

超高密度机柜和刀片服务器散热策略

作者：Neil Rasmussen

白皮书 #46

APC[®]
Legendary Reliability[®]

第4次修订版

概要

应用高密度信息技术设备如刀片服务器可以使每个机柜的功率达到10kW以上。这同时给数据中心带来散热难题，因为目前数据中心环境的行业每个机柜的平均功耗在2kW以下。本文中讲述了五种应付超高功率机柜散热问题的策略，包括新建的和现有的数据中心的实用的解决方案。

介绍

单个机柜中的设备的耗电情况会有很大差异。数据中心的一个机柜的平均耗电量约为1.7kW，但高密度服务器如刀片服务器机柜能够达到的最大功率达20kW以上。这种负载大大超出了一般数据中心的供电和散热设计能力。

数据中心管理员几乎没有管理功率在10kW以上的机柜的经验，但是最近的趋势表明，许多用户将不得不面临安装刀片服务器并为高功率密度机柜提供电力和散热能力的问题。

这个问题回答起来很简单——提高数据中心的供电和散热能力，使它能够为每个机柜提供20kW的冗余电力和散热能力。不幸的是，这在技术上是不可行的或者经济上不切实际。为数据中心安装高密度服务器时做出错误的选择会使物理基础设施的生命周期成本增加数倍，造成不必要的浪费。这一白皮书的目的就是为高密度机柜和刀片服务器的应用拟定切实可行而且行之有效的策略。

本文首先回顾了功率密度的概念。接着分析了目前和新建数据中心的实际功率密度值，并提供了实现高密度的实用的方法以及这些方法的局限性和好处。最后，介绍了应用高密度计算的合理而且实用的策略。

明确定义数据中心的功率密度

描述功率密度时人们可能会有严重的误解，因为“功率密度”这个术语的意思是非常含糊的。功率密度常用每平方英尺多少瓦或每个机柜多少瓦来表示。当所有的机柜消耗的电力相同时这种简单的描述是比较充分的。但是，在实际的数据中心中，每个机柜的功耗会有很大差别。在这种实际情况下，以机柜为单位、以列为单位和以房间为单位进行衡量得出的功率密度会有很大不同。以机柜、列和房间为单位测量得出的功率密度的差异对电力基础设施支持系统的设计有重大影响，对散热系统的设计会有更大的影响。

图1中显示了以机柜、列和房间等不同级别上测量得出的功率密度的不同。在图中，一个机房中安装了许多12kW的机柜。在第一情况下，机房中15%的机柜功率为12kW，其余为1kW。在第二种情况中，同样比例的机柜功率为12kW，但这些机柜集中在一系列。第三种情况下，机房中所有的机柜功率均为12kW。所有上述几种情况中，功率密度峰值都是每个机柜12kW，相当于480瓦 / 平方英尺（5.2kW / 平方米）。但在这种情况中，列和机房的功率密度有很大的差异。

图1 - 三种不同配置下的机房中的功率密度（按单位面积、每个机柜、每列和每个房间的瓦数进行比较）

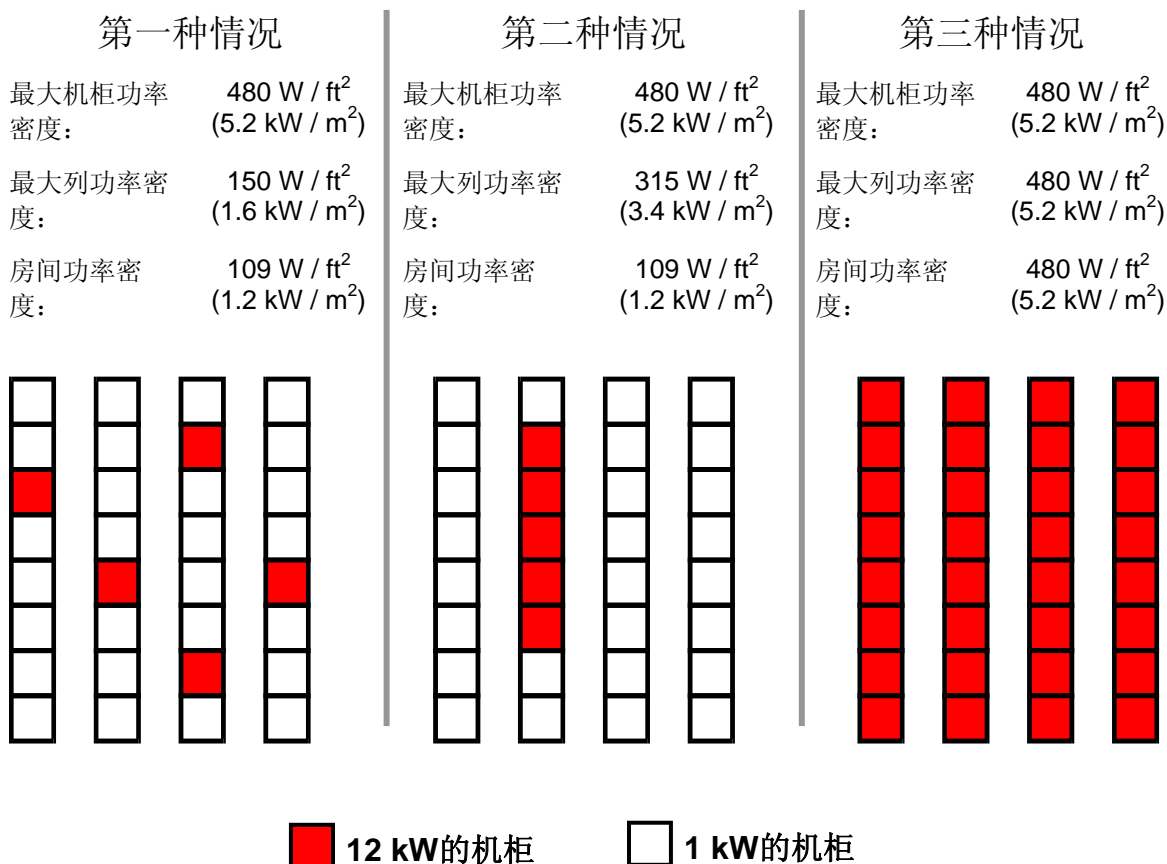


图1中反映出的机柜、列和机房级别功率密度的不同代表了现实机房的情况。这些不同大大影响了电力和散热基础设施的设计。电力和散热系统的总额定值只是负载消耗的电力的总和。这就使得用户很容易就能确定UPS和机房空调的总规模。与功率密度峰值相关的主要问题与数据中心内的功率和空气分配有关。

请注意上述关于功率密度的描述是就总的地面面积而言的，其中包括了过道的空间。这是最常用的描述密度的方式，本白皮书将自始至终使用这一术语。但是，有些资料，特别是原始设备提供商的一些文字资料，用单位面积的瓦数来表示功率密度，而这里的面积只是指机柜的占地面积。用这种基于设备占地面积表述的功率密度数字大约相当于本书表述方法的75%。

