

多联式机房空调系统试验研究

王飞 黄德勇 史作君 董文涛

摘要 针对数据机房、基站全天候空气调节需求,提出多联式机房空调系统,设计制冷量为40 kW的室外机及一台制冷量10 kW的室内机、2台制冷量15 kW的室内机,在标准焓差试验室进行性能试验,结果表明:多联式机房空调系统具有很好的节能效益,化解了定速单元式机房空调能量调节不足问题;与定速单元式机房空调相比,全年能效比AEER提升50%;多联式机房空调系统降低机组成本,提高了空间利用率;各室内机制冷量、显热比达到设计指标,为空调系统的稳定性和实用性提供保障;该技术为数据中心、信息基站等高发热量空间的低成本、高效温控需求提供了新的途径。

关键词 机房空调;多联式;节能;控制;性能试验

Experimental study on VRF system for computer and data processing room

Wang Fei Huang Deyong Shi Zuojun Dong Wentao

ABSTRACT Aimed at the all-weather air-conditioning demand for computer and data processing room and base station, the variable refrigerant flow (VRF) system for computer and data processing room is proposed, and it has one outdoor unit with the cooling capacity of 40 kW, one indoor unit with the cooling capacity of 10 kW and two indoor units with the cooling capacity of 15 kW. The performance test is carried out in the enthalpy method laboratory. The results show that the VRF system for computer and data processing room has very good energy-saving effect, and resolves the energy adjustment insufficiency of the constant speed unitary air-conditioner for computer and data processing room; compared with the constant speed unitary air-conditioner for computer and data processing room, the annual energy efficiency ratio (AEER) of the VRF system for computer and data processing room is promoted by 50%; the VRF system for computer and data processing room has lower cost of the unit and higher space utilization; the control of the cooling capacity and the sensible heat ratio of the indoor unit can realize the design index, which provides guarantee for the stability and practicability of the air-conditioning system; this technology provide a new way for the low cost and temperature control of high energy efficiency for the high heating space, such as data center and information base station.

KEY WORDS air-conditioning for computer and data processing room; variable refrigerant flow (VRF); energy-saving; control; performance test

数据中心、通信基站等全年需冷空间的空调运行时间长、能耗高,因此,研发高能效全年制冷的空调机组是实现数据机房等节能减排的重要途径之一。传统机房、基站空调采用定速单元式(一拖一)结构,虽可靠性高,但能耗始终居高不下,且能量调节性差,加上房间负荷增大,室内、外机空

间限制,适用性越来越差。VRF(variable refrigerant flow,变制冷剂流量)系统由于其采用变容量调节以匹配系统负荷变化,在系统节能方面逐渐有较好的表现。自1982年大金推出多联机以来,经过几十年的发展,多联机在舒适型房间空调器方面运用非常广泛,其设计可靠性、安装可靠性以

收稿日期:2016-08-30

作者简介:王飞,硕士,工程师,主要从事多联机与机房空调制冷技术研究与开发。

及控制可靠性均有了很大提升,且节能效果日益增强。夏建军^[1]通过对一台多联机(一拖六)在制冷工况、部分负荷工况下的运行特性进行实测研究,得出 VRF 系统在部分负荷工况下具有较高 COP,各室内机负荷不均匀指数对性能影响很小。鉴于舒适型多联机良好的运用效果,并且在部分负荷工况下具有很好的节能优势,同时大幅度节省了室外机空间,如能将多联机良好特性运用到机房空调领域,亦会有较好的应用前景。而机房空调除了需要控制机房内温度,还须控制机房湿度,其显热比要求要高于舒适型多联机,故而对于机房空调,其控制更加复杂。赵伟和石文星等^[2-6]提出自治协调控制方法,并对多联机部分负荷特性进行分析,得出多联机的能效比分布在一个与总负荷率和负荷不均匀指数相关的“性能域”内。邵双全等^[7]提出一种多联式机房空调系统,系统主要包括蒸气温缩单元、回路热管单元、室外回路单元和换热单元;王铁军等^[8]提出一种复合式制冷多联式空调系统,将热管系统与制冷系统在冷凝蒸发器处复叠复合,节能效果显著;石文星等^[9]提出一种带自然冷却功能的液泵供液多联式空调机组,通过制冷系统与热管系统在低压储液器处进行耦合复合,具有较高的节能潜力。以上多联式机房空调系统与现有 VRF 系统差距较大,或者带有液泵,或者带有热管单元,成本较高,系统较复杂。故笔者将单冷型 VRF 技术引入机房空调,设计出一种系统简单、可靠的多联式机房空调系统,制造了一台样机(一拖三),并对多联式机房空调系统全年能效特性以及部分负荷特性进行试验研究。

