

离心式制冷机

[日] 高田秋一 著



LIXINSHI

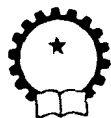
ZHILENGJI

机械工业出版社

离心式制冷机

〔日〕高田秋一 著

耿惠彬 译



机械工业出版社

内 容 简 介

本书是关于离心式制冷机的一本专著。书中介绍了制冷循环的概念、热力学知识、制冷剂与载冷剂、多效制冷与多元制冷、流动与传热、蒸发器与冷凝器、叶轮的理论和离心式压缩机的结构与设计、辅助设备与制冷剂接管、特性、控制与自动运转以及保养与管理的知识。书中既有基础理论的阐述,又有实际经验的介绍。

本书可供从事离心式制冷机设计、制造、管理的工程技术人员和操作人员以及大专院校制冷专业的师生参考。

・タ - ホ 冷凍機・

・ 高田秋一 著

日本冷凍協会 1976

* * *

离心式制冷机

耿惠彬 译

戴永庆 郑玉清 校

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行・新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 ・ 印张 26 ・ 字数 633 千字

1985年8月重庆第一版 ・ 1985年8月重庆第一次印刷

印数 0.001—8,600 ・ 定价 6.15 元

*

统一书号: 15033 5654

前 言

笔者在日本荏原制作所从事离心式制冷机设计近四十年。最近五、六年间，选择这种制冷机作为大学毕业设计和论文题目的学生正在增加。每年在答复学生咨询时，首先听到的问题就是有没有好的资料。笔者往往为此而感到为难，一般情况下总是提供些作者在学报上发表的论文或本厂的样本，以资搪塞。

此外，每年春天本厂总要招收许多新人，其中不少将从事有关制冷机的工作，但是常常缺乏培训用的资料。

在离心式制冷机交货时，虽然随送了使用说明书，但是许多情况下，客户还要求了解理论知识。

为了满足上述要求，迫切需要一本专著，虽然笔者才疏学浅，依然执笔编写。书的内容主要有：制冷循环的概念、热力学复习、制冷剂与载冷剂、多效制冷与多元制冷、流动与传热、蒸发器与冷凝器、叶轮理论、离心式压缩机的设计与结构、辅助设备与制冷剂接管、特性、控制与自动运转、保养与管理。

若读者具有短期大学和高等专科的知识（特别是物理和数学知识），则应能充分理解本书的内容。特别编入了热力学复习、流动与传热等篇章，以加深理解。每章末附有习题，以求自我检查理解程度。若有三分之二以上的习题无法解出，则请自觉从头复习。本书可供有志学习制冷的学生以及离心式制冷机的设计人员、制冷装置的设计人员和从事保养、运转、管理的技术人员参考。

如果从事保养、运转和管理的技术人员要速成学习离心式制冷机，则可选学第一、九、十、十一和十二章，可获得预期的效果。

笔者对编写本书时曾经参考过的论文的作者以及提供产品样本的工厂深表谢意。

本书编写时，承荏原制作所冷热机械部成员，特别是四十宫、上田两副部长，山田、齐藤科长和堺田主任大力支持，特在此表示深深的谢意。

笔者学识浅薄，不乏谬误之处，尚希读者批评指正。

目 录

译序		二十三、蒸气压缩理论制冷循环	42
推荐书		二十四、与理论蒸气压缩制冷循环的	
前言		差异	43
绪论	1	二十五、蒸气压缩制冷	45
第一章 制冷循环的概念	4	二十六、循环效率	48
一、具有往复式压缩机的蒸气压缩制冷		二十七、离心式压缩机的能量式	48
循环	4	第三章 制冷剂与载冷剂	51
二、离心式制冷机的蒸气压缩制冷循环	5	一、氨	51
三、制冷循环中的温度与压力	6	二、氟利昂类制冷剂	51
四、热泵	7	三、烃	52
五、制冷量的单位	7	四、制冷剂的比较	52
六、热力学线图上的制冷循环	8	五、检漏	60
七、饱和制冷循环的计算图表	18	六、音速	60
第二章 热力学复习	27	七、载冷剂	61
一、理想气体与蒸气	27	第四章 多效制冷与多元制冷	70
二、物质的性质与状态	27	一、一级省功器循环	70
三、内能	28	二、封闭型省功器	73
四、比热	28	三、二级省功器循环	74
五、位移能	29	四、二级封闭型省功器	77
六、焓	29	五、过冷循环	77
七、熵	29	六、风冷循环	78
八、可逆性	30	七、中间闪发柜	78
九、热力学线图	30	八、具有不同蒸发温度的两个蒸发器的情况	79
十、热力学定律	30	九、氨液化循环	84
十一、能量式	31	十、氯化氢液化循环	87
十二、与气体有关的热力学关系式	32	十一、二氧化硫、二氧化碳与其它气体的	
十三、等温压缩	33	液化	88
十四、绝热压缩	34	十二、多段方式	88
十五、多变压缩	35	十三、复迭方式	91
十六、伴有冷却的压缩	36	第五章 流动与传热	93
十七、能量头	37	一、流动	93
十八、气体功率	37	二、自然流动	93
十九、效率	38	三、强制流动	93
二十、卡诺循环	38	四、层流	94
二十一、逆卡诺循环	39	五、紊流	95
二十二、最大制冷系数	41		

六、传热系数	96
七、导热	96
八、导热系数	98
九、放热	98
十、因次分析	99
十一、强制对流	102
十二、冷凝与沸腾	104
十三、传热系数	104

