

ZHILENG JISHU YU ZHUANGZHI SHIYAN JIAOCHENG

制冷技术与 装置实验教程

主 编 孙志利 邹同华
副主编 宁静红 田 绅 赵 静



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

制冷技术与装置实验教程

主 编 孙志利 邹同华

副主编 宁静红 田 绅 赵 静

内容提要

本实验教程是在总结天津商业大学制冷及低温工程系的实验教学经验基础上,并基于能源与动力工程专业国家教学示范中心和天津商业大学制冷实验教学中心的实验教学体系构架编写而成的,是中心教材建设中的系列规划教材。

本教程介绍了制冷原理与设备、制冷压缩机、制冷装置设计、制冷装置自动调节、低温技术、食品冷冻工艺学、冷库建筑、吸收式制冷机、制冷机制造工艺、冰箱与空调器、能源与动力机械基础、专用制冷装置、热泵技术及新能源概论等方面的实验,详细论述了各个实验的实验目的、实验内容、实验原理、采用的实验测试方法和实验步骤,对参加实验的人员提出实验要求和实验注意事项,给出了针对课程和实验的思考题并提出实验报告的要求。本教程的架构既便于实验教学与理论教学同步进行,也便于实验课程单独设置。

本书可作为能源与动力工程及相关专业的本科实验教材,也可作为相关专业人员及工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

制冷技术与装置实验教程 / 孙志利, 邹同华主编.

— 天津: 天津大学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-5618-6219-3

I. ①制… II. ①孙… ②邹… III. ①制冷技术 - 实验 - 高等学校 - 教材 ②制冷装置 - 实验 - 高等学校 - 教材
IV. ①TB6 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 184192 号

出版发行	天津大学出版社
地 址	天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话	发行部:022-27403647
网 址	publish.tju.edu.cn
印 刷	北京虎彩文化传播有限公司
经 销	全国各地新华书店
开 本	185mm × 260mm
印 张	21.75
字 数	543 千
版 次	2018 年 8 月第 1 版
印 次	2018 年 8 月第 1 次
定 价	49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

全国设置能源与动力工程、建筑环境与能源应用工程专业的高校有 240 余所,虽然两个专业分属于不同的一级学科,但两个专业在一定程度上是相通的,部分高校设置能源与动力工程专业(原名热能与动力工程专业)、建筑环境与能源应用工程专业(原名建筑环境与设备工程专业)的先后顺序不同。在国家相关专业教学指导委员会制定的教学大纲指导下,各个高校根据自身的办学特色,在理论教学过程中选择了国家级规划教材和部分自编特色教材,而在实验教学方面通常是根据专业特色和实验条件来开设实验课程,并无统一的实验教学大纲和教学方案,更没有规划实验教材。因此,热能与动力工程专业国家级实验教学示范中心在“高等学校本科教学质量与教学改革工程”建设思想的指导下,于 2009 年组织编写了第一版《制冷与空调实验教程》,全书总结了我校能源与动力工程专业、建筑环境与设备工程专业自建校以来的实验教学经验,构建了完善的实验教学内容体系。在过去近十年间,第一版《制冷与空调实验教程》为我校及设置同类专业的高等院校提供了教学实验设置参考,因教学实验工作在不断地更新,实验理念和实验课程也不断更新,书中部分内容已经不能适应目前实验教学的基本要求。为此,我中心组织编写了新版《制冷技术与装置实验教程》。

本教程根据与专业密切相关的课程(制冷原理与设备、制冷压缩机、制冷装置设计、制冷装置自动控制、吸收式制冷机、冰箱与空调、食品冷藏工艺学等)编写,体系按课程来进行实验项目的安排,各实验项目相对独立,有利于使学生形成对专业知识的系统化、全方位认识。

