

数据中心的电力效率建模

第 113 号白皮书

版本 2

作者 Neil Rasmussen

> 摘要

用于估算数据中心电力效率的常规模型根本不能准确表现实际的部署情况。电损耗通常是通过将各种电气设备（例如电源和冷却设备）的效率损耗相加来估算的。本白皮书显示，估算设备效率损耗时常用的值是很不准确的。它介绍了一个简单但更为准确的效率模型，为识别和量化电源和冷却设备中的浪费提供了合理的基础。

目录

[点击内容即可跳转至具体章节](#)

简介	2
什么是“数据中心效率”？	2
数据中心效率的观念偏差	5
数据中心效率的改进模型	6
负载欠载的影响	9
热负荷的影响	10
重组数据中心效率拼图	10
实际的数据中心效率	11
提高数据中心效率的益处	12
结论	14

简介

对于典型的数据中心而言，数据中心物理基础设施 (DCPI) 的 10 年总拥有成本 (TCO) 可高达每机架 80,000 到 150,000 美元。在这些成本中，电能消耗占相当大的比重，约为总成本的 20%¹。这值得引起注意，因为所消耗的许多电能都被浪费了（变成了热量），而相当一部分浪费是可以避免的。据估计，全世界各个数据中心每年的耗电量达 40,000,000,000 千瓦时，因此，对于数据中心运营者而言，减少这些能耗中的浪费不仅是一个重大的经济问题，而且是一个重要的公共政策问题²。

有关数据中心效率的典型的简单化模型完全低估了数据中心的电能浪费。因此，提高效率所带来的益处远比人们普遍认为的要大。本白皮书介绍了一个经过改进的模型，该模型能够提供更准确的数据中心损耗数据，并指出哪些方面有机会改进能耗。

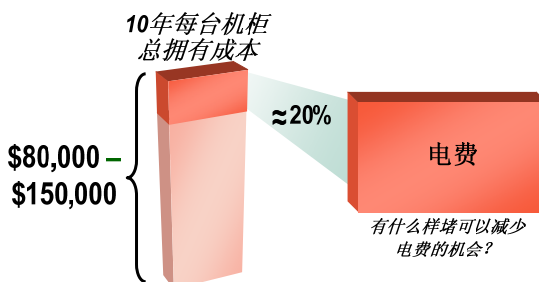


图1
电费在总拥有成本中占很大比重

什么是“数据中心效率”？

任何设备或系统的效率都来自其能源输入（电能、燃料及任何使其“运转”的能源）中转化为所希望的有效结果的那一部分 – 未获得有效结果的能源输入一律被视为“浪费”。这一**有效输出**占**总输入**的比例通常以百分比表示。“有效”是指特定系统取得了所希望的任何结果，这可能不仅取决于系统的性质，还取决于使用环境。例如，一个电灯泡的输出包括5%的光和95%的热，可以将它视为5%效率的电灯泡，或95%效率的加热器，具体取决于是用来给房间照明还是取暖。“有效输出”是指对有关系统有意义的任何输出。

在数据中心的范畴内，效率被定义为总设施功率与IT设备功率的比值。这个参数称为数据中心效率 (PUE)。PUE 等于 1 相当于 100%效率的数据中心。PUE 的值越高，数据中心的整体效率就越低。例如，PUE 等于 2，意味着数据中心所使用的功率两倍于IT设备运转之所需。

对于数据中心物理基础设施，输入的是**电能**，有效输出是**计算设备所消耗的电能**。在本白皮书中，数据中心的模型为一个电力系统，其“总输入”是其从市电消耗的电能，其“有效输出”是它用于计算的那部分电能，这可以用提供给IT设备的电能来表示。³

$$\text{数据中心效率 (PUE)} = \frac{\text{输入数据中心的电能总量}}{\text{IT 负载消耗的电能}}$$

图2显示了这一数据中心效率的一般模型。

¹ 对总拥有成本产生影响的描述详见第6号白皮书《确定数据中心和网络机房基础设施的总拥有成本》

² <http://www.eei.org/magazine> (2006年6月14日访问)

³ 电能与“移动数据位”之间的确切关系不属于本白皮书的讨论范畴，但就此处的分析而言，可以用IT设备所消耗的电能比较准确地计量所提供的计算能力。通过减少IT设备本身的能耗来改进效率是很重要的，但不是本白皮书要探讨的内容。

