

制定数据中心 功率密度规范的 指导原则

作者: Neil Rasmussen

120 号白皮书

APC[®]
Legendary Reliability[®]

摘要

制定数据中心功率密度规范的传统方法不仅含糊不清，而且容易误导用户。使用 W/ft^2 或 W/m^2 来描述数据中心的功率密度不足以确定数据中心的供电或制冷能力是否满足高密度计算负载（例如，刀片式服务器）的要求。在以前，没有一种明确而标准的方法可用来指定数据中心在高密度负载条件下实现可预期的行为。一个适当的数据中心功率密度规范应该能够确保数据中心符合预期的高密度负载的要求，能够为设计、安装供电和制冷设备提供明确的指示，能够防止过度规划，并能够使用电效率最大化。本白皮书就制定数据中心供电和制冷基础设施规范的改进方法在科研领域和实际生产中的应用进行了说明。

简介

为数据中心和服务器机房制定工作功率密度规范是 IT 人员正在面临的巨大挑战。如果对数据中心采用传统密度规范 40-80 W/ft² (430 - 861 W/m²), 则会导致无法可靠地部署最新一代的 IT 设备。如果对数据中心采用最新一代高密度 IT 设备的 600-1000 W/ft² (6458 – 10764 W/m²) 工作功率密度规范, 则会导致数据中心的供电和制冷技术极限受到严峻挑战, 此外还会导致极高的成本和较低用电效率。

由于在设计数据中心时必须确保其能够渡过若干个 IT 更新周期, 但又无法预知未来要安装的 IT 设备的特性, 因此密度规划问题就变得更加严峻。

制定数据中心密度规范的传统方法是采用 W/ft² 指标, 这对于回答当前数据中心操作员所面临的关键问题没有任何指导意义。特别是, 传统的功率密度规范不能回答以下关键问题: “当机架部署超出功率密度规范时会发生什么情况?” 这是一个非常实际的问题, 因为当前典型数据中心的功率密度为每机架 1.5 kW, 而典型 IT 设备却具有每机架 3-20 kW 的更大功率密度。

因此, 需要采用新的、更完善的方法来制定数据中心功率密度。改进的方法必须能够满足以下要求:

- 确保数据中心符合高密度 IT 设备的需求
- 避免电力、空间或资金的浪费
- 能够提供一种方法, 用于根据设计的制冷和供电能力检验 IT 部署规划是否适当

本白皮书着重阐述了制定功率密度规范的改进方法。有关如何构建数据中心以便为高密度应用实施供电、制冷和管理的问题, 在其他一些 APC 白皮书中进行了阐述, 其中包括 APC 46 号白皮书“超高密度机柜和刀片服务器的功率和冷却”。

各种密度规范的制定方法

由于功率密度在文献中没有统一的定义, 这导致在用户群中产生了很大的混乱。为了更好地理解这些定义, 请以下面假设的 500 kW 数据中心为例:

500 kW 数据中心的参数	英制	公制
IT 设备消耗的总功率	500,000 W	
IT 设备占用的总面积	2,800 ft ²	260 m ²
用于安放制冷设备、开关设备等的面积	1,400 ft ²	130 m ²
数据中心的总占地面积	4,200 ft ²	390 m ²
每个 IT 机架的占地面积	6.7 ft ²	0.622 m ²
机架的数量	100	

表 1 列出了五种常见的功率密度定义，以及将定义应用到上述数据中心时得到数值。

**表 1 — 应用到同一数据中心时
不同的数据中心功率密度定义产生不同的数值**

密度定义	计算方法	密度	说明
IT 设备的功耗除以所有 IT 设备机柜的占地面积	500,000 W / (6.7 ft ² × 100 机架)	746 W / ft ²	此方法只包含机架的占地面积，没有包含机架周围供人员活动的面积以及其他网络关键物理基础设施所占用的面积。用此方法计算出的密度值大大高于其他方法算出的值。设备制造商通常使用此方法。
	500,000 W / (0.622 m ² × 100 机架)	8039 W / m ²	
IT 设备的功耗除以数据中心的总占地面积	500,000 W / 4,200 ft ²	119 W / ft ²	数据中心的总占地面积包括 IT 设备的面积和供电、制冷设备室的面积。此方法对于规划使用空间非常有价值，因为它包含了隔间面积。在高密度安装中，隔间会占用很大的面积。建筑设计人员通常使用此方法。
	500,000 W / 390 m ²	1282 W / m ²	
IT 设备的功耗除以所有 IT 设备机柜及其四周间隙占用的面积	500,000 W / 2,800 ft ²	179 W / ft ²	这是文献中最常使用的定义。通常使用每机架 28 ft ² (2.6 m ²) 的面积值。这是确定供电和制冷分布要求的有效方法。IT 人员通常使用此方法。
	500,000 W / 260 m ²	1923 W / m ²	
IT 设备、供电设备和制冷设备的总功耗除以数据中心的总占地面积	(500,000 W + 295,000 W) / 4,200 ft ²	189 W / ft ²	此定义通常用于设备和公共设施的规划，因为它使用了数据中心的总占地面积和总电源消耗。假定制冷设备耗用 265 kW，其中包含供电系统的 30 kW 无效耗电量和其他无效耗电量
	(500,000 W + 295,000 W) / 390 m ²	2038 W / m ²	
机架的功耗	500,000 W / 100 机架	5 kW / 机架	此方法按每个机架计算，因此消除了定义功率密度时的许多变化因素。

表 1 中列出的所有密度定义在已发表的文献和规范中都有使用。如果没有对面积和功率所涵盖范围的明确解释，就使得这四种采用 W/ft^2 或 W/m^2 指标的定义存在明显的差别。但是，已公布的密度值通常遗漏了这些信息。这在业内引起了很大的混乱，并导致 IT 人员和设施的设计、规划人员之间常常出现误解。表 1 中的数据清晰地显示出由于采用了不同的密度定义，同一设施的密度规范变化了几乎 8 倍。

