

高密度热通道对IT人员 工作环境的影响

第 123 号白皮书

版本 1

作者 Jim Fink

> 摘要

现代热通道气流遏制系统被用来应对数据中心日益增长的功率密度，但同时这些热通道也为工作人员工作环境的舒适性带来问题。本白皮书将就这种高密度 IT 环境的附加热应力作基本的探讨。

目录

[点击内容即可跳转至具体章节](#)

简介	2
传统和现代数据中心的 制冷方法	2
CFD 模拟实验	5
结论	9
资源	10
附录	11

简介

IT 机房和相关基础设施的首要目的是支持关键 IT 设备的运行。一般来讲，在必要的情况下，绝大多数大型关键数据中心的业主更愿意以牺牲机房工作人员合理的舒适度为代价来支持关键 IT 系统。关于这点，我们几乎可以在所有数据中心里找到这种现象，比如升高的噪音水平、热冷区域、高速气流、有时连照明也不如相邻办公区理想。但是，近年来，由于 IT 设备功率密度的不断增长，导致机房制冷系统也在不断突破创新。有时，这些新的制冷方案会影响到机房工作人员的舒适度和安全性。

传统和现代的数据中心制冷方法

在数据中心中，传统制冷方法是使用非紧靠热源的制冷方式对负载供应冷风并排出热风。这意味着制冷系统通常采用高架地板进行送风，所输送的冷风在房间内弥散。这里没有严格的边界来防止冷风与房间内的空气的自由混合。其目的是试图将室内总体平均温度降到 IT 设备和人员可接受的水平。在这样的房间里，制冷系统的回风气流基本上反映的就是室内总体温度，一般在 22°C (72°F) 左右。如果在房间里采用了热通道/冷通道布局，热通道的观测温度应当高于 22°C (72°F)，而冷通道的观测温度应当低于 22°C (72°F)。但在实际应用中，它们与室内总体平均温度的偏差没有所设计的那么大。这是因为传统的设计通常会允许较大比例的冷风绕开原本的目标送风位置，直接进入热通道，通常是从地板上的线缆孔渗入的。这降低了热通道的温度。同样地，传统的 IT 设施通常不提供措施来防止 IT 设备废热从机架顶部或机架行末端进入冷通道。这无疑会对房间内的 IT 设备产生不利影响，泄露的冷风会降低在热通道里工作的人员感受到的热应力，而泄露的热风则可能会加热冷通道。这两种再循环流体路径都不是我们希望看见的，因为它们会提高 IT 设备的平均工作温度同时降低制冷系统的效率。图 1 所示为数据中心及其使用传统制冷方式时的空气流向示意图。

