

文章编号:0253-4339(2020)04-0089-08
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.04.089

数据中心冷却用动力型热管的实验研究

王 飞¹ 邵双全^{2,3} 张海南³

(1 克莱门特制冷设备(上海)有限公司 上海 201419; 2 华中科技大学能源与动力工程学院 武汉 430074;
3 中国科学院理化技术研究所 北京 100190)

摘 要 为研究用于数据中心的动力型热管系统性能,本文在焓差法实验室对三类压缩机性能进行了实验研究,结果表明:1)带气泵功能的压缩机具备低压缩比运行能力,可根据室外环境温度以及室内负荷不同分别切换不同工作模式,简化系统配置,具有很好节能效益,其中变频转子压缩机 COP 可以超过 20,变频涡旋压缩机 COP 接近 20,可以较好的替代液泵;2)中小型机房空调领域,综合利用气相动力型热管与压缩制冷技术,拓宽了自然冷却利用时间,全年能效比 AEER 远高于常规机房空调,配合运用地域性风冷、水冷、蒸发冷等节能方式,为现代数据中心节能减排提供了新的思路;3)大型数据中心空调领域,磁悬浮压缩机 COP 超过 20,具有较高的节能效益,但与液泵相比仍具有一定差距,同时离心式压缩机作为气泵运用存在循环不畅的现象,需要液泵进行压头补偿。

关键词 数据中心冷却;回路热管;COP;节能

中图分类号:TB61⁺1;TQ051.5;TU831.6

文献标识码:A

Experimental Study on Compressor-driven Loop Heat Pipe for Data Center Cooling

Wang Fei¹ Shao Shuangquan^{2,3} Zhang Hainan³

(1. Climaveneta Refrigeration Equipment (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, 201419, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China; 3. Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing, 100190, China)

Abstract In order to get better performance of power-assisted heat pipe systems, the performance of three types of compressors was experimentally studied. The results show that: 1) a compressor with gas pump function has the function of a low compression ratio operation, which can switch between different modes, according to different outdoor temperatures and indoor loads, and simplify the system configuration. Additionally, it has good energy-saving benefits. The coefficient of performance (COP) of the inverter rotor compressor can exceed 20, the COP of the inverter scroll compressor is close to 20, which shows that they can be a good alternative to the liquid pump; 2) for the air-conditioning systems in small data rooms, comprehensive utilization of the gas heat pipe and compression refrigeration technology broaden the utilization time of free cooling. The annual energy efficiency ratio (AEER) is considerably higher than that of the conventional computer room air conditioning. The application of regional energy saving methods such as air cooling, water cooling, and evaporative cooling provide a new strategy for energy saving and emission reduction of modern data centers; 3) for air-conditioning in large data centers, the COP of magnetic bearing compressors exceeds 20, and results in higher energy-saving benefits. However, there is still a certain gap as compared with the liquid pump. At the same time, centrifugal compressors used as gas pumps have a shortage of circulation, which requires the liquid pump to compensate the pressure head.

Keywords data center cooling; loop heat pipe; COP; energy saving

随着大数据以及 5G 网络的发展,数据中心的建设越来越广泛,为响应国家节能减排、发展绿色经济的号召,建设绿色数据中心的目標刻不容缓。数据中心节能应从 IT 设备、空调等各个环节着手,并非单一从某一个环节着手研究。IT 设备在数据中心能耗中占比最大,目前行业人员也在研发更高效节能的服务器;其次是空调系统能耗占比,就目前空调系统而言,其节能潜力在 4%~69% 之间,故

具有较大的优化空间^[1]。目前数据中心高效冷却技术是行业内研究的热点,关于利用不同自然冷却技术的研究较多,如蒸发冷却技术、新风技术、热管技术等。数据中心一般采用分离式热管技术进行节能,利用室内、外两个换热器,不仅高效利用室外自然冷源,还可以确保房间内部空气品质,大幅降低空调系统的运行能耗^[2-4]。关于分离式热管及其应用于数据中心冷却的研究,首先是重力型分离式热管,学者对其进行性能优化及在小型数据中心及通讯基站上应用的节能分析^[5-8]。由于热管只适用于机房外温度低于机房内温度时的调节,因此,有研究提出多种回路热管与蒸气压缩制冷耦合式结构,以实现数据中心或通讯基站的全年冷却^[9-14]。这种机组一般都具有热管自然冷却模式(室外温度低于室内温度)和蒸气压缩主动制冷模式(室外温度高于室内温度),有些系统也可实现两种模式同时运行的联合制冷模式^[10-11,13]。此外,为了满足老旧机房节能改造需求,采用液泵或气泵作为辅助动力,以满足单纯依靠重力不足以驱动回路热管运行的情况^[15-19]。其中液泵增压作用在蒸发侧,提高了蒸发压力,减小了室内传热温差,降低了冷凝压力,减小了室外冷凝温差,导致系统换热量不足,弱化了理想热管循环,不适用于长配管、高落差等阻力较大的工况,且不能突破温差传热界限^[20-22];而气泵增压作用在冷凝侧,增大了冷凝温差,强化系统冷凝效果和理想热管循环,使得性能优于液相动力型分离式热管。液泵具有排量大、功率低、COP 高的优势,但价格较高,可靠性有待进一步验证,并且提高蒸发温度,降低传热温差,不适宜长距离、高落差输送;气泵具备强化换热的优点,但存在排量小、功率大、COP 较低等不足^[23-25]。数据中心空调系统采用的压缩机类型较广泛,包括转子压缩机、涡旋压缩机、螺杆压缩机以及离心压缩机等,对于中小型机房精密空调和基站空调,其发热密度和负荷均较小,一般采用转子压缩机与涡旋压缩机,而对于大型数据中心,其发热密度和负荷均较大,采用涡旋、转子压缩机所需要的机组数量庞大,故一般选择螺杆压缩机或离心压缩机。

