则限制在 1% 左右。

从上述分析中可以看出,直流系统的效率可比交流系统高一个百分点。如果实现这一点,那么与本此研究的基准案例相比,直流配电系统的效率优势将上升至大约 1.5%,数据中心整体功耗的

相应降幅将达到 1.1%。但是，数据中心也可以选择 277 V 交流电源标准，这将使北美地区交流配置的效率提高 1% 左右。如果实现这一点，将使交流配电方法与直流配电方法的效率持平。

其他出版物中的数值为何有误？

本次研究的结论与许多已发表文章中的看法存在重大差异。¹⁵ 大部分已发表文章中采用的效率提升数值，均可归结为美国劳伦斯伯克莱国家实验室在公布的一份报告中的论述。该报告得出如下结论：

“在此情况下，普通数据中心的效率可提高 28% 以上。如前所述，这意味着，与目前数据中心通常采用的交流配电系统相比，直流配电系统可以节省 28% 的电能。由于数据中心的 HVAC 负载通常与 IT 负载大体相同，因此这意味着，如果配电和转换效率提高 28%，设施的整体效率也将提高 28%。”

上述被广泛引用的论述的问题在于，它会使读者误认为，在新设施中采用直流配电系统要优于交流系统，因为与后者相比，前者可使设施的整体效率提高 28%。这一数字比本报告中所述的效率提升数值大 30 倍，这显然是错误的。正如 LBNL 报告的表 ES3 所示，28% 这一数字是基于以下假设得出的：与交流配置相比，直流配置中 IT 设备电源的效率比交流配置高 19%。但对于新型电源，情况显然不是这样。这份详细的 LBNL 报告本身并未提到效率提升幅度超过 2% 的新型电源。28% 这一数字还假定交流 UPS 的效率为 85%，这比目前商用交流 UPS 系统的效率低 11.2%。此外，该论述并未考虑制冷设备的固定损耗，从而夸大了设施整体效率的提升幅度。

将上述不恰当的假设综合起来后，完全可以得出 LBNL 报告中 28% 的数字；而本白皮书发现，直流系统只能使数据中心的总功耗节省 0.94%。如果按 UPS 效率和电源效率的适当数值调整 LBNL 报告中的计算过程，其结论将与本白皮书的结论一致。

>存在冲突的结果：请仔细观察

如果其他结论与本白皮书中的分析存在重大差异，则应检查其是否使用了有缺陷的假设、是否忽略了综合效应，或是否夸大了绝对标准

需要寻找的误区：

- 直流 UPS 的效率高于 96%；
- 交流 UPS 的效率低于 96%；
- 交流供电与直流供电的电源效率差异大于 2%；
- 与无变压器的 400/230 V 交流配电系统之外的交流配电系统进行比较；
- 效率数据未经过第三方认证；声称数据中心节省的整体功耗（以百分比表示）
- 超过了供电线路节省的功耗（由于存在某些固定损耗，因此整体功耗节省的百分比将始终小于供电线路功耗节省的百分比）；
- 交流与直流系统之间的布线损耗存在重大差异（这两种系统的布线损耗基本相同）；
- 未能综合多种交流和直流方案下每个供电线路部分的常见效率数值；
- 研究将直流配电系统与其他改进效率或减少 IT 负载的方法混为一谈；
- 对于超大型配置，以绝对数量表示节省的电能（美元、瓦特或服务器数量）；

这些不准确的假设和分析干扰项将错误地扭曲结论，并夸大直流配电系统的优势。

结论

目前，数据中心的配电系统存在重大损耗，数据中心的操作员都希望能在新建的数据中心里减少这些损耗，并尽可能在现有数据中心里降低它们。

对于目前建造的数据中心而言，除采用交流配电系统外别无选择，因为假想配电方式的安全规定、配电设备以及采用 380 V 直流输入的 IT 产品尚未问世。大多数客户可以且应当在新的交流系统设计中采用高效的产品，目前的解决方案已经能够达到非常高的配电效率。

在未来规划中，客户和供应商应当考虑直流系统是否会真的成为交流系统的替代方案。由于新一代设计良好的高效交流配电系统已经能够实现非常高的效率，因此可供直流配电系统显著提升效率的空间已然不大。本次分析采用了目前的最优数据，结论认为，假想的 380 V 直流架构只能使数据中心的功耗降低 0.94%（请参见表 2）。

