

数据中心制冷系统的 节能冷却模式

第 132 号白皮书

版本 0

作者 John Niemann
John Bean
Victor Avelar

> 摘要

在某些天气条件下，一些制冷系统在节能冷却模式下运行每年可以节省 70% 以上的制冷能耗，相应的该年度的 PUE 也会有 15% 以上的改善。但是，市面上有至少 17 种不同类型的节能冷却模式，由于没有明确的行业定义，因此难以比较、选择或说明。本白皮书将介绍这些不同类型节能冷却模式的术语和定义，并且利用数据中心关键特性参数比较它们各自的性能表现。

目录

[点击内容即可跳转至具体章节](#)

简介	2
节能冷却模式的目的和作用	2
节能冷却模式的种类	3
比较不同类型节能冷却模式的性能	8
影响节能冷却模式运行的因素	15
消除或减少不使用节能冷却模式的制冷系统	16
结论	17
资源	18

简介

能源成本不断攀升以及人们对绿色环保的愈加重视促使节能需求越来越强烈。节能冷却模式在某些天气条件下的节能潜力对 IT 环境非常具有吸引力。**如果配置了节能冷却模式，寒冷月份可以利用室外空气制冷，让需要使用制冷剂的制冷组件，比如冷水机和压缩机，可以关停不用或在以较低负荷运行。**直到不久前，节能冷却模式运行仍被认为是一种备选方案或辅助运行模式，但是现在它已经成为满足数据中心操作人员或行业标准（比如 ANSI/ASHRAE 标准 90.1-2010《除低层住宅外的建筑能源标准》）能效目标的必要条件。数据中心操作人员在一些天气条件下发现制冷系统可以以节能冷却模式作为首选工作模式，而让基于制冷剂的工作（即，机械制冷模式）作为辅助工作模式或备用方案。

尽管节能冷却模式的概念已经在数据中心行业内得到认可，但是相关的术语还未标准化并且定义也容易引起混淆。其中最容易引起混淆的一点是使用“节能冷却(economizer)”这一术语来形容制冷系统内的一个组件或制冷系统的子设备。**而实际上“节能冷却”不是指一个物体，而是指一种运行模式。**

制冷系统可以使用风冷制冷、水冷制冷或制冷剂制冷来将数据中心内的热量排到室外。“风侧节能冷却”和“水侧节能冷却”术语常常被用来形容包含节能冷却模式的制冷系统。由于没有其它标准定义，本白皮书将就利用“风”或“水”将热量排到室外的节能冷却模式类型建议相关术语和定义。会涉及到每种节能冷却模式类型，其中包括六种被认为最适合数据中心使用的类型。然后我们将从多个性能特征比较这六种类型的节能冷却模式。

阅读本白皮书需要读者对各种排热系统类型有基本的认识。如果需要更多理解不同类型排热系统的制冷组件，请查阅第 59 号白皮书《用于 IT 环境的不同类型的空调设备》。

资源链接 第 59 号白皮书

用于 IT 环境的不同类型的空调设备

节能冷却模式的目的和作用

许多不同类型的装置和制冷技术被用来制冷数据中心。但是，所有这些系统都会部分或全部包含以下四个基本要素：

- 排热：风机或泵，流体（比如空气或水），将热量从数据中心运送至室外环境。
- 换热：利用盘管或通风孔将热量从一道热流体转换到下一道热流体。不论哪种，最后都需通过热交换将热量排到室外。
- 压缩机：系统使用制冷剂的高压和低压形态使热量“逆势”从冷区（数据中心）流向热区（夏天户外）。高压制冷剂比室外温度高许多。正是这种“温度提升”让热量可以从数据中心流向室外环境。
- 蒸发辅助：利用冷却塔、湿式过滤器或喷头将水蒸发以帮助将热量排到室外。

标准水冷数据中心会用到以上所有要素为数据中心制冷。传热和压缩机在制冷时会消耗电能，而蒸发辅助会消耗水。

> 自然冷却

节能冷却模式有时也被称作“自然冷却”。这个术语可以用来说明节能冷却模式的一般情况，但应注意以下几点。节能冷却模式下，制冷机组的压缩机会部分或完全转为旁通运行。大多数使用节能冷却模式的系统大部分时间是将压缩机部分转为旁通运行，因此节省了部分能源，但是制冷并不是“免费”的。此外，即使节能冷却模式将压缩机完全转为旁通运行，在利用风机或泵排放热量时还是会有所耗能，并且很可能还会用到其它需要耗能的功能，比如加湿*。也就是说即使在完全节能冷却模式下，制冷也并不是“免费”的。

* 在雅虎开发的“鸡笼”式数据中心设计中，通过特殊的建筑设计可以利用自然对流来排放热量，从而减少使用或完全不使用风机来排热。

制冷系统按照数据中心满负载、高室外温度的最恶劣情况进行设计。当数据中心负载较少且室外温度凉爽时，系统必须降低功率以减少向数据中心供冷。不幸的是，制冷机组的各种装置在这种情况下利用不充分且工作效率低。为了提高这种情况下的工作效率，制冷装置经过改进，配置了变频调速驱动、分级控制和其它功能。但是，仍然非常耗能。为了帮助在数据中心负载较少且室外温度凉爽时降低电力消耗，节能冷却模式应运而生。

在节能冷却模式下，压缩机功能全部或部分被旁通所取代，从而消除或减少了压缩机的能耗。压缩机主要是在室外温度高于数据中心温度时用来将数据中心里的热量排到室外。但是，当室外温度比数据中心低到一定程度时，热量就会自动流向室外，而无需压缩机进行“增压升温”，因此这时不必使用压缩机。由此可见，在条件允许时，压缩机可以旁通运行，以节省用电。此外，系统配置了汽化辅助装置，在条件允许时，也可以将其关闭或改为旁通运行以节约用水。

过去，在数据中心制冷系统内增加节能冷却模式需要承担额外支出而且工作也更为复杂，并且节能冷却模式只在一些特殊天气条件下才能够发挥作用，比如高纬度地区。但是，这种情况已经发生变化，由于以下原因，节能冷却模式现在被认为在大多数地区都能够发挥作用：

- 数据中心在部分负载下工作加大了节能冷却模式所能带来的好处，越来越多的设计师认识到数据中心在其生命周期里有相当一部分时间是在较低的负载下运行。IT设备的动态功率变化更使节能冷却模式的作用进一步得到加强。
- 数据中心在较高IT回风温度下工作的发展趋势使节能冷却模式的可用时间增多，特别是在较为温暖的天气条件下。
- 现在大多数新增的节能冷却模式可以实现“部分”节能冷却模式工作，极大增加了各种条件下所能节约的能源数量。
- 用以量化节能冷却模式节能性能的工具现在已经有所改进，常常结合ROI预测产生显著节约的可能性。
- 节能冷却模式的实际工作效果以及控制和监控系统的完善增加了人们对这些模式不会对数据中心可靠性造成负面影响信心。

压缩机旁通功能是所有节能冷却模式的一个核心概念。如何实现旁通功能（以及实现节能）取决于制冷机组的设计，详情请见下文段落。

节能冷却模式的种类

节能冷却模式有19种基本类型，其中15种可用于厂房数据中心（六种采用风侧，九种采用水侧）。其余四种采用水侧方式的节能冷却模式由于将冷凝水直接带进数据中心使设备受水损坏的几率增加，因此不建议在数据中心内使用。**图1**所示为这15种节能冷却模式¹。在后面的段落中我们将就每种类型进一步说明。图中用黄色标注的类型将在本文后面章节中将作详细分析。

