

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20251016002

不同运行模式下间接蒸发冷却空调设计日生成方法

李红莲¹ 王淼¹ 杨怡² 韩星³

(1 西安建筑科技大学信息与控制工程学院 西安 710055; 2 西安建筑科技大学建筑学院 西安 710055;

3 西安建筑科技大学建筑设备科学与工程学院 西安 710055)

摘要 现行蒸发冷却空调系统采用传统暖通空调设计参数作为设计条件,通过选取极端气象条件作为设计日参数,忽略了蒸发冷却空调运行模式的多样性与气象要素的耦合性。本研究以数据中心为研究对象,基于间接蒸发冷却空调干、湿、混合3种模式的运行特征,提出了一种新的设计日生成方法。首先利用TRNSYS建立数据中心间接蒸发冷却空调系统,以送风温度作为空调运行模式的判定条件,提取反映3种切换模式所对应的室外逐时干球温度的气候特征,并结合共同主成分分析和基于形态特征的加权动态时间规整方法,从历史气象数据中识别与该特征序列最相似的气象日,从而生成不同运行模式下的设计日参数。结果表明:相较于原设计参数,新方法生成的设计日参数在3种运行模式下的峰值冷负荷与实际设计负荷的相对偏差分别下降0.15%、0.03%、0.41%。本研究提出的设计日参数能够有效避免原设计参数存在的设计冗余问题,更好地满足工程设计的准确性要求。

关键词 数据中心;间接蒸发冷却;送风温度;气象参数;节能优化

中图分类号: TU119^{*}.2; TU831.6

文献标识码: A

Generation Method of Design Days for Indirect Evaporative Cooling Air Conditioning under Different Operating Modes

Li Honglian¹ Wang Miao¹ Yang Yi² Han Xing³

(1. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China; 2. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China; 3. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China)

Abstract Current evaporative cooling air conditioning systems adopt traditional HVAC design parameters as their design conditions, using extreme weather conditions as design day parameters, which overlooks the coupling between the diversity of evaporative cooling operation modes and meteorological factors. This study considers data centers as the research object and proposes a new method for generating design days based on the operational characteristics of indirect evaporative cooling air-conditioning systems in dry, wet, and mixed modes. First, a TRNSYS model was established for an indirect evaporative cooling air-conditioning system in data centers, with the supply air temperature serving as the criterion for determining the operation mode. The climatic features corresponding to the hourly outdoor dry- and wet-bulb temperatures under the three switching modes were extracted. By combining conventional principal component analysis and the weighted dynamic time warping method, the meteorological days most similar to these characteristic sequences were identified from historical weather data, thereby generating design-day parameters for different operation modes. The results show that, compared with the original design parameters, the peak cooling loads generated by the new method under the three operating modes exhibit relative deviations from the actual design loads of 0.15%, 0.03%, and 0.41%, respectively. The design-day parameters proposed in this study effectively mitigated the design redundancy issues associated with the original parameters, thereby better satisfying the accuracy requirements of the engineering design.

Keywords data center; indirect evaporative cooling; supply air temperature; meteorological parameters; energy-saving optimization

目前空调系统的节能优化已成为数据中心实现绿色转型与节能减排的重要途径^[1]。在多种节能技

基金项目:国家自然科学基金(52278124)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52278124).)

收稿日期:2025-10-16;修回日期:2025-10-28;录用日期:2025-12-15

术中,间接蒸发冷却因其显著的节能潜力和运行优势,逐渐成为数据中心冷却的关键选项。然而,该技术的制冷性能高度依赖于室外气象条件,因此亟需建立合理的室外设计计算参数,为其设计与应用提供支撑。

现阶段,国内外相关规范对空调设计所需的室外气象参数已有明确规定。JGJ 342—2014《蒸发冷却制冷系统工程技术规程》^[2]要求参考 GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》^[3](简称:我国规范),采用历年平均不保证 50 h 的干球温度和湿球温度,并通过逐时变化系数生成设计日参数。已有研究表明,这种方法忽略了气象要素之间的相关性和相互影响,一般会显著高估实际冷负荷需求^[4]。相比之下,《民用建筑暖通空调设计室内外计算参数导则》^[5]通过多不保证率下的干/湿球温度及对应同时发生值来构建参数,在一定程度上考虑了要素间的相关性,但仍以单一气象要素为主导,未能全面反映多因素耦合特征。鉴于这些不足,一些学者^[6-7]通过构建气象参数的联合分布模型来改进空调计算参数。这些研究强调了气象要素之间的耦合性,但大多仍停留在气象数据本身的统计层面。

U. Sajjad 等^[8-11]综述了蒸发冷却空调最新发展及其相关的设计参数和运行条件。蒸发冷却空调以干空气能为驱动,其制冷效果对湿球温度的依赖显著强于传统空调,因此在相关研究中,湿球温度通常被视为核心参数^[12]。目前关于蒸发冷却室外计算参数的研究主要集中在对现行规范方法的修正与优化。于汝娟等^[13]对比了 4 种直接蒸发冷却参数选取方法,提出针对不同应用条件的优化方案。刘艳峰等^[14]利用 k-means 聚类划分适用区域,并给出修正系数;杨怡等^[15]则基于不同地区气候特征提出逐时化系数提取和多要素组合的设计日生成方法,得到以湿球温度为主、干球温度为辅的参数体系。虽然这些研究在一定程度上拓展了计算参数的合理性,但尚未充分考虑蒸发冷却空调实际运行特性及其对系统负荷的影响。

