

双碳目标下数据中心间接蒸发冷却 空调机组补冷系统分析与应用

Analysis and Application of Supplemental Cooling System of Indirect Evaporative Cooling Air Condition Unit in Data Center Under Dual-carbon Target

景 淼,何 健 (联通数字科技有限公司,北京 100048)

Jing Miao, He Jian (China Unicom Digital Technology Co., Ltd., Beijing 100048, China)

摘 要:

针对间接蒸发冷却空调机组在数据中心应用时的补冷方式、补冷比例、压缩机补冷失效时的机房升温进行分析,同时对冷冻水补冷与压缩机补冷2种间接蒸发冷却空调机组在数据中心应用时的CLF和WUE以及2种补冷方式的应用场景进行分析。为间接蒸发冷却空调机组在数据中心补冷方式的选择提供了依据。

关键词:

间接蒸发冷却空调机组;补冷方式;CLF;WUE
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2023.01.016
文章编号:1007-3043(2023)01-0083-05
中图分类号:TU83
文献标识码:A
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

For the application of indirect evaporative cooling air conditioning unit in data center, it analyzes the supplemental cooling mode, proportion of supplemental cooling, and the room temperature rise when the compressor supplemental cooling is failed. At the same time, the CLF, WUE and the application scenarios of the two indirect evaporative cooling air conditioning units of cold water supplemental cooling and compressor supplemental cooling in the data center are analyzed. It provides a basis for the selection of supplementary cooling method when the indirect evaporative cooling unit is applied in the data center.

Keywords:

Indirect evaporative cooling air condition unit; Supplemental cooling mode; CLF; WUE

引用格式:景淼,何健.双碳目标下数据中心间接蒸发冷却空调机组补冷系统分析与应用[J].邮电设计技术,2023(1):83-87.

0 前言

我国力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和。数据中心属于高能耗产业,预计到2030年数据中心能源消耗量将占全国总用电量的3.7%^[1]。随着双碳政策的提出,中央各部委相继出台多项关于数据中心的政策,推进数据中心绿色、低碳发展。2022年工业和信息化部等七部委发布《信息通信行业绿色低碳发展行动计划(2022—2025年)》。该行动计划明确到2025年,全国新建大型、超大型数据中心电能利用

效率(PUE)降到1.3以下,加大先进节能节水技术的应用,加快自然冷源、近端制冷、液冷等制冷节能技术的应用。并根据自然气候条件差异,因地制宜推广先进适用的节能技术,加快应用先进适用的节水技术和装备,提高水资源利用效率。

传统数据中心PUE高达1.5,空调系统能耗约占数据中心总能耗的40%,因此数据中心的空调系统具有极大的节能空间。间接蒸发冷却空调机组属于风侧间接蒸发冷却技术,是一种绿色节能的制冷技术,可以有效减少制冷系统能耗及水资源消耗,减少数据中心碳排放^[2-3]。本文对间接蒸发冷却空调技术的补冷系统进行综合对比分析。

收稿日期:2022-12-09

1 间接蒸发冷却机组

1.1 原理及运行模式

间接蒸发冷却机组是室内侧空气与室外侧空气通过换热芯体进行显热交换,并在室外新风侧增加水喷淋装置,通过水蒸发吸热的原理,冷却进入换热芯体的室外侧空气,进而降低机房送风温度。根据室外气象参数、机房送回风温度等,间接蒸发冷却机组分为3种运行模式,分别为干模式、湿模式和混合模式^[4-7]。间接蒸发冷却机组原理图如图1所示。

