文章编号:0253-4339(2020) 05-0096-06
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.05.096

空调性能最佳状态点的匹配研究

余 桢　陈海宁　潘李奎　王富强

(深圳麦克维尔空调有限公司　深圳　518111)

摘　要　为了匹配空调性能的最佳状态点,本文选用 1 台制冷量为 5.15 kW 的空调机组,实验研究了空调系统的充注量、过冷度和蒸发器出口过热度对系统制冷量及能效的影响,并提出了 SH-Q、SC-EER、SC-Q、SH-EER 理论匹配曲线,通过曲线匹配出空调系统的最佳状态点。实现最佳状态点匹配的途径可分为两部分:1)首次充注制冷剂充注量,根据匹配曲线找到系统最适宜的蒸发过热度和冷凝过冷度;2)根据蒸发过热度及冷凝过冷度,调整充注量和节流强度,匹配出空调系统制冷能效的最佳状态点。实验研究了蒸发过热度为 0~18 ℃、过冷度为 0~9 ℃时空调性能的变化规律,根据匹配曲线得到系统匹配的最佳状态点,即最适宜的过热度、过冷度分别为 1.3 ℃、6 ℃,对应的制冷能效为 2.94,与实验区间最小值 2.64 相比增加了 11.4%。

关键词　最佳状态;性能匹配;空调;能效比;过热度

中图分类号:TB657.2;TU831.3　　**文献标识码**: A

Research on Matching Optimal State Points of Air Conditioning Performance

Yu Zhen　Chen Haining　Pan Likui　Wang Fuqiang

(Shenzhen McQuay Air Conditioning Co., Ltd., Shenzhen, 518111, China)

Abstract　In order to match the best state point of air-conditioning performance, this paper selects an air conditioning unit with a refrigerating capacity of 5.15 kW as a research object. The influence of the charging capacity, the subcooling degree and the superheat degree at the evaporator outlet of the air conditioning system on the refrigerating capacity and energy efficiency of the system is experimentally studied. The theoretical matching curves of SH-Q, SC-EER, SC-Q, SH-EER are proposed, and the best state point of the air conditioning system is matched through the curve. The way to achieve the best state point matching can be divided into two parts: 1) the first charge amount of refrigerant should be based on the matching curve to find the most suitable evaporation superheat degree and condensation subcooling degree of the system; 2) according to the evaporation superheat degree and condensation subcooling degree, the charge amount and throttling intensity are then adjusted to match the best state point of refrigeration efficiency of the air conditioning system. According to the matching curve, the best matching state points of the system are obtained, that is, the most suitable superheat degree and subcooling degree is 1.3 ℃ and 6 ℃, respectively, and the corresponding refrigeration energy efficiency is 2.94, which is 11.4% higher than the minimum value of 2.64 during the experiment.

Keywords　optimal state; performance matching; air conditioning; energy efficiency ratio; superheat

空调机组在研发过程中,在压缩机、冷凝器和蒸发器一定的情况下,研发人员需最大限度匹配出最优的制冷量和能效比,使新产品更加节能。目前,对空调的研究很多都集中于制冷剂充注量[1-5]及制冷部件[6-9]。殷秀娓等[10]提出制冷剂在系统中的分布与换热器的类型及内容积大小有关。李鑫[11]提出制冷系统制冷剂充注量和室内外环境变化有关,且受室内温度影响较大。虞中旸等[12]对热泵热水器的电子膨胀阀范围调节提出了最佳调节区间。周国兵[13]研究了制冷剂在绝热毛细管中的流动特性。孔祥敏等[14]研究了制冷剂通量、毛细管管径、制冷剂冷凝压力对毛细管长度的影响。

在此基础上,本文实验研究了空调系统的蒸发过热度和冷凝过冷度对空调性能的影响,并提出 SH-Q、SC-EER、SC-Q、SH-EER 理论匹配曲线,通过曲线匹配出空调系统最佳状态点。实现最佳状态点匹配的途径可分为两部分:1)首次充注制冷剂充注量,根据匹配曲线找到系统适宜的蒸发过热度和冷凝过冷度;2)根据蒸发过热度及冷凝过冷度,调整制冷剂充注量和节流强度,匹配出空调系统制冷能效的最佳状态点。