¹ CRAH：计算机房空气处理装置，CRAC：计算机房空气调节装置

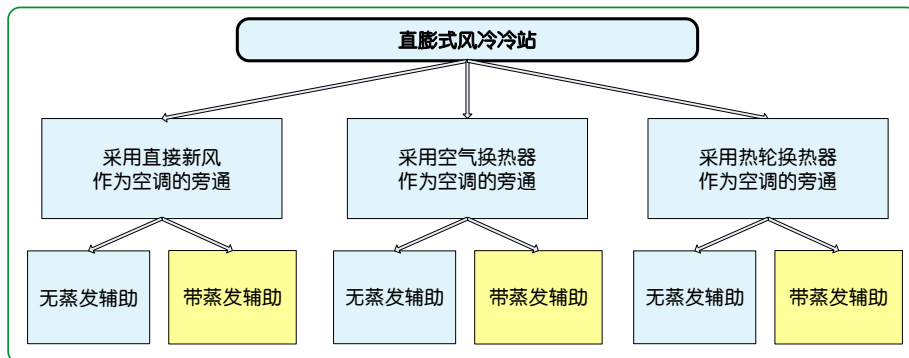
> 串联/并联

节能冷却模式可以按以下两种方式中的一种配置：串联或并联。

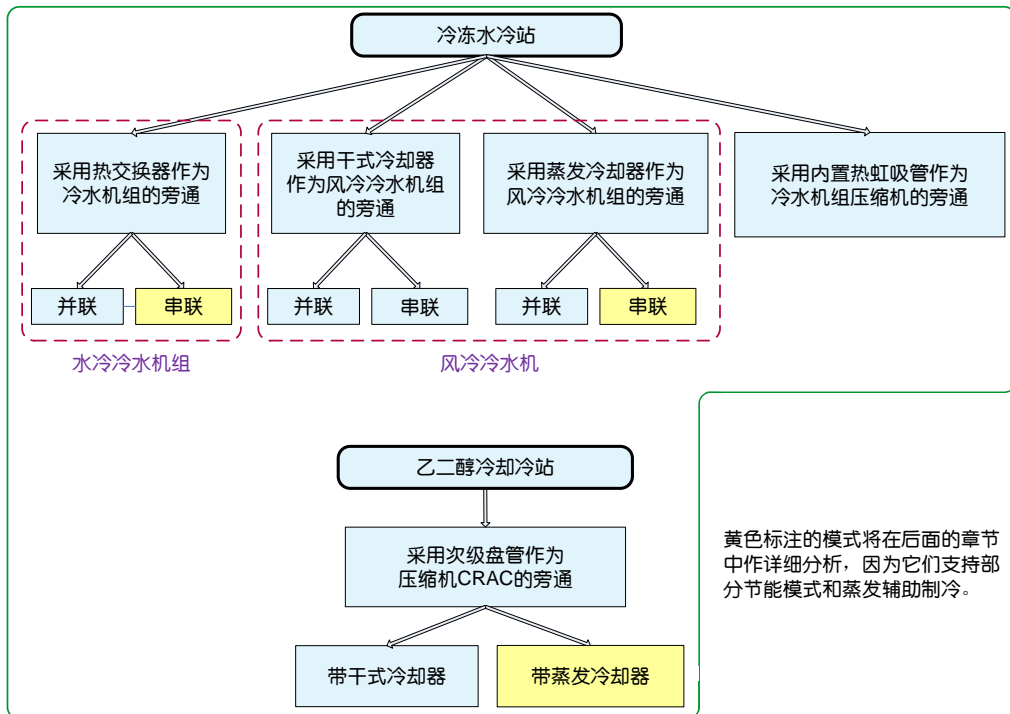
在串联配置中，压缩机的旁通装置（比如板式换热器）与压缩机串联安装。这种配置利用热交换器“预冷”空气或水，让压缩机部分转入旁通模式，减少压缩机的排热量，以部分节能冷却模式节省相当数量的压缩机能耗。

在并联配置中，热泵的旁通装置以并联形式与热泵连接。这种配置不支持部分节能冷却模式，是一种“要么全有要么全无”的方式，因此不能以部分节能冷却模式节省能耗。

为了公平地比较不同类型的节能冷却模式，应将一种节能冷却模式类型所需的所有制冷系统组件全部纳入考虑。比如，有时冷水机组里的板式换热器会被误认为是“节能冷却装置”，而实际上它只是让制冷系统在节能冷却模式下运行的一个组件，此外还需要冷却塔、冷凝水泵、冷冻水泵以及计算机房空调处理器（CRAH）。这些组件中的任一个缺失，节能冷却模式都不能实现，即使在最冷的天气下也不可能。这就是为什么我们一般认为“数据中心节能冷却装置”是一种偏颇的说法，而采用“制冷系统的节能冷却模式”作为更精确的表达。



风侧节能冷却模式



水侧节能冷却模式

黄色标注的模式将在后面的章节中作详细分析，因为它们支持部分节能模式和蒸发辅助制冷。

图 1 节能冷却模式的种类

下面我们将分别介绍以上各种节能冷却模式。每种模式说明均首先列出该模式必需的组件（即，完全不借助机械蒸发压缩）²。所有说明均设定为需要使用控制系统²。

采用直接新风作为空调的旁通

关键组件： 风机、百叶、风门、过滤器，（在与蒸发辅助时还需要用到湿膜棉片和泵）

² 控制系统指调节系统运行的组件，比如在达到一定室外温度时，关闭水阀或通风百叶。

新风节能冷却模式（有时称作“直接通风”），当室外空气条件在设定值范围内时，利用风机和百叶从室外经过过滤器抽取一定数量的冷风并直接送入数据中心，请参见图 2。

百叶和风门可以控制热风排到室外的数量以及与数据中心送风的混合数量以保持环境设定温度。尽管送风已经经过过滤，但是并不能完全消除微粒，比如防止烟雾和化学气体，进入数据中心。

这种类型的节能冷却模式也可以结合**蒸发辅助**一起使用，这样室外空气在进入数据中心前需要先穿过潮湿的网状介质。在气候干燥的地区，蒸发辅助可以使温度降低高达 19°C (35°F)，延长节能冷却模式的可用时间。这种制冷效果类似于一个人从大海中出来，感受到凉飕飕的海风。需要注意的是，这种类型的节能冷却模式在结合蒸发辅助使用时会增加数据中心的湿度，因为直接送入数据中心的新风会先经过蒸发环节。蒸发辅助在干燥气候环境下优势最大。如果是较为潮湿的天气环境，则应结合 ROI（投资回报率）评估是否使用蒸发辅助。这种类型的节能冷却模式支持在部分节能冷却模式下运行。

