

文章编号: 1671-6612 (2021) 03-444-07

空气制冷技术原理及发展现状

刘帅领¹ 马国远¹ 张海云² 戴 晗¹ 许树学¹

(1. 北京工业大学 北京 100124; 2. 中国计量科学研究院 北京 100029)

【摘 要】 介绍了空气制冷循环原理与工作特性, 分析了空气制冷循环系统的研究进展及应用领域, 对采用回热、多级压缩中间冷却、湿压缩、热回收等性能提升方法及关键参数影响规律进行了分析。最后, 对空气制冷机未来的发展进行了评价。

【关键词】 空气制冷; 性能提升; 应用领域; 关键技术

中图分类号 TB61+4 文献标识码 A

Principle and Development Status of Air Refrigeration Technology

Liu Shuailing¹ Ma Guoyuan¹ Zhang Haiyun² Dai Han¹ Xu Shuxue¹

(1. Beijing University of Technology, Beijing, 100124; 2. International Organization of Legal Metrology, Beijing, 100029)

【Abstract】 In this paper, the principle and working characteristics of air refrigeration cycle are introduced, and the research status and development prospect of air circulation system are analyzed. The performance improvement methods such as heat recovery, multi-stage compression intermediate cooling, wet compression and heat recovery and the influence law of key parameters are analyzed. Finally, the future development of air refrigerator is evaluated.

【Keywords】 Air refrigeration; Performance improvement; Application field; Key technology

作者简介: 刘帅领 (1995-), 男, 博士研究生, E-mail: 1172747830@qq.com

通讯作者: 许树学 (1981-), 男, 博士, 副研究员, E-mail: xsx@bjut.edu.cn

收稿日期: 2020-10-27

0 引言

空气制冷是采用空气作为工质的一种制冷技术。1844 年, 由美国人戈里制造出第一台空气制冷机^[1], 由于与之相匹配的技术落后, 其综合性能系数较低, 无法与后来出现的蒸气压缩制冷机相匹敌, 使得空气制冷机逐渐没落^[2]。近年来, 环境问题受到人们的普遍关注, 《蒙特利尔协议》的颁布意味着在不久的将来, 氟利昂制冷剂将被全面禁止使用。有鉴于此, 学者们纷纷加入到替代制冷剂的选择及应用研究行列^[3-5]。现阶段, 虽然在一些氟利昂合成替代工质方面取得了一定进展, 但仍然不是很理想^[6]。随着高效透平膨胀机、紧凑型换热器、高速轴承的出现, 使得空气制冷机又重新受到人们的重视。与蒸气压缩制冷循环相比, 空气制冷循环具有安全环保、制冷温度范围宽, 低温下性能优良、

设备简单可靠等优点。本文对空气制冷技术发展过程及最新研究进展进行总结, 以为后续深入研究提供参考。

1 理论循环

空气制冷循环又称逆布雷顿 (Brayton) 循环, 是由两个等熵过程和两个等压过程组成, 系统循环流程和温熵图如图 1 所示。

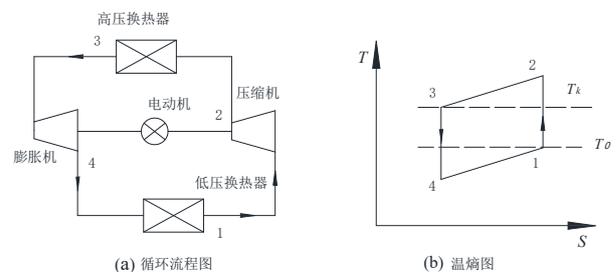


图 1 空气制冷循环

Fig.1 Air refrigeration cycle

其工作过程为: 空气先经过压缩机等熵压缩后进入高压换热器进行等压冷却, 然后在膨胀机中等熵膨胀降温, 获得的低温气流在低压换热器等压吸热后重新进入压缩机, 完成一次循环。

