

文章编号: 1671-6612 (2023) 01-115-09

# 间接蒸发冷却技术在北京地区数据中心的 应用分析

颜晓光

(北京首钢国际工程技术有限公司 北京 100041)

**【摘要】** 结合北京地区的气候特点, 分析了间接蒸发冷却空调在数据中心不同送/回风温度、冷却效率时的切换温度及全年运行时长; 通过建立计算模型, 计算了对应不同空调送/回风温度、间接冷却效率时的能耗情况, 并以某数据中心为例, 计算了采用间接蒸发冷却空调和传统空调的初投资、运行费用等; 根据计算结果分析, 同等冷却效率下, 提高空调送回风温度可显著降低全年空调电耗; 采用间接蒸发冷却空调比传统空调节省电耗 44%。

**【关键词】** 间接蒸发冷却; 间接蒸发冷却效率; 切换温度; 电耗; 初投资; 静态投资回收期  
中图分类号 TU834 文献标识码 B

## Application Analysis of Indirect Evaporative Cooling Technology in Beijing Data Center

Yan Xiaoguang

(Beijing Shougang International Engineering Technology Co., Beijing, 100041)

**【Abstract】** Combined with the climatic characteristics of Beijing, this paper analyzes the switching temperature and annual operating time of indirect evaporative cooling air conditioners in the data center with different supply/return air temperatures, cooling efficiency; By establishing a calculation model, the energy consumption corresponding to different air-conditioning supply/return air temperatures and indirect cooling efficiency was calculated. Taking a data center as an example, the initial investment and operating costs of indirect evaporative cooling air conditioners and traditional air conditioners were calculated; According to the analysis of the calculation results, under the same cooling efficiency, increasing the temperature of the air-conditioning supply and return air can significantly reduce the annual power consumption of the air-conditioning; the use of indirect evaporative cooling air-conditioning saves 45% of the power consumption compared with the traditional air-conditioning.

**【Keywords】** indirect evaporative cooling; indirect Evaporative Cooling Efficiency; switch temperature; Power consumption; initial investment; static payback period

## 0 引言

根据我国数据中心技术节能潜力的分析: IT设备系统的综合技术节能潜力在11%~39%, 平均为29%; 空调系统的节能潜力在4%~69%, 平均为36%; 配电系统的综合节能潜力在8%~27%, 平均为18%<sup>[1]</sup>, 由此可见, 数据中心空调节能减排潜力巨大。近年来, 随着“双碳”目标的提出, 绿色低

碳已成为各界共识, 在此大背景下, 间接蒸发冷却空调技术以其高节能率和高适用性, 逐渐成为绿色数据中心主流的冷却方式之一<sup>[2]</sup>。

常规自然冷却主要受室外干球温度影响, 而间接蒸发冷却由于带有水喷雾蒸发冷却, 机组的运行主要取决于室外湿球温度, 通常室外空气的湿球温度远低于干球温度, 因此, 该技术很大程度上扩展

了利用自然冷却的时域<sup>[3]</sup>。在不同室外气象参数条件下，间接蒸发冷却空调主要耗能部件风机、水泵以及压缩机开启情况不同，分析其不同运行模式下的能耗，配置合理的设备并设置合理的切换温度是设计间接蒸发冷却空调的重点及难点。

本文根据北京地区的气象特征，分析了北京地区数据中心采用间接蒸发冷却空调对应不同切换温度、不同模式的年运行时长及能耗，并以某数据中心为例分析了采用间接蒸发冷却空调和传统空调的初投资及运行费用情况，为间接蒸发冷却空调在数据中心应用提供参考。

### 1 间接蒸发冷却空调适用性分析

数据中心间接蒸发冷却空调采用风侧自然冷却技术，冷却时利用空气/空气换热器与室外空气进行换热，从而使机房送风温度达到要求。间接蒸发冷却技术分为传统意义的间接蒸发冷却和露点间接蒸发冷却。

图 1 为传统意义的间接蒸发冷却过程的焓湿图，间接蒸发冷却换热芯体干通道侧走一次空气（机房空调的送、回风），从状态点 E 被等湿冷却至状态点 F；二次空气（室外空气）流经换热芯体的湿通道，与喷淋水接触，发生直接蒸发冷却，从状态点 A 增焓降温至状态点 D。二次空气通过换热器带走一次空气的热量，使一次空气等湿冷却。

