

服务器入口温度升高造成的能源影响

第 138 号白皮书

版本 1

作者 David Moss, Dell Inc.
John H. Bean, Jr., Schneider Electric

> 摘要

对效率提升的要求产生了关于数据中心最佳空气温度的问题。ASHRAE TC9.9 技术委员会最近针对服务器入口温度和湿度扩展了其推荐的温度阈值。普遍的看法认为，总能源需求应随服务器入口温度的升高而减小。本文对这种假设进行了测验，即推演出服务器的复合功耗曲线与入口温度的函数关系，并将此数据应用于多种制冷体系结构。其目标是找出使 IT 与制冷组合负载最小的最佳温度范围。所提供的数据基于在仿真的复合服务器性能条件下对不同制冷系统进行的实际规模试验。该试验揭示了服务器功率与数据中心总体能耗之间的复杂关系，而其中可在一温度最佳点上实现节能。该温度最佳点会随设备、密闭解决方案及其它因素变化而不同。

目录

[点击内容即可跳转至具体章节](#)

简介	2
服务器基准线	2
所考虑的制冷体系结构	4
试验结果	6
系统设计的考虑因素	9
结论	10
资源	11

简介

当前关于电源可用性及能源成本的压力使人们对数据中心的效率更为关注。为了应对日益增长的数据中心能耗，ASHRAE TC9.9 技术委员会扩展了其推荐的针对数据中心运行的温度阈值。按照预期，提高数据中心的温度将减少将热量送出楼宇所需的能源量，从而可以降低数据中心制冷基础设施的能耗。然而，IT 设备制冷风机的动态特性可能会减小甚至抵消制冷系统的收益。随着服务器入口温度达到或超过 25° C (77° F)，服务器风机通常会响应增加气流量的需求，因此会增加服务器的能耗。本文将研究在 IT 功率存在潜在增长趋势的条件下降低制冷基础设施功率需求的措施。其效果的量度就是对包括制冷基础设施和服务器在内的总功率的真实影响。

服务器基准线

对服务器/IT 设备的试验在位于美国得克萨斯州 Round Rock 市的 Dell 服务器热学实验室中进行。大型热室（图 1）内的所有功率测量均采用一台 Instek GPM-8212 型功率计来完成。该热室能够在很宽的范围内制造恒温。IT 设备采用低压线路（110 V）供电，因此测得的功率值要比在高压线路（208 V）上高。试验中采用了混合的 IT 服务器设备，每一类设备均呈现不同的风机特性。



图 1

服务器室

IT 服务器风机特性通常可归为三类。一些产品采用定速风机，因此系统功率在入口温度范围内变化很小。其它系统则是在环境温度、配置和/或利用率的范围内以离散阶变或连续可变响应的方式改变其流量。

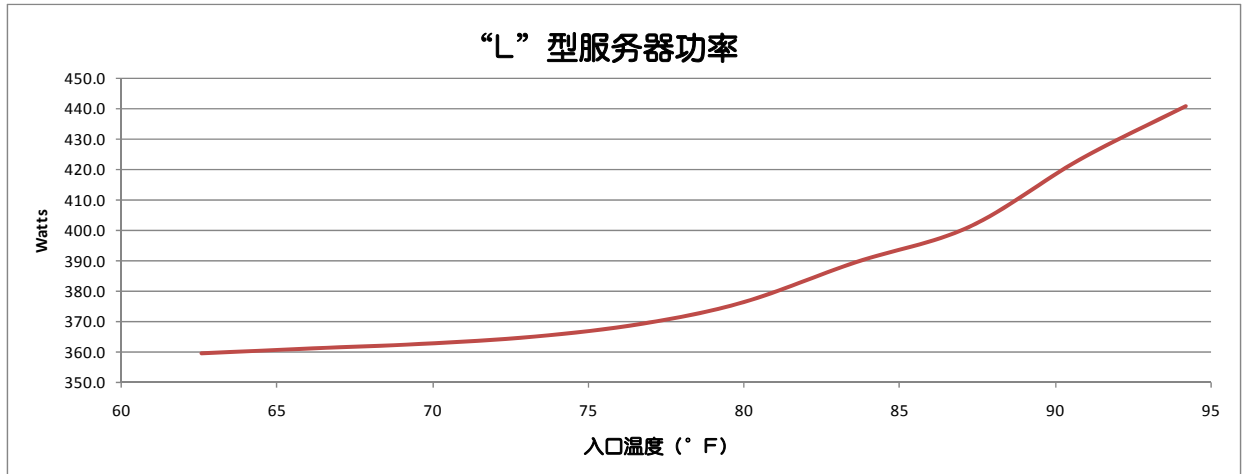
三种不同的服务器系统被选择用于对典型的设施混合 IT 特性进行建模。尽管这些系统的选择仅仅是为了方便，但它们确实较好地呈现出了风机控制类型的区别。在这三种系统中，两种配置相对较简单，且在公称应力试验中被监测。另一种系统的配置则复杂得多，并且按照群集型标准运行。因此，这种“L 型服务器”的基准功率比其它两种系统要大得多。