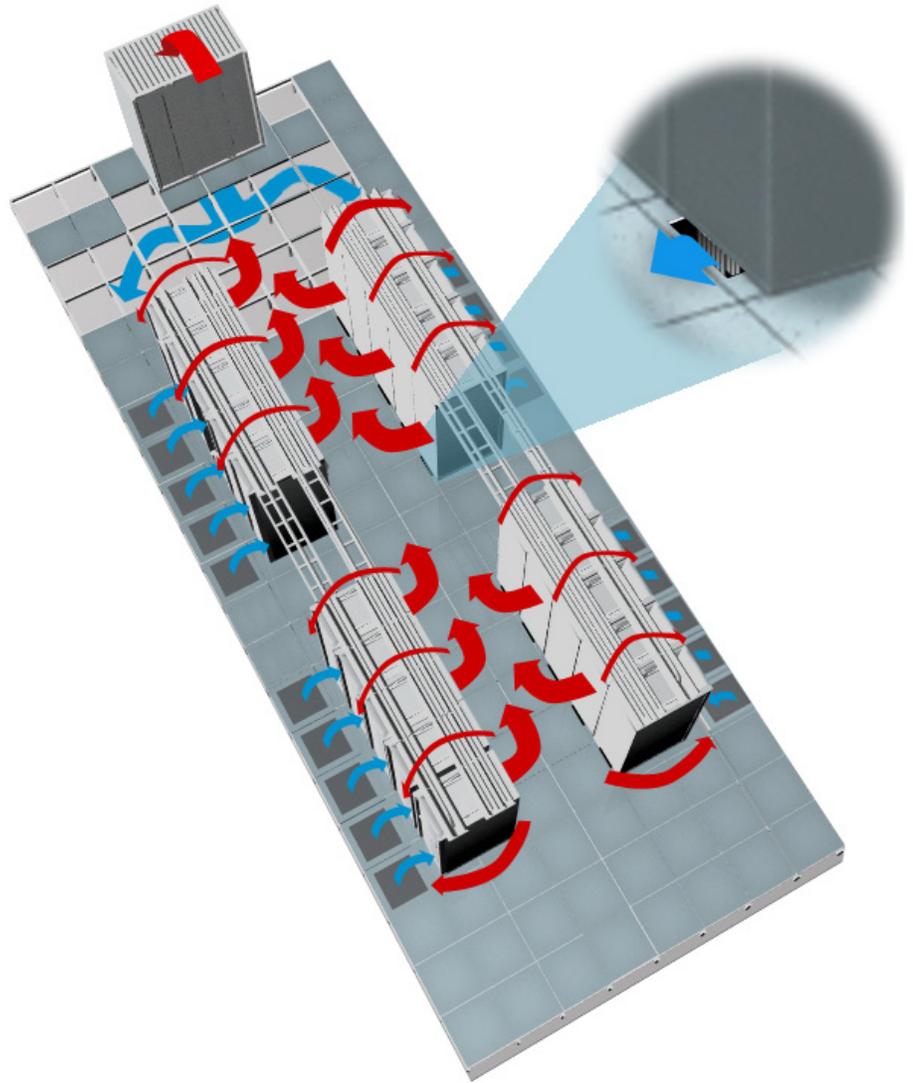


图 1

传统制冷方式气流模式

这种大流量设计被一直沿用至今是因为IT设备功率密度足够低，以至于即使采用不精确的冷风送风方式也不会造成IT设备过热。但是，当用高密度的IT设备对旧的设施进行跟新换代时，就需要彻底重新考虑制冷架构，否则这种制冷设计的局限性就会马上显现出来。因此，基础设施制造商推出了能够抑制的冷、热风混合的产品。这样既对IT设备有益，又能够降低运营成本。本白皮书所提到的这种系统将热通道完全封闭，从而可以防止几乎所有的混合。要实现这点，可以使用专门的改装产品，或者是利用常规施工材料实现绿色环保建筑设计。图 2 所示的为采用施耐德电气旗下APC的热通道气流遏制系统的一个实例。