最清晰的密度定义是“每机架”功耗。该定义为机架的供电和制冷要求（对 IT 设备来说，以瓦特表示的机架功耗等同于以瓦特表示的制冷要求）提供了明确的指导。本白皮书还指出了“每机架”功耗定义在制定数据中心密度规范时的另一个主要优点，也就是它是制定数据中心中密度变化规范的最有效方法。

在实际的数据中心中，功率密度并不完全一致。有些机架消耗较多的电力，因此会比其他机架产生更多的热量。配线板机架可能不消耗任何电力。刀片式服务器可能消耗 20 kW 或更多的电力。由于 IT 设备总是在不断更新，这意味着特定机架的功耗有可能随时发生变化，这使问题变得更加复杂。传统的密度规范并没有完全考虑到这些功率变化，因此随着时间的推移这些规范会渐渐失效。

传统密度规范方法的限制

下面的两个示例说明了传统密度规范的一些严重限制：

在第一个示例中，假定数据中心的密度规范为 $50 W/ft^2$ ($538 W/m^2$)。如果采用“总 IT 负载 / 总 IT 机架面积 + 四周间隙面积”的密度定义，该值相当于每机架 $1400 W$ ($50 W/ft^2 \times 28 ft^2 / \text{机架数}$)。数据中心设计为可提供每机架 $1400 W$ 的最大供电能力和 $1400 W$ 的制冷能力，即可满足此要求。有很多种 IT 设备（如，刀片式服务器）的功率密度超过了每机箱（排） $1400 W$ 。这些种类的设备都不能部署在具有每机架 $1400 W$ 严格限制的数据中心中。这会导致数据中心与很多种 IT 设备不兼容。此外，由于所有机架都有 $1400 W$ 的供电和制冷限制，如果机架中安放的是配线板等低功率负载，其中未使用的电力也不能被其他机架中的设备所利用。最终的结果是产生了一个低效率的数据中心——不仅与很多 IT 设备不兼容，而且无法有效地利用可用的机架空间、供电或制冷能力。

在第二个示例中，数据中心的功率密度规范因机架而异。对于每个机架位置，都会规定具体的功率和制冷指标。可以实施设计方案以满足此规范，并且数据中心的各项指标可提前预知。这是一个理想的解决方案，但是几乎没有任何一个实际的数据中心可以提前提供准确的机架级功率规范。在实际的数据中心中，机架级负载在安装阶段无法预知。如果实际 IT 部署密度与原始机架级规范不一致，就会产生严重后果，其中包括由于所有机架都有供电和制冷限制，当部署了低于机架功率规范的 IT 负载时，该负载未使用的电力也不能被其他机架中的设备所使用。最终的结果是产生了一个低效率的数据中心——它要求提供有关未来 IT 部署的信息，而此类信息通常无法获得。

这两个示例都采用了制定数据中心密度规范的常用方法。无论是房间级的总规范还是因机架而异的准确规范，在实际实施过程中都存在严重的限制，因此无法达到客户的预期要求。制定规范的改进方法必须能够保持灵活性和与 IT 负载的兼容性，与此同时能够确保供电效率最大化并充分利用所提供的供电能力、制冷能力和空间。

密度规范要求

在前面的论述中，对密度规范的改进方法提出了几点要求，其中包括：

可预知性： 密度规范必须能够为任何计划安装或实际安装的 IT 设备确定任何机架位置上的供电和制冷能力。

能够接受部分指定的未来要求： 密度规范不能要求必须预知每个机架位置的准确功率需求。实际上，IT 设备的使用周期远远小于数据中心的使用寿命，并且它们经常被新的、不同的设备所取代。

能够支持供电和制冷能力的借用： 特定机架的可用功率和制冷能力的未利用部分，应该能够被其他机架所利用。

尽量减少浪费： 应当能够尽量减少无效耗电量。充分利用可用的供电、制冷能力和空间。尽量减少投资和运行成本。

支持分阶段部署： 密度规范必须能够支持分阶段部署，包括不同阶段有不同的密度的情况，以及在早期部署时对未来部署阶段的数据无法获知的情况。

尽管上述的某些要求有相互冲突的地方，它们仍可作为建立数据中心功率密度规范的改进方法的基础。

实际约束条件和其他选择方案

任何制定功率密度规范的切实可行的方法必须考虑数据中心设计中所包含的实际约束条件和其他选择方案。下面对其中一些约束条件和其他选择方案以及其对密度规范的影响进行了论述：

配电增加： 配电的成本和复杂性并不与功率线性相关。例如，18kW 三相电源的成本并不一定是 6kW 单相电源成本的三倍。通过将电路断路器与插座相匹配以及通过电路断路器的故障协调功能，AC 配电获得了很多功率优化能力。这些问题以及有关优化的配电电路方面的问题在 APC 29 号白皮书“Rack Powering Options for High Density”中进行了阐述。在制定与配电有关的规范时，必须着重考虑这些优化电路的大小，这些大小因所在位置而异。

空气分配限制：数据中心中的空气分配是限制机架功率密度的主要因素。IT 设备要求空气流量在每 kW 100 到 160 cfm (47.2 - 75.5 L / s) 之间。很多数据中心因为本来就有高架地板或者因为天花板高度的缘故使高架地板的高度受到限制。如果高架地板是空气分配系统的一部分，那么可按照预期要求在地板之下通过的空气量会受到实际限制，进而限制了可达到的平均及峰值机架功率密度。对于许多现有的设施，实际平均功率密度会限制在每机架 5 kW 左右。要超出此密度限制，就必须安装额外的补充空调和/或分配设备。由此得出的结论是成本增加的速度可能高于关键功率密度增加的速度。适当的密度规范应该能够预见到此问题并在问题实际发生之前加以解决。

