

文章编号: 0253-4339(2024) 03-0112-08

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2024.01.112

再热除湿单元式空调机的设计改进及实验研究

解云鹏^{1,2} 时竞竞^{1,3}

(1 特灵空调系统(中国)有限公司 上海 200051; 2 苏州大学电子信息学院 苏州 215031;
3 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

摘要 为了满足在不同空调负荷下能够除湿的同时输送舒适的空气温度和相对湿度,设计并搭建了一种新型的可调节再热除湿系统,优化制冷模式和除湿再热两种模式的制冷剂管理以及改进再热运行开度区间,并对比分析了不同再热盘管方案。实验结果表明:新式微通道再热盘管应用于风冷单元式空调机组能够更好地平衡制冷与除湿再热模式对充注量的需求;在除湿再热模式额定工况下的能效 EER 提高了 17%;除湿能力增加了 6%;制冷剂通过三通阀流向再热盘管的可调节开度范围从 20%~70% 提升至 15%~85%,增大了空气侧再热温升的调节范围,额定除湿再热工况再热温升从 8.3~14.4 °C 的调节区间增至 6.1~19.4 °C。既能提升再热可调节运行范围,增大除湿能力又更加节能。

关键词 再热除湿;制冷剂管理;单元式空调机;可调节再热;微通道再热盘管

中图分类号: TB657.5; TU831.3; TU834.9

文献标识码: A

Improved Design and Experimental Investigation of a Unitary Dehumidification Unit with Hot Gas Reheat

Xie Yunpeng^{1,2} Shi Jingjing^{1,3}

(1. Trane Air Conditioning Systems (China) Co., Ltd., Shanghai, 200051, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou, 215031, China; 3. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract To deliver comfortable conditioned air by reducing humidity levels while enhancing comfort levels in an air space under varied load conditions, an improved design for fully modulating dehumidification with a hot gas reheat system was developed. By managing the charge balance between the cooling and reheat modes, the modulation operating map for the reheat opening was expanded. Different microchannel heat exchanger (MCHE) reheat coil patterns and solutions were analyzed. The test results showed that an air-resourced unitary unit equipped with this novel MCHE reheat system solution improved the balance between the refrigerant charge requirements and the cooling and reheat modes. Under rating conditions, the energy efficiency ratio (EER) in the reheat mode increased by 17%, and water condensate removal through dehumidification was enhanced by 6%. The modulating valve reheat port opening range could be increased from a baseline of 20%–70% to 15%–85%. For the rated reheat dehumidification condition, the reheat temperature rise modulating range increased from 8.3–14.4 °C to 6.1–19.4 °C. This innovative solution was proven to achieve a wider adjustable operating map that improved dehumidification capacity and power conservation.

Keywords dehumidification with hot gas reheat; refrigerant management; unitary air conditioner; modulating reheat; microchannel reheat coil

随着人们对高空气品质和舒适性的追求,越来越多的空调机组应用于高湿带有新风的环境,除湿技术日渐受到更多的关注和发展,冷却除湿技术是其中之一^[1-3]。风冷单元式空调机组的冷却除湿,是在蒸发器的出风侧增加一个再热盘管,蒸发器除湿后出来低温低湿的空气,露点温度和含湿量下降,出风干球温度变低,人体会感觉冷。然后通过再热盘管的冷凝热再次获得温升,补偿蒸发器出来的过冷温度,露点温

度和含湿量不变,提高送风温度,降至人体感觉合适的相对湿度,从而提高舒适性水平^[4-6]。

关于再热实现的方式和控制,早期的北美风冷单元式空调机是采用开-关再热盘管的方式,需要除湿再热模式时完全打开再热盘管,达到目标出风温度设定值时关闭再热盘管。该系统较为简单,但人体会感觉过热或过冷,不能根据工况和负荷的变化适当调节出风温度,会出现再热能力过多或不足的情况。所

