

文章编号:1005-0329(2017)06-0077-06

变频双级离心式冷水机组原理及其控制分析

董凯军^{1,2,3},邵振华^{1,2,3},王志强^{1,2,3},孙 钦^{1,2,3},黄祥发^{1,2,3},黄志林^{1,2,3,4}

(1.中国科学院广州能源研究所,广东广州 510640;2.中国科学院可再生能源重点实验室,广东广州 510640;3.广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室,广东广州 510640;4.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 变频双级离心式冷水机组采用变频技术,极大地提高机组部分负荷运行时的性能系数,采用双级压缩技术,机组循环效率得到提高。变频双级离心式冷水机组广泛应用于暖通空调系统当中,本文依次介绍变频双级离心式冷水机组结构、节流原理及其控制、回油方式、设备冷却方式、喘振机理及其控制。节流电子膨胀阀经验值控制方式以计算出来的开度值为控制目标来调节电子膨胀阀,无需传感器,机组成本降低,控制可靠性提高;变频双级离心式冷水机组实时计算出当前导叶开度下的防喘频率,防喘频率与当前的运行频率进行比较,作出对应的控制,从而避免喘振现象的发生。

关键词: 离心;双级;变频;节流;回油;设备冷却;喘振

中图分类号: TH138;TK5

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1005-0329.2017.06.016

Principles and Control Analysis of Variable Frequency and Double-stage Centrifugal Chiller

DONG Kai-jun^{1,2,3}, SHAO Zhen-hua^{1,2,3}, WANG Zhi-qiang^{1,2,3}, SUN Qin^{1,2,3},
HUANG Xiang-fa^{1,2,3}, HUANG Zhi-lin^{1,2,3,4}

(1.Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2.Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3.Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China; 4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A variable frequency and double-stage centrifugal chiller using inverter technology, can greatly improve the coefficient of performance of the part operation load, and the use of the double-stage compression technology, can improve cycle efficiency. Currently, the variable frequency and double-stage centrifugal chiller are widely used in HVAC; structure, throttle principle and control, oil return methods, equipment cooling methods, surge principle and control on the variable frequency and double-stage centrifugal chiller were described respectively. Electronic expansion valve with control mode of Experience Value uses the calculated value as the control target to adjust the electronic expansion valve; compared with the existing liquid level control mode and the exhaust superheat control mode, the cost of chiller is reduced, and the control reliability is improved. Variable frequency and double-stage centrifugal chiller calculates the current anti-surge frequency, and make the corresponding control to avoid the occurrence of surge phenomenon by comparing with current operating frequency.

Key words: centrifugal chiller; variable frequency; double-stage; throttle; oil return; equipment cooling; surge

1 前言

冷水机组是大型公共建筑中常用的中央空调设备,其中离心式冷水机组因其有冷量大、能效高而得到广泛的应用^[1]。离心式压缩机通过叶轮

对气体做功,在叶轮和扩压器的流道内利用离心升压作用和降速扩压作用,将机械能转换为气体压力能。空气调节系统的冷负荷随季节气候和室内人员数量而变化,在1年的运转时间内,冷水机组主要在部分负荷下运转,因此,离心式冷水机组

收稿日期: 2016-10-20 修稿日期: 2017-05-11

基金项目: 广东省省级科技计划项目(2013A011404001);广东省自然科学基金项目(2015A030310333);广东省省级科技计划项目(2015B090901012)

部分负荷下的高效运行对降低全年能耗具有十分重要的意义。定频离心式冷水机组是通过改变压缩机的进口导叶开度来实现制冷量调节,当负荷降低时,降低导叶开度,制冷剂在流过导叶时存在冲击和摩擦损失,使得部分负荷下压缩机的压缩效率下降^[3],建筑空调领域的离心式冷水机组大都存在“大马拉小车”现象,因此适合采用变频调速调节制冷量^[4],变频机组避免了定频离心式冷水机组降低导叶开度所带来的冲击和摩擦损失,具有显著的节能效果。变频离心式压缩机电机输入功率满足以下关系式:

$$P = k\Delta P q_v / \eta \quad (1)$$

式中 P ——电机功率

k ——常数

ΔP ——气态制冷剂的全压

q_v ——气态制冷剂的体积流量

η ——电机效率

压头 ΔP 、体积流量 q_v 分别与电机转速的二次方、一次方成正比,电机功率与电机转速的三次方成正比,而离心式冷水机组制冷量与转速的一次方成正比^[5],由此降低转速一次方降低制冷量满足部分负荷的同时,电机功率三次方降低,一定程度上提升机组部分负荷下的性能系数,保证了离心式冷水机组高低负荷下的高效运行。相对于单级离心式冷水机组,双级离心式冷水机组采用双级压缩技术,系统循环效率提高了5%~6%,同时又能够最大限度地抑制喘振发生,运行范围增大^[6]。变频技术与双级压缩技术的结合广泛应用于离心式冷水机组当中,本文依次介绍变频双级离心式冷水机组结构、节流原理及其控制、回油方式、设备冷却方式、喘振机理及其控制。

2 机组原理及结构

变频双级离心式冷水机组主要由压缩机、冷凝器、蒸发器、节流机构、变频器及经济器组成。图1与图2分别是带有闪发式经济器的变频双级离心式冷水机组制冷循环图与 $\lg p-h$ 图^[7-9],该冷水机组的制冷量由电机转速与入口导叶联合调节,变频器控制电机的转速,间接控制压缩机的转速,离心式压缩机由电能驱动产生机械动力,压缩机将一级叶轮压缩过的制冷剂气体与来自于闪发

式经济器的中温中压制冷剂气体压缩成高温高压的蒸汽,在冷凝器中高温高压的蒸汽通过换热被冷却水冷凝成高压液体,从冷凝器出来的高压液体经过一级孔板后进入闪发式经济器形成中间压力的气液混合物,闪发式经济器上部闪发的气体温度升高,同时不断闪发致使闪发式经济器下部的液体过冷降温,过冷降温后的制冷剂液体经过二级孔板节流到蒸发压力后进入蒸发器,蒸发器的制冷剂吸收低温环境中的热量而变为低压气体通过吸气口被离心式压缩机一级叶轮压缩,闪发式经济器上部产生的闪蒸气体与一级叶轮压缩过的气体混合被离心式压缩机二级叶轮压缩成高温高压的蒸汽,高温高压的蒸汽进入冷凝器,如此完成一个制冷循环。

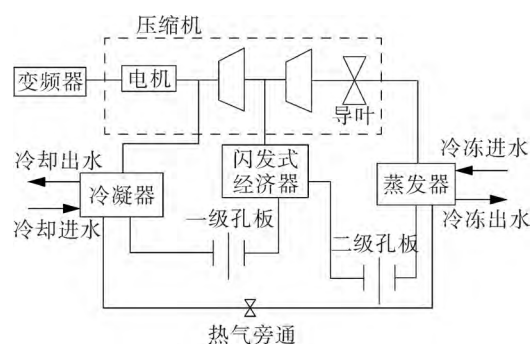


图1 变频双级离心式冷水机组制冷循环

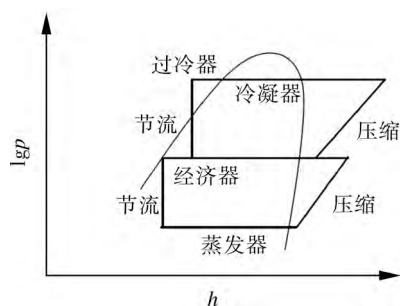


图2 变频双级离心式冷水机组 $\lg p-h$ 曲线

3 机组节流原理及其控制

节流机构是空调的组成部件之一,节流孔板是冷水机组常用的节流机构,孔板作为节流元件时,因孔口大小不能调节,系统的节流特性不能始终保持在最佳状态,特别是部分负荷时,孔板的节流能力与负荷匹配不好,往往在冷凝器与蒸发器之间设置液旁通。液旁通回路上设置电子膨胀阀的变频双级离心式冷水机组制冷循环如图3所示,双级孔

