

两级压缩式热泵空调与冰箱复合系统^{*}

刘业凤 刘华凯 赵奎文 马福一
(上海理工大学)

摘要 根据两级压缩式制冷原理和热泵空调与冰箱制冷系统运行工况的不同,提出一种新型两级压缩式热泵空调与冰箱复合系统,介绍其原理及不同工况模式下的实现方式。该系统将热泵空调系统与冰箱系统冷热量相互有效利用,具有节能效果。对一个应用实例进行数值模拟,结果表明:复合系统能耗与常规的各自独立系统的总耗能相比,冬季节节约9%,夏季节节约18%。

关键词 两级压缩;热泵空调;冰箱;中间换热器;复合系统

Compound system of heat pump air-conditioning and refrigerator with two-stage compression

Liu Yefeng Liu Huakai Zhao Kuiwen Ma Fuyi
(University of Shanghai for Science and Technology)

ABSTRACT According to the principle of two-stage compression refrigeration and different running condition between heat pump air-conditioning and refrigerator, puts forward a new compound system of heat pump air-conditioning and refrigerator with two-stage compression. Introduces system principle and different realizing ways under different running status. This system enables energy to be effectively used between heat pump air-conditioning system and refrigerator system, and saves the energy effectively. Simulates numerically an application example, and the results show that compound system can save more energy than the conventional system, about 9% in winter and 18% in summer.

KEY WORDS two-stage compression; heat pump air-conditioning; refrigerator; intermediate heat exchanger; compound system

两级压缩系统以其单级压比不太高的特点,在较大温差环境下进行能量交换时,可降低压缩机排气温度,从而保护压缩机,并提高系统性能系数,减少压缩机功耗。为了充分利用其优越性,国内外许多学者针对各种不同工况下两级压缩系统的特性,作了大量的研究。

针对极高环境温度下单级空调制冷系统运行中存在的压缩机压比过大、换热器热负荷大、性能系数低及经济性差等问题,顾兆林等^[1]采用两级压缩制冷系统对单级制冷系统进行了改造,降低了压缩机排气温度,性能系数提高15%。针对普通

空气源热泵热水器在低温环境下的应用问题,程文浩等^[2]提出双级压缩热泵热水器系统,实现了在寒冷工况下低温空气源热能的利用。周刚等^[3]在空调工况下利用两级压缩的低压级降低高压级压缩机吸气温度,并达到了保护压缩机与节能的目的。田长青等^[4]将双级压缩与变频技术有机结合,提出一种适用于寒冷地区的双级压缩变频空气源热泵系统,在压缩机排气温度低于120℃下提高了系统制热性能系数,可在-18℃以上的室外环境中满足寒冷地区冬季供暖需求。Gan Andre I等^[5]利用2个单独的制冷循环联合运行,分别提供

^{*} 上海市重点学科建设项目(T0503),上海市教委2005年青年发展基金。

收稿日期:2008-06-03

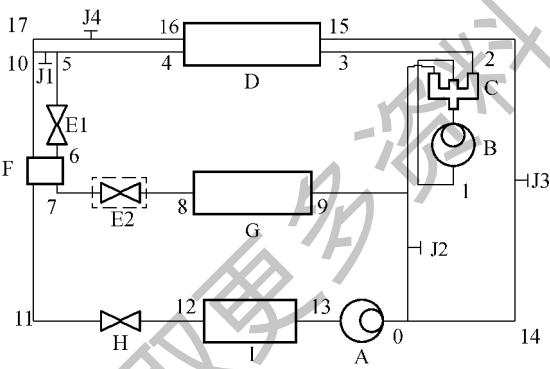
通信作者:刘业凤,Email: yefengliu@tom.com

冰箱冷冻箱与冷藏箱所需冷量,提高了系统效率,并减少了系统除霜次数。Chen Lingen 等^[6]提出2个以上逆卡诺制冷循环组成的联合循环系统的物理模型,优化提高系统性能系数。Thomas Andrew S.等^[7]在超市中使用两级压缩式氨制冷系统在高温环境下为超市展示柜冷冻食品提供冷量。由以上大量研究可见利用两级压缩系统对单级系统改造的益处:利用两级压缩系统将2个单级系统联合运行,在应用两级压缩优点的同时,可分别利用不同压力级实现不同的目的,并可实现单级系统间能量的相互利用。

笔者提出一种两级压缩式热泵空调与冰箱复合系统,在两级压缩式制冷原理的基础上,将热泵空调系统与冰箱系统联合。系统联合运行时空调与冰箱2部分系统冷热量可相互利用以达到节能的目的。部分系统单独运行时与各自独立的分体式空调器、分体式冰箱运行方式相同。

