

# 寒冷地区多联机的设计与开发

刘敏 曹锐 曹培春 张文强

(青岛海信日立空调系统有限公司)

**摘要** 设计并开发寒冷地区多联机产品,产品最大容量可达85 kW(30 hp)。制热工况下产品具备4种运行模式。产品通过压缩机喷液设计和热气旁通除霜模式大幅提升低温制热能力和热舒适特性,实现室外最低-15℃时制热能力无衰减。试验结果显示,热气旁通除霜模式的平均额定能力比率比逆循环除霜模式的提升8.17%,前者的除霜时间仅为逆循环除霜模式的68.28%。

**关键词** 多联机;模块机;低温制热;制热能力;产品开发

## Design and development of multi-connected air-condition(heat pump) unit for low-temperature region

Liu Min Cao Rui Cao Peichun Zhang Wenqiang

(Qingdao Hisense Hitachi Air-conditioning Systems Co., Ltd.)

**ABSTRACT** A series of multi-connected air-condition(heat pump) unit for low-temperature region is designed and developed with a maximum capacity of 85 kW (30 hp). The products obtain four operating modes under heating conditions. With the designs of the liquid ejection in compressor and the hot-gas bypass defrosting mode, significant improvements on heating capacity and thermal comfort are achieved and non-attenuation of heating capacity is obtained in a low outdoor temperature of -15℃. The experimental results indicate that the average nominal heating capacity ratio of the hot-gas bypass defrosting mode has an 8.17% increase than that of the reversing cycle defrosting mode. The defrosting time of the hot-gas bypass defrosting mode is only 68.28% of that of the reversing cycle defrosting mode.

**KEY WORDS** multi-connected air-condition(heat pump)unit; modular product; low-temperature heating; heating capacity; product development

多联式空调(热泵)机组具备负荷覆盖范围大、控制灵活、部分负荷条件下能效比高等特点<sup>[1-3]</sup>。目前我国华北、东北等寒冷地区多联机应用较少,主要是因为北方有依靠燃煤或燃气进行冬季供热的传统,且多联机的制热能力随着环境温度的降低而降低<sup>[4]</sup>。在寒冷地区等极低温场合(如室外低于-10℃),一方面多联机运行压缩比较大,使得压缩机的容积效率较低,制冷剂质量流量不足,导致系统制热量无法满足需求;另一方面,极低温制热工况下压缩机的排气温度快速升高,多

联机的控制策略会限制压缩机的运行频率。这2方面的因素使得极低温工况下多联机的制热量衰减,限制了部分多联机产品在寒冷地区的使用。

### 1 寒冷地区多联式模块机产品介绍

笔者开发的寒冷地区多联机由3个单模块构成:16 kW 模块(RAS-160FSCNY1Q,6 hp),22.4 kW 模块(RAS-224FSCNY1Q,8 hp)和28 kW 模块(RAS-280FSCNY1Q,10 hp)。该系列产品最大模块组合容量为85 kW(30 hp)。各容量模块组合的形式如表1所示。

收稿日期:2016-09-19

作者简介:刘敏,博士,高级工程师,主要从事变频多联式系统的研究、设计与开发,以及新型制冷技术和高效除霜技术的研究与应用。

表 1 寒冷地区多联机模块组合形式

容量	33.5 kW (12 hp)	40 kW (14 hp)	45 kW (16 hp)	50 kW (18 hp)	56 kW (20 hp)
型号	RAS-335FSCNY1Q	RAS-400FSCNY1Q	RAS-450FSCNY1Q	RAS-500FSCNY1Q	RAS-560FSCNY1Q
组合模式 (2 模块)	RAS-160FSCNY1Q RAS-160FSCNY1Q	RAS-160FSCNY1Q RAS-224FSCNY1Q	RAS-224FSCNY1Q RAS-224FSCNY1Q	RAS-224FSCNY1Q RAS-280FSCNY1Q	RAS-280FSCNY1Q RAS-280FSCNY1Q
容量	63 kW (22 hp)	69 kW (24 hp)	73 kW (26 hp)	80 kW (28 hp)	85 kW (30 hp)
型号	RAS-630FSCNY1Q	RAS-690FSCNY1Q	RAS-730FSCNY1Q	RAS-800FSCNY1Q	RAS-850FSCNY1Q
组合模式 (3 模块)	RAS-160FSCNY1Q RAS-224FSCNY1Q RAS-224FSCNY1Q	RAS-224FSCNY1Q RAS-224FSCNY1Q RAS-224FSCNY1Q	RAS-224FSCNY1Q RAS-224FSCNY1Q RAS-280FSCNY1Q	RAS-224FSCNY1Q RAS-280FSCNY1Q RAS-280FSCNY1Q	RAS-280FSCNY1Q RAS-280FSCNY1Q RAS-280FSCNY1Q