1 变频多联式机房空调系统原理

多联式机房空调系统也称为单冷型 VRF 系统,无需四通阀,将一个或多个室外机与多个室内机通过液体连接管与气体连接管耦合在一起(见图 1),系统由压缩机、油分离器、单向阀、冷凝器、多个节流装置以及多个蒸发器构成。

数据机房显热负荷大、结构封闭,较常规舒适型房间空调系统相比,机房空调具有风量大、焓差小、冷量输出较稳定的特点。故多联式机房空调系统在机房使用过程中,其可调转速压缩机运行转速较集中,不易出现大幅调速及频繁启停等现象,系统的回油效率高,可提升空调系统的可靠性。

多联式机房空调系统不能按照现有 VRF 进行室内机容量超配(指室内机负荷大于室外机容

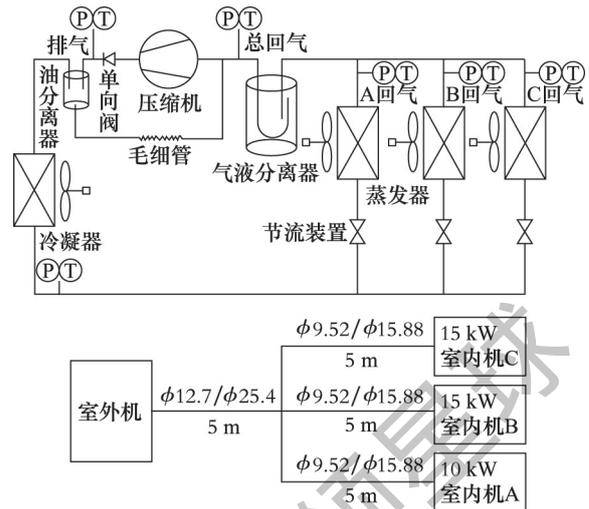


图 1 多联式机房空调样机系统图与连管图

量),若考虑到基站等围护结构密封不高或高、低温使用场景,还须考虑快速回油、低频回油、过冷回路以及低温启动等控制技术,这些技术直接借鉴现有 VRF 控制方式即可,此处不再赘述。

2 变频多联式机房空调系统试验

2.1 试验内容和方法

1) 试验样机

试验样机采用 R410A 制冷剂,如图 1 所示,室外机借用 40 kW 多联机室外机,由压缩机、油分离器、冷凝器以及气液分离器构成;室内机由 1 台额定制冷量为 10 kW 的室内机 A 和 2 台额定制冷量均为 15 kW 的室内机 B 和 C 构成,其中室内机 A 的风机转速可调,B 和 C 的风机为定转速型;其中室外机主配管型号为 φ12.7 mm 的液管及 φ25.4 mm 的气管,主配管(主液管为室外机与分歧管之间连接管;主气管为室外机与分歧管之间连接管)长度为 5 m;3 台室内机配管型号均为 φ9.52 mm 的液管及 φ15.88 mm 的气管,长度为 5 m。

在被测机组的压缩机排气管、冷凝器出口管、压缩机吸气管以及各室内机蒸发器出口管分别布置温度和压力传感器,以获取如图 1 所示各测点位置管内制冷剂的实时状态参数。其中,压力传感器的测量精度为 ±0.1 kPa,温度传感器的测量精度为 ±0.1 °C。

2) 测试系统

将被测机组的室内机和室外机分别设置在焓差试验室内,测量机组的制冷量;采用精度为 ±0.5 W 的功率计测量机组的功率。焓差试验室的主要技术指标:①制冷量测量范围为 20~60 kW,测量精度 ≥

98%;②室内侧风量调节范围为 1 000~10 000 m³/h;③室外侧温度调节范围为-20~55℃。

3) 试验步骤

控制室内蒸发器进口空气干/湿球温度为 38℃/20.7℃,调节室外侧分别为 35℃,25℃,15℃,5℃和-5℃,测试样机能力、能效比 *EER* 等参数;以及在室外温度 35℃工况下测试样机部分末端部分负荷特性。通过控制压缩机运行转速、室外风机转速以及膨胀阀开度,实现各末端蒸发温度(对应表压 1.24~1.26 MPa)在设定值 17℃±1℃范围内,各末端回气过热度维持在 5~10℃之间。