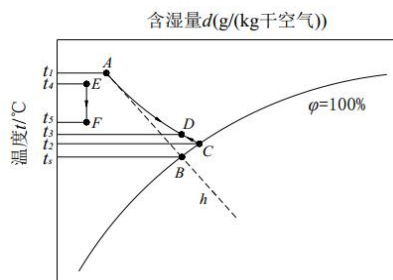


图 1 传统间接蒸发冷却焓湿图

Fig.1 Enthalpy-humidity diagram of traditional indirect evaporative cooling

图 2 为露点间接蒸发冷却过程的焓湿图，室外空气 A 先从二次空气干通道进入，其中分出一小部分空气进入二次空气湿通道，在湿通道内与喷淋水进行蒸发冷却，同时通过换热板的传热等湿冷却二次空气干通道内剩余的空气及一次空气，进入湿通道的空气由状态点 A 到达状态点 A'，再从湿通道出口排出，二次空气干通道内的空气由状态点 A

被等湿冷却至 B 状态点；被冷却至状态点 B 的二次空气再分出一小部分空气进入到湿通道，与喷淋水发生间接蒸发冷却，同时通过换热板的传热等湿冷却二次空气干通道内剩余的空气及一次空气，进入湿通道的空气由状态点 B 到达状态点 B'，未进入湿通道的二次空气被等湿冷却至状态点 C；继续重复上述的处理过程，直至所有二次空气到达状态点 D，并进入到湿通道侧被冷却至状态点 D'，最后排至外界，状态点 D' 接近状态点 A 的露点温度。一次空气则是不断被二次空气湿通道发生的热湿处理冷却，从状态点 F 等湿冷却至状态点 G，然后送入机房。

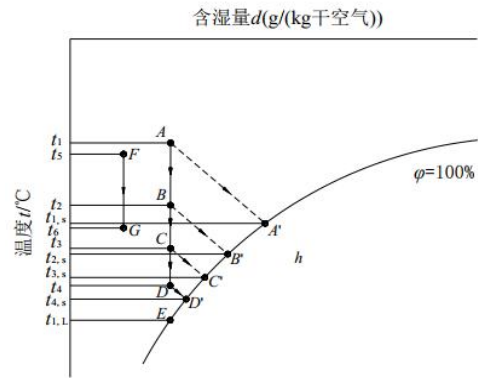


图 2 露点间接蒸发冷却焓湿图

Fig.2 Dew-point indirect evaporative cooling enthalpy-humidity diagram

间接蒸发冷却效率用来描述一次空气出口干球温度接近二次空气入口湿球温度的程度，其计算式为：

$$\eta_{IEC} = \frac{t_{g1} - t_{g2}}{t_{g1} - t_{s1}} \tag{1}$$

式中， $t_{g1}$  为一次空气入口干球温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $t_{g2}$  为一次空气出口干球温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $t_{s1}$  为二次空气入口湿球温度， $^{\circ}\text{C}$ ， $\eta_{IEC}$  为间接蒸发冷却效率。

根据文献[4]的相关研究，传统意义的间接蒸发冷却机组，当二/一次风量比达到1.5时，间接蒸发冷却效率基本达到最高值64.8%，露点间接蒸发冷却技术冷却机组，当二/一次风量比达到1.7时，效率基本达到最高值96.5%。研究表明，露点间接蒸发冷却机组冷却效率高于传统意义的间接蒸发冷却机组，冷却效率可达90%以上，使得一次空气出风温度更接近二次空气的露点温度。

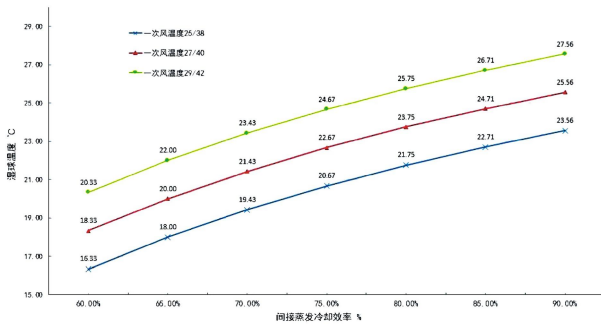


图 3 不同冷却效率及一次风进出温度时的二次风湿球温度

Fig.3 The wet bulb temperature of secondary air at different cooling efficiencies and primary air inlet and outlet temperatures

图 3 为当蒸发冷却提供冷量来满足数据中心空调送、回风（一次空气出、进）温度要求时，对应不同冷却效率及一次空气送出温度情况下的湿球温度，结果表明，冷却效率越高，一次空气出风温度越高，对应的湿球温度越高。当一次空气温度

