

关键设备的空调结构 选择方案

作者: Neil Rasmussen

55 号白皮书

APC[®]
Legendary Reliability[®]

版本 1

摘要

在数据中心和网络机房，利用空气制冷设备有九种基本方法。这些方法在性能、成本及实现的难易程度上各有差别。我们将对这些方法及它们的各自优势加以讨论。学会恰当地运用这些冷却技术，不仅对设备管理人员非常有用，对信息系统的从业人员也是非常必要的。

简介

随着计算设备密度的增加，数据中心和网络机房的冷却问题已经凸显出来，成为一个严峻的挑战。一些服务器合并计划，以及服务器和存储系统物理体积上的缩小，已经导致功率密度和热量密度大大提高。尽管在数据中心中，每个机柜通常的能耗保持在 1kW 的量级上，但设备经过配置后，每个机柜的能耗可能会超过 15kW。这超出了一般数据中心的冷却能力，因为按照设计，它们只能可靠地冷却每个机柜 2-3kW 的能耗。此外，在数据中心中引入高密度机柜可能会导致机房内出现“热点”区域，制冷系统可能无法应对这种情况，因为传统的冷却设计假定：在数据中心中，冷却模式是相对均匀分布的。

网络机房或数据中心的制冷系统由计算机房空气调节 (CRAC) 装置和相关的空气分配系统组成。在规模较大的数据中心中，也可以用计算机房空气处理 (CRAH) 装置来取代 CRAC。所有的制冷系统都使用某种类型的 CRAC 或 CRAH 装置，或二者并用，它们在性能上各有不同，但作用都是带走机房中的热量。然而，影响制冷系统性能的最根本因素在于空气分配系统。正是由于空气制冷系统的配置不同，从而决定了不同数据中心将采用不同类型的制冷系统。这正是本章将要讨论的中心话题。

制冷系统的九种类型

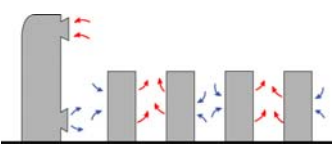
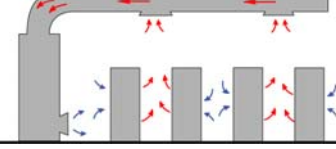
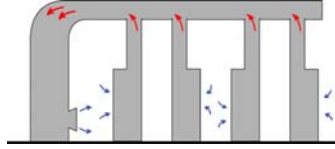
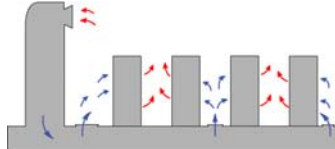
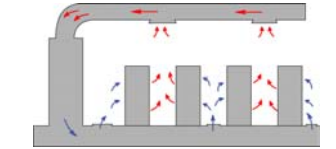
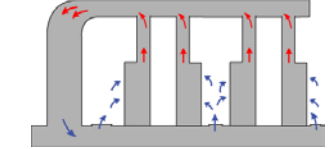
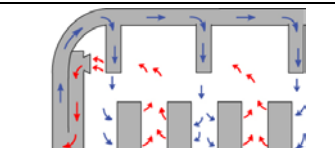
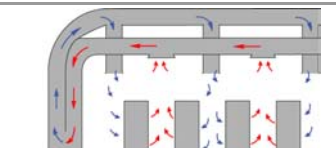
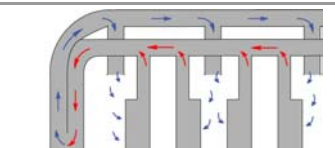
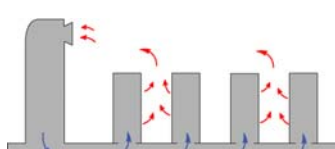
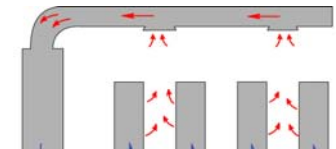
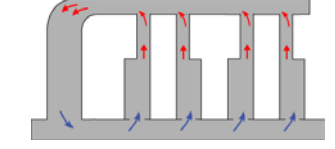
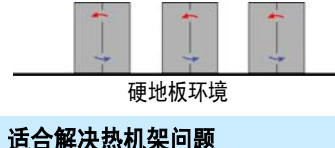
所有制冷系统都由送风系统和回风系统组成。送风系统把冷气从 CRAC 装置分配到负载，而回风系统把负载排出的热气抽回 CRAC 装置。无论是送风系统还是回风系统，在 CRAC 装置与负载之间输送空气都有以下三种基本方式：

