

REFRIGERATION

高等职业教育制冷技术系列规划教材

# 制冷原理

陈 军 主编  
徐 杰 高南岗 副主编

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

高等职业教育制冷技术系列规划教材

# 制 冷 原 理

陈 军 主 编

徐 杰 高南岗 副主编

電 子 工 業 出 版 社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书比较全面地讲述了热力学原理, 制冷剂的分类、性质, 各种制冷方法, 制冷循环及制冷机特性的理论分析和计算, 制冷设备的功能、工作原理、特性、结构特点及设计计算。书中的内容以目前广泛使用的蒸气压缩式制冷机为重点, 并较为详细地介绍了吸收式制冷的原理和设计计算, 还对热泵技术在节能方面的应用做了一些介绍, 并引入了近年来国内外制冷技术领域中的—些科研成果。文中附有大量的图表, 力图使读者从理论和实践两个方面掌握这门技术。

本书可供高职高专制冷与空调专业作为专业课教材使用, 也可供从事制冷、空调工作的工程技术人员自学和参考。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有, 侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

制冷原理 / 陈军主编. —北京: 电子工业出版社, 2008.3

(高等职业教育制冷技术系列规划教材)

ISBN 978-7-121-06006-9

I. 制… II. 陈… III. ①制冷—理论—高等学校: 技术学校—教材 IV. TB61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 018181 号

策划编辑: 程超群

责任编辑: 韩玲玲

印 刷: 北京市顺义兴华印刷厂

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 14 字数: 358 千字

印 次: 2008 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 21.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

改革开放以来,随着国民经济的迅速发展和人们生活水平的不断提高,制冷技术和设备的应用日益普遍。进入 21 世纪以来,我国和世界制冷事业的发展更是一日千里,不但制冷空调工业已经成为我国的支柱产业,而且制冷设备的应用也已深入到工业生产、人民生活、科学研究和国防设施的各个方面和部门。

面对制冷设备的大量推广和应用,需要培养一大批管理人员、操作人员和维护人员,他们必须具备制冷设备的基础知识、制冷设备管理和操作的技能。本书就是依据制冷与空气调节工程等专业培养高职高专层次人才的需要,按照《制冷原理》课程教学基本要求编写的。本书编写从实际出发,针对高等职业教育的特点,既注重加强理论教学,又兼顾基本性能的训练。在编写时,力求做到内容精练,叙述清楚,文字通俗易懂。为了加强理解,培养分析问题和解决问题的能力,本书各章均配有习题。

本书全部学习约需 70 课时,但在教学中可根据要求不同,对教材内容进行取舍。本教材还可供中等职业学校、函授、电大等相近相关专业的师生使用。

本书的第 1、2 章和第 8 章由承德石油高等专科学校陈军编写,并担任本书主编;第 3 章由深圳技师学院高南岗编写,并担任本书副主编;第 4 章由承德石油高等专科学校胡凯编写;第 5 章由武汉船舶职业技术学院徐杰编写,并担任本书副主编;第 6 章由辽阳职业技术学院张淼编写;第 7 章由大家共同编写。

在编写过程中,我们参考了国内外大量的最新技术、研究成果和以往出版的一些教材,在此对本书参考文献中的作者以及给予编者大力支持和帮助的同志表示衷心的感谢。由于编者的业务水平和实践经验所限,教材中可能存在这样或那样的差错,恳请同行专家和广大读者予以批评指正。

# 目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 本课程的研究对象	(1)
1.1.2 本课程的学习目的	(2)
1.2 制冷技术发展概况	(2)
1.2.1 制冷体系的划分	(2)
1.2.2 制冷的发展简史	(2)
1.3 制冷技术在各行各业中的应用	(3)
1.3.1 食品工程	(3)
1.3.2 医药卫生事业	(4)
1.3.3 机械、轻工业和精密仪表电子工业	(4)
1.3.4 日常生活	(4)
1.3.5 低温余热的回收	(4)
1.4 制冷行业国内外关注热点	(5)
1.4.1 制冷剂的环保与替代	(5)
1.4.2 制冷、空调的节能	(6)
第2章 制冷的热力学基础	(7)
2.1 热力学基本定律	(7)
2.1.1 工质的基本状态参数	(8)
2.1.2 能量及其传递和转换	(12)
2.1.3 热力学第一定律及其应用	(12)
2.1.4 热力学第二定律	(18)
2.2 相变制冷	(21)
2.2.1 蒸气的性质	(21)
2.2.2 蒸气的定压发生过程	(21)
2.2.3 相变制冷过程	(23)
2.3 绝热膨胀制冷	(24)
2.3.1 理想气体的热力性质	(24)
2.3.2 绝热膨胀制冷	(25)
习题	(27)
第3章 制冷剂、载冷剂及润滑油	(30)
3.1 制冷剂	(30)
3.1.1 制冷剂概述	(30)
3.1.2 制冷剂的性质	(31)
3.1.3 常用制冷剂的性能	(36)
3.1.4 制冷剂的应用与替代	(38)