对于具有干、湿、混合 3 种运行模式的间接蒸发冷却系统而言,极端的室外条件一般对应混合模式(即风机、水泵、压缩机同时开启),但该运行模式在多数干热气候区实际开启时间十分有限^[16-17]。同时,数据中心的围护结构对负荷影响较低,全年负荷波动较小。外部气象条件更多地影响空调系统的制冷效率,而非室内冷负荷。因此,传统设计日生成方法依据极端气象条件选取设计日时,并不能准确反映大部分运行时段的负荷需求。综上所述,沿用传统

的极端设计日选取方法可能导致空调设备选型冗余。

基于上述问题,本研究以数据中心为研究对象,根据间接蒸发冷却空调不同运行模式提出一种新的设计日生成方法。

1 数据准备和空调模型构建

1.1 数据来源

本研究基于国家气象信息中心提供的上海市 1988—2017 年共 30 年逐时实测气象数据。在机房冷负荷模拟及空调运行时长计算中,所采用的上海市典型气象年数据来源于西安建筑科技大学建筑节能设计基础参数数据平台^[18]。该数据基于长期历史观测资料,采用 Sandia 国家实验室提出的 Filkenstein-Schafer(FS)统计方法生成,具有长期性和平均性特征,能够较好地代表上海市的气候条件^[19]。

1.2 间接蒸发冷却原理

间接蒸发冷却空调的工作原理如图 1 所示。室外空气与循环水在湿通道内直接接触实现等焓降温,机房回风流经干通道时被冷却但不加湿,两者通过换热芯体进行热交换,实现对热空气的等湿降温,并通过管壁导热将服务器热量排至室外^[20]。

该机组主要有 3 种运行模式:

- 1) 干模式。仅风机运行,完全采用外界自然冷源冷却。
- 2) 湿模式。风机和喷淋水泵同时开启,利用喷淋冷却后的二次空气与室内回风换热。
- 3) 混合模式。风机、喷淋水泵和压缩机同步运行,间接蒸发冷却作为常规压缩机制冷的先导预冷方式使用。

1.3 空调模型构建

为了获取间接蒸发冷却空调运行数据,本研究通过设定数据中心机房条件模拟出全年所需冷负荷,确定设备选型,搭建了间接蒸发冷却空调系统仿真平台。

选取上海市某中小型数据中心主机房作为研究对象,占地面积为 1 302 m²,共放置 308 台功率为 7.8 kW 的机柜,机柜全年不间断满负荷运行。根据现行国家标准 GB50174—2017《数据中心设计规范》^[21]相关参数,设置数据中心机房模拟条件如表 1 所示。

模拟结果表明,数据机房全年冷负荷稳定在 2 334.6~2 454.5 kW,几乎不随季节变化,主要因其负荷来源为 IT 设备,建筑围护结构影响较小。因此,空调系统的运行状态主要由其是否满足送风温度需求

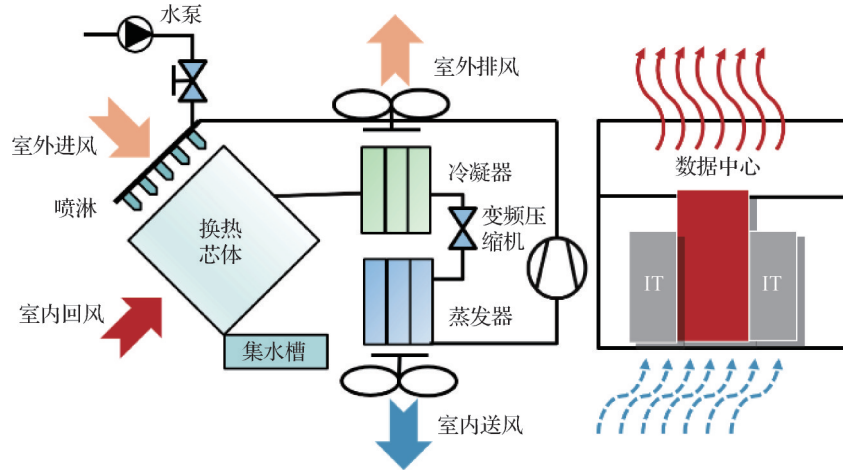


图1 间接蒸发冷却空调工作原理

Fig.1 Operating principle of indirect evaporative cooling air conditioning

表1 数据中心机房模拟条件

Tab.1 Data center computer room simulation parameters

建筑基本参数	取值
尺寸(长×宽×高)/m	42×31×4.5
面积/m ²	1302
服务器机柜数/架	308
围护结构传热系数/[W/(m ² ·K)]	1.3
单位面积照明功率/[W/m ²]	10
服务器机柜功率/(kW/架)	7.8

决定。本研究参考 T/CECS 487—2017《数据中心制冷与空调设计标准》^[22]中机柜进风温度要求,将 18~27 °C 设为模式切换的判断依据。当某一模式无法维持该温度区间,即视为失效,需切换至其他模式,定义模式切换边界值±0.5 °C 为模式切换点,用于后续的研究。

