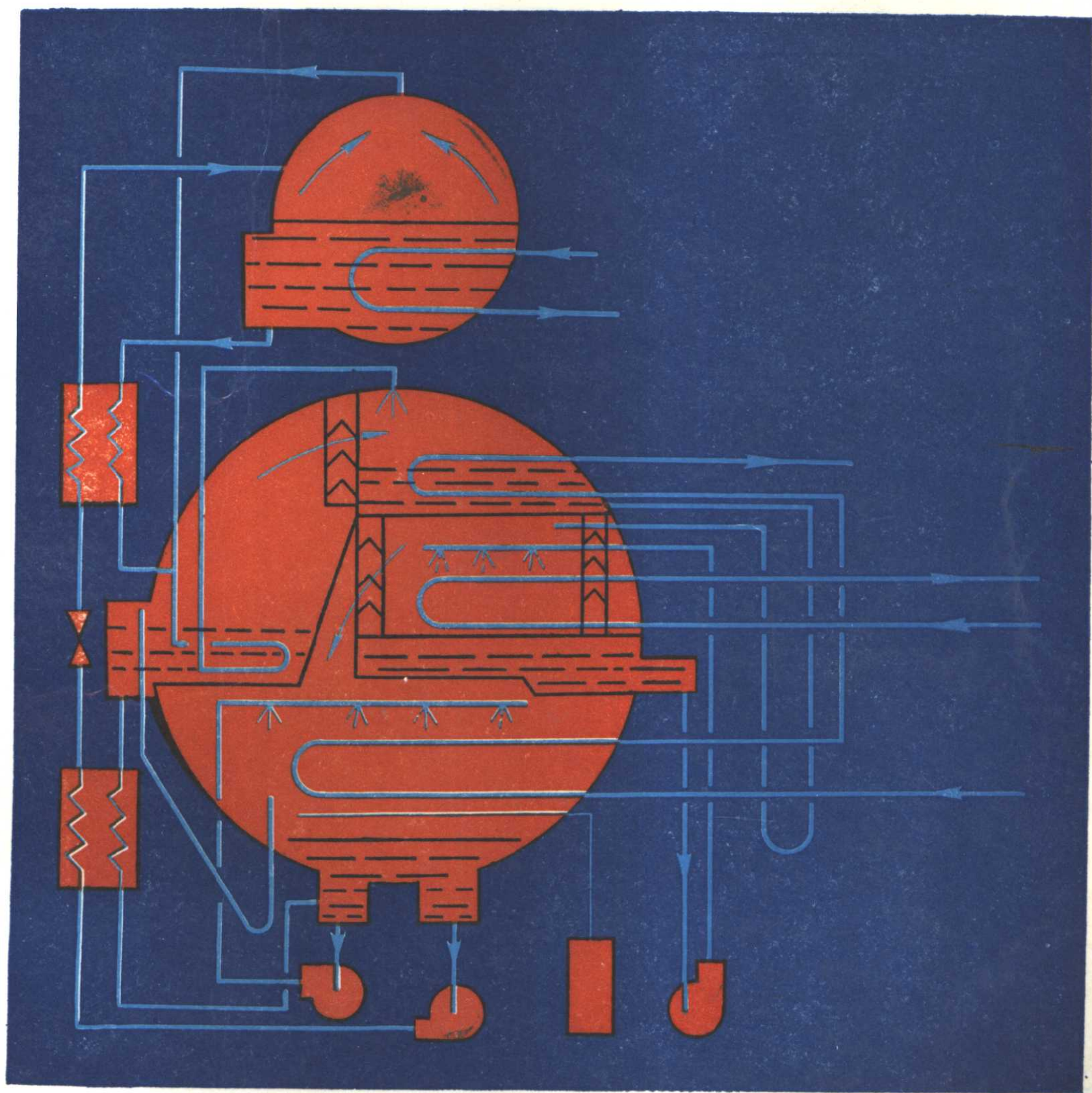


岳孝方 陈汝东 编著

制冷技术与应用

同济大学出版社



制 冷 技 术 与 应 用

岳孝方 陈汝东 编著

同济大学出版社

内 容 提 要

本教材着重阐明了蒸气压缩式制冷的循环原理、设备性能、系统设计、机组特性、制冷技术及其在空调和冷藏方面的应用。对吸收式制冷和系统也作了简明的介绍。书中列出了大量复习思考题和计算题。

本书可供高等院校〈供热与空调〉专业作为教材使用，特别适合函授教学和自学用书。也可供从事制冷技术应用的工程技术人员参考。

责任编辑 冯时庆

封面设计 李志云

制冷技术与应用

岳孝方 陈汝东 编著

同济大学出版社出版

（上海四平路1239号）

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张 18.5 字数：470 千字

1992年1月第1版 1992年1月第1次印刷

印数：1—5400 定价：5.20 元

ISBN7-5608-0863-8/TB·19

前 言

本教材是在总结我校长期来在〈供热与空调〉专业开设“制冷技术”课程的教学经验基础上，广泛吸收校友们的宝贵意见，并结合目前社会实际需要而编写的。

“制冷技术”是一门实践性较强的专业课程，教学上必须重视理论与实践、教学与应用相结合的原则，为此，在本教材中，不但对蒸气压缩式制冷的循环原理、设备性能、系统设计、机组特性作了详尽地阐明，而且对吸收式制冷亦作了一定介绍，特别加强了制冷技术理论及其在空调和冷藏方面的应用，以及实践环节等的基本知识内容。

为了便于自学和检测，本教材每章均列出基本要求和小结；复习思考题；有些章节还布置了作业题和测验作业题；涉及理论计算内容时，均选有典型例题，供读者参阅。

《制冷技术与应用》教材由同济大学热工教研室编写，其中，绪论，第一、三、五、六、七、十一和第八章中的第三节由岳孝方执笔，第二、四、九、十和第八章中的第一、二节由陈汝东执笔。