3.1.5	制冷剂检漏及安全使用注意事项	(40)
3.2	载冷剂	(43)
3.2.1	载冷剂概述	(43)
3.2.2	常用载冷剂	(43)
3.3	冷冻机油	(45)
3.3.1	对冷冻机油的基本要求	(46)
3.3.2	冷冻机油的种类与规格	(48)
3.3.3	冷冻机油的选用原则	(49)
3.3.4	冷冻机油的使用和管理	(49)
	习题	(49)
<b>第4章</b>	<b>单级蒸气压缩式制冷循环</b>	<b>(51)</b>
4.1	单级蒸气压缩式制冷的理论循环	(51)
4.1.1	单级蒸气压缩式制冷系统与循环	(51)
4.1.2	压焓图及温焓图	(52)
4.1.3	制冷循环过程在压焓图上的表示	(53)
4.1.4	单级蒸气压缩式制冷理论循环的热力计算	(54)
4.2	单级蒸气压缩式制冷的实际循环	(56)
4.2.1	实际循环与理论循环的差别	(56)
4.2.2	液体过冷对循环性能的影响	(57)
4.2.3	蒸气过热对循环性能的影响	(58)
4.2.4	气液热交换器对循环性能的影响	(61)
4.2.5	热交换及压力损失对循环性能的影响	(63)
4.2.6	不凝性气体的存在对循环性能的影响	(66)
4.2.7	单级压缩实际制冷循环	(66)
4.3	单级蒸气压缩式制冷机的性能及工况	(67)
4.3.1	单级蒸气压缩式制冷机的性能	(67)
4.3.2	单级蒸气压缩式制冷机的工况	(69)
4.4	单级蒸气压缩混合工质制冷循环	(77)
4.4.1	具有变温热源的理想制冷循环——劳仑兹循环	(77)
4.4.2	单级蒸气压缩混合工质制冷循环	(78)
	习题	(79)
<b>第5章</b>	<b>双级蒸气压缩和复叠制冷循环</b>	<b>(81)</b>
5.1	概述	(81)
5.1.1	采用双级蒸气压缩制冷循环的原因	(81)
5.1.2	双级蒸气压缩制冷循环的基本类型	(82)
5.2	双级蒸气压缩制冷循环	(82)
5.2.1	双级蒸气压缩一级节流中间完全冷却循环	(82)
5.2.2	双级蒸气压缩一级节流中间不完全冷却循环	(85)
5.2.3	氨泵供液的双级压缩一级节流中间完全冷却循环	(87)
5.3	双级蒸气压缩制冷循环的热力计算	(89)

5.3.1	制冷剂 and 循环形式的确定 .....	(89)
5.3.2	循环工作参数的确定 .....	(89)
5.3.3	计算实例 .....	(91)
5.4	双级蒸气压缩制冷循环运行特性分析 .....	(93)
5.4.1	温度变动对双级压缩制冷机特性的影响 .....	(93)
5.4.2	双级压缩制冷循环压缩机电动机功率的配备 .....	(94)
5.4.3	双级压缩制冷循环压缩机的启动问题 .....	(94)
5.5	复叠式制冷循环 .....	(94)
5.5.1	采用复叠式制冷循环的原因 .....	(94)
5.5.2	复叠式制冷循环的组成及工作原理 .....	(95)
5.5.3	复叠式制冷循环的热力计算 .....	(96)
5.5.4	复叠式制冷循环的特点 .....	(96)
	习题 .....	(97)
<b>第 6 章</b>	<b>溴化锂吸收式制冷循环</b> .....	<b>(98)</b>
6.1	溴化锂-水溶液的特性 .....	(98)
6.1.1	溴化锂溶液的物理性质 .....	(99)
6.1.2	溴化锂溶液的热力状态图 .....	(102)
6.1.3	溴化锂溶液的化学特性 .....	(104)
6.1.4	溴化锂溶液的再生 .....	(106)
6.2	单效溴化锂吸收式制冷循环 .....	(108)
6.2.1	单效溴化锂吸收式制冷机的制冷原理 .....	(108)
6.2.2	单效溴化锂吸收式制冷机理论循环 .....	(111)
6.2.3	单效溴化锂吸收式制冷机的热力计算 .....	(113)
6.3	双效溴化锂吸收式制冷循环 .....	(118)
6.3.1	双效溴化锂吸收式制冷机制冷原理 .....	(118)
6.3.2	双效溴化锂吸收式制冷机理论循环 .....	(123)
6.3.3	双效溴化锂吸收式制冷机的热力计算 .....	(126)
6.4	溴化锂吸收式制冷机的性能影响因素及提高途径 .....	(128)
6.4.1	外界条件的变化对制冷性能的影响 .....	(129)
6.4.2	不凝性气体对制冷性能的影响 .....	(132)
6.4.3	其他因素对制冷性能的影响 .....	(133)
6.5	直燃型溴化锂吸收式冷热水机组 .....	(135)
6.5.1	直燃型溴化锂冷热水机组的特点 .....	(135)
6.5.2	直燃型溴化锂冷热水机组的形式与结构 .....	(136)
6.5.3	直燃型溴化锂冷热水机组的工作原理 .....	(137)
6.5.4	直燃型溴化锂冷热水机组的技术参数与性能曲线 .....	(138)
	习题 .....	(140)
<b>第 7 章</b>	<b>其他制冷方法</b> .....	<b>(141)</b>
7.1	压缩式气体制冷循环 .....	(141)
7.1.1	压缩式气体制冷的工作原理 .....	(141)



