

管式间接-直接组合式蒸发冷却空调系统的工程应用分析

西安工程大学 王 伟[☆] 黄 翔 吴 生

西安井上人工环境有限公司 于优城 唐永戡 杨晓弟

摘要 简要介绍对比了几种间接蒸发冷却器的性能特点,并指出管式间接-直接组合式蒸发冷却空调系统的主要形式及分区依据。着重对新疆、甘肃、山西等地的管式间接-直接两级或三级蒸发冷却空调系统的应用情况进行介绍,提出实际工程中机组运行出现的问题,并对具体问题提出改进措施。

关键词 间接蒸发冷却器 管式间接-直接组合式蒸发冷却空调 露点温度 能效比 节能性

Application of the tubular indirect-direct combined evaporative cooling air conditioning system

By Wang Wei[★], Huang Xiang, Wu Sheng, Yu Youcheng, Tang Yongjian and Yang Xiaodi

Abstract Briefly describes and contrasts the performance characteristics of several kinds of indirect evaporative coolers, and points out the main forms and the partition basis of the system. Emphatically presents the application of the tubular indirect-direct two-stage or three-stage evaporative cooling air conditioning system in such provincial regions as Xinjiang, Gansu and Shanxi, puts forward the problems encountered in actual operation, and proposes some concrete improvement measures.

Keywords indirect evaporative cooler, tubular indirect-direct combined evaporative cooling air conditioning, dew-point temperature, energy efficient ratio, energy conservation

★ Xi'an Polytechnic University, Xi'an, China

①

0 引言

随着现代工业的迅速发展,以能源为中心的环境、生态等问题日益加剧。世界各国在寻找新能源的同时,也更加注重节能新途径的研发。蒸发冷却空调不但能最大限度地使用室外新风,不使用 CFC,具有高能效比(EER),且冷却设备的成本低廉。美国、澳大利亚、瑞典等国家,已将蒸发冷却空调技术广泛应用于办公楼、住宅、剧院、工厂等场所。我国近年来也在逐步开展蒸发冷却空调技术的研究与应用。随着蒸发冷却空调技术的成熟,其工程应用的范围也在不断地扩大。特别是在我国一些干燥地区如新疆、甘肃、

山西等地得到实际应用,尤其是管式间接-直接组合式蒸发冷却空调技术在实际工程应用中的降温、节能效果较理想^[1-2]。因此,笔者对新疆、甘肃、山西等地管式间接-直接组合式蒸发冷却空调工程的实际应用进行了调查和现场测试分析,以期工程设计和应用提供借鉴。

1 间接蒸发冷却器

①[☆] 王伟,男,1984年3月生,在读硕士研究生
710048 陕西省西安市金花南路19号西安工程大学105信箱
09级10班
(0) 15229218695
E-mail: haizi198433@163.com
收稿日期:2011-05-03

目前,常用的间接蒸发冷却器主要有板翅式、管式、热管式三种。

板翅式间接蒸发冷却器是目前应用最多的间接蒸发冷却器。其优点是换热效率高、制冷效率可达 60%~80%,结构紧凑、体积小,制造工艺比较成熟。但在西北干燥、风沙灰尘较多且水质不是很好的地区,其弊端尽显:由于流道窄小、易堵塞,随着运行时间的增加,其换热效率急剧降低,造成流动阻力增大;布水不均匀且浸润能力差;金属表面容易结垢,且流道内污垢很难清洗,造成维护成本提高;加工精度低,存在漏水现象^[3]。因此,板翅式间接蒸发冷却器的优点无法发挥。

热管式间接蒸发冷却器的优点是:结构简单,容易制造,换热效率高(可达 60%~70%),传热是可逆的,冷热流体可以变换;冷、热气流之间的温差较小时,也存在换热效率。其缺点主要是设备成本高于节能成本,且流动阻力较大。因此,热管式间接蒸发冷却器未能大规模应用。

管式间接蒸发冷却器布水均匀,流道较宽,不会产生堵塞现象,流动阻力小,有利于蒸发冷却的进行。虽然其本身光管的换热效率较低,但近年来众多学者利用新材料、新技术、新工艺在管内插入螺旋线、管外包覆吸水性材料等来提高换热效率,收到了非常理想的效果;同时在我国那些干燥、风沙灰尘较多且水质不是很好的地区的室外条件下,管式间接蒸发冷却器又能发挥其优点。因此,管式间接蒸发冷却器逐渐被人们重视起来^[3-6]。