在本教材的编写和出版过程中，得到我校和函授学院领导以及教研室老师们的关心和支持，绪论中插图由上海轻工业设计院余东宁绘制，谨在此致谢。

由于编者水平所限，时间仓促，书中不足之处恳请读者批评指正，有待日后改正。

编 者

1990年5月写于上海同济大学

《制冷技术与应用》课程函授教学方法的说明

一、课程的性质与任务

《制冷技术与应用》是《供热与通风》和《热能工程》等专业的专业课之一，主要研究用于空气调节工程、冷库工程和生产工艺等场合的制冷设备。

本课程的主要任务是介绍以蒸气压缩式制冷为重点的人工制冷的基本理论、原理和制冷设备的性能、构造；并根据工程需要叙述制冷设备和管道的选择计算方法以及制冷机房的工艺设计等。最后对于溴化锂吸收式制冷的工作原理和运行性能及制冷系统调试和压缩机冷量测试原理也作了较详尽的介绍。

学习本课程时，应注意运用技术基础课（工程热力学、传热学、流体力学及流体机械等）的基本理论对具体问题进行讨论，培养分析问题和解决实际问题的能力。

二、本课程的自学方法

本教材具有便于自学的特点，每一章都按基本要求、内容、小结、复习思考题和作业等顺序来编写。

“基本要求”提出该章需要掌握的基本内容，预先向读者提示本章需要精读的内容。

“小结”主要涉及本章的重要概念、解决问题的主要方法和应注意的问题，帮助读者理顺有关问题。

为了巩固和加深所学到的知识，培养读者分析问题的能力，训练必要的计算技能，读者可通过复习思考题和习题来检查自己对本章内容掌握的程度。

在完成每一阶段的学习后，教材中还安排了测验作业题，这是教师检查函授生在一个阶段中是否完成学习任务的主要依据。函授生可按自学周历表的规定完成测验作业，测验作业必须按时独立完成。

在有条件的地区，结合课程内容，读者可就近安排参观一些制冷设备和制冷系统，做到理论联系实际，加深对教材内容的理解。

函授生将利用假期集中时间进行教学实验。在实验前，要求学员结合实验内容和实验指示书认真预习。在实验时要认真操作，实验后编写好实验报告。

三、学时分配及作业安排的建议

在整个函授教学过程中，应该合理安排各个教学环节。学时分配及作业安排表仅供参考，在具体教学及自学中可根据不同情况，对有关内容和学时分配作必要的调整。

学时分配及作业安排参考表

教学环节 学时分配 课程内容	自学时数	复习思考 题及习题	测验作业	面 授	集 中 教 学		合 计
					复 习 考 试	实 验	
1.蒸气压缩式制冷循环	6	3	3	3			
2.制冷剂与载冷剂	3	1					
3.制冷压缩机	4	3	3	3			
4.冷凝器和蒸发器	4	1					
5.制冷剂的节流机构	2	1					
6.双级和复叠式蒸气压缩式制冷循环	3	1	3				
7.辅助设备和自控装置	2	1					
8.制冷系统	4	3		3			
9.冷藏库制冷工艺设计	6	3					
10.溴化锂吸收式制冷	6	1		3			
11.制冷系统调试和压缩机冷量测试原理	4	1					
12.课程设计							50
	44	19	9	12	24	4	162

目 录

绪论	(1)
第一章 蒸气压缩式制冷循环	(6)
第一节 逆向可逆循环	(6)
第二节 理论制冷循环	(10)
第三节 液体过冷和吸气过热对制冷循环的影响	(13)
第四节 理论制冷循环的热力计算	(15)
第二章 制冷剂和载冷剂	(22)
第一节 制冷剂	(22)
第二节 载冷剂	(33)
第三章 制冷压缩机	(39)
第一节 活塞式制冷压缩机的构造	(39)
第二节 活塞式制冷压缩机的运行性能	(48)
第三节 螺杆式制冷压缩机	(60)
第四节 偏心滚动转子式和涡旋式制冷压缩机	(63)
第五节 离心式制冷压缩机	(65)
第四章 冷凝器和蒸发器	(69)
第一节 冷凝器	(69)
第二节 冷凝器的选择计算	(72)
第三节 蒸发器	(79)
第四节 蒸发器的选择计算	(83)
第五章 制冷剂的节流机构	(91)
第一节 手动和浮球调节阀	(91)
第二节 热力膨胀阀和热电膨胀阀	(92)
第三节 毛细管	(96)
第六章 双级和复叠式蒸气压缩制冷循环	(100)
第一节 双级蒸气压缩式制冷循环	(101)
第二节 带有经济器(省功器)的压缩式制冷循环	(106)
第三节 复叠式蒸气压缩制冷循环	(109)
第七章 辅助设备和自控装置	(114)
第一节 辅助设备	(114)
第二节 自控装置	(120)
第八章 制冷系统	(129)
第一节 制冷设备的选择和制冷机房的布置	(129)
第二节 制冷剂管道的设计	(135)

第三节 制冷机组..... (147)

第九章 冷藏库制冷工艺设计..... (174)

第一节 冷藏库概述..... (174)

第二节 冷藏库制冷系统和冷却方式..... (181)

第三节 库房耗冷量计算..... (189)

第四节 制冷压缩机和辅助设备的选型计算..... (204)

第五节 其他型式的冷藏库..... (211)

第十章 溴化锂吸收式制冷..... (215)

第一节 溴化锂吸收式制冷机的工作原理..... (215)

第二节 溴化锂吸收式制冷机的热工计算..... (224)

第三节 溴化锂吸收式制冷机的性能..... (233)

第四节 其他型式的溴化锂吸收式制冷机..... (237)

第十一章 制冷系统调试和压缩机冷量测试原理..... (243)

第一节 制冷系统调试..... (243)

第二节 制冷压缩机的冷量试验原理..... (253)

附录..... (265)

主要参考文献..... (269)

绪 论

制冷技术是使某一空间或物体的温度降低到低于周围环境温度，并保持在规定低温状态的一门科学技术，它随着人们对低温条件的要求和社会生产力的提高而不断发展。

一、天然冷源的应用

人类早就应用天然冷源来降温 and 储藏食品。公元前 5 世纪，埃及人就在尼罗河谷地把盛水陶罐放在屋顶上，利用地面对空间的辐射使水结冰。3000 多年前，埃及有一幅壁画上画了一个奴隶在盛水土罐前挥动扇子使多孔土罐中的水加速蒸发，以获得较低温度的水。我国劳动人民也早已懂得利用天然冰冷藏食品和防暑降温，〈诗经〉就有“二之日凿冰冲冲，三之日纳于凌阴”的诗句记载。古代人获得和利用天然冷源的简单操作 实际上完全符合现代热工理论的基本知识，为后来出现人工制冷奠定了基础。