7.1.2	压缩式气体制冷的应用 .....	(143)
7.2	蒸气喷射式制冷 .....	(144)
7.2.1	蒸气喷射式制冷原理 .....	(144)
7.2.2	蒸气喷射式制冷的应用 .....	(146)
7.3	气体膨胀制冷 .....	(146)
7.3.1	气体膨胀制冷的工作原理 .....	(146)
7.3.2	气体膨胀制冷的应用 .....	(148)
7.4	气体涡流制冷 .....	(148)
7.4.1	气体涡流制冷的工作原理 .....	(148)
7.4.2	气体涡流制冷的应用 .....	(149)
7.5	热电制冷 .....	(149)
7.5.1	热电效应 .....	(149)
7.5.2	热电制冷的工作原理 .....	(150)
7.5.3	热电制冷的应用 .....	(151)
7.6	固体吸附制冷 .....	(152)
7.6.1	固体吸附式制冷工作原理 .....	(152)
7.6.2	吸附制冷工质对在制冷技术中的应用 .....	(154)
7.6.3	固体吸附制冷存在的主要问题 .....	(155)
7.6.4	固体吸附制冷的应用 .....	(155)
7.7	磁制冷 .....	(156)
7.7.1	磁制冷的历史及进展 .....	(156)
7.7.2	磁制冷基本原理 .....	(157)
7.7.3	磁制冷方式 .....	(157)
7.7.4	磁制冷的潜在应用场合 .....	(158)
7.8	冰蓄冷 .....	(158)
7.8.1	冰蓄冷的工作原理 .....	(159)
7.8.2	冰蓄冷空调的应用 .....	(160)
	习题 .....	(161)
<b>第8章</b>	<b>热泵技术</b> .....	<b>(163)</b>
8.1	热泵技术概述 .....	(163)
8.2	理想热泵循环及热泵的种类 .....	(163)
8.2.1	理想热泵循环 .....	(163)
8.2.2	热泵的种类 .....	(164)
8.3	吸收式热泵 .....	(165)
8.3.1	第一类吸收式热泵 .....	(166)
8.3.2	第二类吸收式热泵 .....	(167)
8.4	热泵的热源 .....	(169)
8.4.1	对热源的一般要求及热源的种类 .....	(169)
8.4.2	常用的热泵热源 .....	(170)
8.5	热泵的驱动能源和能源利用系数 .....	(172)



8.6 热泵的应用 .....	(174)
8.6.1 热泵的供暖设备 .....	(174)
8.6.2 热泵在游泳馆及人工冰场中的应用 .....	(176)
8.6.3 热泵用于废热的回收 .....	(178)
习题 .....	(179)
附录 A 各种单位制常用单位换算表 .....	(180)
附录 B 各种制冷量单位的换算关系 .....	(181)
附录 C 饱和水与饱和蒸气表 (按温度排列) .....	(182)
附录 D 饱和水与饱和蒸气表 (按压力排列) .....	(184)
附录 E R12 饱和液体和饱和气体性质表 .....	(186)
附录 F R12 压焓图 .....	(188)
附录 G R22 饱和液体和饱和气体性质表 .....	(189)
附录 H R22 压焓图 .....	(191)
附录 I R134a 饱和液体和饱和气体性质表 .....	(192)
附录 J R134a 压焓图 .....	(194)
附录 K R717 饱和液体和饱和气体性质表 .....	(195)
附录 L R717 压焓图 .....	(197)
附录 M R718 饱和液体和饱和气体性质表 .....	(198)
附录 N R718 压焓图 .....	(200)
附录 O R123 饱和液体和饱和气体性质表 .....	(201)
附录 P R123 压焓图 .....	(203)
附录 Q R407C 饱和液体和饱和气体性质表 .....	(204)
附录 R R407C 压焓图 .....	(206)
附录 S R418A 饱和性质表 .....	(207)
附录 T R418A 压焓图 .....	(211)
附录 U LiBr-H <sub>2</sub> O 的压焓图 .....	(212)
参考文献 .....	(213)

# 第1章 绪 论

制冷原理与设备是为了适应人们希望能人工改变局部环境温度的需要而产生和发展的。日常生活中常说的“冷”或“热”是人体对温度高低感觉的反应，因此冷和热是一个相对的概念，制冷中所说的冷和热，是相对于环境温度而言的。

制冷与冷却是两个不同的概念。冷却是指热量从高温物体传递到低温物体中，由于冷、热物体间存在温度差，所以冷却可以自发地进行，但高温物体的温度不可能降低到低于环境介质（空气或水）的温度。所谓制冷，就是把某一物体或空间（包括空间内的物体）的温度，降低到低于环境介质的温度，并保持这一低温状态的过程。为了达到这一目的，就应采用人工的方法不断地将该物体或空间的热量及由外界传入的热量，转移到外界环境中去。这是一个非自发的过程，需要消耗外界能量进行补偿。为实现这一过程所需要的设备称为制冷机。制冷机中使用的工作介质通常称为制冷剂。