重量：有些设施，特别是原来就安装了高架地板的设施，具有地板承载限制。具有极高功率密度的 IT 设备通常也会产生较大的机架重量。某些时候，这是对高密度部署能力的非常实际的限制。由此得出的结论是在制定密度规范时应该考虑是否会超出相应的设施地板承载限制，以避免所指定的功率密度毫无意义。

预留的地板空间：很多数据中心为功率密度以外的其他目的预留了一些地板区域。例如，磁带存储区、操作人员工作区或特殊访问区。由此得出的结论是在密度规范的模型中必须保留这些区域，不能将其用作与实施高功率密度供电或制冷有关的目的。

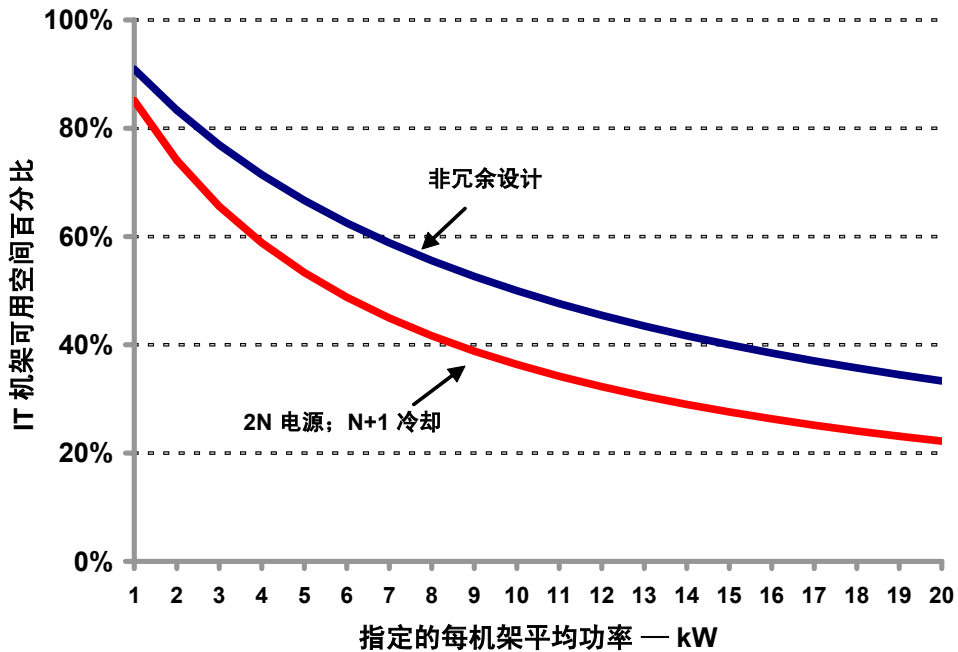
具有分散负载的能力：由于光缆的广泛应用，对大多数 IT 设备而言，在数据中心中分散 IT 设备实体是一个切实可行的选择。在很多情况下，不需要也没有必要以可达到的最高密度来部署设备。诸如刀片式服务器和 IU 服务器等高密度设备可以很容易地分散到多个机架，以降低密度。尽管在机架中填满刀片式服务器或 1U 服务器似乎是优化了空间利用率，但在很多情况下这只是一中错觉。此外，为使机架达到高密度供电和制冷要求而付出的成本通常远远大于使用额外的机架所花费的成本。其结论是建立密度模型时不应该盲目地根据设备能力来指定密度值，而是应该考虑分散负载的可能性，以便优化整个系统的成本和可用性。

特定场所的实际空间限制：特定场所的实际物理空间限制极大地影响了高密度的总体价值。对于许多具有低密度设计的现有设施，高密度部署的确缓解了空间紧张的压力。但是，压缩 IT 空间所带来的好处并不是很大。另一方面，有些设施由于地板面积极其昂贵或根本无法获得，因此在物理面积方面受到很大约束。由此得出的结论是在制定密度规范时必须考虑到地价和所有空间方面的硬性限制。

供电和制冷基础设施导致的空间损失

供电和制冷基础设施占用了原本可被 IT 设备所利用的空间。有些时候，会将供电和制冷设备从 IT 设备所在的区域中移出并安放到邻近的房间。但是，无论如何这些设备还是占用了空间，因此必须算在可实现密度的有效损失中。供电和制冷基础设施占用的空间可以用等同的机架数量来表示，并且此空间会随着供电和制冷能力需求的增加而增加。图 1 显示了这种影响的效果。

图1 — 平均机架密度规范对
IT 机架可用空间百分比的影响



注：此图中的曲线是通过附件中的公式计算得到的。

此图清晰地显示了 IT 设备可使用的空间随着所指定的 IT 设备每机架平均功率（功率密度）的增加而减少。水平轴是所指定的室内每机架的平均功率。垂直轴显示了可用机架位置占室内面积的百分比，室内面积由于供电和制冷基础设施（包括 UPS、配电单元和机房空调）而受到损失。图 1 下部的曲线适用于具有双路 (2N) 电源和冗余 (N+1) 机房空调的系统。这是高密度应用的典型设计方案。注意，对于目前使用中的每机架 1.5 kW 的典型数据中心，大约损失了 15% 的地板面积。但是，随着指定密度的增加，空间损失也大幅度增加。当指定的每机架平均功率超过 7kW 时，50% 以上的空间被供电和制冷设备所占用，而无法用于安放 IT 机架。如果实际密度远低于指定密度，则这种空间损失无关紧要。尽管如此，供电和制冷设施还是占用了空间。由此可以得出高密度设计方案的一项指导原则：**为数据中心指定高于实际需要的高密度将会不必要地减少 IT 设备的可用空间**。除了导致成本和运行费用增加之外，这是另一个严重的问题。因此，有效地规划密度并且只在需要时才部署高密度供电和制冷系统这两点是至关重要的。

