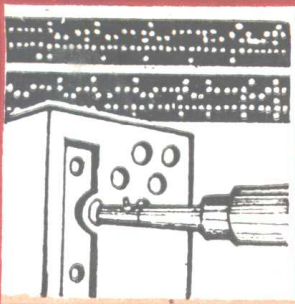
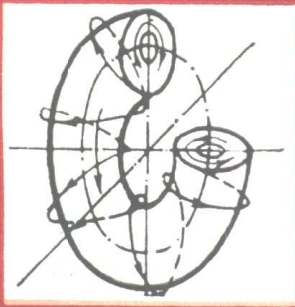


高等学校试用教材



离心式制冷压缩机

上海机械学院叶振邦 编
西安交通大学常鸿寿



机械工业出版社

高等学校试用教材

离心式制冷压缩机

上海机械学院叶振邦
西安交通大学常鸿寿 编

机械工业出版社

离心式制冷压缩机

上海机械学院叶振邦
西安交通大学常鸿寿 编
(重排本)

*

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)

房山南召印刷厂印刷

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 23 字数 537千字

1981年 8月重庆第一版·1985年 6月北京第四次印刷

印数 10,001—12,100·定价 3.80元

*

统一书号: 15033·5058

前 言

离心式制冷压缩机，是离心式压缩机的一个分支，但是它用于制冷领域中时，常与其他辅助设备，如冷凝器、节流机构、省功器（中间容器）、蒸发器等组成机组形式出现。这种机组大致可以分为两类，其一称为冷水机组，其蒸发温度在 -5°C 以上，多用于大型空调或制取 0°C 以上冷水，也有少量是用以制取略低于 0°C 的盐水，以供各种工艺上的用途；其二可称为低温机组，其蒸发温度为 $-5\sim-160^{\circ}\text{C}$ ，但大部分属于 $-5\sim-40^{\circ}\text{C}$ ，多用于化工过程中。由此可知，离心式制冷压缩机与国计民生有着密切的关系，是我国四个现代化中不可缺少的一种机械。

与制冷事业一样，我国的离心式制冷压缩机制造，也是从解放后才开始的。从1958年开始，先后设计制造了各种冷水机组及低温机组，到目前为止，无论是在理论、制造、运行维修上，都已有了自己的体系和经验。为了归纳和总结我国在离心式制冷压缩机的设计等方面经验，培养从事该方面的专业人员，受第一机械工业部的委托，根据“制冷及低温技术”专业教学计划及教材大纲有关文件精神，按教材编写出版计划编写本书。

本书由叶振邦、常鸿寿主编，叶振邦对整本书作了安排并拟订了大纲，后期的主编及出版工作是由常鸿寿负责的；西安交大的周子成、上海机院的徐鸿祥参加了编写，其中，第一、八、十一章由常鸿寿编写，第二、三、四、五、九章由叶振邦编写，第六、七章由周子成编写，第十章由徐鸿祥编写，殷国柱在绘图及会稿方面，协助做了不少工作。本书由西安交通大学透平压缩机教研室朱报楨主审，徐忠审阅了个别章节。

在工作中，得到西安交通大学、华中工学院及上海机械学院有关同志的大力支持，上海第一冷冻机厂、重庆通用机器厂、北京冷冻机厂、沈阳鼓风机厂、一机部通用机械研究所以及上海机械学院的殷忠民提供了不少宝贵资料，在此一并致谢。由于编者水平有限，谬误之处一定不少，希望读者多予批评指教。

上海机械学院 叶振邦 西安交通大学 常鸿寿

1980年10月

目次

| | |
|----------------------------|-----|
| 前言 | |
| 第一章 绪论 | 1 |
| § 1-1 制冷压缩机的种类及其比较 | 1 |
| § 1-2 离心式制冷机的分类 | 4 |
| § 1-3 离心式制冷压缩机简图及基本工作原理 | 6 |
| § 1-4 离心式制冷机在制冷领域中的地位与作用 | 9 |
| § 1-5 国内外离心式制冷机的发展与今后趋向 | 10 |
| 第二章 级内气体的流动与状态变化 | 13 |
| § 2-1 速度三角形 | 13 |
| § 2-2 一元稳定流动的连续性方程 | 15 |
| § 2-3 欧拉方程式 | 17 |
| § 2-4 级内损失简介 | 20 |
| § 2-5 一元稳定流动的能量方程式 | 21 |
| § 2-6 压缩功、移动功与压送功 | 26 |
| § 2-7 级内等熵过程与多变过程, 损失与效率 | 27 |
| § 2-8 状态参数间的联系 | 36 |
| § 2-9 气体的流动与损失 | 48 |
| 第三章 叶轮 | 54 |
| § 3-1 叶轮的能量头 | 54 |
| § 3-2 反作用度, 叶轮的型式 | 62 |
| § 3-3 级的特性曲线(附叶轮特性曲线) | 66 |
| § 3-4 轮阻损失 | 72 |
| § 3-5 漏气损失的种类, 轮盖漏气损失 | 77 |
| § 3-6 叶轮参数的合理选择与成型 | 83 |
| § 3-7 离心式叶轮的堵塞流量 | 98 |
| 第四章 固定元件 | 106 |
| § 4-1 无能量加入一元稳定流动的计算 | 106 |
| § 4-2 扩压器 | 111 |
| § 4-3 弯道与回流器 | 122 |
| § 4-4 蜗壳 | 126 |
| § 4-5 进气室 | 133 |
| 第五章 离心式制冷压缩机整机分析计算 | 135 |
| § 5-1 机器的损失, 功率与效率 | 135 |
| § 5-2 级以外迷宫密封的计算 | 137 |
| § 5-3 多级机器中各级参数的匹配 | 141 |
| § 5-4 离心式制冷压缩机气动-热力设计概要 | 143 |
| § 5-5 设计计算示例与说明 | 145 |
| 第六章 制冷剂与制冷循环 | 169 |
| § 6-1 离心式制冷机中所用制冷剂的选择 | 169 |
| § 6-2 计算制冷剂热物性的方程式 | 176 |
| § 6-3 离心式制冷机循环 | 190 |
| 第七章 相似理论的应用 | 198 |
| § 7-1 π 定律与相似准则 | 199 |
| § 7-2 完全相似 | 202 |
| § 7-3 导出参数和比转速 | 207 |
| § 7-4 不完全相似 | 209 |
| 第八章 离心式制冷机的特性曲线及调节 | 220 |
| § 8-1 离心式制冷机的特性曲线 | 220 |
| § 8-2 离心式制冷机的调节 | 228 |
| 第九章 三元叶轮的设计计算 | 243 |
| § 9-1 三元叶轮的几何描述及运动分析 | 243 |
| § 9-2 三元叶轮正命题求解 | 251 |
| § 9-3 子午面解(求解中间流面上参数) | 253 |
| § 9-4 回转面解 | 262 |
| 第十章 强度计算 | 266 |
| § 10-1 轮盘和轮盖的应力计算, 二次计算法 | 267 |
| § 10-2 用有限元方法计算叶轮的应力 | 288 |
| § 10-3 转子的临界转速 | 300 |
| § 10-4 轴向推力及其平衡 | 322 |
| 第十一章 离心式制冷机的构造 | 325 |
| § 11-1 不同机组的构造特点 | 325 |
| § 11-2 国内外离心式制冷机系列及能量的综合利用 | 331 |
| § 11-3 压缩机主要零部件的结构 | 334 |
| § 11-4 离心式制冷机的辅助设备 | 344 |
| 附录 | 356 |
| I 本书所涉及的SI制单位及其说明 | 356 |
| I 符号表 | 359 |
| 参考文献 | 360 |