## 1.1 概述

### 1.1.1 本课程的研究对象

自然界的客观规律是：热量总是从高温物体传递给低温物体，直至两者温度相等。如一杯开水放置冷却到凉白开，是一个自发的传热过程，属于自然冷却（不是制冷）。

虽然热量不可能自发地从低温物体传向高温物体，但消耗功可以，就如借助水泵对水做功，就能使水从低处流向高处一样，人工制冷就是使热量从低温物体传递到高温物体的技术。工程上实现制冷有许多方法，常用的有相变制冷、气体膨胀制冷、热电制冷等方法。每一种制冷方法都有其特点，可以根据使用的条件进行选择。

例如，相变制冷是利用物质由液相变为气相时的吸热效应来获取冷量的。在标准大气压下，1 kg 液氨汽化时可吸收 1371 kJ 的热量，且汽化温度低至  $-33.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如果将压力降为 0.87 kPa，水在  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  下即可汽化，吸收 2489 kJ/kg 的热量。由此可见，只要选择合适的物质，创造合适的汽化条件，就可获得不同的低温并吸收不同的热量。

再如，气体膨胀制冷是将高压气体作绝热膨胀，使其压力、温度下降，利用降温后的气体来吸取被冷却物体的热量，从而达到制冷的目的。

又如，把两种不同材料的一端彼此连接起来，另一端接上直流电源，则连接后的一端将会产生吸热（制冷）效应，另一端产生放热效应，这种现象称为珀耳帖效应。采用这种方法获取低温称为热电制冷，又称温差电制冷或半导体制冷。

目前，相变制冷是最广泛应用的制冷方法。它又可分为蒸气压缩式、吸收式、蒸气喷射式、吸附式四种制冷方式。其中以蒸气压缩式制冷的应用最为普遍，其次是吸收式。因此，本书将重点介绍蒸气压缩式制冷和吸收式制冷的基本原理与循环过程。

制冷一定要借助专门的装置来完成，实现制冷的实际工艺、装置包括：获得低温的方法、

原理、制冷剂，即制冷原理；使制冷剂压力升高的做功机械，即制冷压缩机；完成制冷剂吸热或放热、节流，安全、经济运行的辅助设备，即制冷设备等。

### 1.1.2 本课程的学习目的

如前所述，各种制冷过程都是通过消耗外界功使热量从低温物体传递到高温物体的过程。为了实现制冷的目的，必须研究制冷的基本原理和过程，对各种制冷方法有深入的认识和理解，掌握各种常见制冷方法的特点与适用范围，针对制冷对象的具体条件，选择合理的制冷方法，满足对其进行制冷的要求。

近百年来，制冷和制冷技术大大改变了人们的生活方式，也创造了巨大的就业机会。据统计，全球有 200 万人直接从事与制冷相关的岗位，制冷设备的年销售额在 2000 亿美元左右。在我国，制冷、空调工业已成为支柱产业之一，2003 年其占国民生产总值的 2%（《中国制冷年鉴》）。

20 世纪 70 年代以来，能源问题已被列为世界五大问题之一，降低制冷过程的能源消耗正在引起制冷行业越来越广泛的重视。制冷作为耗能大的行业之一，每年要消耗大量的电能。据我国制冷学会 1994 年的统计，制冷、空调设备的能耗约占全国总耗电量的 5%~6%，夏季占季节发电量的 18%~20%，个别地区占的比例更大。为了更好地利用制冷过程中的耗功，必须研究制冷循环中的能量转换过程，提高能量转换效率。

## 1.2 制冷技术发展概况

### 1.2.1 制冷体系的划分

制冷的服务对象不同，要求的制冷温度也不同。在工业生产和科学研究上，人们通常根据制冷温度的不同，把人工制冷分为普通制冷（ $T > 120 \text{ K}$ ）、低温制冷（ $T = 4.2 \sim 120 \text{ K}$ ）、超低温制冷（ $T < 4.2 \text{ K}$ ）。由于制冷温度不同，所用的制冷剂、制冷原理、制冷压缩机、制冷设备等有较大的差别，制冷系统的组成也不同。

目前制冷技术中应用最广泛的是普通制冷，它主要应用在空气调节、食品储存与加工及一般的生产工艺用冷等领域。普通制冷主要利用相变原理来获取低温，采用的系统形式主要有蒸气压缩式、复叠式等。其采用的制冷剂选择余地较大，目前开发的各种制冷剂大都可以适用于普通制冷系统。

低温制冷常用于生产低温液体，如氧、氩、氮及氖、氢、氦等气体的液化过程，或用于维持低温环境，以便储运液化后的气体。

本书主要叙述普通制冷的工作原理和热力学分析方法。

### 1.2.2 制冷的发展简史

我们的祖先很早就利用自然界存在的冷物质（如冰、深井水等天然冷源）进行冷的利用和简单的人工制冷。我国早在周朝就有了用冰的历史，到了秦、汉，冰的使用更进了一步，到了唐朝则出现冰镇饮料生产商而且有了从事冰交易的冰商。