2 循环系统及控制方法

单模块由主流路、卸载流路、热气除霜流路和喷射流路构成。主流路包含变频压缩机、定速压缩机(16 kW 模块仅有变频压缩机)、单向阀、高压压力传感器、四通换向阀、室外换热器、室外电子膨胀阀、过冷电子膨胀阀、过冷却器、切换电磁阀、低压压力传感器和气液分离器。卸载流路由卸载电磁阀、卸载毛细管和相应过滤器组成。热气除霜流路由热气旁通电子膨胀阀和相应过滤器组成。喷射流路由喷射电磁阀、消声器和喷射毛细管组成。

2.1 通常制热模式

当室外环境温度  $t_a$  较高(如  $t_a \geq 5^\circ\text{C}$ ) 或者系统所需供热负荷不太高(如部分压缩机未运转)时,笔者设计的多联机采用通常制热模式,如图 1

所示。该模式的循环方式被现有大部分多联机产品所采用,机组仅由主流路和卸载流路组成。热气旁通电子膨胀阀全闭以关闭热气除霜流路;喷射电磁阀关闭以关闭喷射流路。切换电磁阀打开,过冷电子膨胀阀的开度根据过冷却器辅回路制冷剂的蒸发过热度控制,该控制策略有助于提升压缩机吸气过热度,防止压缩机发生“液压缩”。主流路中制冷剂经冷却器后焓值降低,经室外电子膨胀阀节流降压后可提升蒸发侧吸热能力,从而适当提升机组制热能力;对于制冷工况,过冷却器后主流路过冷度的增加能够防止制冷剂在室内机与室外机间的长配管中闪发,保证长配管应用场合的制冷能力。鉴于上述诸多优点,笔者所在公司的大部分多联机产品中均有过冷却器结合过冷电子膨胀阀的设计。