1 复合系统工作原理

将热泵空调循环与冰箱制冷循环通过制冷剂管路的连接实现2个循环的联合,通过中间换热器交换热量,共用1台室外机。通过控制系统改变控制阀的启闭,以实现热泵空调系统与冰箱系统的串并联,满足不同工况的冷热负荷需求。



A. 低压级压缩机; B. 高压级压缩机; C. 四通换向阀
D. 室外机; E1, E2 和 H. 节流阀; F. 中间换热器;
G. 空调室内机; I. 冰箱蒸发器; J1, J2, J3 和 J4. 控制阀。

图1 两级压缩式热泵空调与冰箱复合系统原理图

夏季工况时,热泵空调系统与冰箱系统并联同向循环。高压级压缩机排出的制冷剂在室外机冷凝,一部分制冷剂节流到中间压力进入中间换热器,使另一部分制冷剂进一步过冷,然后进入空调室内机吸热调节房间温度。另一部分制冷剂过冷后节流至低压级压力,进入冰箱蒸发器放出冷量,经低压级压缩机将压力升至中压级压力后与

先节流的中压级制冷剂混合进入高压级压缩机参与循环。

冬季工况时,热泵空调系统与冰箱系统并联逆向循环。热泵循环制冷剂在室外机中蒸发吸热,经高压级压缩机压缩后进入室内机放热冷凝,经节流,在中间换热器中使冰箱循环制冷剂进一步过冷,最后进入室外机吸热,参与循环。冰箱循环制冷剂在室外机放热,冷凝后进入中间换热器获得过冷,然后经节流进入冰箱蒸发器放出冷量,经低压级压缩机压缩升温后进入室外机放热冷凝。

系统将冰箱冷凝器与热泵空调室外机合二为一共同置于室外。夏季工况下,制冷剂在室外机共同利用风机强制对流冷凝,冷凝效果较好,且消除了常规模式下冰箱向房间的散热,减小了夏季空调负荷,并消除了冰箱在房间内易产生噪声的弊端。冬季工况下,冰箱制冷剂在室外机放热,而热泵空调制冷剂在室外机中吸热,能量得到有效利用的同时,可有效防止室外机结霜,为防止室外机结霜提供了一种新的途径。

2 复合系统不同工况具体实现方式

1) 夏季工况

热泵空调与冰箱联合运行时,控制阀 J1 和 J2 开启, J3 和 J4 关闭,节流阀 E2 全开, E1 起节流作用。从高压级压缩机排出的高温高压制冷剂蒸气进入室外机放热冷凝,冷凝后在 5 点分流,一部分制冷剂经节流阀 E1 降至中间压力成为中压级制冷剂,中间换热器提供部分冷量使另一部分制冷剂过冷,然后进入空调室内机,蒸发吸热向房间提供冷量。从 5 点分流后的另一部分制冷剂在中间换热器中获得过冷后,经节流阀 H 降至低压级压力,进入冰箱蒸发器向冰箱提供冷量,经低压级压缩机将压力升至中压级压力后与先节流的中压级制冷剂混合进入高压级压缩机参与循环。

2) 冬季工况

热泵空调系统与冰箱系统并联逆向运行时,控制阀 J1 和 J2 关闭, J3 和 J4 开启,节流阀 E1 全开, E2 起节流作用。热泵循环制冷剂从高压级压缩机排出后进入空调室内机,向房间提供热量,制冷剂自身冷凝,经节流阀 E2 降压后进入中间换热器向冰箱循环制冷剂提供部分冷量使之过冷,然后进入室外机蒸发吸热,最后被吸入高压级压缩机,继续循环。冰箱循环制冷剂从低压级压缩机

排出后, 在室外机放热冷凝, 进入中间换热器获得过冷, 经节流阀 H 降压后进入冰箱蒸发器放出冷量, 最后被吸入低压级压缩机, 继续循环。这种运行方式下, 冰箱循环在室外机放热而热泵空调循环在室外机吸热, 热量互为利用, 可有效防止室外机结霜。

3) 春秋季工况

热泵空调系统可以停运, 冰箱系统单独运行。制冷剂蒸气从低压级压缩机排出, 在室外机放热冷凝, 经节流阀 H 降压后进入冰箱蒸发器放出冷量, 最后被吸入低压级压缩机, 继续循环。这种运行模式下, 由于制冷剂在室外机冷凝, 对流散热效果较好, 可提高过冷度, 增大单位质量制冷剂冷量, 降低能耗。