第一章 绪 论

§ 1-1 制冷压缩机的种类及其比较

一、制冷压缩机的种类

压缩式制冷机是由压缩、冷凝、节流、蒸发四个过程的机器设备所组成的。压缩过程所使用的机器可以是容积式压缩机（如活塞式压缩机、螺杆式压缩机等），也可以是透平式压缩机（主要是离心式压缩机），它们在制冷循环中所起的压缩作用差别不大，但其工作原理、结构形式、使用场合以及其他特点却有很大的不同。

我们知道，气体压力的大小决定于单位时间内气体分子撞击单位面积的次数与强烈度。如果，增加容器内气体温度，可以提高压力，但当温度降低后则气体又恢复到原来压力，故此法不可取。因此，提高压力的方法主要是增加单位容积内气体分子的数目，也就是使分子间的距离缩短。使分子距离缩短的方法有：（1）减少气体分子所占封闭空间的容积，这就是容积式压缩机最基本的工作原理。图 1-1 和图 1-2 分别为活塞式和螺杆式压缩机简图。可以看出气体在气缸内随着容积的减少而直接受到压缩。（2）是利用惯性的方法，通过气流的不断加速，减速，因惯性而彼此挤压，使分子间的距离缩短。图 1-3 为离心式制冷压缩机纵剖面图。由于叶轮的高速旋转，旋转叶片与气流间有力的相互作用，使气流产生了压力能与动能，而后在扩压器中又把动能转变为压力能。

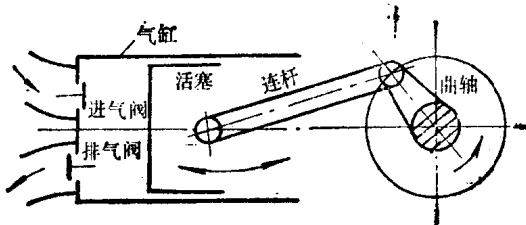


图1-1 活塞式压缩机简图

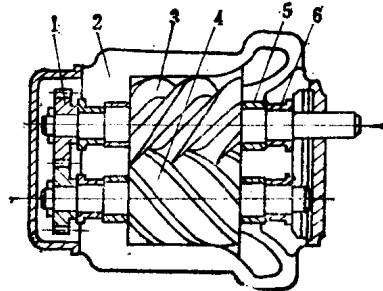


图1-2 螺杆式压缩机简图

1—同步齿轮 2—气缸 3—阳转子
4—阴转子 5—轴密封 6—轴承

由于压缩的原理不同，因而结构形式也有很大的差别。活塞式压缩机是活塞在气缸内作往复运动，考虑到往复运动所带来惯性力的影响，因而原动机的转速就不能很高，制冷量较小；但其压力范围较宽，机器效率较高，制造技术成熟，因而目前对中、小型制冷量的制冷机仍广泛使用。螺杆式压缩机是用一对阴阳螺杆转子作啮合旋转运动，使转子凹槽与气缸内壁之间所构成的容积不断发生变化，以达到吸、压气体的目的。近来由于改进了螺杆型线的加工工艺和采取措施减少噪声，因而在中等制冷量的制冷机中得到应用。离心式压缩机是属于透平机械，它可分为转子及定子两部分，转子上叶轮中的叶片，是把功传递给气体的主要部件，而定子中的扩压器、回流器、蜗室等是用来改变