每次工况调试测试系统稳定运行 30 min,每 5 s 采集并记录一次压力、温度、制冷量和输入功率,并通过试验仪器记录数据,计算吸气过热度及冷凝器出口过冷度。

2.2 试验结果与分析

图 2 所示为多联式机房空调样机工作性能参数与室外环境温度的变化关系,由于机房负荷全年基本维持不变,故随着室外环境温度降低通过调节压缩机转速与室外风机转速的协调控制,实现样机制冷量基本维持在 40 kW 左右,图中显示系统制冷量基本维持在 40.5 kW 左右,满足设计指标。其能效比 *EER*(制冷量/室内外机总功率)随着室外环境温度的降低几乎呈线性增长趋势。在标准工况下,多联式机房空调系统能效比 *EER* 为 3.6,比常规规定速单元式机房空调能效比 *EER* (3.3)高 9%,在-5℃时,能效比 *EER* 达到 10,这是因为室外环境温度较低时,多联式机房空调系统压缩机运行频率低,室外风机转速低,节能效果显著。

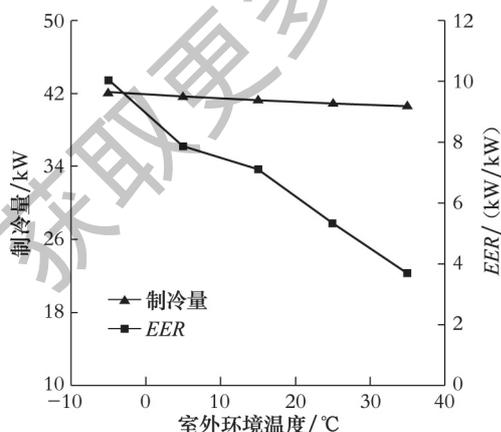


图 2 制冷量、*EER* 与室外环境温度关系

从图 3 可知,系统过冷度随室外环境温度降低而升高,且处于 2~8℃范围内,满足系统需求。

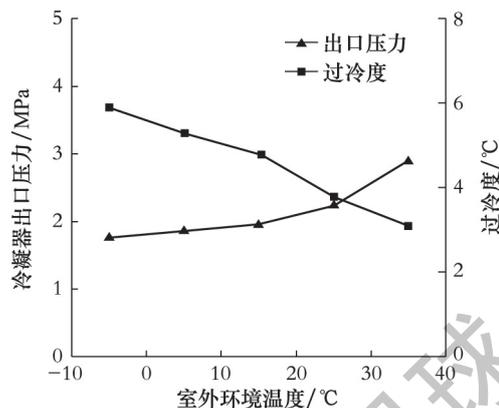


图 3 冷凝器出口压力、过冷度与室外环境温度关系

根据系统设计要求,需要控制目标蒸发温度在 17℃±1℃才能满足显热比达到设计指标(≥95%)的要求,对应蒸发压力(表压)为 1.24~1.26 MPa。图 4 所示为空调样机回气压力随室外环境温度变化关系,室内机 A 与 B 和 C 的蒸发压力不同,室内机 B 和 C 的蒸发压力相同(省略室内机 C 曲线)且高于室内机 A,室内机 A 的蒸发压力为 1.24 MPa,满足设计指标。压缩机吸气口处的总回气压力低于各室内机,这是管路压力损失所致。多联式机房空调系统可以根据管路压损,设定总回气压力与各蒸发器出口压力的修正值,便可以节省每个室内机蒸发器出口的压力传感器,降低设备成本。

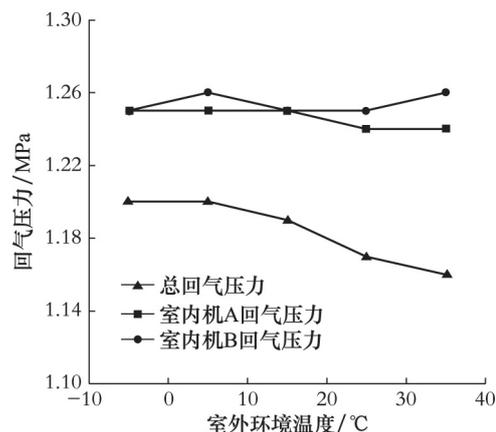


图 4 回气压力与室外环境温度关系

图 5 所示为回气过热度随室外环境温度变化关系,各室内机电膨胀阀控制效果良好,其蒸发器出口回气过热度均满足设计指标。

图 6 所示为多联式机房空调样机在室外环境温度 35℃工况下室内机 A 部分负荷运行特性,控制室内机 B 以 100%负荷率开启,室内机 A 分别运行在不同负荷率(设定 100%负荷为室内机额定

