

文章编号: 1671-6612 (2025) 01-133-07

重力循环柜性能模拟研究与优化改造区

陈海栋¹ 梁 珍¹ 于英娜²

(1. 东华大学环境科学与工程学院 上海 201620;

2. 昆山开思拓空调技术有限公司 苏州 215300)

【摘要】 提出了一种在重力柜两侧增加风机的复合型重力循环柜, 其运行模式是在启动阶段和超负荷运行时启动风机, 其余时间保持自然对流。基于具体试验数据, 建立了重力循环柜的模型, 并模拟了其自然对流模式以及在开口处引入一定风量模式的运行性能, 发现重力循环柜的换热能力可通过增加机械设备, 将自然对流变为强迫对流达到提升换热能力的效果; 同时证明强迫对流的改造设计在更高水温下也可以达到自然对流重力柜的制冷效果; 也可在较低水温下达到自然对流重力柜的制热效果, 增大了重力循环柜的节能潜力, 能充分利用自然冷热源。进一步地, 通过复合型重力循环柜模拟分析, 给出了启动阶段的控制策略。与开口处加风机的重力柜优化进行对比发现, 虽然两种设计方案在换热能力提升上基本相同, 但复合型重力循环柜仅需在启动阶段和室内负荷超过设计负荷时启动风机, 其余时间保持纯自然对流的运行模式, 不仅避免了破坏自然对流模式时的气流组织, 减少了因凝结水导致的安全隐患, 还保留了重力柜原有的优势, 如无机械运转部件的长寿命、自然对流的舒适性。

【关键词】 重力循环柜; 换热设备; 毛细管; CFD; 复合型重力循环柜

中图分类号 TU831.6 文献标志码 A

Simulation Study and Optimisation of Refrigeration Performance of Gravity Cycle Cabinets

Chen Haidong¹ Liang Zhen¹ Yu Yingna²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, 201620;

2. Kunshan KST Co., Ltd, Suzhou, 215300)

【Abstract】 A composite gravity circulation cabinet with fan added on both sides of the gravity cabinet is proposed. The operation mode is to start the fan in the start-up stage and overload operation, and maintain natural convection in the rest time. Based on the specific test data, the paper established a gravity circulation cabinet model, simulated its natural convection mode and the operation performance of introducing a certain air volume mode at the opening, and found that the heat transfer capacity of the gravity circulation cabinet could be improved by adding mechanical equipment to change the natural convection into forced convection. At the same time, it is proved that the modified design of forced convection can also achieve the cooling effect of natural convection gravity tank at higher water temperature. It can also achieve the heating effect of natural convection gravity tank at low water temperature, increase the energy saving potential of gravity circulation tank, and make full use of natural cold and heat sources. Further, the paper gives the control strategy of start-up stage through the simulation analysis of compound gravity circulation tank. Compared with the optimization of the gravity cabinet with fan at the opening, it is found that although the two design schemes are basically the same in terms of heat transfer capacity, the composite gravity circulation cabinet only needs to

作者简介: 陈海栋 (2000.05-), 男, 硕士研究生, E-mail: 1412718700@qq.com

通讯作者: 梁 珍 (1971.12-), 女, 副教授, E-mail: liangzhen@dhu.edu.cn

收稿日期: 2024-06-17

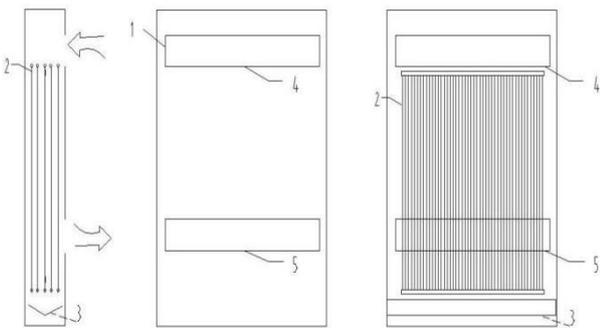
start the fan at the start-up stage and when the indoor load exceeds the design load, and maintains the pure natural convection operation mode for the rest of the time, which not only avoids the airflow organization when the natural convection mode is destroyed. The safety hazards caused by condensate water are reduced, and the original advantages of the gravity tank are retained, such as long life without mechanical moving parts and the comfort of natural convection..