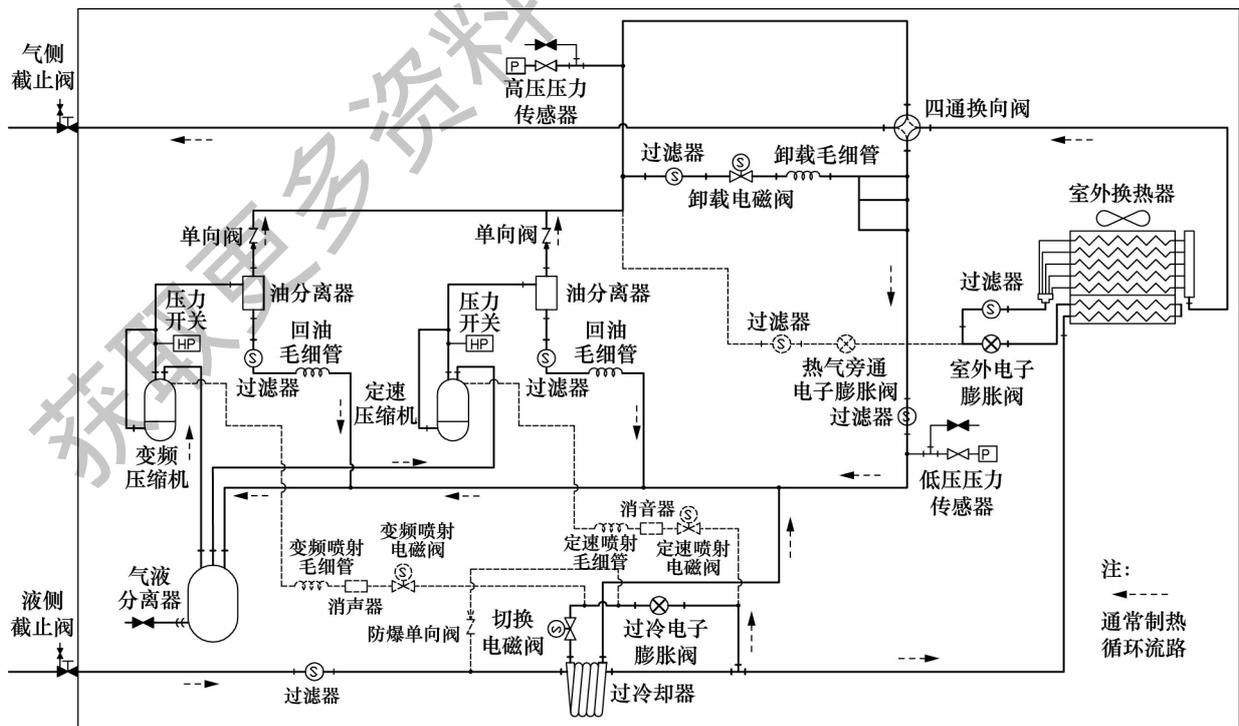


图 1 通常制热模式循环回路

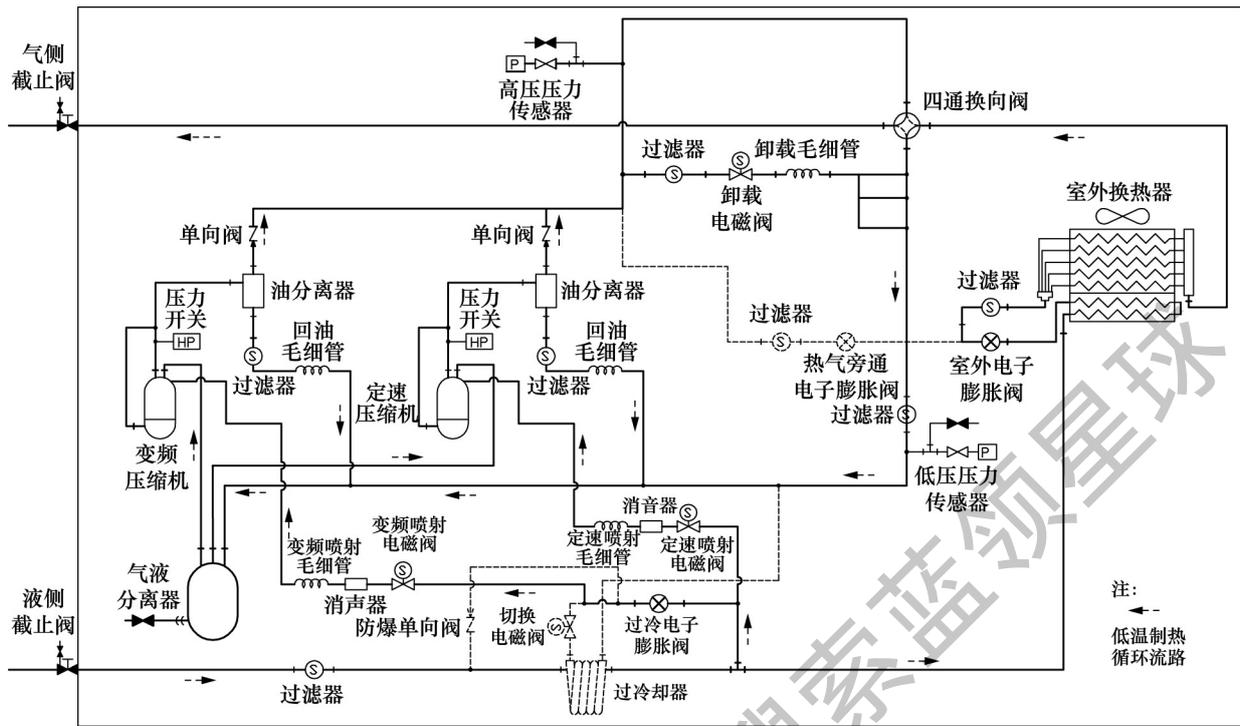


图 2 低温制热模式循环回路

卸载回路用于控制过渡阶段或极端工况下的压力状态,保证系统安全性。在高温制热工况且较少室内机运行时排气压力  $p_d$  过高(如  $p_d \geq 3.6$  MPa),则可打开卸载电磁阀降低  $p_d$ ;在启动阶段或除霜后再次运行制热时,机组吸气压力  $p_s$  较低(如  $p_s \leq 0.11$  MPa),则可打开卸载电磁阀将高压制冷剂旁通至低压侧,以快速提升  $p_s$ 。

### 2.2 低温制热模式

当室外环境温度  $t_a$  较低(如  $t_a \leq -6$  °C)时,低温制热运转会使得机组排气温度  $t_d$  较高(如  $\geq 100$  °C),为保护压缩机可靠性,控制上会限制压缩机频率或降低其运转频率以降低  $t_d$ ,但频率的降低会降低机组的制热能力。因此,普通模块机存在低温制热能力衰减的问题。图 2 所示为笔者设计的低温制热模式,通过关闭切换电磁阀使得过冷却器不起作用<sup>[6]</sup>。