第六章 蒸发器与冷凝器108

一、热平衡	109
二、蒸发器与冷凝器的选择顺序	109
三、传热系数	111
四、管侧的压力损失	116
五、管内的允许速度	117
六、管子的材质	118
七、选择蒸发器尺寸时的注意事项	119
八、蒸发器的绝热	122
九、双联冷凝器	122
十、蒸发器与冷凝器的试验压力	123

第七章 叶轮的理论124

一、回转力矩	124
二、叶轮的基本式	125
三、反作用度	126
四、叶轮的叶片出口角	126
五、叶片流道中的流动	129
六、滑动系数	129
七、级效率	134
八、扩压器	141
九、回流导向叶片	145
十、蜗壳	146
十一、对效率有影响的各种因素	147
十二、离心式压缩机压缩过程的基本相似理论	149
十三、相似无因次数	150

第八章 离心式压缩机的设计157

一、圆周速度	159
二、级数	162
三、转速	163
四、轴功率	165
五、叶轮基本尺寸的确定	165
六、叶轮宽度	174
七、叶片	178

八、轴径	178
九、制冷用离心式压缩机的设计实例	179
十、叶轮的绘型	192
十一、叶轮的强度计算	194
十二、叶片的强度计算	206
十三、叶片的振动	208
十四、使用现成标准叶轮时的设计法	209

第九章 离心式压缩机的结构214

一、轴封	214
二、内部防漏装置	220
三、轴向推力及其平衡法	222
四、轴径与临界转速	225
五、回流导向叶片	226
六、润滑系统	229
七、润滑油	234

第十章 辅助设备与制冷剂接管242

一、抽气回收装置	242
二、抽灌装置	248
三、机器抽真空所需要的时间	251
四、分离筒	252
五、闪发柜	252
六、省功器	253
七、省功器-贮液器	259
八、制冷剂接管	261
九、阀与接头	266
十、管路注意事项	272

第十一章 特性、控制与自动运转276

一、压缩机的特性	276
二、蒸发器与冷凝器的特性	279
三、离心式制冷装置的总特性	281
四、制冷量控制	282
五、离心式压缩机的特性换算	289
六、冷却水和载冷剂流量对特性的影响	292
七、串联供水运转	294
八、并联供水运转	296
九、联合运转的制冷量控制	298
十、自动运转	302
十一、自动联合运转	310

第十二章 保养与管理312

一、保养与管理总论	312
二、气密的保持	314
三、除湿	319

四、制冷剂的管理	321
五、润滑油与供油系统	326
六、冷却水	329
七、冷却水侧的腐蚀（除海水外）	336
八、海水	339
九、载冷剂	351

十、电气系统	354
十一、定期检查与运转管理	365
十二、停机期间的注意事项	373
十三、现场试验	375
十四、故障及其对策	377

绪 论

这种制冷机诞生于1922年。由美国开利亚博士制成，供空调用。1930年日本荏原制造厂建成了第一台机器。与往复式相比，其历史虽然短些，但也已经历了五十年，作为大制冷量制冷机而占据了独特的地位。

作为制冷剂，最早采用的是二氯乙烯，不久就被二氯甲烷所代替。1934年，由开利亚公司开始制造的以R11为制冷剂的全新制冷机，开创了一个新的时代。其后，1938年清凉公司开始制造以R113为制冷剂的封闭式制冷机。这种机器发展而成现在的高速单级封闭式离心制冷机。现在根据制冷机的蒸发温度和制冷量大小，分别使用R114、R12、R22和R500、R502等氟利昂制冷剂。

从离心式制冷机的产生原因可以看到，这种机型适用于制冷量大、蒸发温度高时供给空调用冷媒水；同时也已发展到可供给最低温度达 -10°C 的载冷剂。在化学工业等低温用户方面，以往这种制冷机是用得不多的，主要用的是往复式制冷机。随着化学工业的发展及其规模的扩大，就需要大型制冷设备。采用十多台往复式制冷机，在运转和保养方面就很麻烦。为了尽可能扩大单机制冷量，减少装机台数，精简保养管理工作，节省工资费用，即使在低温方面，也不再用传统的往复式制冷机，而代之以操作极为简单的离心式制冷机。

离心式制冷机的压缩机、蒸发器和冷凝器，通常都总装成一体。压缩机与蒸发器、冷凝器间没有连接用长管。但是工业用机组，特别是以氨为制冷剂时，压缩机、蒸发器、冷凝器可分别安装。这种制冷用氨压缩机，1929年德国就已制成。其后，氟利昂制冷剂研制成功，这种压缩机逐渐销声匿迹。但是1950年以来，氨压缩机的设计有了飞跃的进步，又开始制造大制冷量的离心式制冷机。

石油工业与石油化学工业中，使用丙烷、丁烷、乙烯、甲烷等烃基制冷剂。

离心式制冷机的制造厂遍及日本、美国及西欧。其中日本有七家，美国有五家（开利亚、约克、清凉、克赖斯莱、威斯汀豪斯等公司）。上述日本七家公司年产1200台以上。西欧最有名的制造厂有瑞士的布朗·包维利、苏尔寿和埃舍·维斯公司以及英国的豪尔公司等。此外捷克的斯科达工厂以及苏联的一些制造厂也生产大制冷量的工厂用制冷机。

当压送的制冷剂量增大时，往复式压缩机往往无能为力，采用离心式压缩机比较有利。其使用范围因压力比而异。图1表示了离心式压缩机的适用范围。制冷机中压缩机相同而使用的制冷剂不同，制冷量就不同。图2表示离心式制冷机采用不同制冷剂时，其最小制冷量与蒸发温度的关系。图3所示为3000千卡/小时的低温用离心式制冷机大致的轴功率。