为 25/38°C 时，冷却效率 60% 对应的湿球温度为 16.33°C；冷却效率 90% 对应的湿球温度为 23.56°C。同等冷却效率时，随一次空气温度的提高，对应的湿球温度也提高。

图 4 为根据北京全年逐时干球温度和湿度计算的湿球温度分布，全年逐时干球温度和湿度来自 DeST 模拟软件。根据湿球温度分布，在 7-8 月份多数时间湿球温度都大于 25°C，最高时可达 35°C，因此，单纯依靠间接蒸发冷却不能提供足够的冷量，需要设置机械压缩制冷补充，但通过提高冷却效率及空调送风温度能明显提升间接蒸发冷却提供全部冷量时对应的最低湿球温度，从而缩短机械压缩制冷的运行时间。当冷却效率提高至 90%，送/回风温度提高至 29/42°C 时，对应的最高湿球温度为 27.56°C，北京全年运行不满足时间仅为 239h，占全年的 2.73%。因此，提高送回风温度及间接蒸发冷却效率能减少机械压缩制冷的运行时间，从而节省全年运行电耗。

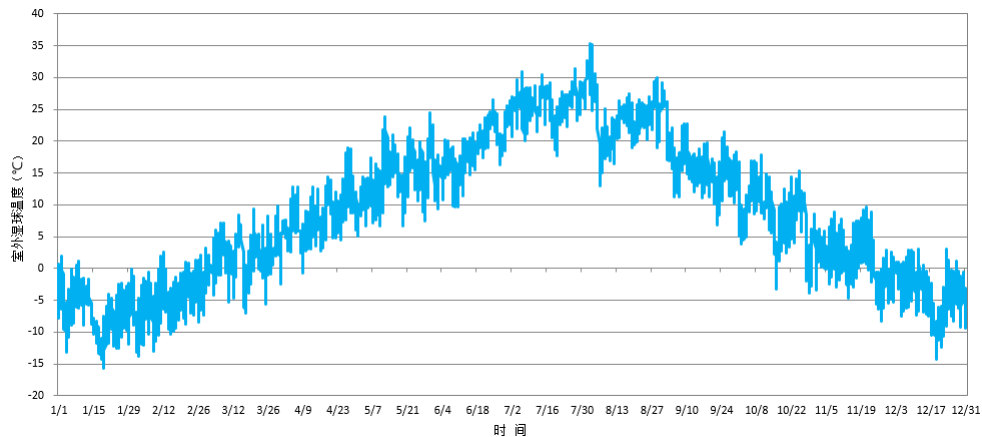


图 4 北京地区全年气象参数—湿球温度

Fig.4 Annual meteorological parameters in Beijing area—wet bulb temperature

## 2 运行模式分析

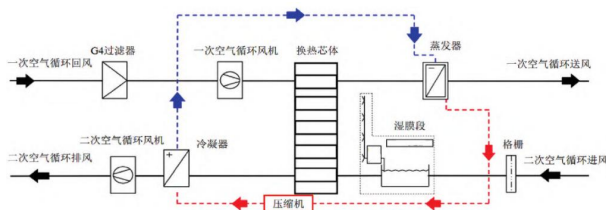


图 5 间接蒸发冷却空调原理图

Fig.5 Schematic diagram of indirect evaporative cooling air conditioner

根据上述分析，北京地区采用间接蒸发冷却空

调机组应配备机械压缩制冷补充系统，当外界环境较高，蒸发冷却不能满足制冷量时，由机械制冷补充，补冷装置可采用直接膨胀式冷却或冷冻水+表冷器形式，图5为带机械制冷补充装置（直接膨胀式冷却）的间接蒸发冷却空调机组原理图。

依据不同的室外气象参数，间接蒸发冷却空调分为干模式、湿模式、混合模式3种运行模式。

(1) 干模式：当室外空气干球温度足够低，仅依靠一次空气与二次空气热交换提供的冷量满足机房所需全部冷量时，采用干模式运行，此时水

喷淋系统、补充机械制冷系统不开启，仅一/二次风机运行，二次（室外）风机的转速根据室外温度线性调节，设备的运行状态如表1所示，该工况下系统能耗最低。

(2) 湿模式：当干模式不能满足制冷需求时，需开启水喷淋系统，依靠蒸发冷却提供的冷量补充机房所需要的全部冷量，此时补充机械制冷系统不开启，开启一/二次风机及水喷淋系统，二次（室外）风机的转速根据室外温度线性调节，设备的运行状态如表1所示。