1 实验方案

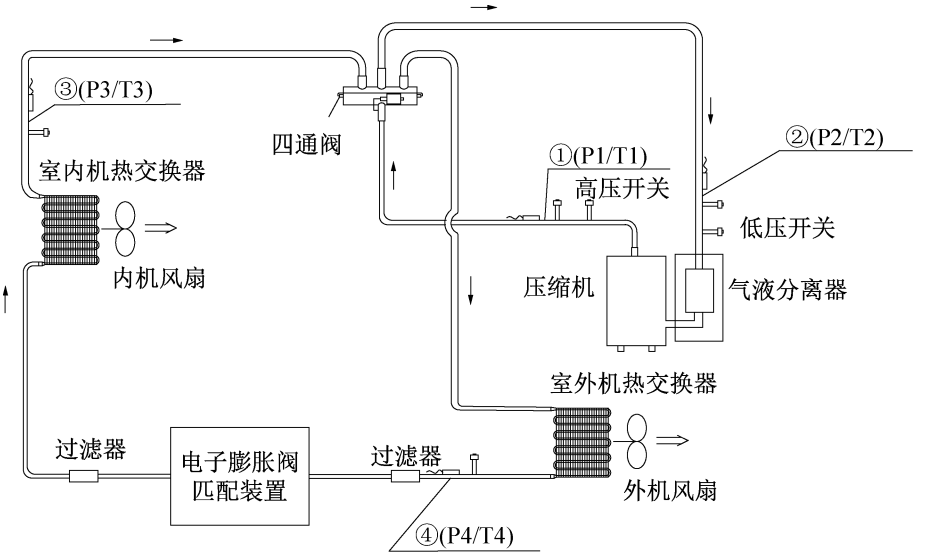
本文选用 1 台制冷量为 5.15 kW 的空调机组进行实验,匹配了该机组最佳状态点的性能。实验室是

收稿日期:2019-10-10;修回日期:2020-04-07

由合肥通用研究院建造的焓差实验室,该实验室获得国家 CNAS 认可。空调机组的输入功率由 WT230 功率计采集,精度为 0.2 级;进出风温度由 Pt100 铂电阻采集,精度为 A 级;热电偶精度为 0.1 ℃。

为避免因更换毛细管时造成系统充注量的误差,节流部件选用电子膨胀阀代替毛细管。由于电子膨胀阀的开度和流量存在一一对应关系[15],因此可以通过调节电子膨胀阀步数来匹配空调机组在不同节流状态下的换热量和能效。

在空调管路相应位置分别采集如下压力点和温度点作为分析参数:1)压力点:排气压力、冷凝器出口压力、蒸发器出口压力、吸气压力;2)温度点:吸气温度、排气温度、冷凝器出口温度、蒸发器出口温度。空调系统及测点布置如图 1 所示。



①排气压力、排气温度;②吸气压力、吸气温度;③蒸发出口压力、蒸发出口温度;④冷凝出口压力、出口温度。

图 1 空调系统及测点布置

Fig.1 Air conditioning system and layout of measuring points

2 实验结果与分析

2.1 蒸发器出口过热度对制冷量的影响

在室内环境干球温度为 27 ℃、湿球温度为 19 ℃,室外干球温度为 35 ℃的条件下[16]运行空调机组的名义制冷工况。保证制冷剂充注量为 1.2 kg 不变,通过改变电子膨胀阀的开度调节系统的节流强度,蒸发器出口过热度变化的测试结果如表 1 所示,制冷量随蒸发器出口过热度的变化如图 2 所示。