收稿日期: 2022-12-17; 修回日期: 2023-04-24; 录用日期: 2023-05-12

以,对比开-关控制的方式,可调节式再热系统能够实现出风温度随着工况变化和需求而从低至高自由调节,进入再热冷凝器和常规冷凝器的制冷剂开度比例能够根据出风温度的设定值而进行控制调节。对于单冷的机组,有两种运行模式,制冷模式(再热盘管关闭)和除湿再热模式(再热盘管开启),除了性能的考量,可靠性方面还需要考虑制冷剂和油的管理。制冷剂管理,一是在制冷模式下排空关闭的再热盘管内的制冷剂,二是除湿再热模式下多了运行的再热冷凝器和部分管路,需平衡两种模式下对制冷剂的需求差异,一般除湿再热模式需要的制冷剂充注量多于制冷模式^[7]。在北美除湿再热机组开发过程中,为了保证制冷模式的制冷性能和角点高环温下不跳机,机组的充注量一般基于制冷模式进行优化充注,根据其最优点来决定,该充注量下运行再热除湿模式对系统而言是欠充的。随着比例开度的变化,当进入任何一个冷凝器的开度比例较小时,制冷剂进入会因流量小很快成为液体,过冷度很大,导致容易储存在该盘管而很难排出,则蒸发器会缺少制冷剂处于“饥饿”状态而过热度很大,蒸发压力低而出现盘管结霜现象或结霜探头/低压开关跳机保护,不能连续运行。增加制冷剂充注量,可以提高再热调节的开度范围,但会牺牲机组制冷能效,并增加了高环温工况下高温或高压保护停机的风险。

目前对于可调节再热除湿机组,北美量产的风冷轻商机器可调节范围较窄,如何提高两端开度的机组连续运行范围是一个难点。本文基于北美除湿再热量产机组,改进了系统设计方案,兼顾制冷和除湿再热两种模式的制冷剂需求,也不增加额外的部件和成本,搭建机组测试验证了两种新型微通道再热盘管带来的改进效果并进行了对比分析,主要对除湿性能和可调节再热开度范围的提升进行了实验研究。

1 实验系统

实验原理如图 1 所示。实验测试改进型系统基于将量产于市场的北美风冷轻商屋顶机改造而来,该基准机器系统原理如图 1(a) 所示。实验机组为单冷机组,制冷剂为 R410A。系统为单系统回路,主要由室外侧的压缩机、室外冷凝器、室外风机、干燥过滤器、三通可调节阀和室内侧的热力膨胀阀、室内蒸发器、室内再热盘管、室内风机、单向阀、排空电磁阀以及管路构成。通过三通可调节阀来调节再热盘管和室外冷凝器的开度以及电磁阀的通断来实现制冷和再热除湿模式的切换。制冷模式下,三通可调节阀流

向室外冷凝器的出口全开,关闭流向再热盘管的出口,全部的流量流经室外冷凝器,同时排空电磁阀处于一直打开状态来排空不工作的再热盘管内的制冷剂,排空电磁阀的出口与低压侧相通,再热盘管出口的单向阀设计来阻止室外侧流入的制冷剂反向流入再热盘管。再热除湿模式下,三通可调节阀两个出口同时打开,从压缩机出来的高温高压气体在三通阀通过开度调节进行流量分配进入室外常规冷凝器和室内再热冷凝器,两者开度之和为 100%,三通阀一个出口开的同时另外一个出口关。再热盘管对室内蒸发器除湿后的空气进行再热升温来实现送风温度的调节^[8-10]。

基准量产机器的设计系统,制冷模式下制冷剂从冷凝器出来绝大部分进入热力膨胀阀 TXV (thermal expansion valve),少部分制冷剂存在单向阀后和三通之间的一小段液管上,当再热盘管出口至三通之间的液管走向固定时,移动单向阀的位置使单向阀更靠近再热盘管,则单向阀后面能够储存制冷剂的液管会增长,有利于制冷剂平衡管理,但由于结构限制,单向阀在液管上可移动的距离和存储的制冷剂很有限,仅有助于解决该段液管带来的制冷和除湿再热两种模式下制冷剂不平衡问题,再热盘管带来的制冷剂不平衡不能通过该途径解决。

改进型系统,通过改进再热盘管设计和单向阀的位置以及管路走向,用再热盘管的第二个回路储存制冷模式的制冷剂,并设法增大第二回路的内容积。把单向阀的位置从再热盘管出口移至再热盘管第一回路和第二回路之间,在第二个集流管上增加隔板,制冷剂走外面管路和单向阀。当运行制冷模式时,制冷剂从冷凝器出来到达三通,大部分进入 TXV,一部分通过再热盘管出口连接管路进入再热盘管最后一个回路,由于两侧集流管均有隔板,两个回路之间有单向阀,因此液态制冷剂主要储存在最后一个回路和两侧集流管,以及单向阀至集流管连接之间的管路部分,还有再热盘管出口至三通之间的管路。很大程度上平衡了再热模式下制冷剂多流经的地方。此外,排空管进口移至再热盘管进口:一方面,若还放在出口,需要移至单向阀之前,由于第二个回路储液,只需排空第一个回路的制冷剂,从结构的角,单向阀管路在盘管内部,蒸发器出口管路在外部,不利于中间走管;另一方面,放在再热盘管进口,再热盘管上进下出,液体在下气体在上,放在上端进口更有利于在排空时减少液击。