“L”型服务器特性

“L”型服务器对环境温度的升高呈现平滑的功率响应，如图 2 所示。这种响应在很大程度上是由于连续可变的风机速度响应。功耗在 17° C (62° F) 至 35° C (95° F) 的温度窗口内升高了超过 80 W。这种服务器类型还接受了风机速度保持恒定条件下的试验，结果是每升高一摄氏度，系统功率增加不足 0.9 W（每° F 为 0.5 W）。这一增加的功率被认为是半导体漏电流增大的结果。“L”型系统主要被配置成运行高应力负载。这是采用精密的算法控制风机速度的主流 Tier 1 服务器的典型特征。

图 2

“L”型服务器功率与入口温度的关系

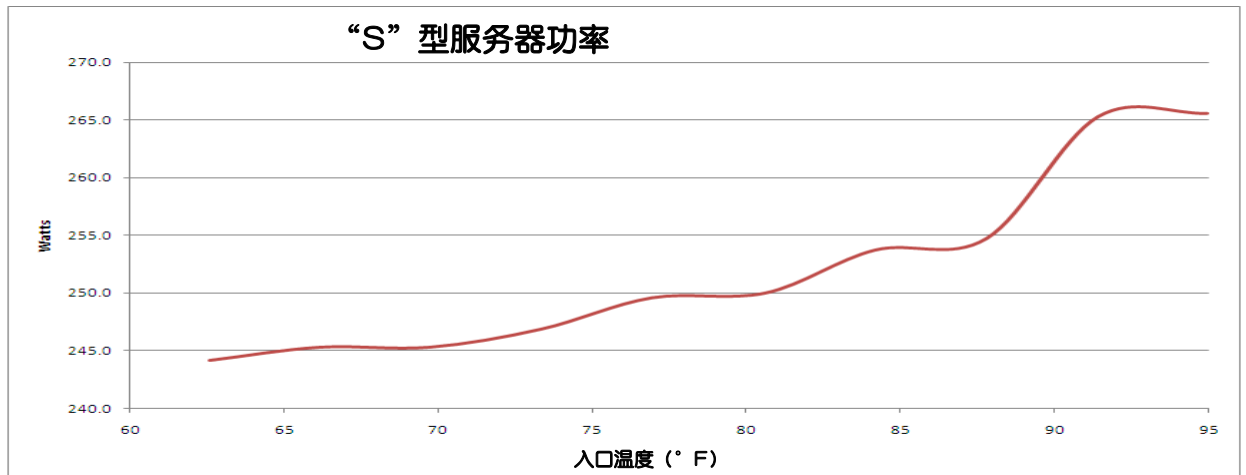


“S”型服务器特性

“S”型服务器在相同的入口温度范围内呈现阶梯式增长，这是风机控制算法不太完善的产品典型特征。此类系统通常配以中等程度的负载（图 3）。

图 3

“S”型服务器功率与入口温度的关系

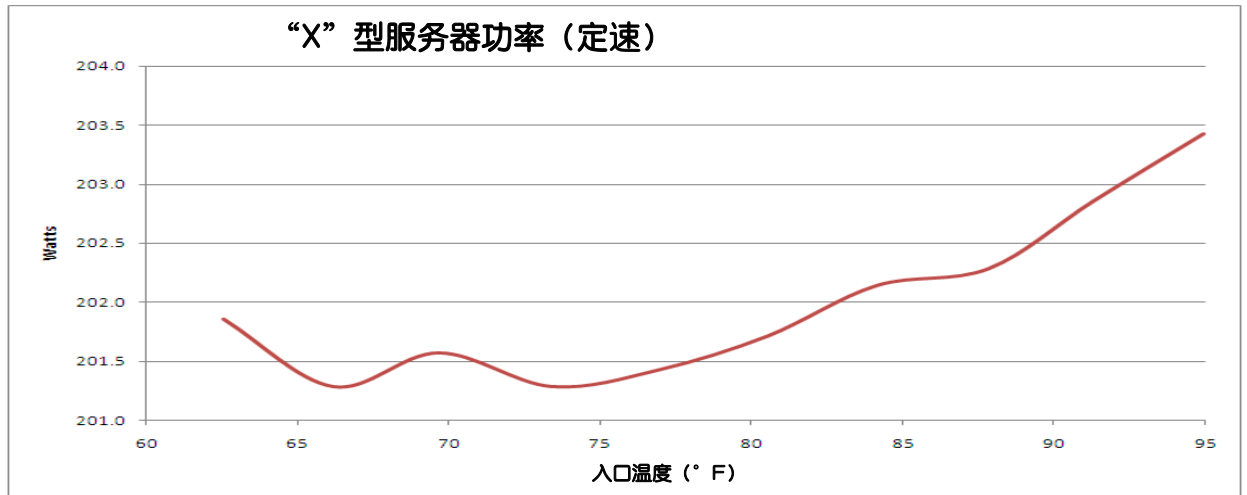


“X”型服务器特性

“X”型服务器是采用定速风机的系统。在这里看到的变化几乎全部源自于测量的不确定性。图 4 中功率小幅增长的总趋势也可能是由于在较高温度下漏电流的增大所致。这种系统在一定的入口温度范围内呈现接近恒定的功率，这是许多白箱服务器的典型特征。它实际上是包含多台服务器的机柜，因此接近恒定的 202 W 功率是一个单一系统的代表。这种系统通常配以较轻的负载。

图 4

