

适用于高效率、高密度 数据中心的改进型架构

作者：Neil Rasmussen

第 126 号白皮书

APC[®]
by Schneider Electric

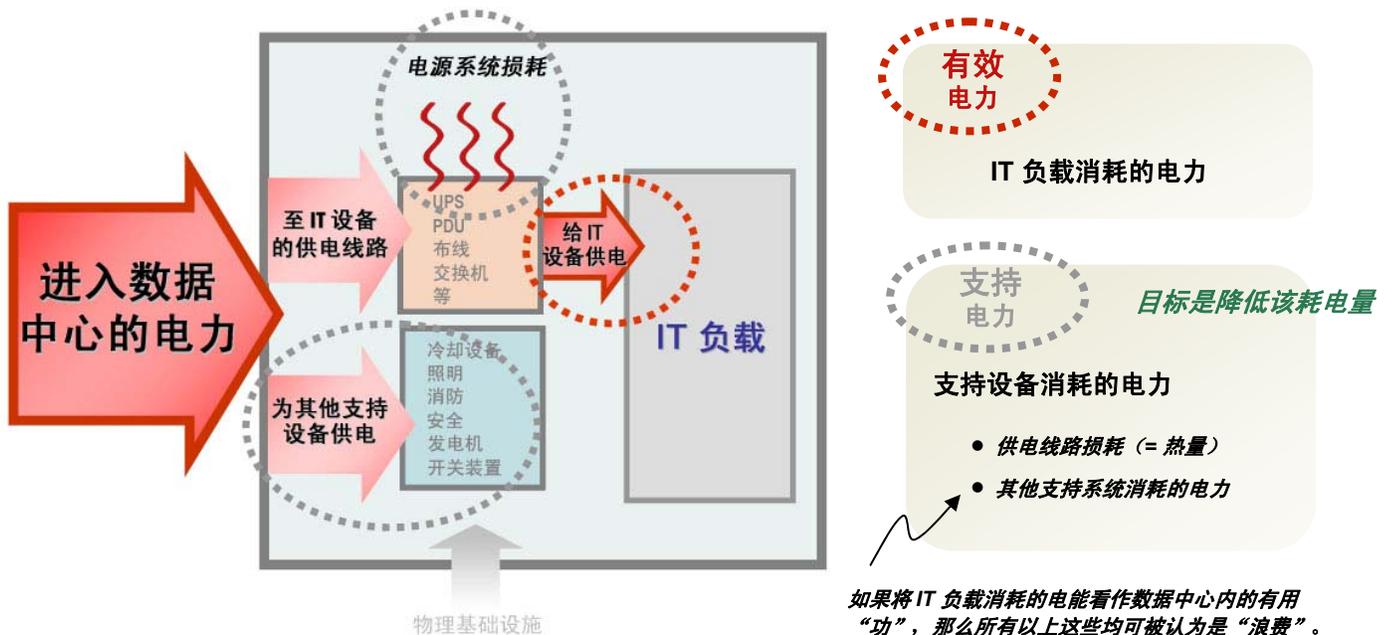
摘要

全球各地数据中心的电源和冷却基础设施每年浪费的电力超过 6000 万兆瓦时，这部分电力在 IT 设备供电过程中未发挥任何作用。这对于整个行业来说是巨大的经济负担，同时也会造成严重的公共环境问题。本白皮书介绍一种可立即实现的新型商用数据中心架构，以期大幅提高数据中心的电力效率。

简介

在典型的数据中心里，只有不到一半的电力真正用于计算机负载。一半以上的电费均用于购买电源系统、冷却系统和照明所消耗的电力。全部耗电量可分为两大部分：(1) IT 负载消耗的电力；(2) 支持设备消耗的电力（图 1）。本白皮书论述的重点是支持设备消耗的电力，其中包括供电线路设备的损耗以及非供电线路支持设备消耗的全部电力。

图1- 数据中心功耗



计算机设备供应商提供了一些可减少 IT 负载功耗的新型解决方案，如可能减少执行特定功能所需的 IT 设备总量的虚拟化技术。但是与此同时，IT 系统在未来会以更高的单位功率消耗密度运行，其电力需求也会随时间不断变化。这使得数据中心的电源及冷却系统的电力效率不断**降低**（参见右框）。

已有相关文献提出各种建议，希望通过提高电源及冷却系统的性能来减少数据中心的电力浪费。例如，直接在 IT 设备和直流配电系统上连接水管，借以增强系统效率，但这些提议现在都不可行。本白皮书介绍一种切实可行的改进型数据中心架构，在典型的安装环境中，该架构可减少 50% 以上的电源及冷却系统能耗。

为什么高密度和变化的 IT 负载会降低数据中心的效率？

如有“智能型”列式电源和制冷系统辅助的话，高密度和动态负载实际上有可能提高效率。但是，如果没有合理的重新设计相应的电源和制冷系统（事实上，这种情况很常见），则可造成以下典型后果：

- 为了解决数据中心内的热点问题，不得不提高室内制冷系统的制冷能力，从而造成制冷能力浪费
- 运行负载降低，电源容量和制冷能力过剩，导致整体效率降低（因为低负载意味着低电源和制冷系统的运行效率）

本白皮书的后面章节将讲解因电源容量和制冷能力过剩或定向不当而造成的效率损失。

本文所介绍的新型架构并不仅仅是设备的物理配置或者只改进个别设备的效率，而是对整体系统的改造，其中综合了数据中心设计的各种最佳要素：

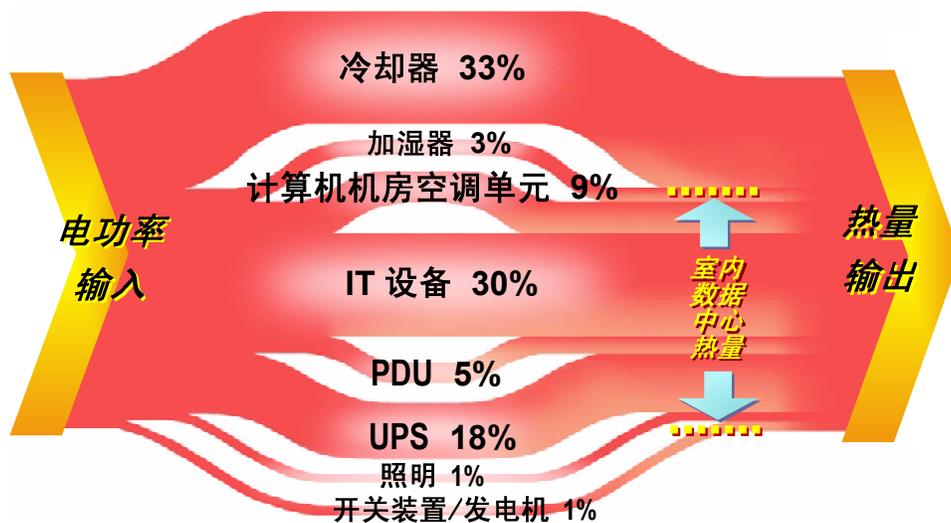
- 单个设备的工程设计
- 配电系统
- 各部件间的通信与协调
- 制冷策略
- 系统规划
- 管理工具

如果将所有这些要素组合成一个集成系统，那么性能的提升将极其可观。

电力都用在了哪些地方？

图 2 显示电流程经一个典型的 2N 数据中心的过程。电力以电能形式进入数据中心，但几乎所有电力（99.99% 以上）均以热量形式从数据中心散发出去（其余电力则经 IT 设备转化为计算能力）。