2 管式间接-直接组合式蒸发冷却空调工程应用形式及划分依据

管式间接-直接组合式蒸发冷却空调主要是由管式间接蒸发冷却器段和直接蒸发冷却器段两种功能段组成。根据室外不同的气象条件以及所供场所的不同要求,可灵活组合这两种功能段,在不同的气象条件下开启不同的功能段,实现分季节、分时段控制和调节。使得该空调系统适用的地区更广,即使是在室内空气要求较高的场所也能满足要求。

目前,实际工程中根据室外气象条件和不同场所要求可划分为以下两种形式:

1) 管式间接-直接两级蒸发冷却空调,第一级为管式间接蒸发冷却段,第二级为直接蒸发冷却

段,如图 1 所示。

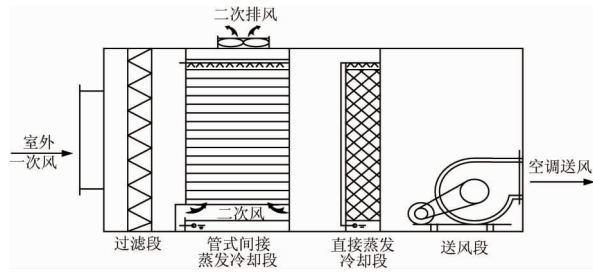


图 1 管式间接蒸发冷却段+直接蒸发冷却段

2) 两级管式间接-直接三级蒸发冷却空调:第一级和第二级均为管式间接蒸发冷却段,第三级为直接蒸发冷却段,如图 2 所示。

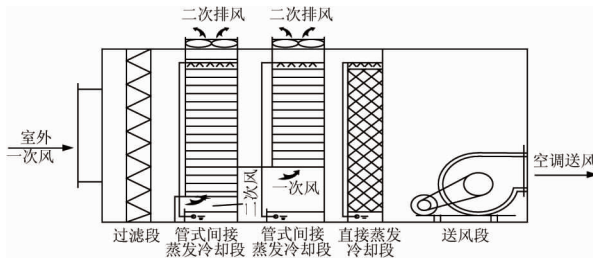


图 2 管式间接蒸发冷却段+管式间接蒸发冷却段+直接蒸发冷却段

蒸发冷却空调的室外气象条件及使用地区的划分依据见表 1。

表 1 蒸发冷却空调划分范围^[3]

	分区指标	区域特点	分区名称
设计一区	$t_s < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	干燥凉爽	通风区
设计二区	$20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t_s < 23\text{ }^{\circ}\text{C}$	干燥较热	高适应区
设计三区	$23\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t_s < 28\text{ }^{\circ}\text{C}$	干燥炎热	适应区
设计四区	$t_s \geq 28\text{ }^{\circ}\text{C}$	潮湿炎热	非适应区

注: t_s 为湿球温度。

3 管式间接-直接蒸发冷却空调工程实例的应用与测试数据分析

3.1 兰州某休闲网吧

1) 系统配置

兰州某休闲网吧面积为 1 700 m²,包间和大厅共设置 280 台电脑,网吧位于大厦的 2 层,考虑到大厦层数和机组噪声,机组无法安装在室外,因此在网吧一侧设置机房。

首先,兰州地区的夏季空调室外计算干球温度 $t_g = 31.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿球温度 $t_s = 20.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3-4]。由表 1 可知,该地区的湿球温度满足设计二区,属于干燥较热地区,蒸发冷却空调系统完全可以替代机械制冷系统;其次,网吧自身由于设备发热量大、

人员密集异味重且人员散热散湿量大,烟雾缭绕,新风排气不足甚至有些根本无新风供应。因此为了满足网吧内的温湿度要求,设计布置2台管式间接-直接两级蒸发冷却空调机组,型号为JSEC-20Ⅱ,一次风机额定风量为20 000 m³/h,风压为700 Pa;二次风机额定风量为10 000 m³/h,风压为120 Pa;二次风量与一次风量比设计为1:2。装机功率为13.5 kW,机外余压为500 Pa,耗水量为130 kg/h,供水压力为0.2 MPa^[7]。图3为该网吧管式间接-直接两级蒸发冷却空调系统实景图。