板孔径给定不可变,故对节流电子膨胀阀的控制是关键。目前所用到的节流电子膨胀阀控制方式,多采用将液位或吸排气过热度作为控制目标,使机组运行时自动调节节流电子膨胀阀开度至目标值。液位控制方式是通过计算实际蒸发器液位与设定蒸发器液位的差值来调节电子膨胀阀的开度,而机组实际运行时,蒸发器壳管内为沸腾状态,液位传感器对实时液位的判断存在很大的偏差,导致液位显示值有很大的波动,机组运行极不稳定。吸排气过热度控制方式是通过计算实际吸排气过热度与目标过热度的差值来调节电子膨胀阀的开度,由于离心式冷水机组的系统特性,吸气过热度远小于排气过热度,导致节流电子膨胀阀在较大范围内调节时吸气温度并无明显变化,造成严重控制盲区^[10],因此一般常采用排气过热度控制方式。以上所有控制方式均需要额外添加液位传感器及温度传感器,添加了机组生产成本。

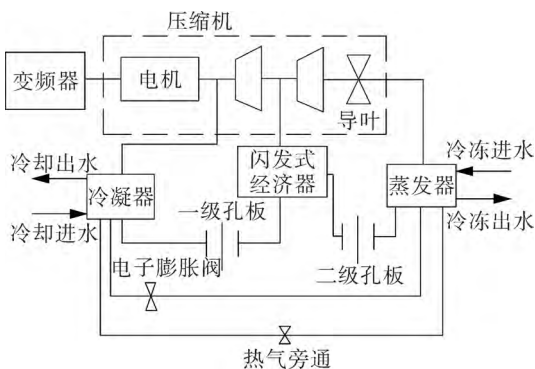


图3 带电子膨胀阀的变频双级离心式冷水机组制冷循环

孔板流量计算式:

$$q_m = \varepsilon \frac{C}{(1-\beta^4)^{1/2}} (2\Delta p \rho_1)^{1/2} \frac{\pi}{4} d^2 \quad (2)$$

式中 q_m ——制冷剂流量
 ε ——膨胀系数
 C ——流出系数
 ρ_1 ——上游液体密度
 β ——孔径比
 Δp ——孔板前后压差
 d ——孔板孔径

根据式(2)可以得到:制冷剂流量正相关于孔板孔径和压差,而电流正相关于制冷剂流量,反推得到孔板孔径正相关于压缩机电流,反相关于压差;节流电子膨胀阀可以看作是变截流面积的节流孔板,基于此,提出了节流电子膨胀阀的经验

值控制方式,即节流电子膨胀阀的开度正相关于压缩机电流,反相关于压差。经验值控制方式是通过实时的压缩机电流值和高低压差值计算出节流电子膨胀阀的开度值,以计算出来的开度值为控制目标来调节电子膨胀阀,提高了控制的稳定性及可靠性。相比现有液位控制方式和排气过热度控制方式,不需要液位传感器和温度传感器,降低了机组成本。机组运行过程当中会遇到特殊工况,包括排气过热度过低和蒸发器低压过低情况。当排气过热度过低时,节流电子膨胀阀按照一定的方式降低电子膨胀阀的开度来防止压缩机吸气带液;蒸发器压力下降太快时,节流电子膨胀阀按照一定的方式增大电子膨胀阀的开度来防止蒸发压力过低。

4 机组回油方式

按冷水机组回油的驱动力不同,冷水机组回油方式有重力回油^[11]、冷媒提纯回油及引射回油,本文主要介绍冷媒提纯回油及引射回油方式。

4.1 冷媒提纯回油

在冷水机组运行中,由于润滑油不蒸发,进入蒸发器中的润滑油越来越多,冷媒的纯度也越来越低,油箱中的润滑油越来越少,使得制冷剂流动不畅,制冷效果下降。冷媒提纯装置如图4所示,连接管穿过冷媒提纯装置,蒸发器和冷凝器通过连接管连接,蒸发器上方通过油、制冷剂混合液输送管连接冷媒提纯装置下方,冷凝器上方通过气态制冷剂输送管连接冷媒提纯装置上方,冷媒提纯装置下方通过油输送管连接油箱入口,冷媒提纯装置上方还通过另一气态制冷剂输送管连接压缩机入口^[12]。