图 2 – 一个典型 2N 数据中心的电能利用情况



请注意，在本示例中，数据中心消耗的电力实际上只有约 30% 用来为 IT 负载供电（图 1 中称之为**有效电力**），其余电力均被电源、制冷及照明设备所消耗（转化为热量），（还有很小一部分电力被消防和物理安全系统所消耗，本明细表中未列出）。可以说这个数据中心的效率为 30%，因为只有 30% 的总输入电力用于 IT 负载。因此，70% 的输入电力未对该数据中心做任何“有用功”（即用于 IT 负载），数据中心效率低下（用效率模型的术语来说就是“浪费”）。要明白如何能够显著减少这种低效率状况（请牢记一点，在本模型中，所有非供电线路支持设备均视作是低效率），我们需要了解造成低效率的五大关键因素：

- 1 电源设备的效率低
- 2 制冷设备的效率低
- 3 照明系统的电力消耗
- 4 电源和冷却系统过度规划
- 5 配置因素造成的低效率

造成电力效率低下的五大主因

这些均会构成图 1 的辅助电力

虽然大多数用户都知道电源、冷却和照明设备效率低是一种浪费，**但事实上，上面所列的其他各项才是造成低效率的主要因素**，大多数用户还不是很清楚这一点。APC 第 113 号白皮书[数据中心的电力效率模型](#)中对上述五大主因进行了深入分析，这里只简述其功耗特性：

1 电源设备的效率低

UPS、变压器、转换开关和配线等设备在工作时会消耗部分电力（表现为热量）。虽然此类设备标称的效率评级很高（90% 或更高），但这些效率值却有误导性，其实不能将其用于计算设备在真实安装环境中损耗的电力。当出于冗余目的成倍配置设备或设备在远远低于其额定功率的情况下运行时，效率会明显降低。而且，**电源设备中这部分“浪费”能源产生的热量还必须使用冷却系统制冷**，从而致使空调系统使用更多的电力。

2 冷却设备的效率低

空气处理器、冷却器、冷却塔、冷凝器、水泵和风干冷却器等设备在执行冷却功能时会消耗部分电力（即，输入功率中会有部分以热量形式散发出去，而不是完全用于冷却的机械功）。事实上，冷却设备的效率低下（废热）通常远远高于电源设备的效率低下（废热）。当出于冗余目的成倍配置设备或设备在远远低于其额定功率运行时，效率会明显降低。因此，**提高冷却设备的效率可直接增进整个系统的效率**。

3 照明系统的电力损耗

照明会消耗电力并产生热量，这些热量又必须经制冷系统冷却，并相应地增加空调系统消耗的电力，即使此时室外温度很低。如果数据中心内没有工作人员时或在数据中心的未用区域仍开启照明设备，便会产生无用的功耗。因此，**提高照明系统的效率或控制照明系统仅在需要的时间及地点开启**，可极大地增进整个系统的效率。

4 过度规划

过度规划是造成电力浪费的最大动因之一，但却最难以为用户所认知和评估。当电源和冷却系统的设计值高于 IT 负载时，便会导致电源和冷却设备过度规划。下述因素的任意组合均可造成这种情况：

- 高估 IT 负载，并按照超大负载确定电源和冷却系统规模
- IT 负载分阶段部署，但却按照将来更大的负载确定电源和冷却系统规模
- 冷却系统设计不当，致使需采用过度规划的冷却设备才能顺利冷却 IT 负载

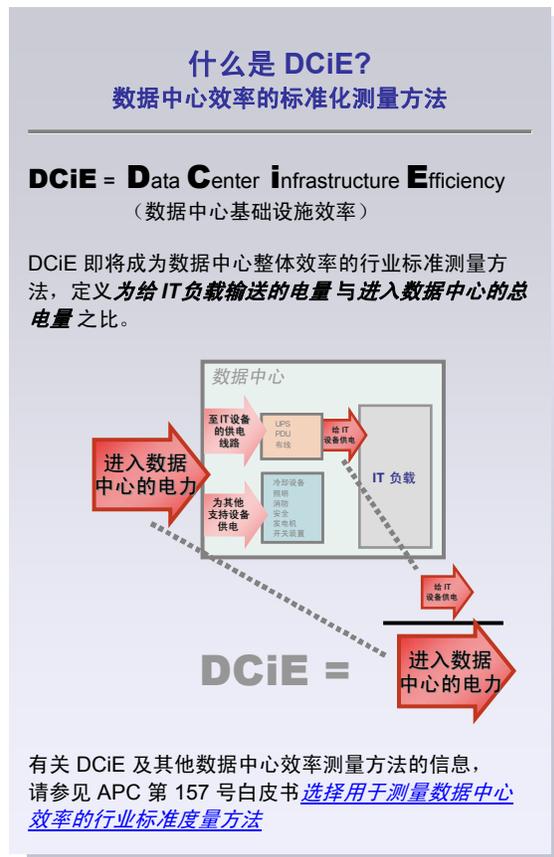
从投资角度来看，显然安装过多的电源和冷却设备是一种浪费。过度规划还能极大地降低整体系统的电力效率，并导致过多的持续电力损耗，这一点却并不容易发现。

电源和冷却设备过度规划导致数据中心电力效率降低的根本原因在于，负载减少时，许多电源和冷却设备的电力效率会大幅度下降。虽然某些电气设备（如电气线路）在低负载下效率更高，但大多数重要设备（如风扇、水泵、变压器和变频器）在低负载下的效率会下降（这是由“固定损耗”造成的，它在 IT 负载为零时依然存在）。制造商的数据表格通常只报告最佳负载（通常为高负载）下的效率，因此很难从该表格中发现这种效率下降。

有关如何量化系统过度规划对功耗造成影响的技术说明，请参见 APC 第 113 号白皮书 [数据中心的电力效率模型](#)。

5 配置因素造成的低效率

IT 设备的物理配置会对冷却系统的能耗产生极大影响。不当的配置不但会迫使冷却系统超过 IT 设备的实际需要增加空气流动，还会导致冷却系统产生温度低于 IT 设备实际需要的空气。此外，物理配置可能会导致多种冷却设备发生“冲突”（如某台设备正在减少空气湿度，而另一台却在增加空气湿度），形成会极大降低系统效率但又难以诊断的典型情况。目前新数据中心及现有数据中心内电力密度不断增加的趋势更加剧了这些低效率情况。当前，几乎所有正在运行的数据中心都存在这些配置问题，并由此产生无谓的能源浪费。因此，对物理配置进行系统优化的架构可大大减少能源损耗。



经过优化的数据中心架构

前面的章节介绍了导致数据中心效率低下的五大因素。回顾一下这些因素，就不难发现它们是相互关联的。因此，一个有效的优化方法必须以整体看待数据中心系统 — 尝试优化个别低效率设备的效果极其有限。如果您仔细分析这些电力损耗（低效率）因素，就会发现基于下述原则制定集成系统可大大提高数据中心的效率：

- 目前用不上的电源和冷却设备不应供电
- 尽量减少系统过度规划的情况，以便设备能够在其效率曲线的最佳范围内运行
- 电源、冷却和照明设备应采用最新技术，以最大限度地减少功耗
- 对于必须低于额定功率（以支持冗余）运行的子系统，应优化该部分负载运行时的效率，而非设备的满负载效率
- 应使用容量管理工具最大限度地减少数据中心内的“闲置容量”，在所有电源和冷却系统能够承受的情况下安装尽可能多的 IT 设备，以期使系统在其效率曲线的最高点¹附近运行
- 最佳的一体式物理配置应来源于数据中心系统，而不与其所安装的房间的特征相关。例如：行间冷却应与 IT 机柜一起考虑，而与机房冷却无关
- 系统应配备监控装置，以便在出现不良功耗时显示和预警，方便工作人员迅速解决问题
- 系统应包含安装和运行工具及规则，以最大限度地提高运行效率，并尽可能减少或消除导致不佳配置或安装的可能性

新架构的**设计原则**

这些**指导系统的实施**

¹有关闲置容量的更多信息，请参见 APC 第 150 号白皮书 [数据中心的电源和冷却能力管理](#)