图3 兰州某网吧管式间接-直接
两级蒸发冷却空调系统实景图

2) 测试数据分析

由于管式间接-直接两级蒸发冷却空调机组的机房布置在网吧内,由于受到外在因素制约,造成前期机组室外进风量、一次风量、二次风量、二次风量与一次风量比都未能达到设计要求,因此制定方

案对机组的室外进风口位置和二次风排风口位置进行改造^[7]。图4,5分别为机组室外进风口和二次风排风口改造前后位置。改造前后的运行对比情况见表2,改造完毕机组正常运行一个月后的测试数据见表3。

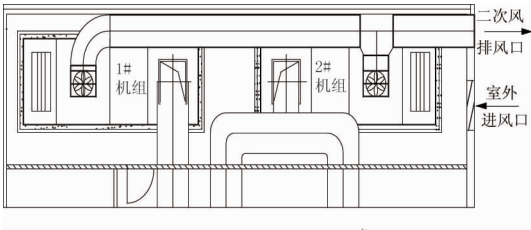


图4 机组室外进风口和二次风排风口改造前位置

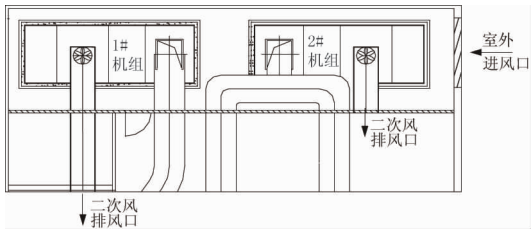


图5 机组室外进风口和二次风排风口改造后位置

表2 兰州某网吧机组改造前后的对比

	室外进风量/ (m ³ /h)	一次风量/ (m ³ /h)	二次风量/ (m ³ /h)	漏风量/ (m ³ /h)	二次风量与 一次风量比
改造前	9 360	14 928	6 390	5 568	1:2.4
改造后	25 740	15 366	8 640	0	1:1.8

注:1) 改造前后都是开启2#机组进行测试;
2) 测试时间:改造前为2010年6月14日,改造后为2010年6月18日。

表3 改造后机组正常运行一个月后的测试数据

	室外进风口			管式间接蒸发冷却器出口			直接蒸发冷却器出口			℃
	干球温度	湿球温度	露点温度	干球温度	湿球温度	露点温度	干球温度	湿球温度	露点温度	
11:50	32.2	22.2	18.8	25.0	21.0	19.6	22.0	21.0	20.7	
12:30	34.0	22.5	18.5	25.0	20.3	18.6	22.0	20.5	20.0	
14:30	35.0	23.3	19.4	25.0	20.0	18.1	22.0	20.5	20.0	
15:30	36.7	23.8	19.6	25.5	20.0	17.9	21.5	20.3	19.9	
16:00	37.5	23.6	19.1	25.5	20.0	17.9	22.0	21.0	20.7	

注:测试时间为2010年7月28日。

由表2可知,改造后室外进风量、一次风量、二次风量、二次风量与一次风量比都得到明显改善,说明室外进风口对整个机房内的环境影响较大,在实际工程中如果机组布置在机房内,必须保证有足够的室外新风进入机房,以满足机组一次风量和二次风量的需要。同时通过对表3的分析可以看出:在兰州气象条件下,室外新风经过管式间接-直接两级蒸发冷却空调机组处理后,机组送风口空气的干球温度最低为21.5℃,

已经低于室外空气的最低湿球温度22.2℃,与室外空气的最高露点温度(19.6℃)也仅差1.9℃。这表明,管式间接-直接两级蒸发冷却空调机组在像兰州这种夏季室外气象条件的地区是非常适用的。

管式间接-直接两级蒸发冷却空调机组开启前后的对比情况见表4,由表4可以看出:机组开启前,室内的平均风速为0.04 m/s,室内平均温度为30.5℃,相对湿度为54.8%,网吧内测点处顾客普

表 4 管式间接-直接两级蒸发冷却空调机组开启前后对比情况

室内送风口 测点	机组开启前				机组开启后			
	室内风速/(m/s)	室内温度/℃	相对湿度/%	顾客舒适感	室内风速/(m/s)	室内温度/℃	相对湿度/%	顾客舒适感
1	0.06	30.5	55.4	较热	0.30	29.1	57.4	不热
2	0.06	30.2	55.3	闷热	0.33	29.5	59.0	不热
3	0.03	31.3	54.3	较热	0.27	29.7	60.7	闷湿
4	0.03	30.7	54.0	较热	0.32	29.3	59.7	不热
5	0.05	30.1	55.4	一般热	0.35	29.3	59.6	不热