为便于学生实验前预习及增强本教程实验体系的系统性,各实验项目的阐述采用了统一的结构框架,每个实验都包括实验目的,实验原理、方法和手段,实验内容,实验准备,实验步骤,注意事项及其他说明,思考题,实验报告八个部分。为强化实验教学和 Related 理论知识的联系,改善实验教学的效果,每个实验项目都设置了与实验内容和方法相关的思考题,学生在完成后,应对实验内容和方法进行认真思考,以巩固学习效果。

本教程由孙志利、邹同华担任主编,宁静红、田绅、赵静担任副主编,各实验项目由制冷专业教研室和实验室全体老师共同完成。参与本书编写的人员有臧润清、申江、杨永安、郭宪民、刘斌、宁静江、刘圣春、张哲、刘清江、刘兴华、毛力、汪伟华、田津津等。

目 录

第1章 制冷原理与设备实验指导	(1)
实验 1.1 有回热与无回热循环性能比较实验	(1)
实验 1.2 制冷机热平衡实验	(7)
实验 1.3 制冷设备结构认识实验	(14)
实验 1.4 制冷机变工况特性实验	(19)
实验 1.5 热力膨胀阀特性实验	(24)
实验 1.6 半导体制冷系统组装	(30)
实验 1.7 换热设备性能测试实验	(34)
实验 1.8 冷水机组性能实验	(40)
实验 1.9 热力膨胀阀/电子膨胀阀性能测试实验	(45)
实验 1.10 制冷(热泵)循环演示装置实验	(51)
第2章 制冷压缩机实验指导	(56)
实验 2.1 压缩机性能测试实验	(56)
实验 2.2 活塞制冷压缩机拆装实验	(60)
实验 2.3 回转式制冷压缩机的结构认识实验	(64)
实验 2.4 制冷压缩机的性能检测(第二制冷剂量热器法测试实验)	(68)
实验 2.5 活塞式制冷压缩机示功图实验	(73)
实验 2.6 活塞式压缩机检测实验	(79)
实验 2.7 带回热的制冷压缩机性能测试实训实验	(83)
实验 2.8 全封闭式制冷压缩机性能实验	(94)
第3章 制冷装置设计实验指导	(101)
实验 3.1 一机二库制冷装置性能实验(第一版)	(101)
实验 3.2 小型制冷装置性能实验	(109)
实验 3.3 典型专用制冷装置结构认识实验	(115)
实验 3.4 氨制冷系统结构认识实验	(120)
实验 3.5 热气融霜制冷系统性能实验	(124)
实验 3.6 氨泵制冷装置性能实验	(130)
实验 3.7 一机二库制冷装置性能实验(第二版)	(139)
实验 3.8 小型冷库系统综合实验台	(146)
实验 3.9 装配库蒸发温度的调试实验	(151)
第4章 制冷装置自动调节实验指导	(154)
实验 4.1 电子膨胀阀流量性能测试实验	(154)