(3) 混合模式：当湿模式不能满足制冷需求时，开启机械制冷系统来补充不足的冷量，机组处于混合模式运行，此时水喷淋系统、机械制冷系统、一/二次风机全部开启，设备的运行状态如表1所示，该工况下系统能耗最高。

表1 不同模式下设备运行状态

**Table 1 Device operating status in different modes**

运行模式	风机	水泵	机械制冷
干模式（风机）	开启	关闭	关闭
湿模式	开启	开启	关闭
混合模式	开启	开启	开启

表2 不同空调参数时的运行模式全年时长

**Table 2 Annual duration of operation mode with different air conditioning parameters**

间接蒸发冷却空调参数	项目	干模式	湿模式	混合模式
间接蒸发冷却效率：65% 空调送/回风温度：25/38	室外干球温度/湿球温度	$t_g \leq 12$	$t_g > 12$ 且 $t_s \leq 18$	$t_s > 18$
	全年运行时间（h）	4038	2527	2195
	运行时长占比%	46.10%	28.85%	25.06%
间接蒸发冷却效率：75% 空调送/回风温度：25/38	室外干球温度/湿球温度	$t_g \leq 14$	$t_g > 14$ 且 $t_s \leq 20.67$	$t_s > 20.67$
	全年运行时间（h）	4522	2622	1616
	运行时长占比%	51.62%	29.93%	18.45%
间接蒸发冷却效率：85% 空调送/回风温度：25/38	室外干球温度/湿球温度	$t_g \leq 16$	$t_g > 16$ 且 $t_s \leq 22.71$	$t_s > 22.71$
	全年运行时间（h）	4980	2527	1253
	运行时长占比%	56.85%	28.85%	14.30%
间接蒸发冷却效率：85% 空调送/回风温度：29/42	室外干球温度/湿球温度	$t_g \leq 16$	$t_g > 16$ 且 $t_s \leq 26.71$	$t_s > 26.71$
	全年运行时间（h）	4980	3413	367
	运行时长占比%	56.85%	38.96%	4.19%

### 3 机械补冷量的设置

间接蒸发冷却空调系统的机械补冷装置容量应根据当地极端气象条件进行配置，根据北京市气象参数，全年最高湿球温度35.3℃，图6为湿球温

三种运行模式间的切换应以最大化利用间接冷却，减少机械制冷为原则，以期实现空调系统最大化节能运行。根据图3，提高间接蒸发冷却系统的换热效率及提高空调送回风温度都可以实现，但鉴于目前的技术水平，冷却效率的提高必将增加设备的体积，往往不符合建设条件；机房采取封闭热通道后，最高送/回风温度为29/42℃，如再继续提高将引起IT设备故障率增加。

根据北京地区的气象条件，夏季空调设计室外湿球温度为26℃，属于中等湿度地区。按目前的技术水平，间接蒸发冷却效率一般为60%~80%，干工况时的换热效率可达50%~60%。表2为不同性能的间接蒸发冷却空调对应三种模式的切换温度及全年运行时长，当空调送/回风温度为25/38℃时，间接蒸发冷却效率由65%提升至75%时，混合模式运行时长减少6.61%，间接蒸发冷却效率由75%提升至85%时，混合模式运行时长减少4.15%。当间接蒸发冷却效率达到85%，空调送/回风温度为29/42℃时，混合模式运行时长仅367h，占全年的4.19%，相比空调送/回风温度为25/38℃时减少10.11%。

度高于30℃时的时长分布，湿球温度大于32℃的时间，全年仅17小时，占全年时长的0.19%；湿球温度大于33℃的时间，全年仅6小时，占全年时长的0.07%。

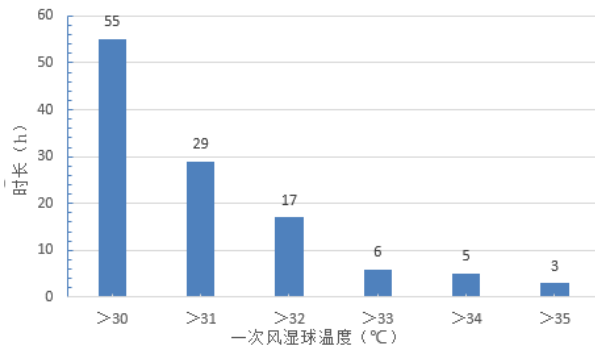


图6 北京市湿球温度>30°C时的时间分布

Fig.6 Time distribution of Beijing wet bulb temperature>30°C

间接蒸发冷却效率不变的情况下，在一定的湿球温度下，根据式（2）可计算出蒸发冷却后的一次风出口的干球温度  $t'_{g2}$ ， $t'_{g2}$  高于空调送风温度  $t_{g2}$ ，需要机械压缩制冷装置对其降温，使其由  $t'_{g2}$  降至  $t_{g2}$ ，机械压缩制冷补充的制冷量占总制冷量的百分比  $\phi$ ，可按下式计算。