利用天然冷源严格说还不是人工制冷，现代人工制冷是在 18 世纪中叶随着工业革命而开始的。1748 年，英国人柯伦证明了乙醚在真空下蒸发时会产生制冷效应；化学教授库仑在 1755

年利用乙醚蒸发使水结冰，他的学生布拉克从本质上解释了融化和汽化现象，提出了潜热的概念，发明了冰量热器，这标志着现代制冷技术的开始；同年，苏格兰人 W.Callen 发明了第一台蒸发式制冷机；1824 年卡诺循环的发明，奠定了制冷和热泵的研究基础。

在伦敦工作的美国人波尔金斯 1834 年制成了用乙醚为制冷剂的手摇式压缩制冷机，并正式申请了专利，这是后来所有蒸气压缩式制冷机的雏形，其重要之处是实现了闭合循环。美国人戈里在 1844 年用封闭循环的空气制冷机为发烧病患者建立了一座空调站，并于 1851 年获得美国专利，它标志着空气制冷机开始应用。

商用食品冷藏事业的发展始于 1858 年美国人尼斯取得冷库设计的第一个美国专利。1859 年，法国人卡列制成了第一台氨吸收式制冷机，并申请了原理专利。1874 年，德国人林德建成了第一台氨压缩式制冷系统，使氨压缩式制冷机在工业上得到了普遍应用。从此，蒸气压缩式制冷机在制冷领域中开始了它的统治地位。

进入 20 世纪后，技术的创新和进步改变了人工制冷的进程。如全封闭压缩机的研制成功、氟利昂制冷剂的发现和混合制冷剂的应用，半导体制冷、声能制冷、热电制冷、磁制冷、吸附式制冷、地温制冷等制冷方法的发现，使制冷进入了实际应用的广阔天地，人工制冷不受季节、区域等的限制，可以根据需要制取不同的低温。其中，1918 年，美国工程师考布兰发明了第一台家用电冰箱，自此，电冰箱逐渐成为家庭的必备电器产品之一。1919 年，美国在芝加哥建起了第一座空调电影院，空调技术开始实际应用。1929 年，美国通用电气公司米杰里发现了氟利昂制冷剂 R12，氟利昂制冷剂具有的无毒、不燃烧性质，使得氟利昂压缩式制冷机迅速发展起来，并在应用中超过了氨压缩机。

我国制冷行业的发展始于 20 世纪 50 年代末期，1956 年在大学中开始设立制冷学科，制冷压缩机制造业从仿制开始起步到 20 世纪 60 年代便能自行设计制造。改革开放以来，我国制冷工业得到了飞速发展，特别是 80 年代通过引进国外先进技术，我国已发展成制冷、空调产品的生产大国，许多产品已打入了国际市场。例如，我国房间空调器生产开始于 1978 年，从 1991~1993 年才开始进入起步阶段，而在 1997~2003 年则进入高速发展阶段，生产量平均每年递增 24%~59%。经过十多年的发展，中国房间空调器产业已经拥有了占世界产量一半以上的生产规模，成为名副其实的房间空调器世界第一生产大国。

## 1.3 制冷技术在各行各业中的应用

在当代社会，随着制冷工业的发展，制冷的应用也日益广泛，现已渗透到人们的生活、生产、科学研究活动的各个领域（从日常的衣、食、住、行到尖端科学技术都离不开制冷），并在改善人类的生活质量方面发挥着巨大的作用。从某种意义上可以说，制冷工业的水平是一个国家现代化水平的标志。

### 1.3.1 食品工程

食物的安全存储一直是人们关注的目标，大多数食品是容易腐败的，并且食品的生产有较强的季节性和地区性。经过长期的实践，人们发现易腐食品从采购或捕捞、加工、储藏、运输到销售的全部流通过程中，都必须保持稳定的低温环境，才能延长和提高食品的质量、经济寿命与价值。为实现稳定的低温环境就需有各种制冷设施，如冷加工设备、冷冻冷藏库、冷藏运输车（或船）、冷藏售货柜台等。到目前为止，低温环境一直被认为是加工、储存食

品最好的方法，食品工业也是最早、最多利用制冷的部门。此外，农业中的良种保存、种子处理、人工气候室等，都需要低温。没有制冷，海洋渔业将无法生产。在食品工程中制冷技术和设备的使用，既能保证食品的质量、减少生产和销售中的损耗，又可以调剂市场、平衡季节性和地区性的供需矛盾。

### 1.3.2 医药卫生事业

血浆、疫苗及某些特殊药品需要低温保存；低温冷冻骨髓和外周血干细胞、低温麻醉、低温手术及高烧患者的冷敷降温等也需制冷技术；在生物技术的研究和开发中，制冷也起着举足轻重的作用。此外，人工冬眠、“冷手术刀”等冷冻医疗技术也在蓬勃发展。