实验 4.2	温度双位调节系统实验	(158)
实验 4.3	制冷空调电气控制系列实验	(163)
实验 4.4	调节器参数整定实验	(167)
实验 4.5	冷库电气系统设计实验	(170)
实验 4.6	调节对象反应曲线测定实验	(173)
实验 4.7	制冷装置电路控制系统设计实验	(176)
第 5 章	低温技术基础实验指导	(179)
实验 5.1	三级复叠制冷系统性能测试	(179)
第 6 章	食品冷冻工艺学实验指导	(183)
实验 6.1	食品的冷却实验	(183)
实验 6.2	食品在空气中冻结曲线的测定	(188)
实验 6.3	果蔬差压预冷实验	(191)
实验 6.4	果蔬真空预冷实验	(194)
实验 6.5	食品干耗实验	(197)
实验 6.6	食品热物性测量的冰点测试实验	(200)
实验 6.7	果蔬冻结过程实验	(204)
实验 6.8	真空冷冻干燥机操作实验	(208)
实验 6.9	食品冷害实验	(211)
第 7 章	冷库建筑实验指导	(214)
实验 7.1	冷库围护结构性能参数的测定实验	(214)
实验 7.2	冷库降温及库内不均匀性实验	(219)
实验 7.3	装配式冷库蒸气压缩制冷系统认识实验	(223)
实验 7.4	装配式冷库蒸气压缩制冷系统热负荷变化实验	(229)
第 8 章	吸收式制冷机实验指导	(232)
实验 8.1	溴化锂吸收式制冷机结构认识实验	(232)
实验 8.2	单效溴化锂吸收式制冷系统性能实验	(236)
实验 8.3	氨-水吸收式制冷机结构认识与系统性能实验	(243)
第 9 章	制冷机制造工艺实验指导	(248)
实验 9.1	活塞式压缩机检测实验	(248)
实验 9.2	装配库制冷系统安装与调试	(252)
实验 9.3	冷藏柜发泡工艺	(255)
第 10 章	冰箱与空调器实验指导	(258)
实验 10.1	空调维修实验	(258)
实验 10.2	制冷制热综合实验	(262)
实验 10.3	电冰箱维修实验	(265)
实验 10.4	间冷式双门电冰箱线路的接线与故障实验	(269)
实验 10.5	空调循环演示实验	(272)

实验 10.6	电冰箱故障及排除方法实验	(275)
实验 10.7	汽车空调系统故障诊断	(278)
实验 10.8	汽车空调充灌制冷剂实验	(281)
第 11 章	能源与动力机械基础实验指导	(285)
实验 11.1	内燃机结构原理(性能)实验	(285)
实验 11.2	沸腾炉冷态实验	(288)
实验 11.3	太阳能热利用性能实验	(293)
第 12 章	专用制冷装置实验指导	(297)
实验 12.1	汽车空调制冷系统与典型故障实验	(297)
第 13 章	热泵技术实验指导	(301)
实验 13.1	制冷系统逆向循环(热泵)实验	(301)
实验 13.2	空气源热泵系统制热性能实验	(305)
实验 13.3	水源热泵系统制热性能实验	(309)
实验 13.4	CO ₂ 水-水热泵系统性能实验	(313)
实验 13.5	空气源热泵辅助太阳能供热实验台	(317)
第 14 章	新能源概论实验指导	(322)
实验 14.1	太阳能光伏发电系统安装与测试	(322)
实验 14.2	风力发电系统模拟实验	(329)

第 1 章 制冷原理与设备实验指导

实验 1.1 有回热与无回热循环性能比较实验

一、实验目的

- (1) 了解制冷回热循环的组成和工作原理及其性能测试的原理与方法。
- (2) 比较回热循环与无回热循环的经济性。
- (3) 认识实验装置及有关仪器、仪表,掌握其使用方法。