$$t'_{g2} = t_{g1} - \eta_{IEC} \times (t_{g1} - t_{s1}) \quad (2)$$

$$\phi = \frac{t'_{g2} - t_{g2}}{t_{g1} - t_{g2}} \times 100\% \quad (3)$$

式中： $t_{g1}$  为一次空气入口干球温度，°C； $t_{g2}$  为空调送风温度； $t'_{g2}$  为蒸发冷却器出口（蒸发器入口）干球温度，°C； $t_{s1}$  为二次空气入口湿球温度，°C； $\eta_{IEC}$  为间接蒸发冷却效率； $\phi$  为机械压缩补冷与总制冷量百分比。

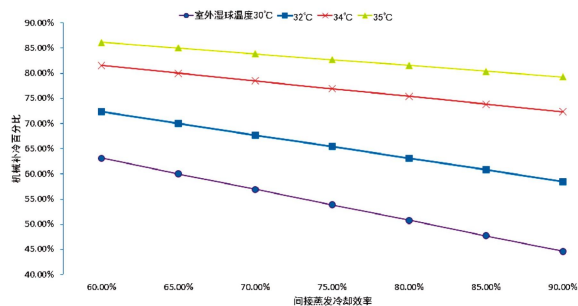


图7 不同冷却效率时需要的机械补冷量（25/38°C）

Fig.7 Mechanical supplemental cooling capacity required for different cooling efficiencies (25/38°C)

图7 为当送回风温度为 25/38°C 时，对应不同间接蒸发冷却效率时需要机械压缩补充的制冷量，当冷却效率为 65%，室外湿球温度为 35°C 时，需

要机械压缩制冷补充的冷量为 85%；室外湿球温度为 32°C 时，需要机械压缩制冷补充的冷量为 70%。机械补冷量随冷却效率的提高而降低，当冷却效率为 85%，室外湿球温度为 35°C 时，需要机械压缩制冷补充的冷量为 80.4%。

图8 为当送回风温度为 29/42°C 时，对应不同间接蒸发冷却效率时需要机械压缩补充的制冷量，当冷却效率为 65%，室外湿球温度为 35°C 时，需要机械压缩制冷补充的冷量为 65%；室外湿球温度为 32°C 时，需要机械压缩制冷补充的冷量为 53.9%。机械补冷量随冷却效率的提高而降低，当冷却效率为 85%，室外湿球温度为 35°C 时，需要机械压缩制冷补充的冷量为 54.2%。

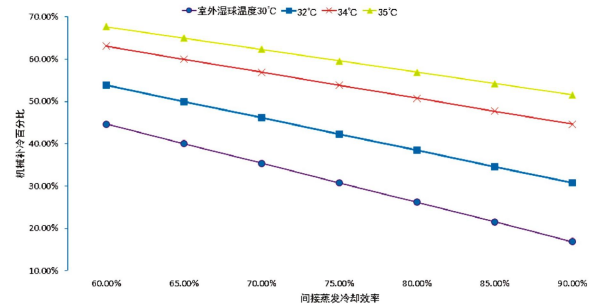


图8 不同冷却效率时需要的机械补冷量（29/42°C）

Fig.8 Mechanical supplemental cooling capacity required for different cooling efficiencies (29/42°C)

根据图7和图8分析，当将空调送回风温度由 38/25°C 提高至 42/29°C 时，对应的机械补冷量明显降低，当冷却效率为 65%，对应室外湿球温度为 35°C 时，机械补冷量由 85% 降至 65%，因此，空调送回风温度设定的越高，对应的机械补冷装置制冷容量越小。

根据北京市气象资料，湿球温度达到 35°C 的全年时长仅 6 小时，若按极端室外湿球温度配置机械制冷系统，将存在较大的裕量，机械制冷系统将在低负荷下长期运行，同时会增加配电容量及不间断电源保障的容量。因此，机械制冷的配置容量应结合 IT 设备工作上限温度，经技术经济比较后确定。