根据冷负荷模拟结果对设备进行选型如表 2 所示。

表2 主要设备参数

Tab.2 Main equipment parameters

设备	参数	数值
一次风机	额定风量/(m ³ /h)	7×10 ⁵
	额定功率/kW	167
二次风机	额定风量/(m ³ /h)	9×10 ⁵
	额定功率/kW	208
喷淋水泵	额定流量/(m ³ /h)	1 100
	扬程/m	25
	额定功率/kW	7.5
双涡旋压缩机	制冷量/kW	2 500
	额定功率/kW	500

在 TRNSYS 中基于各模块的数学模型搭建系统,进行仿真分析,通过模块之间的连线来实现热量传递和能量转换^[23]。图 2 所示为根据间接蒸发冷却空调系统的实际运行形式,在 TRNSYS 中搭建的仿真工程模型。天气文件模拟室外新风作为工作空气经由一次风机对模拟出的室内回风进行降温,换热器、间接蒸发冷却器、机械补冷装置模块组合搭配模拟机组在不同运行模式下的工作状态。

2 研究方法

2.1 技术路线

为了生成与间接蒸发冷却空调运行特征相关联且实际存在的设计日,本文提出一种基于中位数提取,共同主成分分析(combined principal components analysis, CPCA)结合基于形态特征的加权动态时间规整(shape-based weighted dynamic time warping, SWDTW)算法选取设计日的新方法。技术路线如图 3 所示。

具体步骤如下:

1) 运行模式切换状态判定与气象数据提取。根据送风数据识别空调运行模式切换点,提取对应时刻的室外气象参数。

2) 筛选设计日气象要素。基于典型气象年数据,分析与模式切换相关性最强的室外气象变量,作为设计日关键要素。

3) 代表性时段选择。选取切换频次、集中度以及切换间隔小时数作为评价指标,通过对不同指标在表征模式切换特征方面的敏感性分析与验证,最终确定权重因子分别为 0.6、0.2 和 0.2。依据加权结果,选取加权值最高的月份作为模式切换的典型代表。