系统为一大一小两个涡旋式压缩机并联,排量约为 2:1,大压缩机使用定速机,小压缩机使用两级可

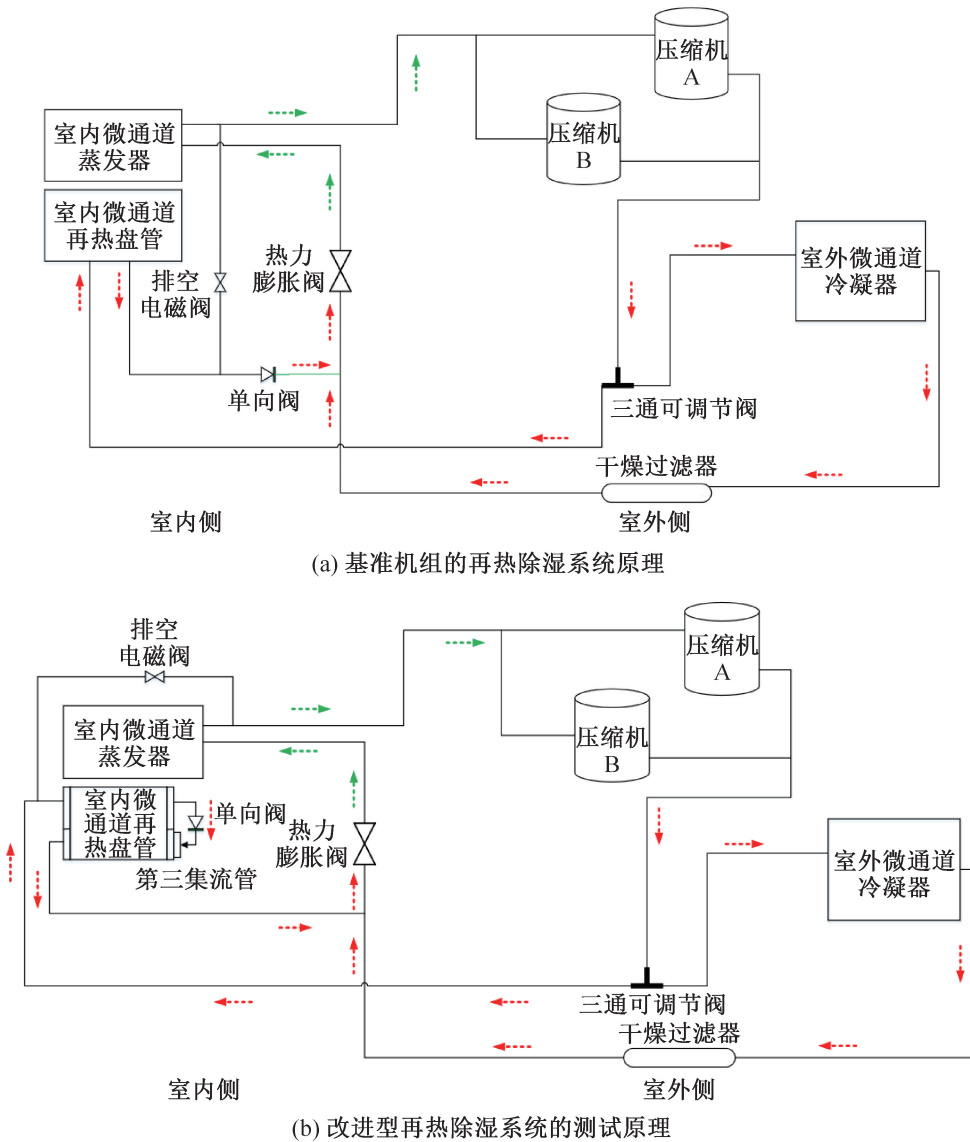


图 1 再热除湿系统的测试原理

Fig.1 Test system diagram for dehumidification with hot gas reheat

卸载型。机组设有 4 个档位可调节,分别为档 1、档 2、档 3、档 4,其中档 1 为最低档,压缩机排量低于 25%,满足标准要求^[11]。三通可调节阀位于排气管上,使用 42 mm 步进电机,满步数为 6 386 步。室外冷凝器、室内蒸发器和再热盘管均为微通道,相比于翅片管,具有传热效率高、充注量少、压缩机可靠性好、成本少和重量轻等优势^[12-13],其结构参数如表 1 所示。再热盘管 A 是基准机组设计,改进型系统采用新型再热盘管 B-1 或 B-2 两种,因单向阀和管路在再热盘管内侧,所以再热盘管 B 比 A 长度方向上减少了 5%。对比 A 和 B,为了增大第二回路的内容积,回路从 3 : 1 改为 1.5 : 1 增大第二回路的扁管数。室内再热盘管风温低使过冷度很高,所以也能提高第二个回路过冷段的比例。因 26

mm 的集流管是供应商能做的 16 mm 扁管微通道的最大集流管尺寸,不能通过增大集流管直径实现多储液。B-2 比 B-1 多了第三集流管设计可以实现更多的储液,第三集流管的高度接近第二回路的高度,第二和第三两个集流管中间距离的精度可以设置为毫米。