【Keywords】 Gravity circulation cabinet; Refrigeration; Capillary; CFD; Composite gravity circulation cabinet

0 引言

1987 年柏林国际建筑展主持的一项节能建筑设计展上,德国人多纳蒂—赫博斯特发明的一种全新的空气调节系统—毛细管平面辐射空调系统,出现在世人的眼前,其新颖的仿生学概念让世人眼前一亮,经过十几年的发展,于 21 世纪初传入国内^[1],并在各大城市高级酒店、办公大楼等场所广泛使用^[2]。

毛细管重力循环柜是利用毛细管实现了制热、制冷、除湿的统一的设备。图 1 是其结构原理图。室内空气因温差作用,从开口(制冷工况为上部开口/制热工况为下部开口)进入重力柜,与毛细管充分接触换热后从另一开口流出,期间若产生凝结水,凝结水沿毛细管和柜壁汇集在凝结水盘中排出。



1—辐射外壳; 2—毛细管网; 3—凝结水盘; 4—正面上部开口; 5—正面下部开口

图 1 毛细管重力循环柜的结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of a capillary gravity circulation cabinet

重力循环柜的运行效果和实际的工作情况,受到了很多研究人员的关注。

Li^[3]等测试了重力循环柜的垂直和水平温度分布。葛玉箫^[4]通过搭建重力循环柜试验平台,测试重力循环柜在梅雨季节下的供冷除湿情况。李诗琪^[5]针对重力循环柜独立运行房间进行了冬夏季工况的试验测试。吴林霖^[6]为确定毛细管重力循环柜(简称重力柜)制冷出力的影响因素及除湿性能,

搭建了重力柜实验平台。沈侃^[7]对供水温度、供水流量、风口尺寸和有无前置挡板对毛细管空调柜制冷性能的影响的试验研究。

重力循环柜作为一种新型的换热末端,研究人员提出了许多让重力柜与其它设备联合使用的系统。谷德军^[8]等通过对重力循环柜联合金属吊顶辐射板运行进行试验研究,发现重力循环系统能够起到补助制冷作用,并对出风口周围地板结构有一定的蓄冷作用,具有部分辐射供冷的效果。刘异^[9]提出了转轮除湿与重力循环柜复合空调系统,并对该系统进行了是试验和模拟研究。李翠敏^[10]提出在重力循环柜与相变板结合的复合空调系统并建立数学模型对其模拟,确定蓄热模式下相变板厚度的上限值为 0.07m。陈慧^[11]等在顶棚辐射末端和新风除湿机组共同运行下,监测得到影响毛细管重力循环空调柜换热和除湿性能的因素及其运行的最佳工况。

王玮^[12]介绍了重力柜在住宅的应用实例,并通过模拟,对当时的重力柜研究提出了宝贵建议。史晶^[13]等提出一种毛细管辐射对流空调末端设备类似于重力柜的运行方式,其设备内流动介质为乙二醇水溶液,对这种末端进行了 5 中供热工况的实验测试,为重力柜内部流动介质的研究提供了新的思路。

传统毛细管重力柜系统,单纯依靠自然对流和辐射进行制冷或者供热功能,在使用过程中,存在对室内温度的响应速度较慢的缺点。虽然有人提出在重力柜入口或出口处放置风机,加快气流的速度,增强换热的效果^[14,15],但是这种方式存在问题,一方面在出口或入口放置风机,风机占用重力柜内部空间较大若不启用风机,会影响内部气流,降低重力柜自然对流换热效果;另一方面,重力循环柜发展至今,其良好的除湿能力也是其一大优势,除湿过程中产生的凝结水会沿着毛细管下落,会影响风机的使用寿命甚至存在潜在的危险。

本文创新性地提出了在重力柜两侧增设风机

的复合型毛细管重力柜空调装置,旨在保存重力循环柜原有的优越性能的前提下,解决现有技术中重力柜对室内温度的控制速度反应慢、时间长等技术问题,提高重力柜的换热能力,并探究重力循环柜在强迫对流模式下的节能潜力。