对于定速压缩机,打开定速喷射电磁阀,液相制冷剂经过喷射流路进入压缩机中间腔以降低排气温度;对于变频压缩机,喷射的液相制冷剂量由变频喷射毛细管规格和过冷电子膨胀阀的开度共同决定。制冷剂喷射主要用于降低  $t_d$ ,因此压缩机喷射口靠近排气口,如图 3 所示。在低温制热模式下,过冷电子膨胀阀的开度根据变频压缩机的排气过热度调节,依据特定的目标排气温度可有效控制低温制热时压缩机的  $t_d$ 。该模式

运行至停机时,变频喷射电磁阀和过冷电子膨胀阀之间会封存一部分液态制冷剂,如果长时间停机且外部温度升高时会导致这部分制冷剂压力升高,因此设置防爆单向阀以防止该段管路破裂及阀类的失效。

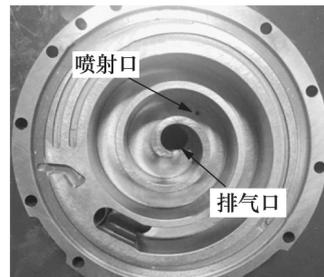


图 3 压缩机动涡旋盘实物图

### 2.3 逆循环除霜模式

普通多联机切换四通换向阀实现逆循环除霜,如图 4 所示。四通换向阀断电,室外换热器作为冷凝器,压缩机排气进入室外换热器进行除霜,笔者设计控制室外电子膨胀阀全开,室内电子膨胀阀根据室内换热器的过热度进行控制(控制出口过热度为 4 °C),切换电磁阀打开且过冷却器工作,过冷电子膨胀阀的开度根据过冷却器的辅回路过热度进行控制(控制辅回路过热度为 5 °C),热气旁通电子膨胀阀全闭,喷射电磁阀关闭。逆循环除霜过程使得室外换热器由低温低压的蒸发