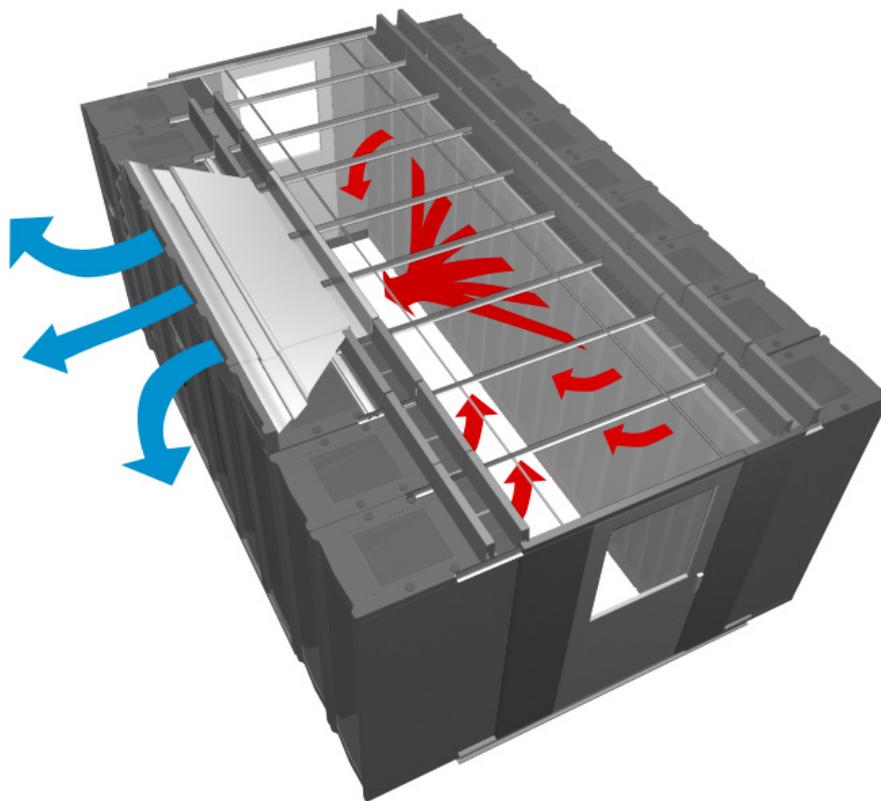


图 2

现代制冷方法

一些使用这种新型制冷系统的用户表示出对量化工作人员在其中所受到的热应力感兴趣，以便于确保其符合本地工作人员安全标准。本白皮书将从绝对和相对这两个角度来回答这个问题。我们将为传统数据中心和无混合的现代数据中心设定一组保守的假设条件，然后将二者进行对比。

热量和质量传递分析可以帮助说明冷、热风混合对工作人员热应力的潜在影响。根据能量守恒和质量守恒定律，对在热通道里工作的人员，其所感受到热应力会随冷、热风混合的降低或消除而减少或升高。实际的结果取决于工作人员是否站在空气发生混合的相关位置。如果工作人员所站的位置几乎位于未发生混合的服务器排风处，那么在冷、热风发生混合时，其所接触到的温度比不发生冷、热风混合时更高。这种情况可能会发生在离服务器排风口较近位置工作的人员身上。但是，如果工作人员的工作是需要热通道里四处走动，那么他很可能在数据中心冷、热风混合发生的位置感受到较低的温度。这是因为，这个工作人员有更多的机会去接触被冷风所中和的空气。附录A所示的能量平衡方程式将能够说明这一点。

我们不能单独依靠以上就得出一些有意义的结论，因为气流的混合就像气候变化一样，几乎不可能被完美预测，而且你也永远找不到气流混合方式完全一样的两个IT设施。但是，在深入分析这些对立作用后，我们可以在恰当的假设条件基础上进行试验，找出最符合数据中心工作人员真实状况的热应力。

CFD 模拟实验

实验包括利用计算流体动力学（CFD）模拟模型比较两种不同类型的数据中心。模型按照传统采用高架地板设计的数据中心和采用热通道气流遏制系统的现代数据中心进行构建和设定假定条件。图 3 和图 4 所示即为模拟所用的两种数据中心的平面布局。

图 3
传统数据中心平面视图

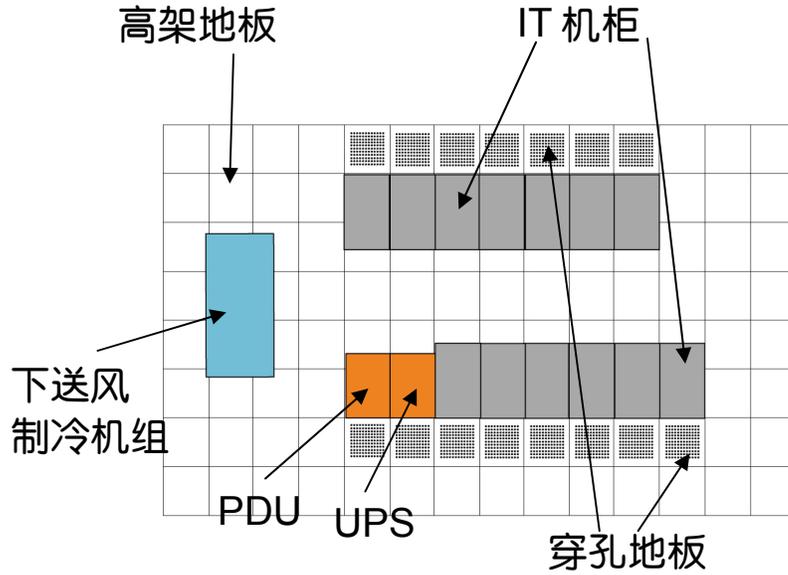
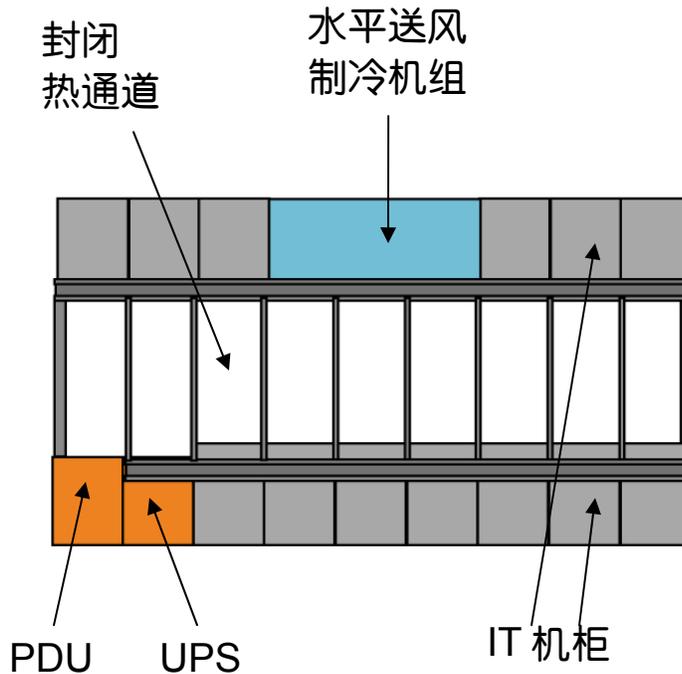