“X”型服务器功率与入口温度的关系

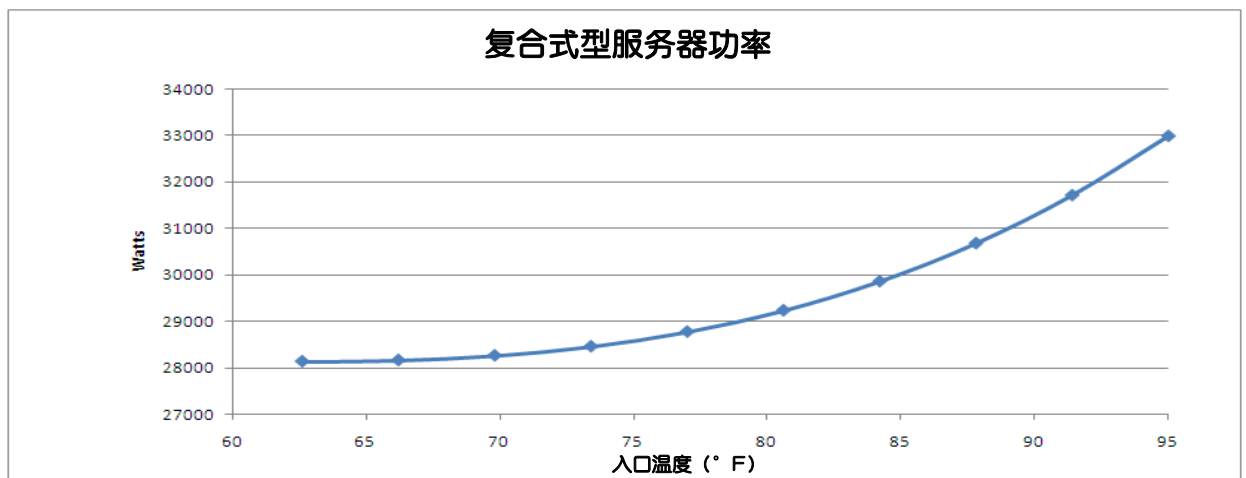


复合式服务器特性

三种类型的系统以可代表三类设备典型组合的方式组合在一起。由于本研究的目标是找出可使 IT 和制冷组合功耗最小化的最佳温度范围，对定功率与变功率设备的典型组合方式加以描述十分重要。将“L”型系统在组合中的比例人为设置为 50%，因为它代表了具有典型 Tier 1 特性的服务器。另两种系统各自设置为 25%。当以上述比例组合时，复合式 IT 的温度响应如图 5 所示。对于试验的设施部分，在 APC 由热量/气流负载仿真器对这种情况进行了再现。

图 5

复合式服务器功率与入口温度的关系



所考虑的制冷体系结构

本研究考虑了三种不同的行级制冷方法，包括两种冷冻水型（CW）和一种整体压缩机直接膨胀型（DX）制冷系统。冷冻水型解决方案在研究中又被分为开放行级配置和热通道气流遏制系统（HACS）。本文所考虑的三种制冷配置包括：

1. 冷冻水型 InRow, RC 制冷, 采用 HACS (ΔT 和送风温度控制)
2. 冷冻水型 InRow, RC 制冷, 开放行级 (机柜入口和送风温度控制)
3. 直膨型 InRow, RD 10kW 制冷, 采用 HACS (ΔT 和送风温度控制)

每种配置采用一定数量的三种 APC InRow™ 制冷模块进行试验，对于每个冷冻水型 RC（ACRC100），额定制冷容量为 20kW，而对每个直膨型 RD（ACRD101）则为 11kW。每一