离心式与往复式特性不同，并各有其优缺点。图4表示了两者的特性的差异。离心式压缩机有下列优点：

1. 外形尺寸小、重量轻；
2. 振动小、基础简单；
3. 磨损部分极少；
4. 制冷量控制范围广，不用分级而可连续调节；

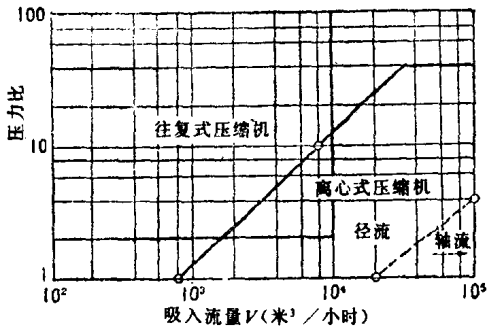


图1 往复式与离心式压缩机的适用范围

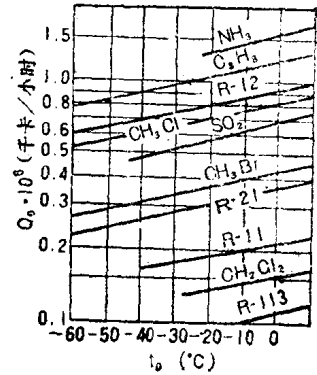


图2 离心式压缩机的最小排气量为800米³/小时情况下, 各种制冷剂的最小制冷量

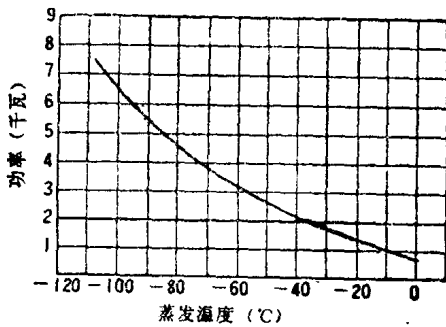


图3 3000千卡/小时离心式制冷机大致的轴功率 (冷凝温度设为40℃)

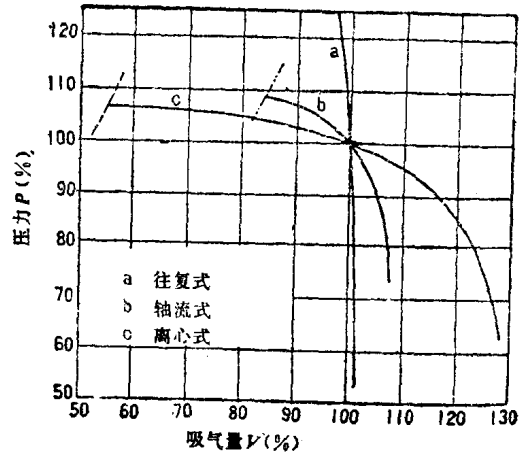


图4 离心式与往复式的特性

5. 容易实现多级压缩和多级蒸发;
6. 制冷剂气体中混入的润滑油极少。

离心式制冷机能有效地使用于下列部门:

1. 合成酒精、人造橡胶、聚乙烯制造、气体液化、溶液冷却、盐类结晶、石蜡分离、石油精制等化学与石油工业。

使用的制冷剂有R11、R114、R12和甲烷、乙烷、丙烷、乙烯等。低温用时, 可用上列制冷剂加以复选。制冷机的温度范围为 $-20 \sim -100^{\circ}\text{C}$, 制冷量范围为 $0.1 \sim 30 \times 10^6$ 千卡/小时。

2. 商业、工业 (出版印刷、纤维、造纸、糖果点心业等) 和煤矿等空调用;
3. 食品的冷却。冷冻、冷藏、制冰、啤酒酿造用麦芽汁冷却等食品工业用;
4. 挖掘地坑、高层建筑打地基和建设地下铁道时冻结地层、便于工程作业, 还可在水力发电站水库筑坝时, 使混凝土急速冷却;
5. 作低温实验用。例如供航空发动机高空条件试验用气密室、汽车寒冷地区运转状态

试验室冷却用。在这些情况下，往往将离心式制冷机与空气膨胀涡轮组合使用。最初将空气冷却到制冷机的温度，接着将空气引入空气膨胀涡轮，使空气从大气压膨胀到相当于高真空状态的低压，并降低到所需的温度。

6. 作为热泵，供中低温度的废热回收用。

以上列举了一些使用实例，但不能认为已囊括了离心式制冷机的全部使用范围。表1记载了各种蒸发温度下所使用的制冷剂、循环型式及其适用的机型。

表1 低温用制冷装置的主要类型

类 型	蒸 发 温 度 (℃)	迄今为止的最大制冷量 (千卡/小时)	循环型式	使用的制冷剂	装置分类
1	12~15	20000000	一 级	R12 R11 NH ₃ H ₂ O	往、离 往、离、吸 喷、吸
2	0~-25	20000000	一 级 二 级	NH ₃ R12 R22 丙烷 丙烯	往、离、吸 往、吸 往 离 离
3	-30~-50	20000000	一级或三级	R12 R22 NH ₃ 丙烷 丙烯	往、离 往 往、离、吸 离 离
4	-60~-80	2000000	三 级 复 迭	R12 R22 R502×R12	往、离 离 离
5	-90~-100	1500000	复 迭	R13×R12 乙烯×NH ₃ 乙烯×丙烷 乙烯×丙烷	离 压 离 离