目前数据中心的实际功率密度承受能力

APC公司和其它一些机构已经对数据中心设计的设计和管理人员进行了一些调查，以确定新建的和现有的数据中心和大型网络机房目前的在用功率密度和设计极限。表1中列举了2002—2003年从多种不同来源获取的数据，包括企业客户、服务人员和工程顾问。数据中得出的每个机柜的实际功率密度值与加利福尼亚大学最近的调查得出的结果非常接近。

表1 - 关于数据中心设计的功率密度和实际功率密度的调查数据

特征	多个数据中心的平均值	90% 的数据中心低于	调查案例中的最高值
设计的功率密度	35 W / ft ² (0.38 kW / m ²)	60 W / ft ² (0.65 kW / m ²)	200 W / ft ² (2.15 kW / m ²)
实际运行的功率密度	25 W / ft ² (0.27 kW / m ²)	40 W / ft ² (0.43 kW / m ²)	150 W / ft ² (1.61 kW / m ²)
设计的每个机柜功率密度	1.1 kW / enclosure	1.8 kW / enclosure	6 kW / enclosure
实际的每个机柜的平均功率密度	1.7 kW / enclosure	2 kW / enclosure	4 kW / enclosure
数据中心的功率密度最高的列每个机柜的实际功率平均值	2 kW / enclosure	3 kW / enclosure	7 kW / enclosure
数据中心中实际单个机柜功率最高值	3 kW	6 kW	12 kW

注：这里说的机柜包括机柜及设备如DASD和大型计算机。体积大于机柜的设备按与其占地面积相同的多个机柜计算。

这些数据表明数据中心的设计功率密度平均为35瓦 / 平方英尺 (0.377千瓦 / 平方米)，相当于每机柜1.1千瓦——假定每个机柜占地面积为30平方英尺 (2.79平方米)。调查结果中每个机柜的实际平均功率比设计值高是可能的，因为平均起来每个机柜35瓦 / 平方英尺 (0.38千瓦 / 平方米) 的设计密度没有达到。这主要是因为机柜并没有占满整个数据中心的可用空间。例如，一个数据中心的设计机柜功率密度为1.1千瓦 / 机柜 (每个机柜占地30平方英尺，即2.79平方米)，那么如果机柜只占据了数据中心可用地面空间的一半，数据中心的机柜平均密度就可能达到2.2千瓦 / 机柜。

需要注意的是，这里的数据仅适合生产环境。开发和测试环境中可能会出现更高的平均和最大功率密度值。

图2显示了基于调查数据的每个机柜功耗的频数分布。这对了解功率密度的影响因素提供了更多的参考。图中每个条形图案代表条形图底部的千瓦数以下500瓦范围内的机柜的比例。举例说明，标有1.5kW的条包括功率在1kW到1.5kW之间的机柜。

请注意，在图2中，数据中心中有相当数量的机柜功率在500W以下。这些机柜中包括一些控制板以及一些配置低密度开关和低密度服务器的机柜。许多这种机柜中还有许多未用的纵向空间。

还应注意到，在图2中，功率达2kW以上的机柜数量急剧下降，功率在8kW以上的机柜数量微乎其微。

图2-实际机柜功耗频数分布，表明与最大可能的机柜配置的关系

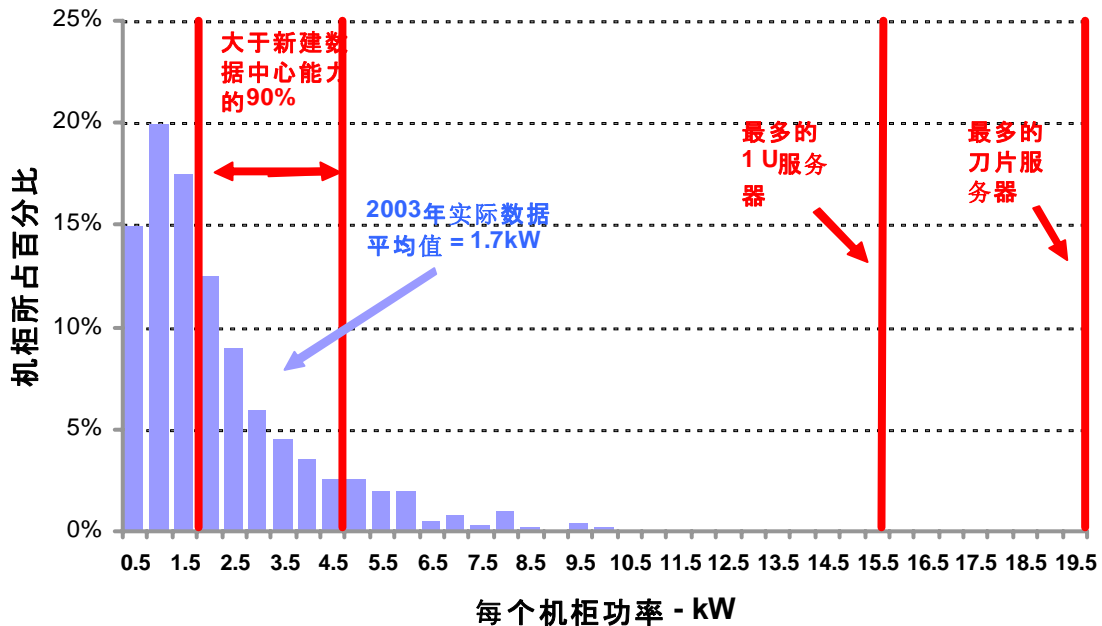


图2的实际每机柜功耗值中还有许多参考线。第一对参考线指示的是依据对工程设计顾问的调查得出的新建数据中心设计的平均功率密度范围。

另外两条线代表用如今最高密度的服务器产品——1U服务器和刀片服务器配置机柜能够达到的功率密度。这些值大大超出了新建数据中心的设计值和现有数据中心的实际值。尽管每个机柜的刀片服务器比1U服务器的功率值更高，但应当注意到在这些功率密度下，刀片服务器的数量大约是1U服务器的两倍，这表明刀片服务器的功耗比常规1U服务器少约40%。

从这些数据中可以得出以下结论：

- 数据中心中的大部分机柜以低于数据中心的设计功率值运行。
- 高密度计算机设备实际上并没有按它能够达到的最大密度安装。
- 相当数量的目前和即将使用的数据中心并没有达到大众媒体中经常谈到的功率密度值

本文中，“高密度”指功率超过3kW的机柜，这里3kW相当于目前数据中心的平均散热能力范围的上限。

高密度机柜的供电和散热设备

举一个例子，一个由6部7U的刀片服务器安装在一个42U机柜中组成的一个非常高密度的机柜，每个刀片服务器功耗为3kW，其总的电力需求为18kw。这意味着必须为这个机柜提供10kW的电力，同时必须提供18kW的散热能力。这一类型的系统一般被认为是关键任务系统，需要具备冗余供电和散热能力。