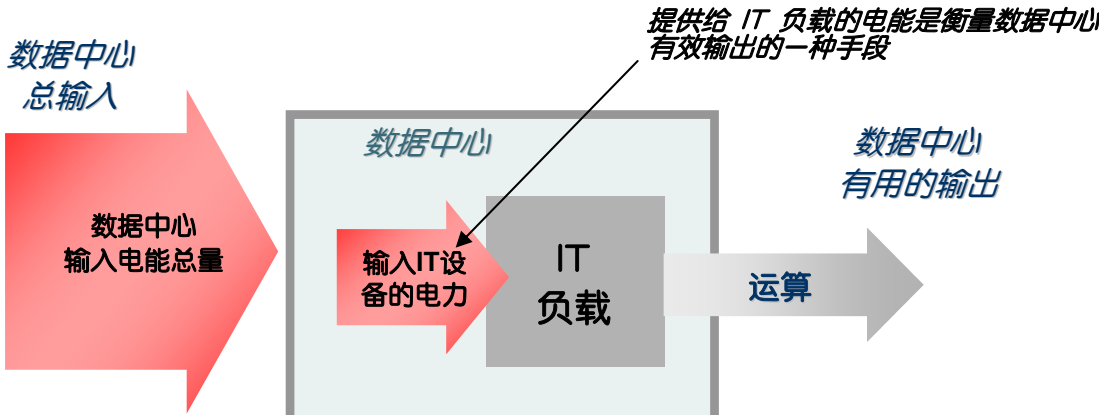


图 2
数据中心效率被定义为输入电能中提供给IT负载的那一部分电能

如果数据中心的效率为 100% (PUE 为 1)，则提供给数据中心的所有电能都会输送给 IT 负载。在实际情况下，有许多时候电能被 IT 负载以外的设备消耗了，因为需要为 IT 设备进行良好的安置、供电、冷却并加以防护，使之可以提供有效的计算能力。（这些任务由数据中心物理基础设施 (DCPI) 来完成。）消耗数据中心电能的非 IT 设备包括变压器、不间断电源 (UPS)、电源线、风扇、空调、泵、加湿器和照明设施。其中有些设备，例如 UPS 和变压器，与 IT 负载串联（因为它们提供了为 IT 负载供电的线路），而另一些设备，例如照明设施和风扇，则与 IT 负载并联，因为它们执行数据中心的其它支持功能。图 3 显示了数据中心效率模型中能耗的这些内部构成成分。

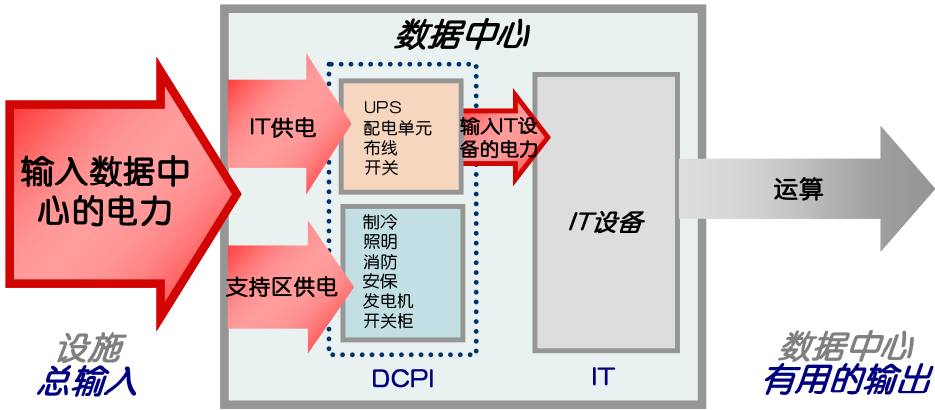


图 3
数据中心效率模型中的能耗细节

数据中心效率模型中的“有效”和“浪费”概念

在效率模型中，“浪费”是指所有不属于系统有效输出范畴的情形。不言而喻，数据中心的 DCPI（数据中心物理基础设施）除了为 IT 负载提供电能，还进行其他有效的工作，这些工作在图 3 中称为“辅助支持”。有人可能认为这些 DCPI 子系统（例如冷却或照明系统）也应被视为数据中心的“有效输出”的一部分。

这是一个参照系的问题。本文分析的主题是数据中心在产生自己的输出，即运算能力，方面的总体效率。建立数据中心的目的是用来提供冷却或防火或任何由 DCPI 完成的其他功能。虽然这些 DCPI 输出对于数据中心内部产生和保护有效输出（运算能力）的工作极为有用，但这些输出本身并非数据中心的“有效输出”，也没有任何理由可以认为它们必须消耗电能。应该将非电源线路的 DCPI 活动视为在为数据中心的计算能力提供支持时的必要代价，因此，在数据中心效率模型中，它们被认为是应该尽可能减少的“浪费”。对于旨在减少数据中心的总体能耗的替代设计和新技术而言，所有这一切都应该是合乎情理的。例如，有的数据中心使用“自然冷却”方法，

即通过转轮式换热器和板框式冷却等技术利用室外的冷空气进行冷却。这可以减少冷却所耗费的电量，从而提高数据中心的效率。

DCPI 组件本身的“有效输出”将是本白皮书后面逐个分析组件效率（这是数据中心内部效率的一个较小的参照系）以减少更大的数据中心总体模型中的无效耗电量（浪费）时的一个关键考量因素。

数据中心的电能消耗在了什么地方？

如果数据中心的“有效”电力（PUE 所定义的）是提供给 IT 负载的电力，那么其余的电力去哪儿了？图 4 为典型的数据中心的电能和热量流向的示意图。值得注意的是，提供给数据中心的所有电能最终几乎都变成了热量。

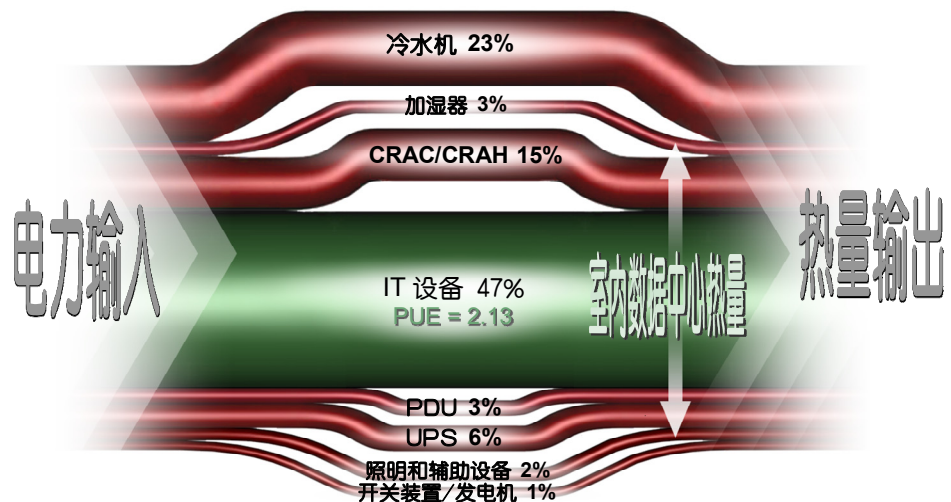


图 4

典型数据中心的电能流向

图 4 中显示的数据中心是一个典型的高可用性的，双供电回路的数据中心，装备有 N+1 机房空调装置（CRAC），运行在 30% 设计容量水平的负载。

值得注意的是，提供给数据中心的电能实际上只有不到一半传输给了 IT 负载。使用 PUE 所定义的效率，47% 的输入电力被送至 IT 负载处，图 4 中的数据中心因此可以认为运行在 PUE 为 2.13 的水平。