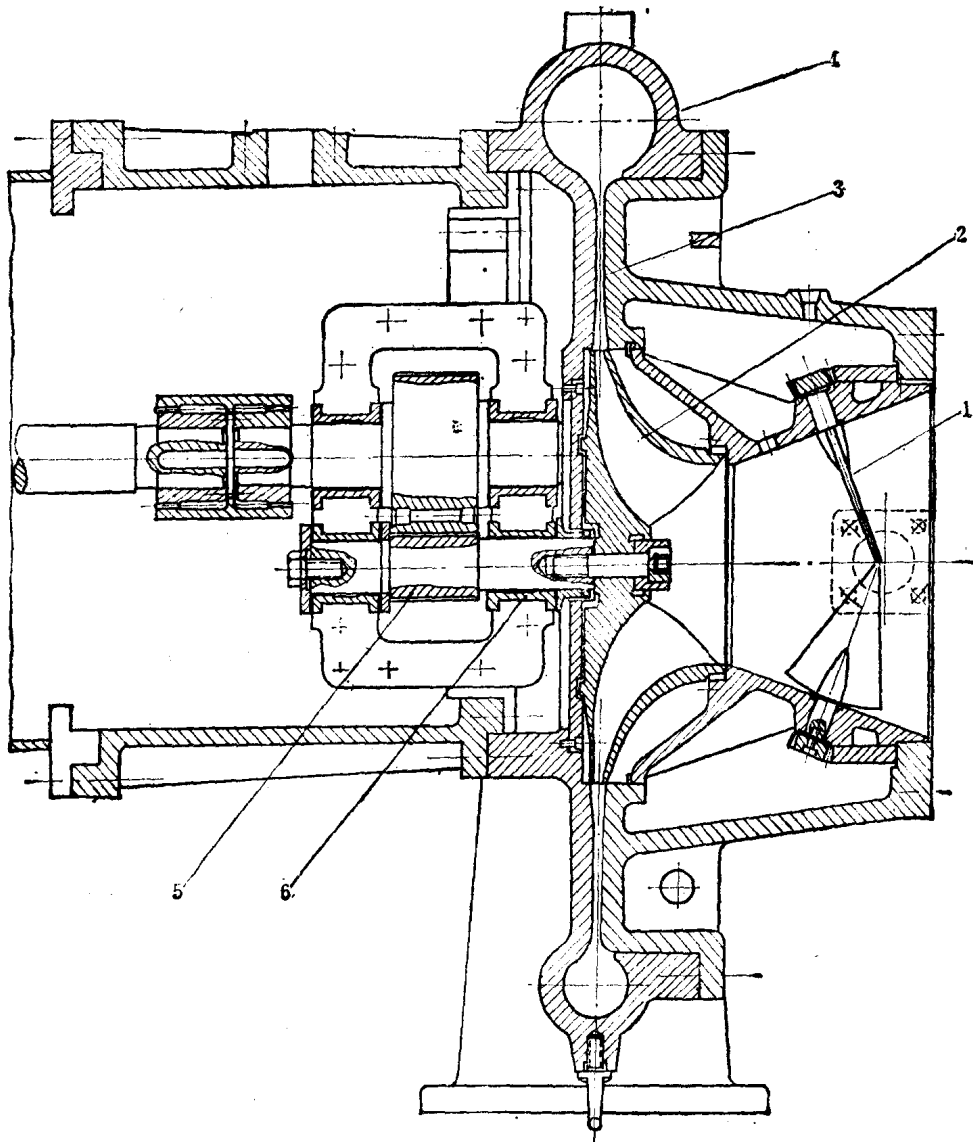


图1-3 FLZ-1000 A型空调用离心式制冷压缩机

1—进口可转导叶 2—叶轮 3—无叶扩压器 4—蜗壳 5—增速齿轮 6—轴承

气流运动方向以及把速度能转变为压力能的部件。离心式压缩机由于是高速旋转、流量大，因而在结构紧凑的制冷机中能得到大的制冷量，同时利用各种不同制冷剂的物理特性，也可使用在较小制冷量的制冷机中。图 1-4 为各种形式制冷机在使用不同制冷剂时各自蒸发温度和制冷量的范围。

离心式制冷压缩机与一般离心式压缩机在工作原理、结构形式方面基本相同，所不同的是它压缩的制冷剂一般价格较高，有的需防爆炸，故不允许泄漏。因此，结构上要求有密封性较高的机械密封。另外在参数表达上不同，它用冷凝温度 t_k 与蒸发温度 t_e 的差表示一般压缩机的进出口压力差，用制冷量 Q_0 表示质量流量 M 。对氟里昂制冷机，

由于制冷剂的分子量大，因此单机压比高，同时其音速 a 小而马赫数 $M_{u_2} = \frac{u_2}{a_1}$ 较大，这在气动设计中要予以注意。在这种机组中由于受 M_{u_2} 数限制 u_2 较小，故叶轮材料一般可使用铸铝合金。

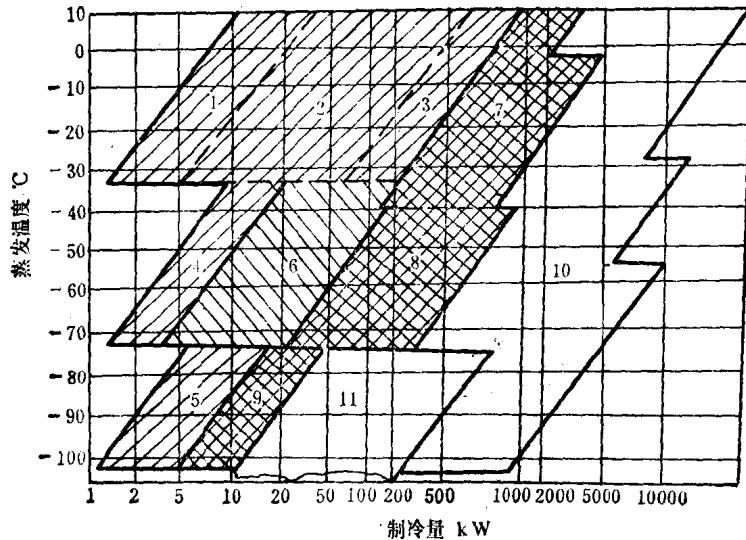


图1-4 各种形式制冷机的蒸发温度和制冷量范围

1—全封闭活塞式 2—半封闭活塞式 3—开启式活塞式 4—两级压缩系统的活塞式
5—复叠式下部活塞式 6—两级压缩系统的回转式 7—单级螺杆式 8—两级压缩系统的螺杆式 9—复叠式下部螺杆式 10—离心式 11—空气透平式

二、离心式制冷压缩机的优缺点

上述各种型式的压缩机均有一定的特点和使用范围，但离心式比起活塞式压缩机具有以下一些优点：

(1) 机器的重量和尺寸小，占地面积小。在相同的制冷量的情况下（特别是制冷量大时），离心式包括增速齿轮箱的重量只有活塞式压缩机重量的 $1/5 \sim 1/8$ ，价格也便宜。

(2) 结构简单，工作可靠，几乎没有磨损，因而经久耐用，修理运转费用较低。

(3) 离心压缩机由于在运转时剩余的惯性力极微，运转平稳，因而基础轻。目前对中小型制冷机，离心式压缩机组可直接装在单筒式的蒸发冷凝器上，无需另外设计基础。

(4) 易于实行多级压缩和节流，以及把制冷剂蒸汽引入压缩机中间级时可得到完全的中间冷却，并可在各蒸发器中得到几种蒸发温度。

(5) 可以在制冷量大幅度变化时，利用进口导叶自动地进行制冷量的调节。

(6) 对大型制冷机，可以采用经济性高的工业汽轮机直接拖动，这对有废热蒸汽的工业企业来说，经济性更高。

离心式制冷压缩机有下列缺点：

(1) 由于一般离心式的效率比之活塞式要低，为了保证叶轮有一定的出口宽度，制

冷量不能太小，否则还会大大降低机器的效率。

(2) 为了得到较高的压力比则需多级，同时一般要用增速传动，对开启式机组还要有轴端密封，这些均增加了制造上的困难和结构上的复杂。

§ 1-2 离心式制冷机的分类

离心式制冷机的分类方法很多，一般可按其用途、结构形式、使用的制冷剂等进行分类。

一、按用途分类

按目前所生产的离心式制冷机，主要可分为冷水制冷机组和低温制冷机组。

冷水制冷机组一般用于空调，其蒸发温度在 0°C 以上。由于温差较小，往往可以做级数较少的机器，特别是利用氟里昂族制冷剂后，籍其分子量大以及不同氟里昂的单位制冷量的不同，可在不同制冷量时把机器做成单级。大容量机器为了降低功耗也有做成两级以上的。机组为半封闭式单筒体居多，由于机器级数较少，因此结构紧凑，运转维护简单。