表 1 蒸发器出口过热度变化的测试结果

Tab.1 Test results of superheat degree change of evaporator outlet

风侧制冷量/kW	输入功率/kW	能效 EER	吸气过热度/℃	热交换器出口过热度/℃	吸气压力/kPa	排气压力/kPa	吸气温度/℃	排气温度/℃	热交换气出口压力/kPa	热交换器出口温度/℃
4.338	1.652 9	2.62	23.17	17.68	629	259 1	20.40	86.80	661	16.20
4.474	1.688 0	2.65	20.62	16.32	670	263 2	19.50	87.50	700	16.40
4.630	1.702 2	2.72	18.46	13.23	699	264 8	18.50	84.40	731	14.50
4.719	1.715 9	2.75	16.22	11.28	726	266 6	17.30	82.40	756	13.50
4.827	1.731 0	2.79	14.27	9.21	751	268 8	16.30	79.80	788	12.60
4.843	1.737 8	2.79	12.35	7.40	765	269 7	14.90	78.10	802	11.30
4.879	1.745 5	2.80	10.12	5.23	782	270 8	13.30	76.00	818	9.70
4.850	1.746 7	2.78	8.89	2.70	783	270 9	12.10	74.60	819	7.20
4.870	1.753 0	2.78	6.54	0.97	798	271 8	10.30	72.60	834	6.00
4.644	1.749 6	2.65	1.01	0.73	830	270 8	5.90	65.80	876	7.20

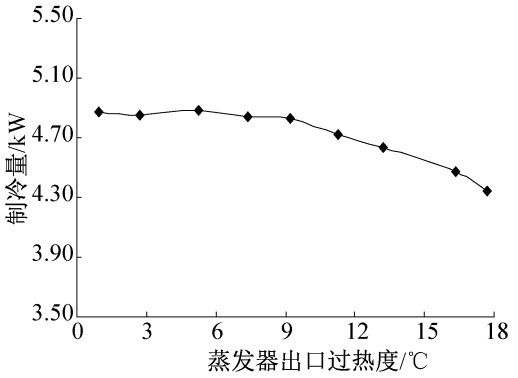


图 2 制冷量随蒸发器出口过热度的变化(SH-Q)

Fig.2 Variation of refrigerating capacity with superheat degree of evaporator outlet(SH-Q)

蒸发器出口过热度不宜过低,否则会造成压缩机吸入的蒸气为湿蒸气,制冷量下降。低温的湿蒸气与压缩机气缸壁间存在热交换,使液相工质迅速蒸发,占据气缸的有效空间,导致压缩机吸入制冷剂的质量减少,制冷量下降。由表 1 可知,蒸发器出口过热度为 0.73 ℃和 0.97 ℃时,两者的吸气过热度分别为 1.04 ℃和 6.54 ℃,对应的压缩机吸入制冷剂分别为湿蒸气状态和过热状态,制冷量分别为 4.644 kW 和 4.870 kW。由此可见,由于制冷剂是湿蒸气的状态造成制冷量偏小为 4.6%,所以匹配的蒸发器出口过热度不宜过低。过低的过热度甚至会导致液相制冷剂过多,造成压缩机液击,损坏压缩机。

蒸发器出口过热度亦不宜过高,过高的蒸发器出口过热度会让过热蒸气占的蒸发面积过大,制冷量下降。蒸发器管内侧的制冷剂一般可分为两相区和过热区。过热度越大则两相区的制冷剂在蒸发器中的传热面积就越小。由于两相区的表面传热系数远高于过热区的表面传热系数,最大约达 4.5 倍[17],因此随着蒸发器出口过热度的增大,两相区的制冷剂传热面积相应减小,制冷量也随之逐渐减小。由图 2 和表 1 可知,当过热度大于 5 ℃时,继续增大过热度会导致制冷量迅速下降,制冷量从最大 4.879 kW 降至 4.338 kW,降幅达 11.1%。因此,蒸发器出口过热度也反映了制冷剂对蒸发器传热面积的利用程度,匹配时蒸发器出口过热度不宜过高。