注:1) 机组开启前的测试时刻为 13:30;机组开启后的测试时刻为 15:00。
2) 顾客舒适感是对网吧内送风口位置附近的上网者进行随机调查得到的。

遍感觉到室内较热;但是机组开启后,室内平均风速为 0.32 m/s,室内平均温度为 29.3℃,相对湿度为 59.3%,网吧内测点处顾客普遍感觉到室内不热或闷湿。这表明人体的热舒适性随着风速和相对湿度的增大而提高,不是传统理解的只有降低室内温度才能满足人体的热舒适性。从另一方面说明蒸发冷却空调将相对湿度、温度、气流速度调节到最佳配比,同样可以满足室内人员的热舒适状况,而且也可以发挥蒸发冷却空调机组的节能作用。

3.2 山西省某煤矿变频机房

1) 系统配置

该煤矿的变频机房内原来使用传统的精密空调(每台功率 18 kW,共 4 台)处理机房内的温湿度,由于山西地区的风沙大及矿区空气中的煤灰、沙尘较多,使得机械制冷空调机组的室外机过滤网堵塞严重,造成机组的效率降低,无法完全处理变频设备机组产生的显热,从而严重影响了变频机房内的温湿度调节,同时使得空调机组的耗电量及维护费用都相应的增加。变频机房的环境特点如下:空调方式偏重于工艺性空调,对空调温湿度有特殊要求;变频器设备自身发热量大、散热量大、散湿量小;送风量大、送风焓差小;为保证生产,要求空调全年可靠稳定运行。该煤矿所在地区的夏季空调室外计算干球温度 $t_g = 31.9℃$,湿球温度 $t_s = 22.9℃$ ^[3-4]。通过对照表 1 可知:该地区湿球温度满足设计二区,为干燥较热地区,属于蒸发冷却空调技术的高度适应区。同时,变频机房偏重工艺性,只是消除设备散发的显热,保证室内稳定的温湿度。

因此,为了满足变频机房内的温湿度要求,设计布置 1 台管式间接-直接两级蒸发冷却空调机组(过滤段采用卷帘式空气过滤器)代替原有精密空

调机组,型号为 JSECZKJ 60-WT,一次风机额定风量为 60 000 m³/h,风压为 945 Pa;二次风机额定风量为 18 000 m³/h,风压为 120 Pa,共 2 台;二次风量与一次风量比设计为 1:2。装机功率为 13.5 kW,机外余压为 450 Pa,耗水量为 230 kg/h,供水压力为 0.2 MPa。图 6 为管式间接+直接两级蒸发冷却空调机组(过滤段采用卷帘式空气过滤器)的实景图。



图 6 管式间接+直接两级蒸发冷却空调机组(过滤段采用卷帘式空气过滤器)实景图

2) 测试数据分析

2010 年 3 月对机组进行试运行并针对运行中出现的问题进行改进,改进方案如下:在喷淋喷嘴上方设置填料来挡水或者改变喷淋喷嘴的位置解决二次风机出口的水雾问题;在接水盘表面布置柔性吸水性材料来防止喷淋水在接水盘溅水问题;调整喷嘴的分布使其均匀合理,来改善部分椭圆换热管表面出现无淋水(干点)问题^[8]。以上这些问题是实际工程中发现的与理论设计不相符的地方,为设计和管理人员提供了借鉴。

2010 年 8 月 26—27 日再次进行了测试,测试数据如表 5,6 所示。

对比表 5,6 可以看出:在两天室外气温基本相同的情况下,管式间接蒸发冷却段和直接蒸发冷却段的干球温度差异较大,其原因是由于供水管出现问题,8 月 26 日测试时管式间接蒸发冷却段和直接蒸发冷却段的循环水箱的循环水不足,各段的