注：离—离心式压缩机；往—往复式压缩机；吸—吸收式装置；喷—喷射式装置。

各类制冷装置的用法

1. 采用冷媒水间接制冷；
2. 采用NaCl、CaCl₂、Ca(NO₃)₂、乙二醇等间接制冷或用于流程直接制冷；
3. 制冷剂在大部分流程热交换器内直接膨胀制冷或采用载冷剂间接制冷；
4. 制冷剂在大部分流程热交换器内直接膨胀冷却；
5. 制冷剂在流程热交换器内直接膨胀制冷。

第一章 制冷循环的概念

一、具有往复式压缩机的蒸气压缩制冷循环

大气压下液态氨在 -33.3°C 下蒸发，1公斤氨可从周围吸取326.78千卡的热量。因此将液态氨贮存在容器中，将口打开，可以认为这就是最简单的制冷装置。氨的蒸发温度低于容器周围温度，从而降低容器周围的环境温度。这种装置的制冷剂散发到大气中，不能再回收，因此是不经济的。另外，低于 -33.3°C 的温度是不能获得的。

但是，如果设置了适当的装置，不仅可以回收制冷剂，再次使用，而且如能控制蒸发压力，则可不受 -33.3°C 的限制，而能获得各种的蒸发温度。即，如能将液态氨保持在 2.410 公斤力/厘米²（绝对）的压力下，则其饱和温度（也即蒸发温度）为 -15°C ，蒸发潜热为 313.53 千卡/公斤。而在 4.379 公斤力/厘米²（绝对）时，蒸发温度为 0°C ，蒸发潜热为 301.52 千卡/公斤。为使制冷剂的状态由液体变为蒸气或由蒸气变为液体，只要改变制冷剂的压力即可。若制冷剂容器的周围温度，高于制冷剂压力下的饱和温度，则制冷剂蒸发，并从周围吸热；若制冷剂蒸发成蒸气，而制冷剂容器的周围温度低于与制冷剂压力相当的饱和温度，则制冷剂凝结。氨以及其他制冷剂，例如R11、R12等的压力、比容、温度、焓、熵等参数，可从市售的标准制冷剂性能表（日本制冷协会发行）查得。

将氨蒸气在 15.850 公斤/厘米²（绝对）压力下加以冷却，它可在与此压力相当的饱和温度 40°C 下凝结。此时应从氨蒸气中除去的凝结热为 262.85 千卡/公斤。

在完全的蒸气压缩制冷机中，应设置蒸发器、压缩机和冷凝器。蒸发器中制冷剂得到蒸发，然后由压缩机将蒸气抽出，使蒸发器内压力保持一定，并将蒸气从低压侧送往高压侧。制冷剂蒸气在冷凝器中放出热量（凝结热），即可重新变成液体。此外还需要设置高压下储存液体制冷剂的贮液器，以及调节高低压间液体制冷剂流量的膨胀阀。

图1-1到图1-8依次表示此种制冷装置的工作过程。图1-1所示为液体制冷剂贮存于贮液器中。

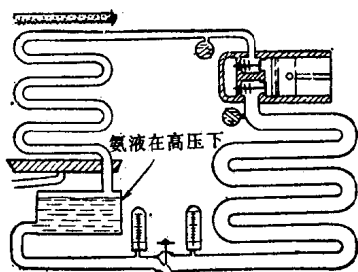


图 1-1

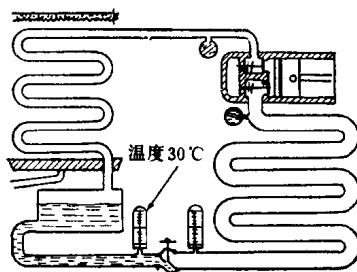


图 1-2

图1-2为制冷剂已到达膨胀阀，氨液的温度为 30°C ，压力为 11.895 公斤力/厘米²（绝对）。

图1-3中液体制冷剂由膨胀阀节流后，进入蒸发器。由于压缩机的抽吸作用，使该处压力保持 2.410 公斤力/厘米²（绝对）。图中的膨胀阀为手动针阀，实际使用的是自动膨胀阀。

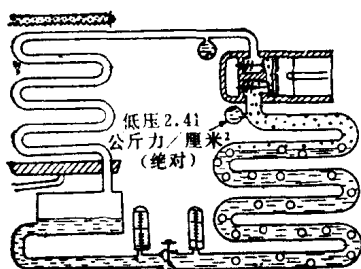


图 1-3

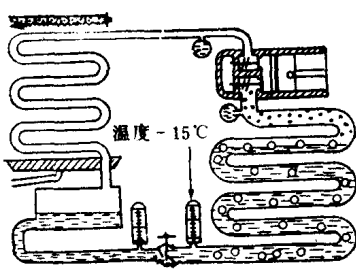


图 1-4

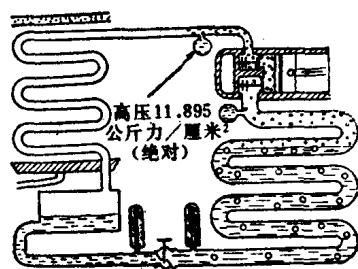


图 1-5

图1-4中，制冷剂在与蒸发压力 2.410 公斤力/厘米^2 （绝对）相当的 -15°C 下蒸发。制冷剂比周围温度约低 3°C ，通过盘管表面供给蒸发热，此时制冷剂并不静止而是剧烈沸腾。