根据工质在制冷机内是单次使用还是循环使用, 可分为开式系统和闭式系统^[7]。开式系统采用直接送风方式省去了内热交换器, 与闭式系统相比, 其系统性能系数较小, 开式系统更易受湿度、尘埃等外界环境影响, 循环须增加相应的除湿、除尘设备, 进而增加了系统的造价和运行成本, 应根据实际情况选择开式系统还是闭式系统。

2 应用领域

美、德、日、英等国对空气制冷开展了较为深入的研究, 涉及超低温冷冻冷藏、空调等领域^[8]。目前, 全球范围内已有相应的产品, 如日本 Mycom 公司的“Pascal Air”系列产品, 应用在超低温冷库领域^[9]; 空调制冷机组应用在欧洲 (ICE) 高速铁路城际列车上^[10]; 国内也有部分学者对相关技术进行了研究^[11-15]。

2.1 低温

空气制冷机极易制取低温, 并具有较宽温度调节范围 ($-100^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 及以上), 理论上可以达到绝对零度^[16]。在低温领域采用空气制冷循环系统比采用蒸气压缩制冷循环系统具有明显的优势。图 2 为采用蒸气压缩制冷循环以获取连续常压低温气流设备的流程图。

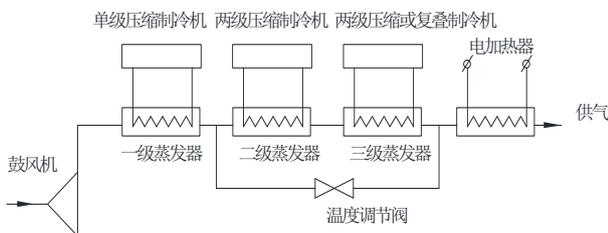


图 2 多级蒸气压缩制冷循环

Fig.2 Multi-stage vapor compression refrigeration cycle

从图 2 中可以看出设备较复杂, 其原因为:

(1) 蒸气压缩制冷循环的制冷量随蒸发温度的降低而迅速下降;

(2) 为合理使用制冷量, 必须采用多级分段冷却, 采用多级压缩或复叠蒸气制冷循环, 这必然导致系统 COP 降低和成本增加。

文献[17]分析指出, 采用开式回冷循环的空气制冷机性能要优于蒸气压缩制冷机, 在食品冷冻冷藏中具有较好的发展前景。

2.2 普冷

虽然在低温领域空气制冷技术具有蒸气压缩制冷技术不可比拟的优势, 但将空气制冷技术应用在普冷领域, 适宜的场合不多。飞机空调系统采用的是空气制冷机系统, 主要是因为空气制冷装置能充分利用飞机现有的条件, 引用飞机涡轮发动机产生的增压空气作为制冷工质, 以机外冲压空气作为冷却介质, 只需增加透平膨胀机及其附属设备, 提高设备利用率, 实现系统小型化。空气制冷机系统经过 60 多年的发展, 已从简单循环逐渐发展到多种升压制冷循环, 包括二轮升压循环系统、三轮升压循环系统、四轮升压循环系统和逆升压循环系统, 系统循环效率逐步提高, 运行更加稳定可靠^[18]。目前, 空气制冷机在普冷领域也逐渐应用在列车机组^[19]、地下井矿^[20]等。

文献[21]提出了分体四轮式 ACS (Air Cycle System) 空气制冷循环系统, 该系统采用两个独立的透平涡轮冷却器来代替一体化四轮式冷却器。基于焓参数法对分体四轮与一体化四轮进行热力过程分析, 结果表明, 两个系统的热力性能保持一致, 该方法可以降低一体化四轮式涡轮冷却器的研制难度。

2.3 热泵

采用热泵循环时, 空气循环系统采用半开式结构不会出现换热表面结霜问题, 在不同环境下系统均具有较为稳定的 COP^[22,23]。文献[24]对空气循环热泵热水系统 (ACHPWH) 在冬季工况、低温工况和全年工况下运行进行性能评估, 其系统流程如图 3 所示。