供电需求

从供电的角度来说，这种6机刀片服务器系统可能需要24个20A的208V或230V供电电路——假定每个双路机柜都采用常用的四线配置方式。与这种电路相关的布线需要占相当多的空间，通常需要从机柜顶部走线以防止在垫起的地板下形成气流阻滞。如果有多个这样的机柜一起放置，情况更是如此。作为另一种选择，如果你采用垫高地板的方式，那么为了适应走线的需要，地板垫起的高度必须要增加。上述任何一种情况都需要安装大量额外的配线，如果这个数据中心正在使用中，这种布线将会是非常复杂而且成本昂贵的。采用这些方法为超高密度机柜提供冗余电力是可能的。

散热需求

为超高密度机柜散热要比为它供电困难得多。前面所说的刀片服务器系统进气口需要大约2,500cfm（立方英尺 / 分钟）（相当于1,180升 / 秒）的冷空气（以排出的气体温度升高20°F [11°C]的常用值计算），从机柜后部也要排出相同数量的热空气。无论散热系统能否提供这么多的冷空气，这些设备都要吸入这么多的空气。如果机房不能为机柜提供这么多的冷空气，机柜中的设备就会吸入自己排出的热空气（或者相邻机器排出的热空气）导致机器过热。要达到所需的散热性能需要四个关键要素：

- 为机柜提供2,500cfm（立方英尺 / 分钟）（相当于1,180升 / 秒）的冷空气
- 从机柜中排出2,500cfm（立方英尺 / 分钟）（相当于1,180升 / 秒）的热空气
- 保证机器排出的热空气远离设备的进气口
- 以冗余和不间断的方式提供所有这些功能

实现这些功能中的任何一项都十分困难。这些困难在接下来的几节中有较详细的叙述。

为机柜提供2,500cfm（1,180升 / 秒）的冷空气

通常地板垫高的数据中心能够为每个机柜提供一个通风地砖。每个通风地砖一般能为一个机柜提供大约300cfm（142升 / 秒）的冷空气。这就意味着一个18kW的机柜需要8个通风地砖，相当于通常为每个机柜分配的数量8倍。为了为每个机柜安排8个通风地砖，机房中通道的宽度需要大大增加，机柜之间的空间需要大大增加。这对于一般的数据中心来说是不可行的。

图3展示了通风地面砖的气流散热能力。随着通风地板砖散热能力的增加，图中显示更高的气流能力是不切实际的。请注意垫高地板为刀片服务器提供的散热能力要比为一般的IT设备提供的散热能力强。这是因为平均来说，同等功率下刀片服务器需要的气流比一般的IT设备少40%。