4) 气象序列构建与特征提取。

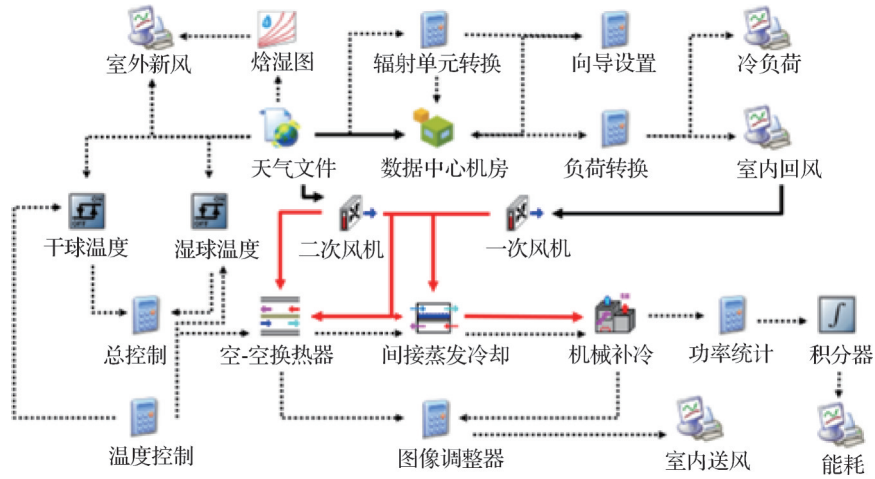


图2 间接蒸发冷却空调系统仿真工程模型

Fig.2 Simulation model for indirect evaporative cooling air conditioning systems

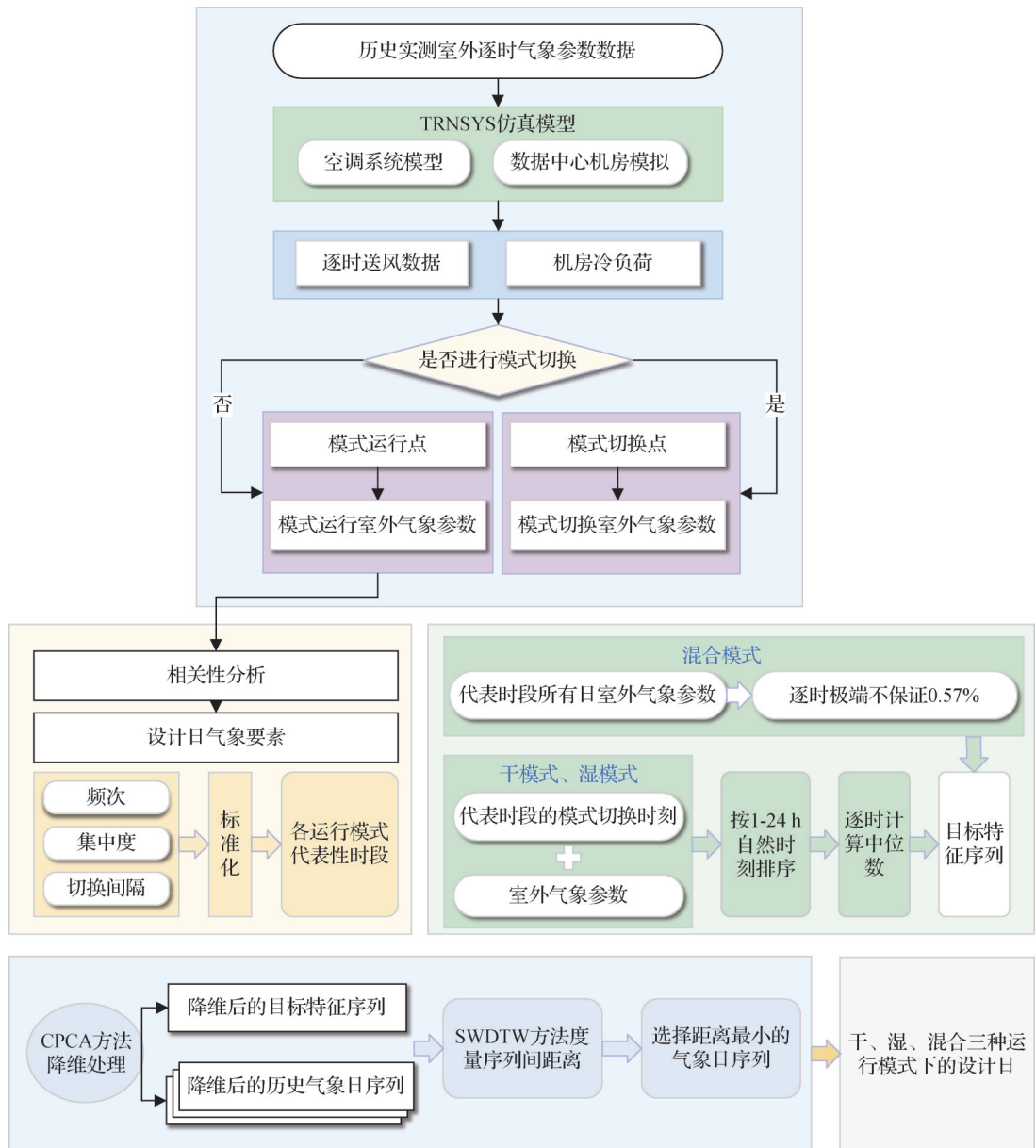


图3 技术路线

Fig.3 Technology road map

干、湿模式:在代表时段内,提取模式切换时刻对应的室外干湿球温度数据,按1—24时顺序排列为 $n \times 24$ 序列(n 为代表时段内模式切换次数),逐时取中位数构成目标序列。

混合模式:提取代表时段中所有天的干湿球温度数据,逐时取极端不保证率0.57%下的温度值作为特征序列。

5)数据降维。运用共同主成分分析(CPCA)方法将历史气象数据序列与上述目标特征序列共同投影至同一主成分空间降维。

6)相似性度量。运用基于形态特征的加权动态时间规整(SWDTW)度量降维后各历史序列与目标序列的形态相似性,选取最接近的气象日作为设计日参数。

2.2 设计日构建方法

为了体现多参数间的耦合性,本研究采用共同主成分分析(CPCA)方法,将目标特征序列与所有候选历史气象日序列拼接构成一个联合矩阵,并基于该矩阵提取共同的主成分。在此基础上,采用基于形态特征的加权动态时间规整(SWDTW)方法,在CPCA降维后得到的统一低维空间内,计算历史序列与目标序列之间的距离。

利用CPCA-SWDTW方法获取设计日的具体步骤如下:

1)构建包含长度为 n 的历史气象日 X 与长度为 m 的目标特征向量 Y 的总数据矩阵 $Z_{(m+n) \times 2}$,并按列标准化:

$$Z_{s,ij} = \frac{Z_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \quad j = 1, 2 \quad (1)$$

式中: Z_s 为标准化后的总数据矩阵; Z_{ij} 为矩阵 Z 的第 j 列第 i 个向量; μ_j 和 σ_j 分别为矩阵 Z 第 j 列的均值和标准差, $^{\circ}\text{C}$ 。

2)计算标准化矩阵 Z_s 的相关系数矩阵,求解相关系数矩阵 R 的特征方程:

$$L = \min \left\{ l: \sum_{i=1}^l \lambda_i \geq \delta \right\} \quad (2)$$

式中: λ_i 为相关系数矩阵 R 第 i 个特征值; δ 为预设的累积方差贡献率阈值(本文取 $\delta = 0.95$); L 为保留的主成分数量。

取前 L 个特征向量构成投影矩阵 W ,将数据投影到主成分空间:

$$P = Z_s \cdot W \quad (3)$$

式中: P 为主成分得分矩阵; W 为投影矩阵。

3)根据各主成分的方差贡献率 ω_i 对投影数据进

行加权,构造加权的历史日序列和目标序列。

$$\omega_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^L \lambda_j} \quad (4)$$

$$H_w = P_h \cdot \text{diag}(\omega_i) \quad (5)$$

$$T_w = P_t \cdot \text{diag}(\omega_i) \quad (6)$$

式中: ω_i 为第 i 个主成分的方差贡献率; P_h 历史日主成分得分矩阵; P_t 为目标主成分得分矩阵; H_w 为加权的历史日序列; T_w 为加权的目标序列。