#### 4 运行能效分析

间接蒸发冷却空调主要耗能部件为一、二次风机、水泵以及压缩制冷。根据间接蒸发冷却空调运行模式的特点，单位时间的运行能耗：干模式<湿模式<混合模式，其中混合模式需要机械压缩制冷

运行，其运行能耗明显高于其它模式。

风机作为间接蒸发冷却空调输配能耗占比最大的部件，在干模式、湿模式以及混合模式下均需要工作运行，风机的消耗功率 ( $N_1$ ) 计算公式为：

$$N_1 = \frac{L \cdot P}{3600 \cdot \eta} k \quad (4)$$

式中： $P$ 为送风机的全压，kPa； $\eta$ 为送风机的全压效率； $L$ 为新风量， $m^3/h$ ； $k$ 为电机容量安全系数，取1.1。

水泵也是间接蒸发冷却空调输配侧的主要耗能部件之一，在干模式下水泵停止运行，在湿模式以及混合模式下均需要工作运行，水泵消耗功率 ( $N_2$ ) 计算公式为：

$$N_2 = \frac{\rho g Q H}{3600 \cdot \eta} \quad (5)$$

式中： $Q$ 为水泵的流量， $m^3/s$ ； $H$ 为水泵的扬程， $m$ ； $\eta$ 为水泵的效率； $\rho$ 为水的密度，取 $1000kg/m^3$ ， $g$ 为重力加速度， $9.8N/kg$ 。

压缩制冷系统作为间接蒸发冷却空调的补冷装置也是主要耗能部件，在干模式、湿模式下均停止运行，仅在混合模式下工作运行。机械制冷系统的消耗功率 ( $N_3$ ) 计算公式为：

$$N_3 = \frac{\Phi}{COP} \quad (6)$$

式中， $\Phi$ 为制冷量，kW； $COP$ 为压缩制冷性能系数；

数据中心间接蒸发冷却空调系统总耗电量是上述耗电部件耗电量之和，空调系统总耗电量 ( $W$ ) 为：

$$W = \sum N_i T_i \quad (7)$$

式中， $N_i$ 为各个耗电部件的实时功率，kW； $T_i$ 为各设备的运行时间，h。

本文以式 (4) ~ 式 (7) 计算公式为基础，气象参数来自DeST能耗模拟软件，利用excel表格建立计算模型，分析各工况运行时长及对应运行能耗。以制冷量为260kW的间接蒸发冷却空调为例，计算出三种运行模式的能耗。为验证模型，以某生产商生产的额定制冷量为260kW的蒸发冷却空调设备标定的电功率为基准，在相同风量、制冷量的工况下的模型计算及标定电功率如表3所示，根据计算结果模型计算功率与设备标定功率基本一致。

表 3 模型计算与设备标定功率对比

Table 3 Comparison between model calculation and equipment calibration power

项目	干模式	湿模式	混合模式
模型计算功率 (kW)	27.95	28.1	42.9
设备标定配电功率 (kW)	28	28.2	42

图9为空调送回风温度为25/38℃时，对应不同冷却效率的运行电耗，其中总电耗为干模式、湿模式、混合模式电耗之和。从四种冷却效率时的电耗分布看，干模式运行的全年能耗最高，主要原因是干模式运行时长最长。随着蒸发冷却效率的提高，湿模式和混合模式运行时长都逐渐缩短，运行能耗也相应降低，其中混合模式降低的更为明显。从全年运行总电耗分析，随冷却效率的提高，全年运行电耗降低，冷却效率由60%提高至65%，耗电量降低4.08%；由65%提高至75%，耗电量降低5.08%；由75%提高至85%，耗电量降低3.6%。说明冷却效率高于65%后，通过提高冷却效率节省电耗的效果越来越不明显。

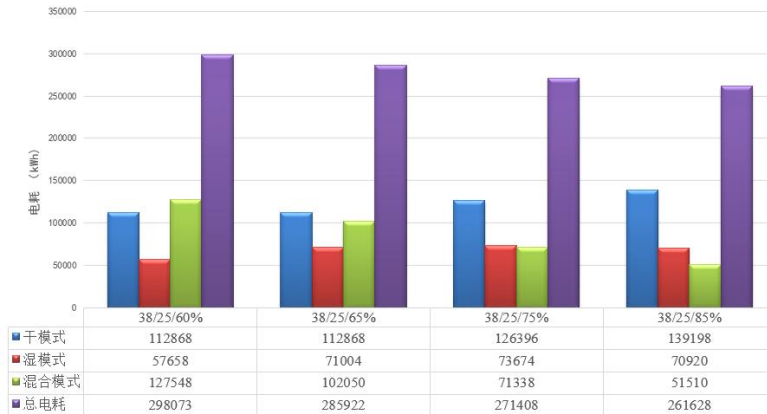


图9 不同运行模式的耗电量 (25/38℃)