图1-5为低压侧产生的蒸气，由压缩机抽吸，送往高压侧。

图1-6为高压氨蒸气送入冷凝器。图中的蒸发器和冷凝器都很简单，传热效率不高。实际使用的结构如后文所述，效率较好。

图1-7中冷却水喷淋在冷凝器盘管上，先除去过热热量，再除去凝结热，使氨蒸气凝结。冷凝器除去的热量，等于蒸发器吸取的热量与压缩机对制冷剂蒸气作功所相当的热量之和。

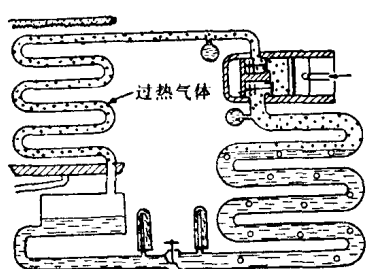


图 1-6

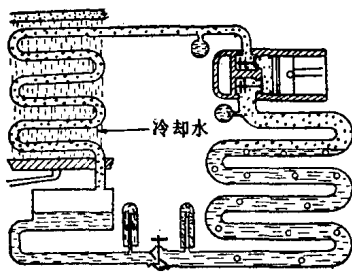


图 1-7

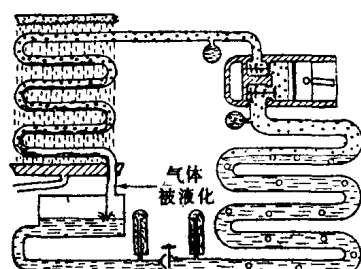


图 1-8

图1-8为在冷凝器中凝结的氨液，在重力作用下回到贮液器。重复上述动作，即可连续进行制冷。

二、离心式制冷机的蒸气压缩制冷循环

离心式制冷机的制冷循环，与上述往复式的并无根本不同，仅仅是将往复压缩机改成离心式而已。此时制冷剂蒸气的压缩靠的是离心力，就好象空气在离心式鼓风机中受压缩一样。因为借助于离心力压缩，而不象在气缸中由活塞来压缩，所能升高的压力比较小。因此离心式制冷机的制冷剂，应该选用压缩比稍为低一些的。

离心式制冷机的冷凝器、蒸发器和压缩机组成一体，安装在一个基座上。利用盐水或水等载冷剂，将负荷从用户处带入蒸发器。离心制冷机的循环，依次示于图1-9至图1-13。

图1-9中制冷机尚未工作，制冷剂贮存于冷却器（蒸发器）中。管外为制冷剂，管内通载冷剂。

图1-10所示为载冷剂通入冷却器，用户的负荷送入制冷机，制冷机处于工作状态。制冷剂由载冷剂得到热量而沸腾。由于离心式压缩机在工作，蒸发的制冷剂同时被该压缩机抽吸，使蒸发器中的压力保持与所需要的蒸发温度相当。图中制冷剂蒸气已进到叶轮。

图1-11中，制冷剂蒸气受离心式压缩机压缩，到达冷凝器的入口。制冷剂蒸气的压缩，

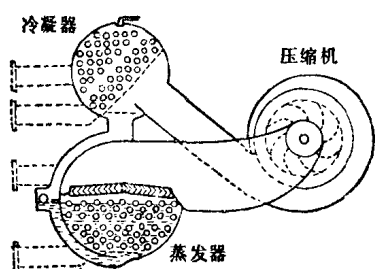


图 1-9

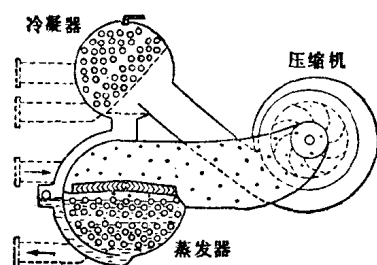


图 1-10

是靠通过叶间流道时所受的离心力，以及由叶轮旋转而使其中蒸气增加的动能。制冷剂蒸气由叶轮外周高速飞逸，为了有效利用高速蒸气的动能，在叶轮出口处设有扩压器。此处速度降低，动能转换成压力能，从而提高了压缩机出口的压力（参阅第七章）。

图1-12中制冷剂蒸气到达冷凝器。冷凝器管内通冷却水。到达管子周围的制冷剂蒸气，由冷却水冷却而凝结。

图1-13所示为制冷剂受重力作用回到冷却器的情况。冷却器的制冷剂液位由浮球阀控制。如此完成一个制冷循环。制冷剂依次经蒸发器、压缩机、冷凝器、蒸发器不断进行循环，则可连续进行制冷。

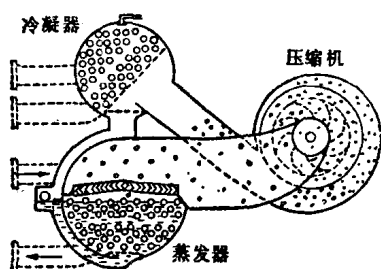


图 1-11

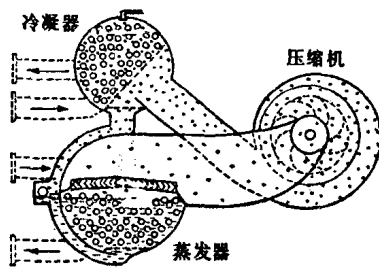


图 1-12

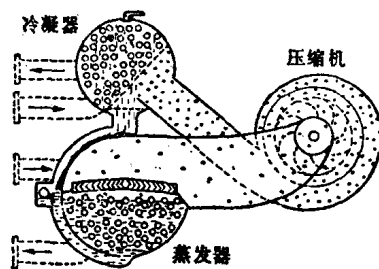


图 1-13

三、制冷循环中的温度与压力

如前所述，在制冷循环中，制冷剂状态由液体变为蒸气，再由蒸气变为液体，它的温度与压力各不相同。

图1-14所示为一般空调用离心式制冷机制冷循环中的压力与温度变化曲线（制冷剂为R11）。蒸发器和冷凝器中各保持一定的压力，使在一定的温度下进行蒸发和冷凝。即在饱和状态下，制冷剂的蒸发或冷凝温度一定，由此可相应地求得蒸发与冷凝压力。在相反情况下，若已知蒸发与冷凝压力，也可求得蒸发与冷凝温度。