1 重力柜模型建立

1.1 基本参数

本文以德国茨维考西撒克逊应用科学大学对传统重力柜的试验数据^[9]为基础建立数学模型,原试验装置如图 2 所示。图 2 左侧外部结构,试验重力循环柜装置外壳由材料 OSB 板构成,其的实测尺寸为 H (高) $\times W$ (宽) $\times T$ (厚) = 2.74m \times 1.18m \times 0.206m,进、出口尺寸为 1.04m (宽度) \times 0.15m (高度),开口设置在柜表面上部和下部,且设置格栅,中心距地面的距离分别为 0.35m 和 2.63m;图 2 右侧为内部结构,材料为直径 3.4mm 的聚丙烯 PP 管,柜内共 5 排毛细管,密集悬挂在重力柜中,单管长为 1980mm (毛细管网面积 9.50m²),同排毛细管中心间距为 10mm (约 90 根),同列毛细管中心间距为 25mm。

本文提出复合型重力循环柜模型,在现有实验模型的两侧分别布置 8 台风机,中心间距 200mm。



1—外壳; 2—上部开口; 3—下部开口; 4—格栅;
5—不锈钢支架; 6—毛细管

图 2 试验装置内外结构

Fig.2 The internal and external structure of the test device

1.2 模型设置

传统重力柜模型在制冷工况时上部开口设置为质量入口(根据试验值设定),下部为质量出口,制热则相反。在开口增加风机时,则增加质量入口

的流量。

复合型重力柜有两种运行工况,一种是启动风机,主要用于重力柜的启动阶段,此时上部开口关闭;另一种是不启动风机,用于房间达到了设定的温度后的平稳运行阶段。

当重力柜处于不启动风机的制冷工况时,上部开口设置为质量入口,下部为质量出口;当启用风机时,开启风机处设置为质量入口,上部开口设置为壁面(即为关闭状态),下部开口设置为质量出口,夏季制热工况则与之相反。

如图 2 所示,由于毛细管管径较小,长度较长,且数目众多,使得模型计算量大,故而对重力循环柜模型进行简化,在毛细管换热面积等效的情况下,将每排毛细管的数量简化为 20 根。选取该简化方法,一方面可以节省网格数量和计算时间,另一方面可方便对两侧加风机工况的模拟,并且可以直观反映柜内的换热以及流场的变化情况。

本文所选取的风机为某品牌的 DC 风机,尺寸参数为 120 \times 120 \times 25。该尺寸风机不同型号的最大风机流量如表 1 所示。

表 1 风机最大流量

Table.1 Maximum flow rate of the fan

风机型号	A24-12	A24-19	A24-22	A23-28
最大风机流量/(kg/s)	0.019	0.025	0.037	0.045

计算时数学模型采用 RNG $k-\epsilon$ 方程模型,增强壁面函数 EWF 热效应。设置水和空气两个流体域,设定耦合边界厚度 0.55mm。

2 重力循环柜换热量的计算方法

2.1 对流换热量

重力循环柜的总供换热由两部分组成,一是外辐射板辐射产生的换热,二是送风口对流送出的换热量。根据冷热量平衡原理,测量重力循环柜进、出口的风温和流量,从而计算重力循环柜的总供冷量,可用式(1)来确定。

$$Q_1 = C_p \cdot \rho_{air} \cdot A \cdot V_{air} \cdot (T_{inlet} - T_{outlet}) \quad (1)$$

式中: Q_1 为重力循环柜的对流制冷量, W; C_p 为空气的定压比热容, J/(kg \cdot $^{\circ}$ C); A 为开口面积, m²; V_{air} 为出口空气流速; T_{inlet} 为入口空气温度; T_{outlet} 为出口空气温度。

2.2 总换热量

重力循环柜运行性能的实际测量,前人已经做了很多工作如葛玉箫等^[4,17]通过模拟和实验对比,得出常规工况下的重力循环柜换热量量处在1000~1600W左右,辐射板换热量量约占总换热量的量的9%~10%左右,剩下的90%换热量量主要是由出口对流换热承担。本文根据以上结论,计算的总辐射换热量由式(2)简化计算,并在后文与实测结果进行对比,验证模型以及计算公式的可靠性。

$$Q_2 = \frac{Q_1}{\gamma} \quad (2)$$

式中: Q_2 为重力循环柜的总换热量, W; γ 为修正系数其值约为0.9。

3 试验与模拟结果对比分析

3.1 模拟验证

为了验证本文的模拟的可靠性,采用德国茨维考西撒克逊应用科学大学对传统重力柜的试验结

果进行验证^[16]。德国茨维考西撒克逊应用科学大学对传统重力柜的试验以自然对流和强制对流两种模式进行试验研究,其中强制对流模式风量选取为500m³/h、750m³/h、1000m³/h。夏季工况下进水温度控制在9℃、14℃、20℃、25℃左右;冬季工况进水温度控制在27℃、36℃、45℃左右。试验与本文模拟结果如图3、表2所示。