低温制冷机组，一般用于化工流程，其特点是：可达到低的蒸发温度（一般 $-5 \sim -160^{\circ}\text{C}$ ，常用的是 $-5 \sim -40^{\circ}\text{C}$ ）以及在同一制冷机中可有多种蒸发温度，因此它常使用多级压缩中间节流循环。使用的制冷剂，大多数为利用流程的非氟里昂制冷剂制冷，例如高压聚乙烯装置中就使用流程中已有的乙烯、丙烯，石蜡脱离工序中就利用氨来制冷。低温机组的压缩机，一般做成多级的开启式（少数有用氟里昂的半封闭式），对分子量较小的氨离心式压缩机即做成高压缸和低压缸，每缸有 $5 \sim 6$ 级。

二、按制冷机构造分类

和活塞式制冷机一样，离心式制冷机也可把机组做成开启式、半封闭式和全封闭式。

开启式机组简图如图1-5，机组的布置是把压缩机、增速器与原动机分开，在机壳外用连轴节连接〔图1-5 a〕，有的机组则是压缩机、增速器在同一机壳内，由增速器轴与电机轴连接〔图1-5 b〕。在这些机组中为了防止制冷剂的泄漏，在轴的外伸端处必需装有机密封。

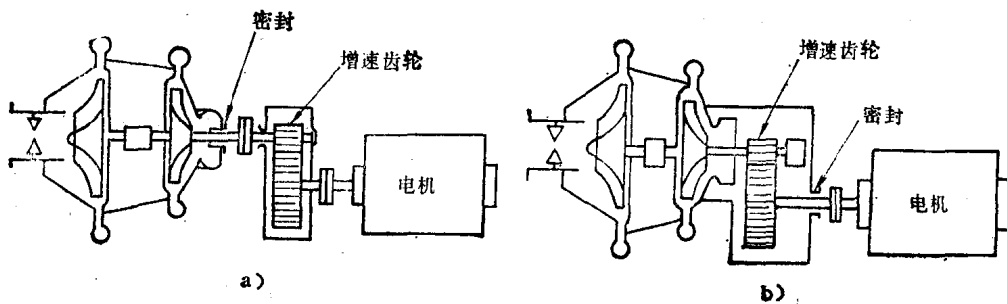


图1-5 开启式机组简图

a) 增速齿轮外装式 b) 增速齿轮内装式

半封闭式机组简图如图1-6。对单级机器可把压缩机、增速器和电动机用同一个筒形外壳封装在一起，仅是压缩机的进气口和蒸发器相连，出气口和冷凝器相通。在这种

机组中不需要机械密封。但电机需专门制造，并要考虑其在运转中的冷却和耐氟的绝缘问题。

全封闭式机组是把所有制冷机器设备封闭在同一机壳内，其简图如图1-7。对小型制冷机这样做有许多优点：制冷剂泄漏极小，一般不用增速器使构造简单，且噪声小，因为仅有主轴旋转而振动小，同时电机在制冷剂中得到充分冷却不会使电机过载等。

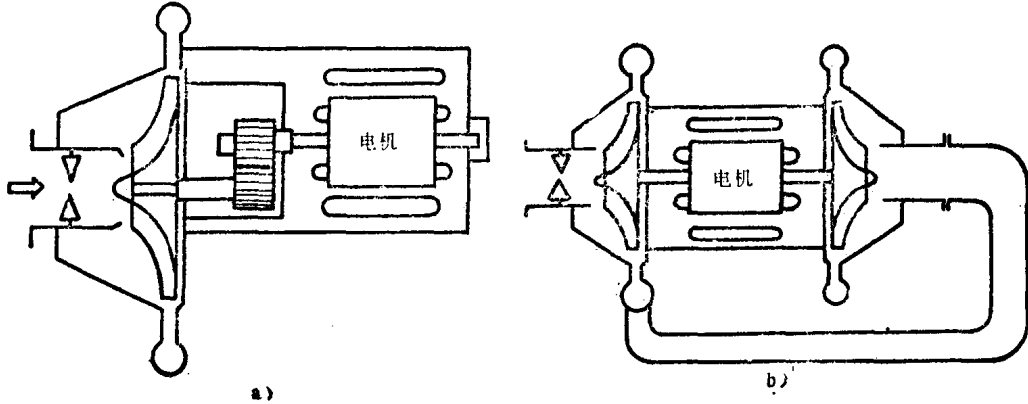


图1-6 半封闭式机组简图

a) 单级压缩式 b) 直联两级压缩式

三、按使用制冷剂分类

目前国内外机组均按制冷量的大小、蒸发温度的高低、按不同制冷剂的特性而制订离心式制冷机的系列。我国提出的冷水机组系列规定：对使用R11机组，其制冷量范围为290kW(30×10^4 kcal/h)到3490kW(360×10^4 kcal/h)。对使用R12机组，制冷量范围则为875kW(75×10^4 kcal/h)到4420kW(380×10^4 kcal/h)。小于上述范围用R113等系列，更大的可用R500(或R22)等系列。低温机组使用的制冷剂如氨、乙烯、丙烯等，有的国家也制定了系列。推广按制冷剂制定系列对制造厂和用户均带来极大方便，应予以重视。

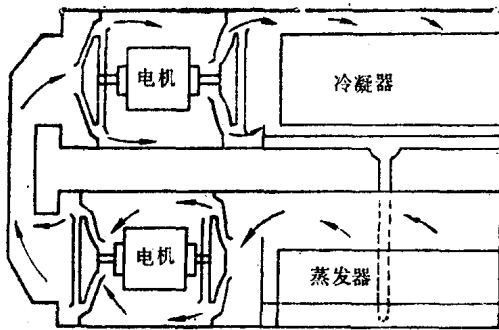


图1-7 直联四段压缩式全封闭型机组简图

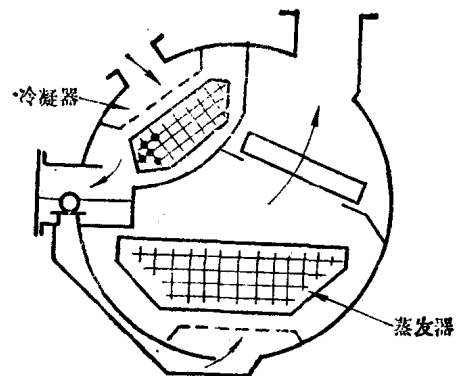


图1-8 单筒式热交换器

四、按冷凝器、蒸发器的布置分类

冷凝器和蒸发器一般使用卧式壳管式，有单筒和双筒两种布置方法。双筒是把冷凝

器放在上部，蒸发器放在下部成为上下两段。目前采用的冷水机组，单筒占绝对优势，其制冷量可做到 4420kW 以上，制冷量太小时，由于工艺上问题有时也做成双筒。单筒是把蒸发器和冷凝器的筒体做成一体（图1-8），把压缩机和其他一些附属设备全部放在筒体上面，这可使结构紧凑、占地面积小、造价低、运转、安装、使用方便。