二、实验原理、方法和手段

本装置为单级蒸汽压缩式制冷循环教学实验装置,其原理图如图 1-1 所示。

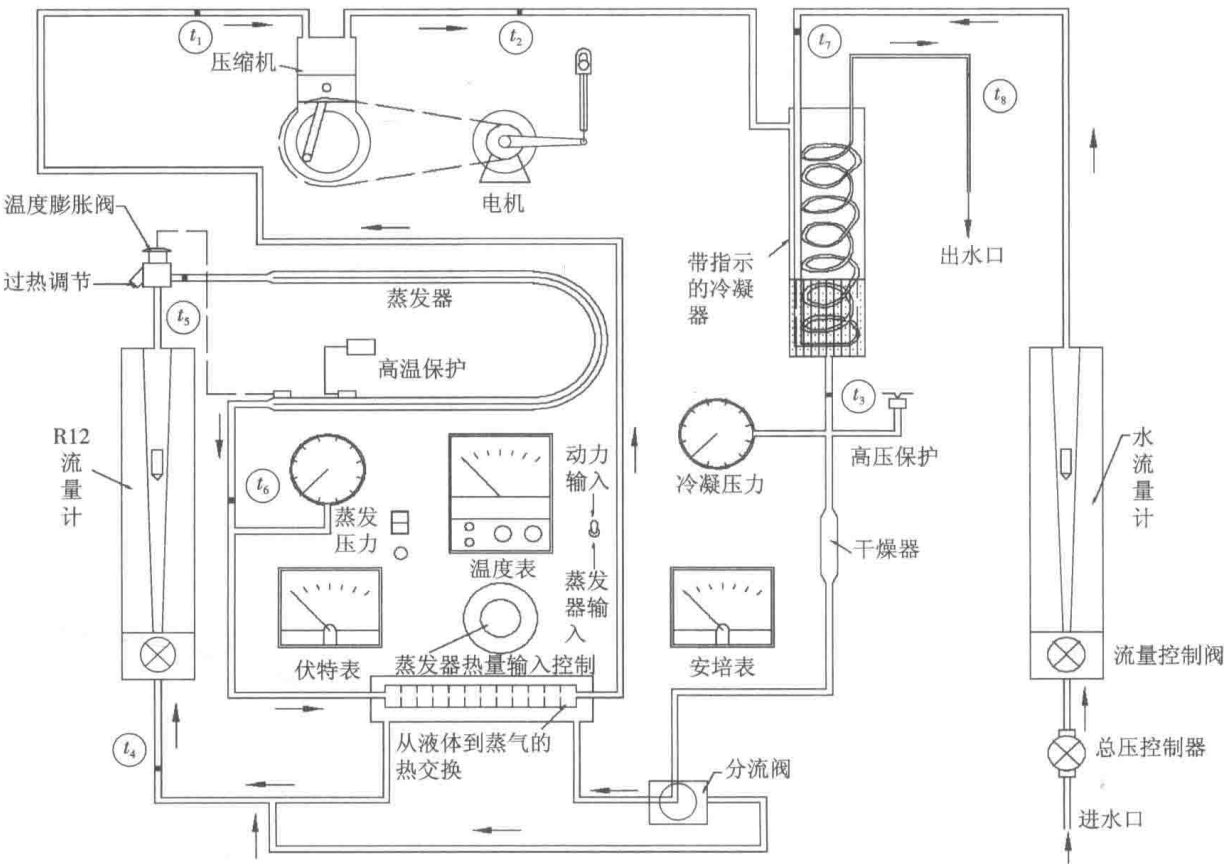


图 1-1 单级蒸汽压缩式制冷循环教学实验装置原理图

四、实验准备

学生在进行实验前,应预习实验指导书和《制冷原理与设备》教材中的相关知识,掌握制冷系统工作原理和性能指标的计算方法,熟悉测量仪器、仪表的使用方法。

五、实验步骤

- (1) 做好实验的准备工作,接通电源和冷却水,打开总压力控制阀。
- (2) 打开电源总开关,启动电动机。
- (3) 先进行无回热制冷循环实验,按给定的蒸发压力 p_0 及冷凝压力 p_k 调节系统,并始终保持冷凝压力 p_k 和蒸发压力 p_0 不变。
- (4) 观察冷凝压力表,粗调冷却水量控制阀,使冷凝压力接近要求值。
- (5) 观察蒸发压力表,粗调蒸发器热量输入旋钮,使蒸发压力接近要求值。
- (6) 反复微调冷却水量控制阀及蒸发器热量输入旋钮,使 p_0 、 p_k 接近要求值。
- (7) 待工况稳定后,依次记录各仪表上的读数。
- (8) 将换向阀旋转 180° ,使冷凝器流出的液体被转向送入热交换器,用蒸气对其冷却。此时制冷系统为回热循环。
- (9) 待工况稳定后,记录各仪表上的读数。
- (10) 实验结束后,关机。先将蒸发器热量输入旋钮拨至零,大约 1 min 后,关闭电源总开关和冷却水阀。