- 开启方式
- 局部管道方式
- 全管道方式

所谓开启方式，即 CRAC 和负载直接从房间吸入或排出大量空气，中间不用任何专门的管道来引导。所谓局部管道方式，即通过管道送风或回风，管道的通风孔位于靠近负载处。而在全管道方式中，空气直接通过管道进出负载。

以上三种方式，都可以用在送风路线和回风路线中。因此，共有 9 种组合，即 9 种空气分配系统类型。所有类型都已在不同场合中得到应用，有时还在同一数据中心混合使用不同类型。其中有些类型需要安装高架地板，而有些类型即可以使用硬地板，也可以使用高架地板。这 9 种类型的示意图见表 1。

表1-9 种冷却系统

	浇灌方式回风	局部管道方式回风	全管道方式回风
浇灌方式送风	 <p>小型局域网机房 (功耗低于 40kW) 安装简单 成本低 可冷却功耗最高为 3kW 的机架</p>	 <p>一般用途 可冷却功耗为 3kW 的机架 不需要活动地板 成本低/安装简单</p>	 <p>适合解决高热机架问题 可冷却功耗为 8kW 的机架 可改型 (依厂商而定) 不需要活动地板 可提高 CRAC 装置的效率</p>
局部管道方式送风	 <p>活动地板环境</p>	 <p>活动地板环境</p>	 <p>活动地板环境</p>
	 <p>硬地板环境</p> <p>一般用途 可冷却功耗为 3kW 的机架</p>	 <p>硬地板环境</p> <p>一般用途 可冷却功耗为 5kW 的机架 高性能/高效率</p>	 <p>硬地板环境</p> <p>适合解决热机架问题 可冷却功耗为 8kW 的机架 可改型 (依厂商而定)</p>
全管道方式送风	 <p>一般用途: 有垂直气流的机柜/大型机 适合活动地板静压室环境</p>	 <p>一般用途: 大型机 有垂直气流的机柜/大型机 适合活动地板静压室环境</p>	 <p>活动地板环境</p>  <p>硬地板环境</p> <p>适合解决热机架问题 可冷却功耗高达 15kW 的机架 需要专门安装</p>

注 1: 术语“管道”指任何可用于送风或回风的强制通风装置。全管道回风系统中的管道把排出的热气从机柜尾部抽走。

注 2: 在本白皮书中, 假设冷却每千瓦功耗需要 160cfm (立方英尺/分钟) 气流, 该值是根据当今 IT 服务器的典型气流估计出来的。

表 1 图释了送风方式和回风方式的各种组合。总体而言, 位于该表左上角的冷却系统最为简单, 成本最低; 越往下往右, 管道系统越来越复杂, 冷却系统的成本和复杂性都在提高。

对于数据中心的冷却系统而言，其关键目标之一是把进出设备的空气分离，以防止设备过热。这种分离同时大大提高了冷却系统的效率和性能。当设备功率密度增加时，排出和吸入的空气量也相应增加，这时要阻止设备吸入自身或邻近设备排出的空气变得更加困难。因此，随着功率密度的增加，采用部分管道或全部采用管道将空气引入或引出设备就显得十分必要。

以下对这 9 种冷却系统进一步给出了概括性的陈述。全管道送风系统一般用于活动地板环境，在这种环境中，地板下面的障碍物会导致低静压问题，使冷气无法到达机柜前端，如图 1B 所示。全管道送风系统还应用于具有直接送风管道的专门设备，如大型计算机中。全管道回风系统主要与其他系统组合使用，并可用于混合密度环境。