表 5 山西省某煤矿变频机房 8 月 26 日的测试数据

	室外进风口			管式段出口		直接段出口		管式段效率/%	直接段效率/%
	干球温度/℃	湿球温度/℃	露点温度/℃	干球温度/℃	湿球温度/℃	干球温度/℃	湿球温度/℃		
14:40	26.4	16.2	10.7	22.5	14.2	19.5	14.5	38.2	36.1
14:50	26.8	16.6	11.2	21.6	13.8	18.6	14.3	51.0	38.5
15:00	26.4	16.5	11.1	21.8	14.2	18.5	14.0	46.5	43.4
15:10	26.4	16.3	10.8	22.1	14.2	17.8	13.8	42.6	55.1
15:20	26.4	16.4	11.1	22.4	14.2	17.0	14.0	40.0	65.9
15:30	27.0	16.8	11.5	23.8	14.8	17.0	14.5	31.4	75.6
15:40	27.3	17.1	11.8	24.0	15.0	17.5	14.3	32.4	72.2

表 6 山西省某煤矿变频机房 8 月 27 日的测试数据

	室外进风口			管式段出口		直接段出口		管式段效率/%	直接段效率/%
	干球温度/℃	湿球温度/℃	露点温度/℃	干球温度/℃	湿球温度/℃	干球温度/℃	湿球温度/℃		
14:10	26.3	16.3	10.9	20.5	14.0	14.5	14.0	58.0	92.3
14:15	26.0	16.4	11.3	20.0	14.0	14.5	14.2	62.5	91.7
14:20	26.8	17.5	13.0	20.0	14.0	14.5	14.5	73.1	91.7
14:25	26.3	16.2	12.6	19.5	13.5	14.0	13.8	67.3	91.7
14:30	27.0	17.1	11.9	20.0	13.5	14.1	14.0	70.7	90.8
14:35	26.6	16.7	11.4	20.5	14.0	14.0	14.0	61.6	100
14:40	26.9	16.8	11.4	20.5	14.0	14.0	14.0	63.4	100

温降及效率都较差,导致该天测试的数据失真。但是对研究实际工程是非常有益的,通过对比 8 月 27 日的各段温降及效率的差值,可以研究在循环水不足时,机组的各段温降及效率的降低程度。

表 6 表明,在各段循环水充足的情况下,室外空气干球温度在 27℃左右,湿球温度在 17℃左右时,管式间接-直接蒸发冷却空调机组的送风温度(干球温度 14℃左右,湿球温度 14℃左右)可以比室外空气的湿球温度低近 3℃,逼近露点温度;且管式间接段的效率达到 60%左右,直接段的效率达 90%以上甚至接近 100%。

管式间接-直接两级蒸发冷却空调机组的整体装机功耗只需 13.5 kW 就能满足设计条件,远远小于精密空调机组的功耗 72 kW,只占到精密空调能耗的 18.8%。使得耗电量降低,维护、运行费用降低,真正达到节能、降低成本的效果。

3.3 新疆巴楚某办公楼

1) 系统配置

新疆巴楚某办公楼的空调面积 400 m²。室内设计干球温度为 25℃,相对湿度为 55%,空调区内的人员为 30~40 人。计算得空调冷负荷为 38 kW,空调总湿负荷为 2.44 kg/h,需要送风量为 18 387 m³/h。巴楚地区夏季空调室外计算干球温度 $t_g = 35.5℃$,湿球温度 $t_s = 21.4℃$ [3-4]。

由表 1 可知:该地区湿球温度满足设计二区,属于干燥较热地区,为蒸发冷却空调技术的高度适应区。

为了满足办公楼内的温湿度要求,设计布置 1 台两级管式间接-直接三级蒸发冷却空调机组,型号为 JSEC-20Ⅲ,一次风机额定风量为 20 000 m³/h,风压为 600 Pa;二次风机额定风量为 10 000 m³/h,风压为 120 Pa;设计二次风量与一次风量比为 1:2。装机功率为 11.7 kW,机外余压为 450 Pa,耗水量为 230 kg/h,供水压力为 0.2 MPa。图 7 为新疆巴楚某办公楼两级管式间接-直接三级蒸发冷却空调机组实景图。