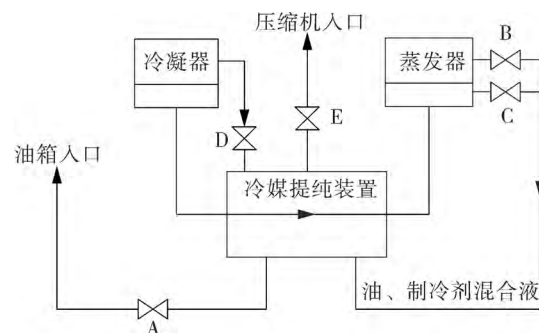


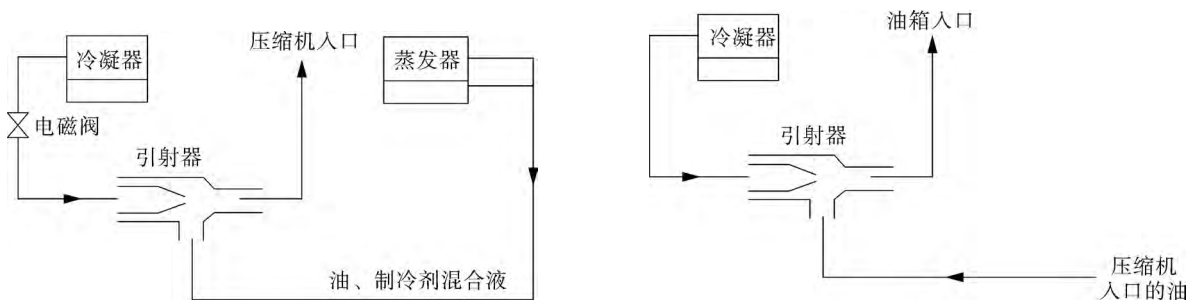
图4 变频双级离心式冷水机组冷媒提纯原理
A~E. 电磁阀

在机组运行状态下,控制器控制 B、C 及 E 电磁阀的开启,让蒸发器里面的油、制冷剂混合液流入冷媒提纯装置内,冷凝器的高温制冷剂经过连接管,对冷媒提纯当中的混合液升温之后,冷媒提纯装置当中的制冷剂便不断蒸发形成气体,回到压缩机入口被压缩,而混合液当中剩下的润滑油慢慢累积存在冷媒提纯装置内,润滑油积存一定时间后,控制器控制 B、C 和 E 电磁阀的关闭,并控制 A、D 电磁阀的开启,冷凝器的高压制冷剂气体将冷媒提纯装置内润滑油压送到压缩机油箱入口处,实现自动回油。

4.2 引射回油

引射器是一种利用高压高速的驱动流去引射抽吸另一种流体的流体机械装置,冷水机组引射器回油采用 2 次引射,如图 5 所示。图 5(a) 中,控制器控制电磁阀的开启,从冷凝器引出高压制

冷剂蒸汽进入引射器,含润滑油与液态制冷剂的混合液体从蒸发器被抽吸出来,混合进入压缩机入口处,入口处的制冷剂气体被压缩机压缩。液态的油沉积在压缩机入口处,沉积在压缩机入口处的润滑油通过第二次引射被冷凝器高压制冷剂蒸汽抽吸出来,混合进入油箱入口处,如图 5(b) 所示。通过 2 个引射过程实现自动回油,冷媒纯度得到提高。与第一个引射过程不同,第二个引射过程没有电磁阀,一直处于常开状态,若第一个引射器处于工作时,第二个引射器即起作用。对于变频双级离心式冷水机组,二级叶轮压缩后的高压制冷剂气体或者一级叶轮压缩后的制冷剂气体压力均高于蒸发压力和压缩机入口处的油压力,驱动流除了可选择冷凝器当中的高压制冷剂蒸汽,也可选择二级叶轮压缩后的高压制冷剂气体或者一级叶轮压缩后的中压制冷剂气体。