蒸发器和冷凝器内处于气液共存状态。如果加热，则制冷剂液蒸发而成制冷剂蒸气；将制冷剂蒸气冷却，取走其热量，制冷剂蒸气凝结而液化。在这些状态变化中，压力保持不变。

在图1-14中，为使蒸发器中的制冷剂在 2°C 下蒸发，蒸发器中的压力必须保持 0.446 公斤力/厘米²（绝对）。为使冷凝器中的制冷剂蒸气在 40°C 下凝结液化，必须使冷凝器中压力保持 1.782 公斤力/厘米²（绝对）。

蒸发器的蒸发温度，必须低于被冷却液（载冷剂）的出口温度。对离心式制冷机，一般取温差LTD（出口温度与蒸发温度之差）为 $4\sim 8^{\circ}\text{C}$ 。用作空调时，大多要求冷媒水出口温

度为 5°C 。LTD取得过大，蒸发温度到 0°C 以下，就有冻结的危险。所以最好在蒸发温度为 0°C 以上的情况下来选择LTD。对于离心式制冷机，冷凝温度取得比冷却水温度高 $4\sim 8^{\circ}\text{C}$ 。蒸发与冷凝压力当然可根据蒸发与冷凝温度分别确定。

制冷剂蒸气的状态变化与热的传递有关。从液相变为气相的蒸发，要从周围介质取得热量；从气相变为液相的凝结，要向周围介质散发热量。制冷剂在完全变为气相或液相之前，温度是一定的。此时传送的热量完全用于状态变化。1公斤的饱和制冷剂液，在一定压力下变为饱和蒸气所需要的热量，称为潜热。与此相应，将饱和蒸气进一步加热或将饱和制冷剂液进一步冷却，使温度相应上升或下降所需的热量称为显热，也就是没有状态变化而只有温度变化时加热或冷却热量。

四、热泵

热只能从高温传给低温，决不会从低温传给高温。为使某一物体保持低温，要创造一个比这一温度更低的温度，使流往该处的热量，用机械输送到高温处，就好象用水泵将低处的积水输送到高处一样。这种工作方式的机器就是制冷机（图1-15）。

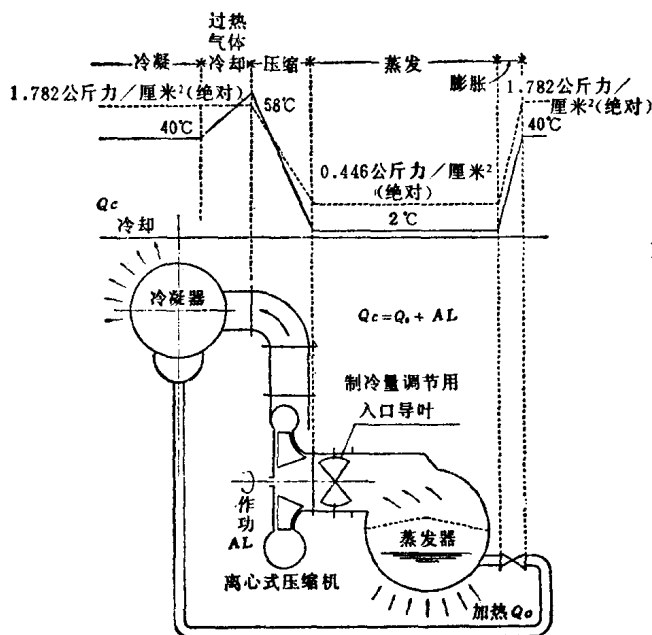


图1-14 采用R11的离心式制冷机中温度与压力的关系

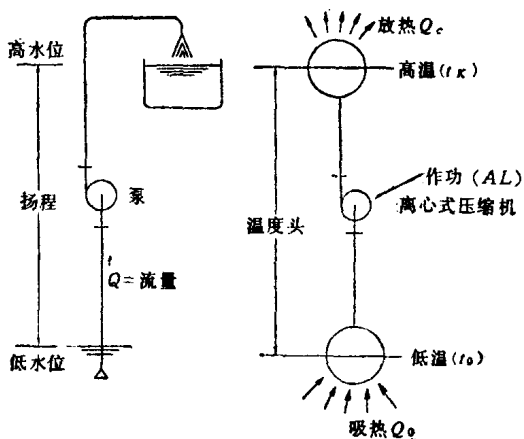


图1-15 水泵与热泵

为了排除地下室的积水，必须将排出的水不断输送到排水沟。对制冷机而言，同样需要从低温部取得热量，然后再散发到适当的介质中，因此必须要有冷却水。

排水泵排出的水，一般是放掉不用的；为了利用吸上的水，通常要用抽水泵。由制冷机从低温输往高温的热量，可积极地用于取暖及作为其它热源。此种情况的制冷机称为热泵。

此时的热平衡情况如下。设图1-14中外界对蒸发器的加热量为 Q_0 ，由压缩机从外部加给制冷剂蒸气的功相当的热量为 AL ，而冷凝器向外界散发的热量为 Q_c ，则下式成立：

$$Q_0 + AL = Q_c \quad (1-1)$$

由上式可知，冷凝器的放热量比蒸发器的冷却量大，其中必须加上与压缩机功相当的热量。热泵所利用的就是 Q_c 。

五、制冷量的单位

泵的能量，可用排量（或流量）来表示，其单位为升/分、米³/小时等。为了表示热泵

或制冷机的制冷量，通常采用单位时间内由低温部送往高温部的热量，其单位一般用千卡/小时。

此外，制冷量还往往用冷吨这种实用单位表示。所谓1冷吨，是指1小时内将3320千卡的热量由低温部分送往高温部分的能力。此种单位以冰的融化热为基础，即1吨0℃的冰在24小时内融化成0℃的水时的制冷量。