在小型数据中心中,压缩机或气泵驱动的回路热管已经取得了良好的效果^[23-25],本文基于数据中心冷却需求,对中小型和大型数据中心冷却系统中采用的 3 类压缩机驱动的回路热管系统进行实验研究,并通过成本、能效、可靠性等各方面对液泵与气泵经济性、适用性进行对比分析,为热管技术在数据中心冷却提供新的思路。

1 制冷和热管技术原理

图 1 所示为制冷循环及理想热管循环的压焓图。理想热管循环是一个等压过程,COP 很高;制冷循环为一个先增压再降压的过程,该过程需要消耗较大的能耗,故 COP 较低。当制冷循环外界环境逐渐改善时,如室外环境温度降低或采用一定手段(水冷、蒸发冷却等方式)使得冷凝压力逐渐降低,即整个循环图冷凝压力线逐渐下降,蒸发压力线基本维持不变,则循环图逐渐趋近热管循环,甚至达到热管循环状态,故可以理解为,热管循环是制冷循环最理想、最原始的状态,也是能耗最小的状态,只是由于室外环境条件不足,导致原有的热管循环要产生制冷目的,必须采用先增压再降压的方式偏离其本来循环,但只要外界环境足够,制冷循环就会逐渐趋向热管循环。

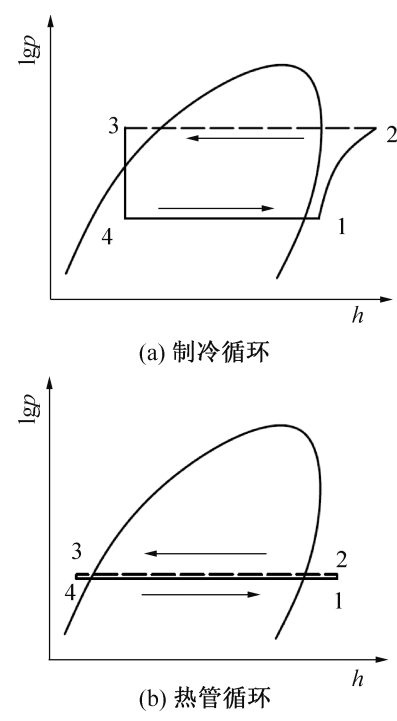


图 1 制冷/(理想)热管系统压焓图
Fig.1 lgp-h diagram of refrigeration/heat pipe system

热管循环与制冷循环均通过制冷剂相变传热,在蒸发器中沸腾汽化,在冷凝器中冷凝液化,在传热方式上具有相似性。理想条件下,只要存在传热温差(室外环境温度低于室内环境温度),既可利用热管系统进行制冷,也可利用制冷系统进行制冷,故可认为制冷系统与热管系统具有相似性或一致性。特别是对于气相热管系统,它与制冷系统所包含部件配置基本相同,只是根据当前运行工况改变系统部件运行方式,均通过制冷剂冷凝与蒸发作用实现循环制冷,相似性、一致性更为显著。因此,采用图 2 所示的压

压缩机驱动的两相回路,在室外温度高于室内温度时,可以运行于蒸汽压缩制冷工况;随着室外温度的降低,可以调节压缩机的压缩比,使其满足小压比制冷运行的要求;而在室外温度低于室内温度时,可以运行于热管模式,压缩机只提供气体流动所需要的动力,实现高效自然冷却。

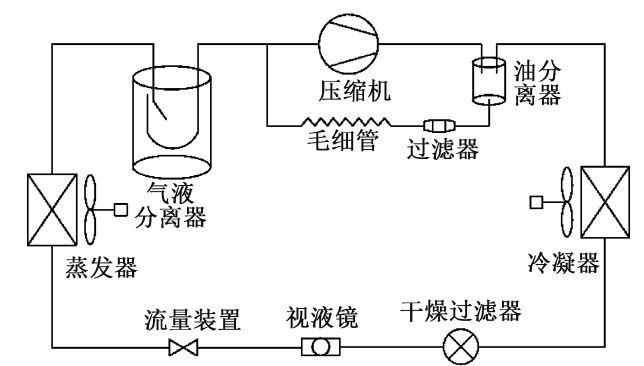


图 2 气相动力回路热管机房空调系统原理
Fig.2 Principle of the compressor assisted loop
heat pipe system