提高数据中心效率的机会

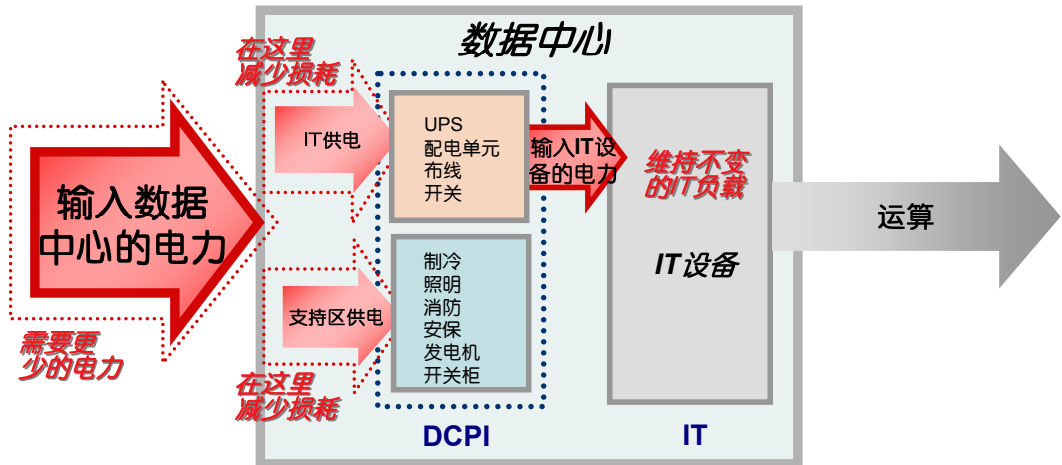
提高数据中心效率的方法有三种：

1. 改进 DCPI 设备的内部设计，减少其工作时的能耗
2. 使 DCPI 组件的规划与实际 IT 负载更好地相匹配（“适度规划”），提高组件的工作效率
3. 开发新技术，减少提供 DCPI 支持功能所需的电能（例如前面提到的“自然冷却”技术）

（正如下面要显示的那样，第 2 种方法为提高数据中心效率提供了最大、最直接机会。）

图 5 显示了如何通过减少内部能耗提高数据中心的效率。

图 5
提高效率



数据中心效率的观念偏差

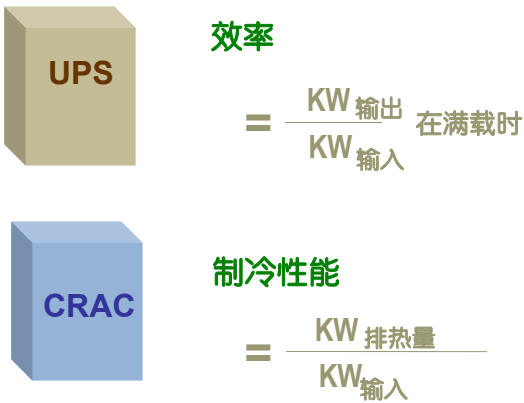
虽然数据中心的效率可以凭经验来确定，即将所有 IT 设备的能耗相加并与数据中心的电能输入总量相除，通常的做法是依据制造商提供的 UPS 和 CRAC 等主要组件的效率声明。这可能比较省事，但获得的效率参数常常被严重夸大，掩盖了可能有助于发现节省电力成本的机会的任何信息。

数据中心的效率不仅仅是“铭牌”式的组件效率

制造商提供了电源和冷却设备的效率数据。对于电源设备，效率通常以输出电能与输入电能的百分比来表示；对于冷却设备，效率通常以称为“性能系数”（即所排除的热量与输入的电能之比）的相关参数来表示。

不同制造商发布的同类设备的效率值相差并不很大，这导致人们简单地认为，只需将各个组件的无效耗电量相加便可获得数据中心的效率损耗数字。可惜，这种方法无法获得实际的数据中心的准确数据。使用制造商的额定效率导致用户或设计人员大幅夸大效率，从而低估实际的数据中心的效率损耗。

图 6
制造商为每种组件提供了单一的效率数值



错误的观念

表 1 列出了导致数据中心效率模型发生显著错误的三种常见的错误观念。

表 1

有关数据中心效率的错误观念

错误观念	实际情况
1 电源和冷却组件的效率是不变的，不取决于 IT 负载	组件（尤其是 CRAC 装置和 UPS）的效率在 IT 负载较低时会显著下降
2 电源和冷却组件在全部设计负载或接近全部设计负载下工作	典型的 IT 负载要显著低于所使用的 DCPI 组件的设计容量
3 电源和冷却组件产生的热量微不足道	电源和冷却组件的热输出会给冷却工作带来明显的负担，在分析冷却系统的无效耗电量时必须考虑在内

