

多联机冷凝余热利用研究

刘合心 余 凯
(珠海格力电器股份有限公司 珠海 519070)

摘要: 阐述了多联机冷凝器余热利用的常见方式。在多联空调热水机系统上,从能量利用角度,分析了其冷凝余热利用方式。研究了多联空调热水机冷凝余热利用控制策略,并探讨了多联机冷凝余热利用能效评价方法。

关键词: 多联空调热水机; 冷凝余热; 实验研究; 能效评价方法

Abstract: The normal methods of application of condensing heat in VRF were described. In the system of VRF water heater unit, the application of condensing heat was analyzed from the aspect of energy utilization. The control strategy of condensing heat from VRF water heater unit was studied, and the methods of evaluation for Energy Efficiency about the application of condensing heat from VRF unit were discussed.

Key words: VRF water heater unit; condensing heat; experimental research; methods of evaluation for energy efficiency

前言

随着经济的发展,人民的生活水平不断提高,人们对家居环境舒适度的要求已成为常态生活需求。包含多联机在内的空调机组日益普及,为创造舒适的家居环境提供了基础。但是,同时也带来建筑能耗的迅速增长,大气环境污染日趋严重,甚至导致局部地区产生了热岛效益。而多联机在空调机组中的市场份额增长迅猛,已成为空调家族的主要成员之一。所以,多联机的冷凝余热利用可带来较大的社会效益和经济效益,即可以到达节能的目的,又在一定程度上缓解了对大气环境的污染。在这个背景下,多联机的冷凝余热利用研究显得较为迫切。

1 多联机冷凝余热利用的常见形式

多联机的冷凝器余热的用途一般是用来空调制热和制热水。目前对多联机冷凝余热利用的常见形式有热回收多联机和多联空调热水机。

1.1 热回收多联机

与普通多联机相比,热回收多联机最突出的特点是不同的室内机可同时开空调制冷和空调制热。也就是说,一个室内机正在运行空调制冷的同时,另一台室内机可运行空调制热。热回收多联机不仅仅可克服普通多联机室内机必须同模式运行的

限制,满足不同房间不同家居环境需求,而且充分利用了室内原本需要由空调系统带走的冷量和热量,从而实现舒适和节能双重目的^[1]。

工作原理: 空调系统由室外机、室内机和冷媒调节器组成。室外机有三个冷媒管,分别是高压气管(排气管)、低压气管和液管。冷媒分配器由两个室内电磁阀和室内电子膨胀阀组成。室外机与室内机之间由通讯信号链接,冷媒调节器由室内机根据各自的模式需求控制。当有制冷需求时,冷媒调节器动作,室内机的两个连接管分别与室外机的液管和低压气管相连,从而使得液管中的中压态的液体冷媒在室内电子膨胀阀节流后,到其中蒸发,然后回到室外机的吸气侧。当有制热需求时,冷媒调节器动作,室内机的两个连接管分别与室外机的高压气管和液管相连,从使得高压气管的排气直接到室内机中冷凝,再经过室内电子膨胀阀节流,回到液管。以完全热回收为例进行说明,系统流程见图 1^[1]。

所谓完全热回收,指的是制冷内机的热负荷与制热内机的相当,此时室外换热器不参与换热,制冷内机产生的冷凝余热完全被制热内机利用。具体流程如下:从压缩机 2 出来的排气经过高压气管 8,通过室内电磁阀 11(室内电磁阀 12 关闭),进入制热内机 14,并在其中冷凝,为室内提供热量。在室内电