将空间细分为不同密度区域

前文所述的要求明确提出了为数据中心不同区域指定不同的功率密度的能力要求。这样才能实现允许各阶段有不同密度的分阶段部署。另一种方法是按照可预期的未来最大负载来制定整个数据中心的规范。这种方法是不切合实际的，因为它可能会导致投资成本和运行成本不必要地增加 3 到 8 倍，并且严重降低用电效率。

即使只有单一阶段的部署，将数据中心划分为不同的密度区域也有很多好处。例如，刀片式服务器和存储器之间有很大的密度差异，将它们分别安置到具有不同密度规范的规划区域，尽管数据中心的总功率负载并没有改变，但仍可以带来很大好处。如果服务器和存储器的机架位置是随机且不可预知的，则在规划供电和制冷分配系统时必须确保能够在任何位置提供最大密度。但是，如果事先为存储系统确定了较低密度区域，那么在该区域就可以降低供电和制冷分配系统的容量。从而降低了投资和运行成本并同时提高了用电效率。

可以通过在平面规划图上将机架分配到不同区域来定义数据中心中的不同密度区域。但是，**建议您最好不要随意划分区域，而总是以行为单位进行划分，每一行由一组不同规格并排摆放的机架组成。**选择行作为定义功率密度区域时的首选单位有以下几点原因：

- 很多机架配电架构都是以行为基础的
- 很多机架制冷架构都是以行为基础的

这表明，在定义功率密度要求和所需的部署递增量时，行将是首选的、最经济的划分级别。因此，本白皮书的后面部分将着重讲述如何以行为级别定义密度变化。

部署策略

在定义密度规范要求时，必须充分考虑到随时间变化的 IT 负载以及分阶段部署。必须就供电和制冷基础设施随时间的变化作出一些假设。

那种认为现有配电和空气分配系统将随着 IT 负载的变化而改变的想法是不切实际的。修改这些系统（例如修改使用中的电路或水管）可能需要一组机架甚至整个数据中心的停机，或产生这样的风险。很多资料表明人为错误是造成数据中心停机的主要原因，而对运行中的设备进行修改是造成停机的主要因素。**因此，最好的方法是按照行或区域安装供电和制冷分配设备，在该行或区域的工作生命周期内不再对其进行变更或重新配置。**

在具体实施此最佳方法时，应采用如下所述的部署策略：

- 采用标准过道间隔在平面图上安排机架/机柜行列
- 确定行的设计密度规范，然后构建可支持该密度规范的完整行。
- 如果要部署的设备符合现有行的设计规范技术参数要求，而且该行有空余位置，则可将设备部署到该行。
- 如果要部署的设备与有空余位置的行的密度有显著不同，**不要为了将设备部署到该行而修改供电或制冷系统，而是应该建立新的一行以满足更高密度的要求。**

- 随着时间的推移，应该将很少使用的机架行彻底拆除并按照符合当前需求的不同密度规范来重新建立。

由于此策略可将与修改数据中心使用中的机架行有关的人为错误降到最低，因此我们强烈推荐您采用此策略。此行之有效的策略的确为密度规范设立了一条限制，即机架行系统的供电和制冷分配在安装后就不能改变。

注意，市场上有一些供电和制冷分配产品允许重新配置供电和制冷架构而不会造成停机的风险。例如，APC InfraStruXure 系统可以：

- 通过添加可热插拔的模块来改变 UPS 功率输出
- 通过添加可热插拔的机架配电单元来改变机架中的插座类型和容量
- 通过插入式架装设备来增加补充冷却气流的容量

此类设备提供了一些附加的灵活性，允许在安装之后进行修改，因此特别适用于不适合进行分阶段、分行部署的小型设施。

行或区域内的峰值密度和均值密度

尽管，如果每个机架具有绝对相同的负载功率可以简化密度规范，但是先前的讨论显示，这是一个不可能实现的目标，因为在实际安装中几乎不可能做到这一点。事实上，机架密度的范围可能在零（配线架）到 30 kW（高密度刀片式服务器）之间变化。这种变化对有效的密度规范的特性产生了巨大影响。

由不同功率的机架组成的特定机架行或区域中，平均机架功率将低于最高机架功率值。因此，行内的机架功率峰值/均值比实际上往往比一大或等于一。非常有益的做法是考虑多种替换方法来指定机架行的功率密度设计，以便在行内支持具有不同机架功耗的一组机架。

将行内所有机架的功率都设计为峰值。指定行密度的一个方法为，指定行中的任何机架或所有机架的功率和制冷密度容量为机架功率的最大预期峰值。在这种情况下，总制冷容量和功率容量必须按照所有机架都可以达到最大功耗的假设情况来确定其规范。这必然会导致实际功率和制冷容量规模过大，因而导致资金和操作成本的增加，同时降低了电气效率。如果每机架功耗的峰值/均值比等于一，则上述这些不利之处都可以避免；但是，如果行内的每机架功耗峰值/均值比为 1.5 或更高，则上述问题都会出现，另外，这个规范最糟糕的情况就是没有考虑到可降低每机架功耗的峰值/均值比的情况，即最大值功率机架产生的负载可能呈分散分布。一般来说，在机架峰值功率最差的情况下指定整体行密度并不是最优选择，除非每个机架的功率峰值/均值比非常接近 1，但是在一般安装中，出现这种情况的几率非常低。

将行内所有机架的功率设计为平均值。指定行密度的另一个方法为，指定所有机架的功率为平均功率密度。和前一个方法一样，这个简单的方法并不令人满意，但导致不满的原因却不尽相同。这个方法要求在任何机架负载可能超过均值时，减少设备直到机架的负载等于或小于均值。此外，这个方法还存在实施上的限制，实际密度低于指定设计密度的机架所产生的未使用的功率和制冷容量并不能给其他机架产生额外的功率和制冷容量。这是因为行的设计仅仅是为了让每个机架的功率和制冷最大能达到平均值。考虑下列情况：某个 IT 操作人员想要在设计容量为每机架 2 kW 的行中部署一个 4 kW 的刀片式机箱。有人可能会认为从未使用的机架中引接一个 2 kW 的电源插座（如果可行）至刀片式机箱是一个可行的办法。但是，为这 4 kW 的负载制冷却成为一个问题，因为制冷系统的设计容量在 2 kW 以下。另外，由于其中一个机架的电源被其他机架占用，因此这个机架也不再可用。