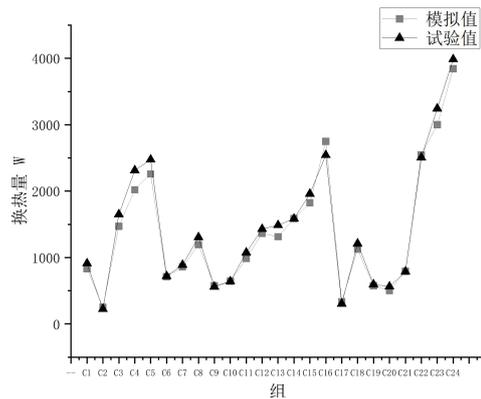


图3 试验与模拟结果

Fig.3 Experimental and simulation results

表2 试验与模拟结果汇总

Table 2 Experimental and simulation results

组	风量	水温	模拟值	实测值	误差	组	风量	水温	模拟值	实测值	误差
C1	0m ³ /h	8.86	833.33	912.00	0.09	C13	1000m ³ /h	20.61	1313.39	1488.00	0.12
C2	0m ³ /h	26.88	250.16	223.00	-0.12	C14	500m ³ /h	36.01	1584.89	1586.00	0.00
C3	500m ³ /h	14.88	1471.31	1651.00	0.11	C15	750m ³ /h	35.09	1823.69	1960.00	0.07
C4	750m ³ /h	14.82	2021.89	2314.00	0.13	C16	1000m ³ /h	36.00	2749.68	2544.00	-0.08
C5	1000m ³ /h	14.58	2257.95	2475.00	0.09	C17	0m ³ /h	18.34	335.44	303.00	-0.11
C6	500m ³ /h	27.32	710.76	719.00	0.01	C18	0m ³ /h	34.55	1125.86	1210.00	0.07
C7	750m ³ /h	27.30	857.65	890.00	0.04	C19	500m ³ /h	26.41	573.79	595.00	0.04
C8	1000m ³ /h	28.25	1193.52	1305.00	0.09	C20	750m ³ /h	26.19	502.36	563.00	0.11
C9	0m ³ /h	13.57	573.79	559.00	-0.03	C21	1000m ³ /h	26.43	791.63	788.00	0.00
C10	0m ³ /h	34.55	641.17	640.00	0.00	C22	500m ³ /h	45.07	2548.12	2506.00	-0.02
C11	500m ³ /h	20.65	985.54	1075.00	0.08	C23	750m ³ /h	45.10	3000.17	3245.00	0.08
C12	750m ³ /h	20.59	1364.11	1430.00	0.05	C24	1000m ³ /h	45.08	3843.12	3986.00	0.04