图 3 显示了符合上述原则的商用集成式数据中心系统。

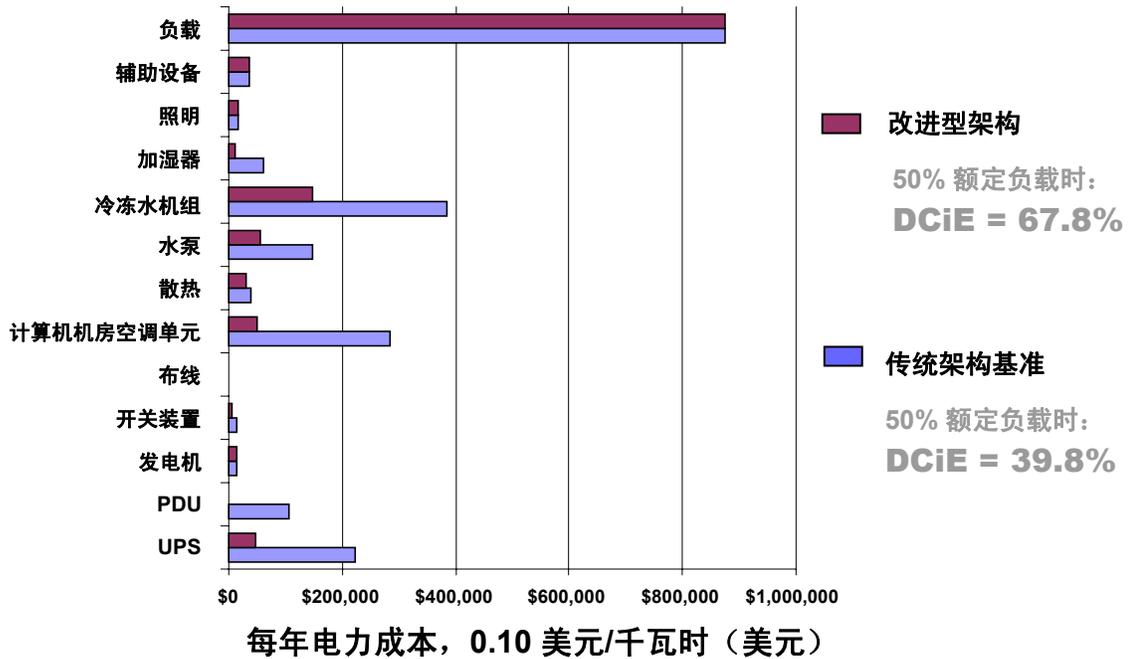
图 3 - 高效率集成式数据中心系统



配备本地显示监控装置，并通过网络与中央管理系统连接

图 3 中的数据中心的功耗较传统设计降低了 40%，图 4 对减少的损耗进行了详细分类。

图4- 改进型架构的成本分析（按数据中心子系统细分）



改进型系统效率的提高可大幅缩减电费。按照 IT 负载为 1MW、电费每度 0.10 美元计算，这种系统十年可节省约 900 万美元的电费。

上述改进基于采用以下配置的数据中心：

- 2MW 设计容量
- 1MW 实际 IT 负载
- 总体电源及冷却基础设施为 2MW，均已安装并开机运行
- 从线路入口到负载均采用双路电源
- 采用 N+1 空气处理机
- 具备冷却塔的冷却水系统
- 平均每机架 7kW 的功率密度
- 热通道/冷通道 IT 机架布局
- 所有设备的效率曲线均来自真实的供应商数据

功耗及费用节省受上述假设影响。例如，去掉双路电源冗余或 N+1 空气处理机可提高效率并略微增加费用。本白皮书的以下部分将详细介绍节省的费用和隐含假设。

如果用数据中心基础设施效率 (DCiE) 表述效率提升的话，上述传统数据中心设计在 50% 的额定 IT 负载下运行时，其 DCiE 效率值为 39.8%，而改进型架构在同等条件下的 DCiE 值为 67.8%。

与传统方法的比较

上述章节中介绍的电力损耗的降低（提高效率）是非常大的。本白皮书的之前部分已经介绍了造成传统设计低效率的五大因素。那么提议的改进型架构是如何实现效率的大幅提升呢？是什么新知识、新设计或新技术促成了这些提升？证明这些提升的数据是什么？为解答这些疑问，我们将进一步探讨共同促成新架构改进之处的关键因素，它们是：

- 可扩展的电源和冷却系统，以避免过度规划
- 基于机柜行的制冷，以提高冷却效率
- 高效率 UPS，以提高电源效率
- 415/240 V 交流配电系统，以提高电源效率
- 水泵和冷却器内的变速马达，以提高部分负载和凉爽天气条件下的效率
- 容量管理工具，以提高电源、冷却和机架空间的利用率
- 房间布局工具，以优化房间布局，提高冷却效率

新架构的构成要素

实施设计原则的技术

虽然这些因素中的部分可以单独实施，以提高效率，但理解下面一点非常重要：将这些因素集成到一个整体架构中才能实现重大改进。例如，虽然从根本上说，列式冷却技术较传统机房冷却技术的效率高出很多，但该技术也是经济高效地实现房间布局工具、容量管理工具及可扩展冷却系统的重要因素。

本白皮书中介绍的架构在任意地理位置的任意数据中心内均有效。改进数据中心效率的另一个策略是利用某些地区凉爽的室外温度，借助“更为经济的冷却模式”或“免费冷却”来提高冷却系统的效率。这些方法通常会增加数据中心的成本，但它们拥有投资回收期（取决于室外温度及湿度条件）。“免费冷却”技术是对本白皮书所介绍之方法的补充 — 利用凉爽的室外空气减少冷却所消耗的电功率，借以提高数据中心的效率。本白皮书在计算任何效率或电费节省过程中均未考虑免费冷却。

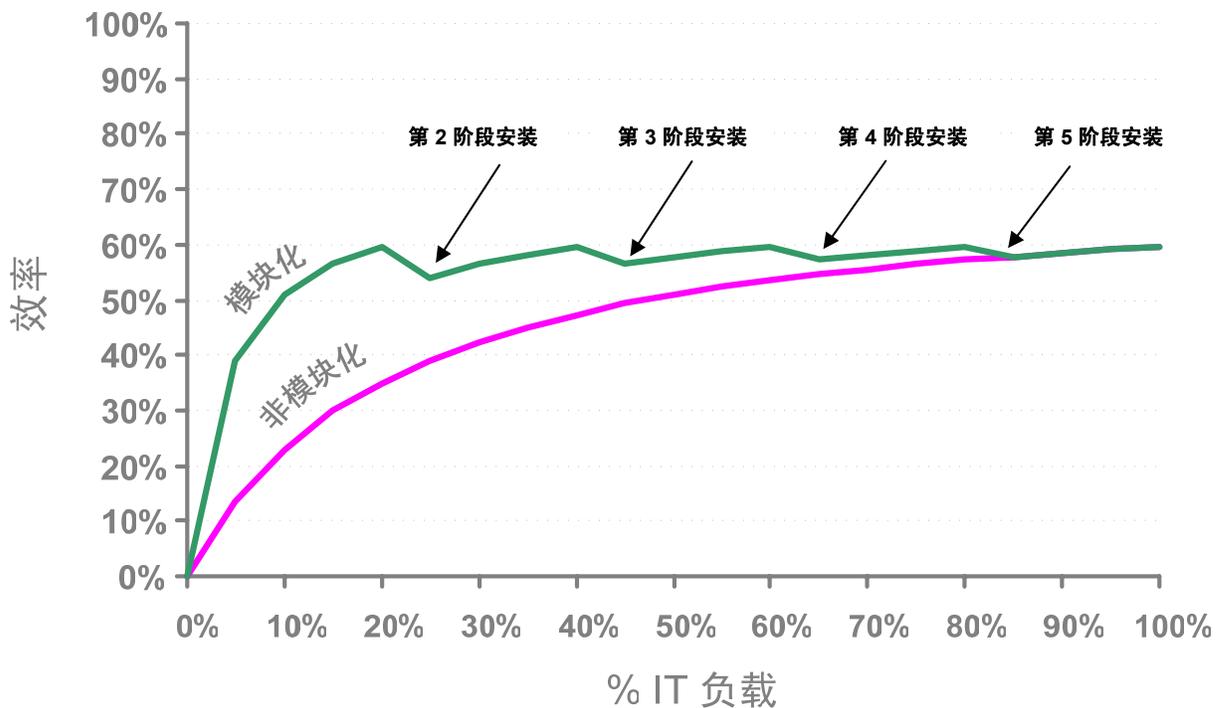
以下章节介绍上述各个因素提供的量化效率。

可扩展的电源和冷却系统

避免过度规划

所有数据中心的效率均随 IT 负载的变化而变化。IT 负载较低时，效率通常会降低，IT 负载为零时，效率亦为零。数据中心的该曲线形状与此描述非常类似。图 5 为一个示例。