蒸发器匹配的最佳出口过热度一般为 1~3 ℃,它与蒸发器的结构、安装位置、回风方式及制冷剂流量有关。本文选用的蒸发器由 2 个“V”字型的热交换器组成,该热交换器为双管程,长度为 715 mm,翅片为开窗片型式,铜管为内螺纹管,共有 4 个回路,每个回路的分配毛细管(外径×内径×长度)分别为 OD3.3 mm×ID2.286 mm×200 mm、OD3.3 mm×ID2.286 mm×250 mm、OD3.3 mm×ID2.286 mm×300 mm、OD3.3 mm×ID2.286 mm×350 mm。由于制冷剂在 4 个回路上的分配毛细管、回风位置及回风温度的差异,导致各回路的流量和分配出口温度不同,它们的两相状态也不可能同时相同。因此,由表 1 可知,蒸发器出口过热度在 0.97、2.70、5.23 ℃时的制冷量变化较小,这是由于 4 个回路两相区状态的制冷剂不是同时最大或最小造成的。在蒸发器出口过热度为 1~5 ℃的变化区间,两相区总的蒸发传热面积比例变化较小,所以制冷量变化也较小。

2.2 匹配蒸发器出口过热度对制冷能效的影响

由制冷能效 EER=Q/P 可知,制冷量的变化必然引起制冷能效的变化。制冷能效随过热度的变化如图 3 所示,制冷能效同样是随着过热度的增大先增大后逐渐减小。

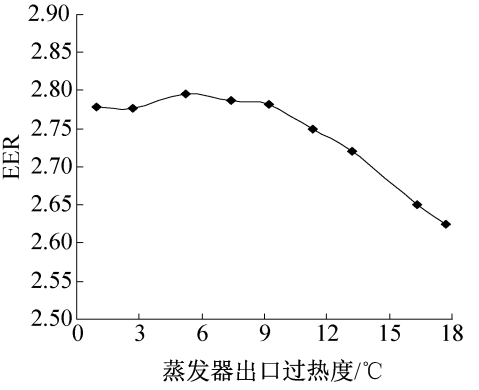


图 3 制冷能效随过热度的变化(SH-EER)

Fig.3 Variation of refrigeration energy efficiency with superheat degree(SH-EER)

2.3 匹配过冷度对制冷量的影响

在 GB/T 7725—2004[16] 要求的名义工况(室外干球温度 35 ℃、湿球温度 24 ℃,室内干球温度 27 ℃、湿球温度 19 ℃)下运行名义制冷,制冷剂充注量从 1.2 kg 增至 1.9 kg,调节电子膨胀阀的开度来实现系统节流强弱的改变,保证系统的蒸发温度和蒸发器出口过热度不变,冷凝器出口过冷度在 1~16 ℃变化时空调机组性能的测试结果如表 2 所示,制冷量、制冷能效随过冷度的变化分别如图 4、图 5 所示。

由表 2 可知,随着制冷剂的增加和电子膨胀阀开度的变小,过冷度从 0.96 ℃逐渐增至 16.17 ℃,而蒸发器出口压力和过热度状态几乎不变,因此制冷量主要受过冷度的影响而变化。结合图 4 可知,随着过冷度的增大,系统制冷量一开始就迅速增大。当过冷度增至约 10 ℃时,制冷量增大的趋势逐渐

平缓;此时若继续增大过冷度,已不能增大制冷量,反而会使系统压力迅速增大,功率增大,能效开始下降。由表 2 可知,过冷度为 10.44 ℃时的高压为 2 933 kPa,而过冷度为 16.17 ℃时的高压已达 3 268 kPa,相应的功率从 1.860 kW 增至 2.039 kW,增加了 9.6%。因此,匹配空调机组时,匹配的过冷度并非越大越好。由图 5 可知,制冷能效随着过冷度的增大而先增大后减小。

表 2 冷凝器出口过冷度的测试结果

Tab.2 Test results of subcooling degree at condenser outlet

充注量/kg	电子膨胀阀开度	制冷量/kW	输入功率/kW	能效 EER	热交换器出口过热度/℃	过冷度/℃	吸气压力/kPa	排气压力/kPa	冷凝后压力/kPa	热交换器出口压力/kPa	热交换器出口温度/℃
1.2	190	4.828	1.742 1	2.77	2.18	0.96	789	2 708	2 657	825	5.90
1.3	115	5.035	1.766 8	2.85	2.14	2.64	782	2 751	2 709	815	5.50
1.4	107	5.195	1.790 9	2.90	2.09	6.00	779	2 802	2 767	816	5.50
1.5	100	5.262	1.824 8	2.88	2.20	8.64	776	2 863	2 829	812	5.50
1.6	97	5.329	1.859 8	2.87	2.23	10.44	779	2 933	2 899	815	5.60
1.7	94	5.334	1.922 9	2.77	1.96	12.49	785	3 045	3 012	815	5.40
1.8	90	5.374	1.989 8	2.70	1.99	14.36	792	3 165	3 132	822	5.60
1.9	86	5.345	2.039 0	2.62	2.03	16.17	788	3 268	3 237	818	5.50