比较上述两种情况的要求，我们可以得知，有效密度规范的一个重要因素为**应当指定行内的机架功率峰值/均值比，并且该比值应当大于 1**。如何选择适当的机架功率峰值/均值比取决于实际机架的预期变化。图 2 中显示了典型数据中心设计的限制和假设这二者的关系：

图 2 — 对于不同的机架间实际密度的变化，机架密度的峰值/均值比对电源和制冷设备的总拥有成本产生的影响

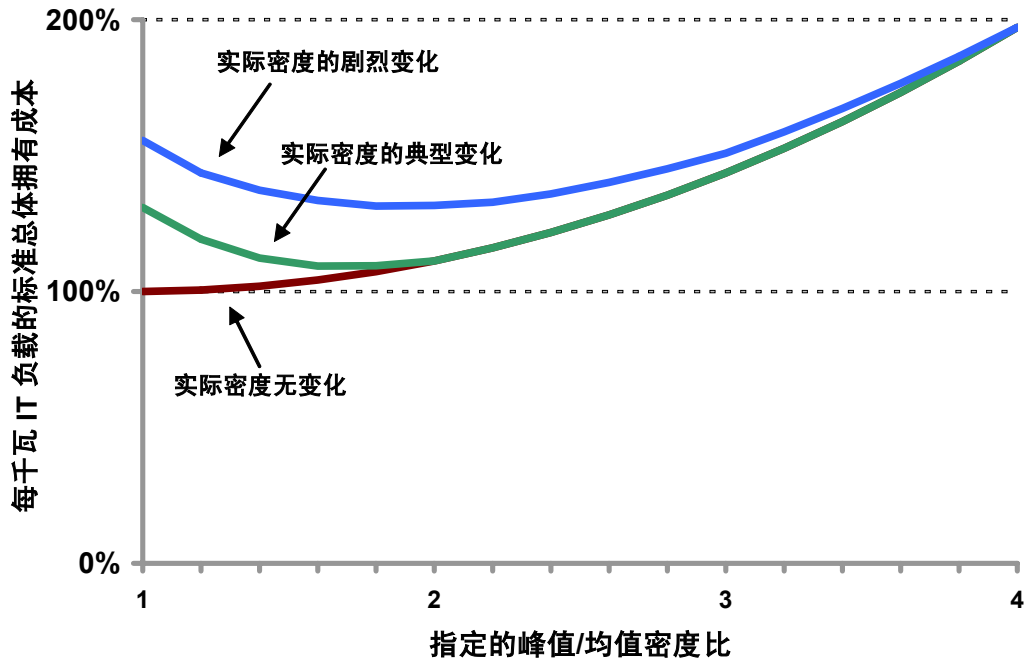


图 2 显示已安装的 IT 设备中，在三种不同的实际机架功率变化的情况下，机架密度规范的峰值/均值比是如何影响电源和制冷基础设施的标准总拥有成本 (TCO) 支出的¹。数据显示，在所有机架具有相同功耗的情况下，机架密度峰值/均值比等于一时，TCO 为最佳（最低）。这种效应的解释可归因于指定额外的峰值功率密度容量会增加功率和制冷分配的支出，但在所有机架都具有相同功耗时不会导致总拥有成本增加。但是，如果实际安装的机架功率不同，峰值/均值比没有增加时，则会增加总拥有成本。这是因为存在无法使用的功率和制冷容量，同时，指定的 IT 设备需要增加地板空间，二者共同产生了这种效应。结果是，机架密度的峰值/均值比大于 1，在实际安装中可获得最佳的 TCO。

这就引出了有效制定数据中心密度规范的另一个重要因素：**在典型的设计中，行内的机架功率密度峰值/均值比应当大约为 2，如果行内的预期实际机架功率密度峰值/均值比大于 2，建议在机架间分散最大密度的 IT 负载来限制峰值/均值比，或将无关的负载重新分配到其他行。**

基于规则的密度规范

如果某行或某区域中的均值和峰值机架功率密度设计已经指定为经预见可实施的规范，则该规范可行。如果峰值机架功率接近平均值，则可直接实施。但是，如果行内的机架峰值/均值比接近 1.5 或更大，则实施该设计的挑战和成本都将增加。确保只要不超过平均功率值，任何机架都可以在峰值功率的水平上操作，在使用高架地板送风系统的安装中，这样造成的问题可能会成为非常严重的限制。如果在密度规范中允许使用基于规则的密度部署，可获得的整体均值和峰值功率密度都可以提高。

要理解基于规则的规范所解决的问题，请考虑将机架功率密度的峰值/均值比设定为建议的 2 时，在现有高架地板制冷系统中安装机架的情况。从电源系统这方面来看，在最大机架密度下，每个机架都必须拥有一定的功率配额，而机架则通过 PDU 或 UPS 来供电，其额定值为平均机架密度乘以 IT 机架的个数。这个方案实施起来非常简单。但是，从冷却角度看，每个机架并不具有定义良好的空气分配系统，其额定值为平均机架密度的两倍。要在密度超过均值时操作机架，必须从邻接的低于均值密度的机架中借用未使用的容量。在使用具有有限通风容量的高架地板时，这就意味着在行内分散高密度机架会显著降低制冷系统上的局部超负荷。如果规范具备建立行内高密度机架位置规则的能力，则可以在系统限制范围内获得较高的峰值和平均值密度。