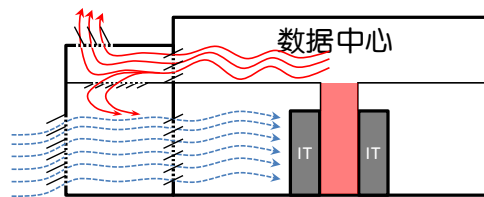


图 2

采用直接新风作为
空调的旁通

采用空气换热器作为空调的旁通

关键组件：风机、固定板式空气换热器，（在与蒸发辅助结合使用时还需要用到湿膜棉片和泵）

采用空气换热器作为空调旁通的模式（有时称作“间接通风”），当室外空气条件在设定值范围内时，利用室外空气间接为数据中心制冷。这种模式使用风机将室外冷风吹到一组板或盘管上面，冷却板或管的另一侧的数据中心内的热空气，将数据中心内的空气与室外空气完全隔离（请参见图 3a）。这种类型的节能冷却模式也可以与**蒸发辅助**结合使用，向板或管的外层喷水以便进一步降低室外空气的温度，从而冷却数据中心内的热风。和前面一种类型的节能冷却模式不同，这里的蒸发辅助不会增加数据中心内的湿度。图 3b 展示的是带有蒸发辅助的空气换热器以及采用这种类型节能冷却模式的完整制冷系统。这种类型的节能冷却模式既能支持在完全节能冷却模式下运行也支持在部分节能冷却模式下运行。

图 3a

采用空气换热器作为空调的旁通

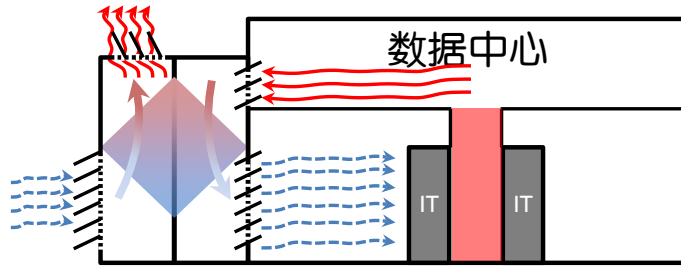
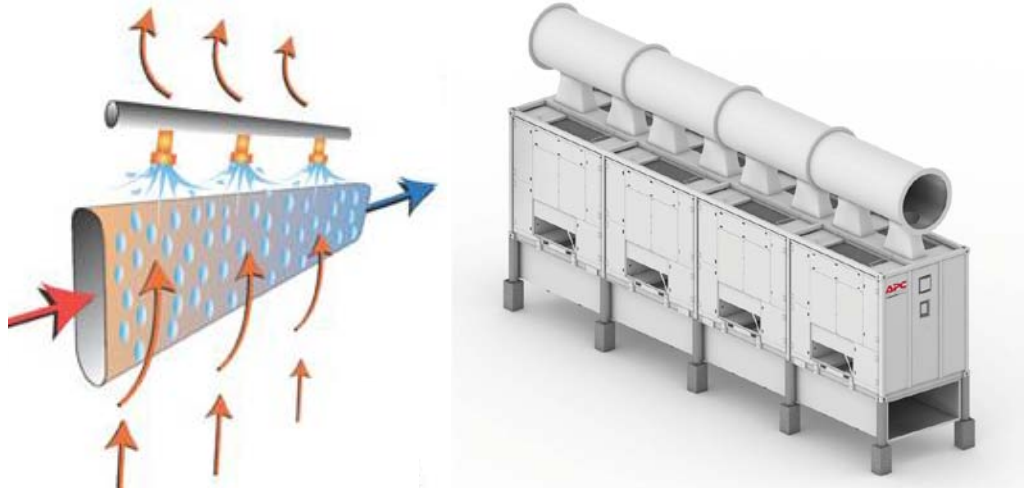


图 3b

带有蒸发辅助的空气换热器（左）以及采用空气换热器式空调节节能冷却模式的完整制冷系统（右）



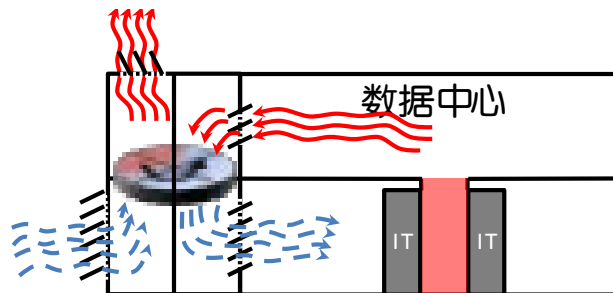
采用热轮换热器作为空调的旁通

关键组件：风机、热轮换热器（在与蒸发辅助结合使用时还需要用到湿膜棉片和泵）

采用热轮换热器作为空调旁通的模式，当室外空气条件在设定值范围内时，利用风机将室外冷风吹入热轮换热器，以使数据中心空间保持较为干燥的环境。请参见图 4 的示意图和热轮换热器图片。热轮换热器采用特殊换热材质，这种材质可以防止污染物污染数据中心内的空气。这种类型的节能冷却模式也可以与蒸发辅助结合使用，室外空气在进入数据中心前需要先穿过潮湿的网状介质。这种类型的节能冷却模式即支持在完全节能冷却模式下运行也支持在部分节能冷却模式下运行。

图 4

采用热轮换热器作为空调的旁通（左）以及热轮换热器图片（右）



采用热交换器作为冷水机组的旁通

关键组件：冷却塔、泵、阀、板式换热器、CRAH

采用热交换器作为冷水机组旁通的模式，当室外空气条件在设定值范围内时，利用冷凝水间接冷却数据中心的冷冻水。泵将冷凝水送入并穿过板式换热器，从 CRAH 使用的冷冻水得以冷却，而无需将两种水混合，请参见图 5。冷水机组的旁通阀可以根据冷凝水的冷冻温度决定是否关闭。这种类型的节能冷却模式在热交换器与冷水机组串联连接时可以支持部分运行。尽管在本文中不作详细探讨，但是这种类型的节能冷却模式也可以使用大型水体（比如，湖泊）作为冷凝水水源。

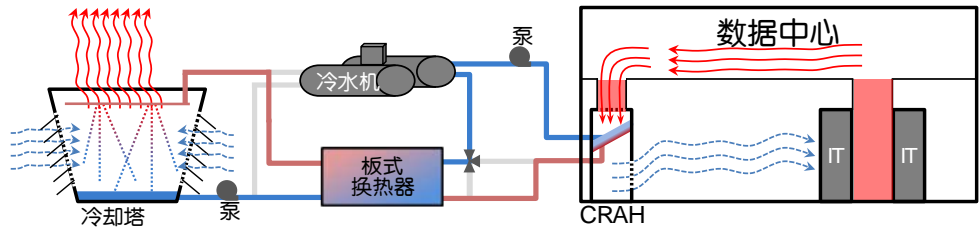


图 5
采用热交换器作为冷水机组的旁通

采用内置热虹吸管作为冷水机组压缩机的旁通

关键组件：冷却塔或干式冷却器、带有热虹吸系统的冷水机组、泵、阀、CRAH

一些冷水机组支持内置热虹吸管作为压缩机旁通的节能冷却模式，允许当室外空气条件在设定值范围内时关闭压缩机。在这种模式下，冷水机组被用作简单的热交换器。热虹吸现象使热的制冷剂自然地流入冷凝水盘管，在这里制冷剂得到冷却。然后经过冷却的制冷剂在重力作用下或在泵的辅助下返回蒸发器以冷却数据中心的冷冻水。制冷剂重新变热，然后按照之前的步骤循环往复。热虹吸特征无需板式换热器。但是，这种节能冷却模式不允许冷水机组在部分节能冷却模式下运行，因为在热虹吸模式工作时，压缩机必须关闭。