个制冷模块采用标准 IT 机柜的形状因数，而宽度仅有标称值的 $\frac{1}{2}$ 。这种物理配置可便于集成在 IT 行级环境中。冷冻水型 RC 试验的 IT 负载在 28kW（下限环境条件下）与 32kW（上限环境条件下）之间变化。直膨型 RD 10kW 的 IT 负载上限限制为 30kW。本试验的规模局限在一典型数据中心的子集内，但可以代表实际的大规模实施方式。服务器仿真器被调整为在各种工作温度下模拟三种服务器基准类别在功率和气流方面的综合响应。

热通道气流遏制系统（HACS）试验进行时采用中等风机速度参数，保持制冷模块两端的温差恒定为 11°C (20°F)。

三种试验情境中每一种的冷通道温度包括： 17 、 18 、 21 、 23 、 25 、 27 和 31°C (63 、 65 、 70 、 73 、 77 、 81 、 84 和 88°F)，冷冻水型制冷解决方案的冷冻水供水温度分别为： 4 、 6 、 8 、 10 、 12 、 14 、 16 和 18°C (39 、 43 、 46 、 50 、 54 、 57 、 61 和 64°F)。冷冻水温度的调整目标是在冷冻水供水与送风气流之间保持类似的温差，使得在较高的冷通道温度下冷却装置效率得以提升。

水冷式直膨型系统具有足够低的冷凝水温，可将压缩机释放压力保持在预定工作范围内。每种试验条件均在稳定之后运行 2.5 至 4 小时时间，在此时间内的能耗被以 $\text{kW}\cdot\text{Hr}/\text{Hr}$ 为单位进行正规化。

机柜与制冷模块的群集通过一套临时绝缘墙壁系统与更大的机房环境进行热学隔离，该墙壁系统采用从地板到天花板的全高方式布设。

对于所有试验，周围机房露点温度被设置为 13°C (56°F)，容差为 $\pm 2.8^{\circ}\text{C}$ (5°F)，且干球温度计测得温度保持在 $22^{\circ}\text{C} \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ ($72^{\circ}\text{F} \pm 3^{\circ}\text{F}$)。为此，采用了一台单独的带除湿/加湿的空气处理机。用于露点温度控制和周围机房温度控制的空气处理机的功耗不被监测，也不作为评价的内容。在这三种试验情境的实施过程中，冷却盘管保持干燥，不产生任何可测量的冷凝水。

在环境范围内，用于功率和气流的复合服务器负载采用八（8）台 IT 服务器仿真器加以模拟。这些服务器仿真器装在一个 10U 机柜安装式基座上，每一台仿真器最大耗用功率为 5,750 W，最大气流量为 316 L/s (670 CFM)。仿真器具备经校准的气流量调整功能，并配有对功率设置的阶变控制，调整分辨率为 250 W。图 6 示出了其中一台服务器仿真器的典型安装方式。仿真器上方的盲板被拆下以便拍照；在实际试验中，所有空的 U 空间均安装有盲板。



图 6
服务器仿真器

图 7 示出了用于此试验的功率监测仪表。所有测量值均采用 Square D Power Logic 仪表（PM-210 型）采集，数据通过 ModBus 接口收集。所采集的功率计测量值包括：电压、电流、功率因数以及合计能耗。在整个试验过程中，以下点/负载被单独进行功率/能耗监测：