这些主要错误相互交织，使问题更加复杂，尤其是在大多数数据中心最常见的低 IT 负载的情况下。其结果是，数据中心的电损耗通常被低估两个或更多的系数。

幸好，可以通过建立一个包含上述问题的简单模型，来估算出更可靠的效率数字。

数据中心效率的改进模型

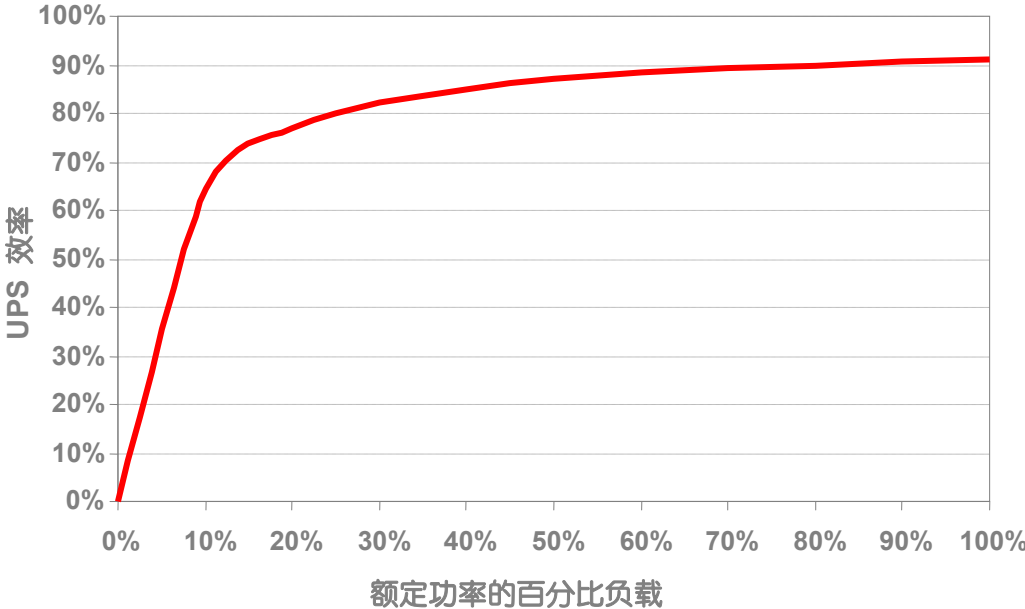
数据中心总体效率的改进模型依赖于各个组件（例如 UPS）建模的准确性。使用单一的效率值来标示电源和冷却组件的效率是普遍的做法，但这种做法并不适合实际的数据中心安装。一个组件（例如 UPS）的实际效率并非一成不变，而是随 IT 负载的变化而变化。图 7 显示了典型 UPS 效率曲线。

错误观念 #1

电源和冷却组件的效率是不变的，不取决于 IT 负载

图 7

UPS 作为负载的函数的典型效率



值得注意的是，当接近非常小的负载时，该设备的效率会下降为零。这是因为有一些损耗不受负载的影响，例如控制逻辑损耗。这种不受负载影响的不变的损耗有各种名称：无负载损耗、固定损耗、分流损耗、空载损耗或并行损耗。本白皮书使用空载损耗这一名称。

图 8 是与图 7 相同的数据的另一个图示。值得注意的是，随着负载的减少，UPS 的内部能耗（即“损耗”，如每个条形图的红色部分所示）占总电能的比重越来越大，因而减小了效率百分比的值。这是由空载部分的损耗造成的，该损耗无论负载如何始终保持不变。

图 8
内部UPS 损耗对效率的影响

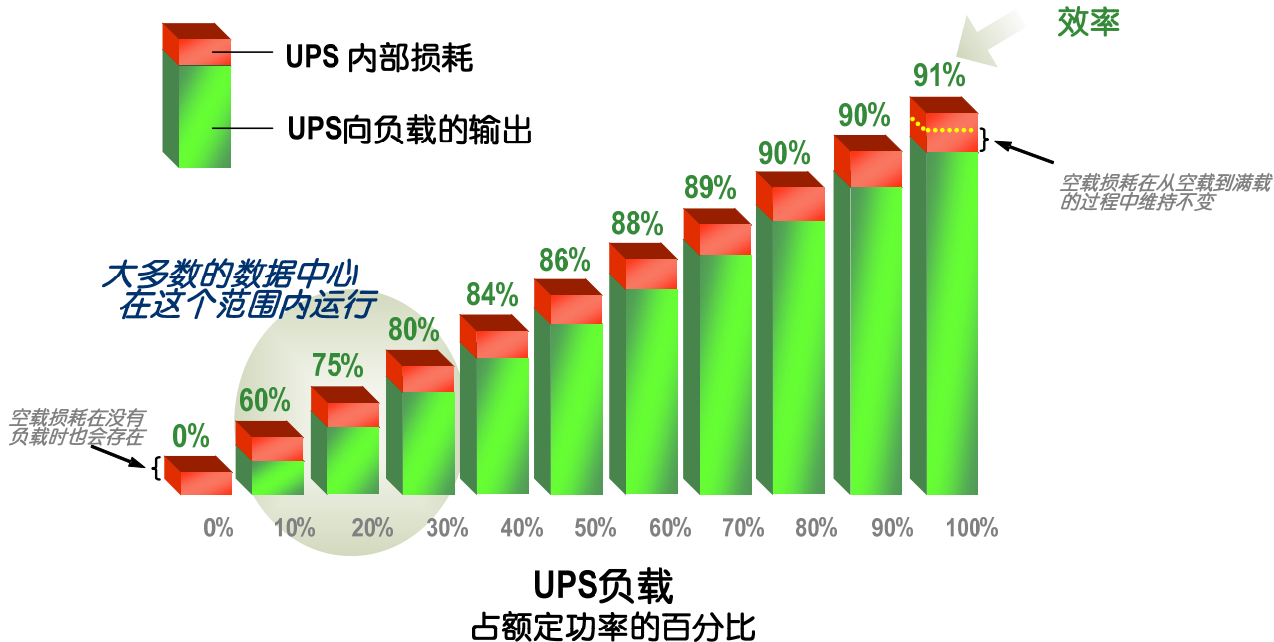


图 7 和图 8 中的数据所描述的 UPS 可以称为具有 91% 的效率。然而，这是满载时（即理想情况下）的效率。在低负载时（大多数数据中心都是在这种状态下工作），说该设备的效率为 91% 是完全错误的。例如，在 10% 负载时，该 UPS 表现的效率仅为 60%。显然，在这种情况下单一参数的效率模型是不适当的。