自 19 世纪末开始，人工制冷（机械制冷）逐步进入使用阶段，并迅速得到发展，天然冷源的应用也就逐渐减少。但是人工制冷需要消耗能源，制冷技术的迅速发展，必然造成制冷能耗的大量增加。目前，由于世界范围内的能源紧缺，如何有效地利用和开发天然冷源，又日益受到重视。

天然冷源主要是指冬季储藏的天然冰和夏季使用的深井水。

1[kg]冰融化时，约可吸收 334[kJ]的热量，而且可使物品保持在接近 0[°C]的低温。当然，天然冰的采集、运输、储存比较麻烦，但可以节省制冷能耗，价格也较低，在有条件的地区，仍然可以考虑使用。

在夏季，深井水温低于环境温度，可以用来防暑降温，或者作为空调冷源使用。深井水特别适用于夏季室内空调温度和湿度要求不是很低，而冷量却很大的场合，例如，纺织厂的纺纱、织布等车间。但是，深井水的大量抽汲和使用，不但可能使井水枯竭，而且可能使地层下沉，上海地区深井水位和地层的变化就充分证明了上述论点。自 1921~1967 年，上海市区地层下沉最严重的地方已超过 2[m]，而且深井水位逐年下降。为了解决这一矛盾，自 1967 年开始，对深井水采用“冬灌夏用”，即冬季向深井中灌入环境温度条件下的低温自来水，夏季再抽汲出来作为空调冷源使用。而且对每口井的充灌和抽汲量作了规定，逐步形成了一套深井水的充灌技术。由于采取了这些有效措施，近几年，上海地层下沉现象基本上得到了控制，而且使夏季应用的深井水平均温度较原来的天然深井水温有所降低。深井水的“冬灌夏用”方法，具有明显的节能意义，得到了许多国家重视。

天然冷源虽然具有较高的省能性和经济性，但是，它的数量和温度毕竟有一定限度，使用也有一定条件。随着社会生产力的不断发展和人民生活水平的日趋提高，用冷范围日益广泛，对温度要求也越来越低，天然冷源已远不能满足社会发展的要求。

二、机械制冷的发展

1748 年，苏格兰科学家库伦(Cullen)观察到乙醚的蒸发会引起温度下降，1755 年，他又

在真空罩下制得了少量冰，同时发表了《液体蒸发制冷》论文。因此，人们通常把1755年作为人工制冷史的起点。从此以后，经过许多科学家的努力和热力学理论的发展，人工制冷技术逐步开始进入应用阶段。其中应该提到的是德国人林德（Linde），他于1875年首先制作了具有实用价值的氨压缩式制冷装置，直至今日，蒸气压缩式制冷仍然是使用范围最广泛的一种制冷方法。

在蒸气压缩式制冷方法出现和发展期间，其他制冷方法也相继出现和不断发展，例如吸收式制冷和蒸气喷射式制冷。这两种制冷方法的机理和蒸气压缩式相同，都是利用液体在一定压力下气化吸热，从而产生制冷效应，区别在于促使工质（制冷剂）进行循环的方式不同。

1834年，法国人珀尔帖（Peltier）发现用两种不同金属组成环路，若通入直流电源，两金属接点处会出现一定温差。当一个接点保持环境温度时，则另一个接点会低于环境温度，从而出现冷效应。珀尔帖效应是塞贝克（Seebeck）的逆效应，它是由于两种不同金属节点的电位差产生的：当直流电由高电位的金属流入低电位时，其减少的能量在接点处以热量形式向外放出；而电流由低电位的金属流入高电位时，在接点处从外界吸收能量（热量），因此该接点温度就低于环境温度，这种制冷方法通常称为热电制冷。但由于当时条件所限，热电制冷尚不具备实用价值，直到本世纪初，由于半导体材料的出现，才使热电制冷逐步进入应用阶段，所以热电制冷也被称为半导体制冷。

另外，利用气体绝热膨胀以及固体绝热去磁法，也可以获得很低的温度。

应该指出，各种制冷方法均有其自身的特点和适用范围，直至今日，没有一种制冷方法，在低于环境温度直到接近绝对零度的制冷区间内，能始终保持着最佳的制冷效果。因此，不同的制冷区间应选用不同的制冷方法。

目前，根据低温的温度要求，通常把制冷范围分为三个区间，即

普通制冷范围（简称“普冷”）：低于环境温度—— $-120[^\circ\text{C}]$ （ $153[\text{K}]$ ）。

深度制冷范围（简称“深冷”）： $-120\sim-253[^\circ\text{C}]$ （ $153\sim20[\text{K}]$ ）。

低温制冷范围： $-253\sim$ 接近 $-273[^\circ\text{C}]$ （ $20\sim$ 接近 $0[\text{K}]$ ）

不同的制冷范围，选用不同的制冷方法。在空调和食品冷藏，以及一般所要求的用冷温度，均属于普冷范围，使用最广泛的制冷方法是液体气化法。

目前，利用液体气化法制冷的装置主要有两种，即蒸气压缩式制冷装置和吸收式制冷装置。这些装置正沿着系列化、标准化、机组化、自动化和省能化的方向发展。

三、制冷技术的应用

在现代社会中，制冷技术的应用已涉及到国民经济的各个部门以及人们的日常生活，现就其主要应用方面介绍如下：

1. 空气调节

制冷装置可以用来降低空气的温度和含湿量，从而使空气的温、湿度得到调节。空气调节根据其使用场合的不同，分为两种形式：

1) 舒适性空调。这种空调的目的主要是满足人们工作和生活对环境温、湿度的要求。如高温车间降温，医院、会堂、影剧场、宾馆、住宅以及各种交通工具，如汽车、火车、轮船和飞机内的空气调节等。

2) 工艺性空调。这种空调的目的主要是为了满足生产工艺和检测等对环境温、湿度的要求。如纺织、印刷、电子元件、光学仪器、精密机床等车间和检测、计量室等。这类空调所需要的温、湿度必需根据工艺要求确定，而且有时要求具有高精度的空调参数，才能保证产品质量和测试数据的正确性。

图0.1展示了高层宾馆中的制冷、空调系统。在该系统中，首先用制冷装置(冷水机组)制得 $5\sim7[^\circ\text{C}]$ 的低温冷冻水，然后通过水泵把冷冻水送入各个客房中的风机盘管，在盘管中与室内空气进行热交换，使空气降温、去湿，在夏季，室内就能保持舒适的温、湿度环境。