图 4
热通道气流遏制系统
数据中心平面俯视图



模拟应尽量准确以避免热通道外围对工作人员热应力的影响。房间规模设定为一个 40kW 的小型数据中心，或者是较大型数据中心的某个区域。两种类型数据中心的功率密度均被设定为每机柜 3 kW。像制冷系统风量、IT 设备风量、UPS 的风量及效率、房间大小和布局这些参数均视为常量。因此，CFD 能够把重点放在比较发生冷、热风混合的高架地板配置与不发生冷、热风混合的封闭热通道配置这两种环境。两个模型所使用的具体规格参数，请参见附录 B。

对于这两种模型，“虚拟热电偶”都被安放在紧靠每个机架后面距地面 1.8 米（6 英尺）高的位置，并以 0.30 米（1 英尺）增量进行安装。热通道全部测试点温度的平均值将被用来估算工作人员所感受到热通道的干球温度。

然而，单凭干球温度并不能很好的反映工作人员的热应力，这是因为它没有考虑到湿度大小和辐射热所产生的生理影响。衡量热应力更好的办法是使用湿球黑球温度（或称之为“WBGT”）。WBGT 与常规的温度计读数不同，它考虑了空气温度、湿度和辐射热。这些因素都会对工作人员感受到的热应力产生影响。职业安全与健康署（OSHA）技术规范第四章第三节就各种条件下可接触的最高 WBGT 进行了规定。其它热指标还包括有效温度指数（ET）和热应力指数（HSI）——也被称为贝尔定-哈特指数（Belding & Hatch Index）。ET 只在湿度非常高（IT 设备排风一般低于 20% 相对湿度）的情况下使用，HSI 的应用难度较大，而且也不太适用于表现工作人员个人所感受到的热应力。**公式 1** 用于计算无太阳辐射时的 WBGT¹，因为其假设环境为数据中心。

$$WBGT = 0.7 \text{ NWB} + 0.3 \text{ GT} \quad (\text{公式 1})$$

其中，

NWB 为自然湿球温度

GT 为黑球温度

自然湿球（NWB）温度是房间干球温度与湿球温度的函数既反映了房间内的干球温度又反映了相对湿度。它是通过在常规水银温度计感温包覆盖一层湿纱布来进行测量的。的测量方式是用一层湿纱布盖住，通过水蒸发带走温度计感温包处的潜热来降低与干球温度相关的温度，就好比工作人员通过出汗进行排热。如果相对湿度已知，那么焓湿图可以被用来查找湿球温度。

假设两种数据中心的相对湿度均控制在 45%。黑球温度（GT）被定义成涂成黑色铜球中心位置温度传感器的读数。辐射热和环境干球温度都对这个读数有影响。热通道里工作人员所吸收的辐射热可以忽略不计，因为可见固体表面不会比工作人员的体温高很多。因此，CFD 模拟得出的干球温度可以用来代替黑球温度，而且不用进行任何的精确性补偿。然后，我们可以将**公式 1** 中的 NWB 与 GT 相加，得出 WBGT。