内部设备损耗的三种类型

仔细研究图 8 后可发现，设备损耗（条形图的红色部分）随着负载的增加而增加。这是由空载损耗以外的与负载成比例的其他损耗造成的。在此之上甚至还可能有一个损耗组件（该图中看不见），与负载的平方成比例，这通常影响不大，但在过高负载时可能会使总体效率下降。

表 2 显示数据中心使用的各种设备的这三种损耗类型的典型值。最后一列给出了这些损耗的和，作为该组件的总损耗。

表 2

用满载组件额定值的比例值
表示 DCPI 组件电气损耗

DCPI 组件	空载损耗	+	比例损耗	+	平方律损耗	=	总损耗 (单一参数)
UPS	4%		5%		-		9%
PDU	1.5%		-		1.5%		3%
照明设施	1%		-		-		1%
布线	-		-		1%		1%
开关装置	-		-		0.5%		0.5%
发电机	0.3%		-		-		0.3%
CRAC	9%		0%		-		9%
加湿器	1%		1%		-		2%
冷水站	6%		26%		-		32%

从表 2 可以看出，通过使用不超过两个的参数来标示每种类型的设备，可以为数据中心使用的组件创建更完整的模型。值得注意的是，本表中的损耗值表示为设备满载额定值的百分比，而对于小于满载的实际负载，损耗百分比将会发生以下变化：

- 空载损耗： 损耗百分比随着负载的减少而**增加**
- 比例损耗： 损耗百分比不变（不受负载影响）
- 平方律损耗： 损耗百分比随着负载的减少而**减少**

图 7 和图 8 中描述的典型 UPS 效率无法用单一效率参数进行准确建模，而是用表 2 的空载损耗 (4%) 和比例损耗 (5%) 参数进行了合理建模。

负载欠载的影响

前一部分说明了电源和冷却系统在以低于设备设计额定值使用时效率会显著下降。这意味着对数据中心效率进行的任何分析都必须将负载适当地表示为设计容量的一部分。

只使用单一效率值为设备建模的简单效率模型对负载不敏感（在这种模型中效率不会随着负载的变化而变化）。但事实上，对一般的数据中心来说，电源和制冷设备通常在远低于额定容量的状态下工作。其结果是，这种模型会明显夸大实际数据中心的效率。

错误观念 #2

电源和冷却组件以全部设计负载或接近全部设计负载的方式运行

对于每种电源或冷却组件而言，组件在低于额定容量的状态下工作的原因有四个：

- 数据中心 IT 负载低于系统设计容量
- 有意使用过度规划的组件，以提供安全容限
- 组件以 N+1 或 2N 配置的形式与其他组件协同工作
- 组件过度规划以适应负载的多样性



资源链接

第 37 号白皮书

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

IT 负载低于数据中心的设计容量。 研究结果清楚表明：一般的数据中心都在低于设计值 65% 的状态下工作。这种情况在第 37 号白皮书《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》中有更详细的说明。本白皮书后面的部分中将说明不能物尽其用是数据中心效率低下的一个非常重要的原因。

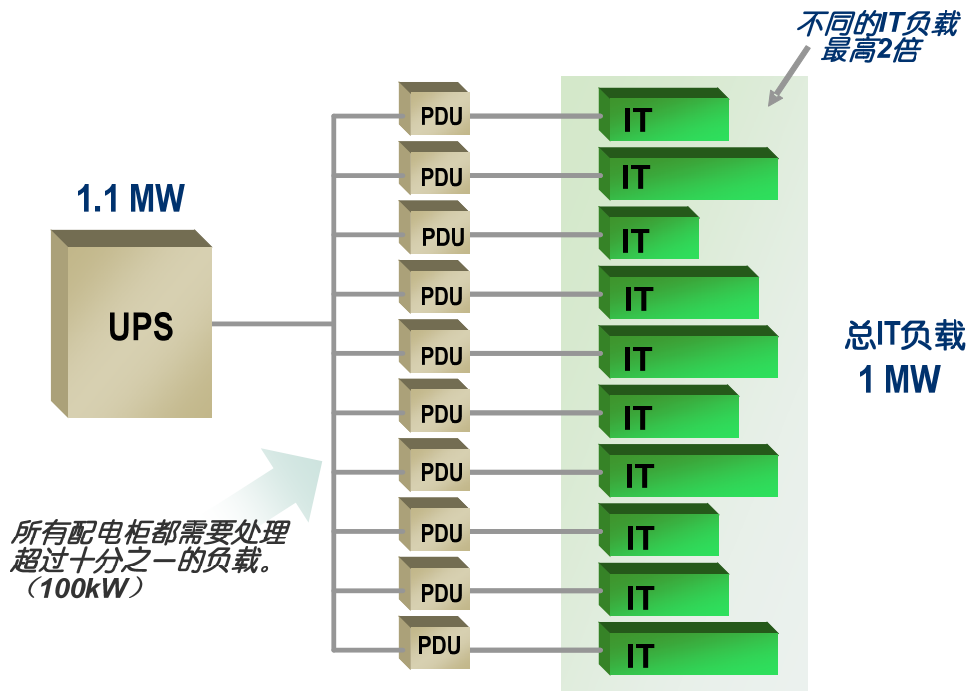
组件过度规划以提供安全容限。 通常会以称为“降额”的普遍做法对组件进行过度规划。其目的是避免组件以接近其容量极限的状态工作。可以在没有任何降额的情况下运营设施，但为高可用性设施推荐的设计实践是采用 10-20% 的降额值。