1. 冷水机
2. 冷冻水型 InRow 冷却装置

3. 冷冻水型 InRow 冷却装置
4. IT 负载
5. 冷冻水泵

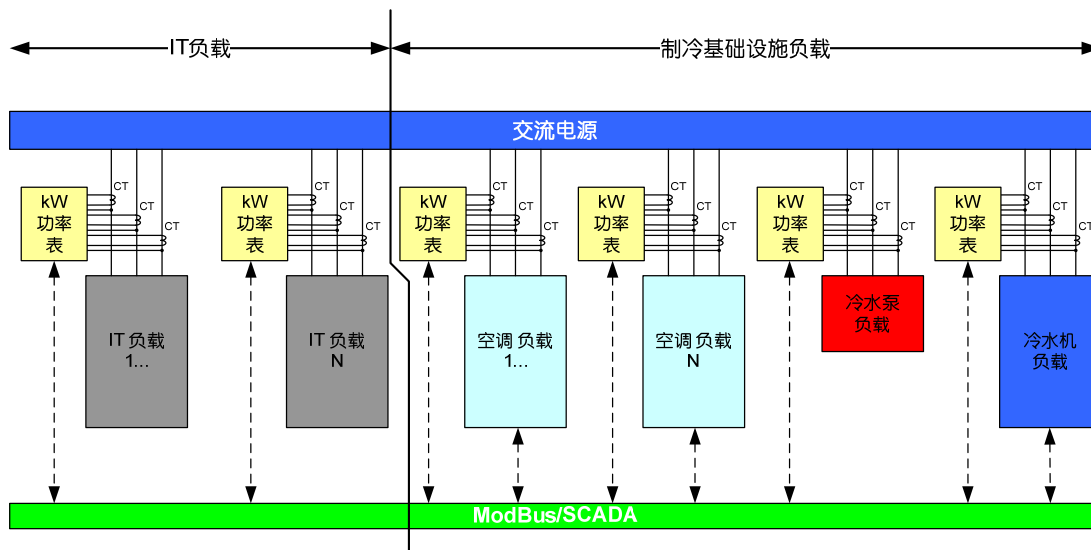


图7
试验功率测量点

试验结果

前述三种配置中的每一种均已执行类似的试验步骤，以评价在八种不同的干球温度试验条件下的电功率/能耗要求。InRow 冷冻水型制冷解决方案中的冷冻水供水温度被重置为所评价的冷通道空气温度的函数。在执行每一试验步骤的过程中收集的数据被以 30 s 的间隔采样。所有数据均被保存并导入一个 Excel 数据表中，以供分析。

冷冻水系统试验由一套非标准的冷水机组配置支持。冷站装置相对负载采用显著的超选型，并由初级水回路上的一个大型贮水箱进行缓冲。达到全额设计值的冷冻水流量在冷水机与贮水箱之间持续循环。初级水箱及回路的温度保持在比次级回路低几华氏度的水平。次级回路循环由一台采用 VFD 控制的单独的循环泵实现。此回路提供 InRow 制冷设备所需的标称流量。次级回路供水的温度调节由冷水机初级回路与次级回路之间的带调节混合来实现。混合由电控执行器根据需要加以调节，以保持所需的次级回路冷冻水供水温度。这种特定的冷水机配置会起到降低通常所期待的性能系数（COP）的作用。尽管 COP 被降低，但所形成的曲线形状不受影响。

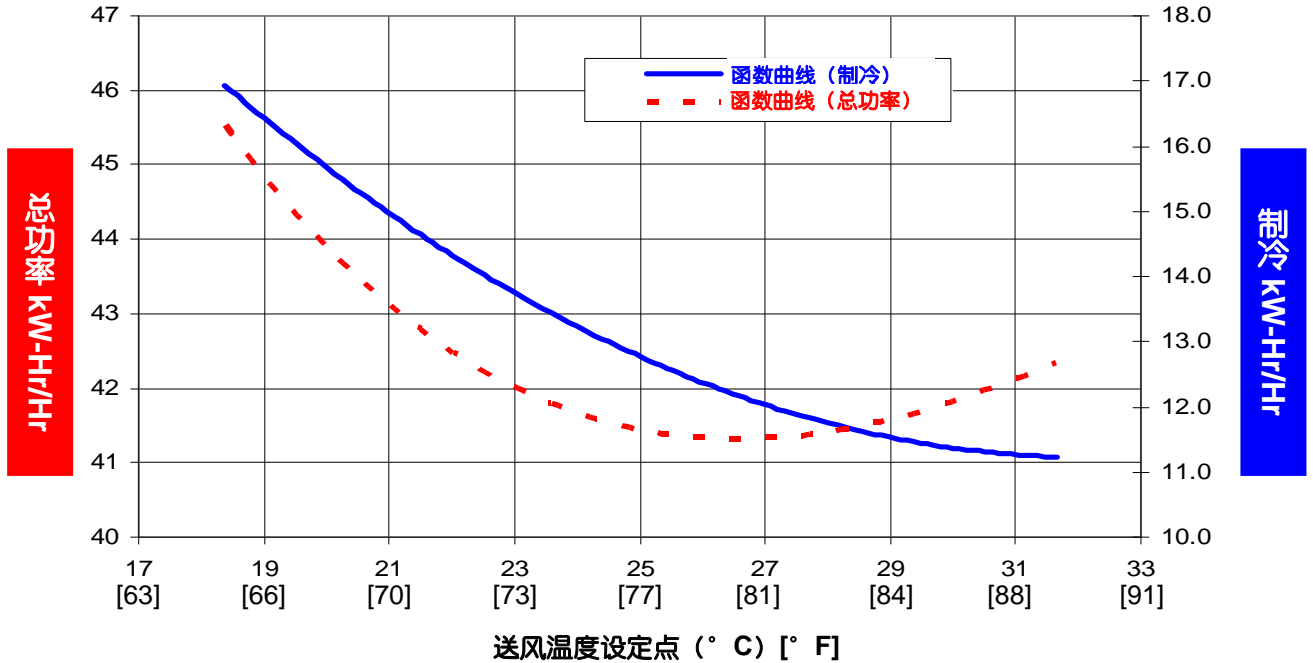
COP 定义为制冷设备所提供的制冷容量除以其所消耗的功率。例如，制冷容量为 30kW，而耗用功率为 10kW（冷水机、泵、空气处理单元），则其 COP 为 3。制冷系统的 COP 越大，其效率就越高。