制冷量时负荷,部分负荷率通过调整室内风机转速实现)下,室内机 C 停机工况下的试验结果。结果显示,系统制冷量随室内机 A 的负荷率降低而降低,而能效比随着负荷率降低呈一定趋势增长,说明多联式机房空调系统在部分负荷率工况时具有很好的能量分配、调节效果,同时反映了其在部分负荷工况下能效高的特性。

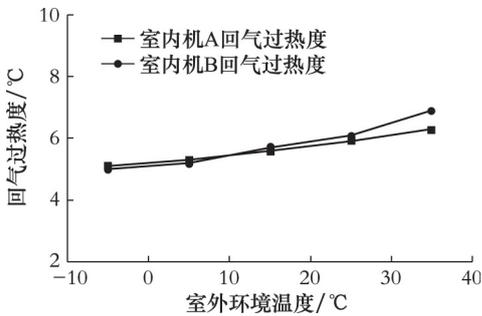


图 5 回气过热度与室外环境温度关系

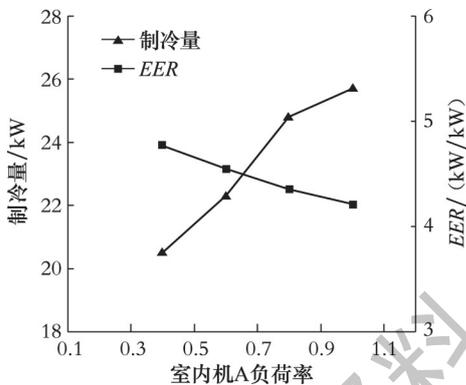


图 6 制冷量、EER 与室内机 A 负荷率关系

图 7 所示为多联式机房空调样机在室外环境温度 35 °C 工况下部分负荷运行特性(其中总负荷 100% 为所有室内机额定制冷量总和),其控制运行方式见表 1。室内机 A、B 和 C 以不同运行方式组合运行,通过调节压缩机运行频率,使得各室内机蒸发器出口压力均在设定值范围内,在部分负荷工况下,机组具有很好的能效比。

表 1 多联式机房空调部分负荷运行状态

负荷率/%	100	75	60	40
A(10 kW)	开	关	开	关
B(15 kW)	开	开	开	开
C(15 kW)	开	开	关	关

3 多联式机房空调系统全年能效比

表 2 所示为根据 GB/T 19413—2010《计算机和数据处理机房用单元式空调机》规定的热点冷却型机房空调的测试工况和测试方法,考察同等

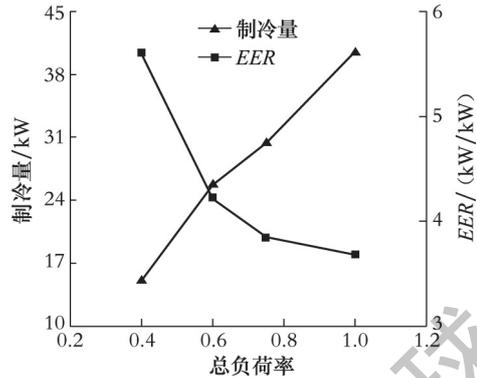


图 7 制冷量、EER 与机组总负荷率关系

额定制冷量定速单元式机房空调和多联式机房空调系统的全年能效比(AEER),多联式机房空调系统具有较好的能量调节能力,其全年能效比 AEER 比常规定速单元式机房空调高 50% 以上;且减少了室外机数量,降低了整个机器成本,特别是在室外机空间资源有限情况下,多联式机房空调系统优势更加显著,甚至还可以在—台室外机中设置 2 台变频压缩机,通过间歇切换运行或—用—备,无须设置过多室外机,成本、空间优势更加明显。

表 2 多联式机房空调全年综合能效比 kW/kW

室外环境温度/°C	35	25	15	5	-5	
EER	定速空调	3.3	4.1	4.9	5.1	5.5
	多联式空调	3.6	5.3	7.1	7.9	10
AEER	定速空调	4.7				
	多联式空调	7.1				

数据机房全年负荷较稳定,故多联式机房空调系统中变频压缩机全年运行转速变化范围不大,属于窄幅变频,避免了压缩机频繁启停、变频等现象,延长机组寿命,多联式机房空调系统在数据机房中具有较好的应用前景。

4 结论

在分析多联式机房空调系统的基础上,笔者设计了多联式机房空调样机,在标准焓差试验室进行了性能试验,得到如下结论:

- 1) 多联式机房空调系统应用于全年运行机房空调领域具有很好的节能效益,其全年综合能效比 AEER 比定速单元式机房空调高 50% 以上;
- 2) 多联式机房空调系统具有较好的部分末端部分负荷特性、能量调节特性,能够满足机房制冷、显热比以及可靠性的需求;
- 3) 与单元式机房空调相比,多联式机房空调系统降低了机组成本,提升空间利用率;