六、注意事项及其他说明

- (1) 一定要严格按照实验装置的操作规程操作。
- (2) 实验前开启冷却水进水阀。
- (3) 启动本装置一般要在中等负荷(约 700 W)下运行 5 ~ 10 min,然后再改变工况。
- (4) 比较有回热器与无回热器制冷机的性能,最好做一组有回热器实验和一组无回热器实验,而不用交替地进行有无回热器实验。
- (5) 负荷变化后,装置很快稳定。在高负荷时,负荷变化后,通常 2 ~ 3 min 达到稳定。而在低负荷时,需要时间略长。当压力、温度、流量等变化停止后,即可达到稳定。
- (6) 实验结束时,先减少制冷机的负荷(蒸发器的热量输入控制)到零,约 1 min 后关闭电源开关,并切断冷却水。

七、思考题

- (1) 采用回热循环制冷系数是否一定提高?

(2) 什么条件下考虑采用回热循环?

八、实验报告

学院、系: _____ 专业、班级: _____ 成绩: _____

姓名: _____ 学号: _____ 同组姓名: _____

实验时间: _____ 实验地点: _____ 指导教师: _____

课程名称: _____ 实验名称: _____ 实验类型: _____

1. 实验目的

2. 实验内容及原理

3. 实验仪器

4. 实验步骤

5. 实验过程及实验数据记录(表 1-1 至表 1-3)

表 1-1 实验数据记录

项目	单位	无回热循环				有回热循环				备注
		1	2	3	算术平均值	1	2	3	算术平均值	
蒸发压力	p_0	MPa								要求值
冷凝压力	p_k	MPa								要求值
蒸发温度	t_0	℃								以下为测量值
冷凝温度	t_k	℃								
吸气温度	t_1	℃								
排气温度	t_2	℃								
冷凝器出口温度	t_3	℃								
蒸发器进口温度	t_5	℃								
蒸发器出口温度	t_6	℃								
冷却水进水温度	t_7	℃								
冷却水出水温度	t_8	℃								
R12 流量	q_m	g/s								
冷却水流量	G_w	g/s								
电加热器电压	V_e	V								
电加热器电流	I_e	A								
电动机电压	V_m	V								
电动机电流	I_m	A								
电动机转速	n_m	r/min								
弹簧力	F	N								

注:计算查图(表)时,压力值要用绝对压力。
规定:绝对压力 = 表压 + 大气压力 = 表压(MPa) + 1(MPa)。

表 1-2 各状态点参数

项目	符号	单位	1 无回热	2 有回热
焓值	h_1	kJ/kg		
焓值	h_2	kJ/kg		
焓值	$h_3(h_4)$	kJ/kg		
焓值	h_5	kJ/kg		
焓值	h_6	kJ/kg		
比容	V_1	L/kg		

表 1-3 数据处理

项目	计算公式	单位	1 无回热	2 有回热	备注
冷负荷	$Q_e = V_e l_e$	W			
单位制冷量	$q_0 = h_6 - h_5$	kJ/kg			
制冷量	$Q_0 = G_r q_0$	W			
单位压缩功	$w_0 = h_2 - h_1$	kJ/kg			
冷凝负荷	$Q = G_w C_{pw} (t_8 - t_7)$	W			$C_{pw} = 4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
压缩机理论功率	$P_0 = q_m (h_2 - h_1)$	W			
压缩机轴功率	$P_e = T\omega = 0.15F \frac{2\pi n_m}{60}$	W			
电动机输入功率	$P_{el} = V_m I_m \cos \Phi$	W			$\cos \Phi = 0.16$
制冷系数	$\omega = \frac{Q_0}{P_e}$				

6. 实验结果分析与问题讨论

7. 思考题

实验 1.2 制冷机热平衡实验

一、实验目的

- (1) 了解第二制冷剂量热器法的实验装置和工作原理。
- (2) 了解有关测试仪器的测控原理,掌握其操作方法。
- (3) 初步掌握实验工况的调试方法。
- (4) 掌握制冷量测试及数据记录、分析、计算等方法。