(a) 第一次引射

(b) 第二次引射

图 5 变频双级离心式冷水机组引射器回油示意

5 机组设备冷却方式

冷水机组通过变频器调节电机的转速来满足不同工况的要求,变频器及电机的长期运行导致其温度较高,由此整个机组当中需要冷却的有变频器与电机,可以用来冷却变频器与电机的工质有机组自身的制冷剂及冷水机组制取的冷水,鉴于机组的安全性及机组成本,一般不采用机组自身制取的冷水来作为冷却工质,借助制冷剂工质,冷却的方法一般有高低压差冷却方式及引射冷却方式^[13]。引射冷却原理与引射回油原理一样,本文主要介绍高低压差冷却方式。

单级离心式冷水机组,冷凝器与蒸发器之间存在压差,而对于变频双级离心式冷水机组,由于闪发式经济器的存在,除冷凝器与蒸发器

之间存在压差外,冷凝器与闪发式经济器、闪发式经济器与蒸发器之间也存在压差,但冷凝器与闪发式经济器之间的压差、闪发式经济器与蒸发器之间的压差较小,一般利用冷凝器与蒸发器之间压差作为驱动力进行节流降温,其原理如图 6 所示。

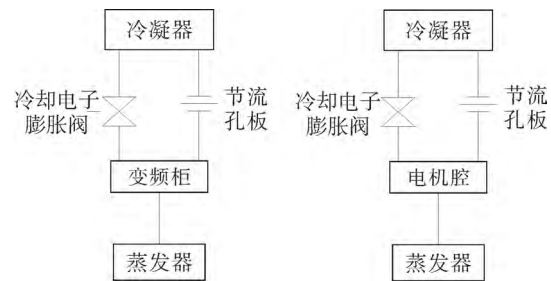


图 6 双级变频离心式机组高低压差冷却原理示意

离心压缩机的变频柜、电机与从冷凝器引出的冷却输入管路连接,冷却输入管路上串环节流孔板,同时节流孔板并联冷却电子膨胀阀,蒸发器与从离心压缩机的变频柜、电机腔引出的冷却输出管路连接;当变频模块与电机绕组温度超过设定温度点后,单独节流孔板不能很好地满足其降温效果,冷却电子膨胀阀逐步打开,冷媒通过节流孔板与冷却电子膨胀阀的节流降压变为低温低压液体状态,在变频模块与电机绕组表面通过汽化潜热蒸发成气体,蒸发形成的制冷剂气体回到蒸发器,最后进入压缩机被压缩,如此循环变频模块与电机绕组得到冷却,保证了变频器与电机的正常工作。

6 机组喘振机理及其控制

离心式压缩机是一种速度型压缩机,当冷凝压力超过压缩机排气压力时,离心式压缩机开始出现运行不稳定,制冷剂气体开始从冷凝器向压缩机倒流,压缩机排气压力上升,当上升到一定值,压缩机又开始排气,排气压力又下降,当排气口压力下降到一定值时,又会引起气体倒流,这种排气压力时降时升不稳定的现象称为喘振现象^[14]。压缩机运行过程中喘振现象发生的机理大致分为低流量和高压差两类。降低离心式冷水机组的高低压差、增大压缩机吸入量是防止喘振的2个方法。压缩机运行过程中气体流量通过压缩机进口导叶与电机转速调节,为了避免喘振的发生,导叶开度及电机转速都需要进行适当的限制,因而冷水机组的运行范围在一定程度上受到限制^[15]。现有技术中解决离心式冷水机组喘振现象的办法大多是基于喘振机理在冷水机组上安装热气旁通阀,控制器控制旁通阀的开启,一方面增加压缩机的吸气量,排气压力得到提高,使得压缩机远离喘振点,另一方面高温高压的制冷剂气体直接进入蒸发器,冷凝压力减小,机组的高低压差减小,排气压力大于冷凝压力,然而热气旁通阀的开启,从冷凝器旁通过来的气态冷媒没有节流降压而是直接以气体的形式回到蒸发器,冷媒没有气化蒸发,不具有制冷效果,但通过热气旁通过来的高压气体,仍需要经过叶轮的压缩,压缩机功耗没有得到减少,由此机组的性能系数大大降低。