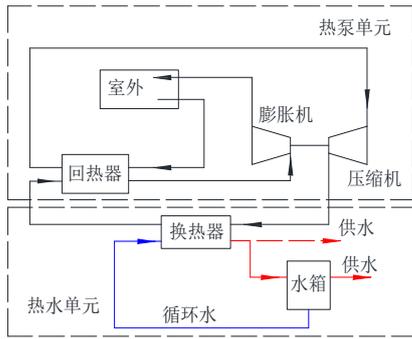


图3 空气循环热泵热水系统

Fig.3 Air circulation heat pump hot water system

研究表明,在设计工况下,随着供水温度的升高, COP 值之间的差距会降低,并且空气循环热泵热水系统的热需求与热容量是匹配的。空气循环热泵热水系统用作水加热器具有较好的应用前景,特别适用于寒冷气候的即热系统。

文献[25]搭建了一个由一台涡轮增压器、两台鼓风机和两台板式换热器组成的空气循环系统实验台,实验研究了系统 COP 随环境温度及供水温度的变化关系。由图 4 可以看出,空气循环热泵系统的 COP 变化范围为 1.12~1.22,系统制热 COP 随环境温度的升高而缓慢下降,在不同测试工况下, COP 值变化很小,对环境温度 and 热水供应温度不敏感。

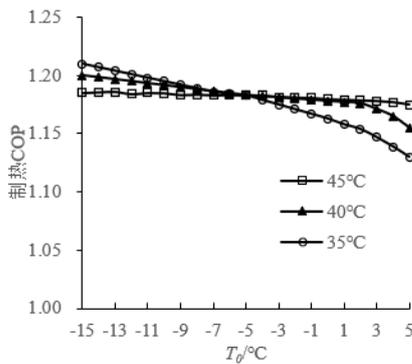


图4 在不同环境温度下的 COP

Fig.4 COP at different ambient temperatures

3 性能提升方法

空气作为制冷工质时,由于其比热小,临界温度低,在空气制冷循环中只能利用显热,不能实现等温吸放热,循环过程不可逆损失增加,使得空气制冷循环的制冷量小、循环效率低。通常采用如下方法提升性能。

3.1 回热

回热是指在基本循环基础上增加回热热交换器,把高压换热器排出的高温气流用来加热进入压缩机的低压常温气流,以提高压缩机入口气流的温度,使得压缩机耗电降低。图 5 是回热与无回热空气循环 T-S 图。从图中可以看出,在制冷量不变的情况下,回热循环降低了压缩机压比和膨胀比,有利于提高空气制冷机的实际制冷系数。

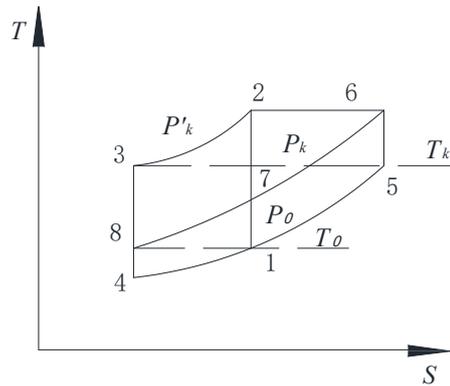


图5 回热与无回热空气循环 T-S 图

Fig.5 T-S diagram of regenerative and non-regenerative air cycle

文献[26]将两级压缩中间冷却空气循环系统应用在列车空调中,对系统采用无回热和有回热进行对比分析,其制冷 COP 值变化如图 6 所示。系统采用回热器时,最大值为 1.36;不采用回热器时, COP 最大值为 1.25。空气制冷循环采用回热器虽然使得系统设备体积增加,但有效提高了系统性能,同时也降低了压缩比和膨胀比,为空气制冷系统的小型化提供可能。