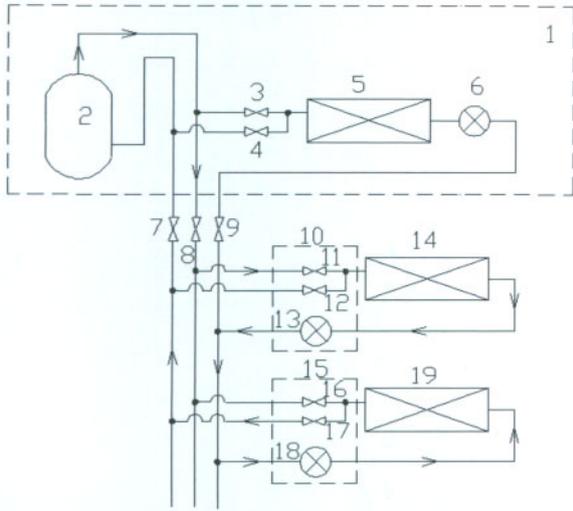


图1 热回收多联机系统完全热回收流程

1 室外机 2 压缩机 3/4 室外电磁阀 5 室外换热器 6 室外电子膨胀阀 7 低压气管 8 高压气管 9 液管 10/15 冷媒调节器 11/12/16/17 室内电磁阀 13/18 室内电子膨胀阀 14/19 室内换热器

子膨胀阀 13 中节流后，冷媒变成中压态，进入液管 9。室外机电子膨胀阀 6 关闭，而室内电子膨胀阀 18 处于开启状态。中压态液态冷媒从室内电子膨胀阀 18，在制冷内机 19 中蒸发，为室内提供冷量，再经过室内电磁阀 17（室内电磁阀 16 关闭），从低压气管 7 中回到压缩机 2 中。

1.2 多联空调热水机

多联空调热水机是近年来出现的新型空调系统，主要由室

外机、冷媒 - 水热交换器、水箱和室内机组成。冷媒 - 水热交换器内有套管（或板式）换热器、水泵等。该机组的主要功能是在空调制冷或制热的同时，提供生活热水。

当部分室内机制冷时，伴随产生的冷凝余热可通过室外机的管路切换到冷媒 - 水热交换器内，并在其中换热，热量转移到水箱，加热热水，从而实现多联机冷凝余热的利用。

2 多联空调热水机冷凝余热利用方式

2.1 系统概述

多联空调热水机外机系统^[1]由压缩机、四通阀、冷凝器、冷媒 - 水热交换器、汽液分离器、油分、和电子膨胀阀等组成，对接水箱，详见图 2。该系统的冷凝余热利用主要体现在制冷兼制热水模式下，也就是利用室内机制冷时产生的冷凝余热来加热热水。在这个模式下，存在四种情况：制冷内机负荷极小、制冷内机负荷较小、制冷内机负荷与热水发生器负荷相当、制冷内机负荷较大。

为了便于说明，可假设换热器的总负荷为 6HP，热水发生器负荷为 4HP，室内机 15、17、19 分别为 1HP、2HP、3HP。外换热器 10 为大换热器，外换热器 11 为小换热器。

2.2 制冷内机负荷极小情况

以单开 1P 内机制冷为例进行说明，即室内机 15 运行制冷模式。此时制冷内机的负荷远小于制热水负荷，制冷内机作蒸

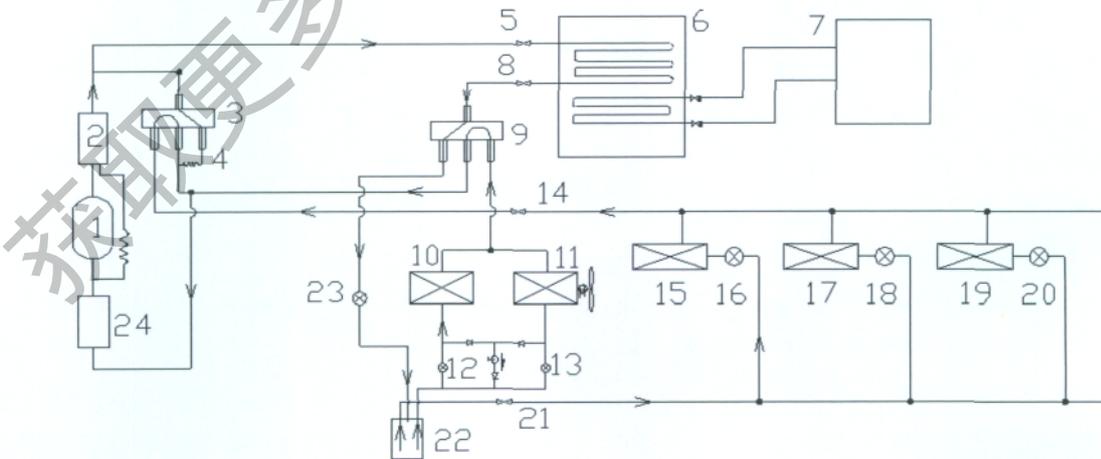


图2 多联空调热水机流程图一^[2]