试验与模拟结果对比如表2所示。通过模拟值与实测值对比,可以看出,模拟值与实测值之间的温度差异较小,在合理允许范围内认为模型是可靠的。

3.2 重力柜上下口引入风机的弊病分析

重力柜夏季是下送上回,冬季为上送下回,如果增加风机变为强迫对流,则需要上下开口分别

安装风机。夏季工况,上面的风机开启;冬季工况,下面的风机开启。夏季重力柜具有良好的除湿能力,会造成凝结水滴入风机,对风机产生破坏减少重力柜的使用寿命。

图4是德国茨维考西撒克逊应用科学大学试验^[16]中前壁体和后壁体产生的凝水。



图 4 试验后柜壁上的凝水

Fig.4 Condensate on the wall of the cabinet after the test

3.3 强迫对流对换热量的影响

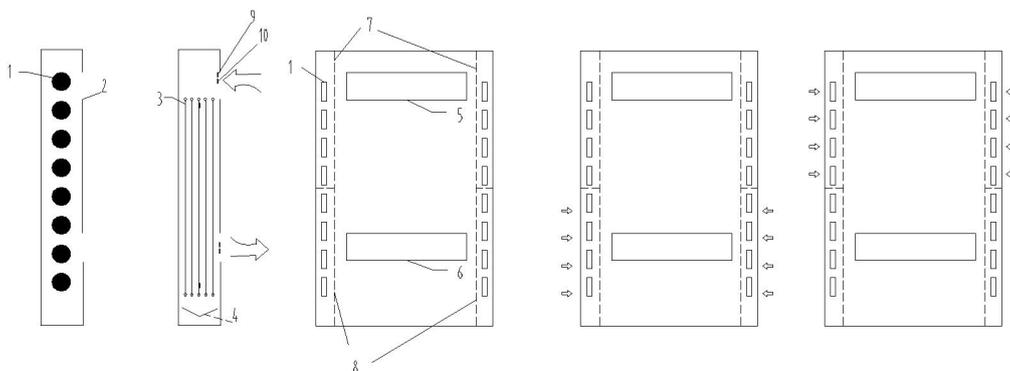
如图 3 所示, 通过强迫对流的方式, 改变进风风量和进水水温。可以看出, 改变进水水温对重力循环柜的换热效果影响较大, 进水水温与室内温度差越大, 换热效果越好; 在进水水温一定时, 通过增加风量可以有效提高换热量, 并且对比自然对流时重力柜换热效果明显增强; 在保持机械风量不变, 仅改变水温, 对换热效果的影响显著, 以加风机制冷, 风量为 $500\text{m}^3/\text{h}$ 的工况为例, 当水温逐渐上升时, 工质与房间的温差减小, 换热效果呈逐步减弱的趋势。同时, 对比同一水温不同机械风量的几组数据, 例如 C3、C4、C5、C9, 可看出同一水温下, 自然对流时制冷量约为 500W , 而改为强迫对流风量为 $500\text{m}^3/\text{h}$ 时其制冷量约为 1300W , 提升约 132.6% , 并随着风机风量的提升, 制冷量逐渐

上升, 当风量为 $1000\text{m}^3/\text{h}$ 时, 制冷量可到 2257W 。显示出机械对流模式相对于自然对流模式拥有更好的换热效果, 同时可以配合改变机械风量, 使得重力柜适配更高的室内负荷。

4 重力循环柜优化改造

4.1 复合型重力循环柜的提出

本文提出一种复合型毛细管重力柜空调装置 (见图 5), 在重力柜两侧布置风机, 通过改变风机流量或者挡板的开度控制强迫对流在换热的占比, 来调整供冷量/热量, 也可以改变工质入口的温度, 以满足不同的供冷/热需求。下面以这种复合型毛细管重力循环柜为研究对象, 研究在不同模式下的换热量的变化情况。



1—低噪音风机; 2—辐射外壳; 3—毛细管网; 4—凝结水盘; 5—正面上部开口; 6—正面上部开口; 7—上部移动挡板; 8—下部移动挡板; 9—温度传感器; 10—湿度传感器

图 5 复合型重力循环柜

Fig.5 Composite gravity circulation cabinet

通过前文对重力柜自然对流工况与机械对流工况的试验与模拟结果可知, 增加机械对流装置可提升换热效果。但传统的在进出口增加风机的改造方式会破坏重力柜自然对流的内部结构, 且有一定

的安全隐患, 则本文采用两侧添加风机的设计, 以避免上述改造方式的缺陷。具体风量见表 1, 风机编号见图 6。

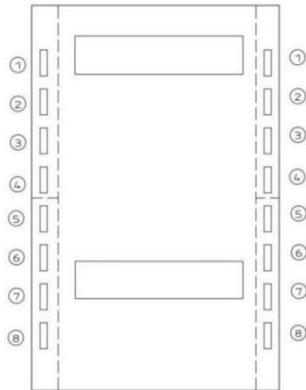


图 6 风机编号图

Fig.6 Fan number diagram

表 3 模拟案例组以及对应的风机数量汇总

Table 3 Summarizes the simulation case groups and the number of corresponding wind turbines