上述冷吨称为日本冷吨。通常还用美制冷吨，即

$$1\text{美冷吨} = 3024\text{千卡/小时}$$

美冷吨比日本冷吨小，注意不要混用。

此外还有高压气体管理法规定的法定冷吨。这是法规所规定的制冷量。对于采用离心式压缩机的制冷机，以压缩机加给制冷剂的能量为基准，将驱动压缩机的原动机的功率千瓦数除以1.2，即得法定冷吨。即

$$\text{原动机功率 } kW / 1.2 = \text{离心式制冷机法定冷吨。}$$

本书中除特别注明者外，都是美冷吨。

六、热力学线图上的制冷循环

1. 一级制冷循环

若将制冷循环画在热力学线图上，则容易理解其工作过程，并能从该线图上简单地求得制冷量、制冷剂循环量、冷凝器放热量等设计制冷机所必要的数值。现在用得最多的热力学线图是温-熵图 ($T-s$ 图)、压-焓图 ($\log P-i$ 图) 和焓-熵图 ($i-s$ 图) (图1-16)。各线图都有其特点。在 $T-s$ 图上，由压缩或膨胀等行程线下的面积，可求得该行程时加入或放出的热量。在 $\log P-i$ 或 $i-s$ 图上，焓轴上的线段长度表示与绝热压缩功相当的热量，或等压下加入或放出的热量。

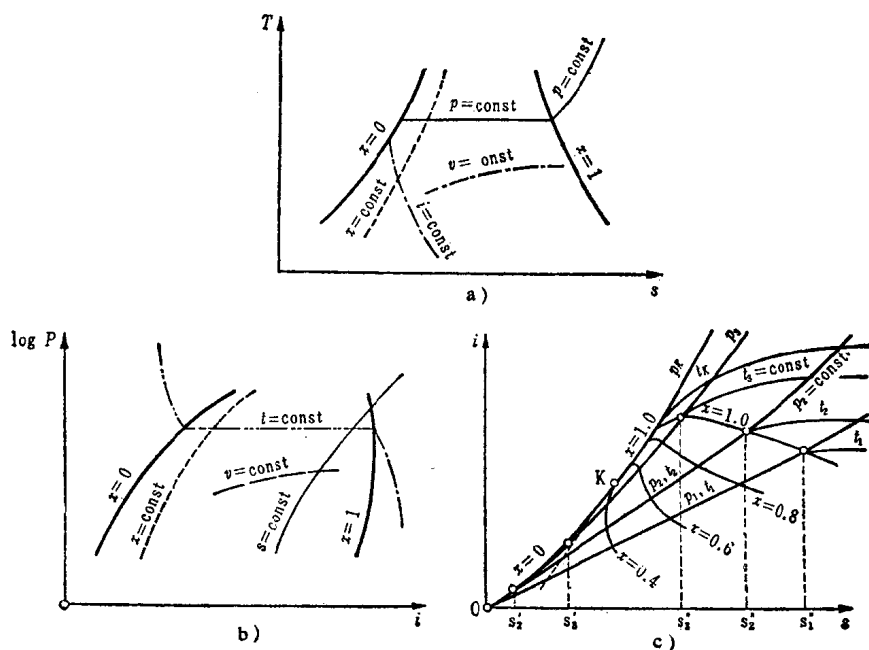


图1-16 热力学线图
a) $T-s$ 图 b) $\log P-i$ 图 c) $i-s$ 图

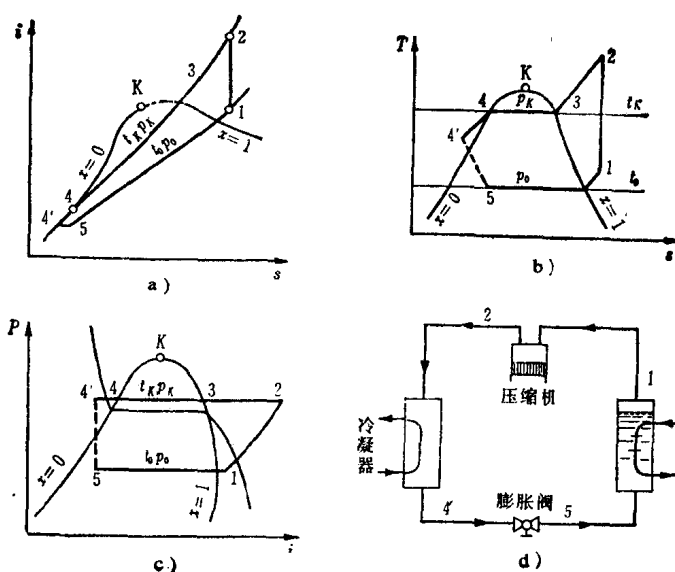


图1-17 热力学线图上一级制冷循环

a) $i-s$ 图 b) $T-s$ 图 c) $\log P-i$ 图

一级制冷的理论循环如图1-17所示，由制冷剂的蒸发、制冷剂蒸气绝热压缩、压缩蒸气的冷却和凝结、膨胀阀的绝热节流等构成。绝热压缩（行程1-2）是将制冷剂蒸气压缩到与制冷剂的冷凝温度 t_K 相应的压力 p_K 。过热蒸气在冷凝器中冷却成饱和蒸气（行程2-3），再进一步冷却而凝结液化（行程3-4）。在冷凝器中或在过冷却器中过冷却至冷凝温度以下（行程4-4'）。制冷剂液通过膨胀阀受到节流（行程4'-5），此时一部分液体蒸发，与残余的制冷剂液一起进入蒸发器，吸取载冷剂的热量而蒸发，从而将载冷剂冷却（行程5-1）。蒸发器内的蒸发温度，是与蒸发器内压力相当的制冷剂的饱和温度。