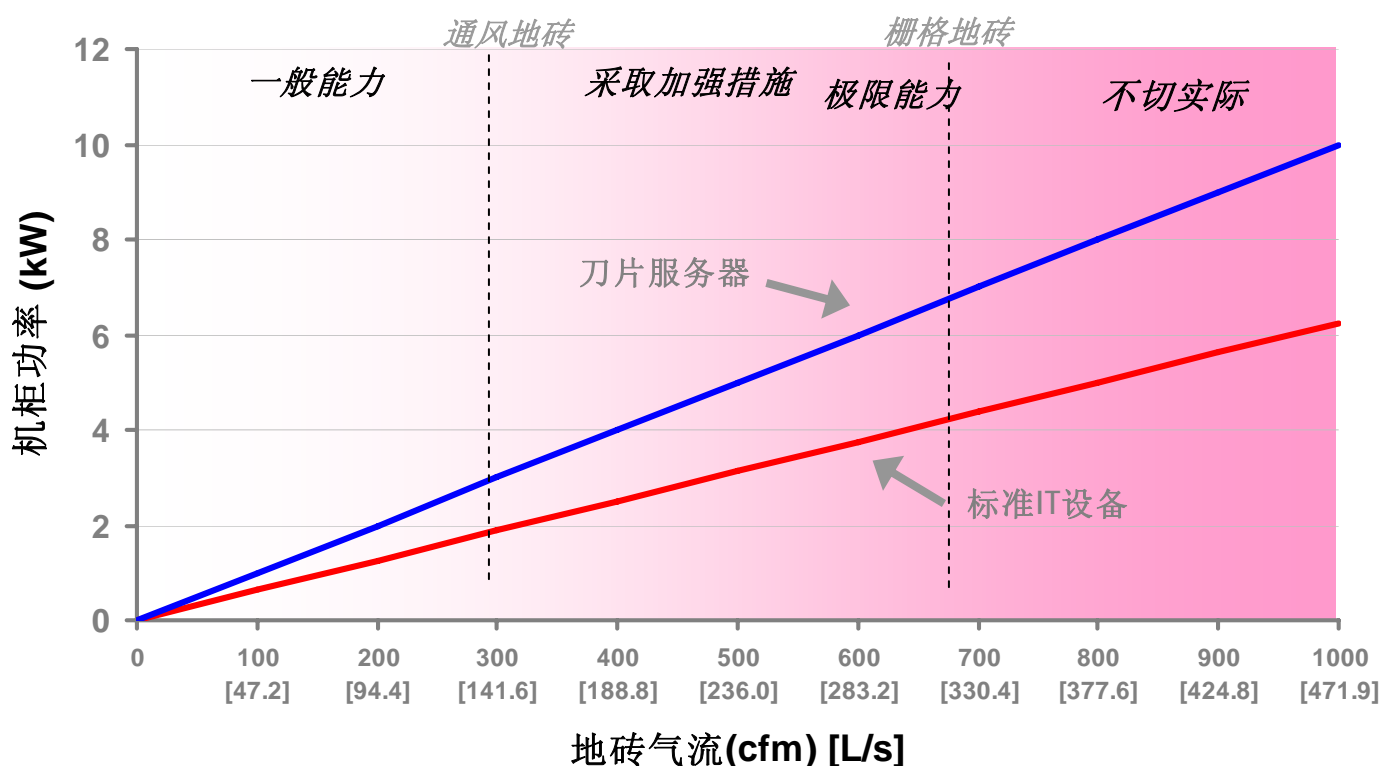


图3 - 地板砖通风气流能够为机柜提供的可用散热能力

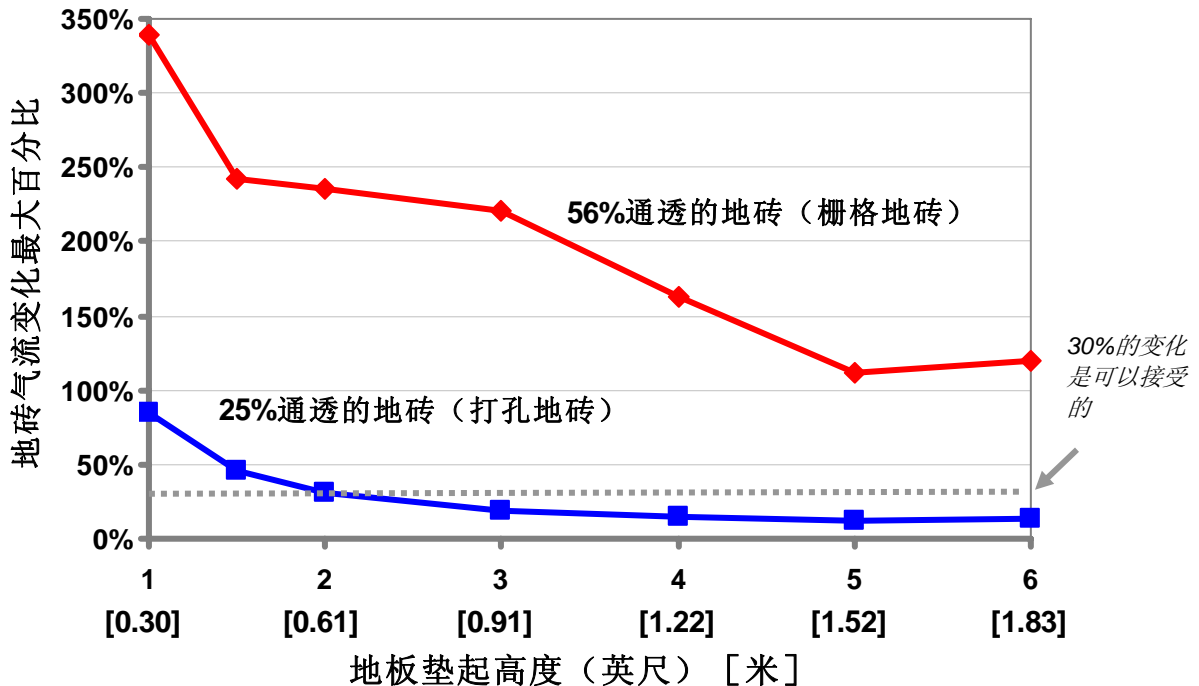
图3表明要使通风地砖的气流达到300cfm（142L/s）以上就需要采取专门的措施，包括对垫高地板进行精心设计、放置CRAC、控制地板下气流阻碍物如管道和电线等。要使每块通风地砖的气流达到500cfm（236L/s）以上需要使用特殊的地板砖，如类似金属栅格设计的地板砖。这种做法能够为一般的数据中心提供每个通风地砖700cfm（330L/s）的气流。但是，使用这些铁格子会大大改变地板下的压力梯度，影响到周围区域的气流。散热能力的均匀性和可预见性会因此受到影响，形成不合需要或不可预见的散热能力极限。

经常会有人建议增加地板垫起的高度会改正多种问题，包括散热能力不均匀的问题。为了对这个问题进行研究，APC使用计算流体动力学（CFD）模拟改变地板垫起高度产生的影响。图4中显示了这一研究得出的一些重要结论。这些数据显示，散热能力有一个变化范围，这种变化与地板垫起的高度相关。正如人们预想的，随着地板垫起高度的增加，每个通风地砖的散热能力会逐渐降低。

但是，研究中有两个令人吃惊的发现。首先，气流流量相对来说对数据没有什么影响。也就是说，通风地砖散热能力的变化是受地砖的几何设计样式控制的，相对来说气流大小对其影响不大。第二个令人吃惊的发现是，使用开放式的地砖后气流的变化极大。例如，对于垫高两英尺（0.61米）的地板，标准的打孔地板气流变化为30%，而栅格形式的地砖为230%。事实上，在使用栅格形式的地砖的情况下，气流有时候会逆流，也就是气流向下流，而不是为IT设备提供气流。

地砖气流的变化是不合需要的，但数据中心内的气流确实会在某种程度上相互均衡和共享，出于这种原因，单个地砖30%的气流变化应被认为是可以接受的。但是，图4中栅格式地砖气流的大幅变化是不可接受的，因为机柜的部分区域可能会得不到足够的散热能力。应进一步注意到增加地板垫起的高度是有好处的，但无论高度多高仍不能解决问题。因此，尽管偶然情况下使用栅格式地砖可能会有帮助，但这些数据表明使用这种地砖对于提高数据中心的整体功率密度能力并不十分有效。

图4 -增加地板垫高度时两种不同通风地砖的气流变化



即使采用“极端”的散热设计，图3表明一个18kW的机柜仍需要3到4块栅格式地砖进行制冷。但是，一般的数据中心规划中只为每个机柜提供一个通风地砖。把这一数据与图4的气流变化数据结合表明以每个机柜一个通风地砖的样式设计的常见的数据中心无法为每个机柜功率达到约6kW以上的机柜进行有效的散热。

从机柜中排出2,500cfm (1,180升 / 秒) 的热空气

有三种方法让空气回到散热系统中：通过房间、通常管理或者通过天花板的压力通风系统。最理想的情况是设备排出的热空气直接回到冷却系统中，没有与设备周围的空气混和或者被吸入设备的进气口的机会。这就需要有一个畅通无阻的回流途径。这里提供一种参考，一个12英寸（30厘米）的圆管携带2,500cfm（1,180升/秒）的空气需要空气流通速率为每小时35英里（56公里/小时）在屋顶最高处中心位置开放较大的通风口就可以提供这种功能。但是，许多数据中心领先回流管道系统或悬挂式顶棚压力通风装置达到空气回流的效果，还有许多数据中心天花板仅比机柜高几英尺，依靠房间内的空气回流散热。这些情况对机房的设计提出的挑战。

对于具体的机柜来说，空气回流能力的可用性是有限的，正如冷空气的供应能力有限一样。和冷空气供应一样，要想在一个持续不变的区域为每个机柜提供高于400cfm（189升/秒）空气回流的能力需要进行专门的工程设计，确保系统具有所需的性能和冗余能力。

保证机器排出的热空气远离设备的进气口

空气到达IT设备进气口最短的途径是从设备本身排气口开始的再循环路径。数据中心设计中最重要的一部分就是冷空气的供应和排出的热空气的回流路径。这对于高密度环境尤其具有挑战性，因为气流速度必须克服气流分配和回流系统的阻力。阻流板（本文后面有叙述）是机柜内空气再循环的有效解决方案。这种以及其它再循环情况在APC白皮书#49“避免妨碍数据中心和网络机房散热性能的错误”中有更详细的解释。

以冗余和不间断的方式提供所有这些功能

在一个高可用性数据中心中，负载在CRAC单元计划中的或计划外的宕机期间必须保持持续运行。这就意味着散热功能必须是冗余的—任何单个CRAC单元关闭时仍能为设备提供散热。在常见的数据中心设计中，多个CRAC单元为一个共享的垫高地板或顶部压力通风装置提供支持，这些系统将所有CRAC单元的输出汇总在整个空气分配系统中提供均衡的压力。该系统旨在在任何一个CRAC单元停止运行的情况下满足气流和散热需求。