另外, 在实际操作中, 某些时间空调与冰箱并不同时运行。在控制系统实现部分功能单独运行时, 将控制阀 J1 和 J2 关闭, J3 和 J4 开启, 即可实现热泵空调与冰箱的并联, 系统部分单独运行。热泵空调通过四通换向阀的调节可实现制热或制冷运行模式, 通过压缩机的启停控制空调部分是否运行; 分体式冰箱则通过低压级压缩机的启停来控制冰箱部分是否运行。

3 系统热力性能理论分析

为说明复合系统与常规系统相比具有节能效果, 选取某一实例, 在相同工况参数下对 2 系统分别进行计算。实例条件如下: 某一小型超市, 面积约 25 m², 夏季工况: 房间冷负荷 3 300 W, 冰箱冷负荷 1 000 W; 冬季工况: 房间热负荷 3 300 W, 冰箱冷负荷 600 W。

分别在夏季和冬季工况模式下对复合系统与热泵空调、冰箱组成的常规系统进行模拟计算, 对比分析在满足房间冷热及冰箱负荷要求的前提下 2 种系统压缩机功耗的大小, 据此求出复合系统与常规系统相比的节能率。

3.1 夏季工况下系统热力性能理论分析

系统工况参数: 冷凝温度 54 °C, 过冷度 5 °C。空调制冷剂: 蒸发温度 5 °C, 出口过热度 5 °C; 冰箱制冷剂: 蒸发温度 -26 °C, 出口过热度 26 °C。系统选用制冷剂 R134a。

1) 复合系统

热泵空调循环与冰箱制冷循环联合运行时, 热泵空调循环制冷剂使得冰箱循环制冷剂进一步过冷, 取中间换热器热端温差 34 °C。冰箱无散热

部件, 且能吸收房间热量, 吸热量为透过冰箱保温层的漏热量, 将减小房间负荷约 300 W, 复合系统模式下热泵空调循环负荷按 3 000 W 计算。

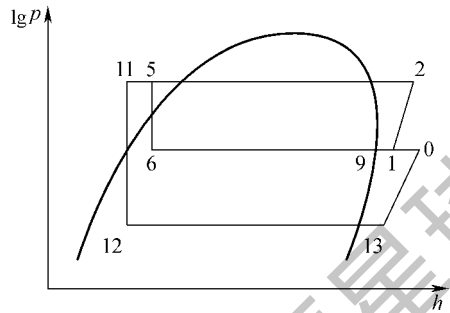


图2 复合系统循环 lg p-h 图

中间换热器热负荷为

$$Q_{\text{inter}} = m_d (h_5 - h_{11}) \quad (1)$$

式中: h_5 和 h_{11} 分别为状态点 5 和 11 的焓值 (kJ/kg); m_d 为低压级制冷剂质量流量 (kg/s)。

由房间负荷与中间换热器负荷, 得高压级制冷剂质量流量为

$$m_g = \frac{Q_{\text{room}} + Q_{\text{inter}}}{h_9 - h_6} + m_d \quad (2)$$

式中: Q_{room} 为房间负荷 (kW); h_6 和 h_9 分别为状态点 6 和 9 的焓值 (kJ/kg)。

低压级压缩机排气与高压级制冷剂蒸气混合过程热平衡关系式为

$$(m_g + m_d) h_1 = m_g h_9 + m_d h_0 \quad (3)$$

式中: h_0 和 h_1 分别为状态点 0 和 1 的焓值 (kJ/kg)。

利用式(3)可求出蒸气混合点 1 的焓值。

2) 常规系统

热泵空调与冰箱各自独立, 热泵空调运行工况与复合系统中热泵空调循环相同。冰箱散热部件位于室内, 透过冰箱保温层的漏热量小于其放热量, 这部分热量将增加系统冷负荷约 200 W, 常规系统模式下空调负荷按 3 500 W 计算。

3.2 冬季工况下系统热力性能理论分析

系统工况参数: 热泵系统制冷剂冷凝温度 54 °C, 过冷度 14 °C。空调制冷剂: 蒸发温度 -10 °C, 出口过热度 10 °C, 常规模式热泵运行工况与复合模式热泵运行工况相同。冰箱制冷剂: 蒸发温度 -26 °C, 出口过热度 26 °C。系统选用制冷剂 R134a。