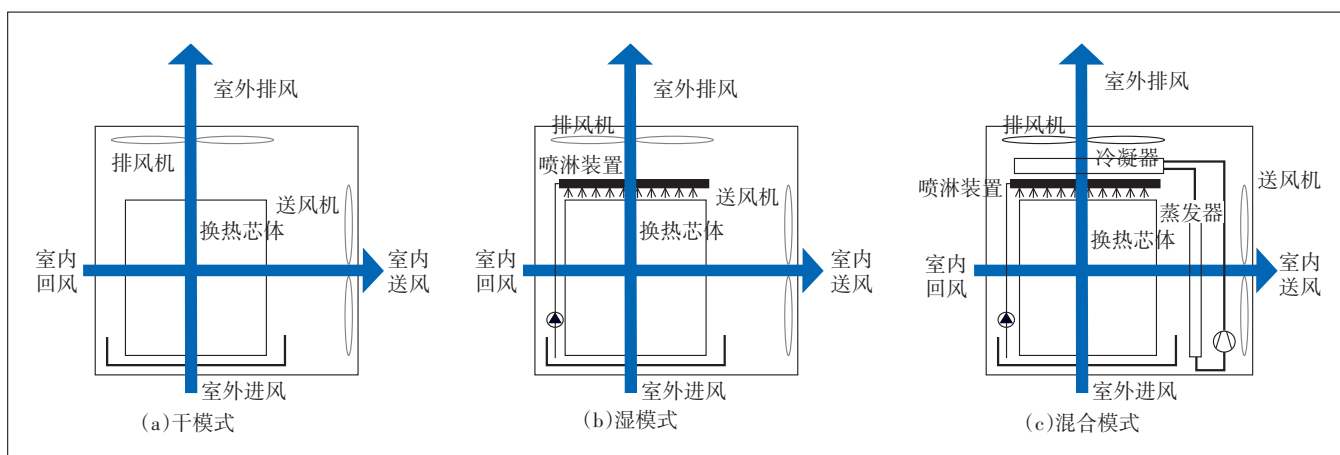


图1 间接蒸发冷却机组原理图

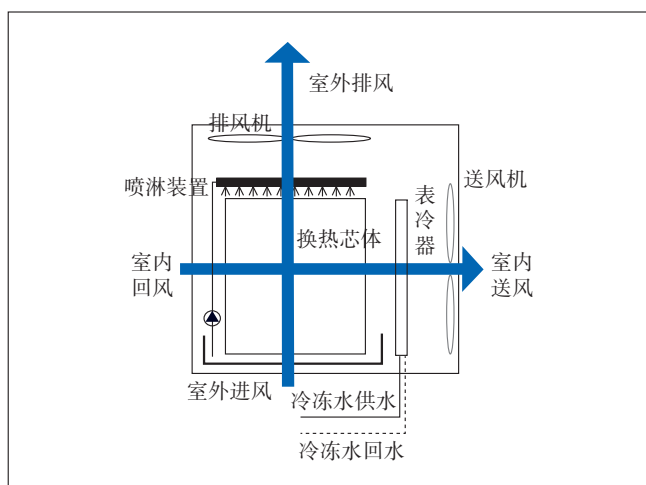


图2 水补冷的间接蒸发冷却机组

根据20年极端气象条件进行计算^[8]。

换热芯体室外侧出风温度:

$$t_{\text{出风}} = t_{\text{回风}} - (t_{\text{回风}} - t_s) \times \eta \quad (1)$$

补冷比例:

$$n = 1 - (t_{\text{回风}} - t_{\text{出风}}) / (t_{\text{回风}} - t_{\text{送风}}) \quad (2)$$

1.2 补冷方式

1.2.1 水补冷

水补冷是将集中冷冻水系统作为间接蒸发冷却机组的补冷来源,如图2所示。

1.2.2 压缩机补冷

压缩机补冷是将压缩机风冷直膨式系统作为间接蒸发冷却机组的补冷来源,如图1(c)所示。

1.3 补冷比例

补冷比例与机房的送回风温度、湿球温度以及换热芯体的换热效率有关。补冷比例中的湿球温度应

其中, $t_{\text{送风}}$ 为断电前机房内冷通道送风温度($^{\circ}\text{C}$); $t_{\text{回风}}$ 为机房内回风温度($^{\circ}\text{C}$); t_s 为当地极端湿球温度($^{\circ}\text{C}$); η 为换热芯体的换热效率。

根据间接蒸发冷却空调机组的适用区域^[9],分别在严寒地区、寒冷地区和温和地区选择相应的城市对空调机组进行分析。若机房内送风温度为 25°C 、回风温度为 38°C 时,不同地区的补冷比例如表1所示。极端湿球温度越高,补冷比例也随之增加。换热芯体的换热效率越高,补冷比例越低。

由式(1)、(2)可知,调整送回风温差,补冷比例也随之变化。送回风温差相同时,随着送回风温度的升高,间接蒸发冷却机组的各模式之间的切换温度提高,补冷比例降低,空调系统越节能。