组件以 N+1 或 2N 冗余配置的形式工作。 通常做法是以 N+1 甚至 2N 配置形式来使用设备，以提高可靠性以及/或允许对组件进行同步维护，而无须关闭系统。以这种配置来运作数据中心意味着 IT 负载由更多的 DCPI 组件分担，从而有效地降低组件的负担。对于 2N 系统，任何单一组件的负载都小于其设计值的一半。因此，数据中心的效率受到以 N+1 或 2N 配置形式工作的设备的严重影响。

组件过度规划以处理“负载多样性”。 这种影响很微妙，通过示例来说明最有效。假设一个数据中心的负载为 1MW，由一个 1.1 MW 的 UPS 提供支持。在 UPS 与 IT 负载之间有十台配电装置 (PDU)，每台都为该 IT 负载提供部分电能。问题：这些 PDU 每台的额定值是多少，并且它们因此对一般负载会以什么值来工作？乍一看，好象每台 PDU 的额定值如果是 100 千瓦，便会满足系统设计要求。而且，如果每台 PDU 都以满负载运行，那么数据中心就可以满足全部负载要求。然而，在实际的数据中心几乎不可能保证 PDU 负载的平衡。特定 PDU 的负载取决于 PDU 所在数据中心地区的 IT 设备的性质。事实上，实际数据中心的各种 PDU 的负载往往有两个系数的差异。如果一台 PDU 所供应的数据中心部分在物理上已经达到容量极限，但仍然没有达到该 PDU 的全部功率容量，则在其他九个 PDU 满负载时将无法使用该 PDU 的剩余容量。在这种配置中，唯一能够确保数据中心的最大容量的方法是大幅度地过度规划 PDU 的总容量。PDU 的典型的过度规划量大致为 30% 到 100%。正如前面的一些例子所显示的那样，这种过度规划会降低系统的效率。图 9 显示了 PDU 进行过度规划以支持负载多样性的必要性。

值得注意的是，导致 PDU 过度规划的问题也会导致空气处理机过度规划。

图 9
负载多样性对PDU规划的影响



热负荷的影响

数据中心效率建模中的另一个主要问题，是人们头脑中的这样一个观念，即电源和冷却设备的热输出（无效耗电量）占IT负载的比重微不足道，因此可以忽略不计。事实上，数据中心里的电源和冷却设备产生的热量与IT设备本身产生的热量并没有不同，因此必须用冷却系统加以消除。这给冷却系统带来了额外的负担，因而需要对冷却系统进行过度规划，而这又进一步增加了冷却系统的效率损耗。为了合理补偿这些损耗，冷却系统负载必须既包含IT设备，又包含制冷空间中的任何电源和冷却设备的损耗。

错误观念 #3

电源和冷却组件产生的热量微不足道

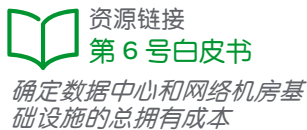
重组数据中心效率拼图

从上面的讨论可以看出，建立一个改进的数据中心效率模型是可能的。改进的模型具有下列特性：

- 组件按照空载损耗来建模，外加与负载成比例的损耗和与负载的平方成比例的损耗
- 包含了因组件降额而导致的过度规划
- 包含了因 N+1 或 2N 设计而导致的不能物尽其用的问题
- 冷却负载既包含 IT 负载，也包含因室内电源和冷却组件的无效耗电量而导致的热负载
- 对于特定的数据中心安装，鉴于数据中心在远低于设计容量的状态下工作，因此模型以图形化方式显示了随负载而变化的效率输出

模型的实施简单明了，需要遵守下列一般流程：

- 在提供额定、多样化和冗余系数的前提下，确定每个电源和冷却组件类型的平均过度规划程度
- 使用输入负载、每个组件类型的基于过度规划的额定负载比例、空载损耗和比例损耗，来确定该组件类型的工作损耗



- 确定由于需要冷却系统冷却数据中心的电源和冷却设备而产生的其他比例损耗
- 将所有损耗相加
- 计算出数据中心随 IT 负载的变化而变化的损耗并列成表格

通过施耐德电气的数据中心 TCO 分析方法已经实施了一个基于这些原则的计算机模型，来计算能源消耗，请参阅第 6 号白皮书《确定数据中心和网络机房基础设施的总拥有成本》。

具有多种工作模式的设备

有些 DCPI 子系统（例如空调）可能具有多种工作模式，每种工作模式的效率都不相同。例如，有些空调系统有“自然冷却”模式，可在室外空气温度很低时使用，从而显著提高系统效率。

这类设备无法基于本白皮书介绍的 3 个参数的简单模型（空载损耗、比例损耗和平方律损耗）使用单一效率曲线来建模。为了为多模式设备建立效率模型，采用了一种不同的技术。幸好，该技术十分成熟，在工程中广泛使用。

对于在不同工作模式之间切换的设备，可以使用称为“状态空间平均”的简单明了的技术进行长期建模。其方法是确定在各个模式中所花的相对时间量，然后生成系统输出的加权平均值。这种技术十分适合计算效率和损耗。

要在具有多种工作模式的 DCPI 设备中使用本白皮书中介绍的效率模型，首先必须确定每种工作模式的固定损耗、比例损耗和平方律损耗。然后将每种模式的损耗乘以该模式中预期所花时间的，计算出一段长时间内产生的总损耗量。例如，一个具有两种模式的完整系统会需要三种效率曲线：