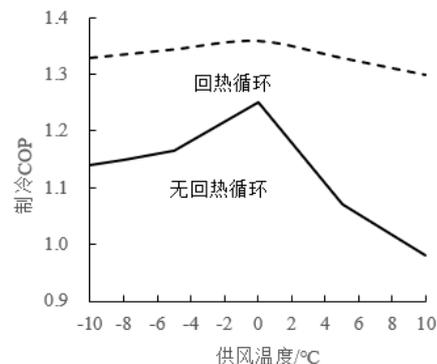


图6 回热与无回热制冷 COP 随供风温度的变化

Fig.6 Changes of cooling COP regenerative and non-regenerative with air supply temperature

3.2 两级压缩中间冷却

卡诺循环指出,最理想的压缩方式为等温压缩。多级压缩正是从等熵压缩向等温压缩的一种过渡,可以降低压缩机功耗,提高系统的循环效率,两级压缩的 $T-S$ 图如图 7 所示。在相同压比下,两级压缩比单级压缩功耗小的多。

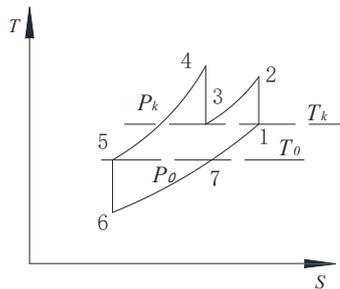


图 7 两级压缩中间冷却 $T-S$ 图

Fig.7 $T-S$ diagram of Two-stage compression intermediate cooling

空气制冷循环中,第二级压缩往往采用膨胀机做功驱动,可以提高系统效率。文献[11]分析了两级压缩与单级压缩对系统制冷系数的影响,如图 8 所示。从图中可以看出,压比在 1.8 时,两级压缩系统的 COP 比单级压缩系统的 COP 高 0.1,并且随着压比的增加之间的差值增加。系统最佳压比在 2.0 左右。

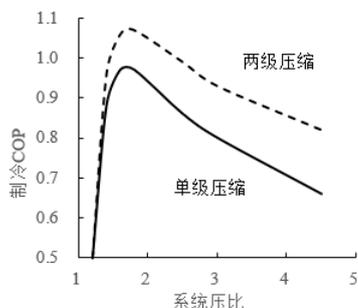


图 8 制冷 COP 随系统压比的变化关系

Fig.8 Relationship between refrigeration COP and system pressure ratio

3.3 湿压缩

1974 年,美国人 R.V.Kleinschmidt 首先提出了湿压缩 (Wet Compression) 的概念^[27]。在压气机入口或级间向气体喷入冷却液体,冷却液体与空气进行充分混合,利用液体的汽化潜热使压缩过程更接近等温过程,降低压缩机功耗。

文献[28]对空气/水混合工质进行了理论分析,

指出水的相变对空气压缩和膨胀过程具有良好的效果,使得循环具有较高的经济性,在膨胀功充分利用前提下,该系统的制冷循环 COP 可达 6~7。文献[29]对实际湿压缩过程建立理论计算模型,模拟计算得出,随着喷水量的增加,压气机的出口温度和功耗都在降低,压缩终温最大可降低 6℃。

3.4 关键部件

文献[30]分析了各部件效率对制冷 COP 的影响,如图 9 所示。透平膨胀机效率对应的斜率最大,表明透平膨胀机效率对机组性能系数影响最大,其次是第二压缩机的增压端、第一压缩机,最后是回热器。

在空气制冷循环系统中,产冷的关键部件是透平膨胀机,为保证透平膨胀机高效运行,需要转子在高速下运作,因此需要选择高速气体轴承,以及保证转子具有稳定性^[31,32]。文献[33]指出高速电机驱动技术将为空气制冷循环技术的发展带来较大影响。

