

文章编号: 1671-6612 (2021) 01-064-06

# 干燥地区蒸发冷却空调系统运行效果及能耗分析

金洋帆<sup>1</sup> 黄翔<sup>1</sup> 吴磊<sup>1</sup> 寇凡<sup>1</sup> 褚俊杰<sup>2</sup>

(1.西安工程大学 西安 710048; 2.中国建筑科学研究院有限公司 北京 100013)

**【摘要】** 介绍了蒸发冷却空调系统的形式, 并进行了简单的分类。提出蒸发冷却空调系统分别从冷源侧、输配侧、末端侧的耗电量计算方法。通过对新疆某医院采用空气—水蒸发冷却空调系统和干燥地区某机场配餐中心采用全空气蒸发冷却空调系统的室内温湿度及整体耗电量实测数据对比分析, 来评价蒸发冷却空调系统的运行效果及能耗, 得出实测的室内平均温度均为 23.6℃, 都低于室内温度的设计值; 同时室外环境的湿球温度对空调系统的耗电量影响较为明显, 当室外环境的湿球温度升高时, 空调系统的耗电量也随之增大。并且给出了蒸发冷却空调系统的优化建议。

**【关键词】** 干燥地区; 空气—水蒸发冷却空调系统; 全空气蒸发冷却空调系统; 运行效果; 能耗分析  
中图分类号 TU83 文献标识码 A

## Analysis of Operation Effect and Energy Consumption of Evaporative Cooling Air Conditioning System in Dry Area Jin Yangfan<sup>1</sup> Huang Xiang<sup>1</sup> Wu Lei<sup>1</sup> Kou Fan<sup>1</sup> Chu Junjie<sup>2</sup>

(1.Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048; 2.China Academy of Building Research, Beijing, 100013)

**【Abstract】** The form of evaporative cooling air-conditioning system is introduced, and simple classification is carried out. A calculation method for the power consumption of the evaporative cooling air-conditioning system from the cold source side, the transmission and distribution side, and the terminal side is proposed. Evaluate the operating effect of the evaporative cooling air-conditioning system by comparing and analyzing the measured data of indoor temperature, humidity and overall power consumption of an air-water evaporative cooling air conditioning system in a hospital in Xinjiang and an all-air evaporative cooling air conditioning system in an airport catering center in a dry area. And energy consumption, the measured indoor average temperature is 23.6℃, which is lower than the design value of the indoor temperature. At the same time, the wet bulb temperature of the outdoor environment has a significant impact on the power consumption of the air conditioning system. When it rises, the power consumption of the air conditioning system also increases. And the optimization suggestions of evaporative cooling air conditioning system are given.

**【Keywords】** Dry area; Air-water evaporative cooling air conditioning system; All-air evaporative cooling air conditioning system; running result; Energy consumption analysis

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0700404); 西安工程大学研究生创新基金资助项目(chx2020040)

作者简介: 金洋帆(1994.03-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 909084955@qq.com

通讯作者: 黄翔(1962.07-), 男, 教授, E-mail: huangx@xpu.edu.cn

收稿日期: 2020-11-03

## 0 前言

目前, 蒸发冷却空调系统在西部炎热干燥地区

已得到广泛应用,然而在社会的能源消耗中,建筑能耗在总能耗所占的比重很大,约为20%~35%。而空调能耗大约占到整个建筑能耗的60%以上,以电力能源消耗为主,而且有逐年增大的趋势<sup>[1]</sup>。为了应对建筑能耗中空调能耗所占比例不断上升的现状,在干燥地区,根据其气候特点首选考虑使用可再生能源——干空气能。

在空调系统中,冷源侧机组能耗最高,末端侧设备以及输配侧循环水泵和风机次之。由此可见,对于蒸发冷却空调系统的节能,最有效且可行的方法是降低冷源侧机组能耗,同时要兼顾冷量输配系统的合理设计,即降低冷量输配系统中的循环水泵

和风机的能耗<sup>[2]</sup>。通过对蒸发冷却空调系统耗电量的对比分析,提出科学合理的运行策略,来降低空调系统运行能耗显得很有意义。

## 1 蒸发冷却空调系统形式

### 1.1 空气-水蒸发冷却空调系统

空气-水蒸发冷却空调系统主要由蒸发冷却冷水机组、蒸发冷却新风机组、输送系统及室内末端组成。该系统新风经蒸发冷却新风机组集中处理后送入空调房间,高温冷水由蒸发冷却冷水机组制取后送入室内显热末端<sup>[3,4]</sup>。空气-水蒸发冷却空调系统的分类如表1所示。