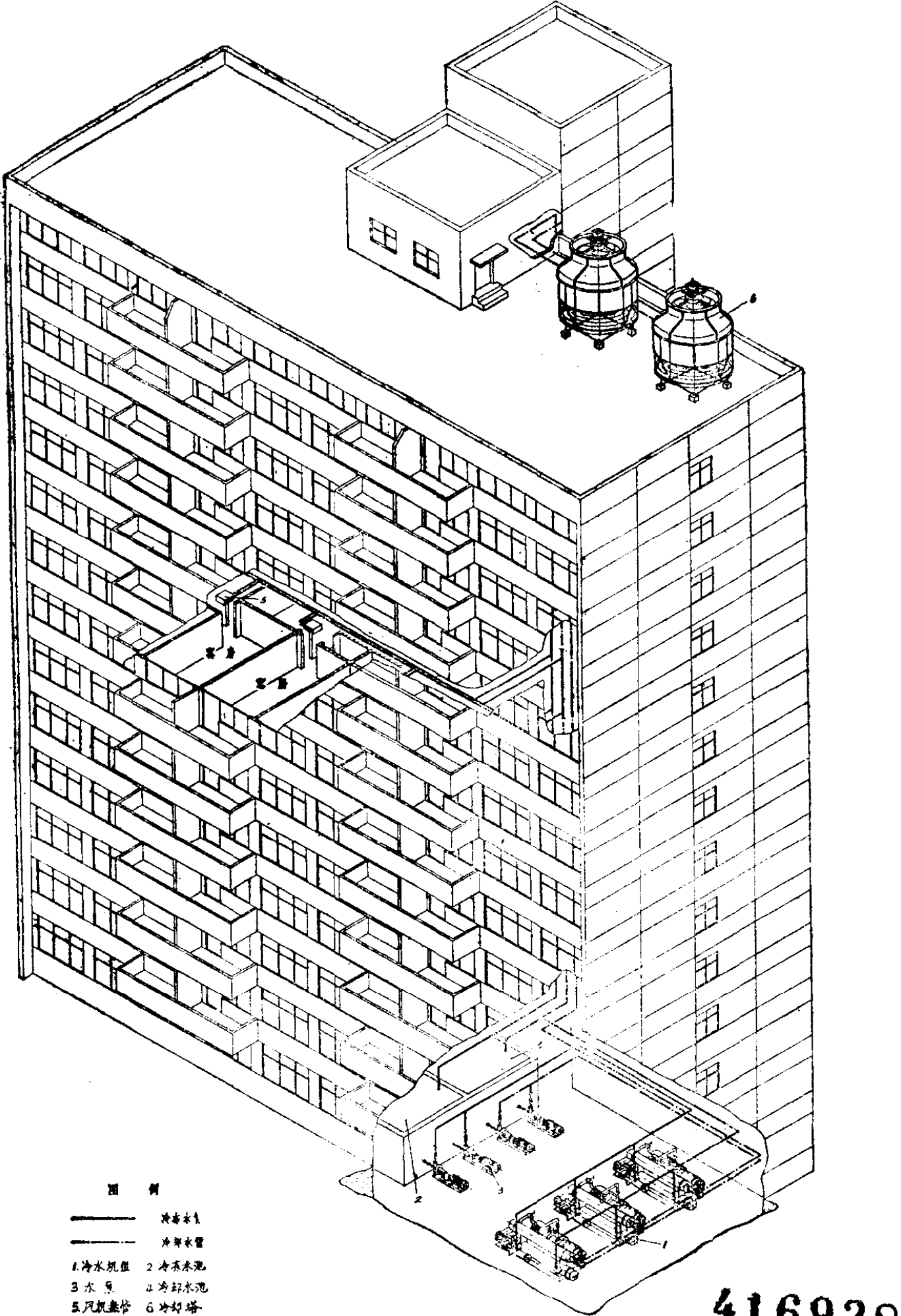


图 0.1 高层建筑制冷、空调系统图

416928

2. 食品冷藏

蔬菜、水果、鲜蛋等的低温保鲜储存，肉、鱼、禽类等食品的冻结、冷藏，以防食品变质和平衡食品的季节性生产与全年耗用之间的矛盾，均需制冷装置提供冷源。

另外，食品在运输、销售，以及在单位和家庭存放期间，也应保持合适的低温条件。因此，冷藏运输工具，如冷藏汽车、火车、冷藏船，冷藏集装箱，以及冷藏商品陈列柜、厨房冰箱和家用电冰箱等冷藏设备都在大力发展和推广应用。

图 0.2 展示了小型冷藏库的制冷系统以及各个库房情况。制冷装置运行时，就能使各个库房保持在所要求的低温温度内。冻结间的温度通常在 $-23\sim-30[^\circ\text{C}]$ ，使进库的食品在一定时间内冻结。冷藏间的温度通常按冷藏食品的种类和时间确定，当冷藏冻结食品时，一般为 $-18\sim-25[^\circ\text{C}]$ 。高温间的温度约为 $0[^\circ\text{C}]$ 左右，主要存放鲜蛋和果蔬类食品。