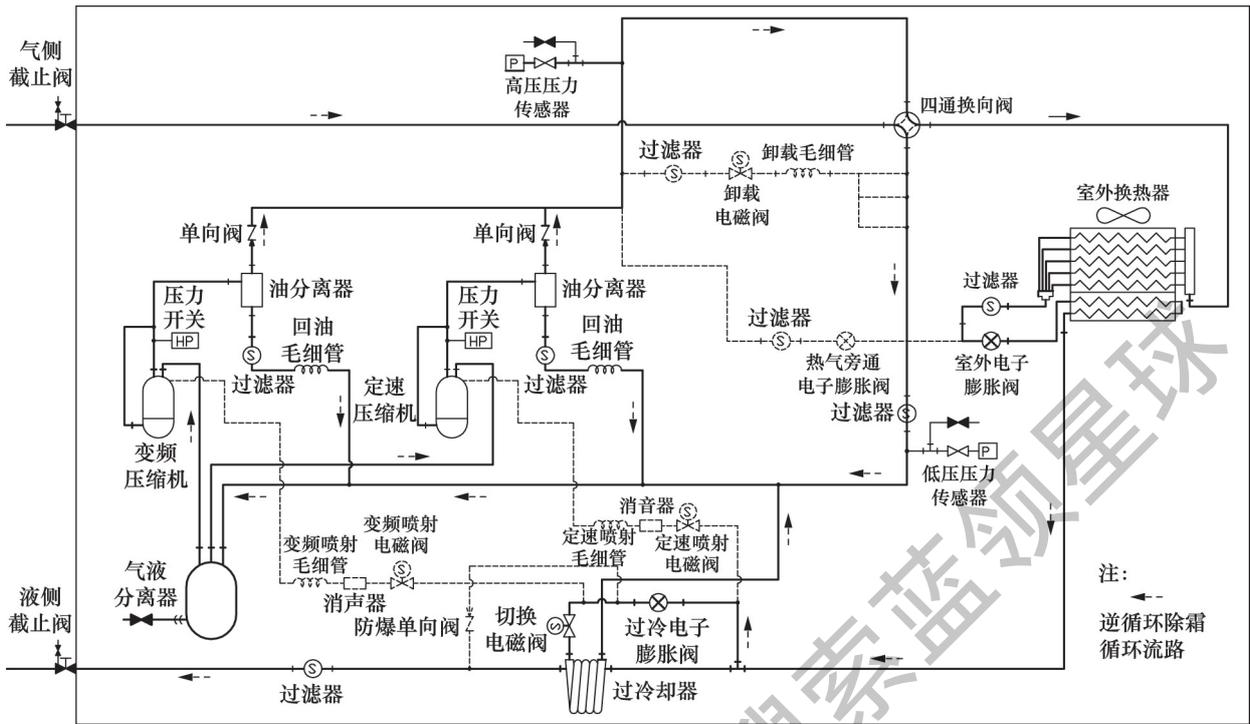


图 4 逆循环除霜模式循环回路

器切换至高温高压的冷凝器,同样室内换热器由高温的冷凝器切换至低温的蒸发器,均存在高、低温状态的热损失,导致整体制热能力下降,且除霜后室内机再次制热时出风温度上升缓慢。