表1 不同地区补冷比例的(%)

城市换热效率	60	65	70
呼和浩特(严寒地区)	29.38	23.50	17.65
北京(寒冷地区)	70.00	67.50	65.00
贵阳(温和地区)	36.17	30.85	25.53

1.4 补冷失效时温升

对于水补冷的机组,采用蓄冷罐可实现不间断冷源;集中冷冻水系统冷源冷量充足时,可实现100%补冷。对于压缩机补冷的机组,在ATS进行市电和UPS切换时,ATS切换时间约为100 ms,而压缩机系统接受市电闪断的时间仅为10 ms,切换过程中压缩机断电重启,此时补冷系统失效。对不同厂家的间接蒸发冷却空调机组进行统计,发现压缩机补冷失效后,一般30~60 s可恢复50%的补冷量,90~180 s可恢复100%的补冷量。根据文献[10],制冷失效后,机房内温升速率与单机架功率(单机架功率小于10 kW)的关系为:

$$Y = 0.000\ 05X - 0.038\ 1 \quad (3)$$

在夏季极端天气时,间接蒸发冷却空调机组的压缩机停止补冷后,由机组湿模式运行提供冷量。此时,机房内的温升主要与制冷量、房间体积、单机架功耗等有关。

断电 ΔT 时间后,机房内温升(不考虑机组湿模式运行)为:

$$Q_1 = Y \times V \times \rho \times C_p \times \Delta T \quad (4)$$

断电 ΔT 时间内,机组湿模式运行提供的冷量为:

$$Q_2 = Q_{\text{机组}} \times n \times \Delta T \quad (5)$$

断电 ΔT 时间后,机房内最终温度(考虑机组湿模式运行)为:

$$t_{\text{最终}} = (Q_1 - Q_2) / (V \times \rho \times C_p) + t_{\text{送风}} \quad (6)$$

其中, X 为单机架功率(W); Y 为温升速率($^{\circ}\text{C}/\text{s}$); V 为机房有效容积(m^3); n 为间接蒸发冷却空调机组台数(热备时为全部机组台数,冷备时仅为备用机组台数); $t_{\text{送风}}$ 为断电前机房内冷通道送风温度($^{\circ}\text{C}$); ρ 为空气密度(kg/m^3); C_p 为空气比热容[$\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$]。

图3为冷通道送风温度为 25°C 、补冷比例为65%(热备)时,不同功率密度下机房的温升情况(图3中无制冷是指在机组完全不运行时,机房内温升情况;湿模式是指机组湿模式运行时,机房内温升情况)。随着功率密度的增加,机房内温升的幅度也随之增加。补冷失效后,湿模式运行可明显降低机房内温升。设备选型时,压缩机恢复补冷时间需根据补冷比例、功率密度、冷通道送风温度和服务器最高承受的温度等综合确定。假设服务器进风侧最高承受温度为 35°C ,功率密度为8 kW时,机组恢复50%的补冷时间建议不超过40 s。

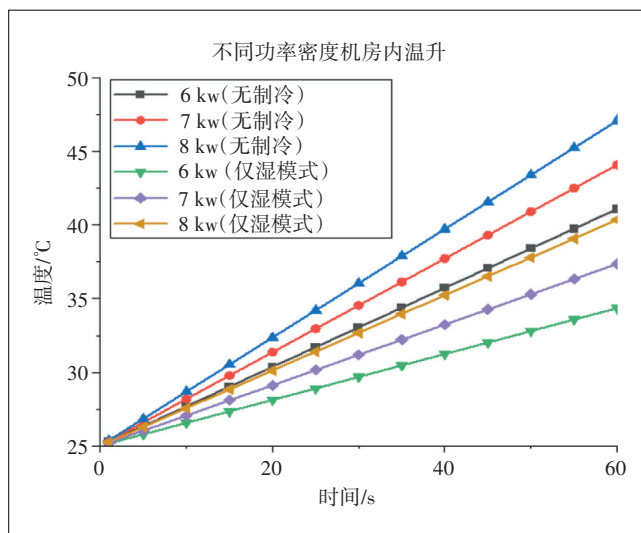


图3 不同功率密度下机房内温升情况

采用6sigmaDC软件对功率密度为8 kW的数据机房进行仿真,冷源采用压缩机补冷的间接蒸发冷却空调,单台显冷量为260 kW,补冷比例为65%,5用1备。机房采用热通道封闭,气流组织为弥散送风、吊顶回风。补冷失效时假设60 s内压缩机恢复50%补冷。在极端湿球温度,备机运行的条件下,进行模拟。模拟曲线取冷通道内各测点的温度平均值。由于模拟考虑了温度升高时机房内空气密度和比热容会降低,模拟值略低于计算值,但整体趋势基本一致。仿真模拟的温升情况如图4所示。