图 5 – 数据中心效率随 IT 负载变化的曲线
模块化设计与非模块化设计的比较



% IT 负载远远低于数据中心的设计参数时，效率降低，可认为相对该 IT 负载而言，数据中心过度规划。许多数据中心均在这种情况下运行（有时甚至长年如此），造成该现象的常见原因是数据中心基于假想的未来 IT 负载而建，但该 IT 负载尚未达到。

APC 第 113 号白皮书 [数据中心的电力效率模型](#) 详述了数据中心效率在低负载时下降的原因。这种现象类似于汽车的燃油燃烧效率下降（大排量引擎在远远低于其额定功率下运行时出现的情况）。

要解决因过度规划导致的效率降低问题，电源和冷却设备需能够随时间扩展，以满足 IT 负载的要求。图 5 中上面的曲线显示了电源和冷却设备分五个阶段部署而非作为单个系统部署时的情况。在满负载时，可扩展的电源和冷却系统无任何效率优势，但负载较低时，效率迅速增加。负载为 20% 时，部署的电源和冷却系统中只有 1/5 以满负载运行。该原则（如图 5 所示）只能部分实现，这是因为某些冷却基础设施（如冷却液泵）无法分阶段部署。

我们发现许多数据中心均在非满额定 IT 负载下运行——特别是较小的数据中心或处于生命周期早期阶段的数据中心。在这些情况下，使用可扩展的电源和冷却解决方案可提高效率，并推迟资本和运营成本投入（需要时再投入）。此外，某些决策（如数据中心内日后空间的目标功率密度）也可推迟至日后 IT 部署时制订。

行间制冷

提高冷却效率

列式冷却是将制冷装置放置在 IT 设备列中，而非放置在房间的周边部分。缩短风流路径可减少冷热气流混合的机会，借以提高气流分配的可预测性。预测针对 IT 设备的气流分配可更精确地控制不断变化的气流速度，实现自动调节，以满足附近 IT 负载的需求。可变速风扇只以 IT 负载所需的速度旋转，不会像恒速风扇那样浪费能源。此外，列式冷却可捕获 IT 负载刚刚释放出热空气，减少其与周围空气混合的机会。上述作用加在一起可极大提高机房内空气处理设备的效率。列式冷却的基本布置如图 6 所示。

图 6 – 采用行间制冷的数据中心制冷单元 (CRAC) 的冷却系统，缩短了气流路径

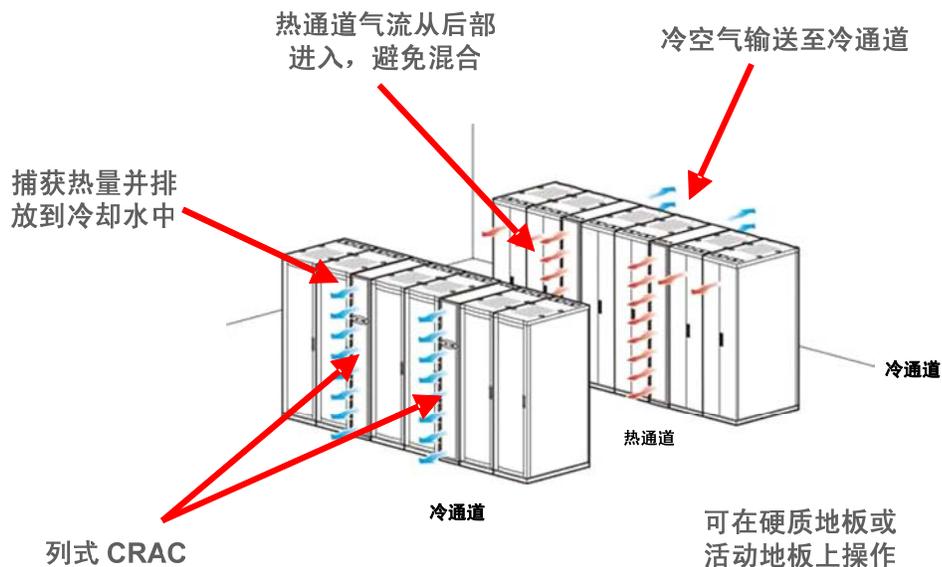
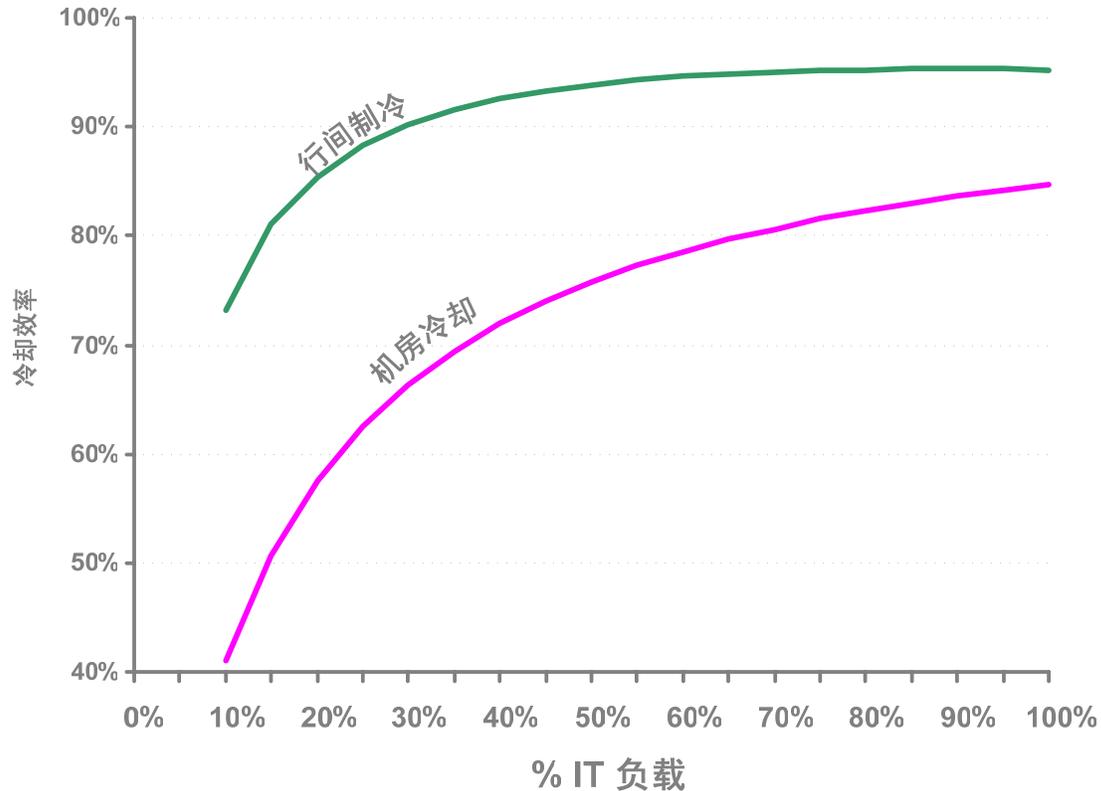