4)计算加权后历史日与目标日序列之间的形态相似性距离。构建局部距离矩阵 D ,其中元素:

$$D(p, q) = |H_w(p) - T_w(q)| \quad (7)$$

式中: $D(p, q)$ 为局部距离矩阵中第 p 行第 q 列的元素, $^{\circ}\text{C}$; $H_w(p)$ 为加权历史序列第 p 个元素的值, $^{\circ}\text{C}$; $T_w(q)$ 为加权目标序列第 q 个元素的值, $^{\circ}\text{C}$;

运用动态规划寻找累积距离最小的规整路径 S_{\min} ,该路径的累积距离即为SWDTW距离:

$$\text{SWDTW}(H_w, T_w) = \sqrt{\sum_{(p,q) \in S_{\min}} D(p, q)^2} \quad (8)$$

5)计算所有历史日与目标日的SWDTW距离,选取距离最小的历史日作为最终设计日。

3 结果与分析

3.1 气象要素选取

基于典型气象年数据,采用Pearson相关分析方法,量化干球温度、湿球温度、太阳辐射等典型气象要素与空调系统运行模式切换状态的相关性,结果如表3所示。结果表明,干球温度和湿球温度与模式切换状态具有显著相关性,而太阳辐射等气象要素的相关性相对较弱。因此,本文选取室外干球温度与湿球温度作为设计日筛选的关键气象要素。

3.2 代表性时段选取

基于典型气象年数据,对间接蒸发冷却空调系

表3 各气象参数与不同模式切换状态相关性分析结果
Tab.3 Results of the correlation analysis between various meteorological parameters and mode-switching status

要素类型	干模式切换状态	湿模式切换状态
干球温度	0.92	0.88
湿球温度	0.90	0.88
相对湿度	-0.54	-0.73
风速	-0.03	0.04
大气压力	-0.01	0.01
太阳辐射	0.53	0.38

统不同运行模式的逐月平均可用时间及其占比进行统计分析,结果如图4所示。结果表明,系统运行受室外气象影响显著,呈现季节性规律。随室外湿度先升后降,自然冷源可用时长先减后增,机械制冷需求则先增后减。其中,干模式运行集中于1—4月及11—12月低温时段;气温回升后湿模式时长显著增加,7—8月高温期间则以混合模式为主。4月干、湿模式交替明显,6月湿模式适用性下降,混合模式渐为主导。3种模式在全年运行时长的占比如表4所示。由表4可知,3种模式均占有一定比例,故设计日生成需兼顾各模式运行特征。

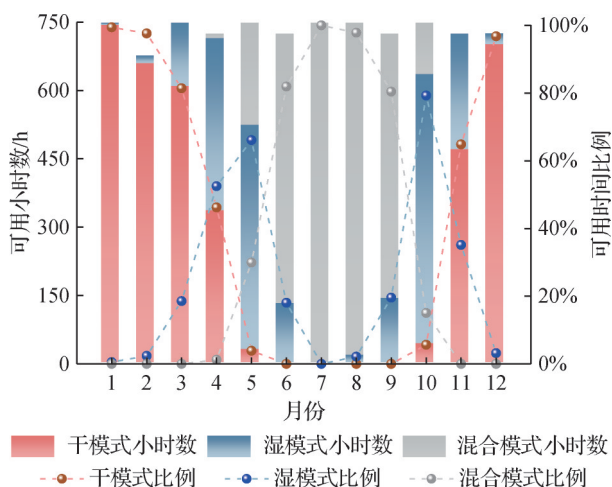


图4 3种运行模式的逐月可用时间和比例

Fig.4 Monthly available time and proportion for the three operational modes

表4 3种模式全年运行时长占比

Tab.4 Annual operational duration proportion of the three modes

运行模式	占比
干模式	0.41
湿模式	0.25
混合模式	0.34

将干湿模式与湿、混合模式的切换临界状态分别定义为切换点1和切换点2。各月加权统计结果如图5所示,4月和6月分别为切换点1与切换点2得分最高的月份。因此,本研究选取4月为干模式代表月份,6月为湿模式代表月份,7月(混合模式占比最高)为混合模式代表月份。

3.3 间接蒸发冷却空调设计日生成

统计各运行模式在代表性时段内切换时刻对应的室外干湿球温度。图6所示为干、湿模式下模式切换时刻干湿球温度的逐时分布情况。2种模式均呈

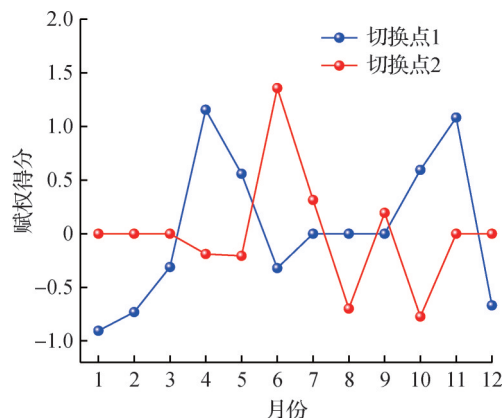


图5 模式切换点逐月加权结果

Fig.5 Monthly weighted results of mode switching points

现明显的昼夜差异,日间随太阳辐射增强,气温升高,箱体与须线范围展宽;夜间热负荷降低,温度分布集中,箱体变窄、须线缩短。干模式下,干湿球温度中位数分别约为16℃和15℃;湿模式下则分别约为23℃和20.5℃。