一般而言,在中小型机房空调用涡旋、转子压缩机领域,计算能效 EER 时包括了内外风机能耗以及压缩机能耗,而在大型数据中心用离心压缩机等领域,计算能效时只计算了压缩机能耗,并未包含外侧风机、传输水泵、内侧末端风机的能耗,且离心压缩机 COP 测试工况与涡旋、转子压缩机工况也不同,故而两者能效对比并未在同一个层次平台(计算方式、测试工况不同)。对于此类情况,参考、借鉴离心机领域,将数据中心制冷系统能效中动力装置(压缩机或泵)的能效单独计算,使数据中心空调系统(包括制冷系统、分离式热管系统)能效在同一个层次平台上进行对比。

数据中心制冷可以看作一个通过室内、外温差实现能量搬迁的过程,利用热管温差传热的原理,定义温差 $\Delta T=(T_{in}-T_{out})+(T_c-T_e)$,其中 ΔT 为总需求温差, $(T_{in}-T_{out})$ 为室内温度 T_{in} 与室外温度 T_{out} 差值,可以称为自然温差, (T_c-T_e) 为系统冷凝温度 T_c 与蒸发温度 T_e 差值,可以称为补偿温差。当自然温差 $(T_{in}-T_{out})$ 足够时,则不需要通过 (T_c-T_e) 补偿;当 $(T_{in}-T_{out})$ 不足时,则需要通过 (T_c-T_e) 进行补偿,并且补偿温差值通过总需求温差 ΔT 确定,即补偿温差传热。

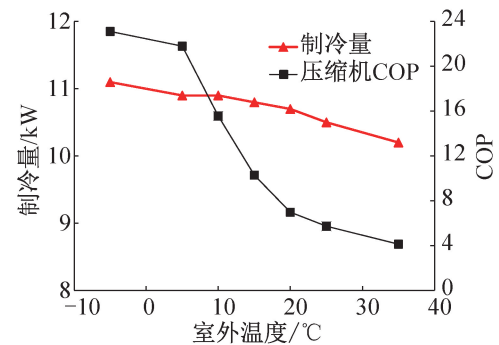
2 气相动力热管系统实验研究

2.1 变频转子压缩机

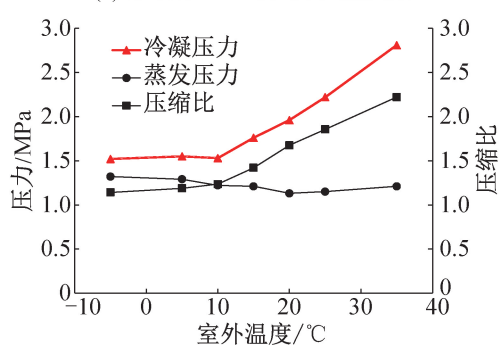
根据图 2 所示的原理图,设计一台制冷量为 10

kW 小型机房空调样机,样机由变频转子压缩机、油分离器、冷凝器、干燥过滤器、视液镜、流量装置、蒸发器、气液分离器构成,并对压缩机进行了技术优化,将现有变频转子压缩机压缩比 $\varepsilon \geq 1.4$ 拓宽到 $\varepsilon \geq 1.1$ 下安全运行,同时对压缩机单体回油管进行优化,实现压缩机单体在 $\varepsilon \geq 1.1$ 下顺利回油,采用 R410A 制冷剂,控制室内干球/湿球温度为 38/20.8℃,利用上述补偿温差换热方式控制机组在室外较宽的温度范围内运行,测试样机制冷性能与能效。

图 3 所示为带气泵功能的变频转子压缩机机组性能。空调系统能够很好利用过渡季节与低温季节的自然冷源,当室外温度高于 25℃ 时,系统运行制冷模式,完成机房散热。当室外温度低于 25℃ 时,利用补偿温差传热原理,通过室外自然冷源构造出具有节能效益的近似热管系统,协调控制压缩机运行频率、风机转速以及膨胀阀开度,在制冷量达到额定设计指标前提下,系统能效比提高 5%~30%,表明通过补偿温差传热控制方法,系统能够很好的完成制冷过程,最大化利用自然冷源,实现系统节能运行。当室外温度低于 5℃ 时,通过压缩机、油分离器、冷凝器、流量装置、蒸发器及气液分离器构成一个简单的气相动力型分离式热管系统,系统制冷量呈稳定增长趋势,且近似呈线性变化,机组 EER 提高 70%,这是因为此时压缩机运行频率低,整个系统压力损失小,约为 0.2



(a)制冷量/COP与室外温度关系



(b)压力、压缩比与室外温度关系

图 3 变频转子压缩机(气泵)机组性能
Fig.3 Performance of inverter rotor compressor(gas pump)

MPa, 仅克服管路及换热器阻力, 故系统能效高, 可完全替代常规压缩制冷系统, 实现数据中心低能耗散热。借鉴 GB/T 19413—2010《计算机和数据处理机房用单元式空气调节机》^[26] 规定的全年能效比 (AEER) 测试与计算方式, 计算其中 5 个工况下能效, 得出样机全年能效 AEER (北京) 达到 5.8。