2 实验结果及分析

风冷单元式空调机 20T 系统的实验数据由标准焓差实验室^[14-15]测得。机组考察的名义性能对应的额定工况以及可允许的运行区间的角点工况区间如表 2 所示^[11,14,16]。改进型系统和基准系统关于 TXV 的设定值保持不变,改进型系统通过改变制冷剂充注量来满足额定制冷性能名义标称值的要求。判定依

表 1 系统微通道换热器的几何参数

Tab.1 Geometric parameters for MCHE heat exchangers

部件	排数	第一、第二集 流管直径/mm	第三集流管 直径/mm	回路 设计	扁管宽度/ mm	高度/ mm	长度/ mm	迎风面积/ m ²	内容积/ L
冷凝器	1	32	—	108-38	25.4	1 320.8	2 369.8	3.13	5.31
蒸发器	2	38	—	93	25.4	1 165.9	1 910.1	2.23	16.16
再热盘管 A	1	26	—	90-30	25.4	1 132.8	1 854.2	2.10	2.33
再热盘管 B-1	1	26	—	72-48	16.0	1 132.8	1 762.0	2.00	2.28
再热盘管 B-2	1	26	26	72-48	16.0	1 132.8	1 732.0	1.96	2.44

表 2 测试工况

Tab.2 Test conditions

参数	制冷模式额定点	再热除湿模式			
		满载性能点	部分负荷性能点	角点最低	角点最高
室内干球/湿球温度/°C	26.7/19.4	26.3/18.7	21.6/16.3	19.4/13.9	32.2/22.8
室外干球/湿球温度/°C	35/23.9	35.6/24.4	16.4/15.8	11.7/—	46.1/—
室内风量/[m ³ /(h·t)]	680	680	510	满负荷 510; 部分负荷 255	815

据是在额定制冷工况下加充制冷剂达到基准机组之前的制冷能力和能效水平,相近的过冷度和过热度,以及高低压状态。基准机组的制冷剂充注量为 7.8 kg,再热盘管 B-1 方案的系统通过实验确定的充注量多了 1.18 kg,再热盘管 B-2 方案的系统所需充注量比 B-1 多 0.73 kg。通过实验确定的制冷性能如表 3 所示,改进型系统 B-1 和 B-2 能够达到不低于基准机组 A 的制冷量和能效。压缩机吸气过度和进阀过冷度也达到了之前的优化点 6.7~8.9 °C,制冷剂出蒸发器压力几乎相同(1 099.7 kPa),压缩机排压也几近相同(3 033.7 kPa),则在角点工况时也能做到基准机组达到的连续运行范围。

该 20T 机组铭牌标称的名义制冷量为 70 kW,能效为 2.9。系统测试结果在能效上有较大余量。

表 4 对比了改进型系统和基准系统在除湿再热满载负荷性能工况三通阀开度为 50%时系统的除湿

表 3 额定制冷性能测试结果

Tab.3 Test results for cooling rated performance

系统	额定制冷量/W	能效 EER
系统 A	71 574.4	3.30
系统 B-1	72 060.0	3.31
系统 B-2	72 160.8	3.32

能力和能效的提升,除湿能力提高约 6%,系统能效提高 17%,更加节能。虽然改进型系统的再热盘管长度上减少了 4%,由于流量增大依然能够达到与基准机组相近的再热盘管温升,满足对温升的要求。同时,从过冷过热的测试值可看出制冷剂平衡的明显改善,在除湿再热模式下基准机组缺少制冷剂导致过热度很大和过冷度很低,改进后的系统能够很好地维持系统需要的制冷剂量,达到合适的过冷过热状态。对比基准机组,改进型系统由于蒸发器不再“饥饿”,因而制冷剂出蒸发器压力、蒸发器能力和除湿带走的冷

表 4 额定再热除湿满载性能和系统参数

Tab.4 Reheat performance for full load condition

系统	除湿量/ (kg/h)	除湿能力 增加比值	系统 EER	系统能效 增加比值	出蒸发器 风温/°C	再热盘管 温升/°C	出蒸发器 过热/°C	进阀 过冷/°C
系统 A	22.9	—	1.05	—	13.7	12.1	16.1	1.8
系统 B-1	24.2	5.7%	1.23	17%	12.9	11.8	7.0	7.8
系统 B-2	24.4	6.6%	1.23	17%	12.8	12.0	7.3	8.7