二、实验原理、方法和手段

1. 实验原理

本实验台压缩机名义功率 2.2 kW,制冷工质为 R22,第二制冷剂为 R11。第二制冷剂量热器由一组直接蒸发盘管作为蒸发器,该蒸发器被悬置在一个隔热压力容器的上部,电加热器被安装在容器底部,并被容器中的第二制冷剂(R11)浸没。

实验装置系统见图 1-3。

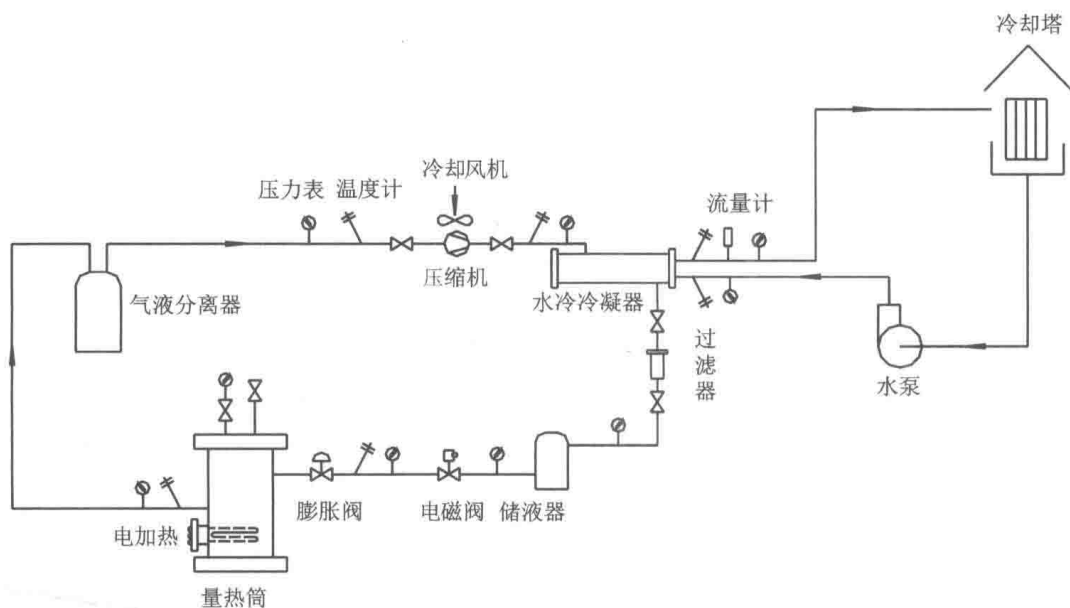


图 1-3 实验装置系统

从量热筒出来的制冷剂蒸气经气液分离器进一步分离后,气态制冷剂被压缩机吸入,并被压缩成为高温高压的制冷剂蒸气,制冷剂经水冷冷凝器冷凝后变为高温高压的过冷液体,该液体进入过滤器,排除水分、杂质,然后经储液器、电磁阀进入膨胀阀,制冷剂被节流成为低温低压的两相饱和状态,再进入量热筒,在量热筒内,调节电加热功率,两相的制冷

剂逐渐蒸发成为过热蒸气,然后进入气液分离器,进行下一个循环。

压缩机的制冷量由电加热管消耗的功率以及系统漏热等因素决定。制冷剂流量由靠近量热器安装的节流阀调节,为了减少外界漏热的影响,节流阀与量热器之间的管道应予以绝热。当要调整实验工况时,压缩机的吸气压力、制冷剂流量均可通过膨胀阀来调节,压缩机吸气温度由输入给第二制冷剂的加热量调节,压缩机的排气压力可以通过改变冷凝器的冷却水量来调节。