### 2.4 热气旁通除霜模式

为解决逆循环除霜的上述不足,笔者设计热气旁通除霜模式,如图 5 所示。该模式下,四通换向阀保持通电,使得除霜过程中室内侧制冷剂流

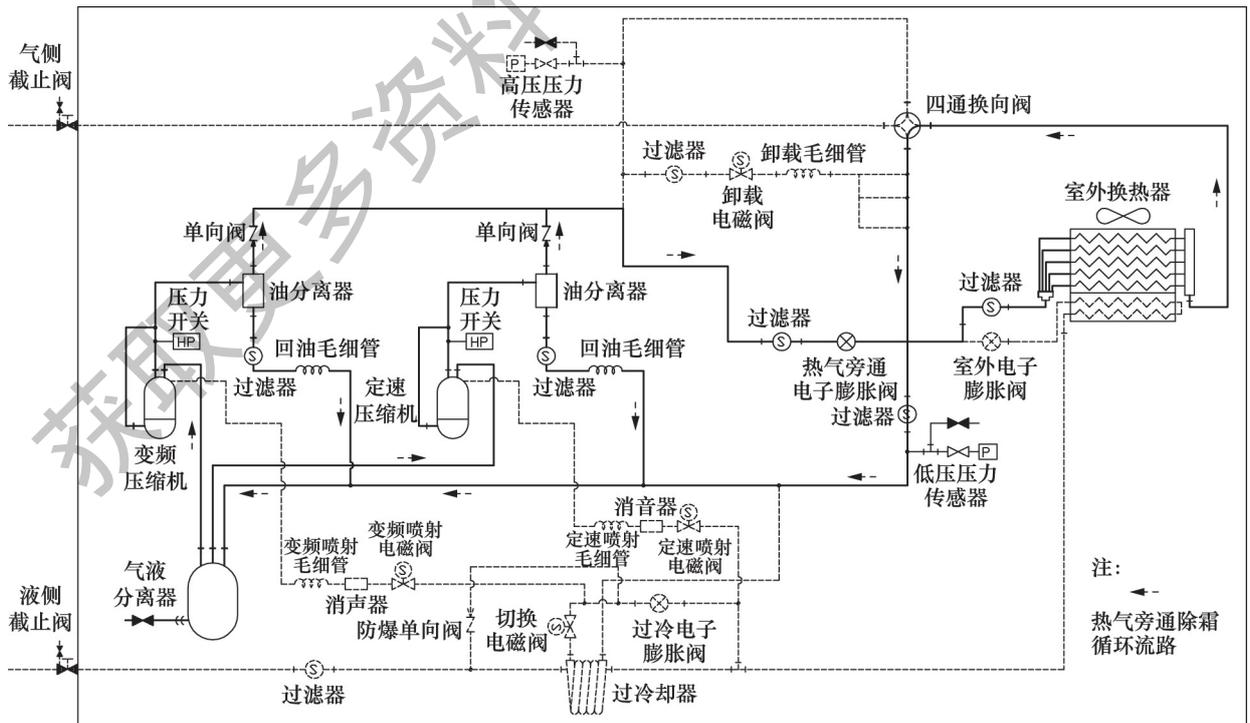


图 5 热气旁通除霜模式循环回路

路不须切换;室外电子膨胀阀关闭,喷射电磁阀关闭,热气旁通电子膨胀阀设置为特定开度,压缩机的排气直接进入室外换热器进行除霜。由于该模式下室内机无须在制热和除霜过程中切换制冷剂流向,使得除霜中室内机依然可维持高温状态,除霜后再次制热时室内机的出风温度可以快速提升,机组整体制热能力提升且热舒适特性好<sup>[6]</sup>。不同于逆循环除霜,该模式并不回收室内机的热量进行除霜,仅依靠压缩机的排热进行除霜,因此仅在室外换热器结霜量较小时应用热气旁通除霜;当结霜量较大时,机组采用逆循环除霜。为了实时判断换热器的结霜量,笔者设计结霜量自动检测技术:根据室外风机功率增长比率  $\Delta W_{fan}$ ,室外环境温度  $t_a$  和室外液管温度  $t_e$  综合判定;在给定  $t_a$  条件下,  $t_e$  与  $\Delta W_{fan}$  处于特定区间时机组进入热气旁通除霜模式。例如,当  $t_a = -13\text{ }^\circ\text{C}$  时,机组同时满足  $-20\text{ }^\circ\text{C} \leq t_e \leq 16.8\text{ }^\circ\text{C}$  且  $110\% \leq \Delta W_{fan} \leq 125\%$  则开启旁通除霜。关于结霜量自动检测技术的详细介绍,可参见文献<sup>[7]</sup>。

### 3 试验结果

为考察热气旁通除霜的效果,采用 RAS-280FSCNY1Q 模块搭配 4 台室内机对不同除霜模式的出风温度和制热性能进行试验研究,4 台室内机的容量分别为 2.2 kW, 5.0 kW, 8.0 kW 和 12.5 kW,室内机与室外机间配管长度为 10 m。图 6 所示为该 10 hp 机组在 100% 负荷运转时室内机出风温度的变化。由图可以看出,热气旁通除霜后再次制热时,室内机经过 5 min 出风温度能快速上升至稳定值 38.5  $^\circ\text{C}$ ;逆循环除霜后再次制热,室内机出风温度则需要 11 min 才能达到其温度值 40  $^\circ\text{C}$ 。可见,热气旁通除霜后制热的热舒适特性更好。图 7 所示为该机组的制热性能变化,其中额定能力比率为实测制热量与额定制热量的比值,额定功率比率为实测制热功率与额定制热功率的比值,该机组的额定制热量与功率分别为 31.5 kW 及 8.39 kW。由图可以看出,热气旁通除霜仅依靠压缩机的排热,为保证除霜量需要提升变频压缩机运转频率至 100 Hz;逆循环除霜可回收室内侧的热量用于除霜,因此大部分情况下(排气压力  $p_d$  不低于 1.8 MPa)变频压缩机可采用 31 Hz 的频率运转即可。