具有简单规则的示例为，机架仅可以超过均值额定功率的量为相邻机架平均功耗低于均值的量。更复杂的规则可以用来最大化已知安装中可预见的功率密度，并且这些规则可以在功率和制冷管理系统中实施²。

¹ TCO 支出包括电源和制冷设备的资金支出及其 10 年的维修、占地空间及电费支出。根据设计和局部利用情况，每机架的总拥有成本在 \$50000 - \$90000 美元之间。请注意，UPS 和冷却器的费用不受峰值/均值比影响，TCO 的变化主要受电源和制冷分配系统的费用的影响。

² 在管理系统中实施制冷密度规则属于 APC Corporation 的未决专利。

针对未来的增长指定密度选择

很多数据中心并不是一次完全建成，而是随着时间的推移不断扩展。在这些情况下，并不需要总是提前为尚未规划的行或区域指定密度。任何指定数据中心密度的实际方法必须考虑未来的需求，因为密度需求难以预测，因此需要尽可能地保留将来密度的选择。理想的做法是，将部署电源和制冷基础设施的费用预算和相关事务尽可能延后进行。另外，数据中心以后的扩展并不会影响已经投入使用的 IT 设备的可用性。

常用的办法为提前规划电源和制冷基础设施，以便支持预先定义的功率密度。这样做好处是，预先安装设备可确保在以后进行 IT 部署时，不需要在已运行的数据中心中再做主干电源的部署。但是，这个方法还存在多个不利的影响，包括：

- 当以后的 IT 密度超过电源和制冷基础设施的密度时，更改或进行重新部署是很困难的
- 当以后的 IT 密度低于电源和制冷基础设施密度时，必然会造成主要基础设施投资的浪费
- 基础设施从来没有扩展，或由于某些规定或其他商业问题而导致在另一个位置进行了扩展，因此造成主要基础设施投资的浪费
- 近期内数据中心的负载远远低于电源和制冷基础设施的额定容量，导致电气效率的显著降低和不必要的大量电费花费
- 提前安装目前不需要的电源和制冷基础设施，造成不必要的设备资金支出和维护合同成本

有效的密度指定模式可以通过将电源和制冷基础设施定制为模块化的大小可调的设计和实施方式来避免以上这些问题。实施这种架构时要求预先安装主供电配电路，如行或区域范围内使用的电源设备和制冷设备。昂贵的电源和制冷基础设施的安装则需要延后，如 UPS 系统、PDU、机架、行内的配电设备、空调及空气分配设备。区域或行内支持的具体密度将在延期后具体部署时确定，并且电源和制冷基础设施将按行部署或以行为基础来部署。APC InfraStruXure 系统是此类结构的实际示例。

这个讨论引出了建议密度规范方法的另一个主要因素：**需要在将来部署的数据中心行或区域进行规划时，应充分考虑在最坏情况下的最大密度值，并要求主要的电线和管线应当预先安装并支持此密度；但是对这些行的实际电源和制冷设备的选择应当延后到确定了部署密度和规划之后再行进行。**这样，电源和制冷设施的主要成本将控制在实际应用的合理范围内，并且在需要的位置和时间进行部署。这样就可以大大减少资金投入和操作成本，建造更具有能源效率的数据中心。

模式

现在可以建构一种功率密度规范模式来满足前面所述的要求，并解决实际操作中的约束和限制问题。

该模式包含下列关键因素：

- 创建的数据中心物理布局以成行的机架或机柜为基础
- 对于每一行，要求达到**表 2**所示的数据

表 2 — 机架范围内要求的数据

数据	单位	说明	主要用途
机架位置号	#	行内的机架位置号。包含所有位置，	用来确定行的总电源和制冷要求
行内的机架功率均值	kW / 机架	由指定行内的 IT 机架显示的每机架功率密度均值。必须为机房内的每行都指定	用来确定整行的总电源和空气分配要求
行内的机架功率峰值	kW / 机架	由指定行内的任一 IT 机架显示的每机架功率密度峰值。必须为机房内的每行都指定	用来确定机架范围的电源和冷却分配系统的设计

- 对于要在以后部署的行，应当指定最有可能出现的平均和最高机架功率，在实际部署之前降低这些值只会对规模过大的主要电源布线和管线系统产生非常小的影响
- 从上述信息中，可以计算出**表 3**所示的数据

表3 — 计算得到的密度数据

数据	单位	说明	主要用途
可用的 IT 机架总数	#	设计的可用 IT 机架数，以及分配给电源或制冷基础设施的所有机架位置最终数目	用来确定用于规划目的的可用总电源和 IT 机架空间
总的最初功率要求	kW	IT 机房的功率和制冷要求，不包含以后的部署	用来确定当前电源和制冷基础设施投资要求
总的最终功率要求	kW	在最后最坏的情况下，机房的电源和制冷要求。	用来确定电源设施的规模，包括电源开关、电线及制冷铅管
峰值功率密度	kW / 机架	任何一行内的最高功率密度	用来建立制冷分配架构
数据中心平均功率密度	kW / 机架	数据中心的密度范围	用于和其他常用单位进行换算，如 W/ft ² 或 W/m ² 。这种转换根据在表 1 中选择的定义而定

使用这个方法定义密度的最复杂的问题就是机架位置的确定，这是部署电源和制冷基础设施必须要解决的问题，如不确定则会产生 IT 设备无法使用的情况。1 个机架位置被电源和制冷基础设施所占，合理的密度估算参考值为每个 IT 负载 15 kW。根据从现有的 1N 和 2N 数据中心安装中得到的经验，这个参考值的得出包括了电源和制冷设备和相应的空间要求。精确值将取决于选择的电源和制冷基础设施、机房限制和系统供应商提供的指导原则。以 APC InfraStruXure 数据中心系统为例，可以使用 APC 提供的计算机辅助设计工具，对每个房间设计进行计算。