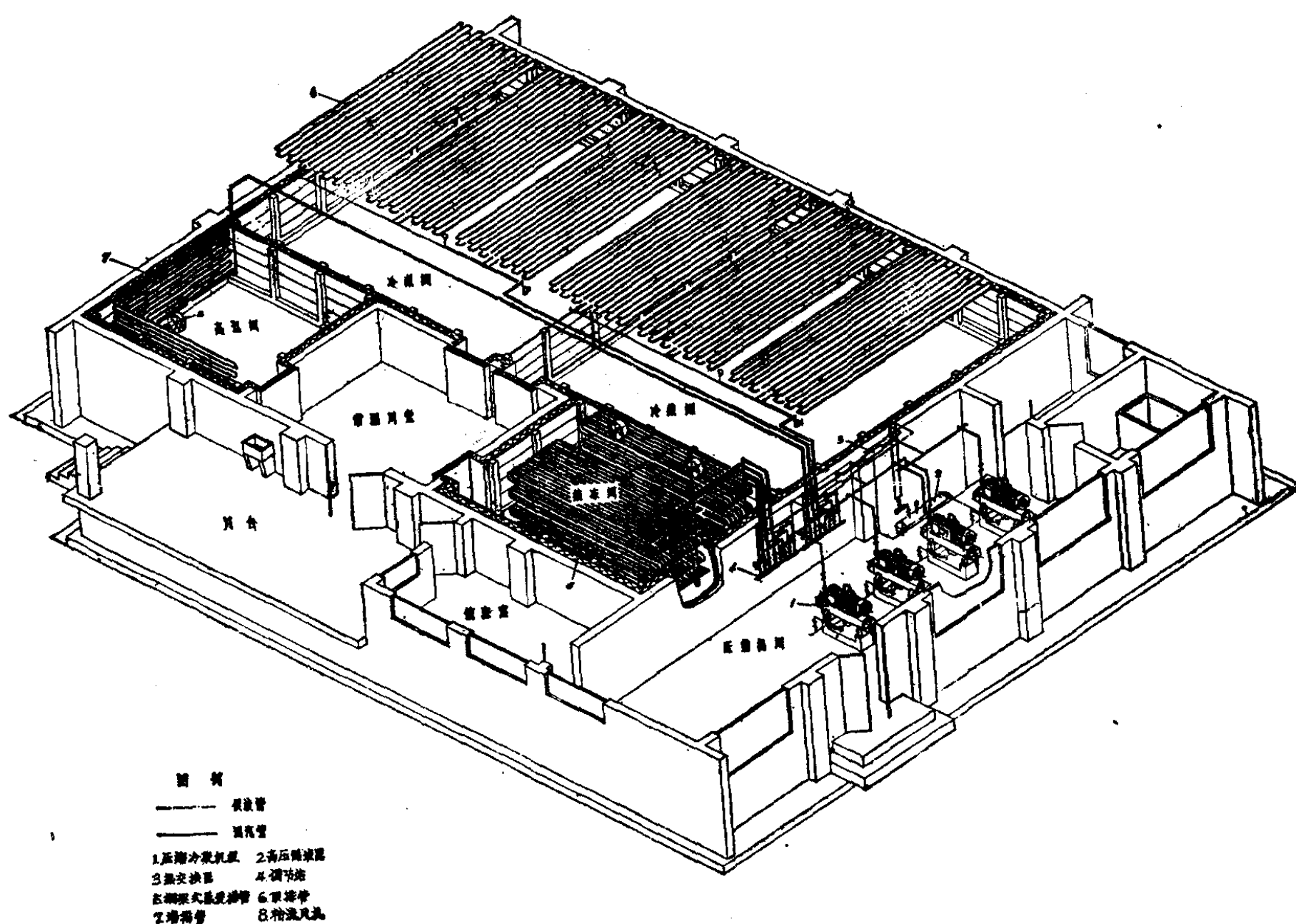


图 0.2 小型冷库制冷系统及其库房分布

3. 生产工艺

某些产品，例如合成橡胶、合成纤维、气体液化、石油裂解和脱脂，以及许多化工原料的提取都需要利用制冷装置为其提供所要求的低温工艺条件，才能保证生产过程顺利进行。

另外，制冷技术在国防工业，航天技术，医疗卫生，科学研究以及农牧业等方面也有许多重要应用，制冷技术为各种使用目的提供了许多专用低温设备。

自进入80年代以来，我国的国民经济和人民生活水平有了很大提高，制冷和空调行业也

得到了迅速发展，各类产品的年产量从1978年的4万台套激增到1988年的790万台套（其中包括家用电冰箱758万台和各种空调器20万台）。截止1988年底，我国制冷与空调器的社会拥有量约为2000万台套，是1981年社会拥有量的40倍。

制冷与空调设备的大量应用，必然造成能源的大量消耗。据估计，1982年我国制冷与空调设备的耗电量约为108亿度，平均占全国总发电量的3.5%（夏季高峰期，约占季节发电量的7%）。而1988年耗电量达300亿度，平均占全国总发电量的5.5%（夏季占季节发电量的18~20%）。从1982~1988年的7年中，耗电量平均以每年17%的速度递增。

一些经济发达国家，制冷与空调的能耗量约占全年总能耗量的20~30%。

制冷与空调设备的大量应用，造成能源的惊人消耗，因此，节省制冷能耗，开发和利用天然冷源，将是制冷与空调技术领域永恒的研究课题。

还应指出，自本世纪40年代开始，由于氟利昂（饱和烃类的卤素衍生物）制冷剂的出现和大量应用，曾使压缩式制冷技术及其应用范围得到了极大发展，特别是在空调制冷和中小型低温制冷领域中，几乎全部采用了这类制冷剂。但是，近十几年的研究证明，氟利昂族中的含氯而无氢的氟化碳（简称CFC）能严重地破坏大气中的臭氧以及地球高空的臭氧层，从而增强了太阳对地面的紫外线辐射强度。据预测，臭氧减少1%，紫外线辐射量将增加2%，而紫外线辐射量的增加，将促使人体的某种病患（如皮肤癌、白内障等）增多，加剧温室效应，以及危害地球上的许多生物，破坏生态平衡。有人提出，臭氧层减少到原来的1/5，将是地球存亡的临界点。因此减少和禁用CFC的使用和生产已成为当今国际社会共同保护人类生态环境所面临的紧迫任务，研究和寻求CFC制冷剂的替代物也成为急需解决的问题。但是，也可以预计，随着CFC甚至其他制冷剂的逐步禁用，新的制冷剂甚至新的制冷方法终将出现，制冷技术也将必定会得到更进一步的发展。

第一章 蒸气压缩式制冷循环

由热力学实验知道，任何液体在沸腾过程中将要吸收热量，液体的沸腾温度（即饱和温度）和吸热量随液体所处的压力而变化，压力越低，沸腾温度也越低。例如，1[kg] 氟利昂 22 液体，在 0.584[MPa] 压力时，其沸腾温度为 5[°C]，吸热量为 200.62[kJ/kg]（单位质量气化潜热）。当压力为 0.296[MPa] 时，其沸腾温度降为 -15[°C]，吸热量变为 211.00[kJ/kg]。而且不同液体的饱和压力、沸腾温度和吸热量也各不相同。因此，只要根据所用制冷液体（称制冷剂）的热力性质，创造一定的压力条件，就可以在一定范围内获得所要求的低温。在实际用冷场合，需要连续和稳定地获得冷量，它不可能让制冷剂一次气化制冷后即放入大气，这不但造成极大的浪费，而且污染环境。为此，必须使气化吸热后的制冷剂蒸气全部重新回复到原来的液体状态，然后才能再次用来制冷。制冷剂经过一系列的状态变化后重新回复到它的初态，称为制冷循环。显然，要实现制冷循环必须要有一定的设备，而且要以消耗能量作为补偿。蒸气压缩式制冷循环就是用压缩机等设备，以消耗机械功作为补偿，对制冷剂的状态进行循环变化，从而使用冷场合获得连续和稳定的冷量及低温。