根据3.3节描述的CPCA-SWDTW算法流程,挑选出的设计日对应日期如表5所示,温度分布如图7所示。

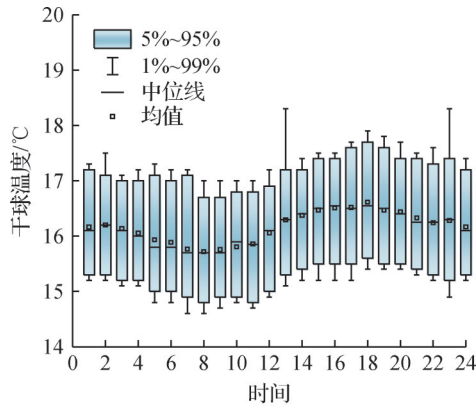
挑选出的干、湿模式下的设计日日期分别为11月和9月,为相应模式下切换较为频繁的月份,混合模式设计日为8月,为该模式全年运行时长较长时段。3种运行模式下设计日的干球温度分别约为16、23、36℃,湿球温度分别约为15、20.5、27℃,呈现出明显的阶梯式递增趋势。该温度分布与各模式的目标特征温度区间一致,验证了选取设计日的合理性。

3.4 冷负荷结果分析

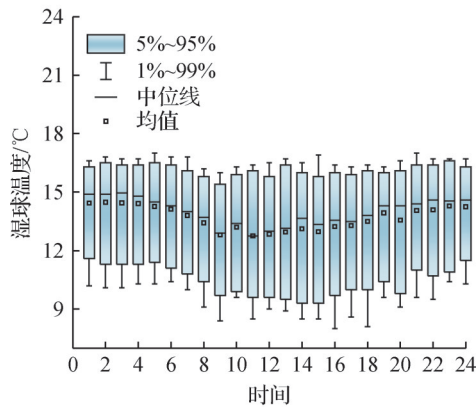
为了进一步对生成的设计日进行综合验证,计算规范方法与本研究方法下设计日参数对应的逐时冷负荷,对比结果如图8所示。

由图8可知,规范方法生成的设计日逐时冷负荷整体高于本研究的干、湿模式结果,低于混合模式。3种模式下,2种方法设计负荷绝对差值分别为47.2、20.7、10 kW,差值出现的时刻主要集中在13:00与14:00;逐时冷负荷差值最大为47、21、11 kW。进一步地,为评估新方法在不同运行模式下对冷负荷计算的准确性,计算其生成的设计日峰值冷负荷与实际房间设计负荷的相对偏差,结果如图9所示。

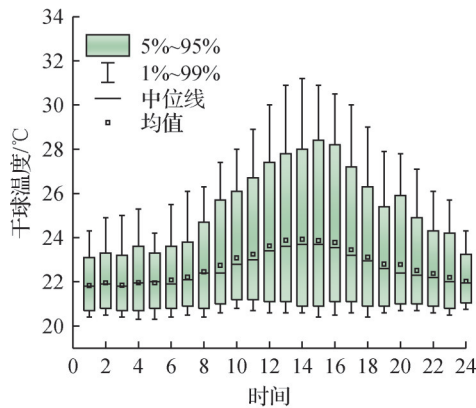
由图9可知,不同运行模式下机房的设计负荷存在显著差异。在干模式和湿模式下,设计负荷均明显低于混合模式。传统方法生成的设计日参数,其峰值负荷仅反映混合模式下的情况,与实际设计负荷的偏差为0.45%。本研究方法生成干、湿、混合3



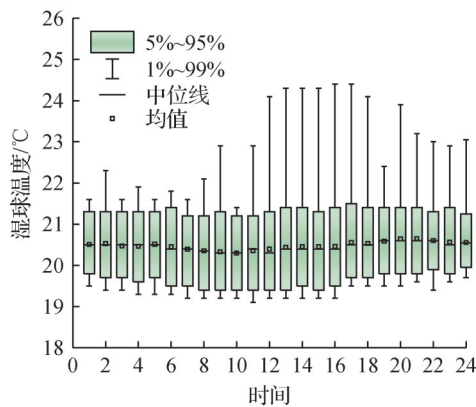
(a) 干模式干球温度



(b) 干模式湿球温度



(c) 湿模式干球温度



(d) 湿模式湿球温度

图6 模式切换时刻干湿球温度逐时分布箱线图

Fig.6 Box-plot of hourly dry-bulb and wet-bulb temperature distribution at mode switching points