采用干式冷却器（或蒸发冷却器）作为风冷冷水机的旁通

关键组件：干式冷却器、泵、阀、CRAH（在与蒸发冷却器结合使用时还需要用到湿膜棉片和泵）

采用干式冷却器作为风冷冷水机旁通的节能冷却模式，当室外空气条件在设定值范围内时，利用一种叫做干式冷却器的热交换器直接冷却数据中心内的冷冻水。泵将冷冻水（通常混有乙二醇）送入并穿过干式冷却器，在这里利用室外冷风冷却冷冻水，然后将冷却后的冷冻水送往 CRAH，请参见图 6a。冷水机的旁通阀可以根据室外冷风的冷冻程度决定关闭或在更高效率下运行。只有当热交换器与冷水机串联连接时才支持在部分节能冷却模式下运行。请注意，图 6a 中的干式冷却器和控制器已完全整合到风冷冷水机解决方案中。这是这种节能冷却模式类型的设定解决方案。与现场安装同样的组件相比，这种成套式解决方案占用面积较小，而且更易于掌控且效率更高。采用这种节能冷却模式的风冷冷水机解决方案，请参见图 6b。

图 6a
采用干式冷却器作为风冷冷水机组的旁通

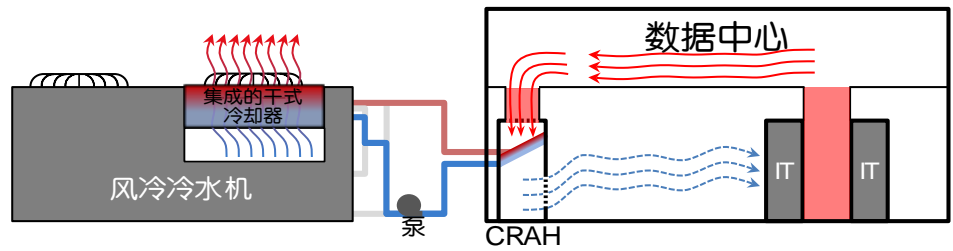


图 6b
带有干式冷却器的风冷冷水机组



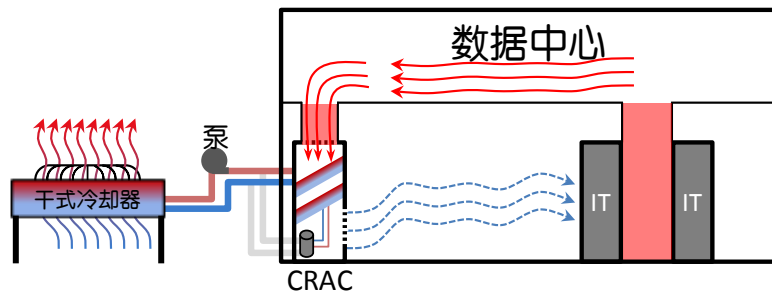
这种类型的节能冷却模式也可以结合蒸发辅助使用，室外风经过潮湿的网状介质或穿过水雾得以进一步冷却，从而更加降低冷冻水的温度，提高节能冷却模式的可用时间。这时应注意用蒸发冷却器代替干式冷却器。

采用次级盘管作为 CRAC 压缩机的旁通

关键组件：干式冷却器、泵、带有次级盘管的CRAC（在与蒸发冷却器结合使用时还需要用到湿膜棉片和泵）

在这种类型的节能冷却模式下，直膨式（DX）CRAC 包含一个独立的次级冷凝水盘管，可在节能冷却模式时使用。当室外空气条件在设定值范围内时，泵将冷凝水送入并穿过干式冷却器，在这里利用室外冷风使冷凝水冷却，然后将冷却后的冷凝水送到 CRAC 的次级盘管（图 7）。这种类型的节能冷却模式支持部分运行，也可以与蒸发辅助结合使用，但应注意将干式冷却器换成蒸发冷却器。另外，还应注意虽然可以使用冷却塔来冷却冷凝水，但那样会增加水处理要求，因此不推荐在数据中心内使用

图 7
采用次级盘管作为 CRAC 压缩机的旁通



比较不同节能冷却模式

节能冷却模式必须尽可能宽泛地利用室外条件，以便延长节能冷却模式工作时间，节省能源。但是，在极端酷热的天气条件下，还是需要至少部分采用制冷剂制冷模式（即，机械制冷），以便在节能的同时，保证数据中心环境的可靠性。节能冷却模式的两个关键特征可以在这方面发挥作用：

1. 压缩机减低负载运行，支持部分节能冷却模式运行
2. 蒸发辅助

在图 1 中我们列出了 15 种节能冷却模式，并且标识出其中具备以上两个关键特征的 6 种节能冷却模式。下面我们将在表 1 中比较这六种节能冷却模式的各项质化特征。蓝色阴影表明该种节能冷却模式在这一特性上表现最佳。表 2 将比较这 6 种节能冷却模式的量化特征。

表 1

不同节能冷却模式的量化比较 (蓝色标注表明其在该特性上表现最佳)

节能冷却模式特征	风侧节能冷却模式			水侧节能冷却模式		
	采用新风作为空调的旁通 (带蒸发辅助)	采用空气换热器作为空调的旁通 (带蒸发辅助)	采用热轮换热器作为空调的旁通 (带蒸发辅助)	采用热交换器作为冷水机组的旁通 ³	采用蒸发冷却器作为风冷冷水机的旁通 ³	采用次级盘管作为 CRAC 压缩机的旁通 (带蒸发辅助)
建筑外壁兼容性	可能需要修改建筑外壁	可能需要修改建筑外壁	可能需要修改建筑外壁	不会影响建筑外壁	不会影响建筑外壁	不会影响建筑外壁
可改造性	不可在现有系统基础上改造	不可在现有系统基础上改造	不可在现有系统基础上改造	如果空间许，可以改造	如果空间允许，可以改造	需要更换 CRAC 机组
控制的复杂程度	少数装置需要控制	少数装置需要控制	少数装置需要控制	大部分装置都需要控制	中等数量的装置需要控制	中等数量的装置需要控制
数据中心湿度控制	依赖于室外湿度	独立于室外湿度	独立于室外湿度	独立于室外湿度	独立于室外湿度	独立于室外湿度
平均寿命	热交换器寿命 20-40 年	热交换器寿命 20-40 年	热交换器寿命 20-40 年	板式换热器寿命 10-15 年	蒸发冷却器寿命 10-20 年	制冷机组寿命 10-20 年
可用性风险 -冷却水损失 -空气质量差 -消防	易受室外空气质量影响。使用气体灭火剂灭火时需要关机	失水造成的宕机风险较低。无因空气质量差或消防造成的风险	失水造成的宕机风险较低。无因空气质量差或消防造成的风险	冷却塔补给水损失可能造成宕机	失水、空气质量差、消防不会造成宕机	失水、空气质量差、消防不会造成宕机
占地面积	0.41 ft ² / kW 0.038 m ² / kW	0.788 ft ² / kW 0.073 m ² / kW	1.72 ft ² / kW 0.16 m ² / kW	1.94 ft ² / kW 0.18 m ² / kW	3.34 ft ² / kW 0.31 m ² / kW	2.02 ft ² / kW 0.19 m ² / kW
是否需要制冷剂模式作为后备	如果空气质量差，应作完全后备	极端天气时作部分后备	极端天气时作部分后备	极端天气时作部分后备	极端天气时作部分后备	极端天气时作部分后备