图 7 显示了相对于传统机房内的空调系统，列式冷却架构在效率方面的提升。

图7- 机房空调效率曲线
(行列冷却与传统机房冷却比较)



这两条曲线代表冷却效率，以空调输出（处理的热量）除以输入（处理的热量 + 耗电量）表示。这样我们可以使用标准的 0-100% 效率等级² 检查机房空调的性能。理想情况下，空调的效率可以达到 100%；上面的曲线显示典型的 CRAC 在 70% IT 负载下的效率为 80%，也就是说有 20% 的输入功率用于风扇和增湿。相比之下，列式 CRAC 在 70% IT 负载下的效率为 95%，也就是说只有 5% 的输入功率用于风扇和增湿。这是减少损耗的四个因素之一。

绘制上图时假定机房冷却解决方案采用冷却水设计、4 级设计、3 英尺活动地板，且每机架的平均功率为 10kW。该数据仅适用于 CRAH 设备，且不包括冷却器、水泵和冷却塔。可以对这些设备进行单独研究，也可以与 CRAH 组合研究，以期获得数据中心的整体冷却效率。请注意：冷却器和冷却塔也需要消耗电力，因此，整个冷却系统的效率会下降至较图中所示更低的值。

² 计算机机房空气处理机的效率通常以其他单位表示，如“性能系数”或“冷却的 IT 负载瓦特/电气瓦特”。但是，这些单位很难让我们将其与日常体验联系起来，且它不使用表达其他类型设备效率常用的 0-100% 形式。所有不同的方法均只是数字关系上的不同，它们传达的信息是相同的。

高效率 UPS

提高电源效率

现在，借助 UPS 系统大幅提高效率的技术已经出现。图 8 将最近推出的高效率 UPS 的效率与劳伦斯伯克莱国家实验室 (Lawrence Berkley National Labs)³ 发布的 UPS 效率数据进行了比较。

图 8 – UPS 效率与负载的关系曲线
(新一代 UPS 与发布的历史数据比较)

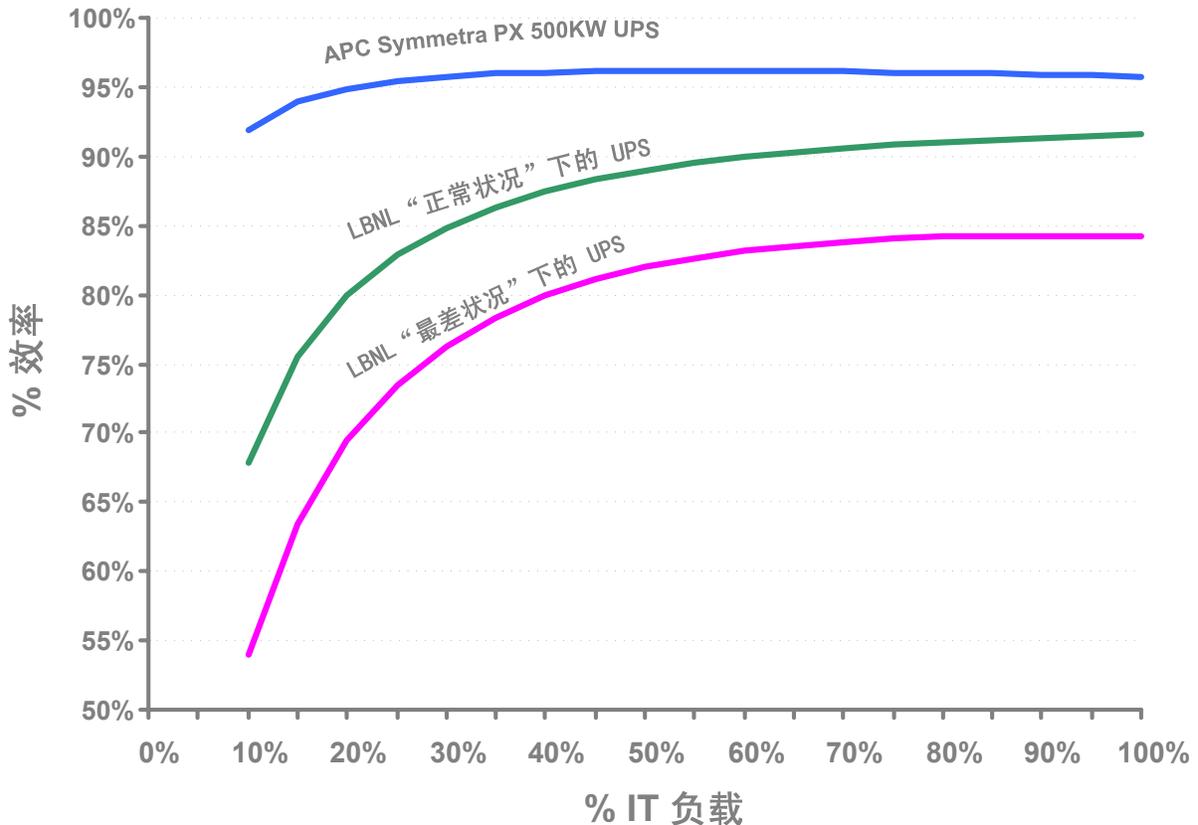


图 8 显示最新 UPS 系统的效率在任意 IT 负载下都要高出很多，且在负载较低时效率提升幅度最大。例如，负载为 30% 时，最新 UPS 系统的效率较当前已部署 UPS 系统的平均效率提高 10% 以上。在本示例中，可以看出该 UPS 的实际功耗减少了 65%。有一点必须注意，UPS 的功率损耗（热量）还必须经空调冷却，进一步产生功耗。

一些新型 UPS 系统提供“节能”运行模式，UPS 制造商据此声称其效率更高。但是，该模式并未完全脱离市电供电质量问题的影响，因此不推荐数据中心采用。本文所述和图 8 所示架构中采用的高效率 UPS 和效率数据均为双转换在线式 UPS，且在输入电力质量不正常时完全不受影响。

³ LBNL 关于 UPS 效率的报告，http://hightech.lbl.gov/documents/UPS/Final_UPS_Report.pdf 第 23 页，图 17。访问日期 2008 年 3 月 21。

415/240V 交流配电

► 提高电源效率

高效率交流配电采用 415/240V 的欧洲标准，而非当前的 208/120V 北美标准，有可能大幅提高北美地区的电力效率。向 IT 负载输送 415/240V 而非 208/120V 电力，可不必使用配电单元 (PDU) 变压器，从而避免了与其相关的损耗。除了效率提升以外，不使用变压器的 PDU 还具有缩减铜缆成本、降低地板载荷，及腾出更多空间安放 IT 设备等优点。数据中心采用基于变压器的 PDU 经常会遇到效率下降的问题，约为 2% 至 15%，如果该数据中心使用冗余供电方式或运行时的 IT 负载较低，那么这个百分比会更高。

采用 415/240V 交流配电获得效率提升的方法仅适用于北美地区，这是因为全球其他大多数国家/地区均已采用 415/240V 或基本相当于 400/230V 的交流配电标准。本文所述的基准效率基于北美地区设计，因此，计算效率提升时考虑了除去 PDU 变压器产生的影响。

有关在北美地区数据中心内采用高效率 415/240V 交流配电的更多信息，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](#)。

水泵和冷却器内的变速驱动器

► 提高冷却效率

以前，数据中心制冷设备中的水泵和冷却器均为定速马达驱动。在这种方案中，必须按照最高预期负载和最差（最热）的室外环境条件配置马达。但是，数据中心运行时通常只能达到其部分设计容量，而且其运行寿命的大部分时间都是在室外较凉爽的情况下度过的。因此，就采用定速马达驱动的冷却器和水泵而言，其马达将在大部分运行时间里以高于所需的速度运转。