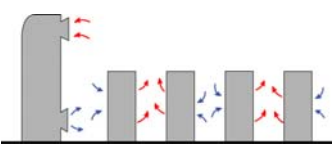
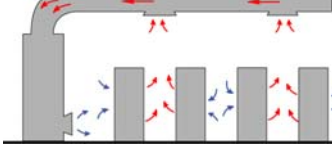
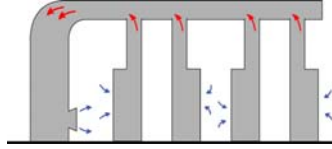
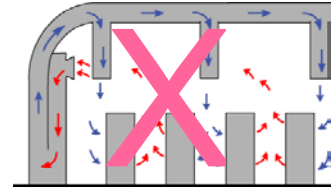
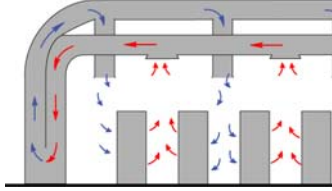
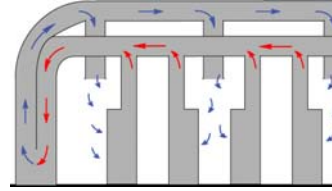
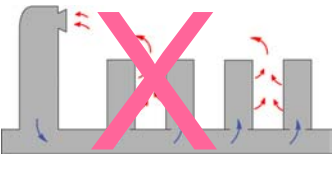
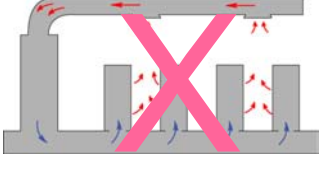
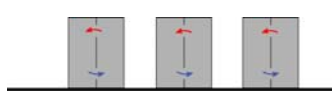
开启方式和局部管道方式的四种组合，占据了冷却系统的绝大部分。为进一步评估这些方法各自的优势和局限性，下文将按以下两大类进行论述：使用活动地板的环境和不使用活动地板的环境。

硬地板环境中冷却系统的类型

虽然一般认为数据中心应使用活动地板，但任何规模的数据中心都可以且常常没有活动地板。绝大多数局域网机房和网络机房都没有采用活动地板。许多较新的大功率数据中心也未使用活动地板。在现代数据中心中，以前那些需要采用活动地板的理由已不复存在，而且使用活动地板还存在许多重大缺陷，诸如专业工程设计、成本、设计时间、净高度要求、抗震性、安全隐患、保密隐患、地板载荷、不便操作以及其他问题。这些问题在 APC 的 19 号白皮书“重新考察活动地板对于数据中心的适用性”中有更详细的讨论。出于这些原因，新建造的数据中心常常使用硬地板，对于小型数据中心和网络机房则一直如此。表 2 列出了硬地板环境中的 9 种冷却系统。

在硬地板环境中，安装局部管道送风系统需要借助架空管道和通风装置，如表 2 第 2 行所示。局部管道送风系统和局部管道回风系统的组合貌似很复杂，但实际上这是商业建筑最常用的冷却方式，在商业建筑里，安装在屋顶的送风栅格和回风栅格散布于冷却空间中。

表 2 — 硬地板环境中的 9 种冷却系统

	浇灌方式回风	局部管道方式回风	全管道方式回风
浇灌方式送风	 <p>小型局域网机房 (功耗低于 40kW) 安装简单 成本低 可冷却功耗最高为 3kW 的机架</p>	 <p>一般用途 可冷却功耗为 3kW 的机架 不需要活动地板 成本低/安装简单</p>	 <p>适合解决热机架问题 可冷却功耗为 8kW 的机架 可改型 不需要活动地板</p>
局部管道方式送风	 <p>不推荐使用 难以阻止冷热空气混合</p>	 <p>一般用途 可冷却功耗为 5kW 的机架 高性能/高效率</p>	 <p>适合解决高热机架问题 可冷却功耗为 8kW 的机架 可改型</p>
全管道方式送风	 <p>不适用</p>	 <p>不适用</p>	 <p>适合解决高热机架问题 可冷却功耗为 15kW 的机架 可改型 需要专门机架和 CRAC 装置</p>

为硬地板环境选择合适的制冷系统类型

要判断各种制冷类型适用于哪种具体环境，首先应了解这些系统。虽然应对具体问题进行分析，不过仍可就每种类型何时适用给出一般性的指导原则。对于规模较大或功率密度需求较高的系统，其制冷系统的设计一般较为复杂，常常需要使用管道。