1) 复合系统

热泵空调制热循环与冰箱制冷循环并联逆向

运行。热泵空调循环制冷剂使得冰箱循环制冷剂进一步过冷,取中间换热器热端温差为 20 °C。由于复合系统冰箱制冷剂在室外冷凝,取冷凝温度 25 °C,过冷度 10 °C。房间内冰箱无散热部件,且能吸收部分房间热量,吸热量为透过冰箱保温层的漏热量,这部分热量将增加房间负荷约 180 W,复合系统模式下热泵空调循环负荷按 3 480 W 计算。

2) 常规系统

热泵制热与冰箱制冷各自独立,冰箱散热部件位于室内,取冰箱制冷剂冷凝温度 45 °C,过冷度 10 °C。由于透过冰箱保温层的漏热量所引起的房间热量损失小于其散热部件的放热量,这部

分热量将减少系统部分热负荷,减少量约为 200 W,常规系统模式下空调负荷按 3 100 W 计算。

夏、冬季 2 种工况模式下,在满足房间冷热负荷及冰箱负荷时,计算整理复合系统模式中高、低压级压缩机功耗与常规系统模式中的热泵空调和冰箱压缩机功耗,为了便于比较 2 种系统模式能耗的差异,将计算结果列表分析,根据复合系统所节约能耗与常规系统能耗相比,给出复合系统节能率(见表 1)。

由以上实例计算结果可以看出,在夏季和冬季 2 种工况模式下,复合系统所消耗的压缩机功耗都明显低于常规模式,系统节能率在 9%~18% 范围内。

表 1 复合系统与常规系统压缩机功率对比

工况模式	负荷/W	复合系统能耗/W	常规系统能耗/W	节约能耗/W	节能率/%
夏季工况	冰箱 1 000	低压级压缩机 173.5	冰箱压缩机 556.2	247.2	18
	房间 3 300	高压级压缩机 964.4	空调压缩机 828.9		
冬季工况	冰箱 600	低压级压缩机 140.6	冰箱压缩机 333.7	98.6	9
	房间 3 300	高压级压缩机 866.0	空调压缩机 771.5		

4 结论

笔者所提出的两级压缩式热泵空调与冰箱复合系统,共用 1 台室外机,通过制冷剂管路的连接实现热泵空调系统与冰箱系统的串并联复合,通过调节控制阀的启闭转换不同的工作模式。热泵空调循环制冷剂与冰箱循环制冷剂通过室外机、中间换热器实现能量的相互利用。通过实例计算发现,两级压缩式热泵空调、冰箱复合系统与空调、冰箱各自独立的常规系统相比,节能率在 9%~18% 范围内。由此可见,如果使用复合系统作为对冷、热量有较大需求量的商场、超市等场所的冷、热源,提供空气调节及陈列柜冷量,将降低相当数量的能耗。在冬季工况下,冰箱系统制冷剂在室外机放热,可有效防止热泵系统制冷剂在室外机蒸发吸热时室外机的结霜。系统压缩机组置于室外,可避免常规模式下冰箱在室内易产生噪声的问题。

参 考 文 献

[1] 顾兆林,郑东宏,李云,等. 极高环境温度下的两级空

- 调系统研究. 西安交通大学学报, 2002, 36(7): 757-761.
- [2] 程文浩,金苏敏. 双级压缩空气源热泵中压缩机的稳态仿真研究. 压缩机技术, 2007, 206(6): 15-18.
- [3] 周刚,朱玉群,王勇. 用于空调工况的双级压缩循环的分析计算. 流体机械, 2002, 30(9): 62-64.
- [4] 田长青,石文星,王森. 用于寒冷地区双级压缩变频空气源热泵的研究. 太阳能学报, 2004, 25(3): 388-393.
- [5] Gan Andre I, Klein Sanford A, Reindl Douglas T. A analysis of refrigerator/freezer appliances having dual refrigeration cycles. ASHRAE Transactions, 2000, 106: 185-191.
- [6] Chen Lingen, Sun Fengrui, Chen Wenzhen. Optimization of the specific rate of refrigeration in combined refrigeration cycles. Energy (Oxford), 1995, 20(10): 1049-1053.
- [7] Thomas Andrew S. Retail refrigeration systems—the use of ammonia and two-level secondary refrigeration. ASHRAE Transactions, 1998, 104: 440-448.
- [8] 郑贤德,陈光明. 制冷原理与装置. 北京:机械工业出版社, 2006: 70-83.
- [9] 吴业正. 小型制冷装置设计指导. 北京:机械工业出版社, 1998: 132-156.