配备变速驱动装置 (VFD) 和相应控制装置的水泵和冷却器能够降低其运转速度和能源消耗，以适应当前的 IT 负载和室外条件。这种能效提升随运行状况而变化，但可达到 10% 或更高，特别是数据中心不在满负载条件下运行时，或在数据中心中的水泵或冷却器采用冗余设计配置。水泵和冷却器内的变速驱动器可以看作是一种“自动容量优化”形式。

使用变速驱动装置所得到的效率提升也可以通过阶段控制或多个定速水泵和冷却器来实现。但是，这些系统可能需要进行大量的工程设计，且借此获得的效率提升通常不到变速器的一半。

与定速设备相比，水泵和冷却器内的变速驱动器是额外的成本。对于某些季节性或间歇性应用而言，这种额外投资所带来的投资回报并不高。但是，对于那些全年不间断运行的数据中心来说，投资回收期可能只需几个月时间，具体情况视特定的数据中心而定。

容量管理工具

► 提高电源容量、冷却能力和机架空间的利用率

大多数数据中心未充分利用电源容量、冷却能力和机架空间。这种情况的主要表现是数据中心的平均运行功率密度低下；现代 IT 设备的功率密度范围是每机柜 5-20kW，典型的数据中心运行情况为每机柜 3kW 或更低。这种差异表明该数据中心的物理规格大大超出需求，其通风模式、气流混合、配电线路及照明系统均超过实际需求。

数据中心经常以低功率密度运行的主要原因是无法以一种可预测的有效方式管理电源容量、制冷能力和机架空间。将 IT 负载分散的结果就是导致电源和冷却系统的效率降低。有效的工具和规则体系可以让数据中心在高功率密度下运行，并具备以下效率优势：

- 气流路径缩短，导致更低的风扇功率
- 气流混合机会减少，导致回风温度较高
- 回风温度较高，导致冷却器效率提升
- 回风温度较高，导致空调制冷量提高
- 配线长度缩短，导致配线和 PDU 损耗降低
- 同等电源和冷却基础设施能够带更多的 IT 负载

除了在低功率密度下运行的问题外，大多数数据中心运行时还有 15% 到 50% 的电源和冷却“安全系数”。安全系数是 IT 负载与电源/冷却设备额定功率间的最小容许百分比差值。考虑安全系数限是一种有意为之的过度规划，用于避免因对系统性能了解不确切而导致系统超载或过热。事实上，考虑安全系数恰恰说明了对系统的无知。

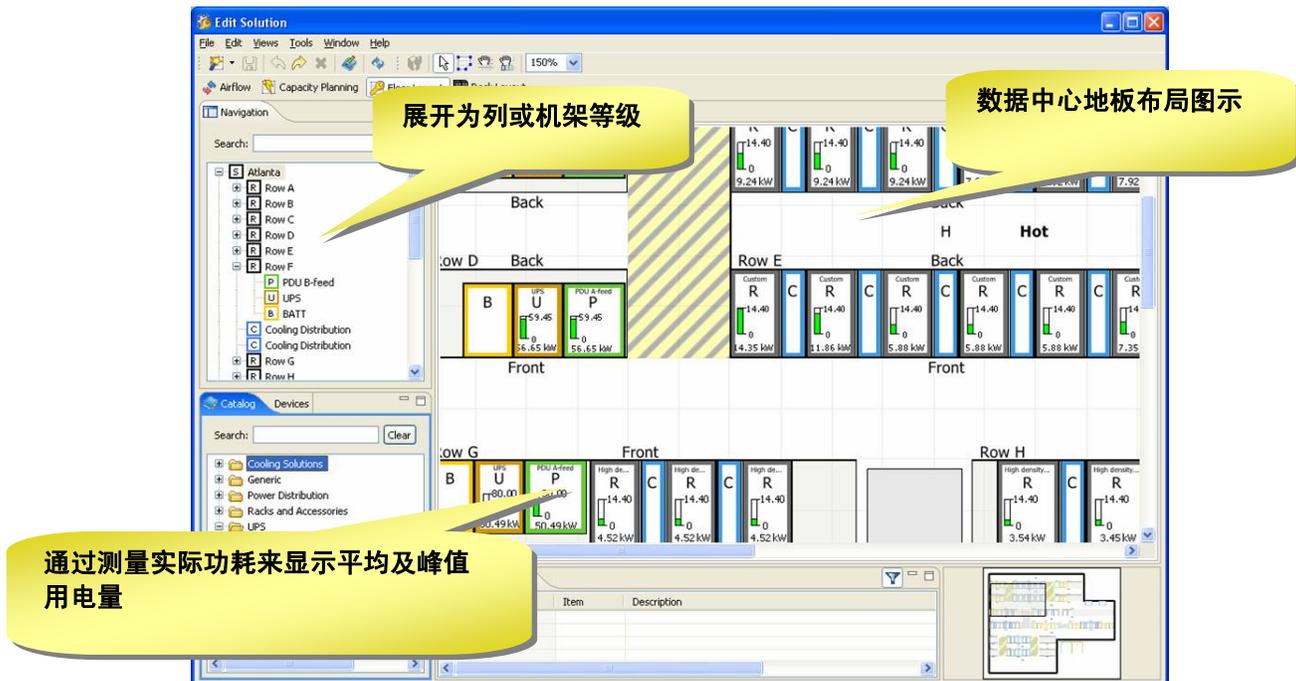
安全系数会对数据中心系统的性能产生两大影响。第一，使用安全系数显著增加数据中心的资本成本，因为它迫使您购买和安装无法使用的设备（容量）。第二，安全容限使得数据中心的运行效率无法达到负载曲线中的最高效率点，降低了数据中心的效率。

有效的容量管理系统包括一些工具和规则，能够使数据中心以较高的密度和较低的安全容限（不影响安全性）运行。一个可行系统的优势在于除因功率密度较高（5-10% 左右）实现资本节约外，整个基础设施的电力效率应为 5% 左右。能够在给定电源和冷却基础设施“承受范围”内运行更多 IT 设备的系统既可增加经济效益，又可提高电力效率。可以清楚地看到，在电源和冷却系统承受范围内放入更多 IT 负载，进而增加的电力效率要高于数据中心的整体效率，也就是说在现有数据中心内放置更多 IT 负载与将其放入到新数据中心相比，通常前者效率更高。

有关高效电源容量和冷却能力管理系统原理及运行状况的讨论，请参见 APC 第 150 号白皮书 [数据中心的电源容量和冷却能力管理](#)。

图 9 显示了一个商用容量管理系统的示例：

图9 – 一个商用电源容量/冷却能力管理系统的操作画面示例



机房布局工具

优化机房布局，提高冷却效率

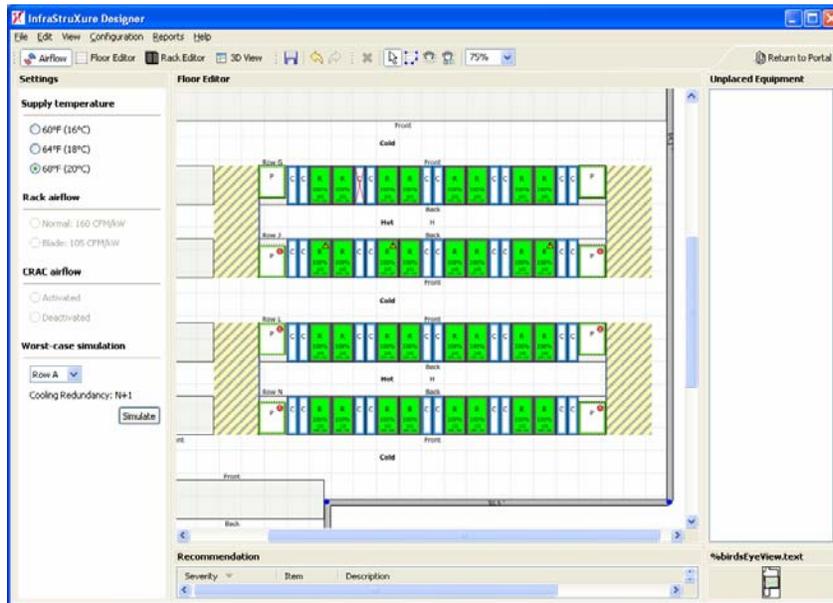
数据中心内的许多电力效率低下问题均源于整个系统内电源和冷却设备的配置方式。即使采用效率非常高的电源和冷却设备，仍会经常出现整体效率低下的现象。造成该问题的最大因素之一是冷却设备和 IT 设备的物理布局。