以下是进行有效设计的一个重要原则：根据所需平均功率密度设计制冷系统，并使其冷却能力可适应高密度机架所在的位置。虽然高密度机架一般只占总负载的一小部分，但事先无法准确预测它们在数据中心的位置。在很多使用传统活动地板的数据中心中，由于担心不能充分冷却潜在“热点”，而把制冷设备和空气分配系统设计得过大，这样不仅会导致资金和运行费用飙升，而且往往仍不能达到预期效果。如果使用管道输送空气或冷却冷气，则不仅能冷却高热密度区域，同时还可避免因制冷系统过大导致的额外成本。

表 3 说明了如何为硬地板环境选择合适的冷却系统。规模越大、密度越高，管道系统越复杂。有些高密度机架的功耗远远超出平均水平，每种冷却系统中都给出了相应的解决方法。

表 3 — 为硬地板环境选择冷却系统

系统特征	基本冷却方案	高密度机柜方案
少于 10 个机架，或功耗低于 40kW		
少于 100 个机架，或功耗低于 150kW，仅偶尔会有高密度机柜		
属于划分为多区域的较大房间的一部分，或拥有高密度机柜		

活动地板环境中冷却系统的类型

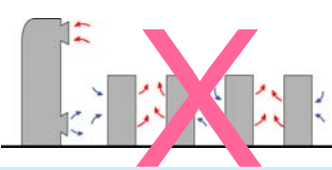
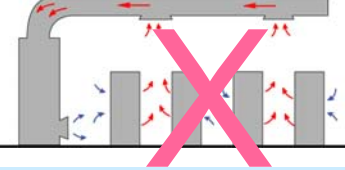
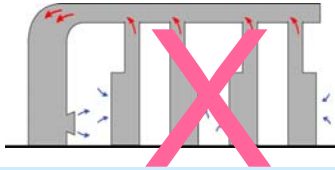
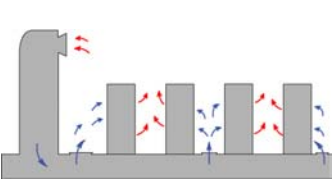
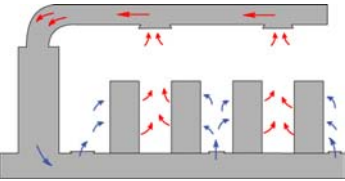
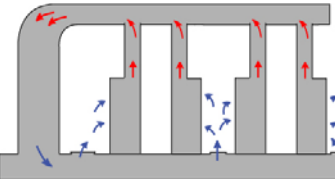
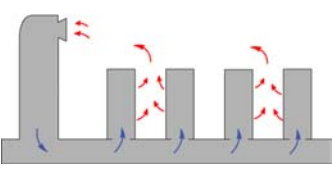
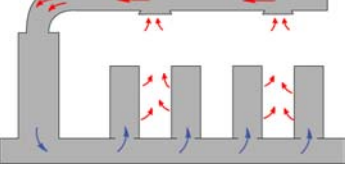
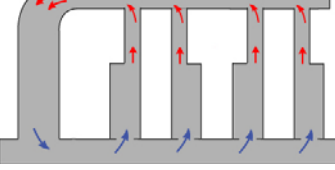
尽管新建筑常常采用硬地板，但也有一些场合可采用活动地板。活动地板适用于如下场合：

- 原有活动地板可以再利用时。
- 安装带有地下通风口的大型计算机时。
- 有大量管道需要穿越机房区域时。

需要注意，若单纯为了铺设电源线或数据线，则不需要活动地板。任何情况下，都不能为布置电源线或数据线而使用活动地板，否则会导致冷却系统性能急剧下降。对于高密度数据中心，架空电源线和数据线是最明智的做法。性能下降的原因是由于，地板下的电源和缆线阻断了原定的气流路线，阻隔了空气的流通，或迫使气流改变了方向。另外，有时为了增减地下缆线，操作人员需要打开地板砖，这进一步阻碍了气流进出关键 IT 设备。