通过整机能效 EER 以及压缩机单体 COP 分析可知, 在标准工况下, 整机能效 EER 为 2.9, 压缩机单体 COP 约为 3.7, 随着室外温度降低, EER 能效与压缩机单体 COP 均大幅提升, 在室外温度为 -5~5℃ 时, 压缩机单体 COP 大于 20, 说明变频转子压缩机作为气泵使用具有较高的节能效益。

统计测试数据中的自然温差 ($T_{in}-T_{out}$) 和补偿温差 (T_c-T_e), 如表 1 所示, 室内温度 38℃ 恒定, 蒸发温度基本维持在 17℃±1℃, 在室外温度低于 5℃ 以后, 室外提供的自然温差已经达到 33℃, 即达到完全热管循环所需总温差, 此时外风机进入调速模式, 即使有一定补偿温差也是为了保护压缩机压缩比 $\varepsilon \geq 1.1$ 而设定, 且系统本身存在 0.15~0.2 MPa 压差, 故通过总温差来看, 基本处在 34~36℃ 之间, 验证了上述分析的正确性。

表 1 变频转子压缩机温差数据

Tab.1 Inverter rotary compressor temperature difference data

室外温度/℃	自然温差/℃	补偿温差/℃	总温差/℃
35	3	32	35
25	13	23	36
20	18	19	37
15	23	12	35
10	28	6	34
5	33	—	—

由图 3(b) 中系统冷凝压力与蒸发压力差值 (压差) 可知, 由于机组采用 R410A 作为制冷剂, 在气相热管模式下系统压差大于 0.2 MPa, 可以较好的实现系统循环。图 4 所示为变频转子压缩机 (气泵) 机组各部件功率变化。由图 4 可知, 风机功率包括室内风机和室外风机功率的总和, 随着室外温度降低, 采用补偿温差传热原理控制方式, 压缩机功率整体呈线性降低的趋势, 当室外环境温度低于 10℃ 时, 压缩机功率小于风机功率, 占比不足 40%, 约为 0.5 kW, 对整机性能影响占比较小。从成本方面分析, 制冷剂泵 (氟泵) 的成本在一台 10 kW 小型机房空调中占比约为 15%~25%, 还需要配置电磁阀等部件, 而采用带

气泵功能的变频转子压缩机机组几乎没有增加成本, 具有很好的成本效益。故综合评价, 中小型机房空调运用可变转速的转子压缩机替代制冷剂泵, 在产品推广上更具前景。

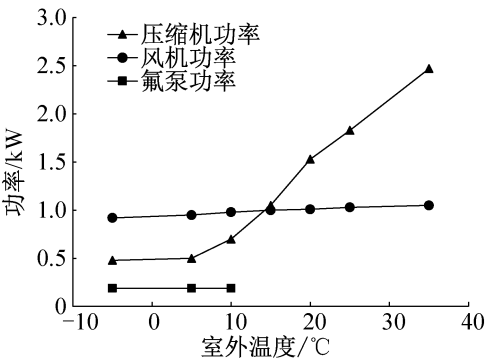


图 4 变频转子压缩机 (气泵) 机组各部件功率变化
Fig.4 Power of each component of inverter rotor compressor (gas pump)

2.2 变频涡旋压缩机

根据图 2 所示原理图设计一款 25 kW 变频列间热管型机房空调, 采用 R410A 制冷剂, 将现有变频涡旋压缩机进行技术升级, 利用低压腔涡旋压缩机并采用油泵供油, 实现在转速 900 r/min 下, 压缩机单体也可以正常回油; 同时拓宽压缩机运行 MAP 图, 将现有变频涡旋压缩机压缩比 $\varepsilon \geq 1.5$ 拓宽至 $\varepsilon \geq 1.15$ 下安全运行, 控制蒸发温度为 15℃±1℃, 由于系统本身阻力接近 0.2 MPa, 故最低冷凝温度为 19℃±1℃, 系统最低压缩比接近 1.2, 在压缩机安全范围内。

在室外全工况下, 控制室内回风温度为 37℃, 研究机组的制冷性能与能效。图 5 所示为运行测试数据, 当室外温度高于 0℃ 时, 机组制冷量满足设计需求。当室外温度低于 0℃ 后, 实际机房负荷有所降低, 故本次控制系统制冷量满足 80% 额定制冷量 (额定制冷量为 25 kW) 为目标, 通过室外全工况机组制冷量显示, 机组性能达到设计需求。通过整机 EER 可知, 当室外温度低于 25℃ 后, 机组即可采用上述补偿温差传热原理实现机组节能运行, 此时机组 EER 达到 4.81 (制冷量), 较常规机房空调已有 5%~10% 的节能效果; 当室外温度低于 5℃ 后, 完全运行气相热管模式, EER 高达 8.25, 随着室外温度继续降低, 自然温差非常大, 需要通过控制系统实现机组在压缩比 $\varepsilon \geq 1.15$ 下运行, 保证机组安全稳定运行。数据分析表明, 利用补偿温差方式实现机组最低能耗运行具有很好的节能效益, 机组可以最大化利用室外自然冷源。通过系统压差可知, 系统压差随着室外环境温度的降低几乎呈线性降低, 即使在室外温度为 -5℃ 时