楼体的兼容性

采用新风、空气换热器和热轮换热器作为旁通的空调需要在室外冷却设备到数据中心 IT 机房之间敷设风管。一般来说，这需要在进行建筑设计时专门为这些风管预留敷设空间，或者在设计时将 IT 机房布置在邻近室外冷却设备的位置。因此，这些类型的节能冷却模式通常较难安装到现有的楼体和多层建筑中。使用水管的节能冷却模式则在安装上更具灵活性，因为水管传热占用的物理空间要小得多，比较容易适应现有建筑条件。

可改造性

一般来说，改造的目的是要尽可能多的重复利用现有制冷基础设施。但是要将传统制冷系统改造为采用直接通风节能空调几乎是不可能的，因为它们相互不能兼容（传统系统使用水冷，而直接通风空调使用风冷）。在使用 CRAH 或 CRAC 机组的数据中心里，有三种方式可以在将现有设备改造成节能冷却模式。

³ 假设热交换器与冷水机组串联连接，允许在部分节能冷却模式下运行。

// 从根本上说，这种转换过渡的可靠性取决于控制系统。配有节能冷却模式的标准预制制冷系统，它的控制系统结合硬件同步进行设计和配置。这类控制系统就比根据特殊制冷系统现场定制的控制系统的可靠得多。

//

第一种也是最常见的一种是增加一台热交换器作为水冷冷水机的旁通（即，利用热交换器其作为冷水机旁通的节能冷却模式）。这通常需要在冷水机附近安装一台板式换热器，并相应配置控制装置和旁通阀。热交换器比冷水机小很多，因此在现有冷水机房内一般都会有足够的空间安装热交换器。

第二种方法是为风冷冷水机增加一台热交换器作为旁通（即，利用蒸发冷却器作为冷水机旁通的节能冷却模式）。这通常需要在冷水机附近安装一台蒸发冷却器，并相应配置控制装置和旁通阀。根据气候条件的不同，蒸发冷却器的总占地面积可能比冷水机大得多，因此需要有足够的安装空间。

第三种方法是为直膨式乙二醇制冷系统的压缩机增加一台热交换器作为旁通（即，利用次级盘管作为 CRAC 压缩机旁通的节能冷却模式）。这种方式非常难以执行且可行性不高，因为次级盘管必须安装在制冷机组内部。改造这种类型的制冷系统需要将整个 CRAC 机组更换为包含有次级盘管的机组。

控制的复杂程度

节能冷却模式和制冷剂模式之间的转换过渡可能会非常复杂，在转换过渡期间还可能会造成暂时的制冷损失。从根本上说，这种转换过渡的可靠性取决于控制系统。**配有节能冷却模式的标准预制制冷系统，其控制系统结合硬件同步进行设计和配置。这类控制系统就比根据特殊制冷系统现场定制的控制系统的可靠得多。**

利用空气换热器或热轮换热器作为空调旁通的节能冷却模式，其控制系统最为简单。控制系统最为复杂的是利用热交换器作为冷水机组旁通的节能冷却模式，因为板式换热器需要冷凝水温度较低而冷水机组需要冷凝水温度较高，这之间形成了一个“死区”。

> 节能冷却模式相关规定

节能冷却模式已被普遍认为是数据中心设计的一种选择。客户可以根据自己的预算和实际条件，选择是否配置节能冷却模式。但是，现在越来越多的标准开始规定新建数据中心的最低性能，它们可能会明示或暗示要求配置节能冷却模式。

其中最主要的标准是 ANSI/ASHRAE 标准 90.1-2010 《除低层住宅外的建筑能源标准》。这个标准规定了建筑在能源绩效方面的最低要求，并且最近已扩大到数据中心。尽管 ASHRAE 不是具有强制执行力的法律机构，但是许多监管部门，包括美国政府和地方建筑规范已经采纳这个标准。此外，绿色建筑标准的制定组织，比如美国绿色建筑委员会的 LEED 标准，已经将 ASHRAE 90.1 作为对能源绩效的最低基准。

对于大多数遵循 ASHRAE 标准的数据中心来说，ASHRAE 90.1 为最低能源绩效定义了一个数据中心基准冷却系统。这个基准就是配置了本文前面介绍过的“利用液体换热器作为冷水机旁通”节能冷却模式的冷冻水系统。90.1 标准没有规定必须要用这个系统，但是任何被用于数据中心的系统，其能源绩效必须达到或超过这个带有节能冷却模式的系统。也就是说，**几乎所有新建的数据中心都必须配备某种节能冷却模式。**

数据中心湿度控制

表 1 中除了一种节能冷却模式之外，其它完全节能冷却模式均将室外空气与数据中心内的空气相互隔离。因此，即使室外湿度水平较高，也不会对数据中心内的湿度造成影响。但是，采用直接新风作为空调旁通的节能冷却模式由于将室外空气直接送入数据中心，所以在气候潮湿时，这种节能冷却模式的可用时间将大大减少。尽管了可以采取控制措施控制湿度，但是因此所额外消耗掉的能源可能会抵消节能冷却模式所节省的能源。

平均寿命

水冷式制冷系统通常比风冷式制冷系统的平均寿命短些。因为水流过管道会产生积垢。对于与使用蒸发辅助的制冷系统，其限制因素主要在于蒸发表面。总体来看，任何制冷系统的平均寿命都很大程度上取决于在生命周期内维护次数。

可用性风险

所有类型的节能冷却模式都可能遭受外部威胁，比如飓风、龙卷风和地震。但是，还有一些更为常见的威胁，我们必须加以考虑。

- **冷却水损失** — 数据中心附近如果有施工项目，那么市政供水就有可能被切断，这种情况可能会事先通知，也可能是突发状况。由于水冷冷水机一般完全依赖于冷却塔才能持续工作，利用热交换器作为冷水机旁通的节能冷却模式是最容易受此影响的一种节能冷却模式类型。通常，针对这个问题，我们可以安装一个容量足以维持冷水机 24 小时或更长时间持续工作的储水罐来予以解决。配备了蒸发辅助的其它节能冷却模式受此威胁的可能性相对要小很多，因为它须要酷热、干燥的室外天气条件也同时发生。

如果系统在整年里都依赖于蒸发辅助来制冷，那么也容易受到冷却水损失的影响。我们可以安装前面提到的储水罐或使用机械制冷系统来承担 100% 制冷负载。

- **空气质量差** — 将室外空气直接送入数据中心的节能冷却模式可能会对 IT 设备造成隐患。此类制冷系统的有些空气过滤器可以有效过滤微米级的微粒，比如微生物。但是，新风节能冷却模式还面临火山灰，附近火灾产生的烟雾或沙尘暴等威胁，在这些情况下过滤器很快就会被堵塞，从而需要转换到制冷剂制冷模式。针对这种威胁，可以安装冗余冷水机组为整个数据中心制冷。对于使用在蒸发辅助内使用湿式介质的节能冷却模式，介质片上可能会堆积微粒。因此，发生这种情况时，很可能需要更换介质片。