实验结果按照 OSHA（美国）和 ISO（国际）指导方针判断其可接受性。**表 1** 所示为 OSHA 指导方针。

表 1

OSHA 指导标准（仅限美国）

工作/休息制度 (每小时工作周期)	轻度工作负荷 最高允许 WBGT	中等工作负荷 最高允许 WBGT	重度工作负荷 最高允许 WBGT
不间断	30°C (86°F)	26.7°C (80°F)	25°C (77°F)
75% 工作 / 25% 休息	30.6°C (87°F)	27.8°C (82°F)	25.6°C (78°F)
50% 工作 / 50% 休息	31.7°C (89°F)	29.4°C (85°F)	27.8°C (82°F)
25% 工作 / 75% 休息	32.2°C (90°F)	31.1°C (88°F)	30°C (86°F)

OSHA 还提供了其它一些条件的调整，比如着装类型和工种分类，以便让 WBGT 在各种工业领域里都可作为一个有用的参量。此外，OSHA 关于热应力的指导标准适用于一般情况下身体健康状

¹ 见 OSHA 技术手册第三部分，第四章，表 3:4-2

况良好且摄入足量水和电解质的个人。OSHA所描述的“轻度工作负荷”相当于IT工作人员的日常工作任务，比如安装机架式设备或敷设网络线缆，并且假设工作人员穿着普通单衣。相对地，OSHA所指的“重度工作负荷”则为重体力活，比如类似于“敷设铁路枕木”的作业活动。

各个国家关于职业安全的条例和指令各不相同，因此熟悉本地的具体要求很重要。ISO 7243《热环境 — 基于WBGT指数估算工作人员所承受的热应力》为国际社会提供类似的指导标准。图5所示为摘自ISO 7243 附录B的曲线图，显示的是针对不同代谢率和工作周期的最高允许WBGT。

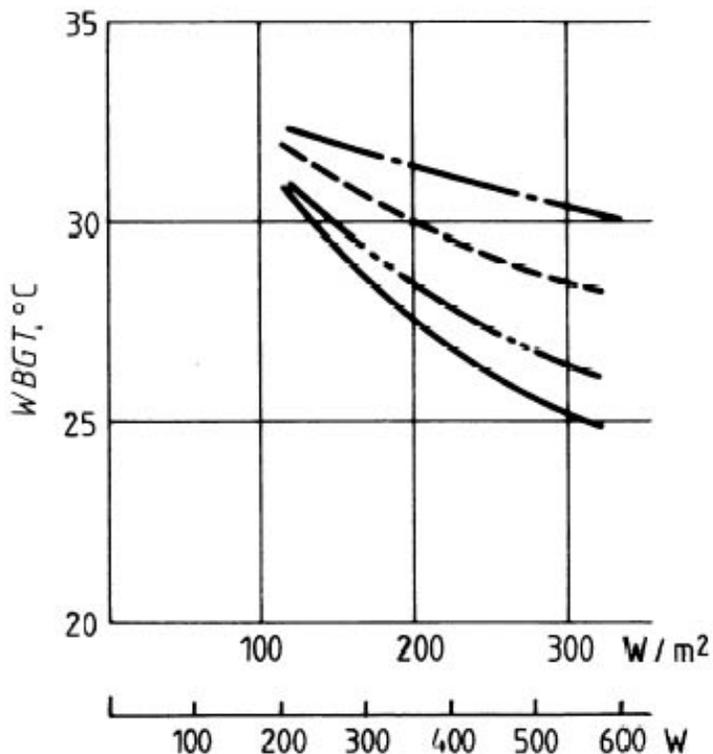


图 5

ISO 指导标准 (国际)