§ 1-3 离心式制冷压缩机简图及基本工作原理

为了逐步建立起对离心式压缩机的认识，我们先介绍一下 KF100(-30) 低温机组中离心式压缩机（图1-9）的典型结构及基本工作原理。该机以 R12 为制冷剂。机器可变型使用，在蒸发温度 $t_0 = -30^\circ\text{C}$ 时，制冷量为 1160kW ($100 \times 10^4 \text{kcal/h}$)，压缩机转速 $n = 7500 \text{r/min}$ ，功率 $N = 630 \text{kW}$ 。当制冷机变型为 KF150(-15) 时，其蒸发温度 $t_0 = -15^\circ\text{C}$ ，制冷量为 1745kW ($150 \times 10^4 \text{kcal/h}$)，转速 $n = 6920 \text{r/min}$ ，功率 $N = 760 \text{kW}$ 。

压缩机为四级，气体由蒸发器从吸气管吸入，流经进口导叶调节器进入第一级叶轮，经无叶扩压器、弯道、回流器再进入第二级叶轮，以此类推，最后经蜗壳把气体排至冷凝器。

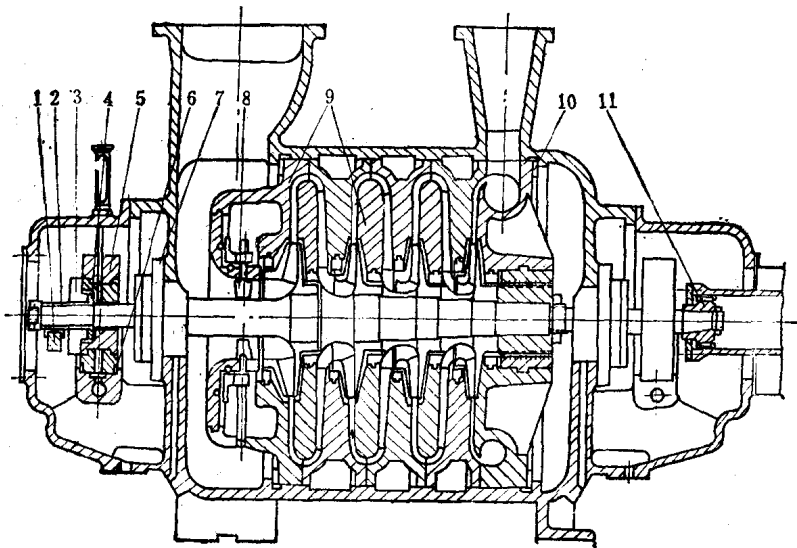


图1-9 KF100(-30) 制冷机中离心式压缩机纵剖面图

- 1—顶轴器 2—套筒 3—止推轴承部 4—止推轴承 5—轴承 6—调整块
7—机械密封部 8—进口导叶叶片 9—隔板 10—调整块 11—齿轮联轴器

该制冷机的流程图和状态图如图 1-10。从压缩机 1 压出的 R12 高压蒸汽进入冷凝器 3，在冷凝器中高压蒸汽的热量被冷却水带走而使蒸汽冷凝成液体，进入浮球阀组 4，由前三个浮球阀节流后的蒸汽分别进入压缩机的二、三、四级，其节流后的压力分别与该级的压力相对应，而最后经浮球阀节流后的液体和蒸汽则进入蒸发器 5，在蒸发器中蒸发后的气体被压缩机吸入第一级进行压缩，而后不断循环。在开车时，冷凝器的高压蒸汽不经过浮球阀而由另一阀门节流后直接进入蒸发器，待工况正常后再关闭该阀

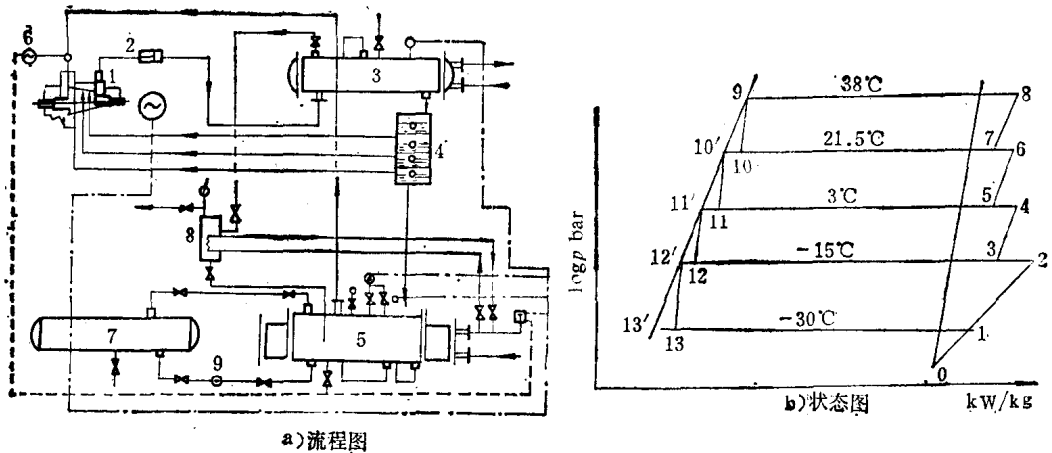


图1-10 KF100(-30)制冷机流程图及状态图

1—压缩机 2—止逆阀 3—冷凝器 4—浮球阀 5—蒸发器 6—
进口导叶调节机构 7—贮液槽 8—气液分离器 9—液氟泵

门。流程中还有分离混入氟里昂中空气的气液分离器8，补充或贮存氟液的贮液槽7。

从以上介绍可以看出，对低温机组中采用多级离心式压缩机具有以下特点：

(1) 多级节流可使制冷量增大，耗功降低。由于决定制冷量大小的是氟里昂液体的蒸发，多次节流就可使蒸发器中干度减小，液氟占的比重增大，在KF100(-30)机组中液氟占到90%。由图1-10b可见焓差 $h_{13}-h_0$ 要比单级节流时的 h_9-h_0 大好多，因此提高了制冷量。同时进入二、三、四级的加气部分，不经过再节流和蒸发，因而减少了无用功，提高了制冷系数。