ASHRAE 曾出版过题目为《数据通讯环境内的微粒和气体污染》的白皮书和书籍。两种出版物都详细阐述了气体和微粒污染在不同节能冷却模式下可能导致的故障，特别是工业领域内直接新风节能冷却模式下可能会出现故障。同时，还介绍了确保无故障运行所允许使用的物质和可接受的工作环境。

- **数据中心内的消防** — 采用气体灭火剂消防系统（即，FM200、INERGEN、ECARO-25）的灭火系统必须对数据中心空间进行密封以便保证气体灭火剂能够达到足以灭火的浓度。这要求关闭所有风门和入口，从而对直接新风节能冷却模式造成问题。和应对空气质量差的威胁一样，我们可以使用机械制冷系统承担 100% 制冷负载来解决这个问题。

占地面积

不同制冷系统的占地面积取决于各个系统所需全部组件所占用的空间，包括节能冷却模式的组件和数据中心内的制冷单元。占地面积以数据中心的额定容量为准（即，数据中心可支持的最大 IT 负载）。采用新风作为空调旁通的制冷系统占地面积最小。采用空气换热器作为空调旁通的制冷系统占地面积稍高一些，因为增加了空气换热器。采用热轮换热器作为空调旁通的制冷系统占地面积是所有“基于空气”的节能冷却模式中最大的，几乎和需要使用冷却塔的冷供水机组一样大。

是否需要制冷剂模式作为后备

虽然制冷系统可以完全放弃制冷剂制冷模式，而完全采用节能冷却模式，但这样做也会增加宕机风险，因此不建议在对可用性要求较高的生产型数据中心内使用。此外，全球终年处于寒冷气候下的地方非常少。即使是在终年处于寒冷气候下的地方，很少的地点具备数据中心运行所需的可接入性、光纤接入、劳动力和其它资源。因此，大多数情况下，节能冷却模式至少需要达到部分额定容量的制冷剂后备模式来帮助度过一年中最热的日子。节能冷却模式中“热交换”次数越多，越需要配置达到 100% 额定容量的制冷剂后备模式。

比如，一个数据中心采用热交换器作为冷水机旁通的节能冷却模式，它会在三个位置实施热交换：CRAH、板式换热器和冷却塔。对于这个数据中心来说，要在 100% 节能冷却模式下向服务器输送温度为 20°C (68°F) 的空气，室外湿球温度的最大值必须终年保持在 2°C (35°F) 或以下⁴。如果冷水机负载降低至设计容量的 50%，室外湿球温度的最大值必须终年保持在 7°C (45°F) 或以下，但这个温度对于数据中心所处的实际状况来说仍然太低。这就是为什么这类节能冷却模式需要一套达到 100% 额定容量的冷水机组作为后备机械制冷系统。

采用直接新风作为空调旁通的节能冷却模式不需要任何热交换，因为室外空气是被直接送入数据中心。因此，配置一个达到部分额定容量的机械制冷系统，它就可以在较干燥的气候条件下全年运行。但是鉴于前面讲过的空气质量风险，以及需要控制湿度，最好还是配置达到全部额定容量的机械制冷系统。采用空气换热器作为空调旁通的节能冷却模式虽然有一次“热交换”，但却避免了空气质量风险和湿度控制问题，因此也就可以节约购置和运行达到全部额定容量的机械制冷系统所需的费用。

未来，虚拟机将允许把发生故障的关键应用进程转移到其它数据中心，因此一些数据中心将有可能全年采用节能冷却模式而无需配置制冷剂模式作为后备。IT 设备的进风温度临界值未来也有望提高，更增加了节能冷却模式下全天候运行的可能性。

⁴ 假设数据中心满负载运行，带有热通道遏制系统，冷冻水供水温度为 14°C (57°F)

表 2

不同节能冷却模式的量化比较

节能冷却模式特征	风冷节能冷却模式			水冷节能冷却模式		
	采用新风作为空调的旁通 (带蒸发辅助)	采用空气换热器作为空调的旁通 (带蒸发辅助)	采用热轮换热器作为空调的旁通 (带蒸发辅助)	采用热交换器作为冷水机组的旁通 ⁵	采用蒸发冷却器作为风冷冷水机的旁通 ⁵	采用次级盘管作为 CRAC 压缩机的旁通 (带蒸发辅助)
以下特征的假设条件为位于美国密苏里州圣路易市的 1MW 数据中心, IT 负载为 50%。更多假设条件请参见侧边栏。						
年度耗水量	100 加仑 379 升	1,262,000 加仑 4,777,000 升	257,000 加仑 973,000 升	7,000,000 加仑 26,000,000 升 ⁶	128,000 加仑 485,000 升	128,000 加仑 485,000 升
整个制冷系统的投资成本	\$2.2 / W	\$2.4 / W	\$2.8 / W	\$3.0 / W	\$2.3 / W	\$2.0 / W
整个系统的年度维护成本 ⁷	75%	75%	83%	100%	100%	92%
总制冷耗能	737,506	340,365	377,625	589,221	736,954	960,974
年度工作时数 – 完全节能冷却模式下	5,723	7,074	5,990	4,705	5,301	4,918
年度工作时数 – 部分节能冷却模式下	0	1,686	2,770	3,604	1,773	3,800
预计年度 PUE	1.34	1.25	1.26	1.31	1.34	1.39

年度耗水量

使用冷却塔的节能冷却模式与其它节能冷却模式相比最为耗水, 因为水会在冷却塔里蒸发, 而且这种蒸发终年不断。冷却塔的耗水量大约为每分钟 151.4 升/1000 吨制冷量 (每分钟 40 加仑)⁸。其它节能冷却模式所使用的蒸发辅助, 其耗水量要少得多, 因为每年只会在较热的时期才会用到蒸发辅助。

整个制冷系统的资本成本

资本成本包括所有物料、安装的人工、设计成本以及与整个制冷系统相关的所有项目费用。比如, 以“使用热交换器作为冷水机旁通”的节能冷却模式为例, 冷水机也包括在资本成本内。事实上, 相比其它系统, 这种制冷系统的资本成本是最高的, 因为它还包括冷却塔、管道、泵和定制控制系统的额外成本。定制控制系统的设计和执行业务都会产生较大的成本支出, 因为如果各个组件由不同供应商提供, 那么就需要专门进行代码设置、测试、验证和调试以确保整个制冷系统安全可靠并且能够实现预期节能目标。系统“调试”可能长达一年甚至更长时间, 在这期间调试成本也在不断产生。尽管我们在这里将这些成本视为资本成本进行分析, 但是它们也可看作是运营成本。制冷系统如果采用以蒸发冷却器作为冷水机旁通的节能冷却模式, 则可以节约 23% 左右的成本, 因为它不需要前面所说的排热组件和调试。但是, 这种系统的效率较低, 因而导致数据中心的总体 PUE 恶化。

> 蒸发辅助的经济效益

蒸发冷却器和蒸发辅助的成本一般包括物料成本、耗水和水处理。在选择数据中心的制冷系统时, 必须将这些成本纳入考虑。

蒸发辅助在干燥气候下最为有效, 比如拉斯维加斯和迪拜。对于较为湿润的气候环境, 应充分权衡蒸发冷却器的成本和效果。否则, 蒸发冷却的成本支出很可能远高于制冷系统所节约的能源成本。

⁵ 假设热交换器与冷水机组相串联, 允许在部分节能冷却模式下运行。

⁶ 根据蒸发、漂流和排放估算得出的冷却塔总耗水量 <http://www.cheresources.com/ctowerszz.shtml> (scroll down page) - 访问于 2010 年 7 月 23 日