### 1.3.3 机械、轻工业和精密仪表电子工业

在机械制造业中，炼钢所需要的氧气要通过深冷分离的方法从空气中得到；炼钢中，高炉鼓风需要用制冷的的方法先将其除湿，然后再送入高炉，以降低铁水的焦化比，保证铁水质量；对钢材进行 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温处理可改变钢材的金相组织，使奥氏体变成马氏体，提高机械零件的硬度和耐磨性能，延长工件的使用寿命；机械加工中，精密机床油压系统利用制冷来控制油温，稳定油膜刚度，使机床能正常工作；机器装配时，利用低温进行零部件间的过盈配合等。

化学工业中，借助制冷，可使气体液化、混合气分离，带走化学反应中的反应热。盐类结晶、润滑油脱脂需要制冷；石油裂解、合成橡胶、燃料生产、化肥生产也需要制冷。

多路通信、雷达、卫星地面站等电子设备也都需要在低温下工作。纺织、印刷、精密仪表、电子工业都需要利用制冷技术来控制温度和湿度，以满足生产要求。

### 1.3.4 日常生活

日常生活中家用冰箱及空调等都是制冷技术的应用；啤酒、胶卷的生产，也离不开制冷。没有制冷技术，卫星地面站就不能正常传输信号，电视节目就看不成了。

我们平常去的体育馆、大会堂、宾馆等公共建筑和小汽车、飞机、大型客车和现在的铁路空调客车等交通工具也都需要通过制冷系统来创造一个使人感到舒适的气候环境。在体育运动中，制冷技术用来产生和维持人工冰场、人工滑雪场，以满足人们随时可以进行这些体育项目的需要。

### 1.3.5 低温余热的回收

采用人工的方法在消耗一定的能量的基础上可以实现将低温区的热量转移到高温区。制冷循环是将低温区的热量转移到环境温度区的，若将环境温度区的热量转移到高温区成为有用的或用处更大的热量，则称这种方法为“热泵技术”。

现代生活和工业生产中存在大量的温度稍高于环境温度的现象，但却无法再次利用其余热（废热），因为它们的温度低，没有利用价值或者直接利用时成本过高，采用直接排放的方式又会对周围环境产生热污染。通过热泵技术则可以提升这部分余热资源的温度，提高能源利用效率。热泵可以利用的余热（废热）资源很多，如空气、江、河、湖、海水及工业生产废水、城市污水、地热、太阳能等。热泵技术目前已成为开发和强化能源利用率的重要手段，是获取可再生能源及维护生态环境的有效途径之一。

综上所述可见，没有制冷工业，就没有现代社会。美国工程院 2000 年评出了 20 世纪 20 项对人类社会和生活影响最大的工程技术成就，制冷技术就是其中的一项。

## 1.4 制冷行业国内外关注热点

### 1.4.1 制冷剂的环保与替代

制冷剂是压缩式制冷中的工作介质，在系统中循环流动。它在低温下吸热汽化，再在高温下凝结放热。从历史上来看，制冷技术发展的第一阶段（从 1830~1930 年），主要采用  $\text{NH}_3$ 、 $\text{HCS}$ 、 $\text{CO}_2$ 、空气等作为制冷剂，这些制冷剂使用了一百年之久，有的有毒，有的可燃，有的效率很低。1929 年美国开发出的氟利昂是饱和碳氢化合物的氟、氯、溴衍生物的总称，有几十种。它们的热力性质有很大的区别，但它们的物理和化学性质又有许多共同的优点，因此从 1930~1990 年，氟利昂得到了广泛的应用。

太阳辐射的紫外线有各种波长，其中波长为  $0.28\sim 0.32\ \mu\text{m}$  以下的紫外线会危害生命。离地面  $25\sim 40\ \text{km}$  的平流层处的臭氧层能够阻挡这些有害的紫外线，保护地球上的人类和生物。1975 年美国学者提出，含氯的氟利昂中的氯原子会破坏臭氧层。到 90 年代氟利昂中的氯原子会破坏臭氧层的理论被广泛接受，并且三位科学家因该理论于 1995 年得到了诺贝尔化学奖。根据该理论，含氯的氟利昂中的氯原子在平流层会分离出来，与臭氧分子作用生成氧化氯和氧分子。氧化氯能与臭氧作用，重又生成氯原子和氧分子。这样不断重复，使大量臭氧被破坏。

研究表明，臭氧层的臭氧每减少 1%，则有害辐射增加 2%。其后果是皮肤癌和眼病增加、人体的免疫系统性能下降、海洋生物的食物链被破坏、一些植物的生长受影响（包括农作物减产）。有研究者提出，当臭氧层余下 1/5 时，则达到地球生命的临界点。

应该说明，并不是所有的氟利昂都会破坏臭氧层。为了便于区分，现在经常把氟利昂分为氯氟烃（CFC）、含氢氯氟烃（HCFC）、含氢氟烃（HFC）三类。其中 CFC 类（如 R11 和 R12）对臭氧有明显的破坏作用，是当前淘汰的重点。HCFC 的破坏作用比 CFC 类小得多，作为过渡物质目前还可以使用。第三类氢氟烃（HFC）不含氯，对臭氧层没有破坏作用。