2 间接蒸发冷却空调系统模型

2.1 计算模型

假定间接蒸发冷却空调机组单台显冷量为260

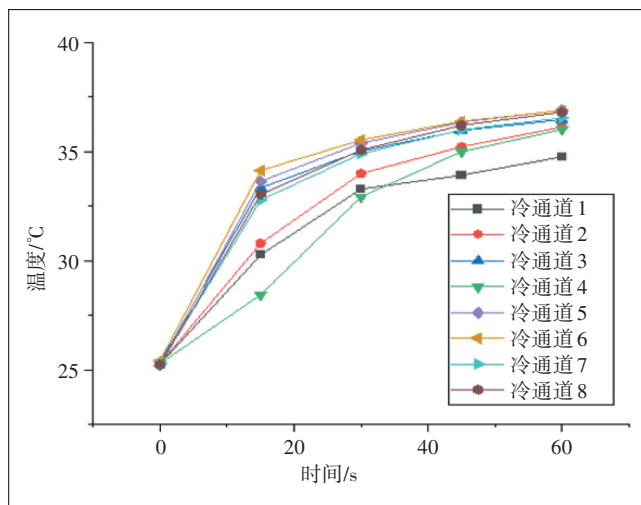


图4 仿真模拟温升

kW,机房内送风温度为25℃,回风温度为38℃,采用节水优先模式进行分析^[9]。干模式工况为室外干球温度≤16℃;湿模式工况为室外干球温度>16℃且湿球温度≤19℃;混合模式工况为室外湿球温度>19℃。水补冷机组的冷冻水系统采用变频离心式冷水机组+板式换热器+开式冷却塔+冷冻水泵+冷却水泵,冷冻水供水温度为18/24℃。

2.2 各模式分析

2.2.1 干模式

干模式运行时,2种补冷方式的间接蒸发冷却空调机组耗电设备为室内外风机,风机运行功耗与室外环境的干球温度有关。如图5所示,机组功耗随着室外干球温度的升高而升高。

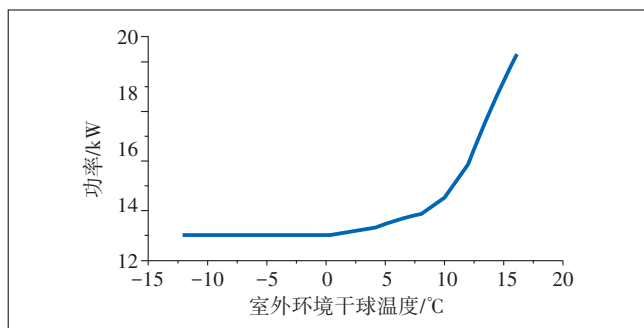


图5 干模式下间接蒸发冷却空调机组功耗

2.2.2 湿模式

湿模式下运行时,2种补冷方式的间接蒸发冷却空调机组耗电设备均为室内外风机和喷淋泵,但由于机组设置的喷淋泵一般为定频泵,且功率较小,对机组整体功率影响也较小,如图6所示。

2.2.3 混合模式

混合模式下运行时,2种补冷方式的间接蒸发冷却空调机组耗电设备差异较大。采用压缩机补冷的机组耗电量包括室内外风机、喷淋泵和压缩机的电量;采用水补冷的机组耗电量包括室内外风机、喷淋