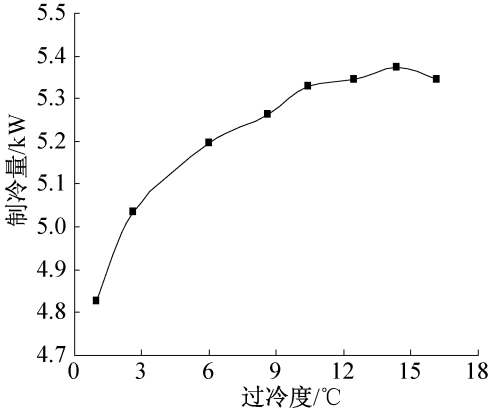


图 4 制冷量随过冷度的变化(SC-Q)

Fig.4 Variation of refrigerating capacity with subcooling degree(SC-Q)

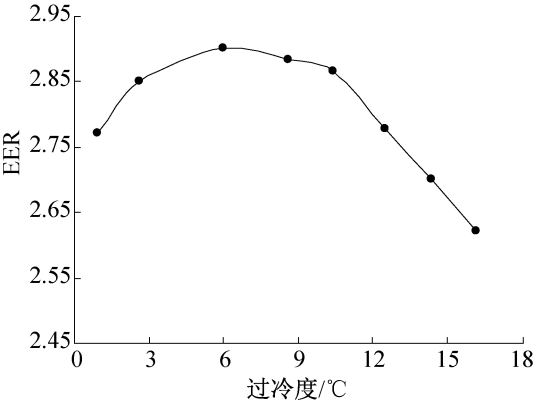


图 5 制冷能效随过冷度的变化(SC-EER)

Fig.5 Variation of refrigeration energy efficiency with subcooling degree(SC-EER)

2.4 最佳状态点匹配结果

蒸发器出口过热度(或吸气过热度)和过冷度是制冷性能匹配时的重要参数。由 SC-Q(图 4)和 SC-EER(图 5)曲线可知,系统的最佳过冷度宜为 6.0 ℃;随着过冷度的增大,空调系统的制冷量最大可以匹配到 5.374 kW。

增加制冷剂充注量和调节电子膨胀阀开度,蒸发器出口过热度与制冷量、制冷能效的关系分别如图 6、图 7 所示。

由图 6 可知,在相同过热度下,制冷剂充注量从 1.2 kg 增至 1.5 kg,系统的制冷量迅速增大;在相同充注量下,随着过热度的增大,制冷量逐渐降低,降幅

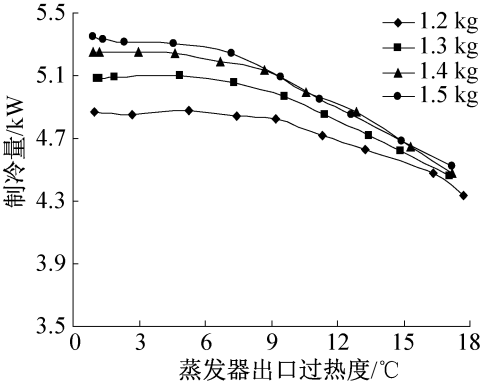


图 6 蒸发器出口过热度与制冷量的关系(SH-Q)

Fig.6 Relationship between superheat degree of evaporator outlet and cooling capacity(SH-Q)