凝水量随之增加。

除湿再热模式下,随着三通阀开度的调节,两端开度容易出现室内盘管结霜探头或低压开关保护跳机的现象。当再热盘管侧开度过大时,进入冷凝器的流量小,制冷剂容易在冷凝器内冷凝成过冷液体并存于冷凝器中很难流出,导致蒸发器缺少制冷剂;当再热盘管侧开度过小时,进入再热盘管的流量小,制冷剂以过冷液体的形式容易存于再热盘管内而致使蒸发器缺少制冷剂出现跳机保护。基于部分负荷性能工况下随着不同三通阀开度的变化测得的出冷凝器过冷、出再热盘管过冷和出蒸发器过热的变化,如图 2 所示,开度从 10% 升至 80%,步数为 10%。随着三通阀再热盘管出口的开度升高,出再热盘管的过冷度逐渐下降,在开度最小 10% 时过冷度最高存的制冷剂最多;出冷凝器的过冷度随着开度的增大而增大,由于再热盘管的进风是蒸发器的出风,低风温使再热盘管换热充分。再热盘管过冷度高于冷凝器过冷度,冷凝器过冷度直至 80% 开度时才开始从 0 到有,制冷剂存于冷凝器内。从蒸发器过热度的角度,中间开度蒸发器过热度较为正常,两端开度下过热度过高,揭示了两端开度下因制冷剂存于冷凝器或再热盘管内使蒸发器处于“饥饿”的状态,容易造成两端的蒸发压力偏低而使室内盘管结霜保护或低压保护不能连续运行。

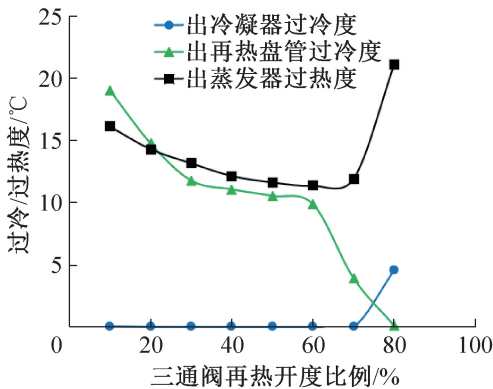


图 2 不同开度下过冷度、过热度的变化

Fig.2 Degree of subcooling and superheat changes under different modulating three way valve openings

为验证除湿再热模式下机器能够连续运行的三通阀最小和最大开度范围,实验工况在机器运行最低环温 11.7 °C (表 2) 时情况最差,环温最低的环境下系统最易被结霜保护或低压保护跳机。系统在出 TXV 的管路即进蒸发器的地方增加了热敏电阻,理论上以该热敏电阻读取的温度低于 -1.1 °C 时关闭压缩机以保护室内蒸发器避免结霜发生,另有低压保护开关跳机点为 503.3 kPa。因再热除湿模式增加了再

热冷凝盘管,冷凝压力低于制冷模式,机组有两个室外定速风机,环境温度(简称:环温)低时通过关闭一个风机可以减小室外冷凝器的换热,有利于不被结霜或低压停机保护从而做到更大的开度运行范围,除湿再热模式在两个室外风机切换至一个风机控制下的开始环温比制冷模式更高。由于开度过小或过大存在积油的问题,除湿再热系统期望达到的开度范围为 15%~85%。图 3 所示为在不同室外环温使机器能够连续运行的情况下三通阀进入再热盘管可调节的最小和最大开度变化。测试开度步数为 5%,控制室外风机运行台数为 1。当室内工况一定时,随着环温的升高,机组可运行再热的最小和最大开度区间变大。整体上看,环境温度提升至一定程度,机组能够达到更高的最大开度以及更低的最小开度。环温升高使蒸发器缺少制冷剂的现象得到改善,也提升了系统蒸发压力,所以提高环温能够在一定程度上拓宽三通阀可调节范围。