1 压缩机 2 油分 3/9 四通阀 4 四通阀旁通毛细管 5 气阀 (to 冷媒 - 水热交换器侧) 6 冷媒 - 水热交换器 7 水箱 8 液阀 (to 冷媒 - 水热交换器侧) 10/11 外换热器 12/13/23 室外电子膨胀阀 14 气阀 (to 内机侧) 15/17/19 室内机 16/18/20 室内电子膨胀阀 21 液阀 (to 内机侧) 22 储液罐 24 汽分

蒸发器，冷媒 - 水热交换器作冷凝器，但是需大外换热器作蒸发器使用。

系统流程见图 2，具体说明如下：高压高温态的冷媒从压缩机 1 排出来，流经油分 2。四通阀 3 断电，冷媒无法大量流过四通阀旁通毛细管 4。冷媒从气阀 (to 冷媒 - 水热交换器侧) 5 进入冷媒 - 水热交换器，并在其中冷凝，用于加热水箱 7 中热水。四通阀 9 上电，液态冷媒流经室外电子膨胀阀 23 中再次节流，变成中压液态冷媒，进入储液罐 22。中压态液态冷媒分两部分，一部分在室内电子膨胀阀 16 处节流后，在室内机 15 中蒸发；另一部分在室外电子膨胀阀 12 处节流后 (室外电子膨胀阀 13 处于关闭状态)，在大外换热器 10 中蒸发。两部分低压气态冷媒分别经过四通阀 3 和四通阀 9，汇聚一处，进入汽分 24，回到压缩机 2。

在这种情况下，制冷室内机 15 仅为 1HP，而冷媒 - 水热交换器为 5HP，显然低压侧换热面积太小，所以需要大外换热器 10 参与蒸发。制冷室内机产生的冷凝余热被完全利用，同时部分外换热器也从外界吸收热能，才能满足冷媒 - 水热交换器的热量需求。采用综合能效比^[9]进行热力学分析。

用热力学公式可表达为： $Q_{水} = Q_{内机} + Q_{外换热器} + W$ ，则 $EER_{C+W} = (Q_{水} + Q_{内机}) / W = 2Q_{内机} / W + Q_{外换热器} / W + 1$ 。

2.3 制冷内机负荷较小情况

以单开 3P 内机制冷为例进行说明，即室内机 19 运行制冷模式。此时制冷内机负荷小于制热水负荷，制冷内机作蒸发器，冷媒 - 水热交换器作冷凝器，但是需小外换热器作蒸发器使用。

系统流具体说明如下：高压高温态的冷媒从压缩机 1 排出来，流经油分 2。四通阀 3 断电，冷媒无法大量流过四通阀旁通毛细管 4。冷媒从气阀 (to 冷媒 - 水热交换器侧) 5 进入冷媒 - 水热交换器，并在其中冷凝，用于加热水箱 7 中热水。四通阀 9 上电，液态冷媒流经室外电子膨胀阀 23 中再次节流，变成中压液态冷媒，进入储液罐 22。中压态液态冷媒分两部分，一部分在室内电子膨胀阀 20 处节流后，在室内机 19 中蒸发；另一部分在室外电子膨胀阀 13 处节流后 (室外电子膨胀阀 12 处于关闭状态)，在小外换热器 11 中蒸发。两部分低压气态冷媒分别经过四通阀 3 和四通阀 9，汇聚一处，进入汽分 24，回到压缩机 2。

在这种情况下，制冷室内机 19 为 3HP，而冷媒 - 水热交换器为 5HP，显然低压侧换热面积偏小，所以需要小外换热器 11 参与蒸发。制冷室内机产生的冷凝余热被完全利用，同时部分外换热器也从外界吸收热能，才能满足冷媒 - 水热交换器的热量需求。

用热力学公式表达式与以上相同， $Q_{水} = Q_{内机} + Q_{外换热器} + W$ ，则 $EER_{C+W} = (Q_{水} + Q_{内机}) / W = 2Q_{内机} / W + Q_{外换热器} / W + 1$ 。