⁷ 维护成本显示的是与传统冷水机/冷却塔制冷系统基准维护成本的比值

⁸ Arthur A. Bell, Jr., 《HVAC 公式, 数据和经验法则》(纽约: McGraw-Hill, 2000), 第 243 页

> 表 2 的假设条件

数据中心容量：1,000 kW（无冗余）
 地址：美国密苏里州圣路易斯
 IT 总负载：500 kW
 行级制冷（水侧节能冷却模式）
 悬挂吊顶（风侧节能冷却模式）
 热气流遏制（所有模式）
 CRAH 变速风机
 服务器内平均温差：13.9°C / 25°F
 机架平均进风温度：24°C / 75°F
 55% 相对湿度下服务器最大进风量
 最大露点温度：10°C / 60°F
 冷却器气流与 IT 气流比：120%
 冷冻水设计温差：6.7°C / 12°F
 冷水机 COP * IPLV：9
 最低冷却塔水温：4.4°C / 40°F
 使用浸入式加热器防止冻结
 冷却塔设计温度：5.6°C / 10°F

整个制冷系统的年度维护成本

冷水机/冷却塔系统是数据中心非常常见的制冷系统，可用作其它制冷系统维护成本的参考基准。因此，表 2 中的年度维护成本显示的是与冷水机/冷却塔制冷系统维护成本的比值。年度维护包括对各种模式下制冷系统所有组件的维护，包括节能冷却模式。比如，在利用热交换器作为冷水机旁通的节能冷却模式下，冷水机也包括在维护成本内。使用“风冷”节能冷却模式的制冷系统，其维护成本比采用其它需要较多组件且更复杂节能冷却模式的制冷系统低。

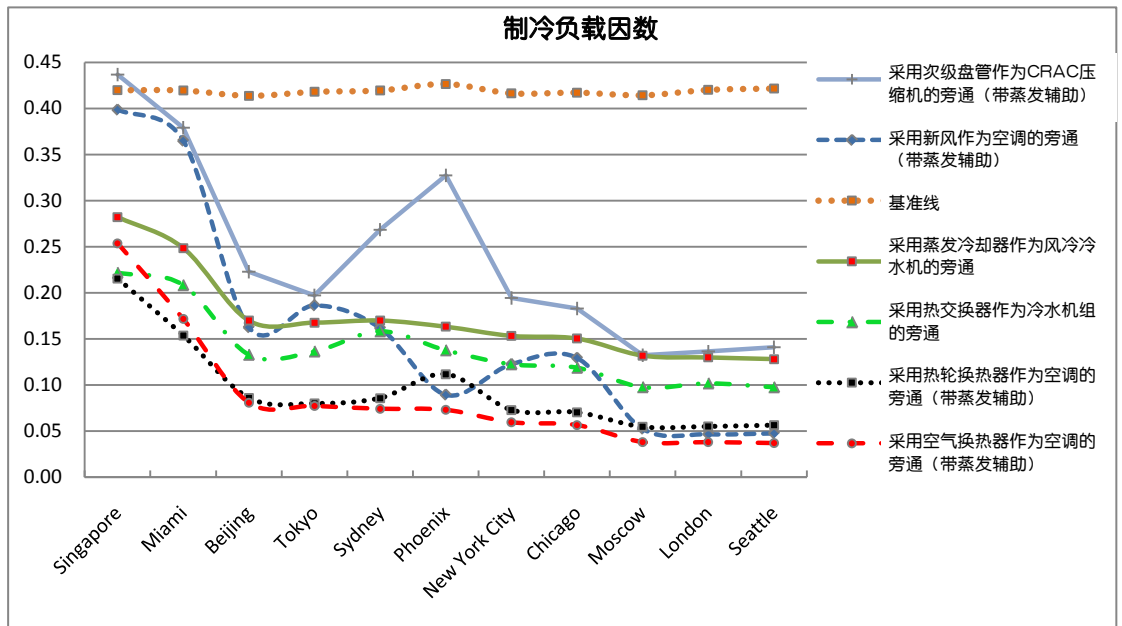
总制冷耗能

这是整个制冷系统的总体能耗。能源成本最高的节能冷却模式是采用次级盘管作为 CRAC 旁通的节能冷却模式类型。主要是因为配置分布式制冷系统需要承担能源损失。能源成本最低的节能冷却模式是采用空气换热器作为空调旁通的节能冷却模式类型。采用热轮换热器作为空调旁通的节能冷却模式，其能源成本比它略高一点。

由于大部分 1MW 及以上数据中心都使用传统冷冻水/冷却塔系统，因此我们也可以将传统冷冻水/冷却塔系统的能耗作为节能冷却模式的能耗基准。基准系统假设为无遏制系统，无节能冷却模式，冷冻水供水温度为 7.2°C (45°F)⁹，使用 CRAH 匀速风机。根据这个基准条件，图 8 按照大型数据中心通常所处的 11 个城市，就各种节能冷却模式的制冷负载因数 (CLF)¹⁰ 与基准冷水机进行了比较。CLF 是数据中心制冷系统 PUE 的一部分。

除一些最极端的气候环境以外，比如新加坡，所有节能冷却模式均比基准制冷系统更加节省能源。利用空气换热器作为空调旁通的节能冷却模式，其制冷耗能最低，几乎所有天气条件下的平均耗能都在 381,385 千瓦时，约为基准制冷系统平均能耗 1,834,403 千瓦时的 75%。利用热轮换热器作为空调旁通的节能冷却模式在节能方面也表现良好。

图 8 各种节能冷却模式与基准模式的制冷耗能比较



⁹ 对于使用冷冻水的节能冷却模式来说，冷冻水供水温度应高于传统冷水机。如果冷冻水供水温度设定在 10-15°C (50-59°F)，节能冷却模式的可用时间将大幅延长。

¹⁰ 制冷负载因数 (CLF) 是制冷系统总能耗除以 IT 负载能耗得出的数值。这里使用的 IT 负载能耗为 500kW x 8760 小时/年。关于 (CLF) 的更多详情，请参见绿网联盟组织第 1 号白皮书的第七页 - 2010 年 12 月 21 日 http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/Green_Grid_Metrics_WP.ashx?lang=en

年度工作时数 – 完全节能冷却模式下

这是指采用各种节能冷却模式的系统，每年在 100% 节能冷却模式下工作的时数。这里的假设条件是：位于美国密苏里州圣路易斯的 1MW 数据中心，IT 负载为 50%（工作时数很大程度上取决于地理位置）。由于数据中心需要达到一定湿度要求，如果系统采用利用直接新风作为空调旁通的节能冷却模式，其每年的在 100% 节能冷却模式下工作的时数相对最短。如果系统采用利用空气换热器作为空调旁通的节能冷却模式，那么它每年在 100% 节能冷却模式下工作的时数可以达到 7,074 小时。

年度工作时数 – 部分节能冷却模式下

当室外天气条件迫使节能冷却模式不能独立完成对数据中心的制冷而需要借助压缩机制冷时，系统可以在部分节能冷却模式下运行。这对于任何节能冷却模式来说都是非常重要的特性，因为世界上很少有地方可以全年支持 100% 节能冷却模式下运行。在一些地方，系统在部分节能冷却模式下的工作时数远高于在完全节能冷却模式下的工作时数，而且能够节省更多能源。由于数据中心需要达到一定湿度要求，如果系统采用利用直接新风作为空调旁通的节能冷却模式，其在部分节能冷却模式下的工作时数相对最短。