性能实验包括主要实验和校核实验,二者应同时进行。本实验中,第二制冷剂量热器法为主要实验,水冷冷凝器量热器法为辅助实验。主要实验和校核实验结果之间的偏差应 $\leq \pm 4\%$,并以主要实验测试结果为计算依据。

实验工况的规定:根据国家标准的规定,压缩机名义工况规定如表 1-4 所示。

表 1-4 压缩机名义工况

类型	蒸发		冷凝		液体温度 $t_l/\text{℃}$	吸气温度 $t_{g1}/\text{℃}$	环境温度 $t_a/\text{℃}$
	温度 $t_0/\text{℃}$	压力/MPa	温度 $t_k/\text{℃}$	压力/MPa			
高温	7.2	0.62	54.4	2.14	46.1	18.3	35
中温	-15	0.3	30	1.19	25	-10	32

2. 主测法冷量计算

(1) 由实验测得的制冷剂流量:

$$m_f = \frac{Q_i + K_1(t_a - t_s)}{h_{g2} - h_{l2}}$$

式中 m_f ——制冷剂流量,kg /s;

Q_i ——电加热功率,W;

h_{g2} ——量热器出口制冷剂气体的比焓,kJ/kg,在本实验台 h_{g2} 为压缩机实际吸气状态的比焓;

h_{l2} ——实验时实际过冷温度下,节流阀前液体制冷剂比焓,kJ/kg;

K_1 ——漏热系数;

t_a ——环境温度平均值,℃;

t_s ——第二制冷剂饱和温度,℃。

量热器漏热量的标定:量热器的漏热量不应超过压缩机制冷量的 5%。调节输入第二制冷剂的电加热量,使第二制冷剂压力所对应的饱和温度比环境高 15 ℃ 左右,并保持压力不变。环境温度在 40 ℃ 以下时,保持其温度波动不超过 $\pm 1\text{℃}$ 。电加热器输入功率的波动不应超过 $\pm 1\%$ 。每隔 1 h 测量第二制冷剂压力一次,直至连续四次相对应的饱和温度值的波动不超过 $\pm 0.5\text{℃}$ 。

漏热系数用下式计算:

$$K_1 = \frac{Q_h}{t_p - t_a}$$

式中 Q_h ——标定时输入量热器的电加热量即为量热器的漏热量, W;

t_p ——对应于第二制冷剂所处压力的饱和温度平均值, $^{\circ}\text{C}$;

t_a ——环境温度平均值, $^{\circ}\text{C}$ 。

对于本实验台, $K_1(t_a - t_s)$ 经测定漏热量小于制冷量的 5%, 所以此项可以忽略不计。

(2) 规定工况的制冷量:

$$Q_{01} = m_f(h_{g1} - h_{f1}) \frac{V_{a1}}{V_{g1}} \cdot \frac{n_1}{n_2}$$

式中 Q_{01} ——输入量热器的电加热量, 即实验工况稳定后加入第二制冷剂功率表的读数之和乘以功率表相应的分格常数, kW;

h_{g1} ——规定工况下吸入压缩机的制冷剂气体的比焓, kJ/kg;

h_{f1} ——在规定的过冷温度下, 对应于排气压力下液体制冷剂的比焓, kJ/kg;

V_{g1} ——规定工况下吸入压缩机的制冷剂蒸气比容, m^3/kg ;

V_{a1} ——压缩机吸入口制冷剂蒸气实际比容, m^3/kg ;

n_1 ——压缩机额定转速, r/min;

n_2 ——压缩机实验时的实际转速, r/min。

本实验台的电加热器为三相负载不对称 (五个电加热器, 三组), 每相的功率是不相等的, 所以采用三个单项功率来测量, 接线如图 1-4 所示。

三相电路总的功率等于三个功率表读数之和, 即

$$P = W_1 + W_2 + W_3$$

每个功率表的被测功率的数值

$$W_i = Ca$$

式中 C ——功率表分格常数;

a ——功率表指针偏转的格数。

$$C = V_m I_m / a_m$$

式中 V_m ——所使用功率表的电压额定值;