(2) 由于每级加气使各级叶轮的流量逐级增加，这样使叶轮的出口宽度不致过窄。

(3) 如果把吸入二、三、四级的制冷剂引入到另设置的蒸发器，则一机可得多种蒸发温度，在该制冷机中可得+10°C、+3°C、-15°C和-30°C，这在某些工艺流程中使用特别适宜。

对离心式制冷压缩机，由于使用的场合、蒸发温度的高低以及不同的制冷剂，压缩机的缸数、段数和级数是不同的。例如，上面介绍的KF100(-30)制冷机中的压缩机为一缸、四段、四级，对轻分子气体而蒸发温度又较低时（如氨离心式制冷机）所需级数较多而做成两缸，在要求一台制冷机有几个蒸发温度工作时，则每一个蒸发温度所需的级数可以是一级或多级，我们把这个一级或多级的组成称压缩机的“段”。

“级”是组成离心式制冷压缩机的基础，也是我们今后重点讨论的对象，它是叶轮及其后的固定元件（对中间级是指扩压器、弯道、回流器及级间密封，对末级则有扩压器和蜗室）组成。图1-11为离心式压缩机中间级简图。图中数字表示了各个主要截面的代号，它们是：0-0 叶轮进口截面，1-1 叶轮叶片进口截面，2-2 叶轮叶片出口截面，3-3 扩压器进口截面，4-4 扩压器出口截面，5-5 回流器叶片进口截面，6-6 回流器叶片出口截面，0'-0' 级出口或下一级进口截面

下面介绍各个元件的作用原理。

吸气室：它是为了把所需压缩的气体由蒸发器均匀地引入第一级而设置的。它的形状可参见图1-9。一般作成沿气体流动方向截面积略有减小，使气体流动时略有加速，

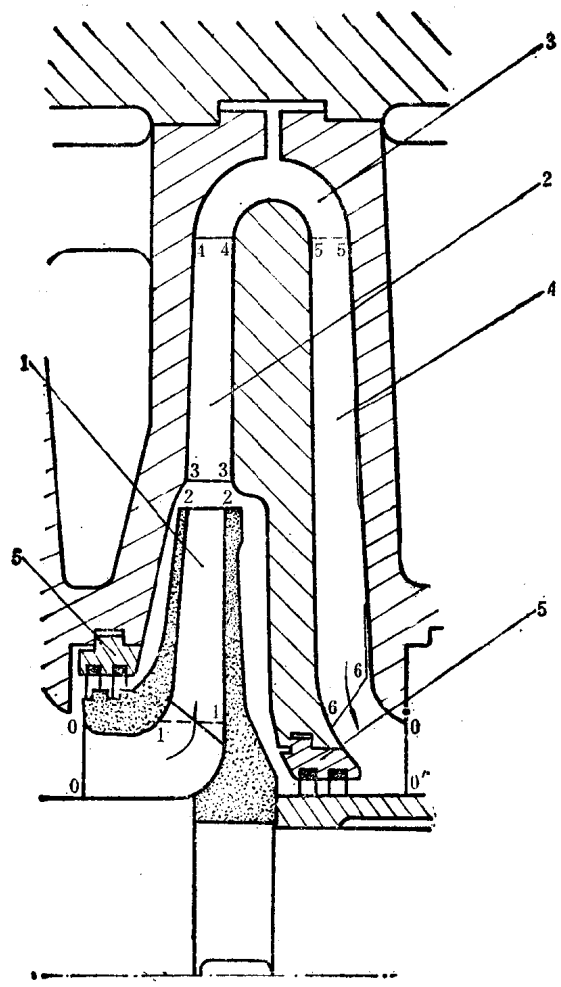


图1-11 离心式压缩机的中间级

- 1—叶轮 2—扩压器 3—弯道 4—回流器 5—级内密封

即压力略有降低以减少损失。

进口导叶：它用来调制冷量。在导叶旋转时使得进入叶轮的气流绝对速度方向改变，从而改变了进入叶轮气体流量的大小。

叶轮：叶轮也称为工作轮，它是压缩机中最重要的部件，如图1-11。叶轮由轮盖、叶片和轮盘组成（也有把这三部分一起用铝合金铸成的）。在工作时，轴和叶轮以高速旋转，故把轴和叶轮等组成的部件称为转子，转子以外不动的部分称为固定元件。

高速旋转着的叶轮，利用其叶片对气体做功，气体由于受旋转离心力的作用以及在叶轮内的扩压流动，使气体通过叶轮后的压力和速度得到提高。这从能量转化的角度来看，也可以理解为叶轮交给气体的一定能量，此能量又转化为气体的压力能和速度能。

扩压器：气体从叶轮流时，它有较高的流动速度。为了充分利用这部分速度能，常在叶轮后面设置了流通面积逐渐扩大的扩压器，用以把速度能转化为压力能，以提高气体的压力。面积逐渐扩大的环形通道称为无叶扩压器，其中装有叶片的称为叶片扩压器。

弯道及回流器：弯道和回流器是用来把从扩压器出来的气体，引入到下一级叶轮，

进行再一次压缩。一般在弯道之后的回流器中都装有叶片，以便引导气体以轴向方向进入下一级叶轮。

蜗壳：单级离心式压缩机和多级的末一级，不存在把气体引入下一级的问题，所以它的后面就没有弯道和回流器，而是接上一个蜗壳，蜗壳的主要目的是把扩压器或叶轮后面的气体汇集起来，引导到冷凝器去。

密封：叶轮在工作时，由于轮盖与固定壁之间的压力比叶轮进口处压力要高，同时由于转子与固定元件之间有相对运动，应有一定的间隙，因此高压气体就要通过这些间隙向低压处泄漏，这种泄漏是种损失。为了尽量减少这种损失，需装有图 1-12 的迷宫密封。

迷宫密封不仅用于级之间的内密封，而且在级之外如平衡盘，轴的两端也使用，若压差不大且对泄漏无特殊要求时，也常用迷宫密封作为外密封。对氟里昂制冷机，由于制冷剂贵重，无论在开车或停车时都不允许泄漏，则在轴端要用机械密封，图 1-9 中的 7 即为安装机械密封的部位。在有些机器中还使用油膜密封、气体密封等。