为了削弱机组状态参数变化对制热性能的影响,进一步研究多模块组合时系统在不同除霜模式下的制热性能。采用 2 台 RAS-224FSCNY1Q

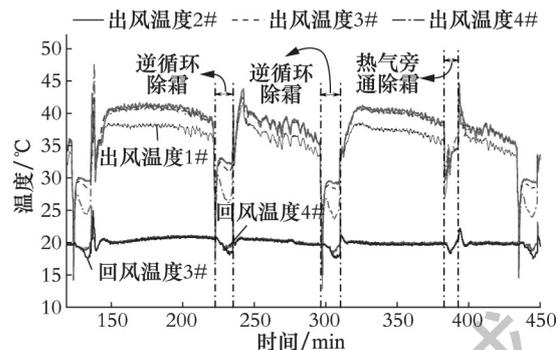


图6 不同除霜模式的出风温度变化

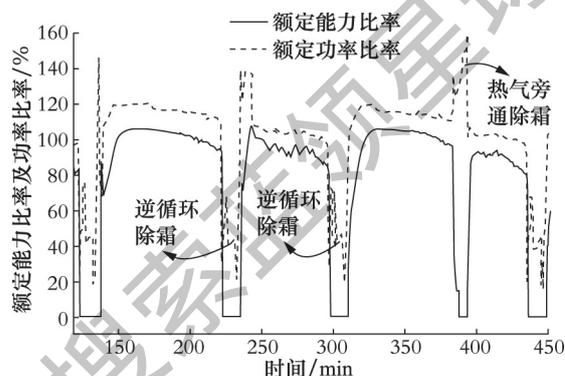


图7 不同除霜模式的制热性能变化

机组进行模块组合,搭配 3 台 16 kW 容量的室内机进行除霜性能试验研究。RAS-224FSCNY1Q 机组的额定制热能力和功率分别为 25 kW 和 6.44 kW。表 2 所示为 2 种除霜模式的制热性能比较结果,测试工况为室外干/湿球温度为 5  $^\circ\text{C}/3\text{ }^\circ\text{C}$ ,室内干球温度为 19  $^\circ\text{C}$ 。从表 2 可以看出,热气旁通除霜模式下 2 模块系统的平均额定能力比率为 98.6%,比逆循环除霜模式的平均额定能力比率提升 8.17%,前者的实测制热量平均值比后者的增加 3.72 kW;由于热气旁通除霜仅依靠压缩机的排热,需要高频运转,使得其制热功率比逆循环除霜增加了 2.28 kW,最终前者的 COP 比后者的降低了 4.45%。考虑到寒冷地区优先满足供热能力的需求,因此在机组能效相当的前提下,热气旁通除霜模式能满足市场应用。从表 2 还可以看出,热气旁通除霜模式的除霜时间仅为逆循环除霜模式的 68.28%,可有效提升用户使用的热舒适特性。

如表 3 所示,基于寒冷地区多联机的技术资料<sup>①</sup>,进一步比较所开发的产品与普通多联机在不同低温制热工况下的制热能力。从表 3 可以看出,

①室外机技术手册:FLEX MULTI 变频控制多联式空调系统寒冷地模块机系列,TC12015010A. 2015.

表 2 两种除霜模式的制热性能比较

参数	热气旁通除霜					逆循环除霜				
	第一周期	第二周期	第三周期	第四周期	平均值	第一周期	第二周期	第三周期	第四周期	平均值
实测制热能力/kW	49.19	49.97	48.96	49.12	49.31	45.87	45.57	44.21	46.69	45.59
额定能力比率/%	98.40	99.90	97.90	98.20	98.60	91.70	91.10	88.40	93.40	91.15
实测制热功率/kW	19.45	19.46	19.68	19.70	19.57	17.43	17.13	16.90	17.70	17.29
额定功率比率/%	150.9	151.0	152.7	152.9	151.9	135.2	132.9	131.1	137.3	134.1
COP	2.53	2.57	2.49	2.49	2.52	2.63	2.66	2.62	2.64	2.64
制热时间/min	57	51	43	50	50.25	57	47	58	50	53
除霜时间/min	5	4.8	4.8	5.2	4.95	6	9	9	5	7.25