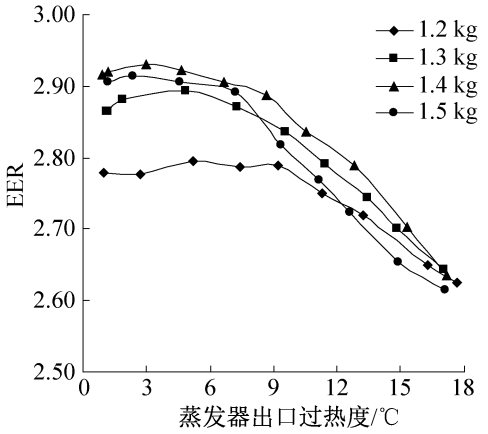


图 7 蒸发器出口过热度与制冷能效的关系(SH-EER)

Fig.7 Relationship between superheat degree of evaporator outlet and refrigeration efficiency(SH-EER)

最大达 15.5%。由图 7 可知,在相同过热度下,随着制冷剂的增加,制冷能效同样是逐渐减小的趋势。

结合图 6 和图 7 可知,当制冷剂充注量从 1.4 kg 增至 1.5 kg 时,出现制冷量增大但能效开始下降,因此判定制冷剂最佳充注量为 1.4 kg;在蒸发器出口过热度约为 1.3 ℃时(对应的过冷度约为 6 ℃),制冷能效最大,为最佳匹配状态点。

3 结论

本文实验研究了空调蒸发器出口过热度、压缩机吸气过热度及过冷度与制冷量、制冷能效的匹配关系,得到了 SH-Q、SC-EER、SC-Q、SH-EER 理论匹配曲线,通过匹配曲线可以确定匹配的最佳状态点,得到结论如下:

1)通过 SC-Q 曲线确定空调系统匹配的制冷量最大可以调试到 5.374 kW。

2)通过 SC-EER 曲线确定了空调系统过冷度为 6 ℃时制冷能效达到最大值。

3)通过 SH-Q 曲线和 SH-EER 曲线确定实验的蒸发出口过热度宜为 1.3 ℃,制冷剂充注量为 1.4 kg。当过热度继续增大或制冷剂充注量继续增加时,制冷能效开始下降。

4)明确了实验空调系统适宜的过冷度、过热度和充注量后,最终可获得空调器匹配的制冷能效最佳状态点的能效值为 2.94,与实验区间最小值 2.64 相比升高了 11.4%。

参考文献

[1] 王敏, 邓立生, 何兆红, 等. 制冷剂充注量对冷暖空调性能的影响[J]. 新能源进展, 2017, 5(2):141-145. (WANG Min, DENG Lisheng, HE Zhaohong, et al. Effects of refrigerant charge on performance of dual air-conditioning system[J]. Advances in New and Renewable Enengy, 2017, 5(2):141-145.)

[2] 欧阳怀瀑, 巨福军, 范晓伟, 等. 充注量对 R290 热泵热水器性能影响的实验研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(4):52-55,98. (OUYANG Huaipu, JU Fujun, FAN Xiaowei, et al. Experimental study on the effect of refrigerant charge on the performance of heat pump water heater with R290[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019, 47(4):52-55,98.)

[3] 夏添. 轻型商用单元式空调机组制冷剂充注量试验研究及其对性能的影响[J]. 制冷与空调(北京), 2018, 18(1):40-45. (XIA Tian. Experimental research on refrigerant charge capacity for light commercial unitary air-conditioning unit and its impacts on performance[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2018, 18(1):40-45.)

[4] 康艺, 张春路, 葛美才, 等. 分体式冷凝排风新风机组的制冷剂充注量优化[J]. 制冷技术, 2017, 37(2):51-55. (KANG Yi, ZHANG Chunlu, GE Meicai, et al. Refrigerant charge optimization in a split condensing exhaust air heat recovery unit[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(2):51-55.)

[5] 刘杰, 赵宇, 祁照岗, 等. 制冷剂充注量对新型换热器汽车空调的影响[J]. 制冷学报, 2011, 32(1):12-15. (LIU Jie, ZHAO Yu, QI Zhaogang, et al. Impact of refrigerant charge on mobile air conditioning system with new heat exchanger[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(1):12-15.)