表 4 列出了活动地板环境中的 9 种冷却系统。

表 4 — 活动地板环境中的 9 种冷却系统

	洪灌方式回风	局部管道方式回风	全管道方式回风
洪灌方式送风	 <p>不推荐使用 若有活动地板，本方案无优势</p>	 <p>不推荐使用 若有活动地板，本方案无优势</p>	 <p>不推荐使用 若有活动地板，本方案无优势</p>
局部管道方式送风	 <p>局域网机房，低密度功耗 安装比较简单 可冷却功耗为 3kW 的机架</p>	 <p>一般用途 可冷却功耗为 5kW 的机架 高性能/高效率</p>	 <p>适合解决高热机架问题 可冷却功耗为 8kW 的机架 可改型</p>
全管道方式送风	 <p>一般用途 有垂直气流的机柜/大型机 适合低静压活动地板环境</p>	 <p>一般用途 有垂直气流的机柜/大型机 适合低静压活动地板环境</p>	 <p>适合解决高热机架问题 可冷却功耗为 15kW 的机架 需要专门机架和 CRAC 装置</p>

在活动地板环境里，可通过活动地板安装局部管道送风系统，如表 2 第 2 行所示。若有活动地板，并且它可以采用局部管道送风，则开启方式送风不具备优势，应不予考虑。因此，通过表 4 可以看出，在活动地板环境中不建议使用开启方式送风冷却系统。

使用架空的回风管道，可使回风吸力集中于设备的热气排放口附近。全管道方式回风可完全避免冷热空气混合，从而机架入口温度场梯度比较均匀（特别是靠近机柜顶部的位置），并且使 CRAC 的效率得以提高。此外，还可以调整回风管道，以使数据中新热点附近的回风吸力达到最大。¹

¹ 如果吊顶冷却系统中采用的是回风栅格，则更可将此功能发挥得淋漓尽致。因为在此类系统中，可以根据需要轻松移动回风栅格的位置。

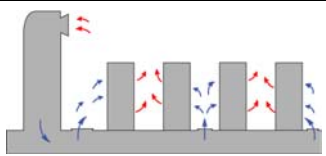
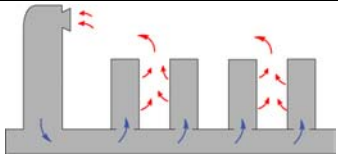
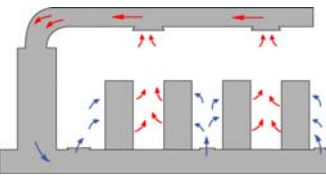
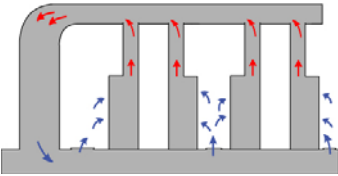
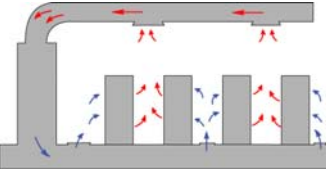
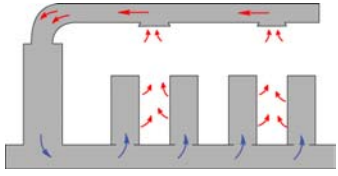
为活动地板环境选择合适的制冷系统类型

要判断各种制冷类型适用于哪种具体环境，首先应了解这些系统。虽然应对具体问题进行分析，不过仍可就每种类型何时适用给出一般性的指导原则。对于规模较大或功率密度需求较高的系统，一般需要使用更复杂的管道。

进行有效设计的重要原则与硬地板情况相同：根据所需平均功率密度设计制冷系统，并使其冷却能力可适应高密度机柜。虽然高密度机柜一般只占总负载的一小部分，但事先无法准确预测它们在数据中心的位置。

表 5 说明了如何为活动地板环境选择合适的冷却系统。规模越大、密度越高，管道系统越复杂。有些高密度机架的功耗远远超出平均水平，每种冷却系统中都给出了相应的解决方法。

表 5 — 为活动地板环境选择冷却系统

系统特征	基本冷却方案	高密度机柜方案
机架平均功耗低于 3kW 且屋顶很高，或总功耗 低于 100kW		
机架平均功耗很高或总 功耗超过 100kW		
大型机环境的备选高密 度解决方案		