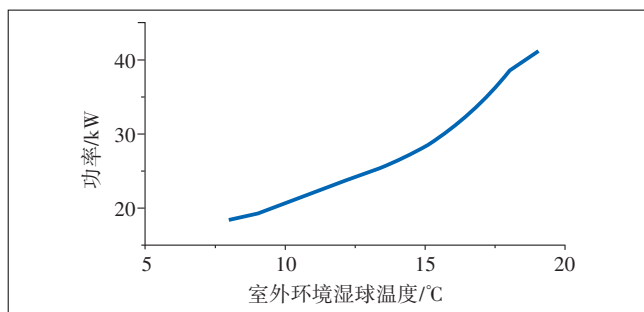


图6 湿模式下间接蒸发冷却空调机组功耗

泵以及满足补冷量所需的冷冻水系统的电量。如图7所示,由于压缩机能耗高于补冷量所对应的冷冻水系统功耗,采用水补冷没有压缩机补冷耗电,水补冷的间接蒸发冷却机组的用电功耗会大幅度降低。

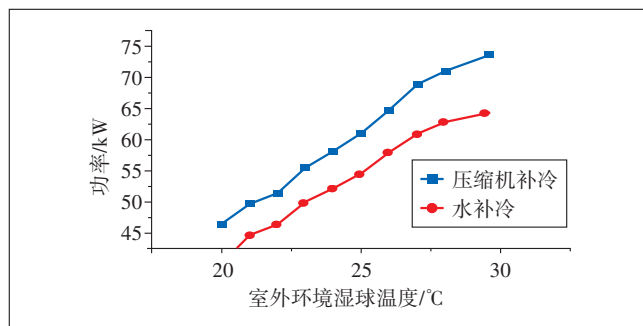


图7 混合模式下压缩机补冷与水补冷机组功耗

3 能耗分析

3.1 节能性分析

CLF指制冷负载因子,是衡量空调系统能耗的重要指标。间接蒸发冷却空调机组的CLF为:

$$CLF = \text{机组全年空调制冷能耗} / \text{全年IT设备总能耗}$$

冷冻水系统作为外置补冷冷源,补冷开启时水冷冷水机组效率高于压缩机,采用水补冷机组的CLF略低于采用压缩机补冷的系统。但水补冷与压缩机补冷相比,CLF降低的并不显著,这是由于水补冷机组的CLF主要取决于冷冻水系统的CLF、机组的补冷量和开启补冷的时长。例如,北京地区补冷比例较高,但补冷时间较短;贵阳地区补冷比例较低,但同等工况下冷冻水系统的CLF较高,且补冷时间较长(见图8)。

3.2 节水性分析

WUE是数据中心水资源消耗的重要指标。

$$WUE = \text{机组全年空调制冷耗水量} / \text{全年IT设备总能耗}$$

间接蒸发冷却空调机组的耗水量包括蒸发水量、排污量和飘逸水量。机组全年空调制冷耗水量与室

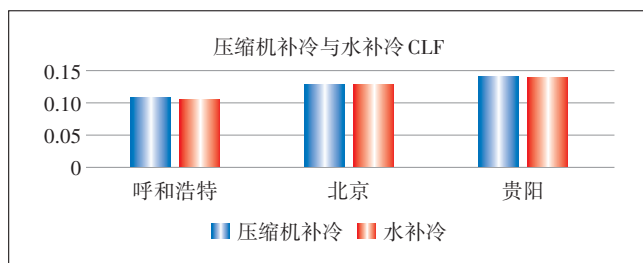


图8 压缩机补冷、水补冷的间接蒸发冷却机组的CLF

外气象参数、运行模式、机组性能、运行策略、补水水质等相关。年耗水量应根据全年气象参数计算,间接蒸发冷却空调系统的补水系统应按照设计工况下最大小时耗水量设计。图9为呼和浩特、北京和贵阳采用压缩机补冷、水补冷的间接蒸发冷却机组的WUE对比(WUE单位L/k·Wh)。采用压缩机补冷的机组其WUE明显低于采用水补冷的机组,这是由于机组运行在混合模式时,喷淋用水量一致,但补冷时压缩机完全不需要消耗水资源,而冷冻水系统仍需消耗较多的水资源。综上,对WUE要求严格的数据中心,建议采用压缩机补冷的间接蒸发冷却机组。