当常规数据中心运行中的功率密度增加时，压力通风区的气流就会增加，这种共享的压力通风系统运行的基本想定就会开始崩溃。关闭某一个CRAC单元就会从根本上改变压力通风系统内部的本地气流速度。某单个地板砖的气流甚至会反向流通，气流流向地板底部，发生文丘里管效应的结果。随着功率密度的增加，散热系统在错误情况下的运行变化更具有不可预知性。出于这种原因，高密度安装经常需要使用数值模拟方法（计算流体力学—CFD）进行模拟以确定冗余能力的存在。

不间断散热的概念在高密度环境中同样受到挑战。常规数据中心的散热系统从一个备用发电机获得备份电力而不是靠不间断电源供电。在一般的数据中心中，发电机启动延迟是可以接受的，因为失去5—20秒（发电机启

动需要的时间)的制冷和气流供应引起的温度升高只有大约1°C (1.8°F)。但是,在每个机柜18kW高密度负载的情况下,气温在发电机启动延迟过程中会升高8—30°C (14-54°F),这是不可接受的。因此,在高密度环境中,CRAC风扇和气泵——有些情况下甚至是CRAC单元本身——的持续运行是非常必要的,以确保不间断的散热。让散热系统接入不间断电源系统(UPS)是造成成本增加的一个主要因素,也是应用高密度计算的主要障碍之一。

应用高密度机柜和刀片服务器的五种策略

应用高密度机柜和刀片服务器有五种基本方法:

- 1. 分散负载。** 为整个机房提供为机柜负载平均值提供电力和散热的能力,同时将负载超过平均值的机柜中的负载分散到多个机柜中。
- 2. 基于规则的散热能力转借。** 为整个机房提供为机柜负载平均值提供电力和散热的能力,通过采用一些规则允许高密度机柜借用邻近的利用率不高的冷却能力。
- 3. 辅助散热。** 为整个机房提供为机柜负载平均值提供电力和散热的能力,使用辅助散热设备为功率密度超过机柜设计的平均值的机柜提供所需的散热能力。
- 4. 设定专门的高密度区。** 为整个机房提供为机柜负载平均值提供电力和散热的能力,在房间内设定一个有限的专门的区域提供强散热能力,将高密度机柜限制在这一区域内。
- 5. 全房间制冷。** 为机房内每个机柜提供能够为期望达到的功率峰值提供电力和散热的能力。

下面依次对这些方法进行了探讨,并阐述了每种方法的利与弊。

方法1: 分散负载

为整个机房提供为机柜负载平均值提供电力和散热的能力,同时将负载超过平均值的机柜中的负载分散到多个机柜中。

这是在今天的数据中心采用高密度设备最常用的解决方案。幸运的是,1U服务器和刀片服务器不需要同时安装同一个机柜中,可以分散配置在多个机柜中。通过将设备分散安装在多个机柜中,任何一个机柜都可以不超出设计的功率密度,因此散热性能是可预测的。

请注意在多个机柜中分散配置设备会使机柜内有相当大的未被利用的垂直空间。必须用隔板封填充这些空间,防止散热性能降低——如APC白皮书#44“使用隔板提高机柜散热性能”所述。图5中描述了用模块化隔板封闭机柜的实例。

图5-为数据中心气流控制设计的模块化卡锁式隔板 (APC # AR8136BLK)



除了散热外，其它一些因素也常
需的电力或数据可能不可行或不切
阻碍空气的流通，甚至后门都无法关闭。

所
重

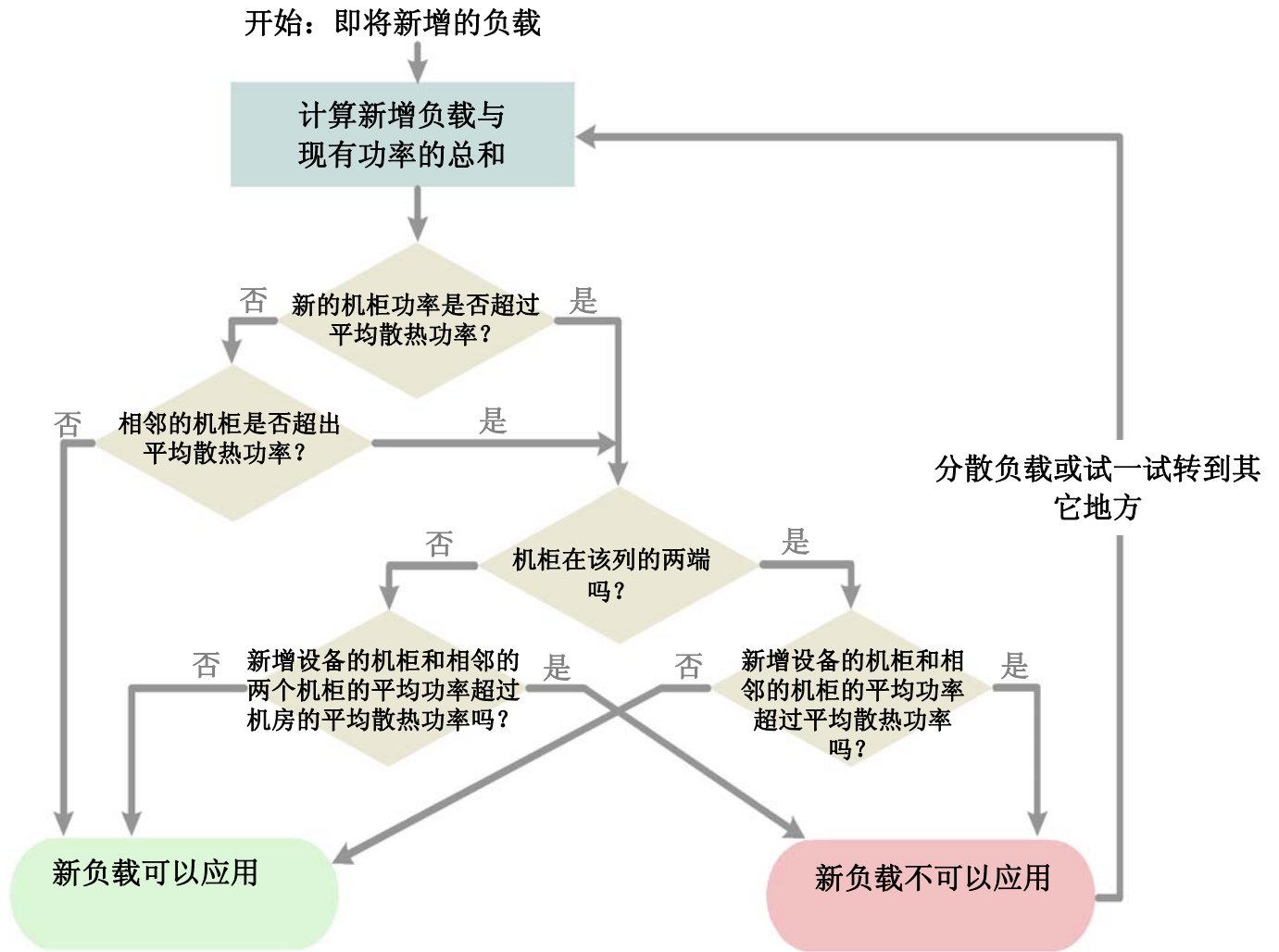
方法2: 基于规则的散热能力转借

为整个机房提供为机柜负载平均值提供电力和散热的能力，通过采用一定的规则允许高密度机柜借用邻近的利用率不高的冷却能力。

这种解决方案在实践中经常被采用但很少有文字记录。这种方法利用了这样一个事实——一些机柜的功耗低能设计的平均值。散热能力和回流能力利用率不高的机柜的散热能力可以让附近的其它机柜使用。象“不要让高密度机柜相互挨在一起”这样的简单规则就会起到一些有益的效果，用户还可以采用一些更复杂的规则，使机柜能够为两倍于设计的平均功率值提供可靠和可预测的散热能力。可以通过以机柜级监控功耗来确定和遵从这些规则。这种功能可以通过管理系统如APC的ISX Manager自动完成。当引进较新的IT设备时——其功耗会随时间的推移发生变化，这种功能的自动实现就显得十分重要。