研究蒸气压缩式制冷循环的主要目的，是为了分析影响制冷循环的各种因素，寻求节省制冷能耗的途径。

基本要求

- (1) 熟悉逆卡诺和具有温差的逆卡诺循环的特殊性及其理论和实践价值。
- (2) 掌握变温热源逆向循环的特点及其对制冷工质的要求。
- (3) 熟悉影响理论制冷循环性能的各种因素。
- (4) 牢固掌握理论制冷循环热力计算方法。

第一节 逆向可逆循环

在热力学中已经介绍，工质循环有两种方式：一种是正向循环，它是使高温热源的工质通过动力装置对外做功，然后再流向低温热源（图 1.1a），亦称动力循环；另一种是逆向循环，它是使工质（制冷剂）在吸收低温热源的热量后通过制冷装置，并以外功作补偿，然后流向高温热源（图 1.1b）制冷循环就是按逆向循环进行的。

逆向循环又分为可逆和不可逆两种。可逆循环是一种理想循环，它不考虑工质在流动和状态变化过程中的各种损失。如果在工质循环过程中考虑了上述各种损失，即为不可逆循环。在制冷循环中，不

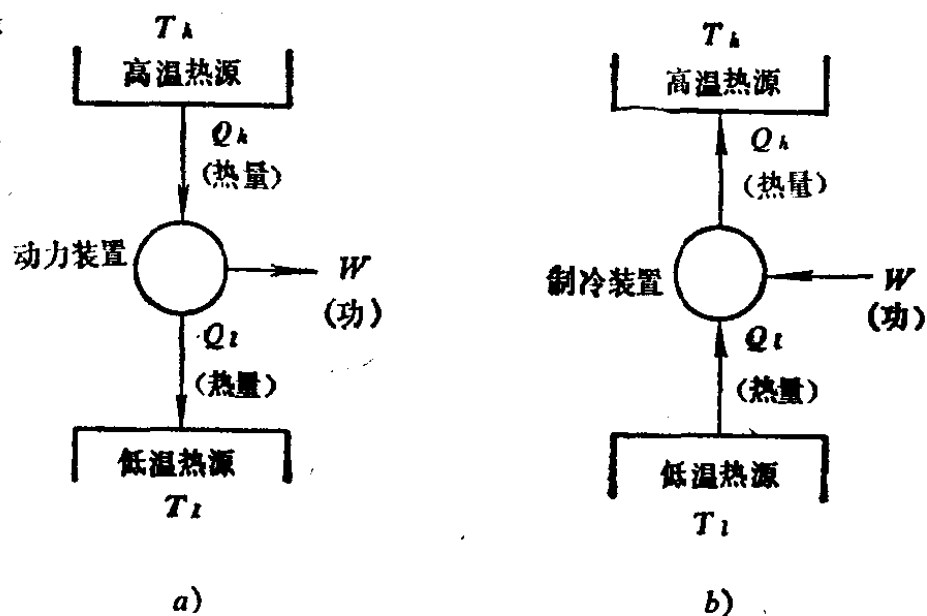


图 1.1 动力装置和制冷装置工作原理比较

可逆损失主要来自两方面：即制冷剂在流动和状态变化时因内部摩擦，不平衡等引起的内部不可逆损失，以及冷凝器、蒸发器等换热器存在传热温差的外部不可逆损失。为了逐步熟悉和掌握影响制冷循环的各种因素，并寻求热力学上最完善的制冷循环，首先介绍逆卡诺循环。

一、逆卡诺循环

逆卡诺循环是可逆的理想制冷循环，它不考虑工质在流动和状态变化过程中的内部和外部不可逆损失。虽然逆卡诺循环无法实现，但是通过该循环的分析所得出的结论对实际制冷循环具有重要的指导意义。

利用液体气化制冷的逆卡诺循环必须具备的条件是：高、低温热源温度恒定；工质在冷凝器和蒸发器中与外界热源之间无传热温差；工质流经各个设备时无内部不可逆损失；作为实现逆卡诺循环的必要设备是压缩机、冷凝器、膨胀机和蒸发器。工质按逆卡诺循环过程以及这些过程在 T - S 图上的表示如图 1.2 所示。