表1 空气-水蒸发冷却空调系统的分类

Table 1 Classification of air-water evaporative cooling air-conditioning systems

系统分类	冷源形式	供回水温差 $\Delta T/^\circ\text{C}$	显热末端	适合应用场所
小温差型冷水机组 空气-水蒸发冷却空调系统	小温差型蒸发 冷却冷水机组	5 $^\circ\text{C}$	干式风机盘管、辐 射板、主动式冷梁、 被动式冷梁、地板 诱导器及吊顶诱 导器	适用于室内湿负荷较小的场所,或 者对于建筑物层高没有过多要求的 场所
大温差型冷水机组 空气-水蒸发冷却空调系统	大温差型蒸发 冷却冷水机组	10 $^\circ\text{C}$		适用于室内湿负荷较大的场所,或 者对于建筑物层高有限制的场所, 可有效节省空间

### 1.2 全空气蒸发冷却空调系统

全空气蒸发冷却空调系统主要由蒸发冷却空调机组和送排风系统组成。该系统的空调区室内负荷全部由经过蒸发冷却空气处理机组处理后的空气来负担的空调系统<sup>[5,6]</sup>。与传统机械制冷空调系统相比,具有以下特点:(1)空气处理机组增加了间接蒸发冷却器和直接蒸发冷却器,其中间接蒸发冷却器形式又可分为外冷式和内冷式,而且间接蒸发冷却器(段)的种类及级数视具体情况而定。

(2)风系统形式多是直流全新风空气系统,而传统的全空气系统多采用混合式系统。特殊建筑或特殊季节全空气蒸发冷却空调系统也会采用混合式或全回风系统,比如热负荷较大的数据机房,夏季极端工况时蒸发冷却空调系统也会采用混合式系统,可大大降低空调系统的能耗。(3)蒸发冷却空调系统中既有一次空气系统,又有二次空气系统,而传统的全空气式空调系统中没有一、二次空气系统之分。全空气蒸发冷却空调系统的分类如表2所示。

表2 全空气蒸发冷却空调系统的分类

Table 2 Classification of all-air evaporative cooling air-conditioning systems

分类依据	系统形式
系统采用的空气处理机 组形式	单级全空气蒸发冷却空调系统、多级外冷式全空气蒸发冷却空调系统、多级内冷式全空气蒸 发冷却空调系统和多级内冷-外冷复合式全空气蒸发冷却空调系统
系统是否采用回风	直流式全新风空调系统、 混合式空调系统和全回风空调系统

## 2 空调系统耗电量计算

### 2.1 冷源侧

#### (1) 蒸发冷却冷水机组耗电量

根据供冷期内不同室外气象条件下空调供冷能耗需求,通过控制间接蒸发冷却冷水机组运行台数来适应不同室外气象条件下建筑冷负荷的需求,以提供所需制冷量。

蒸发冷却冷水机组耗电量 ( $P_{LSJZ}$ ) 计算

$$P_{LSJZ} = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m P_i \cdot j \cdot N \cdot k \quad (1)$$

式中:  $i$  为小时数,  $h$ ;  $j$  为满负荷运行的间接蒸发冷水机组的台数;  $k$  为输入功率修正系数,取 0.9;  $N$  为间接蒸发冷却冷水机组额定功率, kW。

#### (2) 蒸发冷却空调机组耗电量 ( $P_{AHU}$ ) 计算

$$P_{AHU} = K \sum P_i \cdot Q_i / (3600 \cdot 1000 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2) \quad (2)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  小时风机全压;  $Q_i$  为第  $i$  小时风机风量;  $\eta_1$  为风机效率;  $\eta_2$  为传动效率;  $K$  为电机容量安全系数。

### 2.2 输配侧

(1) 供冷期冷水循环水泵累计耗电量 ( $P_{XHSB}$ ) 计算

$$P_{XHSB} = \sum [P_{i,LD} \cdot j_{LQ}] \quad (3)$$

式中:  $P_{i,LD}$  为冷水循环泵非名义工况下的输入

功率, kW;  $j_{LQ}$  为冷水循环泵运行台数。

#### (2) 排风机耗电量 ( $P_{PFJ}$ ) 计算

$$P_{PFJ} = K \sum P_i \cdot Q_i / (3600 \cdot 1000 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2) \quad (4)$$