针对效率优化的机房布局应具备以下特征：

- 尽可能缩短气流路径的长度，以降低风扇功耗
- 尽可能减小气流阻力，以降低风扇功耗
- IT 设备排出的热空气在高温状态下直接回流至制冷设备内，以最大限度地将热量传回制冷设备
- 空调的安装位置应使其所能提供的冷空气是与附近的负载需求保持平衡

以上的一些要求可以通过制冷来实现设备基本设计（如列式冷却）。但是，IT 设备和空调的地板布局会极大的优化制冷设备。最佳地板布局随数据中心的具体情况而异，具体来说，它取决于机房的形状和大小、机房内的目标 IT 功率密度及其他场地特点。要设计出最佳的布局，一方面需要遵守相关规范，另一方面还必须进行复杂的计算。好在这些相关规范可输入计算机辅助设计工具和计算也可交给计算机辅助设计工具自动完成。图 10 所示为用于优化空调布局的数据中心布局工具示例。

图 10 – 用于优化空调安装位置的机房布局工具



新型架构带来的整体效率提升

将此改进型架构的各个要素组合到一起后，与前文所述的传统设计相比，其耗电量降低幅度达到 40%。前面图 4 中列出了按数据中心子系统划分的成本节约明细项。整个数据中心基础设施的效率（DCiE – Green Grid 联盟确立的度量标准）是一条随 IT 负载而变化的曲线，如图 11 所示。

图 11a 显示采用双路供电设计和 N+1 空气处理装置的高可用性数据中心 DCiE 与负载的关系曲线。图 11b 显示的是相同的数据，不过是一个无电源或冷却设备冗余的典型数据中心。比对这些图片后，我们会发现：

- 对于传统的数据中心，电源和冷却冗余可使整体 DCiE 降低约 5%
- 电源和冷却冗余对改进型架构效率的影响微乎其微
- 对于电源和冷却设备冗余的数据中心而言，分阶段部署模块化电源和冷却系统可极大提高设备效率，特别是负载较低的时候

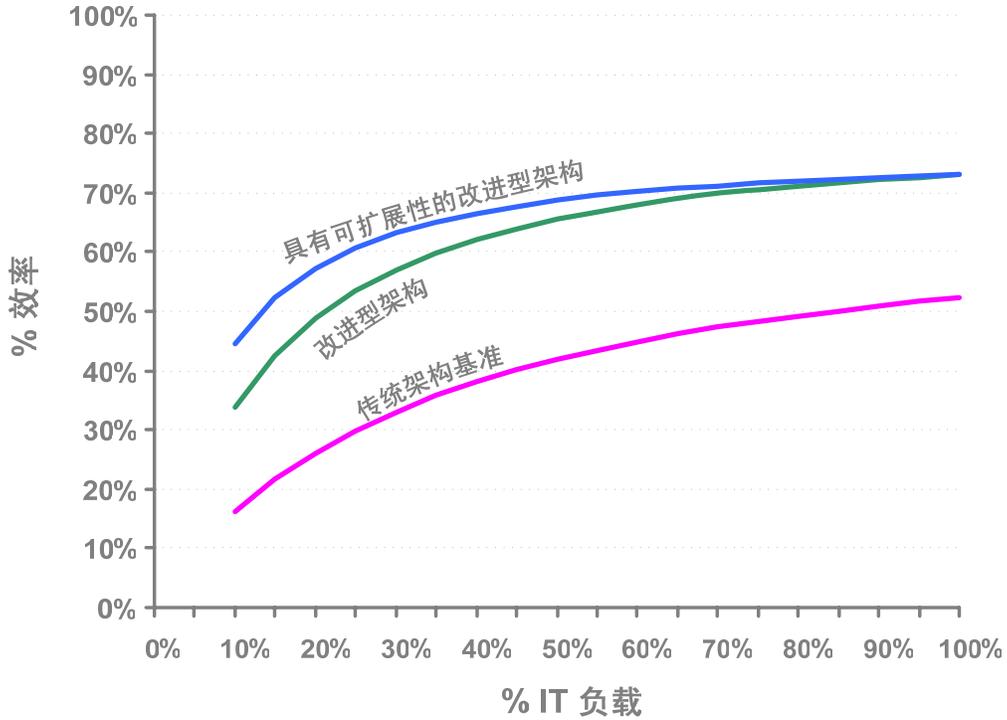
本文所述的效率提升受许多其他因素的影响，各数据中心的情况可能不尽相同。其中一些因素包括：

- 传统数据中心内的吊顶回风设计
- 传统机房空调之间不能协调工作，互相冲突
- 缺少热通道/冷通道的机架布局
- 高效节能的照明设备
- 使用 UPS 为空气处理系统供电
- 电源和冷却系统的规格搭配不均衡
- 全双路空气处理系统
- 全双路冷却器
- 成套冷却器或风冷型乙二醇系统
- 高架活动地板（地板下净空 0.5m 或更小）
- 较大辅助负载（工作人员区、网络操作中心）
- 炎热和/或潮湿的气候
- 制冷剂管通非常长

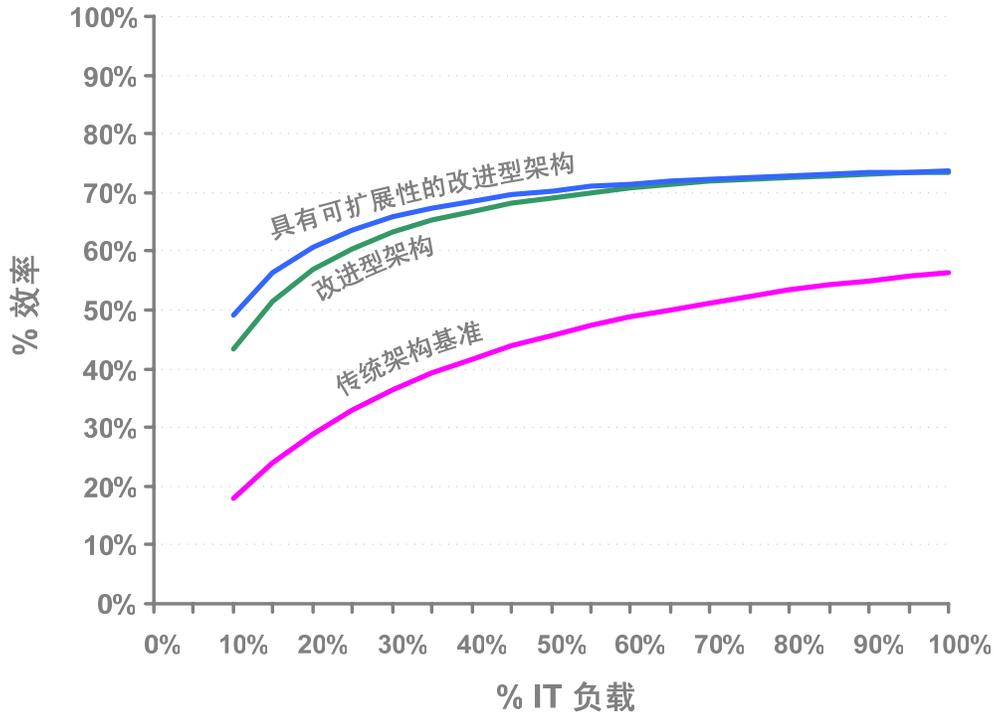
我们在计算本白皮书中的数据时未假设以上任一因素或条件。不过，所有这些因素均可量化、建模和分析。本白皮书中使用的模型、技术和分析均可应用于现有或规划中的特定数据中心。例如，APC 提供的数据中心效率评估服务 (Data Center Efficiency Assessment Service) 就包含这一项内容。