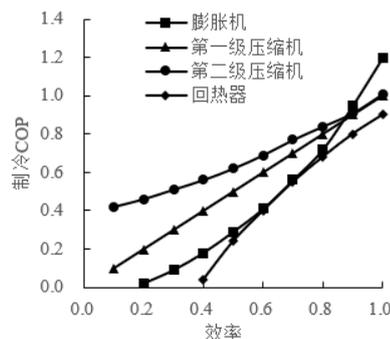


图 9 各部件效率对制冷 COP 的影响

Fig.9 Efficiency influence of each component on refrigeration COP

20 世纪 70 年代,美国 ROVEC 公司开发了一种变容式空气制冷机^[34],具有能耗少、尺寸小、运转平稳、启动方便的优点。其典型的型面有四种:偏心圆、椭圆、椭圆偏心圆和双维偏心椭圆,其中偏心圆横截面形状如图 10 所示。变容式压缩机可以在压缩机入口喷雾化水,利用水的汽化潜热,使功耗减小^[35,36]。

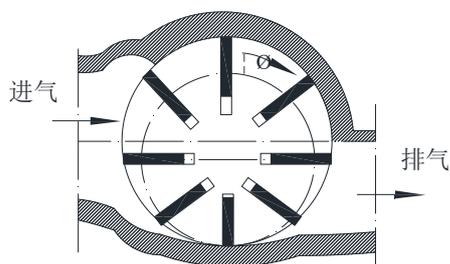


图 10 偏心圆横截面图

Fig.10 Cross section of eccentric circle

3.5 除水

空气制冷循环系统中含有大量水蒸气且湿度过高时, 经过透平涡轮时, 当温度降低到冰点以下会使空气中的水蒸气凝结甚至会结冰, 凝固的水蒸气不仅放出潜热使系统冷量受损, 而且产生的冰晶对涡轮叶片产生磨损, 更有甚者会堵塞管路, 使得系统瘫痪。为此空气制冷循环系统的除湿技术是必要的。在空气制冷循环系统中常用的除湿方法有压缩除水法和吸附法, 其中压缩除水法包括低压除水法和高压除水法。

文献[37]利用高压除水系统中分离出的冷凝水来冷却高压换热器, 研究表明, 在温度为 33-37℃时, 相对湿度为 95%时的 COP 比相对湿度为 65%时的 COP 高 20%左右, 空气制冷循环系统在夏季高湿环境中更具优势。

吸附法是利用多孔固体作为吸附剂 (如硅胶、氧化铝等), 吸附从一级压缩机出来经过冷却器的水蒸气, 以达到干燥的目的, 吸附剂达到饱和和后失去吸附能力, 但可以通过太阳能技术[38]、废热利用[39]等方式进行再生重复使用。

3.6 热回收

空气循环系统在实际工作过程中有大量的能量损失, 压缩空气时会产生大量的压缩热, 文献[40]指出, 在空气压缩过程中, 将电能用于增加空气势能所消耗的电量占总电量的 15%, 约有 85% 的电转换为热量排放到大气环境中造成了大量的能源浪费。为降低能源损失, 应合理高效利用压缩机产生的排热, 比如应用在干燥[41]、生活热水[42]等方面。

文献[41]设计了一个压缩机废热热回收装置, 该热回收流程如图 11 所示。系统利用压缩机废热驱动吸收式制冷机, 对压缩机空气进行干燥除湿, 同时回收部分废热用以生产生活热水。