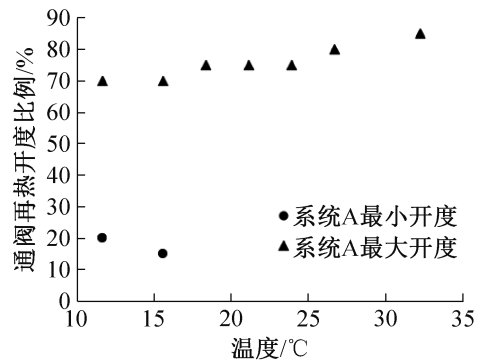


图 3 三通阀可调开度范围随环温的变化

Fig.3 Modulating opening range change with the ambient temperature

改进型系统对比基准机组达到的开度区间改善结果如表 5 和表 6 所示,表 5 考虑了最差工况,表 6 是为了满足目标期望开度 15%~85% 所需的最低环温。测试中开度步数变化为 5%,判定依据是机器能够连续运行不被结霜或低压停机保护。表 5 和表 6 结果显示,在环温最低 11.7 °C 的最差工况下,基准机组能达到的连续运行开度范围只有 20%~70%,更低开度 15% 或更高开度 75% 发生了停机保护。随着环温的升高,连续运行的开度范围更大,15.6 °C 最小开度可以实现 15%,15.6 °C 以上至少能够在 15% 开度下连续运行;直至环温升高至 32.2 °C 时最大开度才达到 85%;改进型再热盘管 B-1 系统能够实现 11.7 °C 最小开度达到 15% 的目标,再热盘管 B-2 系统至少能够在 15% 最小开度下连续运行;B-1 系统最大开度在环温最低 11.7 °C 下达到 75%,18.3 °C 时达到

85%, B-2 系统比 B-1 系统更具优势, 11.7 °C 时 B-2 系统能够达到 85% 连续运行, 即再热盘管 B-2 系统在整个环温运行范围下都能实现 15% ~ 85% 的目标三通阀开度调节范围, 很好地提高了再热除湿模式下的可调节开度系统连续运行范围。

表 5 最差工况下实验系统能达到的开度区间
Tab.5 The modulating three way valve opening range under worst condition for test systems

系统	最小开度/%	最大开度/%
系统 A	20	70
系统 B-1	15	75
系统 B-2	15	85

表 6 实验系统达到 15%~85% 开度所需的最低环温
Tab.6 The required lowest ambient to reach 15%~85% opening for test systems

系统	15% 开度所需 最低环温/°C	85% 开度所需 最低环温/°C
系统 A	15.6	32.2
系统 B-1	11.7	18.3
系统 B-2	11.7	11.7

图 4 所示为系统压力温度参数随开度变化的结果, 先从制冷模式切换除湿再热模式再热开度为 50%, 然后调节再热开度至 70%, 接着调节再热开度至 75%, 此时机器发生停机保护, 以基准系统实验验证找到能达到的最大开度为例。同一工况室外环温为 11.7 °C 下, 从制冷模式切换至再热除湿模式, 系统的蒸发冷凝压力一定程度降低; 随着三通阀再热开度比例由 50% 升至 70%, 蒸发压力发生一定程度的下降, 系统仍然能够维持正常运行; 但切换至 75% 开度下, 蒸发压力和出阀温度的急剧下降引起停机保护,

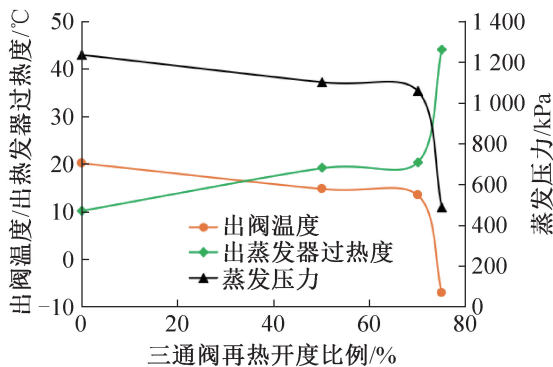


图 4 系统参数随再热开度的变化

Fig.4 System parameters change with the reheat openings

出蒸发器的过热度忽然剧烈上升揭示了蒸发器严重缺少制冷剂的现象, 因为制冷剂此时存于室外冷凝器内而系统缺少制冷剂不能维持正常的连续运行。

上述结果主要是因为三通可调节阀随着开度变化的调节特性, 如图 5 所示, 随着三通阀再热步数比率的变化, 进入再热盘管的流量测试结果在中间区域开度较为平缓, 两端流量才随着步数的升高变化显著。

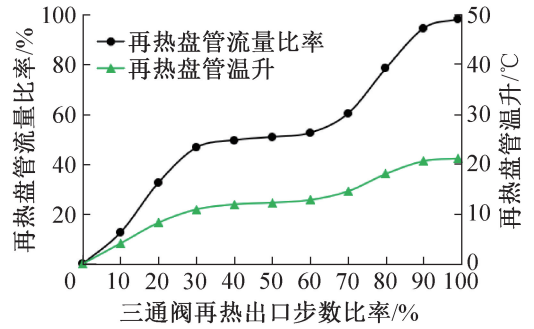


图 5 三通比例调节阀动作特性及温升控制

Fig.5 The operating characteristic and temperature rise control for modulating three way valve