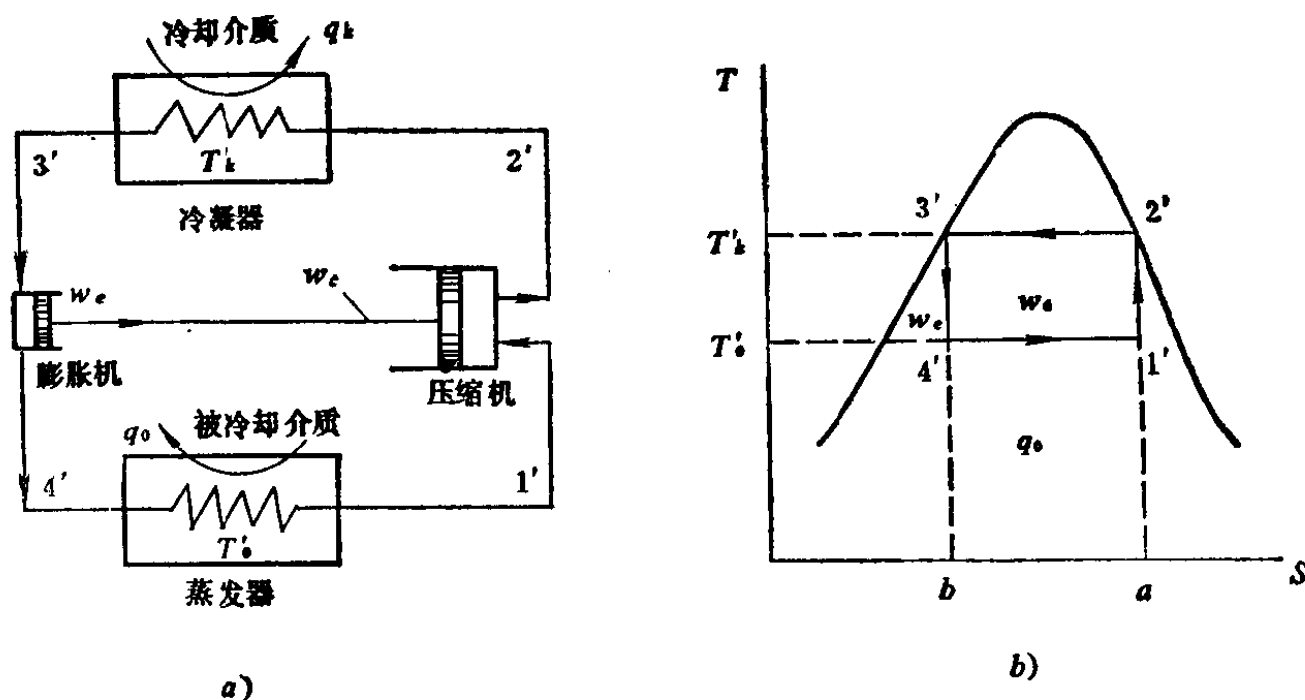


图 1.2 逆卡诺循环过程

由图 1.2 可知，制冷剂按逆卡诺循环的四个热力过程为：

绝热压缩过程 $1'-2'$ ，制冷剂的温度由 T_0 升至 T_k ，外界输入功 w ；

等温冷凝过程 $2'-3'$ ，制冷剂在等温 T_k 向高温热源放出热量 q'_k ；

绝热膨胀过程 $3'-4'$ ，制冷剂的温度由 T_k 降至 T_0 ，膨胀机输出功 w_e ，并为压缩机所利用；

等温蒸发过程 $4'-1'$ ，制冷剂在等温 T_0 吸收低温热源中的热量 q'_0 。

这样，1[kg]制冷剂在每一次循环中从低温热源吸收的热量为

$$q'_0 = T'_0(S_a - S_b) \quad [\text{kJ/kg}]$$

向高温热源放出的热量为

$$q'_k = T'_k(S_a - S_b) \quad [\text{kJ/kg}]$$

外界输入压缩机的功为

$$w_c = w - w_e = q'_k - q'_0 = (T'_k - T'_0)(S_a - S_b) \quad [\text{kJ/kg}]$$

制冷循环常用制冷系数 ε （即 COP Coefficient of Performance）表示它的循环经济性能，制冷系数等于单位耗功量所制得的冷量，对于逆卡诺循环而言

$$\varepsilon_c = \frac{q'_0}{W_c} = \frac{T'_0(S_a - S_b)}{(T'_k - T'_0)(S_a - S_b)} = \frac{T'_0}{T'_k - T'_0} \quad (1.1)$$

从公式(1.1)可知, 逆卡诺循环的制冷系数 ε_c 仅与高、低温热源温度有关, 而与制冷剂的热物理性能无关。当 T'_0 升高, T'_k 降低时, ε_c 增大, 这意味着单位耗功量所能制取的冷量增加, 提高了制冷循环的经济性。求公式(1.1)两个偏导数的绝对值

$$\left| \left(\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial T'_k} \right) \right| = \frac{T'_0}{(T'_k - T'_0)^2}$$

$$\left| \left(\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial T'_0} \right) \right| = \frac{T'_k}{(T'_k - T'_0)^2}$$

由于

$$T'_k > T'_0$$

所以

$$\left| \left(\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial T'_0} \right) \right| > \left| \left(\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial T'_k} \right) \right| \quad (1.2)$$

公式(1.2)告知, T'_0 与 T'_k 对制冷系数 ε_c 的影响不是等价的, T'_0 的影响大于 T'_k 。

由于逆卡诺循环不考虑各种损失, 而且压缩机利用了膨胀机对外输出的功, 因此, 在恒定的高、低温热源区间, 逆卡诺循环的制冷系数 ε_c 最大, 在该温度区间内进行的其他各种制冷循环的制冷系数均小于 ε_c , 所以逆卡诺循环制冷系数可用来评价其他制冷循环的热力完善程度。

如果在逆卡诺循环中考虑冷凝器和蒸发器的传热温差(外部不可逆)各为 ΔT_k 和 ΔT_0 (见图1.3), 则该循环多消耗的功可用面积2'233'2'和11'4'41表示, 减少的制冷量为面积11'4'41。同理可得具有传热温差的逆卡诺循环制冷系数 ε'_c 为

$$\varepsilon'_c = \frac{T_0}{T_k - T_0} = \frac{T'_0 - \Delta T_0}{(T'_k - T'_0) + (\Delta T_k + \Delta T_0)} \quad (1.3)$$

显然 $\varepsilon'_c < \varepsilon_c$, 这表明具有传热温差的不可逆循环的制冷系数, 总小于相同热源温度时的逆卡诺循环制冷系数,

而且随传热温差 ΔT_k 和 ΔT_0 的增大而降低。同时, 从图1.3和公式(1.3)可知, 蒸发器传热温差 ΔT_0 对制冷系数 ε'_c 的影响将大于冷凝器传热温差 ΔT_k 。一切实际制冷循环均为不可逆循环, 因此实际循环的制冷系数总小于相同热源温度时的逆卡诺循环制冷系数。相同热源温度时这两种循环制冷系数的比值, 可用来表示实际循环的热力完善度。

即

$$\eta = \frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon_c}$$

显然, 热力完善度恒小于1, 它的大小反映实际制冷循环接近逆卡诺循环的程度。

为了进一步理解高、低温热源温度 $t'_k(T'_k)$ 、 $t'_0(T'_0)$ 和冷凝器、蒸发器的传热温差 Δt_k 、 Δt_0 (ΔT_0)对制冷系数的影响, 以及采用制冷系数和热力完善度评价制冷循环经济性的条件现举例计算, 并将计算结果列入表1.1, 供分析。