案例组	单风机风量	风机编号 (组)		案例组	单风机风量	风机编号	
		制冷	制热			制冷	制热
F0	0						
F1	0.037	1	5	F12	0.025	3 4	8 9
F2	0.037	2	6	F13	0.037	3 4	8 9
F3	0.037	3	7	F14	0.019	1 2 3	5 6 7
F4	0.037	4	8	F15	0.025	1 2 3	5 6 7
F5	0.019	1 2	5 6	F16	0.037	1 2 3	5 6 7
F6	0.025	1 2	5 6	F17	0.019	2 3 4	6 7 8
F7	0.037	1 2	5 6	F18	0.025	2 3 4	6 7 8
F8	0.019	2 3	6 7	F19	0.037	2 3 4	6 7 8
F9	0.025	2 3	6 7	F20	0.019	1 2 3 4	5 6 7 8
F10	0.037	2 3	6 7	F21	0.025	1 2 3 4	5 6 7 8
F11	0.019	3 4	8 9	F22	0.037	1 2 3 4	5 6 7 8

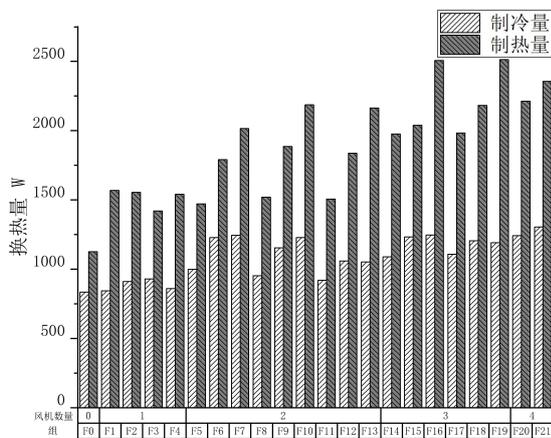


图 7 复合型重力循环柜换热效果模拟

Fig.7 Simulation of heat exchange effect of composite gravity circulation cabinet

4.2 复合型重力柜性能模拟

为探究复合型重力循环柜的制冷和制热的运行效果，制冷模式设定进口水温为 8.86℃；制热模式设定进口水温为 43.93℃。复合型重力循环柜正常运行时间内保持纯自然对流的运行模式（如案例组 F0），仅在启动阶段和房间内负荷超过设计负荷时启动风机增大换热。

通过改变风机流量和风机位置，探究启动期间，达到迅速冷却房间的启动程序，以及不同室内负荷对应的风机启动方案，具体模拟案例组以及对应的风机数量见表 3，结果见图 7。

结果显示，在重力循环柜的运行过程中，在重力循环柜两侧布置风机也可以增加重力柜换热效果。在选定风机流量范围内，制冷量从自然对流工况的 844W，提升至 1300W，提升约 54.0%；制热量从自然对流工况的约 1200W 提升至 2500W，提升 92.6%。

其中改变两侧风机的位置、风机流量、开启风机的个数均会影响重力循环柜的换热性能，开启多组风机时，重力柜内部空间限制和两侧风速是复合型重力循环柜开启风机时的两个主要影响因素，在程序设计之初应该综合考虑。在风机位置不变时，风速过小或过大均会使制冷量减弱；当风机的风量一定时，改变开启风机的位置和数量，使得重力柜内部空间限制过小或过大也会影响重力柜的换热效果。例如 7F、F15 两组模拟结果对比，在风机风

量不变, 增加一组风机后, 总风量升高, 但由于内部空间限制, 使得重力柜内部空气的换热效果并没有提高, 甚至有所减弱 (见图 8)。

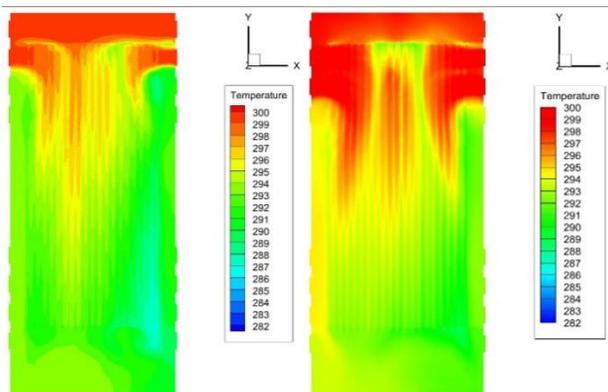


图 8 案例组 F7、F15 重力柜内部温度分布

Fig.8 The internal temperature distribution of the gravity cabinets in F7 and F15

4.3 复合型重力循环柜的控制程序

针对上述结论设计复合型重力循环柜的控制程序流程如下:

在制冷工况下, 控制策略包括: 启动阶段开启上部四组风机并设置为最大风量; 中期调整时, 逐步降低并关闭第一、第四组风机, 保持第二、第三组运行; 进一步调整时, 关闭第三组风机, 仅保留第二组运行; 最终进入自然对流阶段, 通过降低风机转速并调整重力柜开口和挡板。

在制热工况下, 控制策略则是: 启动阶段开启下部四组风机并设置为最大风量; 中期调整时, 首先关闭第五组风机, 保持第六、第七、第八组运行; 进一步调整时, 依次关闭第八组和第七组风机, 最终仅保留第六组运行; 同样进入自然对流阶段, 通过降低风机转速并调整重力柜开口和挡板。

4.4 侧加风机与上下加风机的方案比较

通过对比两种重力柜改造设计, 例如对比模拟组 C3 和模拟组 F15, 两个相近的工况, 发现在换热方面, 两侧加入风机的设计方案与直接在上下开口处加风机的设计方案相比, 换热能力基本相同, 但考虑重力柜的工作原理和运行方案, 为了防止破坏自然对流时的运行, 减少因凝结水导致的安全隐患, 且仅需要在设备启动阶段的一小段时间, 以及房间内负荷超过设计负荷时启动风机增大换热, 其余时间可保持重力循环柜, 自然对流的特点, 综合考虑之下, 两侧增设风机的设计更有优势。

5 结论

本文首先依据德国茨维考西撒克逊应用科学大学具体实验^[10]建立传统重力循环柜模型进行模拟, 发现重力循环柜的换热能力可通过增加机械设备, 将自然对流模式变为强迫对流模式达到提升换热能力的效果, 以水温 14℃ 的工况为例, 自然对流时制冷量约为 560W, 而改为强迫对流风量为 750m³/h 时其制冷量约为 2000W, 提升效果显著, 并且可通过提高风机风量或者降低入口水温等方式, 进一步提高。同时可以配合改变机械风量, 使得重力柜适配更多的室内负荷。也证明了增加机械对流装置的改造设计有助于提升重力循环柜的节能潜力, 改造后入口水温在 20℃ 时也可通过调整风机风量达到 1300W 左右的制冷量; 在 36℃ 时也可达到 2000W 左右的制热量, 即使用高温冷水制冷或采用低温热水供热时, 可与自然冷源、机房热回收等节能手段匹配。在此基础上创新性的提出了两侧设置风机的改造设计方案, 即复合型重力循环柜, 在选定风机流量范围内进行模拟, 制冷量从自然对流工况的 844W, 提升至 1300W, 提升约 54.0%; 制热量从自然对流工况的 1200W 提升至 2500W, 提升约 92.6%, 给出了启动阶段的控制策略。对比各种重力柜设计方案进行研究分析: 发现侧加风机和上下加风机两种设计方案在换热能力方面基本相同, 只是侧风机设计方案的换热效果略小于后者, 复合型重力循环柜的设计, 避免了破坏自然对流时的气流组织运行; 减少了因凝结水导致的安全隐患; 仅需要在设备启动阶段的一小段时间, 房间内负荷超过设计负荷时启动风机增大换热, 其余时间可保持重力循环柜纯自然对流的运行模式。综合考虑之下, 两侧增设风机的设计方案即复合型重力循环柜更有优势。

参考文献:

- [1] 顾皓. 毛细管平面辐射空调系统的发展与工程现状 [C]. 2011 年全国冷冻冷藏行业与山东制冷空调行业年会暨绿色低碳新技术研讨会, 2011:3.
- [2] 仝小鹏. 浅谈毛细管网辐射采暖制冷系统应用 [J]. 山西建筑, 2011, 37(15): 111-112.
- [3] Li C, Zhao J. Experimental Study on Indoor Air Temperature Distribution of Gravity Air-Conditioning for Cooling [J]. Energy Procedia, 2012, 17: 961-967.