Fig.9 Power consumption in different operating modes (25/38℃)

图10为空调送回风温度为29/42℃时，对应不同冷却效率的运行电耗。从四种冷却效率对应的电耗分布看，与图9总体趋势相同。从全年运行总电耗分析，随冷却效率的提高，全年运行电耗降低，

冷却效率由60%提高至65%，耗电量降低2.67%；由65%提高至75%，耗电量降低3.19%；由75%提高至85%，耗电量降低1.73%。说明冷却效率高于60%后，通过提高冷却效率节省电耗的效果不明显。

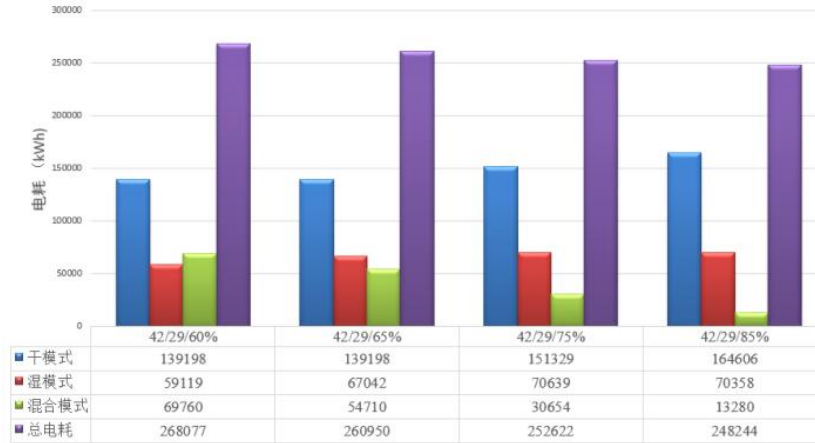


图10 不同运行模式的耗电量 (29/42℃)

Fig.10 Power consumption in different operating modes (29/42℃)

表4为不同送风温度及冷却效率下的耗电量，根据表中数据分析提高空调的送风温度，能明显降

低电耗，当冷却效率为60%时，节电率10.06%，随冷却效率的提高节电率逐渐降低。

表4 不同送风温度时的耗电量

Table 4 Power consumption at different supply air temperatures

名称		蒸发冷却效率			
		60%	65%	75%	85%
总电耗	25/38℃	298073	285922	271408	261628
(kWh)	29/42℃	268077	260950	252622	248244
节电量 (kWh)		29997	24972	18786	13384
节电率		10.06%	8.73%	6.92%	5.12%

### 5 经济性分析

为更准确的对间接蒸发冷却空调系统的运行费用、初投资进行分析，本文以北京市某数据中心为例，该数据中心空调设计冷负荷为9220kW，选

用单台制冷量为260kW的间接蒸发式冷却空调。空调送回风温度为25/38℃，间接蒸发冷却效率65%，单台空调技术参数如表5所示。

表5 蒸发冷却空调技术参数

Table 5 Technical parameters of evaporative cooling air conditioner

项目	制冷量/显冷量 kW	一次侧风量 (m³/h)	二次侧风量 (m³/h)	送风温度 (℃)	回风温度 (℃)	最大机械补冷 配比
数值	260	60000	65000	25	38	63%

在设定的送/回风温度条件下，一次风量为定值，一次风机为定频运行；二次风机为变频，运行时通过改变二次空气侧风量使一次空气侧空气参

数保持在规范要求的范围内。表6为主要用电设备的装机容量。

表6 蒸发冷却空调主要用电设备

Table 6 Main electrical equipment of evaporative cooling air conditioner

项目	一次风机功率 (kW)	二次风机功率 (kW)	水泵功率 (kW)	制冷压缩额定功率 (kW)
数值	22	15	0.25	58

本项目 IT 设备 100%满负荷运行时，IT 设备总功耗 7450kW，电力系统及其它损耗 700kW，表 7 为间接蒸发冷却空调和传统空调（制冷机组+冷却塔系统）全年运行总电耗的对比，间接蒸发冷却