(上转第 9 页)

2 结束语

从 2017 年中国制冷展可以看出,企业对于蒸发冷却技术的关注度与往年相比有了明显的提升。这与我国大力倡导节能与绿色环保发展理念是密不可分的。蒸发冷却技术作为一种健康、节能、经济和低碳的通风空调技术,在我国实施的节能减排中起着重要的作用,在西部地区的建筑节能中扮演着重要角色。未来,随着国家节能减排和“一带一路”倡议的持续推进,蒸发冷却技术将充分发挥因地制宜的作用,在丝绸之路经济带沿线国家的建筑节能中具有广阔的发展前景。

参考文献

- [1] 黄翔,孙铁柱,汪超. 蒸发冷却空调技术的诠释(1) [J]. 制冷与空调,2012,12(2):1-6,14.
- [2] 蒸发式冷气机:GB/T 25860—2010[S].
- [3] 蒸发式冷风扇:GB/T 23333—2009[S].
- [4] 霍海红,黄翔,李成成. 浅谈高压喷雾直接蒸发冷却和其在世园会中的应用[J]. 制冷,2011,30(3):64-69.
- [5] 刘佳莉. 新型复合式露点间接蒸发冷却空调机组在住宅建筑的应用研究[D]. 西安:西安工程大学,2015.
- [6] 蒋珍华,邱利民,欧阳录春,等. 湿能空调器的结构与性能分析[J]. 流体机械,2005,33(7):82-85.
- [7] 裴德凤,袁一军. 一种新型空调——全新风湿能空调器的研究[J]. 流体机械,2005,33(3):70-72.
- [8] 李沁,陈晓春,马季,等. 双冷源温湿度独立控制空调系统中排风热回收的节能性分析[J]. 暖通空调,2017,47(3):68-72.
- [9] 候晖. 溶液调湿空调技术在酒店空调系统的应用研究[C]//福建省暖通空调制冷学术年会论文资料集. 福建,2011:76-79.
- [10] 何滔,卢军. 某商业楼溶液调湿新风机工况和经济性分析[J]. 制冷与空调,2011,25(2):183-185,203.
- [11] 孙铁柱,黄翔,文力. 一种蒸发冷却与机械制冷复合制取高温冷水的新方法[J]. 制冷,2010,29(4):12-15.
- [12] 王绍瑞. 蒸发冷却式冷水机组三种应用方式的探讨[C]//河南省土木建筑学会会议论文集. 郑州,2011:657-663.
- [13] 苏晓青. 蒸发冷凝式冷水机组的研发及在地铁中的应用研究[D]. 西安:西安工程大学,2016.
- [14] 王学会,袁晓蓉,吴美,等. 制冷用水平降膜式蒸发器研究进展[J]. 制冷学报,2014,35(2):19-29.
- [15] 吴治将,朱冬生,蒋翔,等. 蒸发式冷凝器的应用与研究[J]. 暖通空调,2007,37(8):98-102.

(下接第 28 页)

4) 多联式机房空调系统具有良好的应用前景,该技术为数据中心、信息基站等高发热量空间的低成本、高能效温控需求提供了新的途径。

参考文献

- [1] 夏建军. VRF 空调系统优化控制研究[D]. 北京:清华大学,2005.
- [2] 赵伟,周德海,石文星. 多联机空调系统的性能域[J]. 暖通空调,2010,40(7):98-102.
- [3] 赵伟. 多联式空调系统部分负荷特性分析[D]. 北京:清华大学,2009.
- [4] 石文星. 变制冷剂流量空调系统特性及其控制策略研究[D]. 北京:清华大学,2000.
- [5] SHAO S Q, SHI W X, LI X T, et al. Simulation model for complex refrigeration systems based on two-phase fluid network—part I: model development[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(3):500-509.
- [6] SHI W X, SHAO S Q, LI X T, et al. Simulation model for complex refrigeration systems based on two-phase fluid network—part II: model application[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(3):500-509.
- [7] 邵双全,张海南,田长青. 一种多联式机房空调系统:201310410064.4[P]. 2014-12-17.
- [8] 王铁军,曾晓程,刘志峰,等. 一种复合式制冷多联空调系统:201410549491.5[P]. 2014-12-31.
- [9] 石文星,周德海,王宝龙,等. 一种带自然冷却功能的液泵供液多联式空调机组:200910235429.8[P]. 2010-04-14.