- 模式 1 中的效率曲线
- 模式 2 中的效率曲线
- 在假定了每种模式中所花时间量的情况下的预期总体效率曲线

实际的数据中心效率

在拥有了更好的数据中心能耗模型后，便可以改进对数据中心效率的估算。通过使用典型的设备损耗、降额、负载多样性、过度规划和冗余值，可以得出图 10 的效率曲线。

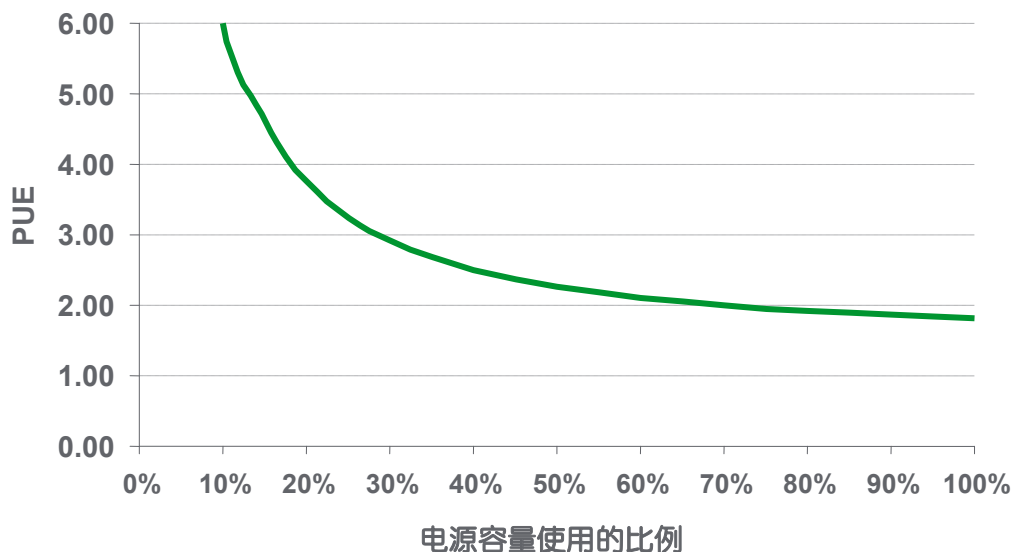


图 10 使用改进模型的典型数据中心的效率

值得注意的是，该效率（PUE）-负载曲线与根据使用制造商发表的组件效率数据进行的传统计算得出的估算结果有很大的不同。对图 10 中的数据中心的效率进行传统估算所得出的值为 60-70%，并且不受负载影响。请注意改进后的模型所预测的数据中心效率的大幅度下降，尤其是在许多数据中心实际采用的较低负载的状态下。

该模型显示，负载非常小的数据中心的效率所受到的影响可能会十分严重。例如，对于负载仅为额定容量 10% 的数据中心，提供给该数据中心的每十瓦电量中，仅有大约一瓦实际到达了 IT 设备。其余九瓦都由于数据中心物理基础设施中的无效耗电量而损失掉了。

另一种评判这些损耗的方法是看经济成本。图 11 显示了一个 1 MW 数据中心的年电力成本随 IT 负载的变化而变化的情况。这基于 N+1 CRAC 装置的典型的高可用双路供电设计。本分析假定电力成本为每千瓦时 0.10 美元。

图 11
典型的 1 MW 数据中心的年电力成本随使用的设计容量比例而变化

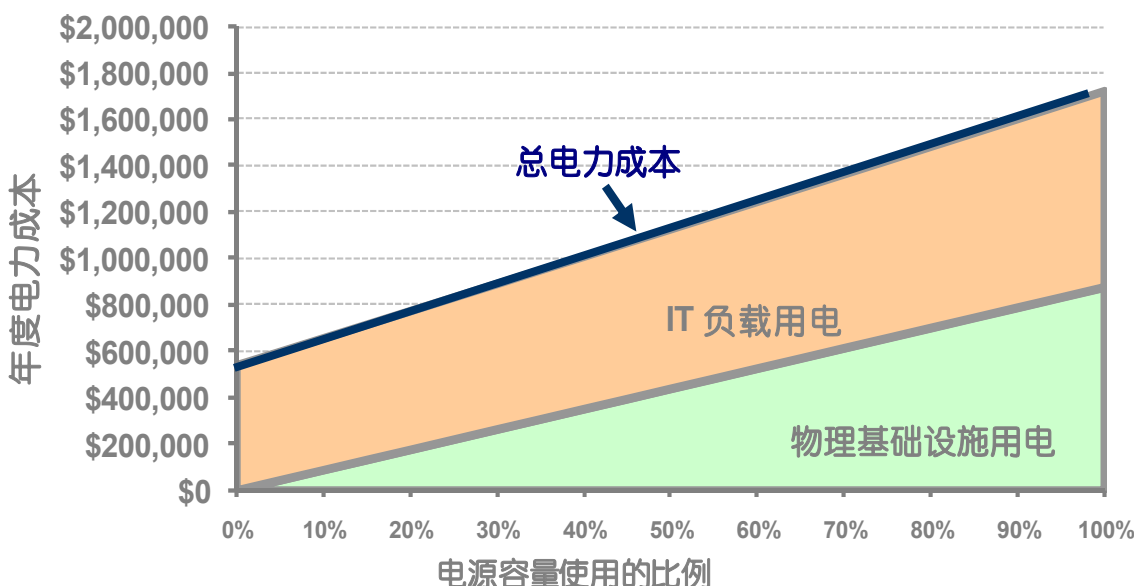


图 11 显示 1 MW 数据中心每年的总电力成本从 600,000 美元到 1,700,000 美元不等，具体取决于 IT 负载规模。请注意，即使没有 IT 负载，由于电源和冷却系统的无效耗电量，每年的成本也超过 500,000 美元。在典型的数据中心的 30% 的容量使用水平下，70% 以上的电力成本是由电源和冷却设备的无效耗电量造成。

提高数据中心效率的益处

模型清楚地表明数据中心主要的电力成本是由基础设施组件的空载损耗造成的，它在典型情况下超过了 IT 负载的能耗。值得注意的是，传统分析中忽略了空载损耗；事实上，通过查看产品规格可以发现，设备制造商通常不提供有关电源和冷却设备的空载损耗的重要规格参数。