表 3 寒冷地区多联机与普通多联机低温制热能力的比较<sup>①</sup>

室外湿球温度 /℃	参数	22.4 kW 机组	28 kW 机组	33.5 kW 机组	45 kW 机组	56 kW 机组	69 kW 机组	73 kW 机组	85 kW 机组
-10	普通多联机 制热量/kW	20.1	24.8	29.7	39.1	49.6	60.4	65.3	74.7
-15		18.0	22.2	26.6	35.0	44.4	54.2	58.6	67.0
-20		16.0	20.2	23.3	30.1	40.4	48.2	51.3	58.0
-10	寒冷地区多联机 制热量/kW	25.0	31.5	37.6	50.0	63.0	75.0	81.5	94.5
-15		25.0	31.5	37.6	50.0	63.0	75.0	81.5	94.5
-20		22.4	28.0	33.6	45.0	56.0	67.2	72.8	84.0
-10	制热量提升比率/%	24.4	27.0	26.6	27.9	27.0	24.2	24.8	26.5
-15		38.9	41.9	41.4	42.9	41.9	38.4	39.1	41.0
-20		40.0	38.6	44.2	49.5	38.6	39.4	41.9	44.8

所开发的寒冷地区多联机产品能够保证室外最低 -15℃ 时制热能力无衰减;相比于普通多联机,寒冷地区多联机在室外湿球温度 -10℃, -15℃ 及 -20℃ 时的制热能力分别提升 24.2%~27.9%, 38.4%~42.9% 和 38.6%~49.5%。可见,所开发的寒冷地区多联机能够大幅提升低温制热能力和热舒适特性,从而有效扩大多联机的低温应用范围。

#### 4 结论

笔者设计并开发了寒冷地区多联机,产品具备 3 个模块:16 kW 模块(6 hp)、22.4 kW 模块(8 hp)和 28 kW 模块(10 hp),通过模块组合最高达到 85 kW(30 hp)容量,主要结论如下:

1) 所开发的产品在制热工况下具备通常制热模式、低温制热模式、逆循环除霜模式和热气旁通除霜模式,基于有限的部件实现多重循环回路和控制策略。

2) 低温制热模式下通过压缩机喷液控制压缩机温度,以提升极低温制热时压缩机的运行频率;设计热气旁通除霜模式,提升机组平均制热能力和热舒适特性。

3) 所开发的产品能够实现室外最低 -15℃ 时制热能力无衰减;相比于普通多联机,寒冷地区多联机在室外湿球温度 -10℃, -15℃ 及 -20℃ 时制热能力分别提升 24.2%~27.9%, 38.4%~42.9% 和 38.6%~49.5%。

4) 试验结果显示,热气旁通除霜后再次制热时,室内机经过 5 min 出风温度能快速上升至稳定值 38.5℃,其除霜时间仅为逆循环除霜模式的 68.28%;系统采用 2 个 22.4 kW 模块组合时,热气旁通除霜模式的平均额定能力比率比逆循环除霜模式的提升 8.17%,前者的实测制热量平均值比后者的增加 3.72 kW。

#### 参考文献

- [1] MENG J J, LIU M, ZHANG W Q, et al. Experimental investigation on cooling performance of VRF system with microchannel condenser [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 81(1): 232-241.
- [2] 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.
- [3] 王旭辉, 夏建军, 彭琛, 等. VRF 空调系统部分负荷特性的实测研究 [J]. 建筑科学, 2010, 26(10): 151-156.
- [4] 薛卫华, 刘传聚, 陈沛霖. 变频控制热泵式 VRV 空调机组冬季运行特性研究 [J]. 节能技术, 2000, 18(5): 3-6.
- [5] 刘敏, 刘立强, 梁爱云. 一种强热型室外机、热泵系统及其控制方法: 201510381850. 5 [P]. 2015-06-30.
- [6] 刘敏, 王战术. 一种室外机、多联式热泵系统及其控制方法: 201510334238. 2 [P]. 2015-06-16.
- [7] 刘敏, 郭来红, 熊志洪. 一种热泵系统结霜量自动检测的除霜控制方法及装置: 201510287207. 6 [P]. 2015-05-29.