### 2.3 累计耗电量

夏季空调累计耗电量 ( $P_{总}$ ) 是供冷期空调冷水机组耗电量、冷水循环水泵耗电量、空调机组、排风机耗电量之和。

$$P_{总} = P_{LSJZ} + P_{AHU} + P_{XHSB} + P_{PFJ} \quad (5)$$

## 3 空调系统运行效果及能耗分析

为了评价空调系统运行效果及能耗,对空调系统制冷效果室内温湿度及整体耗电量指标进行监测与分析。

### 3.1 新疆某医院空气—水蒸发冷却空调系统

新疆某医院采用空气—水蒸发冷却空调系统,空调系统冷源采用间接蒸发冷水机组,机组供回水温度 16~21℃,通过板换系统换热,末端为室内干式风机盘管、蒸发冷却空气处理机组及地板辐射供冷系统提供高温冷水<sup>[7]</sup>。

在空调系统运行期间(6月28日~9月24日)进行监测,该工程室、内外环境实测参数如表3所示。

表3 新疆某医院室、内外环境实测参数

Table 3 Measured parameters of room, internal and external environment of a hospital in Xinjiang

环境参数	日平均			最高日平均			最低日平均		
	干球温度 /°C	湿球温度 /°C	相对湿度/%	干球温度 /°C	湿球温度 /°C	相对湿度/%	干球温度 /°C	湿球温度 /°C	相对湿度/%
室外	24.7	15.2	36.0	30.3	15.9	20.6	13.6	10.2	66.1
室内	23.6	15.8	44.4	25.8	17.8	46.0	22.4	14.5	42.4

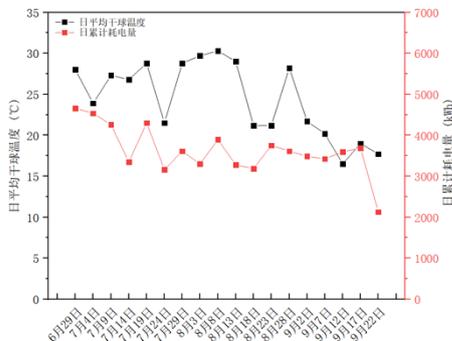


图1 新疆某医院室外日平均干球温度与日累计耗电量关系图  
Fig.1 The relationship between the daily average outdoor dry bulb temperature and the daily cumulative power consumption of a hospital in Xinjiang

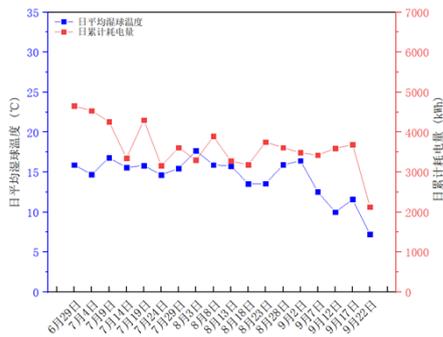


图2 新疆某医院室外日平均湿球温度与日累计耗电量关系图

**Fig.2 The relationship between the average daily outdoor wet bulb temperature and the daily cumulative power consumption of a hospital in Xinjiang**

系统主要耗能设备有间接蒸发冷水机组、供冷循环泵耗电量、蒸发冷却空气处理机组、干式风机盘管等空调系统设备,监测期间,新疆某医院空气一

表4 干燥地区某机场配餐中心室、内外环境实测参数

**Table 4 Measured parameters of the catering center room, internal and external environment of an airport in a dry area**

环境参数	日平均			最高日平均			最低日平均		
	干球温度 /°C	湿球温度 /°C	相对湿度 /%	干球温度 /°C	湿球温度 /°C	相对湿度 /%	干球温度 /°C	湿球温度 /°C	相对湿度 /%
室外	26.9	16.4	33.9	30.8	16.2	20.6	19.5	17.6	83.7
室内	23.6	16.6	49.6	24.7	16.8	45.8	23.0	16.3	51.0