CFC 与 HCFC 等消耗臭氧层物质（ODS）排入大气后即无国界，因此保护臭氧层需要世界各国协调行动。我国于 1991 年加入《蒙特利尔议定书》，对消耗臭氧层的物质进行控制。1992 年我国批准了《中国消耗臭氧层物质逐步淘汰的国家方案》。应该说明，CFC 并不是只用于制冷、空调。从世界平均水平来看，用做制冷剂的 CFC 大约占 30%，其余用于塑料发泡，各种行业的喷雾剂、清洗剂、溶剂。因此，淘汰 CFC 保护臭氧层涉及许多行业，是一个系统工程，是一个逐步进行的过程。

根据《中国消耗臭氧层物质逐步淘汰的国家方案》，对于我国的制冷、空调行业，家电行业在 2003 年完成 70% 新生产冰箱、冷柜的替代；汽车空调行业自 2001 年 12 月 31 日起禁止所有新空调车中使用 CFC-12，并逐步削减在用车的 CFC 消费量。2009 年后只允许使用回收的 CFC；工商制冷行业则需在 2010 年停止 CFC-11 和 CFC-12 维修补充的再灌装；泡沫行业在 2005 年前完成挤出泡沫和聚氨酯垂直/水平泡沫工艺中使用的 ODS 替代；2007 年前完成聚氨酯板材、管材泡沫工艺中使用的 ODS 替代；2010 年前实现聚氨酯喷涂和箱式工艺中使用的 ODS 替代，以最终实现淘汰消耗臭氧层物质。

从目前的情况分，CFC 与 HCFC 的替代工质有许多种。潜在的绿色环保替代物有合成的和天然的两大类，合成的替代物有 HFCS；天然的有氨、二氧化碳、水、碳氢化合物等。

臭氧层的破坏和全球气候变化，是当前全球所面临的主要环境问题。制冷、空调、热泵行业广泛采取的 CFC 与 HCFC 类物质对臭氧层的破坏作用并产生温室效应，使全世界的制冷、空调与热泵行业面临严重的挑战。CFC 与 HCFC 的替代已成为当前国际性的热门话题，该领域的研究和发展还在持续进行中。

### 1.4.2 制冷、空调的节能

我国的人均能源、资源占有量相对不足，仅为世界平均水平的 40%~50%。能源问题是制约我国现代化建设的关键之一。目前广泛采用的压缩式制冷消耗了大量的电能，而且其耗电能所占的比重越来越大。据报道，北京、深圳的夏季集中空调用电量，已占全市总用电量的三成。因此，制冷、空调的节能也就显得越来越重要。

目前人们熟知的“节能”（Energy Saving）已经逐渐为“能量效率”（Energy Efficiency）所取代。这一字之差，实际上反映了人们对节能的认识已从单纯地抑制需求、减少耗能量，发展成为用同样的耗能量或用少许增加的耗能量来满足需求，进而提高工作效率和生活质量。

制冷、空调的节能应以提高能量效率，用有限的资源和最小的能源消费代价来取得最大的经济和社会效益，满足人们日益增长的需求为目标。节能并不意味着限制发展，也不意味着降低生产和生活标准。

制冷、空调的节能是技术的进步。由于新工艺、新技术、新材料的研究与应用，高效、节能、环保、新功能的制冷与空调设备不断出现：静音、省电、数字温控、自动除臭、模糊控制、模拟人工神经网络除霜冰箱等；清新空气、变频、HFCs、神经网络和模糊控制、双转子压缩机、急冷/急热空调等；新型螺杆式、涡旋式、余摆线式压缩机等。这些新技术、新设备都为制冷、空调的节能提供了技术保障。

制冷、空调的节能实际上也是一个最优化的问题。它包括制冷、空调每一个部件和整个系统设计的优化、操作调节的优化、维护管理的优化。制冷、空调系统都是由单个设备集成组成的一个复杂系统，通过每一个环节的优化可达到运行的优化，即整个系统的高效率运行。

总之，制冷技术的应用是很广泛的，随着国民经济的发展，科学技术的进步，人民生活水平的不断提高，制冷技术的发展与应用将会走向新的领域。



## 第2章 制冷的热力学基础

制冷就是应用人工的方法不断地将物体或空间的热量以及由外界传入的热量，转移到外界环境中去。这是一个非自发的过程，需要消耗外界能量进行补偿。同时，热量的转移需要一种携带热能的工作物质来完成，这种工作物质我们称之为工质，在制冷机中使用的工质则通常称为制冷剂和载冷剂。工质在工作过程中，热力状态不断发生变化，因此必须掌握工质的热力性质。

制冷剂在工作过程中其状态是发生变化的，有时处于液态，有时处于气态。气态工质具有极好的热膨胀性能，在制冷剂工作参数范围内，制冷剂气体必须当做实际气体来对待。我们研究实际气体的性质都是在理想气体的性质基础上进行的。

### 2.1 热力学基本定律

在制冷设备中，能量的相互转移与转换，需要通过制冷剂吸热或放热、膨胀或压缩等变化来完成。因此需要研究能量相互转换过程中所应遵循的规律的科学，即热力学。广义地说，热力学研究系统宏观性质变化之间的关系，研究系统在一定条件下变化的方向和限度，其主要内容是热力学第一定律和热力学第二定律。这两个定律都是人类经验的总结，有着牢固的实验基础。热力学第一定律是能量守恒和转换定律在具有热现象的能量转换中的应用。它指出，自然界的一切物质都具有能量，能量能够从一种形式转换成另一种形式，从一个物体传递给另一个物体，但在转换与传递过程中能量的数量不变。