这些代谢率是工作人员工作紧张程度的数字化表达。ISO 7243 在休息时可以低至每平方米体表 65 瓦以下，而在极端条件下可以高达每平方米体表 260 瓦以上。根据ISO的描述，IT工作人员的工作任务与ISO “1 级”或轻度工作负荷最为接近，也就是代谢率在 65 瓦至 130 瓦之间。从图5可以看到，在最坏条件下以每平方米体表 130 瓦的代谢率连续工作，其最高允许的WBGT是 30°C（与OSHA一致）。在这个温度下，指导标准认为，“一般说来，几乎任何个人在这个温度下都不会受到任何有害影响……”。与OSHA标准类似，ISO也假定工作人员的健康状况良好并且能够适应该工作环境。对于不能适应这种工作环境的工作人员，ISO将最高允许的WBGT从 30°C降低到 29°C。

表 2

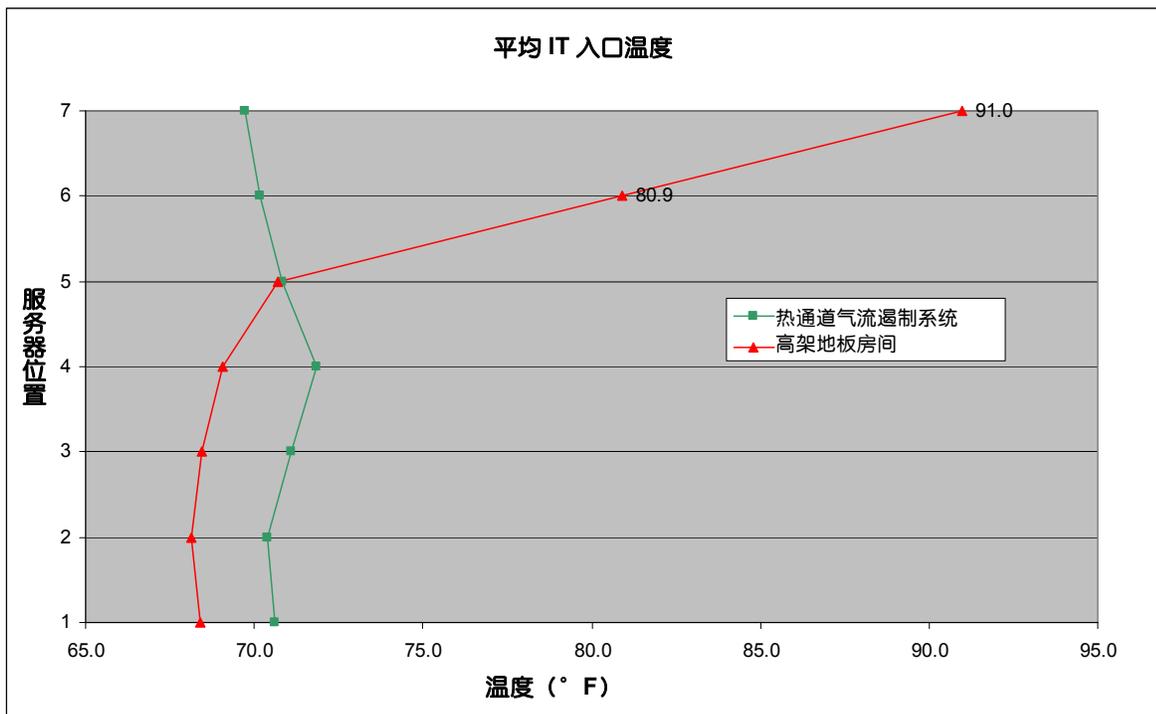
CFD 分析结果

	热通道平均干球温度 (°F / °C)	最坏条件下热通道湿球温度 (°F / °C)	湿球黑球温度 (OSHA / ISO 最高允许值 = 86° F / 30° C)	IT 设备平均进口温度 (°F / °C)
高架地板房间	81.9 / 27.7	68.7 / 20.4	72.7 / 22.6	73.8 / 23.2
封闭热通道房间	89.8 / 32.1	66.5 / 19.2	73.5 / 23.1	70.7 / 21.5

机架背后的干球气温比封闭热通内的温度平均高 4.4°C(8°F)，其原因正如前面所提到的，就是在高架地板房间里冷风渗透到热通道后导致的结果。根据计算出的平均入口温度和假设的相对湿度值，被排入热通道的空气在最坏条件的湿球温度为 20.4°C (68°F)。