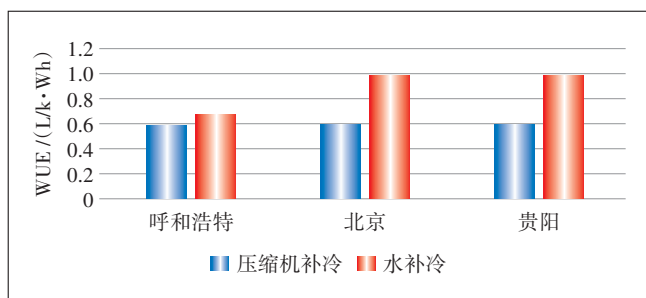


图9 压缩机补冷、水补冷的间接蒸发冷却机组的WUE

4 应用分析

针对间接蒸发冷却空调机组的补冷方式的应用场景进行分析,如表2所示。

5 结束语

间接蒸发冷却空调机组能够充分利用自然冷源,

表2 补冷方式应用场景分析

补冷方式	压缩机补冷	水补冷
应用场景	快速部署、分期部署以及有扩容需求的数据中心	具有集中冷冻水系统的改造项目或局部使用间接蒸发冷却机组,其余采用集中冷冻水系统的新建数据中心
不间断电源	双路电源,一路U电、一路市电,需提供室内外风机、喷淋泵、压缩机电量	双路电源,一路U电、一路市电,仅提供室内外风机、喷淋泵的电量
不间断冷源	ATS切换时,压缩机断电重启,补冷系统失效	采用蓄冷罐,可实现不间断冷源;集中冷冻水系统冷源冷量充足时,可实现100%补冷
地区适用性	适用于干燥地区(夏季空气调节室外计算湿球温度小于23℃的地区)及中等湿度地区(夏季空气调节室外计算湿球温度大于23℃、小于28℃的地区) ^[9]	适用地区与压缩机补冷机组相同,但应用在严寒、寒冷地区时,冷冻水系统冬季需要泄水或电伴热防冻,影响冷冻水系统稳定、增加运维难度、增加额外电伴热能耗

在新建、改建数据中心中具有广阔的应用前景。本文对间接蒸发冷却空调机组的补冷方式进行分析,得出以下结论。

a) 机组补冷比例与极端湿球温度、送回风温度、换热芯体换热效率等因素有关,需综合确定。极端湿球温度越高,补冷比例越高;换热效率越低,补冷比例越高;送回风温差恒定,温度越高,补冷比例越低。

b) 随着功率密度的增加,压缩机补冷失效时机房内温升的幅度也随之增加。压缩机恢复补冷时间需根据补冷比例、功率密度、冷通道送风温度等综合确定。

c) 水补冷的间接蒸发冷却空调机组CLF略低于压缩机补冷,但压缩机补冷的WUE明显低于水补冷。水补冷适合应用在具有集中冷冻水系统的改造项目或局部使用间接蒸发冷却机组,其余采用集中冷冻水系统的新建数据中心。

参考文献:

- [1] 程序,贺晓,张飞. 碳中和目标下蒸发冷却节能技术在数据中心的应用[J]. 邮电设计技术,2021(6):63-66.
- [2] 韩文锋,陶杨,陈爱民,等. 数据中心高效绿色冷却技术[J]. 制冷与空调,2021,21(2):78-90.
- [3] 贾晨昱,黄翔,田振武,等. 间接蒸发冷却技术在国内外数据中心的应用研究[J]. 制冷与空调,2020,20(1):61-67.
- [4] 黄翔,范坤,宋姣姣. 蒸发冷却技术在数据中心的应用探讨[J]. 制冷与空调,2013,13(8):16-22.
- [5] 严政,吴学渊,黄翔,等. 间接蒸发冷却空调机组在数据中心的应用研究[J]. 制冷与空调,2022,22(11):75-81.
- [6] 杨彦霞,杨子韬. 数据中心设备冷却要求及空调方案选择[J]. 制冷与空调,2015,15(9):75-80.
- [7] 刘明亮,王娟,郭丰. 蒸发冷却技术在数据中心应用[J]. 现代信息技术,2020,4(12):51-53.
- [8] 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.
- [9] 姜宇光. 数据中心冷水空调系统与间接蒸发冷却空调系统建模对比分析[J]. 暖通空调,2021,51(1):76-83.
- [10] 殷平. 数据中心研究(7):自然冷却[J]. 暖通空调,2017,47(11):49-60,124.

作者简介:

景淼,高级工程师,硕士,主要从事数据中心空调技术研究工作;何健,高级工程师,硕士,主要从事数据中心电源技术研究工作。