表5 不同模式下设计日挑选结果

Tab.5 Selection results of design days under different operating modes

运行模式	对应日期
干模式	2008-11-02
湿模式	1990-09-10
混合模式	2010-08-14

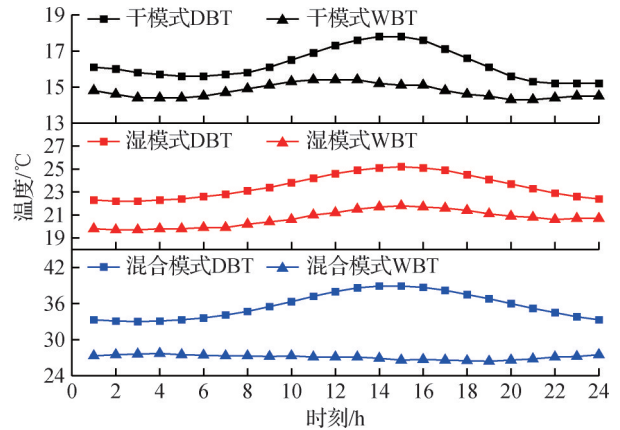


图7 不同模式下设计日温度分布

Fig.7 Temperature distribution of design days under different operating modes

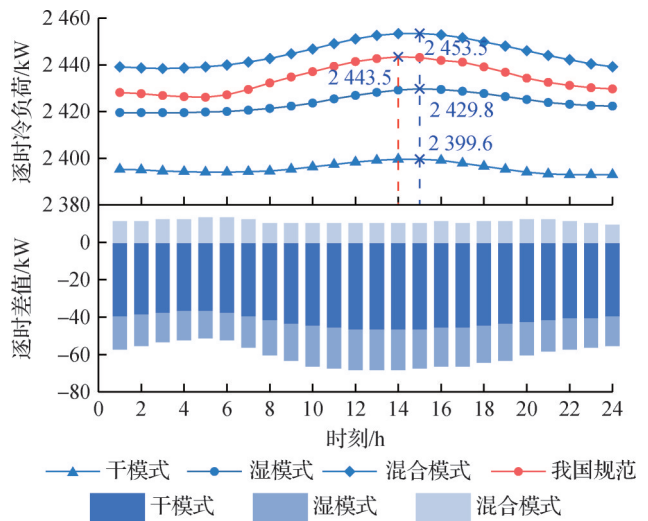


图8 两种方法设计日逐时冷负荷对比结果

Fig.8 Comparative results of hourly cooling load on design days using two methods

种模式下的设计日参数,其峰值负荷与相应模式下的实际设计负荷之间的偏差为0.3%、0.42%、0.04%,均小于传统设计参数。

4 结论

为使设计日参数更契合工程设计应用,本文提取并分析了间接蒸发冷却空调在不同运行模式下的室外气象特征,提出了一种新的设计日选取方法,并

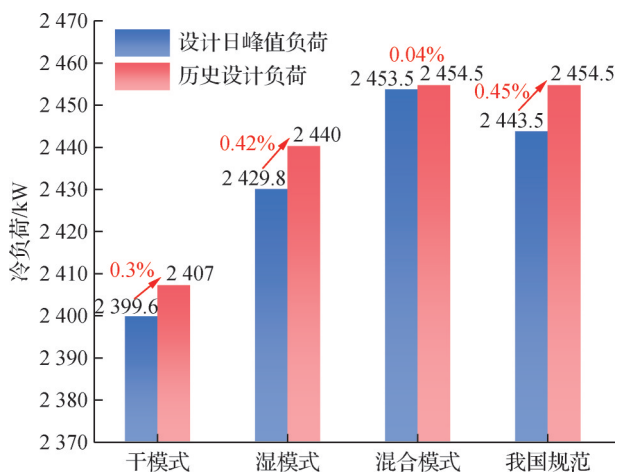


图9 峰值负荷与历史设计负荷对比结果

Fig.9 Comparative results of peak load versus historical design load

将该方法应用于上海市某数据中心间接蒸发冷却空调系统,获得了干模式、湿模式和混合模式下的设计日参数。得到如下结论:

1)本研究通过相关性分析选取干湿球温度作为设计日关键参数。从全年运行结果来看,间接蒸发冷却空调系统干、湿、混合3种运行模式的占比为0.41、0.25、0.34;因此有必要计算3种模式下的设计日参数。

2)3种运行模式下设计日生成的峰值负荷与相应模式下的实际设计负荷之间的偏差为0.3%、0.42%、0.04%;因此,本研究方法挑选出的3种运行模式下的设计日参数具有很高的准确性,可满足工程设计准确性要求。相比之下,原设计参数由于未区分运行模式,易导致干模式和湿模式下的设计负荷被高估。

3)本研究仅以上海市为例,探究3种模式下设计日的选取方法。在后续研究中,还需进一步针对本研究方法在其他气候区的适用性展开深入研究,为工程设计应用提供更准确、通用的设计日参数。

参考文献

[1] 周峰, 王芮敏, 马国远, 等. 我国数据中心碳中和路径情景分析[J]. 制冷学报, 2025, 46(1): 79-85. (Zhou Feng, Wang Ruimin, Ma Guoyuan, et al. Scenario analysis of data centers in China under carbon neutrality target[J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(1): 79-85.)

[2] JGJ 342—2014 蒸发冷却制冷系统工程技术规程[S]. (JGJ 342—2014 Technical specification for evaporative cooling air conditioning[S].)

[3] GB 50736—2012 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. (GB 50736—2012 Design code for heating ventilation

and air conditioning of civil buildings[S].)

[4] Chen T Y, Yik F, Burnett J. A rational method for selection of coincident design dry- and wet-bulb temperatures for required system reliability [J]. Energy and Buildings, 2005, 37(6): 555-562.