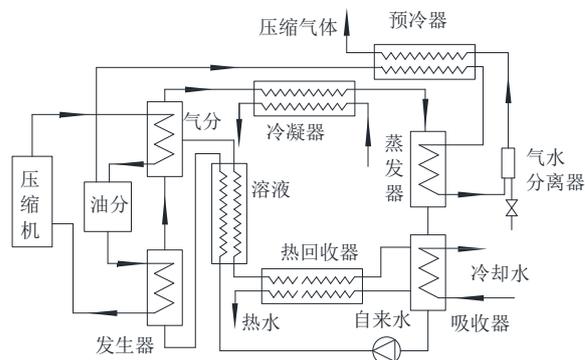


图 11 热回收流程示意图

Fig.11 Schematic diagram of heat recovery process

3.7 运行参数匹配

影响空气制冷循环系统性能参数主要有透平膨胀机等熵效率 η_{es} 、压缩机的等熵效率 η_{cs} 、换热器效率 η_r 、膨胀比和压缩比等。文献[43]针对开式空气制冷循环系统的热力性能进行理论分析, 研究在不同制冷温度下, η_{cs} 、 η_{es} 、 η_r 对系统 COP 的影响。结果表明, 随着 η_{es} 、 η_{cs} 和 η_r 增加, 系统 COP 逐渐增加, 膨胀机等熵效率 η_{es} 对 COP 影响最大, 提高膨胀机等熵效率是最有效的; 换热器效率和 COP 之间近似呈线性关系, 改善换热器效率也是提高系统性能行之有效的方法。

文献[44]对实际空气制冷循环系统进行了热力学分析并建立理论计算模型, 结果如图 12 所示。与理论循环不同, 实际循环存在 COP 对应最佳膨胀比, 当膨胀比小于最佳膨胀比时, 系统 COP 逐渐下降, 当膨胀比高于最佳膨胀比时, 系统 COP 缓慢下降。在外部环境一定时, 膨胀比 PR 越大, 膨胀机出口空气温度 T_4 越低, 当膨胀比 PR 大于 5 时, 膨胀比对系统 COP 影响较小, 所以在低温领域应用中不必过分强调膨胀比; 但将空气制冷循环应用在空调领域时, 要求膨胀机出口温度不能太低, 循环在小膨胀比范围内工作。

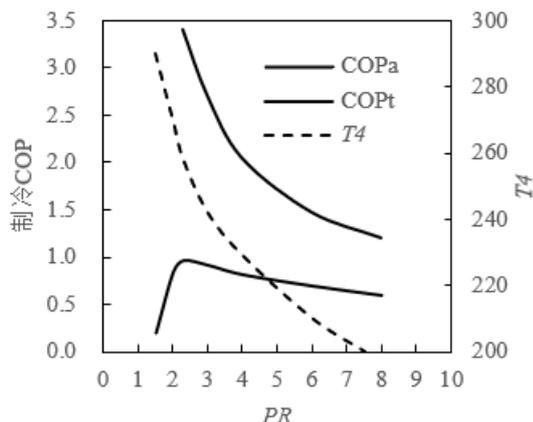


图 12 COP 和 T_4 随膨胀比 PR 的变化

Fig.12 Changes of COP and T_4 with the expansion ratio PR

4 总结与展望

空气制冷循环系统在普通空调领域虽不及蒸汽压缩制冷循环系统,但在低温领域,空气制冷循环具有蒸汽压缩循环不可比拟的优势,在普通空调领域应用和推广空气制冷循环系统,提高其系统 COP 是重中之重。回热、双级压缩中间冷却、湿压缩、除水、热回收、运行参数匹配等是提高系统性能的有效方式,压缩机、膨胀机效率对系统性能影响较大,开发出高效、一体化压缩—膨胀机是空气制冷机未来发展的关键。

参考文献

[1] 杜建通.空气制冷循环的特性及其在制冷空调中应用的关键技术[J].低温与超导,1999,27(3):33-38.
 [2] Goodyer M J, Kilgore R A. High-Reynolds-number cryogenic wind tunnel[J]. AIAA Journal,1973,11(5): 613-619.
 [3] 张晓丹,郎贤明,刘忠赏.新型替代制冷剂的应用与分析[J].制冷与空调,2019,19(6):38-41.
 [4] 史琳,安青松.基加利修正案生效后替代制冷剂的选择与对策思考[J].制冷与空调,2019,19(9):50-58.
 [5] 许晨怡,郭智恺,史婉君,等.HFOs 制冷剂在制冷空调领域的替代研究综述[J].制冷与空调,2019,19(8):1-13.
 [6] 李敏华,巫江虹.空气制冷技术的现状及发展探讨[J].制冷与空调,2005,5(2):11-15.
 [7] 秦刚,李敏,等.空气制冷机[M].北京:国防工业出版社,1980.

