



住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材



高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材

建筑用制冷技术

张吉礼 马良栋 马志先◎编著



中国建筑工业出版社



住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材



高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材

建筑用制冷技术

张吉礼 马良栋 马志先 编著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑用制冷技术/张吉礼, 马良栋, 马志先编著. —
北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 6

住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材
高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材
ISBN 978-7-112-23225-3

I. ①建… II. ①张… ②马… ③马… III. ①建
筑-空气调节-制冷技术-高等学校-教材 IV. ①TU831.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 018229 号

责任编辑: 张文胜 姚荣华

责任校对: 党 蕾

住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材
高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材

建筑用制冷技术

张吉礼 马良栋 马志先 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京京华铭诚工贸有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 34 字数: 826 千字

2019 年 6 月第一版 2019 年 6 月第一次印刷

定价: 65.00 元

ISBN 978-7-112-23225-3

(33308)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序 言

“建筑用制冷技术”是建筑环境与能源应用工程专业的主要专业课之一。制冷技术在国民经济中的应用很广泛，涉及工业、农业、商业、国防、医疗卫生等多个领域，要求制冷的温度从几开尔文到 20 多摄氏度。制冷作为建筑空调的冷源，它与空调的发展形影相随，互相促进。中华人民共和国成立之前，只有个别城市（如上海市）的一些高档建筑、影剧院设有空调，其所用的空调、制冷设备都是国外产品。中华人民共和国成立后，我国有了自己的空调制冷设备的制造企业，但早期大多是仿制产品。国民经济的发展和人民生活水平的提高促进了空调制冷产业的发展。尤其在改革开放后，我国的经济开始转型，并快速发展，为空调制冷提供了广阔的市场。空调制冷从中华人民共和国成立初期主要为工业服务转向主要为民用服务，空调制冷设备已走进了各类公共建筑和千家万户。从而促进了空调制冷产业的发展壮大。我国现在已成全球最大的空调制冷设备的生产国和消费市场，也涌现了许多著名企业与名牌产品。我国空调制冷技术的飞速发展作为《建筑用制冷技术》教材的编写提供了丰富的素材。

教材的作者已从事制冷课的教学近二十年，形成了独具特色的教学模式，并把“建筑用制冷技术”课程打造成“辽宁省精品资源共享课”。在此基础上编著了《建筑用制冷技术》教材。该教材系统地阐述了制冷基本概念与原理；详尽地介绍了各种制冷设备的构造、工作原理、性能、设计计算，以及制冷剂系统和冷源系统的组成与自动控制；扼要地介绍了空调冷源工程的经济性分析和制冷机组的实验方法。教材内容丰富，理论联系实际，反映了空调制冷技术当前的新进展和新技术。本书不仅是建筑环境与能源应用工程专业学生系统学习建筑用制冷技术的教材，还是一本可供从事空调制冷技术工作的工程技术人员用的参考书。

哈尔滨工业大学

陆亚俊

2019年5月11日

前 言

制冷设备及系统是现代建筑实现室内环境舒适、健康和节能调控的必备系统。2000年以来,随着我国建筑产业的快速发展、建筑环境质量和节能环保要求的不断提高,大型公共建筑以及超高、高大建筑如雨后春笋建设发展,极大地带动了我国空调制冷产业的发展。一方面,建筑冷源中的制冷机组由20世纪占市场主流地位的活塞式,逐步被螺杆式和离心式等类型的制冷机组所替代,且单台容量也越来越大,制冷压缩机、蒸发器、冷凝器、制冷剂、控制系统等方面的技术也发生了根本性变化,机组的制冷性能和冷源工程质量均得到大幅度提高。另一方面,网络与智能控制技术的发展及其在建筑领域中的应用,不仅极大地提高了冷源设备及系统的自动化、智能化和网络化水平,而且为制冷设备及系统能够满足整个建筑环境舒适、健康和节能调控要求,提供了技术保障和平台基础。

制冷与供冷技术是全国建筑环境与能源应用工程专业(简称建环专业)本科生必须掌握的一门专业课,在上述新的时代背景下,作为建环专业的本科生,不仅要扎实掌握制冷技术的基本概念、基本原理、基本方法及基本的工程应用技术等,而且要及时了解该领域最新的研究成果和技术进步情况,以敏锐客观的开放性和创新性思维来学习、思考、创新和实践建筑中的制冷与供冷问题,不断提高自身的学习能力、思维能力、创新能力和工程实践能力,以主动适应新时代行业发展对跨学科、高层次专门人才的新需求。为此,建环专业制冷课程的目标定位、教学目的、教学内容、教材资料、教学模式、实验实践、考核方式、质量评价等都需要面向我国建环专业人才培养的新需求而主动变革。作为制冷课程的知识、方法、技术和能力培养载体的教材,更应该与时俱进,在系统地承传制冷与供冷技术的经典理论体系、基本原理和方法的基础上,及时引入空调制冷及相关领域的最新成果,进一步完善建环专业制冷课程的内容体系,使之更适于教师教学和学生学学习,适于社会进步和行业发展对该类教材的新要求。