考虑中间开度范围时, 三通阀两个出口的压降较小, 主要压降在两个分支的盘管和管路上, 所以中间开度范围的变化不会引起流量分配的改变。只有中间开度范围以外的两端开度, 三通阀开度的压降足够大, 在冷凝器和再热盘管的流量分配上起主要作用, 从而进行调节。这与供应商提供的阀自身的流量系数 C_v 特性曲线也较为一致, 经典动作特性像一个躺着的“S”型曲线^[17-20]。由图 5 可知, 表 2 额定除湿再热工况下随着三通比例调节阀步数变化带来的再热盘管的温升调节, 与再热流量调节曲线的趋势较为一致。额定除湿再热工况下, 当开度从 20% ~ 70% 提升至 15% ~ 85% 时, 增大了再热温升的调节范围, 从 8.3 ~ 14.4 °C 的调节区间扩大至 6.1 ~ 19.4 °C。

3 结论

本文基于开发的再热除湿风冷单元式空调机进行系统改进设计, 搭建了相应的实验台, 实验研究了除湿再热系统在两种改进型再热盘管系统方案运行时的性能和可调节运行范围。通过优化制冷和除湿再热两种模式的制冷剂平衡管理, 实验研究了对额定制冷性能的影响, 对比了除湿再热能力以及系统能够连续运行的三通阀开度可调节运行区间, 得到如下结论:

1) 设计了一种新型可调节再热除湿系统, 通过改变单向阀的位置、管路布局和新式再热盘管设计,

利用微通道再热盘管的最后一个回路以及集流管来实现制冷模式下的储液功能,解决了除湿再热模式比制冷模式需要更多制冷剂的问题。

2)改进型再热盘管方案的应用能够更好地平衡制冷模式和除湿再热模式对充注量的需求,系统最优充注量兼顾了两种模式的过冷过热优化点使额定工况落在 6.7~8.9 °C。无需增加额外储液部件,不增加成本。

3)在不影响额定制冷性能的前提下,主要改善了除湿再热性能。降低除湿再热模式的过热度的同时提高过冷度,从而增加了系统除湿再热模式下的除湿量,除湿量提高约 6%,机组能效升高了 17%,更加节能。

4)在整个实验运行工况范围内,实现了 15%~85%的可调节三通阀开度下系统连续运行的效果,改善了在三通阀开度两端开度过大或过小时蒸发器缺少制冷剂而停机保护的问题,在再热温升调节范围上更具优势,额定除湿再热工况下再热温升调节区间从 8.3~14.4 °C 增至 6.1~19.4 °C,能够更好地满足不同送风温度可调性的需求。

参考文献

[1] 刘敏,王远鹏,石靖峰,等. 变频多联式空调系统再热除湿性能的实验研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(2): 101-106. (LIU Min, WANG Yuanpeng, SHI Jingfeng, et al. Experimental investigation on reheat dehumidification performance of multi-split variable refrigerant flow rate air-conditioning system[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(2): 101-106.)

[2] 程恰,周国梁,兰娇,等. 新型电动汽车热泵系统除湿再热性能实验研究[J]. 制冷学报, 2018, 39(5): 105-111. (CHENG Qia, ZHOU Guoliang, LAN Jiao, et al. Experimental research on dehumidifying and reheating characteristics of a novel heat pump system for electric vehicle[J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(5): 105-111.)

[3] LAZZARIN M R, CASTELLOTTI F. A new heat pump desiccant dehumidifier for supermarket application[J]. Energy and Buildings, 2007, 39(1): 59-65.

[4] 李玉春,童明伟. 变频空调器除湿性能的试验研究[J]. 制冷学报, 2008, 29(3): 39-42. (LI Yuchun, TONG Mingwei. Experimental study on dehumidification performance of variable speed air conditioner[J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(3): 39-42.)

[5] 崔建宁,韩旭,贾永杰,等. 并联型调温除湿机制冷剂流量三通比例调节阀动作特性的实验研究[J]. 制冷学报, 2011, 32(5): 31-36. (CUI Jianning, HAN Xu, JIA

Yongjie, et al. Experiments study on movements characteristics of three-way modulating control valve of the parallel condensers dehumidifier [J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(5): 31-36.)

[6] NAKAMURA H, FUNAKOSHI S, YOKOYAMA H, et al. Improvement of dehumidification performance on room air conditioner adopting dehumidification method reheated by refrigeration cycle[J]. Transactions of the JSRAE, 2009, 26(4): 1-12.

[7] 李丽芬,陈旭. 单元式空调机冷却除湿技术分析[J]. 制冷与空调(北京), 2011, 11(4): 14-18. (LI Lifen, CHEN Xu. Technology analysis of cooling dehumidification for unitary air conditioner[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2011, 11(4): 14-18.)

[8] 王树涛,张玥,蒋贤国,等. 利用空调器的再热技术对房间内空气的除湿研究[J]. 家电科技, 2022(增刊1): 138-142. (WANG Shutao, ZHANG Yue, JIANG Xianguo, et al. Dehumidify the air in the room with the reheat technology of the air conditioner[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2022(Suppl. 1): 138-142.)