也达到 0.24 MPa,能够实现压缩机回油以及系统顺利循环。借鉴 GB/T 19413—2010^[26],计算其中 5 个工况下能效,样机全年能效 AEER(北京)达到 6.3。

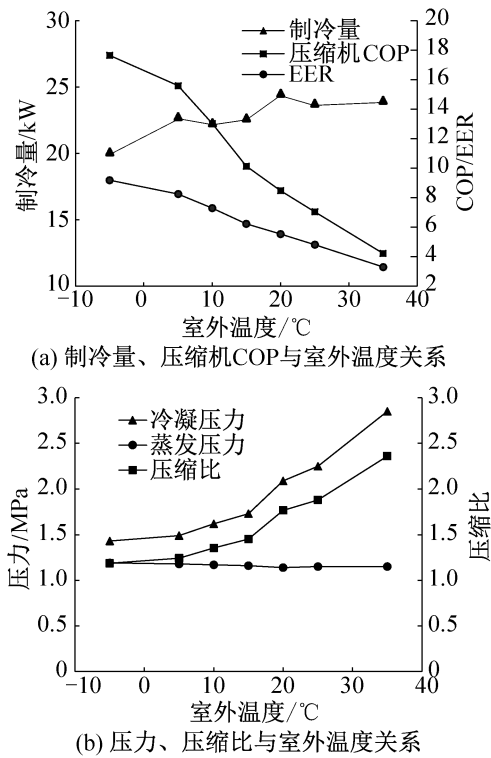


图 5 变频涡旋压缩机(气泵)机组性能

Fig.5 Performance of inverter scroll compressor(gas pump)

由图 5 可知,标准工况下压缩机 COP 为 4.22,随着冷凝压力降低,COP 逐渐升高,当压缩机运行在气相热管模式下时,压缩机 COP 约为 15~17,与常规机房空调压缩机 COP 相比,大幅提高,但与液态制冷剂(氟泵)相比仍存在一定差距,液泵在单台 25 kW 制冷量机组中,COP 可达 50~60,这是因为液泵驱动液态制冷剂,而压缩机驱动气态制冷剂,两者在同等蒸发温度下密度相差约 20 倍,所以要达到与液泵同等排量时,需要非常大的压缩机气缸,这很难实现,且压缩机在很低压缩比下存在泄漏和偏离最佳运行点的情况。

统计测试数据中的自然温差 ($T_{in}-T_{out}$) 和补偿温差 (T_c-T_e),如表 2 所示。室内温度为 37 °C 恒定,蒸发温度基本维持在 15 °C $\pm$ 1 °C,当室外温度低于 5 °C 后,室外提供的自然温差已达 32 °C,即达到完全热管循环所需总温差,且外风机进入调速模式,此时即使存在一定补偿温差也是为了保护压缩机压缩比 $\varepsilon \geq 1.15$ 而设定,并且系统本身存在一定压差,总温差基本处在 34~36 °C 之间,验证了上述分析的正确性。

从整机能效 EER、成本以及可靠性分析,中小型机房空调可以优先运用气相热管技术。因为在低温

工况下,限制机组能效比 EER 的因素中,压缩机能耗占比很低。如图 6 所示,在单台机组制冷量为 25 kW 机房空调中,当室外温度低于 10 °C 时,压缩机功率很低 ($P \leq 1.7$ kW),而在室外温度为 5 °C 时,压缩机功率为 1.46 kW,此时内、外风机功率总和达到 1.3 kW,整机 EER 受到内、外风机限制,即使采用 COP 较高的液泵,机组 EER 提高率仍有限。从成本方面分析,当压缩机本身具备低压比运行时,机组整机成本几乎未增加;而另外配备一台液泵使整机成本增加较多,对于中小型机房空调,一台液泵成本约占整机成本的 15%~30%,另外还需增加阀门、储液器等部件,使成本更高。从可靠性方面分析,部件的增加导致整机故障率升高。综合成本、能效、可靠性等多方面考虑,在此类中小型机房空调中,优先运用气相热管技术以及采用气相热管-制冷一体技术,并运用上述热管温差传热原理,实现空调系统在全工况下节能运行,具有较好的效益。

表 2 变频涡旋压缩机温差数据

Tab.2 Inverter scroll compressor temperature difference data

室外温度/°C	自然温差/°C	补偿温差/°C	总温差/°C
35	2	34	36
25	12	24	36
15	22	13	35
10	27	7	34
5	32	—	—
-5	43	—	—

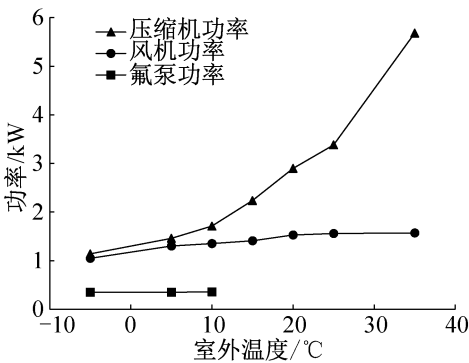


图 6 变频涡旋压缩机(气泵)机组各部件功率情况

Fig.6 Power of each component of inverter scroll compressor(gas pump)