采用 HACS 的冷水型 InRow RC

图 8 示出了针对采用 HACS 的冷水型 InRow RC 制冷的制冷能耗（蓝色）和总体组合（IT + 制冷）能耗（红色）所拟合的二次多项式曲线。需要注意的是，在冷通道温度超过 29° C (84° F) 之后，作为干球温度的函数的所需制冷能量缩减率将逐渐变小。尽管冷却装置 COP 在此温度以上继续提高，总体热负荷将作为增长中的服务器气流量/功率的函数而增长。所需制冷能量的逐渐缩减与所需 IT 能量的增加相结合，其结果是在 25° C 至 27° C (77° F 至 81° F) 之间可获得最小的能量率。这表明，对于这种具体的系统，在超出此温度范围之后，所需总能量不会继续作为提高后的冷通道温度设定点的函数而继续改善。

图 8

带气流遏制系统的 RC 制冷解决方案
总用电量需求 (IT + 制冷系统)



无气流遏制系统的冷冻水型 InRow

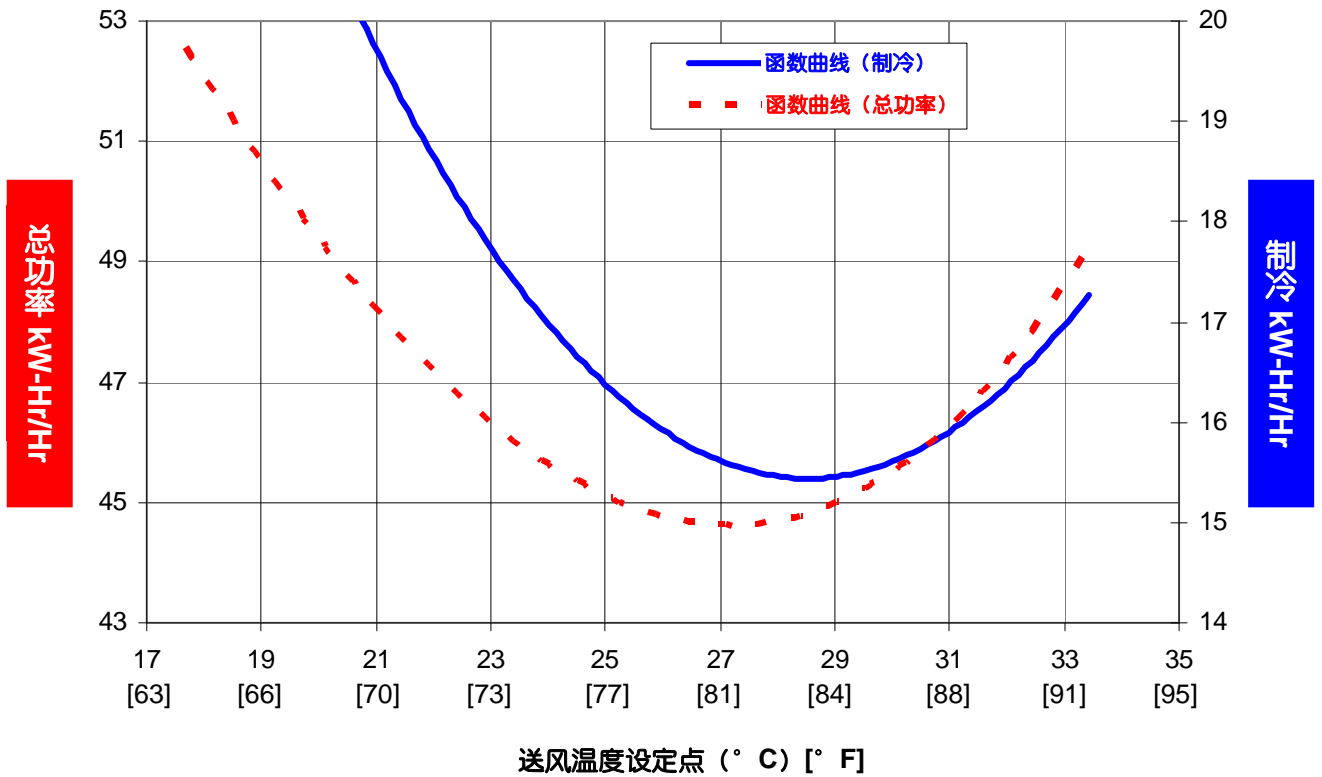
图 9 显示了针对无 HACS/开放行级冷冻水型 InRow RC 制冷的制冷能耗 (蓝色) 和总体组合 (IT + 制冷) 能耗 (红色) 所拟合的二次多项式曲线。需要注意的是，在冷通道温度超过 29°C (84°F) 之后，作为增长中的冷通道干球温度的函数的所需制冷能量缩减将发生逆转，在此点处制冷能量实际上开始增加。尽管冷水机 COP 继续提高，冷水机所需的总能量以及行级制冷能量将作为增长中的服务器气流量/功率的函数而增长，因此对处于较高温度下的制冷解决方案，在单位时间内需要更多的能量。