1 公斤制冷剂的制冷量 q_o 为：

$$q_o = i_1 - i_5 \quad (\text{千卡/公斤}) \quad (1-2)$$

冷凝器内除去的热量（包括过冷却部分） q_K 为：

$$q_K = i_2 - i_5 \quad (\text{千卡/公斤}) \quad (1-3)$$

压缩功 AL_{KA} 为：

$$AL_{KA} = i_2 - i_1 \quad (\text{千卡/公斤}) \quad (1-4)$$

理论循环的制冷系数 ϵ_{th} 为：

$$\epsilon_{th} = \frac{q_o}{AL_{KA}} = \frac{i_1 - i_5}{i_2 - i_1} \quad (1-5)$$

单位容积制冷量为：

$$q_v = \frac{q_o}{v_1} = \frac{i_1 - i_5}{v_1} \quad (\text{千卡/米}^3) \quad (1-6)$$

式中 v_1 ——压缩机吸入口蒸气的比容（米³/公斤）。

制冷剂循环量为：

$$G_o = \frac{Q_o}{q_o} \quad (\text{公斤/小时}) \quad (1-7)$$

式中 Q_o ——制冷机的制冷量(千卡/小时)。

压缩机的吸入量为:

$$V_o = G_o v_1 = \frac{Q_o}{q_o} \quad (\text{米}^3/\text{小时}) \quad (1-8)$$

每千瓦·小时的理论制冷量 K_{Ta} 为:

$$K_{Ta} = 860 \varepsilon_{th} \quad (\text{千卡/千瓦} \cdot \text{小时}) \quad (1-9)$$

上述图1-17相当于往复式制冷机。离心式制冷机与图1-17稍有差别,其理由如下。图1-18为离心式制冷机的一级制冷循环。该离心式制冷机无过冷却器,而且冷凝器的结构中也无过冷却部分,因此膨胀阀前的状态为图1-18点4所示的饱和状态。离心式中蒸发器和压缩机不象往复式那样用管路联结,而是直接相联。由于这个原因以及无过冷却器,离心式压缩机的吸入状态不是图1-17所示的过热状态,而是图1-18点1所示的饱和状态。即离心式制冷机的循环可以考虑为简单的饱和循环。

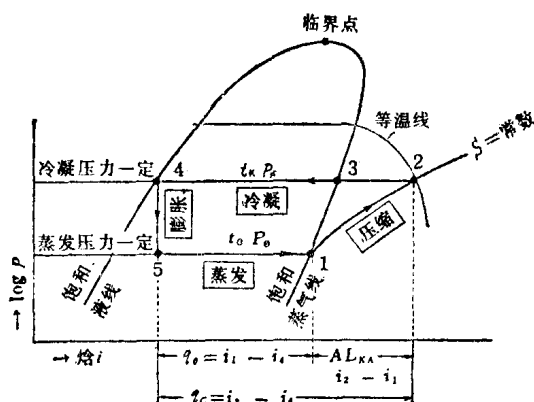


图1-18 离心式制冷机的一级制冷循环

表1-1为常用制冷剂的容积制冷量 q_v 的值。

【例1-1】 设有一离心式制冷机,以 R113 为制冷剂。蒸发温度 0°C , 冷凝温度 40°C , 采用简单饱和制冷循环。

求: q_o , q_K , AL_{KA} , ε_{th} , q_v , G_o , V_o 和 K_{Ta} , 其制冷量为100冷吨。

解: 由制冷剂表(参阅相应的表)可以求得下列各值:

$$i_1 = 137.90, i_2 = 108.97, i_2 = 142.81$$

因此

$$q_o = i_1 - i_5 = 137.90 - 108.97 = 28.93 \quad (\text{千卡/小时})$$

$$q_K = i_2 - i_5 = 142.81 - 108.97 = 33.84 \quad (\text{千卡/小时})$$

$$AL_{KA} = i_2 - i_1 = 142.81 - 137.90 = 4.91 \quad (\text{千卡/小时})$$

$$\varepsilon_{th} = \frac{q_o}{AL_{KA}} = \frac{28.93}{4.91} = 5.88$$

$$q_v = \frac{q_o}{v_1} = \frac{28.93}{0.7993} = 36.1 \quad (\text{千卡/米}^3)$$

$$G_o = \frac{Q_o}{q_o} = \frac{3024 \times 100}{28.93} = 10450 \quad (\text{公斤/小时})$$

$$V_o = G_o v_1 = 10450 \times 0.7993 = 8350 \quad (\text{米}^3/\text{小时}) = 2.32 \quad (\text{米}^3/\text{秒})$$

$$K_{Ta} = 860 \varepsilon_{th} = 860 \times 5.88 = 5060 \quad (\text{千卡/千瓦} \cdot \text{小时})$$

【例1-2】 制冷循环中采用 R12。蒸发温度 -23°C , 冷凝温度 $+40^\circ\text{C}$, 采用简单饱和循环。

求: 1. 每1冷吨(3024千卡/小时)的压缩机吸入蒸气量(米³/小时)

2. 每1冷吨的理论功率