2.4 制冷内机负荷与冷媒 - 水热交换器相当情况

以开 1P 内机 + 3P 内机制冷为例进行说明，即室内机 15 和室内机 19 运行制冷模式。此时制冷内机负荷与冷媒 - 水热交换器制热水负荷相当，制冷内机作蒸发器，冷媒 - 水热交换器作冷凝器，无外换热器参与系统换热。

系统流具体说明如下：高压高温态的冷媒从压缩机 1 排出来，流经油分 2。四通阀 3 断电，冷媒无法大量流过四通阀旁通毛细管 4。冷媒从气阀 (to 冷媒 - 水热交换器侧) 5 进入冷媒 - 水热交换器，并在其中冷凝，用于加热水箱 7 中热水。四通阀 9 上电，液态冷媒流经室外电子膨胀阀 23 中再次节流，变成中压液态冷媒，进入储液罐 22。室外电子膨胀阀 12、室外电子膨胀阀 13 和室内电子膨胀阀 18 处于关闭状态。中压态液态冷媒分两部分，一部分在室外电子膨胀阀 16 处节流后在室内机 15 中蒸发；另一部分在室内电子膨胀阀 20 处节流后，在室内机 19 中蒸发。两部分低压气态冷媒分别经过四通阀 3 和四通阀 9，汇聚一处，进入汽分 24，回到压缩机 2。

在这种情况下，制冷室内机总负荷为 4HP，冷媒 - 水热交换器负荷也为 4HP，显然高低压换热面积相当，所以需要无需外换热器 11 参与蒸发。制冷室内机产生的冷凝余热被完全利用，刚好能满足冷媒 - 水热交换器的热量需求。

用热力学公式表达式与以上相同， $Q_{水} = Q_{内机} + W$ ，则 $EER_{C+W} = (Q_{水} + Q_{内机}) / W = 2Q_{内机} / W + 1$ 。

2.5 制冷内机负荷较大情况

以开 1P 内机 + 2P 内机 + 3P 内机制冷为例进行说明，即室内机 15、室内机 17 和室内机 19 运行制冷模式。此时制冷内机负荷比冷媒 - 水热交换器制热水负荷大，制冷内机作蒸发器，冷媒 - 水热交换器作冷凝器，需要外换热器作为冷凝侧换热器，参与系统换热。

系统流具体说明如下：高压高温态的冷媒从压缩机 1 排出来，流经油分 2。四通阀 3 断电，冷媒无法大量流过四通阀旁通毛细管 4。冷媒从气阀 (to 冷媒 - 水热交换器侧) 5 进入冷媒 - 水热交换器，并在其中冷凝，用于加热水箱 7 中热水。四通阀 9 断电，液态冷媒进入外换热器 11 和外换热器 12，进一步冷凝后，流到储液罐 22。室外电子膨胀阀 23 处于关闭状态。中压态液态冷媒分三部分，分别在室内电子膨胀阀 16、18、20 处节流后，在各自室内机中蒸发。低压气态冷媒分别经过四通阀 3 和四通阀 9，汇聚一处，进入汽分 24，回到压缩机 2。

在这种情况下，制冷室内机总负荷为 6HP，冷媒 - 水热交换器负荷仅为 4HP，显然低压侧换热面积比高压侧的大，所以需要需外换热器 11 参与冷凝。制冷室内机产生的冷凝余热太多，不能被完全利用，除了满足冷媒 - 水热交换器的热量需求外，仍有部分冷凝余热释放到外环境中。

用热力学公式表达式与以上相同， $Q_{水} + Q_{外换热器} = Q_{内机} + W$ ，则 $EER_{C+W} = (Q_{水} + Q_{内机}) / W = 2Q_{内机} / W - Q_{外换热器} / W + 1$ 。

3 多联空调热水机冷凝余热利用控制策略

3.1 控制目的

多联空调热水机在进行冷凝余热利用时，实际正在进行制冷兼热水模式，所以需要同时考虑制冷效果和制热水速度。制冷效果和制热水速度的反应参数主要是系统高压、系统低压、冷媒 - 水热交换器进 / 出管温度和内机进 / 中 / 出管温度。