对于变频双级离心式冷水机组,机组的制

冷量调节遵循导叶优先原则,由电机转速与入口导叶联合调节。变频双级离心式冷水机组优先采用增大导叶开度的方式来提升气体的流量从而防止喘振,若导叶开度与运行频率都达到额定值时仍无法避开喘振的情况下,则需开启热气旁通阀来降低机组的高低压差。为了得到机组的防喘线,须先得到机组喘振线,喘振线是通过喘振试验获取,通过喘振实验测试得到一系列喘振时对应的冷凝压力、蒸发压力及频率,经过拟合得到该压缩机的喘振线,添加一定的喘振裕量即可得到该压缩机的防喘线^[16~20]。图7为某离心式压缩机导叶开度100%时的喘振线及防喘线。

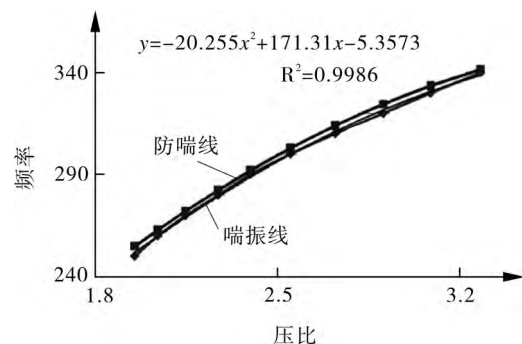


图7 变频双级离心式冷水机组喘振曲线与防喘曲线^[20]

对喘振数据进行拟合得到喘振线为:

$$y = -20.255x^2 + 171.31x - 5.3573 \quad (3)$$

式中 y ——该压比下的拟合喘振频率

x ——实时冷凝压力与蒸发压力之比

设置4 Hz的喘振裕量,得到该压缩机导叶开度100%时的防喘线为:

$$Y = -20.255x^2 + 171.31x - 1.3573 \quad (4)$$

导叶从100%往下降时,相同频率下离心式冷水机组制冷剂流量会随导叶开度减小而减小,由机组喘振机理可知压缩机的防喘能力下降,基于此对防喘线进行频率补偿修正,上述压缩机0~100%导叶开度下的防喘线为:

$$Y_{0-1} = -20.255x^2 + 171.31x - 1.3573 + x(Ad^2 + Bd + C) \quad (5)$$

式中 d ——导叶开度

A, B, C ——系数

A, B 及 C 之和为0,当导叶开度为100%($d=1$)时,频率补偿项为0。 A, B 及 C 的值按照经验给定。同一系列的离心式冷水机组其压头一样,离心式

压缩机压头由线速度决定,线速度为转速与叶轮外径之积,大冷量段压缩机叶轮尺寸大于小冷量段压缩机叶轮尺寸,由此可知大冷量段压缩机额定频率小于小冷量段压缩机额定频率,大冷量段压缩机 A、B 及 C 的绝对值之和小于小冷量段压缩机 A、B 及 C 的绝对值之和。

7 结论

(1) 相对于定频离心式冷水机组,变频双级离心式冷水机组采用变频技术,极大地提高机组部分负荷运行时的性能系数;相对于单级离心式冷水机组,变频双级离心式冷水机组采用双级压缩技术,其机组循环效率得到提高。