图 11 – 体现出改进型架构效果的数据中心效率曲线

11a – 双路供电、N+1 空气处理系统



11b – 单路供电、N 空气处理器



与其他提议方法的比较

还有许多用于提高电源和冷却效率的假设方法，并未包含在本文所提出的架构中。特别值得一提的是，**直流配电**和**直接将制冷剂管接至服务器**这两种方法，已被建议用作未来提高数据中心效率的架构改革方案。因此，有必要评估一下与本白皮书中介绍的高效率架构相比，采用这些方法可使效率再提高多少。

直流配电

有人建议采用直流配电代替传统的交流配电可显著降低数据中心的电力损耗。据说，无需使用 PDU 变压器、使用 AC-DC 转换器代替 UPS，以及能够接收高压直流输入（可能具有或不具有交流配电输入功能）的创新型 IT 设备均具有相应的优势。**表 1** 为这些效率优势的量化数据。

表 1 – 与传统设计及本文的高效率架构相比，直流配电数据中心的效率提升

直流配电部件	较传统设计节约	较本文所述的高效率架构节约
无需变压器	5%-10%	无
使用 AC-DC 转换器代替 UPS	5%-15%	无
能够接收高压直流输入的新型 IT 设备	4%	2%
总计提高	13%-28%	2%

表 1 显示采用直流配电获得的效率提升明显高于传统的交流配电数据中心设计，但与本白皮书中介绍的高效率架构相比，优势不大。本文所述架构与假设的高压直流架构性能相当的主要原因在于：

- 这两种系统都未使用费电的 PDU 变压器
- 新型高效率交流电 UPS 系统可实现与 AC-DC 高压 UPS 系统相同的效率
- 这两种系统均能够使 IT 设备的电源在更高的输入电压下工作，从而提高了效率

与本白皮书中介绍的架构相比，高压直流配电方法在理论上略占优势，但该方法属实验性的，尚未商业化，且缺乏标准规范。相比之下，本白皮书中介绍的方法已得到世界各地相关规范的认可，现在就可以使用。有关各类直流配电的更详细论述及交流配电与直流配电效率的详细量化分析，请参见 APC 第 63 号白皮书 [数据中心的直流配电与交流配电](#) 及 APC 第 127 号白皮书 [数据中心高效率交流配电与直流配电的量化比较](#)。

直接将制冷剂管道接至服务器

造成当今许多数据中心效率低下的根源在于数据中心内的气流组织问题。配电问题很容易预测，因为电力是通过特定配线直接从电源输送至 IT 设备。相对而言，冷空气的传送看不见、摸不着，且空调与 IT 负载之间的热量传递通通常常令人费解。为提高冷却系统的效率，设想将冷却液直接连接至 IT 负载自然就顺理成章了，这样可以使冷空气的传送像电流一样，大大提高系统的可预测性，并有可能提高系统的效率。

与传统设计相比，直接将制冷剂管道连接至服务器的效率建模显示，其效率可有明显提升。但是，表 2 显示与本文所述的高效率列式冷却架构相比，这种方法带来的效率提升并不明显。由于行间制冷能够有效地将制冷输送到非常靠近 IT 负载的地方，因此，行间制冷实现的效率提升与采用直输制冷剂管道所产生的的效果近似也就不足为怪了。

表 2 – 与传统设计及本文的高效率架构相比，将制冷剂管道直接连接至服务器所获得的数据中心效率提升

直输管道连接部件	较传统设计节约	较本文所述的高效率架构节约
温度更高的制冷剂回流	5%	无
风扇功率损耗	10%	5%
泵送功率损耗	-5%	-2.5%
总计提高	10%	2.5%

但遗憾的是，如今还没有通过直接输送制冷剂冷却的 IT 设备，且在近期内出现的可能性也不大。此外，该方法还有成本过高及可靠性问题亟待解决。令人欣慰的是，本文所述的高效率架构能够实现直速方式的大部分优势，而且能用现有的风冷式 IT 设备及现有设备来实现。

实际性能限制

前面对数据中心内电力“浪费”五大主因（不必要的效率低下问题和欠佳的设备配置）的论述为我们指明了改进的方向。这自然会引发出一个问题：减少效率低下问题存在哪些实际限制因素？例如，是否存在某些物理学基本定律或实际的工程原理限制了节约能源可能性的。

令人意外的是，从理论上讲，数据中心的非 IT 损耗可以减少的程度并没有限制。出于这个原因，电源设备、冷却设备和照明设备消耗的*所有*电力均必须视作浪费（即图 1 中显示的**辅助**电力）。例如，从理论上讲，采用室外空气自然对流设计的数据中心，配合超导电气系统，就可能实现零损耗，即将 100% 的输入功率输送给 IT 负载。

但是，出于技术的实用性和合理的预算限额等原因，如今的电源和冷却效率仍存在实际限制。

除了本白皮书中介绍的那些改进型架构因素以外，进一步提升电源和冷却系统效率的最大实际障碍均与冷却系统有关。通过制冷剂和空调系吸收送并传递热量是一项稳定和成熟的技术。虽然我们可以期望日后进一步优化和整合这些系统，但除本文所述方法以外，预计传统空调系统的效率提升仅有 5% 左右。

自由制冷和利用这项技术设计的空调系统有可能将效率再提高 5-10%，具体情况视地理位置而定。将可预见的空调技术性能提升加在一起，可以使 DCiE 效率达到 88%，本白皮书中介绍的系统架构则为 73%。

结论

整合常见电源/冷却设备且经过实践检验的优化系统设计可能实现较高的效率，传统数据中心的运行效率远远低于此。本白皮书介绍了一种改进型架构，整合了高效率电源和冷却设备，同时配合采用可优化总体效率的配置和运行策略。

本白皮书的一个重要发现是要确保实现高效率的数据中心，单单购买高效率设备是不够的。以有效的方式使用此类高效率设备的架构和策略以及减少过度规划现象，与高效率硬件本身同样重要。如果将高效率设备与有效的架构相结合，数据中心的电功率总量可以较传统设计节约 40%。

关于作者：

Neil Rasmussen 是 APC-MGE Critical Power and Cooling Services 负责技术创新的高级副总裁。在关键网络的电源、冷却和机架基础设施研究领域，他确立了全球研发预算额最高的项目的技术研究方向。目前，Neil 正在为实现高效率、高密度、可扩展型数据中心基础设施解决方案的科技进步而努力工作，同时，他还是 APC-MGE 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电子工程学士和硕士学位，其学术论文是有关 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。

相关的 APC 白皮书



130 [列式和机架式数据中心冷却架构的优点](#)



150 [数据中心的电源容量和冷却能力管理](#)



63 [数据中心的直流配电与交流配电](#)



127 [数据中心高效率交流配电与直流配电的量化比较](#)



128 [利用改进型高密度配电提高数据中心的效率](#)



154 [数据中心的电气效率测量](#)



157 [选择用于测量数据中心效率的行业标准度量方法](#)



113 [数据中心的电力效率建模](#)



114 [实现高效节能的数据中心](#)



37 [避免数据中心和网络机房基础设施因过度规划造成的资金浪费](#)