图6中描述了一种有效的规则的实例，可以按照这种方法实施。这种规则适用于新设备的应用。根据这种规则，紧邻的几个机柜未被充分利用的散热能力可以用于对一个机柜的设备进行散热，这就使得该机柜的功率密度峰值可以超过房间平均散热功率值。在一般的数据中心中，这是一种非常有效的应用高密度机柜的方法，因此经常会有相邻机柜的散热能力未被充分利用的情况。

图6-用于相邻的高密度机柜使用未被充分利用的散热能力的“转借散热”规则的实例



方法 3: 辅助散热

为整个机房提供为机柜负载平均值提供电力和散热的能力，使用辅助散热设备为功率密度超过机柜设计的平均值的机柜提供所需的散热能力。

通常这种方案需要事先对安装进行规划，以便在需要的时间和地点利用辅助散热设备。房间已经按这种方法进行规划时，可以用多种方法对机柜进行辅助散热。这些方法包括：

- 安装特制的（栅格式）地板砖或风扇增强CRAC对机柜的冷空气供应。
- 安装特制的回流管道或风扇从机柜中排出热空气，使机器排出的热空气回流到CRAC。
- 安装专门的机柜或机架式散热设备直接为机柜提供所需的散热能力。

这些方法是APC白皮书#55“关键任务设施的机柜空气分配架构”中讨论的主题。这些方法只是最近才出现，在如今的数据中心中尚未被大量使用。但是，这些方法提供较大的灵活性，经过适当的规划后，直到需要时才需要进行购买和安装。

方法 4: 设定专门的高密度区

为整个机房提供为机柜负载平均值提供电力和散热的能力，在房间内设定一个有限的专门的区域提供强散热能力，将高密度机柜限制在这一区域内。

这种方法需要对高密度机柜部分以及将这些机柜隔离到一个特定区域的能力提前有所了解，在这些制约情况下能够达到最佳的空间利用率。不幸的是，对高密度机柜部分的事先了解通常很难做到。因此，许多用户无法采用这种方案。

当一个专门的高密度区被确定后，用户可以在这个区域采用专门的高密度技术，以便为该区域提供可预测的功率和散热密度。当功率密度超过每个机柜10kW时，气流的不可预测性成了主要问题。解决这一问题的技术是基于缩短散热系统和机柜间的气流路径的原则的。

APC InfraStruXure HD就是高密度机柜群集的模块化高密度供电和散热解决方案的实例，如图7所示。该系统将一系列IT机柜与高密度空调系统和高密度配电系统整合在一个经过测试的单元中。

图7-.数据中心内专用高密度区的模块化供电和散热系统实例。2-12 IT机柜模块，
每个机柜额定功率为20kW

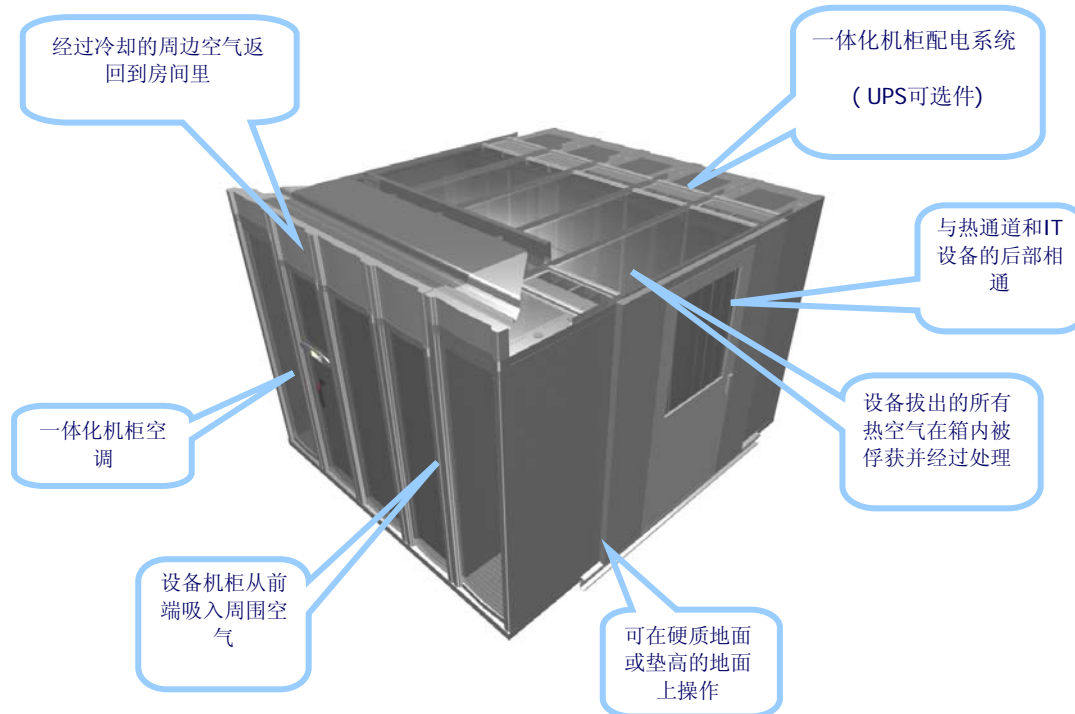


图7中所示系统包含了机柜的一个热通道 / 冷通道布局。该系统的关键运行原则就是通过封闭热通道来控制IT设备排出的所有热空气，然后立即用一个基于机架的空调系统对这些热空气进行冷却。控制热空气再加上较短的气流路径使得系统能够为很高的功率密度进行冷却，同时使得系统体现出高效率。这一系统的性能完全不依赖场地而且地板不垫高的情况下也可安装使用。