空调相比传统空调系统年节省电耗 8070709kWh，节省电耗 44%，间接蒸发冷却式空调全年 PUE 值为 1.23。

表 7 蒸发冷却空调与传统空调电耗对比

Table 7 Comparison of power consumption between evaporative cooling air conditioners and traditional air conditioners

空调类型	项目	IT 设备电耗	制冷空调系统	电力系统及其他	总计	PUE
间接蒸发冷却	电耗 (kWh)	68766000	9877558	6132000	85632547.15	1.23
	占比	81.12%	11.65%	7.23%	100.00%	
传统空调	电耗 (kWh)	68766000	17948267	6132000	92846266.67	1.35
	占比	74.06%	19.33%	6.60%	100.00%	

表 8 为采用间接蒸发冷却空调与传统空调（制冷机组+冷却塔系统）系统初投资及运行费用的对比，间接蒸发冷却空调较传统空调初投资增加

1475.2 万元，年节省电费 635.3 万元，静态投资回收期 2.3 年。

表 8 蒸发冷却空调与传统空调经济性分析表

Table 8 Economic analysis table of evaporative cooling air conditioner and traditional air conditioner

序号	项目	单位	间接蒸发冷却空调	传统数据中心制冷模式
1	机房总冷负荷	kW	9220	9220
2	单位冷量初投资	元/kW	4800	3200
3	空调总投资	万元	4425.6	2950.4
4	空调年度耗电量	kWh	10007265	17948267
5	电费单价	元/kWh	0.8	0.8
6	空调年度用电费用	万元	800.6	1435.9
7	初投资差值	万元		1475.2
8	节省用电费用	万元		635.3
9	静态投资回收期	年		2.3

## 6 结语

本文以北京地区的气象参数为基准，通过建立计算模型，分析了不同送/回风温度、间接冷却效率时的能耗情况，并对比分析了间接蒸发冷却空调与传统空调的经济性。

(1) 采用露点间接蒸发技术可有效提高间接蒸发冷却效率，从而提高混合模式运行的切换温

度，缩短机械制冷的全年运行时间。

(2) 通过提高空调送/回风（一次风）温度，可明显提高干工况、混合工况的切换温度，从而延长干模式的运行时长，缩短混合模式的运行时间。因此，对数据中心项目，在服务器可接受范围内，合理提高空调送回风温度，做好冷热气流隔离，可以有效降低空调系统能耗。



(3) 当空调送/回风(一次风)温度为 25/38℃ 时, 蒸发冷却效率达到 65% 后, 再提高冷却效率, 节能效果逐渐降低; 当空调送/回风(一次风)温度为 29/42℃ 时, 蒸发冷却效率达到 60% 后, 通过提高冷却效率节省电耗的效果不明显。因此, 冷却效率提高到一定程度后需进行技术经济比较, 确定最佳冷却效率。

(4) 数据中心采用间接蒸发冷却空调与传统空调(制冷机组+冷却塔系统)相比, 初投资增加约 50%, 但可节省电耗 44%, 每年节省电费 635.3 万元, 静态投资回收期约 2.3 年。

#### 参考文献:

- [1] 中国制冷学会数据中心冷却工作组. 中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2017[R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 10-11.
- [2] 黄翔, 邵双全, 吴学渊. 绿色数据中心高效适用制冷技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021: 98-99.
- [3] 黄翔. 蒸发冷却空调原理与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [4] 杜妍, 黄翔, 王颖, 等. 数据中心空气侧蒸发冷却技术性能及适用性分析[J]. 制冷与空调, 2022, 36(1): 105-110.
- [5] 殷平. 数据中心研究(7): 自然冷却[J]. 暖通空调, 2017, (11): 49-60.
- [6] 颜晓光. 首钢园区数据中心空调系统设计及节能经济效益分析[J]. 制冷与空调, 2021, 35(6): 875-883.
- [7] 肖新文, 魏赠, 曾春利. 间接蒸发冷却空调箱机组制冷的数据中心气流组织探讨[J]. 制冷与空调, 2020, (1): 62-69.
- [8] 褚俊杰, 黄翔, 孙铁柱, 等. 逆流式露点间接蒸发冷却器性能实验研究[J]. 制冷学报, 2019, 40(1): 121-127.
- [9] 肖新文. 间接蒸发冷却空调机组应用于数据中心的节能分析[J]. 暖通空调, 2019, 49(3): 67-71.