3.2 控制参数

针对以上存在的两个问题，需采用一定的调节策略，用于同时保证制热和热水效果。

与冷媒调节的系统元器件：四通阀；室外电子膨胀阀；室内电子膨胀阀。用于监测数据的传感器：高压传感器；低压传感器；内机进 / 中 / 出管温度传感器；外机进 / 中 / 出管温度传感器；冷媒 - 水热交换器进 / 出管温度传感器。系统设置可调元器件：压缩机频率；外风机频率；水泵频率以及各电子膨胀阀开度。

3.3 控制策略

结合内外环境温度、水温、制冷内机和冷媒 - 水热交换器负荷，计算蒸发侧和冷凝侧的热负荷分配比例，确定四通阀换向方向，以外换热器在系统流向中作蒸发器或冷凝器使用。通过制冷内机的进管温度、出管温度和低压来控制内机电子膨胀阀的开度，冷媒 - 水热交换器电子膨胀阀开度和水泵频率由高压与其进、出管温度控制。而室外电子膨胀阀开度和外风机频率需根据四通阀换向情况而定：当外换热器作为冷凝器使用时，以上两者的控制由高压与外机进、出管温度控制；当外换热器作为蒸发器使用时，以上两者的控制由低压与外机进、出管温度控制。

通过三方面措施，控制冷媒在高压侧和低压侧之间的平衡。同时，系统高压和系统低压影响压缩机的频率，而反过来，压缩机频率、各电子膨胀阀的开度、水泵频率以及外风机频率影响着冷媒在高压侧和低压侧的状态，也间接影响到其分配。

4 多联机冷凝余热利用性能评价体系

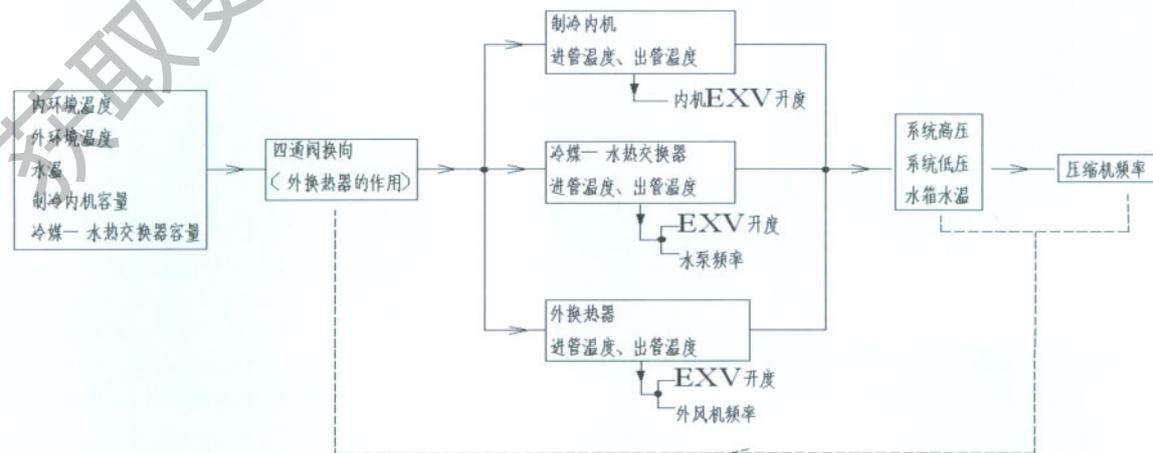


图 3 多联空调热水机热水机冷凝余热利用控制简图

国标 GB/T 18837^[4] 对多联机的制冷性能评价体系进行了完整的描述,其评价 IPLV(C) 已被广泛接受。在规定工况(内 侧 27/19 , 外侧 27/19) 下,分别在 100% 负荷、(75 ± 10)% 负荷、(50 ± 10)% 负荷和 (25 ± 10)% 负荷进行测试能效比 EER。通过计算,得到:

$$IPLV(C) = f(EER_1, EER_2, EER_3, EER_4)$$

但是对于可利用冷凝余热的多联机性能评价无明确的规定。关于这方面的研究,目前一般只是简单地采用综合能效比 EERC+W 进行评价。

$$EER_{C+W} = (Q_C + Q_W) / W$$

这显然未能体现出多联机能够运行不同负荷的特征。需结合以上两者,来综合考虑多联机冷凝余热性能评价。

4.1 热回收多联机

为了体现热回收多联机部分符合的特征,结合实际运行情况,可规定热回收多联机能效测试要求如下。

负荷选择:(75 ± 10)% 制冷 +(25 ± 10)% 制热、(50 ± 10)% 制冷 +(50 ± 10)% 制热、(25 ± 10)% 制冷 +(75 ± 10)% 制热。要求所开的制冷内机与制热内机负荷之和等于 (100 ± 10)%。