在高密度机柜必须放置在一起的情况下，应首选基于多个高密度机柜共处一地的解决方案和采用专门的高密度技术。 **所有其它解决方案均需要一定程度地分散高密度设备。**

方法5：全房间制冷

为机房内每个机柜提供能够为期望达到的功率峰值提供电力和散热的能力。

从概念上讲，这是最简单的解决方案，但从未实现过，因为数据中心每个机柜的功率会有很大的不同，这种解决方案的结果会造成极大的浪费和极高的成本。此外，每个机柜的整体机柜功率密度超过6kW的数据中心进行设计需要极复杂的工程设计和分析。这种方法只有在极端情况下才是合理的。

小结

表 2 中归纳了为高密度机柜提供散热的五种方法的优缺点。

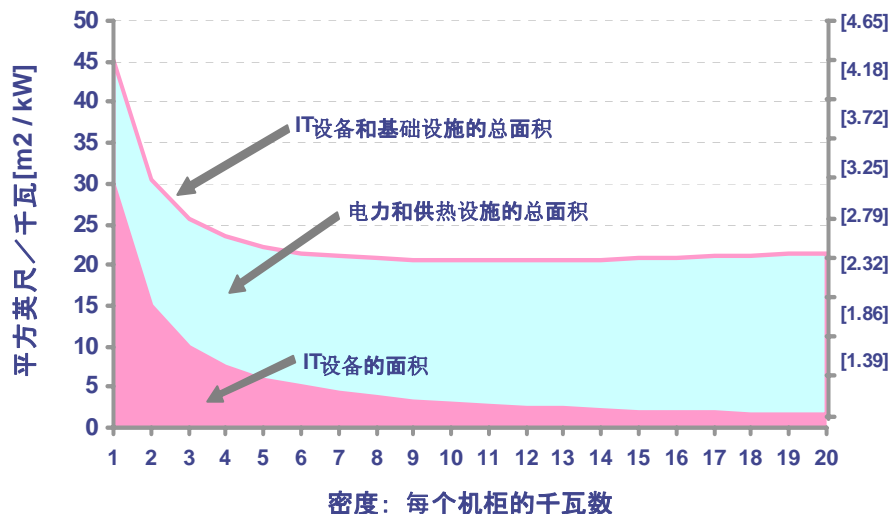
表 2-五种高密度机柜散热方法的应用

方法	优点	缺点	应用范围
1 分散负载 将设备分散到多个机柜中以降低负载峰值	在任何地点都管用，不需要进行规划 多种情况下基本上都适用	高密度设备必须分散放置，甚至要比方法 2 更分散 占用更多的地面空间 数据线的连接可能会有麻烦	现有的数据中心——高密度设备只是总负载的一小部分
2 转借散热 提供均衡的散热能力，同时允许借用利用率不高的散热能力	不需要添加新设备 多种情况下基本上都适用	仅限于大约 2 倍的设计功率密度 占用更多的地面空间 需要按多项复杂的规则实施	现有的数据中心——高密度设备只是总负载的一小部分
3 辅助散热 提供均衡的散热能力，同时增加辅助冷却设备	哪里需要高密度什么时候需要高密度可自由掌握 延缓资本投入 高效率 地面空间利用率较好	仅限于每个机柜约 10kW 机柜和房间必须提前设计好，支持这种方法	新建机房或机房改造 混合环境 事先没有规划高密度设备的位置
4 设定高密度区 在数据中心设一个高密度区	最大限度地提高了功率密度 地面空间的利用率达到最佳 高密度设备无需分散放置 高效率	需要事先规划一个高密度区域，或为设置高密度区预留空间 必须将高密度设备隔离出来	功率密度为每个机柜 10—25kW 高密度设备需要与其它设备同在一个机房 新建机房或机房改造
5 整个机房 为机房中每个机柜提供高密度冷却能力	具有前瞻性，能够应付未来需求	投资巨大，运营费用高达其它方法的 4 倍 可能会导致昂贵的机房设施利用率不高	有限的空间，极多的高密度设备

紧凑的价值

在前面几个章节中，我们找出了与高功率密度安装相关的许多成本问题、复杂性和可靠性障碍。在数据中心中应用高密度设备必须要克服这些问题。但行业出版物普遍预测数据中心紧凑设计不可避免，而且正在向这个方向发展，原因是设备紧凑安装能够节约成本和空间。但是，调查数据并不支持这些看法，相反，数据表明如果不从根本上降低功耗而通过增加密度来提高紧凑度是不划算的。

图 8显示了每千瓦对应数据中心的面积。当IT设备的密度增加时，该设备占用的建筑面积随之降低，如图中较低的曲线所示。但是，电力和散热设施所占的建筑面积并没有相应地减少。功率密度到了大约每机柜2.5kW



后，电力和散热设备占用的面积实际上超过了IT设备所占的面积。结果就是紧密度超过大约每机柜4-5kW不会导致总面积进一步减少。

图 8-每千瓦功率与数据中心面积的比率与机柜密度的关系

人们普遍认为数据中心的成本是受占地面积影响的，通过紧密安装减少占地面积会降低成本，这是紧凑安装的一个基本前提。图9显示了数据中心生命周期的总体拥有成本与IT设备功率密度的关系。当IT设备的密度增加时，人们一般会期望看到总体拥有成本成比例降低的结果，如图中下面的曲线所示。但实际情况却是75%的数据中心总体拥有成本受率影响，只有25%的成本受面积影响。此外，随着功率密度的增加，每瓦的成本也在增加，其原因已在前面解释过了。其结果是总体拥有成本不会随着功率密度的增加而大幅下降，而实际上在达到某一适宜的值后反而会随之增加，这个值是每机柜6kW左右。

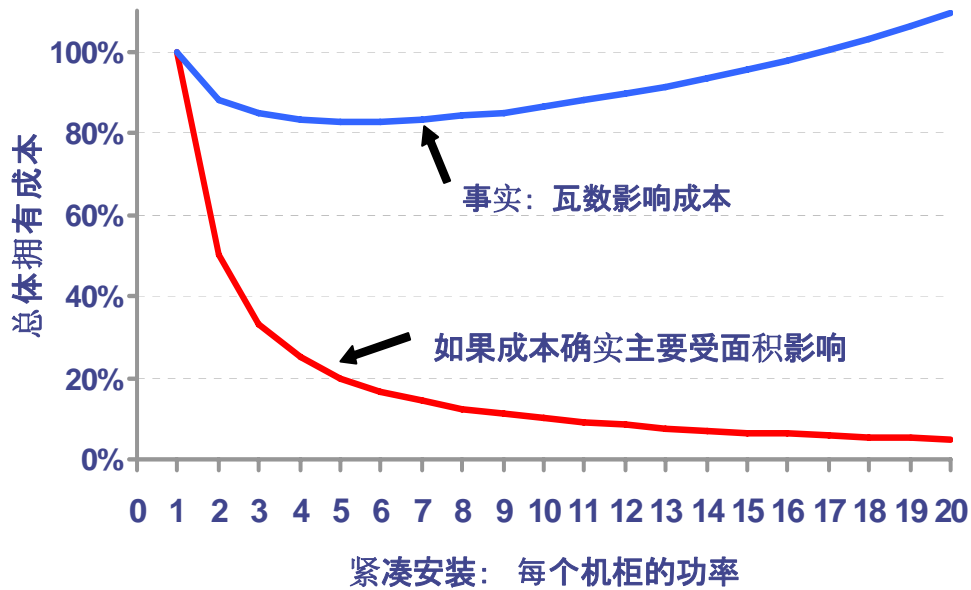


图9-数据中心生命周期总体拥有成本变化与机柜功率密度的关系

增加IT设备的功率密度带来的好处很少。但降低IT设备的功耗会带来实质性的好处，因为正如前面的章节所述，功耗对数据中心面积和总体拥有成本的影响非常大。表3显示了进一步降低IT设备的功耗和体积如何影响数据中心面积和总体拥有成本。与一般的基线情况相比，功率的降低比成比例降低IT设备的体积带来的好处要多得多。