使用操作指南

使用已说明的模式来指定密度规范并不能保证得到最佳的机房设计。用户对机房布局的选择、对机房本身的设计以及用户对密度要求的估计都可能影响最终安装的效果。但是，使用这种模式可得到很多的好处，包括：

- 和其他一般用过的规范方法相比，它可提供更完全和更精确的数据中心密度说明
- 按照此规范建造数据中心具有更多可预见的性能
- 该模式非常具体，因而各种成本（包括资金投入和操作成本）都可以快速估算，进而可以加快设计周期并对替换情况进行分析
- 支持调整数据中心部署规模的模块化系统，由此可显著提高电气效率并降低 TCO。

对于所说明的密度规范方法的实际应用还包括：

- 比较替换数据中心地点或机房位置的 TCO
- 估算在规划中或现有的数据中心中增加密度的成本
- 提供可让 IT 用户易于理解的可清楚确定密度预期要求的规范，以便 IT 用户、数据中心操作员以及数据中心供应商可以确定相同的预期要求

在计算机辅助数据中心设计工具中实施密度规范方法可以加速自动化规范和设计的流程。

数据中心规范示例

下面以示例说明如何使用规范模式来设计实际的数据中心。在这个示例中，首先必须提供一个机房，必须在机房中确定所有 UPS、配电和冷却系统的位，由于净空限制，没有高架地板。将要部署的各种网络设备包括刀片式服务器、机架安装式服务器、存储设备和网络设备。将刀片式服务器放置在一起，不要分散摆放。根据估算，当前的要求是填满机房空间的一半。机房保留的剩余空间的部署密度将超过目前部署密度的 20%，其容量至少可以支持 3 个刀片式服务器机架，据估测每个机架的功率为 25 kW。可用性要求主要针对非冗余电源和制冷系统。

图 3 显示机房的大致轮廓，其中包含建议的机架布局，整个机房共有 41 个机架位置。根据说明，第 1、2 和 3 行将会立即完成部署，而第 4、5、6 和 7 行将在以后进行部署。对目前规划的部署进行审视可以指定行中诸如电力设备等的位置以减少行内的峰值/均值比，并分配位置以便按照要求在第 2 行将刀片式服务器摆放在一起。第 1、2、3 行机架范围的规范已经写入**表 4**。

图3 — 建议的数据中心平面图布局，含建议的机架布局
(APC InfraStruXure Build-Out Tool 软件中的图像)

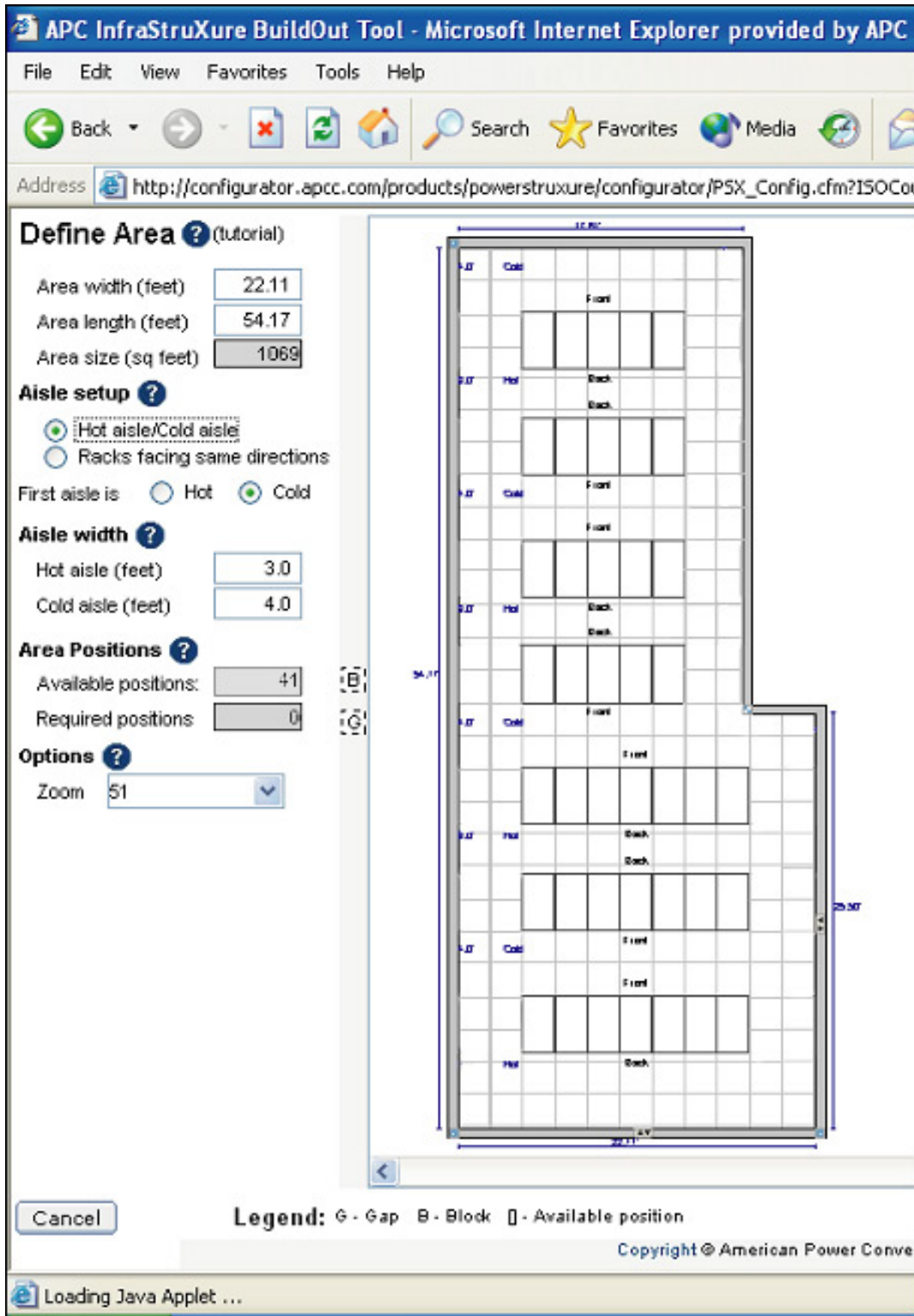


表4 — 建议的数据中心行密度数据

数据	单位	行 1	行 2	行 3	行 4	行 5	行 6	行 7	整体
机架位置号	#	7	7	7	5	5	5	5	41
行内的机架均值	kW / 机架	2	5	3	4	4	4	4	3.7
行内的机架峰值	kW / 机架	4	15	6	15	15	15	15	15