本教材就是在上述背景下,根据笔者近二十年的建环专业制冷课程教学工作感悟和积累,面向社会进步和行业发展对建环专业人才培养的新需求,充分吸收我国建环专业现在普遍使用的同类教材优点,结合国外特别是美国该类课程教材特点、我国制冷专业本科生教材特色以及互联网时代对教师授课质量和教学模式的新要求撰写的,具体章节内容如下。

第1章 绪论。本章旨在强化学生对建筑与制冷之间关系的认识。主要介绍了建筑的供冷需求、人工制冷的发展简史、实现制冷的基本途径、建筑空调制冷系统的基本形式和常用的制冷设备及制冷在其他领域的应用。

第2章 制冷剂的种类与性质。本章旨在强化学生对制冷剂热力性质和迁移特性计算方法的学习。首先介绍了制冷剂的种类、制冷剂发展过程、环境影响与制冷剂替代;其次,重点介绍制冷剂热力性质计算方法,包括状态方程、压力方程、密度方程、比热容方程、潜热方程等,重点介绍制冷剂的动力黏度和导热系数计算方程;最后,介绍了制冷剂的物理化学性质。

第3章 蒸汽压缩式制冷循环的演变与特性。本章旨在强化学生对最大制冷系数探索进程及有效提升途径的认知。首先介绍了蒸汽压缩式制冷系统的基本构成及制冷系数的概念；其次介绍了人类对制冷系数最大化探索的进程，从卡诺循环的提出，到逆卡诺制冷循环、湿蒸汽区的逆卡诺循环、蒸汽压缩式制冷饱和循环及其热功计算等；再介绍提高饱和循环性能的有效途径，包括饱和循环与逆卡诺循环的差异、节流损失、过热损失，及提高饱和循环性能的有效途径——节流前过冷、回热循环、多级压缩循环和复叠式循环（本书将复叠式循环作为提高循环性能的途径之一来介绍）；最后介绍蒸汽压缩式制冷实际循环以及循环内部损失的熵分析法和焓分析法。

第4章 蒸汽压缩式制冷压缩机。本章旨在强化学生对各类制冷压缩机的基本结构、种类、工作过程、效率、制冷量、功率以及调节特性的学习。首先介绍了往复式制冷压缩机的结构与种类、制冷量和功率；其次介绍了螺杆式制冷压缩机的结构与特征、制冷量与功率及能量调节；再介绍离心式制冷压缩机的结构与特点、能量损失与轴功率、特性与调节等；最后介绍了滚动转子式制冷压缩机和涡旋式制冷压缩机的结构与工作过程、种类及特点、制冷量与功率以及能量调节等。

第5章 制冷系统的冷凝器与蒸发器。本章旨在强化学生对冷凝器和蒸发器设计计算方法的学习，这也是众多同类教材中最为缺失的部分。本章按照统一的思路和方法，先后介绍了冷凝器和蒸发器的种类与特点、共性设计计算方法、常用冷凝器和蒸发器设计计算案例，常用冷凝器包括卧式冷凝器、空冷冷凝器、板式冷凝器和蒸发式冷凝器，常用蒸发器包括干式蒸发器、满液式蒸发器、冷却空气蒸发器和板式蒸发器。

第6章 制冷剂管路系统及功能部件与设备。本章旨在强化学生对制冷剂管路系统和节流机构的学习。首先介绍制冷剂管路系统的基本构成、典型制冷剂管路系统工艺流程；其次，重点介绍了常用节流机构的工作原理和特性，包括手动节流阀、浮球膨胀阀、热力膨胀阀、电子膨胀阀和毛细管；再介绍了制冷剂管路系统中的安全保护和功能调节等关键部件，以及气液分离、润滑油处理和不凝性气体处理等；最后，介绍了制冷剂管路系统的管路设计及防护等。

第7章 制冷系统的安全保护与自动控制。本章旨在强化学生对制冷系统关键部件及系统整体的机械式控制（或电气控制）和计算机自动控制的学习。首先在介绍了制冷系统的运行安全自动保护的基础上，系统地介绍了蒸发器、压缩机和冷凝器的自动控制与调节；其次，介绍了典型制冷系统的运行控制，包括小型商用制冷系统、直膨式空调制冷系统、螺杆式冷水机组、热泵式空调器和VRV空调系统的自动控制；最后，介绍了制冷系统的故障分析与对策。

第8章 溴化锂吸收式制冷。本章旨在强化学生对溴化锂吸收式制冷原理及机组自动控制的学习。首先介绍了吸收式制冷原理及溴化锂水溶液的性质；其次，介绍了单效和双效溴化锂吸收式制冷机的原理、结构特点、热力计算及性能影响因素等；再次，介绍了直燃型溴化锂吸收式冷热水机组；最后介绍了溴化锂吸收式制冷机组的自动控制。

第9章 建筑冷源工程。本章旨在强化学生对建筑冷源工程的设计、监控及冷源系统经济性分析方法的学习，同时通过制冷系统性能测试方法和实践教学案例的介绍，旨在加强实践教学、提高学生实践能力。首先介绍了载冷剂种类及输送系统形式；其次介绍了建筑冷源系统的设计方法和经济性分析方法，介绍了建筑冷源系统监测控制系统设计方法；最后介绍了制冷机组与制冷系统性能测试原理、方法及实践教学案例。