通过上述变频转子压缩机以及变频涡旋压缩机分析可知,中小型基站、机房、数据中心可利用上述补偿温差传热原理,将气泵(气体增压泵, $1.0 \leq \varepsilon \leq 1.3$)与压缩机 ($1.3 \leq \varepsilon \leq 8.0$) 合二为一,当空调系统

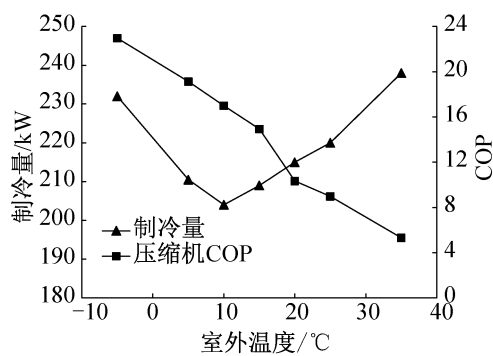
在冬季以及春、秋过渡季节工况时,在满足制冷量前提下尽量控制较低的冷凝压力,使系统冷凝/蒸发压差较小,既能实现充分利用自然冷源,又可实现空调冷源系统成本控制,在具备足够温差时采用气相热管循环替代常规制冷循环,降低系统能耗损失,提高效率,从而实现制冷系统全工况效率和空调器季节能效水平的提升,实现数据机房、基站区域化高效制冷。

2.3 无油磁悬浮离心压缩机

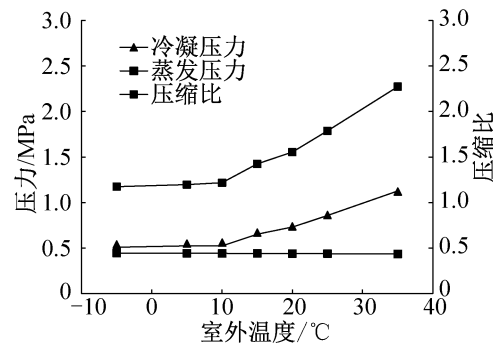
设计一台 240 kW 的风冷磁悬浮机组样机以及热管背板末端,系统主回路中匹配制冷剂泵,并在实验室进行性能实验,压缩机采用天磁 TT300 系列,制冷剂采用 R134a,测试蒸发温度在 18 ℃ 下的机组性能。末端采用室内 37 ℃ 回风的热管背板进行 18 ℃ 蒸发温度性能实验,由于末端采用多联式,所以只测试其中一个末端性能,并对整个主机+热管背板末端(包括一台主机和 10 台热管背板末端)的综合性能进行评价。在室外全工况下,当主机采用 18 ℃ 蒸发温度时,由于主机在控制上采用了上述补偿温差控制技术,通过标准工况下整机 EER 显示,EER 超过 3.8,节能率超过 20%,随着室外温度降低,节能效果显著,当室外温度低于 25 ℃ 后,节能效益大幅提升。当室外温度为 10 ℃ 时,机组通过运行气泵驱动模式制冷量达到了 204 kW,能效非常高。借鉴 GB/T 19413—2010^[26] 计算其中 5 个工况下能效,样机全年能效 AEER(北京)达到 9.5。

图 7 所示为磁悬浮压缩机机组性能曲线。由图 7(a)中压缩机 COP(不考虑内、外风机功率)可知,标准工况下压缩机 COP 为 5.31,相比于常规变频涡旋、转子压缩机有大幅提高。COP 随冷凝压力的降低而逐渐提高,当压缩机作为气泵使用时,压缩机 COP 约为 23,与常规机房空调压缩机 COP 相比,大幅提高。但通过系统压差可知,为保持系统循环流畅,在室外环境温度低于 10 ℃ 后,磁悬浮压缩机运行在气相热管模式下需保证系统压差超过 0.1 MPa,否则不能很好的实现压缩机电机冷却,且系统循环也存在一定不畅现象,也可通过制冷剂泵出口旁通一个压缩机冷却回路,保证压缩机冷却,系统正常运行。

从整机能效 EER、成本以及可靠性而言,当磁悬浮压缩机作为气泵使用时,COP 约为 23,具有很高的节能效益,但与制冷剂泵相比仍具有较大差距,若系统在室外温度低于 10 ℃ 时,采用制冷剂泵(氟泵)驱动的液相热管替代气泵循环,可大幅提高系统能效,因为一般制冷量 250 kW 系统匹配的制冷剂泵功率约为 0.8~1 kW,故液泵 COP 可以达到 200~300,远高于气泵,远低于磁悬浮压缩机功率。由图 8 可知,



(a) 制冷量、COP与室外温度关系



(b) 压力、压缩比与室外温度关系

图 7 磁悬浮离心压缩机(气泵)机组性能

Fig.7 Performance of magnetic suspension compressor (gas pump)