从这些信息可以计算出第一次部署的平均密度为，每机架 $(2 \times 7 + 5 \times 7 + 3 \times 7) / 21 = 3.3$ kW。如果其他行的规划密度超出 20%（尚未指定这些行的详细部署），则可计算出整体数据中心平均密度为，每机架 $(2 \times 7 + 5 \times 7 + 3 \times 7 + 4 \times 5 + 4 \times 5 + 4 \times 5 + 4 \times 5) / 41 = 3.7$ kW。给以后未定的行指定较高的峰值密度 15 kW，将在以后对这些行进行设计和变更时享受极大的灵活性。表 4 说明第 4、5、6 和 7 行的未来规范。在以后的行中应用较高峰值的唯一结果是限制主要制冷和电源设备的规模。

使用图 1 对电源和制冷设备最后占用空间的首次估算为，机架密度为 3.7 kW 时保留 30%，相当于 13 个机架（ $30\% \times 41$ 机架）。从这一点来看，根据密度规范，最终可用的 IT 机架为 70%，即 28 个机架。

建议的服务器的密度规范在表 4 中表述，表 5 显示了计算值。

表5 — 建议的数据中心机房范围计算值

数据	值	单位	备注
可用的 IT 机架总数	28	#	数据中心中的某些空间被电源和制冷设备占用
最初的总功率要求	47	kW	最初必须安装至少 47 kW 的电源和制冷设备。使用图 1，根据行 1、2 和 3 的密度，可用 IT 机架空间的数目分别为 6、4 和 5（ 6×2 kW/机架 + 4×5 kW / 机架 + 5×3 kW / 机架 = 47 kW）
最终的总功率要求	104	kW	剩余的电源和制冷设备有 60 kW 之多，延迟到剩余的行确定之后安装（ 28 IT 机架 \times 3.7 kW / 机架 = 104 kW）
峰值功率密度	15	kW / 机架	在这么高的密度下进行制冷会缩小可选择的范围并增加成本。在实施此密度的设计之前，应当考虑进行进一步分散峰值负载的尝试
数据中心平均功率密度	3.7	kW / 机架	指定的此数据中心的功率密度为目前数据中心平均密度的两倍多。比数据中心当前的密度小 2%

接下来的步骤是根据设备和系统设计的性质，建立电源和制冷设备的实际位置。这个过程由具体设备的复杂算法模式、优化规则和客户的偏好习惯而定。针对不同的电源和制冷设备供应商，这个过程也各不相同，因此这里不再详述。理想状况下，在最初的部署中，只设计必需的电源和制冷设备，但在实际安装中却需要包含和实施在将来规划的电源和制冷设备，以部分满足指定的将来部署规划。例如，在部署的第一阶段确保主要电源布线和冷却管线已预装在将来的机架中。请注意，尽管目前为以后的行指定了机架密度的平均值和峰值，但是这些值可以在将来实际进行部署之前随时更改，只要整个区域的总功率不超过目前规划的值。

结论

传统的说明数据中心密度的方法可归结为一种粗放、不完整和不明确的方法。这些传统的方法无法提供规划指导来确保能够预见数据中心将来在最新一代的高功率密度 IT 设备下的电源和制冷性能。

本文概述了密度规范的要求，并介绍了制定密度规范的一种新方法。该方法提供了可实施的规范，可让 IT 员工和设备设计者之间明确交流各种要求，并加速了可预见成本效益和电气效益的数据中心的创建。

关于作者：

尼尔·莱斯姆森 (Neil Rasmussen) 是 American Power Conversion 的创始人和首席技术执行官。在 APC，尼尔领导着研发预算额居全球第一的研发团队，从事关键网络的电源、冷却和机架基础设施的研究，主要的产品研发中心分布在马萨诸塞州、密苏里州、罗得岛州、丹麦、台湾和爱尔兰。目前，尼尔正带领 APC 开发模块化的可扩展数据中心解决方案。

尼尔于 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，其学位论文是有关 Tokamak Fusion 核反应堆的 200MW 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。

附件：决定数据中心机架空间中最终可用的电源和制冷设备所占的比例

图 1 所示的图像目的在于在负载功率和电源/冷却设备容量之间建立一种平衡，其中

P_I = IT 设备电源

P_N = 电源和制冷设备容量

D_I = kW/机架位置的 IT 设备密度

D_N = kW/机架位置的电源/制冷设备密度

R_N = 电源和制冷设备占用的机架位置编号

R_I = IT 设备占用的机架位置编号

R_T = 空间内的总机架位置编号

$$P_N = P_I$$

$$R_N D_N = R_I D_I$$

$$R_N = \frac{R_I D_I}{D_N}$$

但是, $R_N = R_T - R_I$

因此, $R_T - R_I = \frac{R_I D_I}{D_N}$ $R_T = R_I \left(1 + \frac{D_I}{D_N} \right)$

$$\frac{R_I}{R_T} = \frac{1}{\left(1 + \frac{D_I}{D_N} \right)}$$

这个最终公式产生了图 1 所示的函数。 D_N 的值取决于实际使用的具体电源和制冷设备以及冗余配置。