如果将目标设定为使配电系统的效率提高大约 1%，则在北美地区迅速实现这一目标的途径是，将配电标准转换为 277 V 交流电，而非 380 V 直流电。以 277 V 交流电运行的配电系统具有下列优点：可与 380 V 直流电运行的配电系统提供相同的效率；采用现有的设备和标准；可轻松实施于混合环境；几乎可以立即实施。

任何有利于效率提升的措施都值得尝试。但是，若要花 10 年时间对 IT、工程、配置和电力行业进行大幅改造，才能得到不足 1% 的效率提升，这似乎并不值得。此外，通过致力于改进数据中心的制冷系统，非常有可能实现近 20 倍于上一数字的效率提升（大约可使总功耗降低 20%），从而使上述做法变得更加没有意义。实际上，只要对制冷系统设计或运行设置进行轻微调整，即可为数据中心节省大量的功耗，这远远超过了将数据中心由交流系统转换为直流系统后可能带来的效率提升。

几乎已发布的所有文章都鼓吹直流系统的优势，这是因为它们都依赖于上述 LBNL 报告中的论述，然而遗憾的是，该论述具有误导作用。本白皮书对这一误解进行了说明和更正。

事实上，目前有很多正在运营、甚至是在建的数据中心并未对整体配电效率进行优化，导致其总耗电量中有 10% 被浪费掉了。为此，人们提议采用直流配电系统来减少这部分浪费，但该系统需要很多年才能实施完毕。幸运的是，目前市场上的新型交流配电方法可与上述提议实现几乎相同的效率提升，并可以立即实施。通过对数据进行系统分析，我们发现，大家找到了问题的根源，但直流配电系统并不是它的解决方案。



关于作者

Neil Rasmussen 是 APC-MGE 的首席技术官。就全球而言，APC 在关键网络供电、制冷和机架基础设施方面的研发预算投入位居首位，Neil 则负责为其制定技术发展方向。目前，Neil 正带领 APC 开发可扩展的高效模块化数据中心基础设施解决方案，他同时还是 APC InfraStruXure 系统的主要设计者。

Neil 于 1981 年创建 APC，之前他在麻省理工学院获得了电子工程学士和硕士学位，其毕业论文是有关 Tokamak Fusion 核反应堆的 200 兆瓦电源的分析。1979 年至 1981 年，他在麻省理工学院林肯实验室工作，从事飞轮储能系统和太阳能电力系统的研究。

James Spitaels 是 APC-MGE 的咨询工程师。他拥有伍斯特理工学院的电子工程学士和硕士学位。James 在 APC 已渡过 16 个春秋，在这段职业生涯中，他曾参与开发 UPS、通信产品、架构和协议、设备机柜以及配电产品，并管理着多个产品开发团队。此外，James 还拥有四项与 UPS 和电源系统有关的美国专利。



 浏览所有 APC 白皮书
whitepapers.apc.com

 浏览所有 APC TradeOff 工具
tools.apc.com

 **AC vs. DC Power Distribution for Data Centers**
APC 白皮书 63

 **Electrical Efficiency Modeling for Data Centers**
APC 白皮书 113

 **Increasing Data Center Efficiency by Using Improved High Density Power Distribution**
APC 白皮书 128

 **Data Center AC vs. DC Calculator**
APC TradeOff Tool 3

与我们联系

关于该白皮书内容的反馈和评论

Data Center Science Center, APC by Schneider Electric
DCSC@Schneider-Electric.com