热力学第一定律仅指出能量转换在数量上的关系。然而遵循热力学第一定律的过程却未必能实现，还需同时遵循热力学第二定律。热力学第二定律揭示了能量交换和转换的条件、深度和方向。

热力学第二定律指出，机械功可以全部变为热，但热却不能无条件地全部转换成机械功，即不可能单从热源取热，使之完全变为功而不引起其他的变化。由此可知，仅利用一个热源（或冷源）无法完成循环过程。制冷剂在循环过程中，除了向低温热源吸热（制冷）外，还必须向高温热源排热。热力学第二定律又指出，不可能把热从低温物体传至高温物体而不引起其他变化。也就是说，热量能自发地从高温物体传向低温物体，而不能自发地从低温物体传向高温物体，当低温物体的热量传向高温物体时，必须有一个补偿过程。人工制冷的过程就是在外界的补偿下，将低温物体的热量向高温物体传送的过程。目前使用的补偿过程的方法有两种，一种是消耗功（机械能或电能）来提高制冷剂的压力和温度，使制冷剂将从低温物体（低温热源）吸取的热量，连同机械功转换成的热量一同排至环境介质中从而完成热量从低温传向高温的过程；另一种是消耗热能，用热量由高温传向低温的自发过程作为补偿，来实现将低温物体的热量转送到高温物体的过程。

由于热力学所研究的对象是大数量分子的集体，因此所得结论具有统计性，不适用于个别分子、原子等微观粒子。可以说，热力学的特点就是不考虑物质的微观结构和反应机理，

只对现象之间的联系做宏观了解，不能做微观说明；它只能告诉我们在某种条件下，变化能否发生，进行的程度如何，而不能说明所需的时间、经过的历程、变化发生的根本原因。尽管它有局限性，但仍不失为一种非常有用的理论工具。

在用热力学方法研究问题时，首先要确定研究的对象。我们将所研究的一部分物质或空间，从其余的物质或空间中划分出来，这种划定的研究对象叫系统或体系；而将与系统密切相关的其他部分称为环境。

根据系统与环境间的能量和物质的关系，可将系统分为以下三种。

(1) 孤立系统（孤立系）：系统与环境之间既无能量交换（其中，能量交换包括热、功和其他能量），又无物质交换。孤立系统完全不受环境的影响。

(2) 闭口系统：系统与环境之间只有能量交换，而没有物质交换。

(3) 开口系统：系统与环境之间既有能量交换，又有物质交换。

热力学所研究的系统必须是处于热力学平衡态的系统，也就是说系统必须同时满足下面几个条件。

① 热平衡：系统的各个部分温度相等。

② 力学平衡：系统各部分之间及系统与环境之间没有不平衡的力存在，即在不考虑重力场的影响下，系统内部各处的压力相等，且也等于环境的压力。宏观地看，系统的界面不发生相对移动。如果两个均匀系统被一个固定的器壁隔开，即使双方压力不等，也能保持力学平衡。

③ 相平衡：当系统不止一相时，各相的组成不随时间而变化。相平衡是物质在各相之间分布的平衡，如溴化锂-水溶液。

④ 化学平衡：当各物质之间有化学反应时，达到平衡后，系统的组成不随时间而变。

只有同时满足以上四个条件的系统才是热力学平衡系统，否则为非平衡态系统。只有热力学平衡的系统，才能用统一的宏观性质来描述整个系统的状态。在制冷系统中涉及的平衡状态主要是热平衡、力学平衡和相平衡。

### 2.1.1 工质的基本状态参数

在热力装置及制冷装置中，不断循环流动以实现能量转换的物质称为工质。任何物质均可有固、液、气三种相态。从体积和形状来看，三种相态的特征各不相同。在给定的条件下，固态时的物质具有固定的体积和形状，液态时的物质具有给定的体积但其形状随容器而变；气态时则无给定体积和形状，物质可以充满整个容器。液体和气体都具有可以流动的特性，合称为流体。在制冷装置中，工质应以液态或气态（或气液混合物）的形式出现，要能够循环流动。

在制冷装置工作过程中，工质常会由液态变为气态，或者由气态变为液态。在一定条件下，物质由一种相态变为另一种相态的过程，称为相变。常见的相变有六种：液态变为气态称为汽化，气态变为液态称为凝结，液态变为固态称为凝固，固态变为液态称为熔化，固态变为气态称为升华，气态变为固态称为凝华。纯物质在相变过程中，当保持压力不变时，温度也恒定不变，而且所保持的温度与压力之间存在一定的关系，这种关系随工质种类的变化而变化。

在制冷设备中，能量交换的根本原因在于制冷剂的热力状态存在差异，也就是说，制冷剂的客观物理状况发生了变化。我们把工质在某瞬间表现的热力性质的总状态，称为热力状态，