[8] 杜建通.空气制冷循环的特性及其在制冷空调中应用的关键技术[J].低温与超导,1999,27(8):32.
 [9] 郑爱平.利用空气制冷的地下冷库[J].西北建筑工程学院学报,1994,(2):73.
 [10] 加藤 聪(日).采用空气循环制冷机的 ICE 客车用空调[J].国外铁路车辆,2003,40(4):21-24.
 [11] 刘云霞,赵远扬,王尚锦.列车空调用空气制冷系统的方案设计[J].流体机械,2003,31(6):48-51.
 [12] 刘忠宝.双级压缩正升压流程空气制冷系统在铁路列车空调中的应用探讨[J].制冷学报,2001,(1):59-62.
 [13] 张振迎,杨永,陈艳华,等.空气制冷机在列车空调中的应用分析[J].制冷技术,2009,37(5):57-60.
 [14] 何升,庄明,盛林海,等.空气循环制冷机试验台设计与测试[J].制冷技术,2018,46(8):54-57.
 [15] 侯予,王瑾,熊联友,等.逆布雷顿(Reverse-Brayton)循环空气制冷机系统试验台的建立[J].低温工程,2000,(2):7-11.
 [16] 黄艳玲,陈汝东.空气制冷循环在冷藏库中的应用[J].制冷空调与电力机械,2008,(4):32-34.
 [17] 臧润清,韩新宇,黄悦.空气制冷机在食品冷冻中的应用分析[J].制冷技术,2006,34(5):390-393.
 [18] 林韶宁,夏葵,李军,等.空气制冷机在飞机空调系统中的应用[J].流体机械,2004,32(10):46-49.
 [19] Heinz Kurz.德国新一代 ICE 高速列车-ICE[J].国外铁道车辆,1998,(3):21-24.
 [20] 苏兵,侯予,赵红利,等.矿井空调系统采用空气制冷机的可行性分析[J].矿山机械,2007,35(6):37-41.
 [21] 杨涵,张兴娟,王超,等.分体四轮式空气循环制冷系统仿真及试验研究[J].北京航空航天大学学报,2020, 46(12):2203-2210.
 [22] Gigiel A J. Air cycle refrigeration[J]. Fuel and Energy Abstracts, 1996,37(4):31-38.
 [23] T Pelsoci. Closed-cycle air refrigeration technology for cross-cutting applications in food processing, volatile organic compound recovery, and liquid natural gas industries: economic case study of an ATP-funded program[R]. report NIST GCR, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2001:01-819.
 [24] Yang Liang, Yuan Han, Weipeng Jing, Chunlu Zhang. Performance modeling of air cycle heat pump water heater in cold climate[J]. Renewable Energy, 2016:1067-1075.