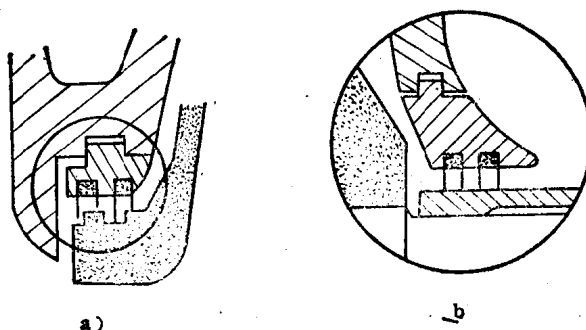


图1-12 级内的密封

a) 轮盖密封 b) 隔板密封

平衡盘：由于轮盘上内外两侧的压力不相等，在转子上就受有轴向推力（此力在图 1-9 上为向左边作用）。为了平衡这个推力，在末级之后设置平衡盘（图 1-9 中为第四级叶轮后）。因平衡盘的左侧为高压，而右侧与进气压力相通，致形成相反的力平衡掉大部分轴向推力。单双级冷水机组的推力不大，可以不用平衡盘。

轴承：为了支承高速转动的转子，在轴的两端装有支承滑动轴承。又由于转子上的轴向推力虽经平衡盘平衡掉大部分，但仍有剩余的轴向力要由止推轴承承受。在图 1-9 中支承止推轴承装于进气侧。对于支承止推轴承、齿轮箱、机械密封等的润滑则需设置润滑油系统。润滑油除了进入两元件之间进行润滑以减少摩擦外，还对相对摩擦处起冷却作用。为了监视轴承温度，在各轴承处装有温度计。

§ 1-4 离心式制冷机在制冷领域中的地位与作用

对大、中型制冷量，蒸发温度从 0°C 以上到 -160°C 范围内，离心式制冷机在空调及工艺流程中越来越得到广泛的应用。现概括介绍如下：

一、空调冷水机组

一般要求制冷剂蒸发温度在 0°C 以上，它广泛使用于建筑物的空调、舰艇船舶、航空飞机等舒适系统、生产工艺流程（如矿井以及纺织、精密机械加工、感光胶片、电视显像管车间等）。所需的制冷量一般在几百 kW 到一万 kW 以上。在这些制冷机中使用的制冷剂一般为 R11、R12 或 R22。在制冷量较大的场合，有采用集中供冷的区域性空调，

如美国纽约世界贸易中心大楼在建筑面积为 220 万平方米中, 空调用冷量达 170 多万 kW, 安装有七台单机容量达 24000kW 的离心式制冷机, 每台采用了 5080kW 电机拖动。在制冷量较小的场合, 如在 DC-8 航空飞机上用 R12 为制冷剂的离心式制冷机, 它在蒸发温度为 5°C 冷凝温度为 60°C 的情况下, 制冷量为 50kW, 主轴转速 89500r/min, 用铝合金叶轮, 叶轮直径只有 49.8mm, 叶轮圆周速度为 233m/s, 叶轮重 15.9g。另一台用 R114, 转速为 75000r/min 的制冷机, 其制冷量为 35kW。这两台均用尾气涡轮驱动。空调不仅能提高产品质量, 而且对提高工作人员劳动生产率也是主要措施。据统计, 在夏天设置空调时, 工厂提高工效 25~35%, 办公室可提高 35%。可见空调的意义是重大的, 而离心制冷机又是空调中采用的主要机种。

最近在大型高炉的炼铁过程, 由于从高炉鼓风机压出的空气中, 含有较多的水分, 会使炼铁的焦比增加, 铁的质量也有所降低。现在对进入鼓风机前的空气进行制冷脱湿, 去除水分。例如日本神户制钢所在加古川 No3 高炉上于 1978 年采用了 SRM 型制冷机的制冷脱湿系统, 把大气温度 35°C 时湿度为 26g/Nm³ 的空气经脱湿后降为 6g/Nm³ 再送入高炉, 使焦比降低, 铁的质量提高。由于鼓风机进口温度的降低使功率减少的部分补偿了制冷机所需的功率。

二、低温制冷机组

(一) 在化工流程中, 气体的液化、分离、溶剂的回收、冷却等均需使用巨大的冷量。例如在润滑油脱腊过程使用的氨制冷机, 在年产 200 万吨炼油装置中, 它的参数为两种, 在 -20°C 蒸发时制冷量为 2900kW, -42°C 蒸发时制冷量为 1550kW。氯化乙烯树脂装置使用的丙烯制冷机, 在月产 5 千吨的工厂, 需要制冷量大约 2100~2440kW, 蒸发温度在 -20~-50°C 之间。合成橡胶工厂使用的蒸发温度, 随合成工艺的不同在 0~-110°C 范围内变化, 其最大制冷量可达 70000kW。年产 30 万吨合成氨装置中使用的氨制冷机, 单机容量达 18600kW。它分三档蒸发温度: -33°C、-7.2°C 和 +3.3°C。而在高压聚乙烯装置中, 就使用丙烯和乙烯制冷机, 丙烯的蒸发温度为 -45°C 和 -27°C, 而乙烯则有 -101°C、-70°C 和 -65°C, 随着装置的容量不同, 这种制冷机的制冷量也不同。

(二) 液化天然气(或液化石油气、液化甲烷)工业。天然气为目前世界上主要能源之一, 其主要成分为甲烷。为了使它远距离输送, 可将 600m³ 的天然气液化为 1m³ 的液体。液化有压缩和膨胀法及全冷冻法两种, 以全冷冻法经济性高。在全冷冻液化设备中使温度为 24°C, 压力为 41.7 bar 的天然气, 经过丙烷—乙烯—甲烷三种离心式制冷机的分段冷却, 使甲烷液化, 最终温度达 -162°C。这些机组均由蒸汽轮机驱动, 有的机组最大功率达 2300kW。

(三) 其他使用离心制冷机的场合还有: 啤酒工业、人造干冰、人造冰场、冷冻土壤、低温试验室和大型冷库等。

§ 1-5 国内外离心式制冷机的发展与今后趋向

一、离心式制冷机国外发展水平及趋向

从第一台制冷机于 1922 年开始生产以来, 离心式制冷机已经历了半个世纪的实践与改进, 可以说已达到了相当成熟的地步。目前美国、西德、日本、苏联、英国、瑞士等

国家的产品虽然都有自己的特点，但是归纳起来，他们对一台制冷机的主要要求是：使用方便、维修简单；运转安全可靠；制造成本低、生产周期短；运行费用低、经济指标高。为了达到这些要求，国外各厂所采用的手段大致有以下几个方面：

(一) 产品“三化”