IT设备平均入口温度（附录A中图A1 里的T₂）也可以利用CFD分析进行计算得到，因此这一数据也被包含在表 2 中。虽然并不是本白皮书的主要探讨内容，我们还是将这一信息提供给读者进行比较对照，因为IT设备入口温度必须保持在 18-27°C (64-80°F)范围才能保证最佳的可用性。图 6 则进一步显示了高度对IT设备入口温度的影响。位置 7 是标准 42U机架的最高位置，7 个高度位置上均装有一台 6U服务器。

图 6
机柜上的安装位置对IT设备进风温度的影响



尽管两个平均温度都在预期范围内，图 6 还是显示出传统高架地板数据中心的温度梯度不甚理想，安装在机架顶部附近的设备（服务器位置 6 和 7）承受的温度较高，分别为 27°C (80.9°F) 和 33 °C (91°F)。

结论

冷、热风混合抑制可以让冷通道更冷，热通道更热。从可用性、功率密度容量和能效的角度来看，它对 IT 设施有利，但它也会稍微提高在热通道里工作的人员所感受到的热应力（约 1°F WBGT）。但是，预期的热应力仍在 OSHA/ISO 的限制范围内。由于高架地板内气流混合使热通道 WBGT 降低的值比 IT 废热温度升高使 WBGT 升高的值要来的低，因此 WBGT 会小幅上升。虽然我们设置了较为保守的假设条件，但各个数据中心的具体表现各有不同。比如，出于保守考虑，我们在这个实验采用的是足够深的（36 英寸或 0.91 米）且无障碍的高架地板。如果采用较浅且部分封堵的高架地板进行模拟，实验结果将大为不同。



关于作者

Jim Fink 是一位注册工程师，也是罗德岛州克兰斯顿 Thielsch Engineering 公司 MEP 工程咨询总监。他于 1994 年毕业于联合大学 (Union College)，获得电气工程学士学位，并于 2005 年获得罗德岛州立大学 (University of Rhode Island) MBA 工商管理硕士学位。Jim 在关键基础设施设计和运营方面拥有 15 年的丰富经验，包括核电站和数据中心。同时，他还是一位司法工程学从业者。2008 年，他受美国国家专业工程师学会当地分会的推选，荣获当年的“年度青年工程师”大奖。



资源

点击图标打开相应
参考资源链接



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：

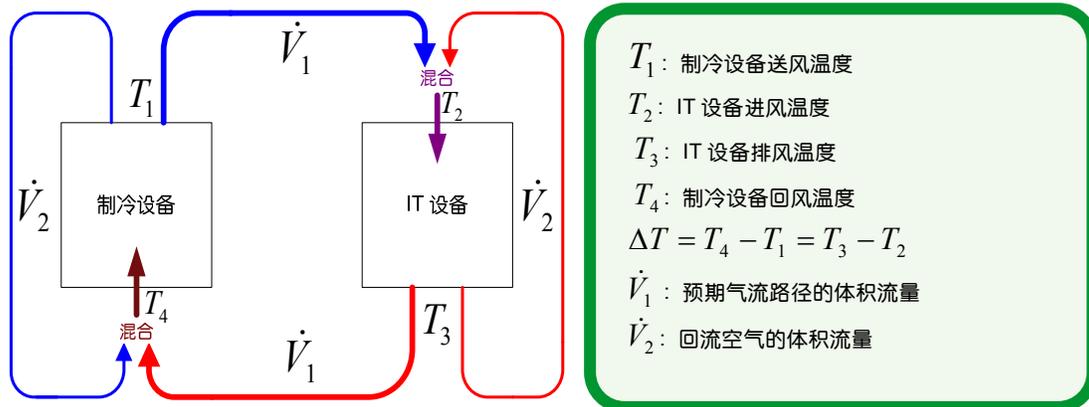
数据中心科研中心
DCSC@Schneider-Electric.com

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

附录 A: 热量与质量 传递理论

由于存在相反作用，冷、热风混合对热通道内工作人员热应力的影响尚不明确。图A1显示的是计算机机房内的预期空气流向和冷、热风混合空气的流向。这里假设系统的热量和气流已经达到平衡，也就是说制冷系统处理的总热量等于IT设备的总散热量，并且制冷设备所提供的总供风量等于IT设备的总进风量，或 $\dot{V}_1 + \dot{V}_2$ 。