[9] 陆东铭,卢云. 带有再热除湿功能的房间空调器的设计研究[J]. 家电科技, 2018(11): 40-43. (LU Dongming, LU Yun. Design and research of room air conditioner with reheating dehumidification function[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2018(11): 40-43.)

[10] 田向宁,杨毅,丁德,等. 空气冷却除湿过程的理论研究[J]. 暖通空调, 2014, 44(1): 121-124. (TIAN Xiangning, YANG Yi, DING De, et al. Theoretical research on air cooling dehumidification process[J]. Journal of HV&AC, 2014, 44(1): 121-124.)

[11] Energy standard for buildings except low-rise residential buildings; ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019[S]. USA: ASHRAE, 2019.

[12] KIM J H, GROLL E A. Performance comparison of a unitary split system using microchannel and fin-tube outdoor coils[J]. ASHRAE Transactions, 2003, 109(2): 219-229.

[13] KIM M H, BULLARD C W. Performance evaluation of a window room air conditioner with microchannel condensers[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2002, 124(1): 47-55.

[14] Standard for performance rating of commercial and industrial unitary air-conditioning and heat pump equipment; AHRI Standard 340/360 (I-P) - 2019[S]. USA: AHRI, 2019.

[15] Methods of testing for rating electrically driven unitary air-conditioning and heat pump equipment; ANSI/ASHRAE

- Standard 37-2009[S]. USA: ASHRAE, 2009.
- [16] Thermal environmental conditions for human occupancy; ANSI/ASHRAE Standard 55-2017[S]. USA: ASHRAE, 2017.
- [17] 林丹, 章茂森, 马杰, 等. 冷却系统用三通调节阀流量系数和流阻系数研究[J]. 阀门, 2018(3): 14-16, 28. (LIN Dan, ZHANG Maosen, MA Jie, et al. Study on flow coefficient and flow resistance coefficient of three-way control valve for a cooling system[J]. Valve, 2018(3): 14-16, 28.)
- [18] 靳淑军, 李忠, 章茂森. 基于 CFD 技术的三通调节阀内部流动性能研究[J]. 阀门, 2019(4): 11-14. (JIN Shujun, LI Zhong, ZHANG Maosen. Research on internal flow performance of three-way control valve based on CFD technology[J]. Valve, 2019(4): 11-14.)
- [19] SRIKANTH C, BHASKER C. Flow analysis in valve with moving grids through CFD techniques[J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(3): 193-201.
- [20] 李树勋, 李忠, 周爱民, 等. 三通调节球阀节流盘开口

型线优化及试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 61-66. (LI Shuxun, LI Zhong, ZHOU Aimin, et al. Optimization and test on throttle plate opening profile line of 3-way control ball valve [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(2): 61-66.)

通信作者简介

时竞竞,女,硕士研究生,上海理工大学能源与动力工程学院,特灵空调系统(中国)有限公司研发中心,13671690251, E-mail: AnnieJingJing.Shi@tranetechnologies.com。研究方向:蓄能蓄冷技术,风冷式单元机

About the corresponding author

Shi Jingjing, female, master degree candidate, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Engineering and Technology Center, Trane Air Conditioning Systems (China) Co., Ltd., 86-13671690251, E-mail: AnnieJingJing.Shi@tranetechnologies.com. Research fields: thermal storage technology, air resourced unitary unit.

(上接第 103 页)

- [20] 徐耀祖, 商向东, 徐景久, 等. 固体蓄热器蓄热过程分析与优化研究[J]. 热动力工程, 2022, 37(1): 150-156. (XU Yaozu, SHANG Xiangdong, XU Jingjiu, et al. Study on heat storage process analysis and optimization of solid heat accumulator [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(1): 150-156.)
- [21] 赵岷, 王启民. 基于 ANSYS 分析的蓄热砖蓄热特性数值模拟及实验研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2020, 16(2): 34-38. (ZHAO Di, WANG Qimin. Numerical simulation and experimental study on thermal storage characteristics of thermal storage brick based on ANSYS analysis [J]. Journal of Shenyang Institute of

Engineering (Natural Science), 2020, 16(2): 34-38.)

通信作者简介

许树学,男,副研究员,北京工业大学环境与生命学部,13810094996,E-mail: xsx@bjut.edu.cn。研究方向:制冷及低温工程。

About the corresponding author

Xu Shuxue, male, associate researcher, School of Environment and Life, Beijing University of Technology, 86-13810094996, E-mail: xsx@bjut.edu.cn. Research fields: refrigeration and cryogenic engineering.