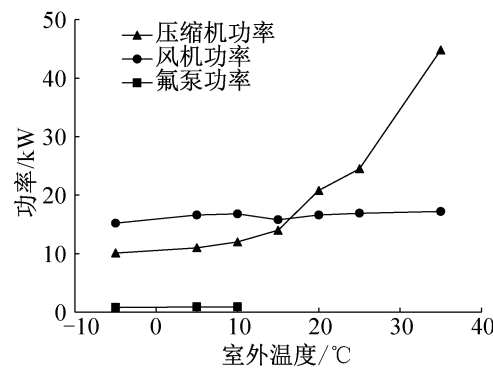


图 8 磁悬浮压缩机(气泵)机组各部件功率情况

Fig.8 Power of each component of maglev compressor (gas pump)

室外温度为 10 ℃ 时压缩机功率为 12 kW,远高于制冷剂泵功率。成本方面,大型数据中心冷水机组中,液泵成本占比很小,小于 5%,故易于推广。可靠性方面,离心压缩机在低压比工况下可能存在压头不足的情况,会造成压缩机电机冷却不良,且多联式热管背板蒸发器存在水平方向上分液不均问题,可能导致局部热点现象。若引入制冷剂泵补偿压缩机压头不足,不仅可以解决电机冷却问题,还可以强化系统循环,解决重力热管多个背板蒸发器在水平方向上分液不均的问题。

综上所述,对于大型数据中心采用离心压缩机冷却机组,利用补偿温差传热原理,并引入制冷剂泵,强化循环特性,可实现制冷系统全工况效率和空调器季节能效水平的提升和数据中心的高效制冷。

3 结论

本文将热管温差传热原理以及补偿温差最小能耗原理应用于变频转子压缩机、变频涡旋压缩机以及磁悬浮离心压缩机,研究结果表明具有较好的节能效益,得到如下结论:

1)带气泵功能的变频转子压缩机、涡旋压缩机具备低压缩比运行功能,根据室外环境温度和室内负荷不同分别可切换热管模式、过渡模式以及制冷模式,简化系统配置;变频转子压缩机单体 COP 可以超过 20(室外温度低于 5℃),变频涡旋压缩机 COP 接近 20(室外温度低于 5℃),综合成本、可靠性等多方面评估,可以较好替代液泵;但仍需满足压缩比 ε 在 1.0~4.0 之间正常运行,并且具备良好的可靠性以及较高的效率,压缩机本体回油、制冷系统回油正常。

2)在大型数据中心领域,磁(气)悬浮离心压缩机已可实现压缩比 1.0 运行,磁悬浮压缩机 COP 超过 20(室外温度低于 5℃),具有很好的节能效益;但其单体 COP 较难超过 30,与制冷剂泵相比差距较大,且存在压头不足以及多末端分液不均问题,需要液泵进行压头补偿。

3)通过压缩机单体 COP 分析,系统运行在气相热管模式下,压缩机 COP 最高,通过加大冷凝器或蒸发冷却等方式使得制冷系统逐渐接近气相热管循环可提高制冷系统能效。

4)气相动力型热管与压缩制冷技术相结合,覆盖范围广泛,适用于各类压缩机,拓宽了自然冷却利用时间,全年能效比 AEER 远高于常规机房空调,配合地域性风冷、水冷、蒸发冷等节能方法运用,为现代数据中心节能减排提供了新的解决方案。

参考文献

[1] 中国制冷学会数据中心冷却工作组. 中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2018[R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (Data Center Cooling Technical Committee of CAR. Annual reports on research and development of data center cooling technologies 2018[R]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.)

[2] ZHANG Hainan, SHAO Shuangquan, TIAN Changqing, et al. A review on thermosiphon and its integrated system with vapor compression for free cooling of data centers[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 789–

798.

[3] 张海南, 邵双全, 田长青. 数据中心自然冷却技术研究进展[J]. 制冷学报, 2016, 37(4): 46–57. (ZHANG Hainan, SHAO Shuangquan, TIAN Changqing. Research advances in free cooling technology of data centers[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(4): 46–57.)

[4] NADJABI C, LOUAHLIA H, LEMASSON S. A review of thermal management and innovative cooling strategies for data center[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2018, 19: 14–28.

[5] DING Tao, HE Zhiguang, HAO Tian, et al. Application of separated heat pipe system in data center cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109 (Part A): 207–216.

[6] TIAN Hao, HE Zhiguang, LI Zhen. A combined cooling solution for high heat density data centers using multi-stage heat pipe loops[J]. Energy and Buildings, 2015, 94: 177–188.

[7] LING Li, ZHANG Quan, YU Yuebin, et al. Experimental study on the thermal characteristics of micro channel separate heat pipe respect to different filling ratio[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 102: 375–382.

[8] LING Li, ZHANG Quan, YU Yuebin, et al. Experimental investigation on the thermal performance of water cooled multi-split heat pipe system (MSHPS) for space cooling in modular data centers[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 107: 591–601.

[9] HAN Linjun, SHI Wenxing, WANG Baolong, et al. Energy consumption model of integrated air conditioner with thermosiphon in mobile phone base station[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 40: 1–10.