系统主要耗能设备有复合式露点间接蒸发冷却空调机组、排风机等空调系统设备。干燥地区某机场配餐楼总摆盘间和热厨夏季空调供冷面积为362m<sup>2</sup>, 空调系统累计耗电量为1240kWh, 每天每平方米空调系统耗电量约为0.076kWh, 每平方米的建筑耗电量约为3.425kWh。该空调系统运行期间室外日平均干球温度与湿球温度对日累计耗电量的关系如图3和4所示。

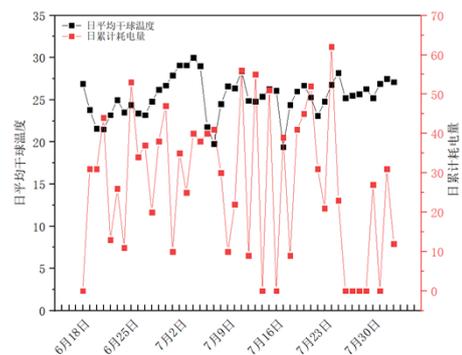
水蒸发冷却空调系统运行84天,共计运行2016h,空调系统累计耗电量为321504.3kWh, 每天每平方米空调系统耗电量约为0.0717kWh, 每平方米的建筑耗电量约为6.311kWh。

空调运行期间室外日平均干球温度与湿球温度对日累计耗电量的关系如图1和2所示。

### 3.2 干燥地区某机场配餐中心全空气蒸发冷却空调系统

干燥地区某机场配餐中心采用以复合式露点间接蒸发冷却空调机组为冷源的全空气蒸发冷却空调系统, 同时每台空调机组对应1台排风机, 将室内湿热空气排出室外, 完成相应的空调循环<sup>[8]</sup>。

在空调系统运行期间(6月19日~8月2日)进行监测, 运行时间为每日09:30~17:30, 每天空调系统运行时长为8h, 累计运行45天。空调系统运行期间, 室内、外环境平均环境参数如表4所示。



**图3 干燥地区某机场配餐中心室外日平均干球温度与日累计耗电量关系图**

**Fig.3 Relationship between outdoor average daily dry bulb temperature and cumulative daily power consumption of an airport catering center in a dry area**

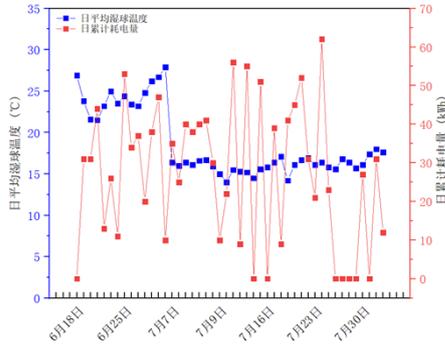


图 4 干燥地区某机场配餐中心室外日平均湿球温度与日累计耗电量关系图

Fig.4 Relationship between outdoor average wet bulb temperature and daily cumulative power consumption of an airport catering center in a dry area

### 3.3 对比分析

将空气—水与全空气蒸发冷却空调系统分别各取两种类型的建筑进行能耗对比分析,其结果如表 5 所示。由于不同项目的蒸发冷却空调系统运行规律各不相同,用以一天为单位,对系统耗电量进行计算,最终得出各工程的每天每平米空调系统耗电量作为系统每天耗电指标<sup>[9]</sup>,通过对比得出以下结果:

表 5 空气—水全与空气蒸发冷却空调系统能耗对比

Table 5 Comparison of energy consumption between air-water and air evaporative cooling air-conditioning systems

系统方案	空气—水蒸发冷却空调系统	全空气蒸发冷却空调系统
项目名称	新疆某医院	干燥地区某机场配餐中心
总建筑面积 (m <sup>2</sup> )	59411	2880
系统运行规律	每天 24h	每天 8h
监测时长 (d)	84	45
总耗电量 (kWh)	321504.3	1240
每天每平米空调系统耗电量 [kWh/(m <sup>2</sup> ·d)]	0.0717	0.076

### 4 优化建议

(1) 室内温湿度环境参数实测值与前期设计值存在一定的偏差,这往往是由于在设计过程中将系统的冷源设备选型过大,富裕值过高,这样会增加设备的能耗,从而加大整个空调系统的耗电量。建议蒸发冷却空调系统在前期设计时就应该正确计算、模拟以及校核,避免不必要的能源浪费。