HACS 解决方案与开放行/无气流遏制系统方案的性能差别要归因于开放行级解决方案对冷却装置气流量更为迅速的响应。尽管制冷系统能量增长的点落后于总体组合 (IT + 制冷) 能量增长的点，净效应将导致总体组合能量在 27°C (81°F) 左右出现非常急剧的增长。在此情况下总能耗在 33°C (92°F) 至 19°C (67°F) 之间基本相等。

所需制冷能量与所需 IT 能量的增加相结合，其结果是在 27°C (81°F) 可获得最小的能量率。这表明，对于这种具体的系统，在超过此温度之后，所需总能量不会继续作为提高后的冷通道温度设定点的函数而继续改善。

图 9

无气流遏制系统的 RC 制冷解决方案
总用电量需求 (IT + 制冷系统)

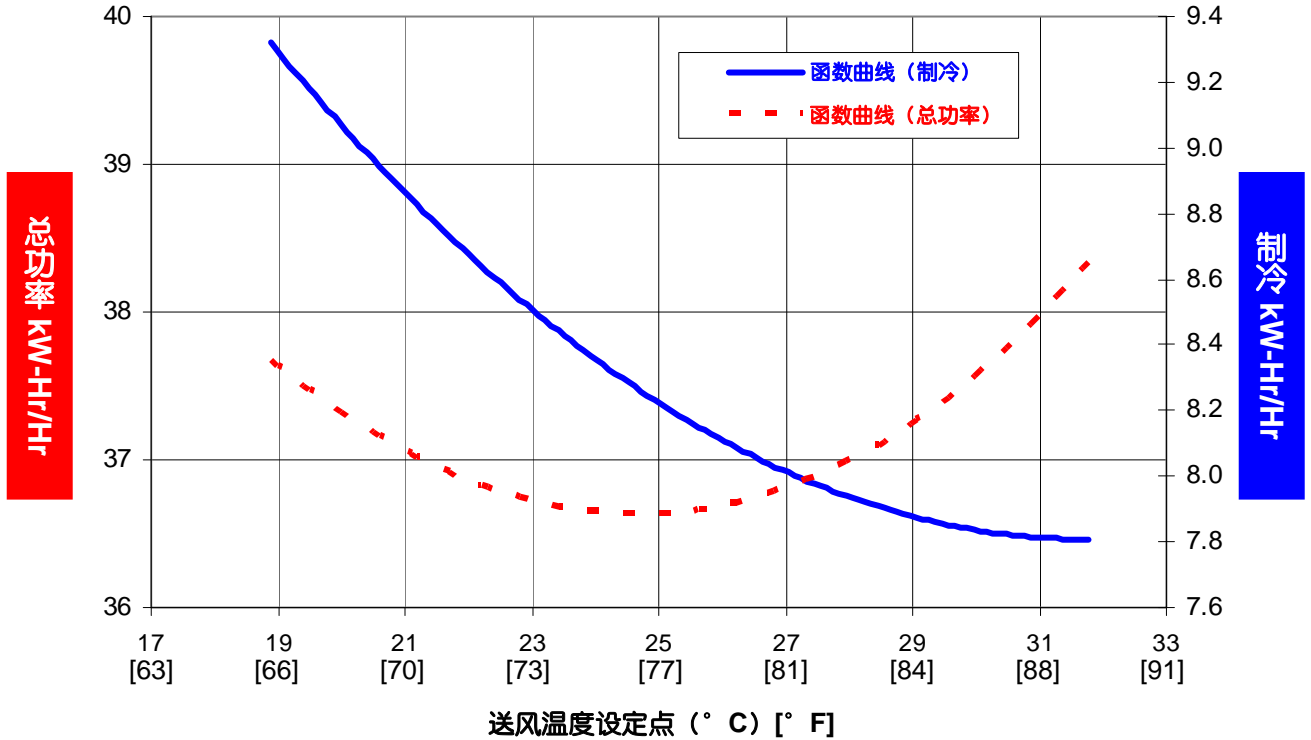


采用 HACS 的直膨型 InRow

图 10 示出了针对采用 HACS 的开放行级直膨型 InRow RD 制冷的制冷能耗 (蓝色) 和总体组合 (IT + 制冷) 能耗 (红色) 所拟合的二次多项式曲线。在此情境下需要注意的是, 制冷 COP 显著优于任何一种冷冻水解决方案。这要归功于在“试验结果”一节开头所讨论的非标准冷水机配置。与其它热通道气流遏制系统试验一致, 随着温度超过 29° C (84° F), 制冷系统的能量改善将开始减小。行级制冷还是需要增大冷却装置气流量, 以便与 IT 设备流量的增加相匹配。此外在此情境下, 由于制冷在所需总能量中占比例较小, 组合能耗增加的点将在较低温度下出现。在这一具体情境下, 效率最佳 (即组合能耗最小) 的点在 24° C (76° F)。