I_m ——所使用功率表的电流额定值;

a_m ——功率表标度尺满刻度的格数。

3. 校核实验

校核实验为冷凝器量热器法。为了校核电量热器法所获得的制冷量的正确程度, 根据国际标准 (ISO 制) 的规定, 必须采用辅助手段校核, 本实验辅测采用“水冷冷凝器法”。根据标准规定, 在水冷冷凝器上装有温度、压力和冷却水流量的测量仪表, 将冷凝器作为量热器, 它的漏热量不应超过压缩机制冷量的 5%。水冷冷凝器的漏热量测定方法与电量热器法中量热器漏热量的测定方法一样。

由实验测得制冷剂流量为

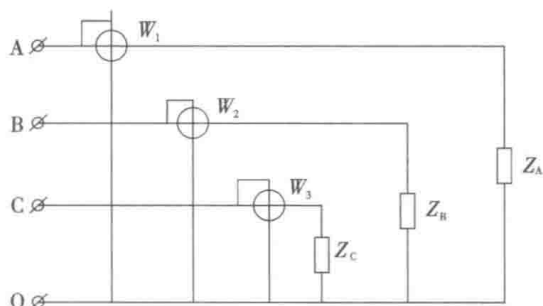


图 1-4 电加热器功率测量接线图

$$m_{12} = \frac{c(t_2 - t_1)m_c + K_2(t_r - t_a)}{h_{g3} - h_{f3}}$$

式中 c ——冷却水的比热(近似取 $c = 4180 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$);

m_c ——冷却水的质量流量,可用流量计或称重法测得,本实验台用称重法,即称出单位实际的循环水流量,用磅秤、水箱、秒表测得, kg/s ;

t_1 ——冷却水进水温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_2 ——冷却水出水温度, $^{\circ}\text{C}$;

h_{g3} ——冷凝器进口制冷剂气体比焓(由 t_{g3} 、 p_{g3} 查《制冷工质热物理性质表和图》), kJ/kg ;

h_{f3} ——冷凝器出口制冷剂液体比焓(由 t_{f3} 查《制冷工质热物理性质表和图》中饱和液体比焓), kJ/kg ;

t_r ——冷凝器中制冷剂的平均饱和温度, t_r 为对应于 $p_r = \frac{p_{g3} + p_{f3}}{2}$ 的饱和温度, $^{\circ}\text{C}$;

p_{g3} ——制冷剂进冷凝器处压力, MPa ;

p_{f3} ——制冷剂出冷凝器处压力, MPa ;

K_2 ——冷凝器漏热系数, W/K 。

$K_2(t_r - t_a)$ 是冷凝器的漏热量。经测定本实验台的漏热量小于压缩机制冷量的 5%, 可忽略不计, 其中

$$K_2 = Q_h / (t_c - t_{r0})$$

式中 t_c ——冷凝器外表面温度的平均值, $^{\circ}\text{C}$;

t_{r0} ——冷凝器中液体制冷剂的平均温度, $^{\circ}\text{C}$;

Q_h ——标定漏热系数时输入冷凝器的电加热量, kW 。

规定工况制冷量

$$Q_{02} = m_{12}(h_{g1} - h_{f1}) \cdot \frac{V_{a1}}{V_{g1}}$$

4. 主要实验与校核实验之间的偏差

$$\Delta = \frac{Q_{01} - Q_{02}}{Q_{01}} \times 100\%$$

三、实验内容

(1) 了解实验操作规程。

(2) 掌握正确启动制冷系统的方法。

(3) 初步掌握调试系统工况的技能, 了解本实验性能测定的基本原理及方法。

四、实验准备

(1) 复习教材中的相关章节, 会熟练使用《制冷工质热物理性质表和图》。