设计冷却系统时的注意事项

选择了合适的制冷系统类型之后，在系统设计过程中还应当考虑其他一些事项。包括：

- 机架的隔行布局
- CRAC 装置的位置
- 通风口的数量和位置
- 管道系统的规模（参见注 1）
- 机架内部的合理配置

以上事项对系统性能有很大影响，特别当房间很大或功率密度很高的时候。**绝大多数现有数据中心在设计时并未充分考虑上述因素，因而往往会遇到意外的容量限制、冗余容量不合适或效率很低等问题。**因此，应当把这些事项当作例行公事而草草了事，设备管理人员和 IT 管理人员应当充分理解它们。在 APC 的 49 号白皮书“影响数据中心和网络机房冷却性能的可避免的错误”中，有关于这些问题的更全面的论述。

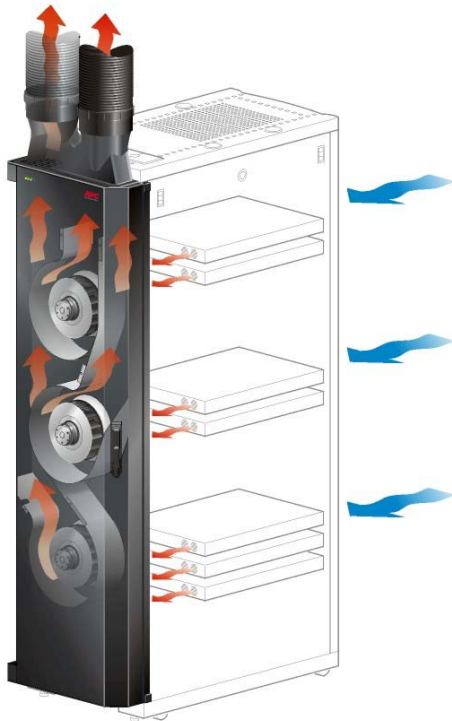
空气分配专业组件示例

上文所介绍的空气分配系统主要使用通用的 CRAC 装置、管道系统、吊顶通风装置及活动地板等。这些组件已存在了几十年，业界对它们非常熟悉。本文不再给出具体的例子。然而，应用于高密度应用环境的某些全管道方式所采用的组件在市场上相对较新。以下将给出一些有代表性的例子，以说明这些组件的功能和用法。

全管道回风组件

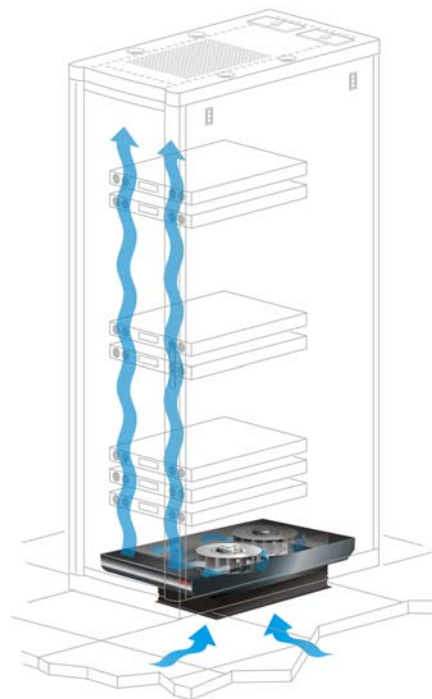
装有全管道回风组件的机柜，能把从其尾部排出的气体全部引至 CRAC 回风装置。为克服捕捉和引导空气带来的气流阻力，同时为帮助克服缆线和机架前门等带来的气流阻力，当功率密度高到一定程度时，此种管道系统需要添加风扇。图 1A 是安装了全管道回风装置的机架示例。