(2) 蒸发冷却空调系统受室外环境的湿球温

(1) 运行效果:室内环境温湿度指标应满足《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736-2012 要求,供冷工况,温度 24~26°C,湿度 40~60%<sup>[10]</sup>。新疆某医院采用空气—水蒸发冷却空调系统和干燥地区某机场配餐中心全空气蒸发冷却空调系统的实测室内温度均为 23.6°C,都低于设计的室内温度指标,且相差不多,总体不会影响空调系统的运行效果。

(2) 运行能耗:新疆某医院空气—水蒸发冷却空调系统每天每平米空调系统耗电量为 0.0717kWh/(m<sup>2</sup>·d),干燥地区某机场配餐中心全空气蒸发冷却空调系统耗电指标为 0.076kWh/(m<sup>2</sup>·d),两者几乎相等,但是新疆某医院空气—水蒸发冷却空调系统每天的运行时间要比干燥地区某机场配餐中心全空气蒸发冷却空调系统多出 16 个小时,而在同一时间内空气—水蒸发冷却空调系统实际耗电量更少。

(3) 对于空气—水蒸发冷却空调系统,室外日平均湿球温度对空调系统日累计耗电量的影响较为明显;对于全空气蒸发冷却空调系统,室外日平均干、湿球温度与空调系统日累计耗电量没有明显的规律可循。

度影响较大。因此,应该根据室外环境参数和负荷变化来调节系统运行策略,优化空调系统自动控制模式,从而降低整个空调系统的运行能耗,减少运行费用。

(3) 针对不同形式的蒸发冷却空调系统,应结合实际的运行情况科学地计算其耗电量及室内温湿度评价指标,不同形式的空调系统应该用同一评价指标来进行全面分析,进而为评价不同形式的

蒸发冷却空调系统耗电量和室内温湿度提供依据。

(4) 为全面评价蒸发冷却空调系统的运行效果及能耗,建议细化整个空调系统的每个耗能环节,可以从冷源侧、输配侧和末端侧分别进行评价,从而简化整个系统的评价,为优化蒸发冷却空调系统的运行效果和降低能耗都有一定的指导价值。

## 5 结论

(1) 新疆某医院采用空气—水蒸发冷却空调系统和干燥地区某机场配餐中心全空气蒸发冷却空调系统实测的室内平均温度均为 23.6℃,都低于室内温度的设计值,虽然不会影响空调系统的运行效果,但从耗能的角度来说,额外增加了空调系统的能耗。

(2) 通过实际测试数据对比分析,得出在干燥地区大型公用建筑中空气—水蒸发冷却空调系统相对于全空气蒸发冷却空调系统运行能耗较低,而全空气蒸发冷却空调系统因系统相对简单、运行灵活,适用于中小型建筑。因此,针对不同的应用场所,选择合适的蒸发冷却空调系统形式是十分重要的。

(3) 在干燥地区,蒸发冷却空调系统充分利用可再生能源——干空气能,大大降低了冷源侧机组的能耗,对于空气—水蒸发冷却空调系统,室外

环境的湿球温度对空调系统的耗电量影响较为明显,当室外环境的湿球温度升高时,空调系统的耗电量也随之增大。

## 参考文献:

- [1] 2019 中国建筑能耗研究报告[J].建筑,2020,(7):30-39.
- [2] 严锦程,黄翔,周理,等.新疆某办公楼蒸发冷却空调系统应用及效益分析[J].制冷与空调,2020,20(3):1-9,22.
- [3] 黄翔.空调工程[M].北京:机械工业出版社,2006:289-291.
- [4] 黄翔,白延斌,汪超,等.水-空气蒸发冷却空调系统的设计方法[J].流体机械,2014,42(03):76-80,52.
- [5] 黄翔.蒸发冷却空调原理与设备[M].北京:机械工业出版社,2019:30-32.
- [6] 黄翔,白延斌,汪超,等.全空气蒸发冷却空调系统的设计方法[J].流体机械,2014,42(1):68-74.
- [7] 王文博,黄翔,高源基,等.蒸发冷却技术在干燥地区医院中的应用研究[J].洁净与空调技术,2017,(1):39-42.
- [8] 黄凯新.蒸发冷却空调系统在机场的节能应用研究[D].西安:西安工程大学,2019:50-52.
- [9] 王玉娇,刘鸣.新疆办公建筑能耗及其影响因素分析[J].暖通空调,2018,48(6):13-16.
- [10] GB50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.