表3-降低IT设备的体积和功耗对数据中心面积和总体拥有成本的影响

改进IT 设备	面积节省	TCO 节省	分析
体积减少50%，功耗不变	14%	4%	没有达到预期的空间节省，因为供电和散热系统占用的相当大的面积 总体拥有成本的节约没有达到预期的效果，因为与功率相关的成本占总体拥有成本的主体
功耗降低50%，体积不变	26%	35%	面积的节约较大，这是节省了供电和散热占用空间的结果 总体拥有成本节约较大，这是因为与功率相关的成本是总体拥有成本的主体

注意：基线情况是指常见的每个机柜3kW，双处理器的2U服务器

由于刀片服务器采用共同的机架基础构造，因此和相同计算能力的常规服务器相比，它们确实能够降低20—40%的电力消耗。这部分节约会大大节约用户的总体拥有成本，因为总体拥有成本主要受与功率相关的成本影响，而不是与IT空间相关的成本。

与人们普遍的观点相反，与网络关键物理基础设施相关的总体拥有成本方面的主要好处来自功耗的降低，而不是占用空间面积的减少。因此没有必要以高密度安装刀片服务器以获得TCO方面的这些好处。

最佳散热策略

从本文提供的信息中，我们可能会找到一种对大多数安装情况都比较适合的最佳策略。这种安装策略结合了本白皮书前面叙述的几种方法，并在表4中进行了归纳。

表4-应用高密度计算设备时优化散热的实用策略

策略各组成部分	目的
1) 忽略IT设备的物理体积，把关注的焦点放在功耗上	这是使占地面积和总体拥有成本最小化的有效途径
2) 对系统进行设计，使之允许以后安装辅助散热设备	这使得用户在以后需要的时候在所需的地方安装辅助散热设备，以应未来不时之需。
3) 为你的最新设计方案从40—100 W / ft ² [0.4 – 1.1 kW / m ²]之间选择一个基线功率密度，80 W / ft ² [0.9 kW / m ²] 是对于大多数新设计方案都比较适合的也比较实用的功率值	应选择一个适当的基线功率密度值以避免因为规模过大造成太大的浪费。通过将功率密度值限制在100 W / ft ² (1.1 kW / m ²)以下来确保系统性能和冗余能力具有可预测性。
4) 当部分高密度负载很高而且可预测时，在数据中心内设定一个专门的100-400 W / ft ² [1.1-4.3 kW / m ²] (每个机柜3-12 kW)的高密度区	当事先了解到需要设立一个高密度区而且分散负载不可行时采用这种措施。这样做会使数据中心设计方案的成本、时间和复杂性大大增加。
5) 确定政策和规则，这样可以根据机柜的位置和相邻的负载确定任何机柜允许使用的电力供应	理解设计方案的能力，再结合供电监控，新设计安装的实施规则能够减少热点，有助于确保散热的冗余性，同时提高系统的散热效率，降低电力损耗。更先进的规则和监控能够使更高的功率密度成为可能。
6) 在需要时使用辅助散热设备	在需要的时间和地方安装辅助散热设备能够使数据中心某一区域的散热能力增强到设计值的3倍，以适应高密度设备的需要。
7) 将不能按这些规则进行安装的设备分开	这是成本和风险最低的方案，但当高密度负载不只是一小部分时这会占用大量的空间。许多空间限制不是很大的用户把这种方法做为他们的主要策略。

结论

最新一代高密度IT设备能够达到的最高机柜功率密度大约是现有数据中心平均机柜密度的10倍。目前的数据中心有极少量的机柜运行时的功率密度达到这一最高功率密度的一半。

由于空气传递和回流系统的局限性以及发电力转换过程中提供冗余和不间断散热功能的困难，数据中心目前的方法和规划无法提供高密度设备所需的散热能力。

当用户的目的是减少数据中心的面积并降低总体拥有成本时，用户应把注意力集中在IT设备的功耗上，而忽略设备的物理体积的大小。出现这种出乎意料的结果是因为功率密度到 $60 \text{ W} / \text{ft}^2$ ($0.6 \text{ kW} / \text{m}^2$)以上后会比IT设备的体积对TCO和机房面积产生更大的影响。

在常规数据中心环境中有效地应用高密度计算设备有多种解决方案。尽管为支持高密度对整个数据中心进行重新设计是不切实际的，但是通过采用辅助散热系统、采用一些规则允许借用相邻的利用率不高的散热能力以及在多个机柜中分散负载，数据中心是能够支持有限地安装高密度设备的。

当计划安装的高密度机柜的比例较大，而且分散负载的方法不可行时，用户唯一的选择就是进行设计，为所有的机柜提供这种能力。常见的垫高地板的设计方案无法为这样的系统提供足够的或可预测的散热能力，用户需要专门的机柜 / 列 / 群集级别的散热系统。

尽管行业杂志中关于数据中心设计密度的讨论认为数据中心的设计功率密度可以达到每平方英尺300—600瓦 ($3.2\text{-}6.5 \text{ kW} / \text{m}^2$)，但达到这一密度仍是不切实际的，原因是达到这样高的功率密度的成本太高，实现高可用性的难度太大。当前的高可用性高性能数据中心在 $40\text{-}100 \text{ W} / \text{ft}^2$ [$0.4\text{-}1.1 \text{ kW} / \text{m}^2$]的范围内是可预测的也是切合实际的，而且通过利用负载的差异性或使用辅助散热设备，数据中心也能应付机柜密度达到设计密度值的3倍的一些少数情况。

关于作者：

Neil Rasmussen是美国电力转换公司（APC）的创始人之一，首席技术官。在APC，Neil负责世界上最大的研发项目预算，该项目用于关键网络的电力、散热和机柜设施的研发。其主要的产品开发中心设在美国的马萨诸塞州、密苏里州、丹麦、罗德岛、台湾和爱尔兰。目前Neil负责领导APC公司开发模块化可扩展数据中心解决方案的工作。

在1981年创建APC公司之前，Neil在麻省理工学院获得了电力工程学学士和硕士学位，在那里他完成了他的关于为托卡马克聚变反应堆200MW供电分析的论文。1979至1981年，他在麻省理工学院林肯实验室工作，研究飞轮能力存储系统和太阳能电力系统。