通过对数据进行分析，可以迅速发现减少损耗和提高数据中心工作效率的机会，并确定这些机会的优先顺序：

- 最大的节约机会是采用允许电源和冷却基础设施随着负载的增加而增加的适应性、模块化架构，以减少数据中心的过度规划；这带来的节约要远比其他机会为大。**降低损耗的潜力：50%。**
- 提高冷却系统的效率。**降低损耗的潜力：30%**
- 降低数据中心电源和冷却组件的空载损耗。**降低损耗的潜力：10%**

资源链接
第 114 号白皮书
实施节能的数据中心

图 12 显示了提高组件效率和减少过度规划所带来的相对效率益处。有关效率益处和效率提高机会的更详细讨论，是 的第 114 号白皮书《实施节能的数据中心》的主题内容。

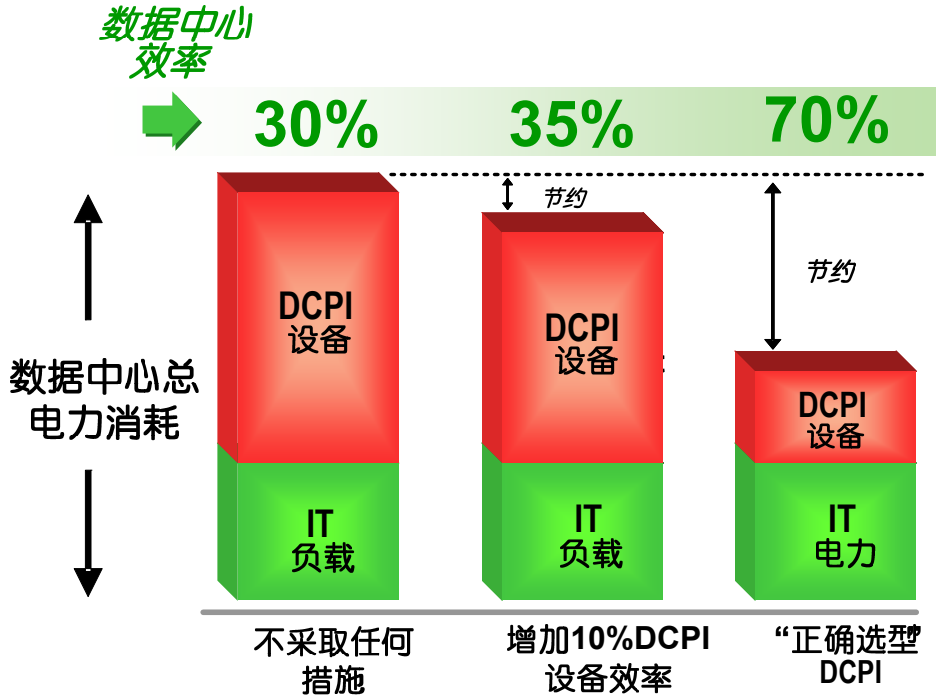


图 12
提高数据中心效率的益处

结论

传统的数据中心效率模型通常夸大了效率，因为这些模型无法正确理解设备过度规划的程度，也无法理解大多数数据中心在低负载下工作时效率的下降。一个经过改进的模型提供了有关数据中心效率的更准确的数值，并探讨了在哪些方面发生损耗和如何减少损耗。

典型的数据中心所消耗的电能是 IT 负载的两倍以上。与这种能耗有关的成本在系统总拥有成本中占相当大的比重。凡是不属于 IT 设备所需的能耗都是不可取的，而且其中很大一部分是可以避免的。

数据中心过度规划是数据中心无效耗电量的最大根源，这表明能够随 IT 负载的增加而变化的可扩充的解决方案提供了减少电能浪费和电力成本的重大机会。典型 1 MW 数据中心在其典型的 10 年生命周期中潜在的电力成本节约大致为 2,000,000 美元至 4,000,000 美元。

由于数据中心的无效耗电量消耗了大量电能和电力成本，减少这些损耗应该对所有数据中心所有者都至关重要，并且是重要的公共政策问题。



关于作者

Neil Rasmussen 是施耐德电气旗下 IT 事业部—APC 的高级创新副总裁。他负责为全球最大的用于关键网络设备（电源、制冷和机柜等基础设施）科技方面的研发预算提供决策指导。

Neil 拥有与高密度数据中心电源和制冷基础设施相关的 19 项专利，并且出版了电源和制冷系统方面的 50 多份白皮书，其中大多白皮书均以 10 几种语言印刷出版。近期出版的白皮书所关注的重点是如何提高能效。他是全球高效数据中心领域闻名遐迩的专家。Neil 目前正投身于推动高效、高密度、可扩展数据中心解决方案专项领域的发展，同时还担任 APC 英飞系统的首席设计师。

1981 年创建 APC 前，Neil 在麻省理工学院获得学士和硕士学位，并完成关于 200MW 电源托克马克聚变反应堆的论文。1979 年至 1981 年，他就职于麻省理工学院林肯实验室，从事飞轮能量储备系统和太阳能电力系统方面的研究。



资源

点击图标打开相应
参考资源链接



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

第 37 号白皮书



确定数据中心和网络机房
基础设施的总拥有成本

第 6 号白皮书



实施节能的数据中心

第 114 号白皮书



浏览所有 白皮书

whitepapers.apc.com



浏览所有 TradeOff Tools™ 权衡工具

tools.apc.com



联系我们

关于本白皮书内容的反馈和建议请联系：

数据中心科研中心

DCSC@Schneider-Electric.com

如果您是我们的客户并对数据中心项目有任何疑问：

请与您的 **施耐德电气** 销售代表联系