图 9

带气流遏制系统的 RD 10kW 制冷解决方案
总用电量需求 (IT + 制冷系统)



根据热学性能选择 IT 设备的说明

由于多数情况下与制冷解决方案相关的能量会随工作温度的提高而降低，人们可能倾向于选择在较高温度下功率变化很小的 IT 设备。但如果该设备流量在高温下不能扩增，它也不能在较低温度下缩减。选择风机的目的是在温度升高时达到适当的内部温度。它必须能够应对上限情况。它在较低温度下会按比例缩减，因为不需要高流量来实现可接受的温度。不能按比例增减的 IT 设备就不能利用低温下的低能耗优势。如果一切可行，IT 厂商应就设备在较宽的温度范围内使用多少风机功率给予指导。

系统设计的考虑因素

需要指出的是，本研究及分析聚焦于 IT 设备的入口空气温度。对于行级空调，它与来自空调系统的送风温度基本相同；然而对于典型的机房级制冷系统，来自空调系统的送风温度将远低于 IT 设备的入口空气温度。例如，在典型的机房级制冷系统中，送风温度可能是 13° C (55° F)，而 IT 入口温度则在 21° C (70° F) 水平。这种差别源自于机房式制冷系统中的空气混合，而且会对空调机的效率和容量造成重大的负面影响。减少空气混合的系统变更（如行级制冷或气流遏制系统）将减小这一温度差异，而且总能提高制冷系统效率，但不一定能提高整个设施的效率。

除确定最小能耗温度点之外，本文所给出的数据表明了较高温度下运行的能源优势的相对幅度。需要指出的要点是，并非所有数据中心都能立即利用工作温度急升的优势。在历史上，机房级制冷会导致所实现温度不等。由于有混合，热点（所实现的温度显著高于送风温度的地方）在一小部分 IT 设备中很常见。尝试提高温度可能会对处于热点的系统产生风险。这一点在行级制冷中造成的问题通常要小得多，当对任何制冷系统施用密闭时，通常可消除此问题。为了利用升温运行的能源优势，数据中心可能必须要考虑制冷系统类型和/或气流管理技术，如密闭。

结论

由于 IT 设备内的流量可变，确实存在一个能耗最低的最佳点；而且答案并不一定是“越高越好”。在所研究的三种情境中，最低的能源用量均出现在 24° C (76° F) 至 27° C (81° F) 区间内。每种情况下的触发因素都是：IT 风机功率增加并超出增量将使制冷所需的能量减少。尽管并非对最佳点做出评价，但比较图 8 和 9 的总能量可以很明显地看出，加装气流遏制系统可节能 10%左右。

本实验中的直膨型解决方案实际上比两项冷冻水试验都更高效，原因在于在“试验结果”一节开头处所讨论的非标准冷水机配置。由于制冷解决方案在总能源用量中所占比例较小，其相对贡献率往往会将最佳点移向一个更低的温度，因为 IT 的贡献率占据更大的主导地位。效率更高的设施往往遵守这一模式。

为了实现效率最高的制冷系统，必须以合适的温度运行。要实现这一目标就应考虑制冷过程所耗用的能源以及 IT 风机功率，还应考虑实现这一目标的最佳制冷解决方案以及气流管理技术。送风温度的提高只能在考虑其对每一件 IT 设备的影响之后方可实施。如果数据中心成功地提高了它们的实现温度，则将在冷水机方面实现很大的节能，在湿度控制方面有可能实现节能，而且还可能增加节能冷却模式运行的小时数。



关于作者

David Moss 在电子封装领域有超过 26 年的工作经验，其中包括在防务电子领域的 8 年，还有在 Dell 公司工作的 18 年。他设计过从笔记本电脑到服务器的多种产品，持有 20 余项 Dell 公司的专利，主要是在热学工程领域。在 2000 初，他由服务器系统体系结构转到数据中心策略方面，目前担任负责数据中心体系结构的副总裁，帮助制定 Dell 的电源/制冷策略。他是 ASHRAE 数据通信技术委员会、TC9.9 的有投票权会员，而且是绿色网格 (The Green Grid) 的参与会员。

John Bean Jr. 是施耐德电气信息技术事业部负责机柜制冷解决方案的创新主管。此前 John 在 APC 担任制冷解决方案的全球工程经理，负责开发若干种新的产品平台，并在美国和丹麦建立工程和实验室设施。在加入 APC 之前，John 在其他从事任务关键型制冷解决方案开发和生产的公司担任工程经理。



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