- [25] Shuang shuang Li, Shugang Wang, et al. Experimental investigation of a regenerated air cycle heat pump heating system with a turbocharger[J]. International Journal of Refrigeration, 2019:48-54.
- [26] 任金禄. 空气制冷机[J]. 制冷与空调, 2008, 6(8):15-21.
- [27] Kleinschmidt R V. Value of wet compression is gas-turbine Cycles[J]. Mechanical Engineering, 1947, 69:115-116.
- [28] 李豪, 高洪涛. 空气/水混合工质制冷循环理论计算[J]. 大连海事大学学报, 2006, 32(2):117-120.
- [29] 李淑英. 湿空气压气机性能研究[R]. 哈尔滨工业大学博士后研究报告, 2004, 4.
- [30] 何升, 庄明, 蒋庆峰, 等. 空气循环制冷剂的有用能分析及优化[J]. 低温工程, 2019, (1):31-40.
- [31] Hongli Zhao, Yu Hou, Yongfeng Zhu, et al. Experimental study on the performance of an aircraft environmental control system[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(16):3284-3288.
- [32] Yu Hou, Hongli Zhao, Chunzheng Chen. Comparative test on two kinds of new compliant foil bearing for small cryogenic turbo-expander[J]. Cryogenics, 2004, 44(1):69-72.
- [33] 肖晓劲, 袁修干. 高速电机驱动的空气循环制冷技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(1):80-83.
- [34] 余海结, 王浚. 新型变容压缩机[J]. 低温工程, 1997, (1):41-44.
- [35] 王浚. 变容式压缩机型面和参数影响因素分析[J]. 流体机械, 1987, (5):24-30, 68.
- [36] 王俊. 混合工质制冷技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1987.
- [37] Xiaoxin Wang, Xiugan Yuan. Reuse of condensed water to improve the performance of an air-cycle refrigeration system for transport applications[J]. Applied Energy, 2007, (84):874-881.
- [38] 冯毅, 谭盈科, 李宗楠. 太阳能驱动的吸附除湿空调系统的研究[J]. 太阳能学报, 2000, 21(3):265-268.
- [39] C E L Nobrega, L A Sphaier. Desiccant-assisted humidity control for air refrigeration cycles[J]. Sci Verse Science Direct, 2013, 36:1183-1190.
- [40] 张浩, 闵圣凯. 空气压缩机的热回收改造实践[J]. 上海节能, 2009, (2):8-10.
- [41] 戴雨辰, 陈飞, 李宏顺, 等. 一种空气压缩机废热综合利用系统[J]. 节能, 2015, (10):61-64.
- [42] Handong Wang. Comprehensive utilization system of waste heat generated by air compressor[J]. 2011 International conference on Machine Intelligence, 2011.
- [43] 孙郁, 侯予, 赵红利, 等. 逆布雷顿循环空气制冷机的性能分析[J]. 低温工程, 2006, (1):27-30.
- [44] 张振迎, 廖胜明. 实际逆布雷顿空气制冷循环的性能研究[J]. 制冷技术, 2007, 35(6):523-526.

(上接第 359 页)

- [7] 周芮锦, 潘毅群, 黄治钟. 基于时间序列分析的建筑能耗预测方法[J]. 暖通空调, 2013, 43(8):71-77.
- [8] 马忠娇, 张吉礼. 基于相似工况组合权重的空调能耗预测方法[J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(12):13-18.
- [9] 杨柳, 侯立强, 李红莲, 等. 空调办公建筑能耗预测回归模型[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(5):707-711.
- [10] 沙国荣, 钱青. 人工智能算法在建筑能耗预测中应用综述[J]. 科技创新与生产力, 2018, (9):58-59, 62.
- [11] 李俊峰, 戴文战. GM(1,1) 改进模型的研究及在上海市发电量建模中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(3):140-144.
- [12] 宋晓华, 祖丕娥, 伊静, 等. 基于改进 GM(1,1) 和 SVM 的长期电量修正组合预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, (5):1803-1807.
- [13] 李昕, 张明明. SPSS 22.0 统计分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.

(上接第 364 页)

- [3] Kwon H B. Numerical study of flow characteristic of the

-
- high-speed train passing through a tunnel [J]. Proc Instn Meeh Engrs Part F, 2003, 217(2).
- [4] 闫春利, 雷波. 行车对数和位置对活塞风井通风特性的影响[J]. 制冷与空调, 2018, 32(1): 1-6.
- [5] 崔景东. 铁路隧道活塞风数值模拟及特性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
- [6] J Y Kim, K Y Kim. Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2007, 22(2): 166-172.
- [7] 王树刚, 江亿, 朱颖心. 北京地铁列车活塞风的实测与分析[J]. 暖通空调, 1998, (5): 49-51.
- [8] 甘甜, 王伟, 赵耀华, 等. 地铁活塞风 Fluent 动网格模型建立与验证[J]. 建筑科学, 2011, 27(8): 75-81.
- [9] 李炎. 铁路隧道列车活塞风特性分析及理论研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2010.
- [10] 李人宪, 袁磊. 高速列车通过隧道时的压力波动问题[J]. 机械工程学报, 2014, 50(24): 115-121.