图 7 新疆巴楚某办公楼两级管式间接-直接三级蒸发冷却空调机组实景图

2) 测试数据分析

该机组于 2009 年夏季安装运行,至 2010 年 8 月测试期间无任何故障。此次测试是为了验证该机组在运行一段时间后,其各段的温湿度及送风口

参数是否满足原设计参数要求。

表 7 为新疆巴楚某办公楼的测试数据,在室外进风干球温度最高时刻(17:30),送风段的干球温度 13.7℃远远低于室外进风的湿球温度 19.6℃,

接近室外进风的露点温度 13.3℃;同时观测直接段的循环水温可以降低到 13.7℃,这为研究两级管式间接-直接三级蒸发冷却空调制取低温冷水提供了参考。

表 7 新疆巴楚某办公楼测试数据℃

	室外空气			直接蒸发冷却段送风出口				室内空气	
	干球温度	湿球温度	露点温度	干球温度	湿球温度	露点温度	循环水温	干球温度	湿球温度
14:40	32.3	19.5	13.9	16.0	15.0	14.5	16.0	26.5	20.3
15:10	33.0	19.5	13.5	16.0	15.0	14.5	16.0	26.4	20.5
15:40	33.5	19.2	12.6	16.0	14.9	14.3	16.0	26.2	20.3
16:30	33.5	19.4	13.0	15.3	14.0	13.3	15.3	26.0	20.5
16:50	33.4	19.0	12.3	14.5	13.0	12.2	14.5	26.2	20.0
17:00	33.5	19.0	12.2	14.0	12.6	11.8	14.0	26.4	20.5
17:30	33.7	19.6	13.3	13.7	12.5	11.8	13.7	26.2	20.3
17:50	33.4	20.0	14.2	14.0	12.7	12.0	14.0	26.3	20.3
18:10	33.5	19.0	12.2	14.2	13.0	12.3	14.2	26.2	20.1

该办公楼若使用传统制冷空调系统,需要选用的装机功率为 77 kW,其能效比 $EER=38\text{ kW}\div77\text{ kW}=0.493$ 。使用两级管式间接-直接三级蒸发冷却空调系统,其装机功率为 11.7 kW,其能效比 $EER=38\text{ kW}\div11.7\text{ kW}=3.247$,远大于传统制冷空调系统的 EER 。同时两个系统的能量消耗比为 0.15,两级管式间接-直接三级蒸发冷却空调的能耗仅为传统制冷系统的 15%。

4 结语

通过对新疆、甘肃、山西等地区管式间接-直接蒸发冷却空调技术实际工程应用状况的调查研究和现场测试分析,感受到了蒸发冷却技术在这些地区的节能效果,增强了在我国干燥地区推广应用这种环保、节能和经济型空调新技术的信心^[9-12]。这些工程实例的成功应用,推动了管式间接蒸发冷却器在蒸发冷却空调的应用。但是还要看到管式间接-直接蒸发冷却空调系统在工程应用过程中出现的各种问题:水侧的问题,如二次风机出口的水雾问题、喷淋水在接水盘的溅水问题、部分椭圆换热管表面出现无淋水(干点)问题、椭圆换热管模块一次出风口出现漏水的问题;风侧的问题,如二次风量/一次风量不足的问题、室内是否设置合理的排风系统、机组的密封性不好造成的漏风现象等。对于这些问题笔者都进行了分析总结和解决,希望通过这些工程实例的分析为有关设计、施工及管理人员改进和完善管式间接-直接蒸发冷却空调系统提供相应的参考。

参考文献:

[1] 黄翔,屈元,狄育慧.多级蒸发冷却空调系统在西北地区的应用[J].暖通空调,2004,34(6):67-71

[2] 黄翔,周斌,于向阳,等.新疆地区三级蒸发冷却空调系统工程应用分析[J].暖通空调,2005,35(7):104-107

[3] 黄翔.蒸发冷却空调理论与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2010

[4] 陆耀庆.实用供热空调设计手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2008

[5] 陆亚俊.间接-直接蒸发冷却在空调中的应用[J].暖通空调,1982,12(6):37-40

[6] 黄翔.空调工程[M].北京:机械工业出版社,2006

[7] 王伟,黄翔,吴生,等.两级蒸发冷却空调运行优化实例分析[J].制冷空调与电力机械,2010,31(6):49-54

[8] 王伟,黄翔,吴生,等.两级蒸发冷却空调机组运行中的问题及改进措施[J].建筑热能通风空调,2011,30(1):70-72

[9] 黄翔,刘鸣,于向阳.我国新疆地区蒸发冷却技术应用现状分析[J].制冷与空调,2001,1(6):33-38

[10] 秦继恒,薛世伟,兰文治.两级蒸发冷却器性能测试[J].制冷与空调,2008,8(6):51-54

[11] Renato M L. Introduction of a simple diagram-based method for analyzing evaporative cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27((11/12):2011-2025

[12] 尧德华,黄翔,吴志湘.四级蒸发冷却组合式空调机组能耗分析[J].建筑节能,2009,37(5):42-46