的教学评分高达 95 分,教学效果良好。学生参加全国高等院校“绿色建筑设计”技能大赛获得全国优秀奖,学生依托科研项目参与并授权实用新型专利。期间,学生的成就感和专业自豪感得到明显提升,从而使得学生内驱力得到激发,提高了教学效果。

4 结语

在“双碳”战略需求和“新工科”建设要求背景下,以市场需求为牵引,围绕本校应用型人才培养目标,开展了建环专业新能源课程体系的建设,在建环专业人才培养体系中增设了新能源模块课程。通过“多元化教学+虚实结合”的手段探索了建环专业新能源模块的教学实践模式,完成了对学生科研思维的训练、新能源知识的传授和低碳设计技能的实训,培养了学生绿色节能综合设计能力和科学研究应用能力,满足了新时代新能源行业对建环专业的人才要求。

参考文献:

- [1] 教育部高等学校教学指导委员会编.普通高等学校本科专业类教学质量国家标准(上)[S].北京:高等教育出版社,2018.
- [2] 中华人民共和国教育部.加强碳达峰碳中和高等教育人才培养体系建设工作方案[Z].2022.教高函(2022)3号.
- [3] 李志永,张召冉,苑翔,等.“双碳”背景下建筑环境与能源应用工程专业培养模式探讨[J].现代商贸工业,2023,44(8):252-255.
- [4] 周东一,袁文华,石楚平.高校制冷与空调专业学生实习现状及改革探讨[J].制冷与空调,2008,(1):98-100,94.
- [5] 孙亮亮,曹晓玲,余涛,等.工程认证背景下建环专业培养方案优化[J].制冷与空调,2023,37(5):742-745.
- [6] 中华人民共和国教育部.关于加快建设发展新工科实施卓越工程师教育培养计划 2.0 的意见[Z].2018.教高(2018)3号.
- [7] 杜芳莉,杨亚萍,申慧渊.“双碳”背景下建环专业综合改革探析[J].制冷与空调,2022,36(5):777-781.
- [8] 王景刚,罗景辉,鲍玲玲,等.“双碳”背景下建环专业人才培养模式研究[J].云南化工,2024,51(2):198-201.
- [9] 张登春,郝小礼,于梅春,等.新工科背景下建筑环境与能源应用工程专业创新型人才培养模式探索[J].高等教育,2022,31(3):57-62.
- [10] 张红英,高蓬辉,张东海,等.新工科背景下建环专业人才培养模式研究与实践[J].教育教学论坛,2022,(4):119-122.
- [11] 李栋,高梦,张姝,等.“多方协同虚实结合”建环专业实践教学探索[J].大学教育,2022,(4):51-53.
- [12] 邵雪,赵薇,张丹.仿真软件在建环专业课程教学中的应用[J].现代信息科技,2023,7(12):191-194,198.
- [13] 葛玉箫,梁珍,于英娜.梅雨季节下重力循环柜性能实测研究[J].东华大学学报(自然科学版),2020,46(3):457-462,478.
- [14] 李诗琪.重力循环柜的性能测试及不同层高下特性的模拟研究[D].上海:东华大学,2023.
- [15] 吴林霖,梁珍.毛细管重力循环柜夏季制冷除湿性能实验研究[J].暖通空调,2023,(11):137-143.
- [16] 沈侃,吕静,吕锋.毛细管空调柜性能的实验研究[J].建筑节能,2018,46(5):112-115.
- [17] 谷德军,金梧凤,裴凤,等.毛细管重力循环供冷末端装置及运行性能研究[J].流体机械,2013,41(9):54-60.
- [18] 刘异.转轮除湿与重力循环柜复合空调系统研究[D].西安:西安科技大学,2022.
- [19] 李翠敏.重力循环供暖末端设备及运行特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [20] 陈慧,韩东太,王友成,等.基于毛细管空调系统的试验研究[J].流体机械,2014,42(11):63-67.
- [21] 王玮.住宅室内环境场模拟研究[J].洁净与空调技术,2020,(3):10-12.
- [22] 史晶,舒海文,王宏彬,等.毛细管辐射对流空调末端设备的供热性能分析[J].煤气与热力,2016,36(6):18-22.
- [23] 刘春洋,马吉勇,吴伟辉,等.毛细管重力柜空调装置[P].CN215675479U,2022-01-28.
- [24] 陈拥军,刘春洋,黄交存,等.通风可控重力柜空调装置[P].CN216159144U,2022-04-01.
- [25] Korndörfer P D M H S. Leistungsuntersuchungen an einem Kühl-und Heizschacht[R]. Forschungs-und Transferzentrum Zwickau, 2012.
- [26] 葛玉箫.不同季节下重力循环柜的运行性能及室内热湿环境研究[D].上海:东华大学,2019.

(上接第 139 页)