预计年度 PUE

能源利用率（PUE）是整个数据中心总耗能与 IT 设备总耗能的比值。这个年度预测数据以常见的能源基础设施为基础。利用次级盘管作为 CRAC 压缩机旁通的节能冷却模式，其年度 PUE 值最差 — 1.39。利用空气换热器作为空调旁通的节能冷却模式，其 PUE 值最好 — 1.25，或者说整个数据中心的能耗与图 8 所示的基准系统平均 PUE（1.68）相比低 26%。

影响节能冷却模式运行的因素

许多因素能够对部分节能冷却模式下的工作时数产生影响。其中最主要的因素是数据中心所在的地理位置。但是，数据中心制冷系统的设计和制冷设定值也会产生很大影响。

地理位置

节能冷却模式的使用完全取决于数据中心的地理位置。即使在部分节能冷却模式下工作时，地理位置的季节性气候条件也至关重要。ASHRAE、美国国家再生能源实验室、美国国家海洋和大气局是少数几家提供天气数据以供评估节能冷却模式可用时间的机构。这些数据通常称作“bin 气象数据”，因为气象数据以温度范围进行表现。利用某个地理位置的气象数据可以计算出节能冷却模式的可用时数。

制冷系统制冷设定值

增加节能冷却模式可用时间的方法主要有两种：1) 将数据中心搬到较为寒冷的地区，以及 2) 提高服务器的设计进风温度。第一种方法对于已有数据中心来说显然是不现实的。第二种方法则具有可行性，而且现在不论是新建数据中心还是已有数据中心都适用。事实上，ASHRAE TC9.9 标准的 2008 年版本已经将服务器的最大进风（干球）温度从原来的 25°C (77°F) 提高到 27°C (80.6°F)。不过，IT 送风温度能够提升多少取决于热风和冷风隔离遏制的效果。

热冷气流隔离

如果机柜布置不合理或者气流管理不当，数据中心内的热风和冷风会发生混合。如果制冷设定值提高到 27°C (80.6°F)，到送风到达服务器进风口时，温度可能已经接近 32°C (90°F)。这就是为什么制冷系统设定值通常远远低于服务器进风温度的原因。

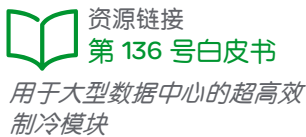


为了提高制冷系统设定值并从而延长节能冷却模式可用时间，必须将热风 and 冷风分开。我们可以利用冷通道气流遏制系统和热通道气流遏制系统达到这个目的。但是，热通道遏制可以提供更多的节能冷却模式可用时间，因此更受新建数据中心青睐。相关详情，请参见第 135 号白皮书《热通道气流遏制与冷通道气流遏制》。任何使用节能冷却模式的数据中心在使用气流遏制系统后都可以在很大程度上提高效率。因此如果使用节能冷却模式，没有理由不配置气流遏制系统。

消除或减少非节能冷却模式的制冷系统

过去，节能冷却模式被看做是主要制冷系统的节能补充措施。大部分的设计都遵循这一理念，因此节能冷却模式可以关闭并且数据中心仍然可以在基本的制冷模式下运行。但是，随着数据中心设计的不断进步，节能冷却模式开始成为主要的工作模式，为数据中心改善成本效率提供了新的可能性：

1. 如果设计允许部分节能冷却模式在最糟糕的条件下运行，让压缩机系统在任何时候无需承担全部数据中心负载，那么我们可以考虑降低压缩机系统的选型；
2. 如果设计允许完全节能冷却模式在最糟糕的条件下运行，我们可以考虑完全移除压缩机系统，让数据中心一直在节能冷却模式下运行；
3. 如果设计允许完全节能冷却模式在除少数最糟糕条件以外的情况下运行，我们可以考虑为 IT 系统增加控制系统，以便在最差的室外天气条件下保护 IT 负载。这样做之后，压缩机系统也可以完全移除。这种控制系统能够利用前瞻的主动能源管理或通过将 IT 负载转移到其它位置来保证服务器的正常工作。



减少和移除压缩机系统的使用可以极大提高数据中心制冷系统的效率。第 136 号白皮书《用于大型数据中心的超高效制冷模块》将介绍一种新的数据中心制冷办法，其耗能约为传统方式的一半，但是具有更高的可扩展性、可用性并且易于维护。

结论

在过去，制冷系统节能冷却模式在大多数数据中心内并没有得到重视。这主要是因为那时电力成本较低，IT 设备供风温度较低，并且还没有颁布碳排放法规。今天，各种标准，例如 ANSI/ASHRAE 标准 90.1-2010，和各项法规，如《英国碳减排承诺》，均要求数据中心减少耗能。一些节能冷却模式在许多气候条件都能有效减少能耗。数据中心操作员可以根据自己所处的气候条件找出可以作为系统首选工作方式的节能冷却模式，并将机械制冷系统作为辅助工作方式或后备。

在某些天气条件时，一些制冷系统在节能冷却模式下运行可以节省超过 70% 的年度制冷能源成本，相应的年度 PUE 也会有超过 15% 的改善。但是，市面上有至少 15 种不同类型的节能冷却模式，由于没有明确的行业定义，因此难以比较、选择或说明。本白皮书对这些不同种类节能冷却模式的术语和定义进行了介绍并且利用关键数据中心特性比较它们各自的性能表现，以帮助设计师根据实际情况作出最佳选择。



关于作者

John Niemann 是施耐德电气信息科技事业部负责行级和机柜级制冷产品的产品线经理，负责这些产品线的规划、支持和市场营销。John 自 2004 年起领导 APC InRow 全线制冷产品的产品管理。他在暖通空调领域有 12 年的经验。其职业生涯起始于商业和工业暖通空调市场，在这些领域他专注于定制化的空气处理和制冷系统，其专业能力集中于关键环境的能源回收和筛选。他在暖通空调领域的经验涉及应用工程、开发、产品管理以及技术销售。John 是美国采暖制冷与空调工程师学会 (ASHRAE) 和绿色网格组织 (The Green Grid) 的会员，并获得美国密苏里州圣路易斯市华盛顿大学 (Washington University) 的机械工程学位。

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。

Victor Avelar 是施耐德电气数据中心科研中心的高级研究员。Victor 致力于数据中心的设计和运营方面的研究。并且通过向客户提供风险评估和设计实践方面的咨询，来优化数据中心环境的可用性和能效。Victor 于 1995 年从伦斯勒理工学院 (Rensselaer Polytechnic Institute) 获得了机械工程学的学士学位，而后在波士顿大学 (Boston College) 获得 MBA 工商管理硕士学位。Victor Avelar 是 AFCOM 和美国质量协会的成员。



点击图标打开相应
参考资源链接

 **用于 IT 环境的不同类型的空调设备**
第 59 号白皮书

 **热通道气流遏制与冷通道气流遏制**
第 135 号白皮书

 **用于大型数据中心的超高效制冷模块**
第 136 号白皮书

 **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

如果您是我們的客戶並對數據中心項目有任何疑問：

請與您的 **施耐德電氣** 銷售代表聯繫