(2) 变频双级离心式冷水机组节流电子膨胀阀具有不同的控制方式,经验值控制方式以计算出来的开度值为控制目标来调节电子膨胀阀,无需传感器,相比现有液位控制方式和排气过热度控制方式,降低了机组成本,提高了机组控制可靠性。

(3) 变频双级离心式冷水机组常用冷媒提纯及引射回油 2 种方式回油,以及采用高低压差与引射方式冷却设备。

(4) 喘振现象是离心式冷水机组的固有特性,热气旁通是常用的基本防喘方式,对于变频离心式冷水机组,机组实时计算出当前导叶开度下的防喘频率,防喘频率与当前的运行频率进行比较,作出对应的控制,从而避免喘振现象的发生。

参考文献

- [1] 田旭东,刘华,张治平,等.高温离心式冷水机组及其特性研究[J].流体机械,2009,37(10):53-56.
- [2] 周子成.变频离心式压缩机冷水机组[J].制冷,2010,29(1):51-56.
- [3] 邬燕芳,许雄文.变频离心式冷水机组部分负荷下的节能分析[J].制冷,2013,32(2):59-64.
- [4] 王振辉,岳海兵,迟冬青,等.离心式冷水机组变频调速的节能效果分析[J].流体机械,2007,35(6):80-82.
- [5] 叶盛,陈汝东.变频离心式冷水机组的运行特性[J].制冷技术,2007,27(3):21-24.
- [6] 李浙.空调用离心式冷水机组的性能分析[J].制冷空调与电力机械,2001,22(1):29-34.
- [7] 陈权,邵双全,张晓亮,等.双级离心式冷水机组的数学模型及其应用[J].制冷学报,2008,29(2):23-28.
- [8] 邵振华,于文远,陈小娇,等.太阳能驱动的有机朗肯-喷气增焓(带二次吸气的增效)蒸汽压缩制冷系统性能分析[J].新能源进展,2014,2(5):373-379.
- [9] 邵振华,郑子辉,于文远,等.基于正逆循环的节能技术[J].新能源进展,2015,3(4):280-288.
- [10] 万亮,周宇,潘翠,等.离心式冷水机组节流控制方法[P].广东:CN104567154A,2015-04-29.
- [11] 张为民,肖瑶瑶,王恕清.冷水机组的回油技术研究[J].制冷与空调,2012,12(2):18-21.
- [12] 姜灿华,刘华,张治平,等.回油装置[P].广东:CN201306892,2009-09-09.
- [13] 姜灿华,郭忠民,刘华,等.一种离心式制冷机组冷却系统[P].广东:CN201014825,2008-01-30.
- [14] 靳伍银,刘飞跃,刻昌峰,等.离心压缩机的防喘振控制[J].兰州理工大学学报,2007,33(3):42-45.
- [15] 周宇,李宏波,张治平,等.一种离心式制冷机组防喘振系统[P].广东:CN104567054A,2015-04-29.
- [16] 陈孙艺.压力容器有限元分析建模中值得关注的几个工程因素[J].压力容器,2015,32(5):50-57.
- [17] 葛玖浩,李伟,陈国明,等.基于 EN13445 直接法的深海外压.容器稳定性研究和影响因素分析[J].压力容器,2015,32(2):21-26.
- [18] 郭小宝,赵振,陈落根,等.基于能量法的重载码垛机器人重力平衡分析与设计[J].包装与食品机械,2015,33(6):43-46.
- [19] 石军键,李光.不同工况下钢架木箱有限元分析及优化设计[J].包装与食品机械,2016,34(2):37-40.
- [20] 易海洋,周宇,金成召,等.一种变频离心式冷水机组及其控制调节方法[P].广东:CN105571181A,2016-05-11.

作者简介:董凯军(1971-),男,工学博士,教授级高级工程师,研究生导师,主要从事制冷空调方面的研究。

通讯作者:邵振华(1988-),男,工学硕士,研究助理,主要从事蓄冷空调方面的研究,通讯地址:510640 广东广州市天河区五山能源路 2 号中国科学院广州能源研究所,E-mail:shaozh@ms.giec.ac.cn。