[5] 连之伟. 民用建筑暖通空调设计室内外计算参数导则[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2021. (Lian Zhiwei. Guidelines for indoor and outdoor design parameters in HVAC design of civil buildings[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2021.)

[6] Jiao Zhichao, Emura K. Estimation of outdoor design dataset based on interdependency of multiple meteorological elements by using vine copulas[J]. Energy and Buildings, 2023, 280: 112724.

[7] Li Honglian, Jiang Suwan, Wang Mengli, et al. Research on the generation method of outdoor design parameters for summer air-conditioning based on machine learning and dynamic time warping [J]. Building and Environment, 2025, 278: 112968.

[8] Sajjad U, Abbas N, Hamid K, et al. A review of recent advances in indirect evaporative cooling technology [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 122: 105140.

[9] Mohammed R H, El-Morsi M, Abdelaziz O. Indirect evaporative cooling for buildings: a comprehensive patents review [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 50: 104158.

[10] Kapilan N, Isloor A M, Karinka S. A comprehensive review on evaporative cooling systems [J]. Results in Engineering, 2023, 18: 101059.

[11] Hasan R A, Abdulqader M A, Alias A B, et al. Advancements and performance of evaporative cooling technologies: applications, benefits, and future prospects [J]. Khwarizmia, 2025, 2025: 30-41.

[12] 黄翔. 蒸发冷却通风空调系统设计指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (Huang Xiang. Design guide for evaporative ventilation and air conditioning system[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)

[13] 于汝娴, 辛军哲. 直接蒸发冷却空调室外设计气象参数的优化选取[J]. 建筑热能通风空调, 2016, 35(4): 64-68. (Yu Ruxian, Xin Junzhe. Optimization of outdoor design conditions for direct evaporative air conditioning system [J]. Building Energy & Environment, 2016, 35(4): 64-68.)

[14] 刘艳峰, 李娟, 王莹莹, 等. 直接与露点间接蒸发冷却空调技术在我国各地区适用性研究[J]. 暖通空调, 2019, 49(12): 8-14. (Liu Yanfeng, Li Juan, Wang Yingying, et al. Regional applicability of direct and dew-point indirect evaporative cooling air conditioning

- technologies in China [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2019, 49(12): 8-14.)
- [15] 杨怡, 黄翔, 褚俊杰, 等. 蒸发冷却空调室外计算参数生成方法研究[J]. 制冷学报, 2024, 45(3): 104-111. (Yang Yi, Huang Xiang, Chu Junjie, et al. Generating method of outdoor design parameter for evaporative cooling air conditioning [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(3): 104-111.)
- [16] 贺红霞, 黄翔, 何华明, 等. 数据中心用露点间接蒸发冷却与机械制冷复合空调的实验研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(6): 71-76. (He Hongxia, Huang Xiang, He Huaming, et al. Experimental investigation on dew point indirect evaporative cooling system combined with mechanical refrigeration for data center [J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(6): 71-76.)
- [17] 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. (Chu Junjie, Huang Xiang, Sun Tiezhu, et al. Experimental study on the performance of a countercurrent dew-point indirect evaporative cooler [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(1): 121-127.)
- [18] 建筑节能基础数据共享平台[EB/OL].[2021-05-10]. <http://leb.xauat.edu.cn>. (Buildingenergy efficiency basic data sharing platform [EB/OL].[2021-05-10]. <http://leb.xauat.edu.cn>.)
- [19] T/CECS 1079—2022 民用建筑热环境设计室内外计算参数标准[S]. (T/CECS 1079—2022 Standard for indoor and outdoor calculation parameter in thermal environment design of civil building[S].)
- [20] 高帅, 孙铁柱, 周理, 等. 立管间接蒸发冷却器与机械制冷复合空气处理机组干湿工况运行模式能耗分析[J]. 制冷与空调(四川), 2024, 38(2): 177-181. (Gao Shuai, Sun Tiezhu, Zhou Li, et al. Analysis of energy consumption in dry and wet operating mode of vertical tube indirect evaporative cooler and mechanical refrigeration complex air treatment unit [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2024, 38(2): 177-181.)
- [21] GB50174—2017 数据中心设计规范[S]. (GB50174—2017 Code for design of data centers[S].)
- [22] T/CECS 487—2017 数据中心制冷与空调设计标准[S]. (T/CECS 487—2017 Design standard for cooling and air conditioning of data centers[S].)
- [23] 陈瑞, 许家翔, 曹军. 数据中心间接蒸发冷却复合空调系统的节能运行分析[J]. 暖通空调, 2024, 54(10): 113-119. (Chen Rui, Xu Jiayang, Cao Jun. Energy saving operation analysis of indirect evaporative cooling composite air conditioning systems in data centers [J]. Journal of HV&AC, 2024, 54(10): 113-119.)

通信作者简介

李红莲,女,教授,西安建筑科技大学大学信息与控制工程学院,18392494291,E-mail:lihonglian_lhl@163.com研究方向:建筑能耗模拟气象年。

About the corresponding author

Li Honglian, Female, Professor, School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 18392494291, E-mail: lihonglian_lhl@163.com. Research fields: Building Energy Consumption Simulation Meteorological Year.

(责任编辑:王亚薇)