进行产品的系列化、零部件的通用化、标准化的所谓“三化”，可以使制冷机降低成本、减少生产周期、扩大产品使用范围，以较少的零部件满足较大的应用范围的需要，产品质量与工艺要求都容易得到保证。国外各工厂在三化的基础上，对用户提出的新产品，利用电子计算机进行最佳方案的选择，可以得到较好的经济效果。

(二) 机组化

冷水机组已尽可能地机组化，即离心式压缩机、电机、单筒式换热器等辅助设备组装为一体。把整机运至现场后，无需地基，只要接上水、电便可工作。这样几乎完全消除用户的安装调正工作，占地面积也小。

(三) 气动、强度、振动方面的深入研究

大多数工厂目前在气动、强度、振动方面均用电子计算机进行计算。一般采用三元流动叶轮并与扩压器和蜗壳进行最佳化方案选择，使压缩机的等熵效率达到79~83%。

为了确保机器的安全运行，要使零件有足够的强度。由于在转动时叶轮的离心应力一般很大，为了确切知道其应力分布情况，现已采用有限元素法代替过去的二次算法，必要时还需进行应力测定。为了克服键槽的应力集中，许多工厂在轴与叶轮间采用了各种形式的无键连接。

振动方面主要是临界转速 n_{cr} 的计算，过去使用的能量法无法考虑轴承的油膜刚度、叶轮的回转效应以及轴系中各轴相互间的影响，即使对刚支的单轴，高阶临界转速 n_{cr} 的计算也有困难。现在采取普劳尔(Prohl)法用程序计算，可解决能量算法的不足。若工作转速 n 避开临界转速 n_{cr} 时，还要作不平衡响应计算，看振幅是否在许可范围。

(四) 高效换热器的应用以及辅助设施的完善化

提高传热强度，可以减小换热器的尺寸和重量。在冷水机组中，传统的低肋管，其单位面积传热系数的发展已近极限。最近日本日立公司采用了新型的Thermoexcel管，据称可降低换热器的尺寸或重量近30%。对传热强度较低的蒸发器，采用对液体加以搅动的方法可获得较好效果。

辅助设施的日益完善，大大减少运转中的事故。如在半封闭式制冷机中装有蒸发式分油设备，可不断对混入氟里昂中的油进行分离；自动工作的抽气回收装置，及时地排除氟里昂中的空气和水分；采用孔口形式的节流机构代替浮球阀，以保证在高负荷下液体的畅通；在R12制冷机中，普遍采用了泵出设备，它使检修机器时处理制冷剂大为简化，并使损失降至最小。

(五) 采用新结构新工艺

机器中各个关键部分的结构国外许多工厂都作了较大的改进。开启式机器的机械密封，除了双端面形式外，还有中间加自由转动的滑环，以降低动环与静环间相对速度。把机械密封设计成浸在油槽内的形式，可省去专门的停车密封。为了降低联轴节的对中要求，多采用各种形式的挠性联轴节来代替过去的齿式联轴节。在增速传动方面采用了行星齿轮，自定心平行轴人字齿轮，还有用变频器通过高频电机直接传动。以前的调节

叶片多采用齿式传动，容易因锈蚀等原因而卡死，现在大多改用铰接式连杆传动，有的甚至用钢丝绳传动，以保证调节机构的灵活可靠。

工艺上如铝叶轮的低压铸造，钢叶轮的焊接等均达到较新水平。

(六) 实现高度的自动化

国外在自控元件方面早就运用逻辑性能强、体积小、操作稳定、寿命长、精度高的固体集成电路替代热离子管和继电器的电子管电路。为了适应全自动化的要求，安全控制线路的规模与可靠性大大增加，并能显示出故障原因，使错误操作得到避免。

(七) 低噪声化

国外制冷机一般要求噪声在 90 分贝以下，有的公司规定在距制冷机 1 米高、距离机器 1.5 米的平面内，各方向的噪声不超过 85~88 分贝。措施是把产生噪声的齿轮采用各种方法使齿面接触均匀，并采用双层机壳隔绝办法降低噪声指标。

(八) 提高机器及制冷机总能源运行的经济性

最近由于能源问题突出，国外许多公司竞相出现“特别省能量制冷机”。采取的措施有：采用双级制冷循环和过冷；提高传热强度，降低传热温差；用功耗较小的如 R11 制冷剂；采用双级机器及省功器来配合双级循环，并对机器的热力和气动设计采用最佳化计算；改善低负荷下功耗，除用进口导叶调节外还配合改变扩压器宽度调节等方法。

采用电动机拖动的机器，其热效率仅有 20~30%。若对建筑物的照明用电、采暖和制冷空调综合利用能源，可使热效率达到 80% 以上。这种系统一般为使煤气供燃气轮机发电；废气供余热锅炉生产蒸汽使吸收式制冷机制冷，有的可推动蒸汽透平以带动离心式压缩机。

在大型区域性空调中，可采用离心式制冷机与溴化锂制冷机的联合运行得到较高的经济性。有的地方采用蓄冷槽利用夜间廉价电力，而蓄冷槽可使冷量整天使用。

二、离心式制冷机国内发展概况

我国在 1958 年由上海第一冷冻机厂生产了第一台 R11 空调用离心式制冷机，随后又生产了化工用丙烯离心式制冷机。1963 年重庆通用机器厂与西安交通大学自行设计制造了供纺织系统用的 1400kW 冷水机组，以后又发展了许多氟里昂制冷机投入了生产。1973 年以后北京冷冻机厂和重庆通用机器厂试制成供脱腊装置用的氨离心式制冷机。锦西、兰州化工机械厂等生产了高压聚乙烯装置的丙烯和乙烯离心式制冷机。上海冷气机厂、大连冷冻机厂也试制了中小型氟里昂冷水机组。从 1976 年起，我国有关单位一起制定了 R12 空调离心式制冷机系列，其中的 2800kW ($240 \times 10^4 \text{kcal/h}$) 产品在重庆通用机器厂试制成功。在以上介绍的国外先进技术中，国内所生产的产品中许多项目得到应用，也获得满意的结果。全国有不少高等学校中设立了制冷机专业，开设了离心式制冷机的课程，培养了一批技术骨干。在科研单位和工厂中也相应的设立了专门的研究机构。

虽然在 20 多年中我国在离心式制冷机方面做了不少工作，但为了实现四个现代化的需要，目前的技术、制造和生产管理水平还满足不了要求，与国外先进水平相比还存在一些差距。例如：还没有完全形成我国或某个工厂的产品系列，产品数量与质量不能满足日益增长的国民经济建设的需要，科技力量不足，经济管理水平还不适应建设的要求等。相信在党的领导下，全国人民同心同德搞四化建设中，离心式制冷机制造工业也会得到很快发展。