如果您是我们的顾客并对数据中心项目有任何问题的话

请与您的施耐德电气旗下的 APC 销售代表联系

- 1 Symmetra MW - TÜV 测试报告编号 21113774_010, 2005 年 9 月 26 日。Symmetra PX - TÜV 测试报告 IS-EGN-MUC/ed, 2007 年 6 月 12 日。Smart-UPS VT - TÜV 测试报告编号 21113774_008, 2005 年 11 月 11 日。
- 2 美国加州能源委员会报告中的 SatCon 数据。
http://www.consumerenergycenter.org/erprebate/inverter_tests/summaries/Satcon-AE-75-60-PV-A.pdf
- 3 美国劳伦斯伯克莱国家实验室报告：“High Performance Buildings:Data Center – Uninterruptible Power Supplies (UPS)”（高性能建筑：数据中心 - 不间断电源 (UPS)），2005 年 12 月，图 17。
http://hightech.lbl.gov/documents/UPS/Final_UPS_Report.pdf
- 4 A. Pratt 和 P. Kumar 合著的“Evaluation of Direct Current Distribution in Data Centers to Improve Energy Efficiency”（评估数据中心的直流配电系统以提高能源效率），The Data Center Journal, 2007 年 3 月。
- 5 由 Stefan Lidstrom 在 Netpower Labs 直流数据中心股东大会上所做的演示，组织者为美国劳伦斯伯克莱国家实验室，2007 年 7 月 12 日，请参见复合 PDF 的第 31 页（共 67 页）第 8 张幻灯片。
<http://hightech.lbl.gov/presentations/dc-powering/dc-stakeholders/1-Voltage.pdf>
- 6 美国劳伦斯伯克莱国家实验室：摘要“DC Power for Improved Data Center Efficiency”（直流电源可提高数据中心的效率）第 5 页，2007 年 1 月，表 ES1。
http://hightech.lbl.gov/documents/DATA_CENTERS/DCDemoExecutiveSummary.pdf
- 7 美国劳伦斯伯克莱国家实验室：“High Performance Buildings:Data Centers – Server Power Supplies”（高性能建筑：数据中心 - 服务器电源），2005 年 12 月。
http://hightech.lbl.gov/documents/PS/Final_PS_Report.pdf
- 8 由 Mike Bushue 在 Sun Microsystems 直流数据中心股东大会上所做的演示，组织者为美国劳伦斯伯克莱国家实验室，2007 年 7 月 12 日。
<http://hightech.lbl.gov/presentations/dc-powering/dc-stakeholders/1-Voltage.pdf>
- 9 由 Paul Perez 代表 Hewlett-Packard 在正常运行时间学术研讨会上所做的演示，2007 年 3 月 5 日。
http://www.uptimeinstitute.org/jsymp/index.php?option=com_content&task=view&id=45&Itemid=61
- 10 2007 年 Intel 研发成果发布会演示，“Data Center Energy Efficiency Research @ Intel Day”（Intel 研发成果发布会 - 数据中心能源效率研究），作者 Guy AlLee、Milan Milenkovic 和 James Song, 2007 年 6 月。
http://download.intel.com/pressroom/kits/research/poster_Data_Center_Energy_Efficiency.pdf
- 11 Intel 白皮书“Air-Cooled High-Performance Data Centers:Case Studies and Best Methods”（风冷高性能数据中心：案例研究与最佳方法），作者 Doug Garday 和 Daniel Costello, 2006 年 11 月。
<http://www.intel.com/it/pdf/air-cooled-data-centers.pdf>
- 12 由 Mike Bushue 在 Sun Microsystems 直流数据中心股东大会上所做的演示，主持方为美国劳伦斯伯克莱国家实验室，2007 年 7 月 12 日，请参见复合 PDF 的第 19 页（共 67 页）第 9 张幻灯片。
<http://hightech.lbl.gov/presentations/dc-powering/dc-stakeholders/1-Voltage.pdf>
- 13 由 Mike Bushue 在 Sun Microsystems 直流数据中心股东大会上所做的演示，主持方为美国劳伦斯伯克莱国家实验室，2007 年 7 月 12 日，请参见复合 PDF 的第 19 页（共 67 页）第 9 张幻灯片。
<http://hightech.lbl.gov/presentations/dc-powering/dc-stakeholders/1-Voltage.pdf>

14 美国劳伦斯伯克莱国家实验室：摘要“DC Power for Improved Data Center Efficiency”（直流电源可提高数据中心的效率）第 6 页，2007 年 1 月。

http://hightech.lbl.gov/documents/DATA_CENTER/DCDemoExecutiveSummary.pdf

15 美国劳伦斯伯克莱国家实验室：摘要“DC Power for Improved Data Center Efficiency”（直流电源可提高数据中心的效率）第 6 页，2007 年 1 月。

http://hightech.lbl.gov/documents/DATA_CENTER/DCDemoExecutiveSummary.pdf