图 1A — 安装了全管道回风装置的机架



APC 机型 ACF101BLK 回风装置

图 1B — 安装了全管道送风装置的机架



APC 机型 ACF101BLK 送风装置

全管道送风组件

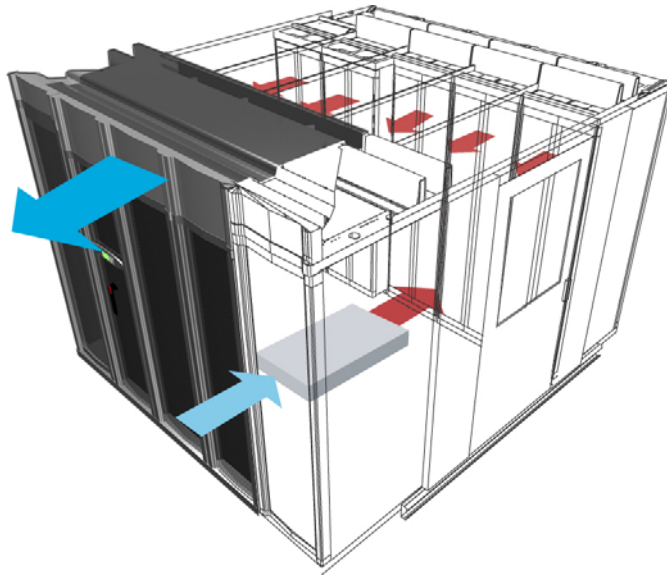
装有全管道送风组件的机柜，能把 CRAC 供应的新鲜空气引至设备通风口，从而克服引导空气时的气流阻力。为了帮助克服线缆或机架后门带来的气流阻力，当功率密度高到一定程度时，此类型的管道系统需要添加风扇。图 1B 是安装了全管道送风装置的机架示例。

为提高性能，图 1A 和图 1B 中的设备通常配备有 N+1 风扇以及双线供电能力。此外，还可以控制风扇速度以达到最优系统性能。

开启方式送风及管道方式回风组件

该组件为一个完整的高密度冷却系统，由一组机柜和专门的 CRAC 装置组成。两排机柜背向放置，以把排出的热气全部从中央通道引至 CRAC 回风导管。该系统可以在不影响其他任何机架或现有的冷却系统的情况下安装在数据中心内。从散热角度而言，该系统不会影响房间内的温度，因为它既可以吸取室内的冷却空气，同时将相同温度的空气排放回室内，也可以在封闭的机柜内使用自身的气流。图 2 是该系统的一个示例。

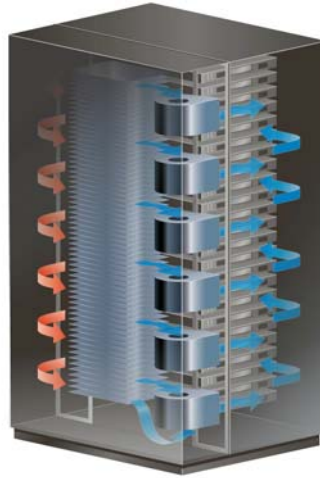
图 2 — 集成的机架冷却系统（多机架）



全管道送风和回风组件

对于硬地板环境功率密度极高的应用场合，或者如果要解决热点问题或要对高密度应用实施改型，送风和回风端都采用全管道方式的系统比较灵活，而且还与现有的环境因素无关。在前面的结构选择方案表 2 和表 3 中，展示了全管道方式的送风和回风系统，该系统邻接 CRAC 装置，可用于高密度场合。将 CRAC 靠近放置有助于更好地控制气流，并且不再需要大量的管道或者通风空间。图 3 为一个机架与 CRAC 集成系统示例，该系统在送风和回风端均采用了全管道方式。

图3 — 集成的机架冷却系统（单机架）



该示例展示了一台一侧装有冷凝片和风扇的服务器机架。从服务器排出的热气经过冷凝片，冷却后的空气又被服务器的进气口吸入循环利用。

结论

数据中心和网络机房的各种冷却系统，主要是在分配空气的方式上有所不同。送风系统和回风系统各有 3 种不同配置，它们又可以组合成 9 种基本冷却系统。这 9 种冷却系统各有所长，可应用于不同场合。

了解这 9 种冷却系统及其特性，可帮助我们确立何时应用哪种系统的指导方针。本文给出了活动地板和硬地板两种环境中的指导方针。

大多数情况下，数据中心的首选为硬地板。与流行观点相悖的是，硬地板环境中的冷却系统的性能可与活动地板环境媲美，甚至更好。

总之，对于功耗范围在 5-15kW 的机柜，可采用全管道送风或全管道回风方式进行冷却。由于功耗为 5-15kW 的机柜一般只占数据中心负载的很少一部分，因此，常常将此方法与其他简单方法结合使用。全管道方式只在局部位置，从而在冷却数据中心平均热负荷的基础上，还能根据需要对高密度机柜进行冷却。

关于作者:

Neil Rasmussen 是 American Power Conversion 的创始人和首席技术执行官。在 APC, Neil 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, Neil 正带领 APC 开发模块化的可扩展数据中心解决方案。

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。