工况采用内侧(制冷)环境温度为 27/19 , 内侧(制热)环境温度 20/15 , 外侧环境温度按照制冷内机与制热内机负荷搭配选择。

制冷内机负荷	制热内机负荷	外环境温度/℃
(75 ± 10)%	(25 ± 10)%	27/19
(50 ± 10)%	(50 ± 10)%	27/19
(25 ± 10)%	(75 ± 10)%	7/6

测试出各负荷下的 EER_{1C+W} 、 EER_{2C+W} 、 EER_{3C+W} , 然后可结合 IPLV(C) 计算公式,得到 $IPLV(EER_{C+W}) = f(EER_{1C+W}, EER_{2C+W}, EER_{3C+W})$ 。

4.2 多联空调热水机

在国标 GB/T 21362^[5] 中,对普通热泵热水机的能效比测试做了规定。在空气侧为 20/15 的工况下,进行制热水实验,水温从 15 升到 55 截止。

$$\text{制热量: } Q_h = C \times G \times (t_2 - t_1) / (3600 \times H \times 1000)$$

$$\text{消耗功率: } W = N_0 / H$$

$$\text{性能系数: } COP = Q_h / W$$

结合多联机特点,可规定直流变频多联空调热水机制冷兼热水模式能效测试要求如下:工况采用内侧 27/19 , 外侧

27/19 ;水温从 15 升到 55 截止,分别在分别在 100% 负荷、(75 ± 10)% 负荷、(50 ± 10)% 负荷和 (25 ± 10)% 负荷进行测试能效比 EER_{C+W} 。结合 IPLV(C) 计算公式,得到: $IPLV(EER_{C+W}) = f(EER_{1C+W}, EER_{2C+W}, EER_{3C+W}, EER_{4C+W})$ 。

虽然在该测试过程中制冷量会随着水温的升高发生降低,不符合普通机组的产品检测定量数据必须在条件下采集这一国标规定,但是直流变频空调多联热水机具备烧热水的功能,故其性能比需结合热泵热水的特点,将水温从低烧到高,这是一个相当稳态的加热过程。并且,可考虑提高测试软件精度和计算方法,对制冷量统计进行优化。同时,这一测试方法也与实际使用环境相近。

5 结论

5.1 多联机冷凝余热利用主要形式是热回收多联机和多联空调热水机,前者主要依靠制冷内机和制热内机之间的热量利用实现,后者主要依靠制冷内机和冷媒-水热交换器之间的热量利用实现。

5.2 在不同制冷内机负荷的情况下,多联空调热水机系统可通过四通阀切换,有效地利用冷凝余热。其控制策略关键在于外换热器的分配和冷媒流量。

5.3 从热力学角度考虑,多联空调热水机的冷凝余热利用是相当有利用价值的。

5.4 结合多联机特性和冷凝余热利用特点,通过测试不同内机负荷时冷凝余热利用能效,并进行有效地数据处理,可对多联机冷凝余热利用进行精准的评价。

参考文献

- [1] 倪小静,周赵凤,陈华江.变频技术空调的节能分析——热回收型多元 VRV 空调系统[J].浙江树人大学学报,2004年5月第4卷,第3期:79-82.
- [2] 余凯,韩仁智,《热泵热水空调机组》,中国,专利号 200820189009.1
- [3] 王恕清,陈文祥,俞乔里等.热水空调器产品性能、实验方法及社会效益分析与探讨[J].制冷与空调.2004年2月第4卷,第1期:83-85.
- [4] 国标 GB/T 18837-2002: 15-16
- [5] 国标 GB/T 21362-2008: 16-17