[10] 张海南, 邵双全, 田长青. 机械制冷/回路热管一体式机房空调系统研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(3): 29–33. (ZHANG Hainan, SHAO Shuangquan, TIAN Changqing. Performance analysis on integrated system of mechanical refrigeration and thermosiphon[J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(3): 29–33.)

[11] ZHANG Hainan, SHAO Shuangquan, XU Hongbo, et al. Integrated system of mechanical refrigeration and thermosiphon for free cooling of data centers[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75: 185–192.

[12] MA Yuezheng, MA Guoyuan, ZHANG Shuang, et al. Experimental investigation on a novel integrated system of vapor compression and pump-driven two phase loop for energy saving in data centers cooling[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 106: 194–200.

[13] WANG Zhenying, ZHANG Xiaotong, LI Zhen, et al. Analysis on energy efficiency of an integrated heat pipe system in data centers[J]. Applied Thermal Engineering,

- 2015, 90: 937-944.
- [14] SUN Yutao, WANG Tiejun, YANG Lei, et al. Research of an integrated cooling system consisted of compression refrigeration and pump-driven heat pipe for data centers[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 187: 16-23.
- [15] ZHANG Penglei, LI Xianting, SHI Wenxing, et al. Experimentally comparative study on two-phase natural and pump-driven loop used in HVAC systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 142: 321-333.
- [16] ZHANG Penglei, LI Xianting, LI Rongjia, et al. Comparative study of two-phase natural circulation and gas-side mechanically driven loop used in air-conditioning systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 153: 848-860.
- [17] ZHOU Feng, WEI Chuancheng, MA Guoyuan. Development and analysis of a pump-driven loop heat pipe unit for cooling a small data center[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 124: 1169-1175.
- [18] MA Yuezheng, MA Guoyuan, ZHANG Shuang, et al. Cooling performance of a pump-driven two phase cooling system for free cooling in data centers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 95: 143-149.
- [19] ZHOU Feng, LI Cuicui, ZHU Wapeng, et al. Energy-saving analysis of a case data center with a pump-driven loop heat pipe system in different climate regions in China[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 169: 295-304.
- [20] 王飞, 黄德勇, 史作君. 两种动力型分离式热管系统的试验研究[J]. *制冷与空调(北京)*, 2017, 17(10): 53-57. (WANG Fei, HUANG Deyong, SHI Zuojun. Experimental study on two kinds of dynamic separate type heat pipe system[J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2017, 17(10): 53-57.)
- [22] 朱万朋, 马国远, 李翠翠, 等. 数据中心自然冷却用泵驱动两相回路系统火用分析[J]. *制冷学报*, 2019, 40(3): 24-30. (ZHU Wapeng, MA Guoyuan, LI Cuicui, et al. Exergy analysis of pump-driven two-phase loop system for free cooling in data centers[J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(3): 24-30.)
- [23] 王绚, 马国远, 周峰. 泵驱动两相冷却系统性能优化与变工质特性研究[J]. *制冷学报*, 2018, 39(4): 89-98. (WANG Xuan, MA Guoyuan, ZHOU Feng. Performance optimization and characteristics of different refrigerants for pump-driven two-phase cooling system[J]. *Journal of Refrigeration*, 2018, 39(4): 89-98.)
- [23] 石文星, 王飞, 黄德勇, 等. 气体增压型复合空调机组研发及全年运行能效分析[J]. *制冷与空调(北京)*, 2017, 17(2): 11-16. (SHI Wenxing, WANG Fei, HUANG Deyong, et al. Development of gas pressurized composite air-conditioning unit and annual operation energy efficiency analysis[J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2017, 17(2): 11-16.)
- [24] 薛连政, 马国远, 周峰, 等. 气泵驱动冷却机组在某小型数据中心的运行性能分析[J]. *制冷学报*, 2019, 40(8): 1-9. (XUE Lianzheng, MA Guoyuan, ZHOU Feng, et al. Performance analysis of gas-pump-driven free-cooling unit in a small data center[J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(8): 1-9.)
- [25] 李少聪, 马国远, 薛连政, 等. 旋转气泵驱动环路冷却机组的工作特性[J]. *制冷学报*, 2019, 40(1): 1-7. (LI Shaocong, MA Guoyuan, XUE Lianzheng, et al. Working characteristics of a rotary booster-driven loop cooling unit[J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(1): 1-7.)
- [26] 计算机和数据处理机房用单元式空气调节机: GB/T 19413—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010. (Unitary air conditioners for computer and data processing rooms: GB/T 19413—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.)

通信作者简介

邵双全, 男, 博士, 教授, 华中科技大学能源与动力工程学院, (027) 87540724, E-mail: shaoshq@hust.edu.cn。研究方向: 高效热湿环境控制理论及在舒适性空调、食品保质贮运加工全程冷链、电子产品及数据中心冷却等方面应用的关键技术研究。

About the corresponding author

Shao Shuangquan, male, Ph. D., professor, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, +86 27-87540724, E-mail: shaoshq@hust.edu.cn. Research fields: fundamental and key technologies of efficient thermal and humidity control and its application in air conditioning for human thermal comfort, cold chains for food preservation, and cooling of electronics and data center, et al.