应当指出, 无论是逆卡诺循环或是仅考虑传热温差的逆卡诺循环, 仍然是无法实现的制冷循环, 实际制冷循环还存在其他各种损失。但是, 从表1.1分析中得出的结论且极为重要, 对所有压缩式制冷循环均具有指导意义, 因此, 要使实际制冷装置省能运行, 必须充分

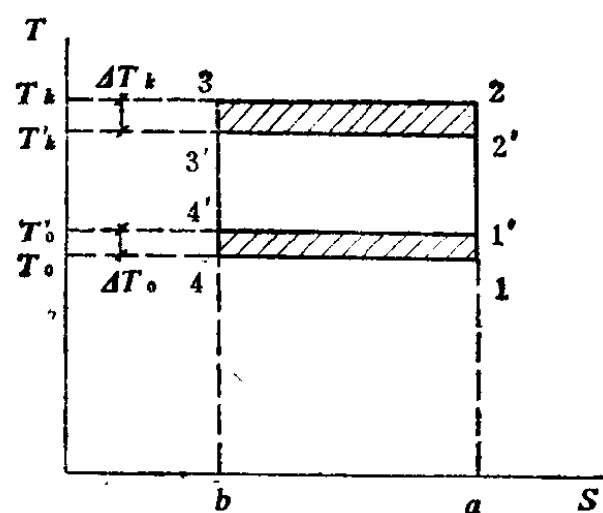


图 1.3 具有传热温差的逆卡诺循环

高、低温热源温度和传热温差对制冷系数和热力完善度的影响

表 1.1

高温热源温度 $t'_k [^{\circ}\text{C}]$	低温热源温度 $t'_0 [^{\circ}\text{C}]$	冷凝器 $\Delta t_k [^{\circ}\text{C}]$	蒸发器 $\Delta t_0 [^{\circ}\text{C}]$	逆卡诺循环 ε_c	有温差的逆卡诺循环 ε'_c	热力完善度 $\eta = \frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon_c}$	说 明
30	-5	0	0	7.66	7.66	1	制冷系数 ε_c 随 t'_k 和 t'_0 变化, 而且 t'_0 对 ε_c 的影响大于 t'_k 。由于制冷循环的 t'_k 或 t'_0 不相等, ε_c 不能反映循环的热力完善度 η , 两者不等价
40	-5	0	0	5.96	5.96	1	
40	+5	0	0	7.94	7.94	1	
40	+5	0	0	7.94	7.94	1	当 t'_k 和 t'_0 恒定时, ε'_c 和 η 随 Δt_k 和 Δt_0 变化, 而且 Δt_0 对 ε'_c 和 η 的影响大于 Δt_k 。 ε'_c 的大小能反映循环的热力完善度 η , 两者等价
		5	5		6.07	0.76	
		10	10		4.87	0.61	
		10	5		5.46	0.69	

认识和严格遵循上述原则, 这就是详细分析逆卡诺循环的主要目的。

二、变温热源的逆向循环

在制冷装置的实际运行中, 高温热源 (冷却介质) 和低温热源 (被冷却介质) 的温度通常是在不断变化的, 例如, 冷凝器中的冷却水 (或空气) 的温度是逐步升高, 而被冷却介质 (水、空气或各种物质) 的温度是逐步降低 (图 1.4)。由于制冷剂在冷凝器和蒸发器中保持等温冷凝 (T_k) 和蒸发 (T_0), 这样就增大了制冷剂与介质之间的传热温差, 使循环的不可逆损失增加, 制冷系数和热力完善度下降。

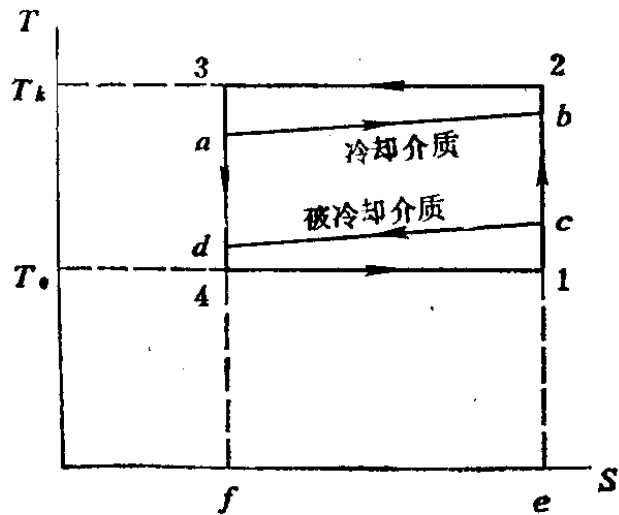


图 1.4 恒温热源逆向循环

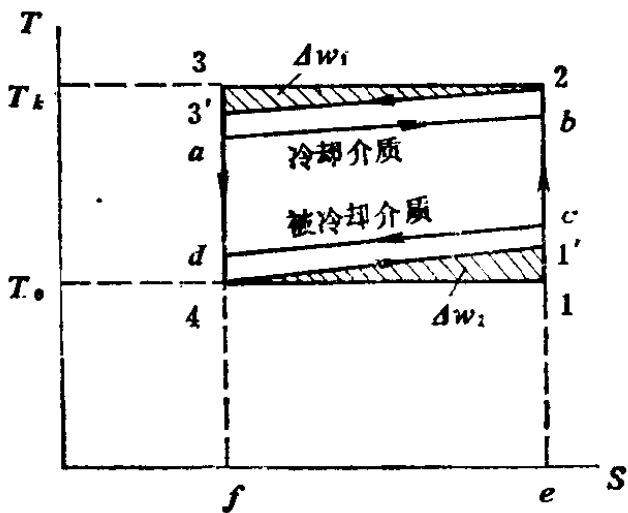


图 1.5 变温热源逆向循环

为了减少不可逆传热所引起的能量损失, 制冷剂与冷却和被冷却介质之间必须保持最小的传热温差, 并且所有各点应保持定值。通常情况下, 冷却与被冷却介质在冷凝器和蒸发器的进出口处温度固定不变, 因此形成制冷剂与介质流线等温差的唯一办法是变更制冷剂在等压冷凝和蒸发过程中的温度, 即冷凝和蒸发过程在一个温度范围内变温进行 (图1.5)。由图1.5可知, 当冷却介质的温度由 T_0 升至 T_b , 被冷却介质的温度由 T_c 降至 T_d 时, 制冷剂的冷