根据能量守恒，两气流混合过程可写成可利用以下公式说明气流混合所产生的影响：

$$T_2 = \frac{\dot{V}_1 \cdot T_1 + \dot{V}_2 \cdot T_3}{\dot{V}_1 + \dot{V}_2} \quad \text{公式 1}$$

$$T_4 = \frac{\dot{V}_1 \cdot T_3 + \dot{V}_2 \cdot T_1}{\dot{V}_1 + \dot{V}_2} \quad \text{公式 2}$$

重组公式 1 和公式 2，以便更清晰的显示冷、热风混合对 T_2 和 T_4 的影响。

$$T_2 = T_1 + \Delta T \left(\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} \right) \quad \text{公式 3}$$

$$T_4 = T_3 - \Delta T \left(\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} \right) \quad \text{公式 4}$$

公式 3 和公式 4 显示出当冷、热风混合减少时，IT 设备供风温度 T_2 会随之降低，而制冷系统回风温度 T_4 会随之升高。出于前面我们已经讲过的原因，这两种状况均有益于 IT 设施的可用性和能效。

直接接触 IT 设备排风的工作人员将会感受到的温度是 T_3 。比如，当工作人员的工作要求他/她站在 IT 机柜的背后时，那么该工作人员就会完全被排出的热空气完全包围，从而出现 T_3 的状况。

T_3 的计算公式如下：

$$T_3 = T_1 + \Delta T \left(\frac{\dot{V}_1 + \dot{V}_2}{\dot{V}_1} \right) \quad \text{公式 5}$$

公式 5 显示的是温度 T_3 的计算结果，可以看出工作人员的热应力将随冷、热风混合 (\dot{V}_2) 的减少而降低或消除。简单来说，这时工作人员身体周围的空气只会被 IT 设备一个出风口加热，而不是多个出风口，因此温度要比发生冷、热风混合时凉爽。但是，在传统的采用高架地板的机房里，

图A1 显示的混合回风只是发生在制冷系统的上游，而通常混合现象在更上游的位置就已经开始发生（更接近IT设备出风口）。换句话说，进入热通道的冷风实际在返回制冷系统整个过程前已经与服务器热排风充分混合。因此，在热通道内工作的工作人员更容易接触到的是 T_4 （混合后的回风温度），而不是 T_3 （未混合的IT设备排风温度）。公式 4 显示出位于 T_4 温度中的工作人员将因冷、热风混合的降低或消除而感受到更大的热应力。因此，冷、热风混合抑制对工作人员热应力的净作用取决于工作人员是否站在两股气流开始发生混合的相关位置。我们不能单从这种相关性上得出有意义结论，因为气流的混合就像天气的变化，几乎不可能被完全预测，而且你也找不到气流混合方式完全一样的两个IT设施。但是，在深入分析这些对立作用后，我们可以在恰当的假设条件基础上进行试验，找出最符合数据中心工作人员真实状况的热应力作用结果。

附录 B: CFD 建模的 假设条件

两种数据中心的共同假设条件

IT 机架	13
功率/IT 机架	3.08 kW 均匀分配到机架内所含的 7 台 6U 服务器
IT 总功率	40 kW
UPS 低效	3.2 kW
PDU 低效	800 W
IT 风量/机架	391 cfm (664 m ³ /h)
UPS 风量	513cfm (872 m ³ /h)
房间尺寸	高 x 宽 x 深 = 3 x 7.1 x 4.3 米 (10 x 23.4 x 14 英尺)
IT 入口相对湿度	45%
制冷系统风量	6,500cfm (11,043 m ³ /h)

只针对高架地板数据中心的假设条件

高架地板深度	0.91 米 (3 英尺) 地板深度用于将压力梯度的影响降至最低
冷、热风混合	40%冷、热风混合经由高架地板均匀泄漏 注：大多数已安装的大型高架地板系统，其冷、热风混合均发现至少达到这个数值
制冷系统	下送风制冷机组

只针对热通道封闭型数据中心的假设条件

热通道	顶部和端部封闭，但不进行密封
制冷系统	后面回风正面送风的制冷机组（气流水平流动）