[6] 田德强, 李平, 逯兆栋, 等. R290 制冷系统节流毛细管的设计及分析[J]. 家电科技, 2018(增刊 1):125-129. (TIAN Deqiang, LI Ping, LU Zhaodong, et al. Calculation and analysis of throttle capillaries of throttle capillaries in R290 refrigeration system[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2018(Suppl. 1):125-129.)

[7] 李泽芳, 苏庆勇. 单元式空调机节流毛细管分液头的改进与实验[J]. 装备制造技术, 2018(3):18-19. (LI Zefang, SU Qingyong. The improvement and experiment of unitary air- conditioner capillary tube distributor[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(3):18-19.)

[8] 袁朝阳, 陶乐仁, 虞中旸, 等. 使用电子膨胀阀的空气源热泵热水器的实验研究与优化[J]. 热能动力工程, 2018, 33(8):8-14,44. (YUAN Zhaoyang, TAO Leren, YU Zhongyang, et al. Optimization and experimental study on air source heat pump water heater with electronic expansion valve[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(8):8-14,44.)

[9] 王琳, 李慧. 多联机系统中电子膨胀阀作用性能分析[J]. 节能, 2017, 36(5):58-60. (WANG Lin, LI Hui. Performance analysis of electronic expansion valve in VRV

[J]. Energy Conservation, 2017, 36(5):58-60.)

[10] 殷秀娓, 王文. 小型制冷系统制冷剂充注量的试验研究[J]. 流体机械, 2016, 44(9):61-66. (YIN Xiuwei, WANG Wen. Experimental study of charge inventory in unitary products[J]. Fluid Machinery, 2016, 44(9):61-66.)

[11] 李鑫. 室内外温度对制冷系统制冷剂最佳充注量的影响[J]. 制冷与空调(北京), 2018, 18(8):38-42,37. (LI Xin. Effect of indoor and outdoor temperarures on optimum refrigerant charge amount of refrigeration system[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2018, 18(8):38-42, 37.)

[12] 虞中旸, 陶乐仁, 袁朝阳. 热泵热水器中电子膨胀阀节流特性的试验研究[J]. 热能动力工程,2018,33(9):79-85. (YU Zhongyang, TAO Leren, YUAN Zhaoyang. Experimental study on throttling characteristics of electronic expansion valve in heat pump water heater[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(9): 79-85.)

[13] 周国兵. 绝热毛细管制冷剂流动特性及与系统匹配研究[D]. 天津:天津大学, 2004. (ZHOU Guobing. Study on refrigerant flow characteristics in adiabatic capillary tubes and matching with the system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.)

[14] 孔祥敏, 刘何清, 王浩. 小型空调装置毛细管长度计算方法研究[J]. 制冷, 2013, 32(1):1-6. (KONG Xiangmin, LIU Heqing, WANG Hao. Research on the calculation method of capillary length about small air conditioning equipment[J]. Refrigeration, 2013, 32(1):1-6.)

[15] 彦启森, 石文星, 田长青. 空气调节用制冷技术[M]. 4版. 北京:中国建筑工业出版社,2010. (YAN Qisen, SHI Wenxing, TIAN Changqing. Refrigeration technology for air-conditioning[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press,2010.)

[16] 房间空气调节器:GB/T 7725—2004[S]. 北京:中国标准出版社, 2004. (Room air conditioner: GB/T 7725—2004[S]. Beijing: China Standards Press, 2004.)

[17] 葛云亭, 彦启森. 蒸发器动态参数数学模型的建立与理论计算[J]. 制冷学报,1995(1):9-17. (GE Yunting, YAN Qisen. Foundation of dynamic parameter model and theoritical calculation of evaporator[J]. Journal of Refrigeration, 1995(1):9-17.)

通信作者简介

余桢,男,主任工程师,深圳麦克维尔空调有限公司,13480815713,E-mail:yu.zhen@mcquay.com.cn。研究方向:高能效空调的研究。

About the corresponding author

Yu Zhen, male, chief engineer, Shenzhen McQuay Air Conditioning Co., Ltd., +86 13480815713, E-mail: yu.zhen@mcquay.com.cn. Research fields: research on high energy efficiency air conditioning.