本教材的内容体系具有以下特色:

(1) 注重制冷技术所涉及的相关基础问题的介绍和推演,有利于夯实学生的专业基础,便于学生知识结构的“上挂下联”。

(2) 注重制冷技术所涉及的基本概念、基本原理、基本方法及基本工程应用技术的介绍,有利于帮助学生夯实基础、练好基本功。

(3) 注重制冷技术涉及的科技发展前沿问题的介绍。教材多数章节安排了相关内容的概述,重点阐述国内的发展概况、研究现状分析及当前的研究重点和发展方向,有助于学生了解该领域的国内外最新研究与应用进展,增强学生的自信心。

(4) 注重教材理论与工程实际应用的结合。本教材主要面向建筑环境与能源应用工程专业的本科生,教材在多数章节都介绍了建筑冷源系统形式、系统设计及监测与控制等方面的内容,以培养学生的建筑制冷系统工程设计、运行调控和管理能力。

(5) 注重实验教学与课后习题的训练。第9章的实验教学有利于培养学生实验设计、实验操作和实验分析的实验创新能力,有利于学生加强对课堂理论教学内容的理解;同时,教材收集和设计了成套的课后习题,特别是引进了国外同类教材的习题,有利于考查学生对所学内容的掌握程度,加强对所学内容的理解和巩固。

1999年6月,哈尔滨建筑大学建筑热能工程系空调教研室,刚刚留校的我从马最良教授手中接过一厚本沉甸甸、泛了黄、破了边的《空调用制冷技术》手写稿教案;从那时到现在,一晃就是20年。2008年9月我计划编写《建筑用制冷技术》教材,从那时到现在,一晃就是10年。过去的20年,我始终坚守那神圣而又深受同学们喜爱的三尺制冷课讲台,践行一个大学教员教书育人的基本职责。通过努力,我们把该门课程已打造成“辽宁省精品资源共享课”,并形成了独具特色的教学方式、教材、实验及考核方式;本教材也成为“住房和城乡建设部土建类学科专业‘十三五’规划教材”和“高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材”。值此教材完稿之际,我谨代表参编作者,向给了我和我们先进的大学教学理念、教学方法、特别是大学教师教学精神的哈尔滨工业大学陆亚俊教授、孙德兴教授和马最良教授表示衷心的感谢。向全国建筑环境与能源应用工程教育指导委员会给予的大力支持表示衷心的感谢;向中国建筑工业出版社的辛勤付出和热情帮助表示衷心的感谢;向大连理工大学教务处和建设工程学部的大力支持表示衷心的感谢。向历届在教学过程中给以默契配合而又辛苦努力的哈尔滨工业大学和大连理工大学建环专业的同学们表示衷心的感谢,你们是我们编写此教材的最大动力!向曾经参与本书编写,特别是在最后成稿过程中做了大量工作的任体秀、曲振楠、梁云、张继谊、赵楠等研究生同学表示衷心的感谢!

本教材由大连理工大学张吉礼任主编,负责本教材的整体构思、编写组织、统稿工作。本教材的第1章~第4章、第5章的第5.1~5.2节和第5.4节、第7章由张吉礼负责编写,第8章和第9章的第9.1~9.4节由马良栋负责编写,第5章的第5.3节、第5.5节和第5.6节、第6章和第9章的第9.5~9.6节由马志先编写。

由于作者水平有限,书中不妥和不足之处在所难免,恳请读者和同行不吝赐教。

作者

2018年11月18日于大连

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 建筑的供冷需求	1
1.1.1 空调冷负荷	1
1.1.2 制冷的概念	1
1.1.3 人工制冷的发展	3
1.2 实现制冷的基本途径	3
1.2.1 相变制冷	3
1.2.2 气体绝热膨胀制冷	4
1.2.3 温差电制冷	4
1.2.4 热声制冷	5
1.3 空调制冷系统的基本形式	5
1.3.1 居住建筑的空调制冷系统	6
1.3.2 公共建筑的空调制冷系统	6
1.4 制冷在其他领域的应用	9
本章习题	9
本章参考文献	10
第 2 章 制冷剂的种类与性质	11
2.1 制冷剂的种类与替代	11
2.1.1 烷烃基制冷剂	11
2.1.2 烯烃基制冷剂	14
2.1.3 无机化合物制冷剂	14
2.1.4 不同压力水平的制冷剂分类	14
2.1.5 制冷剂的替代	15
2.2 制冷剂的热力性质计算方法	17
2.2.1 制冷剂热力性质参数模型	17
2.2.2 制冷剂热力性质图表	20
2.3 制冷剂的迁移特性计算方法	21
2.3.1 动力黏度方程	21
2.3.2 导热系数方程	22
2.4 制冷剂的物理化学性质	23
2.4.1 安全性与热稳定性	23
2.4.2 对其他物质的物化作用	25
本章习题	26

本章参考文献	26
第3章 蒸气压缩式制冷循环的演变与特性	27
3.1 蒸气压缩式制冷系统的基本构成	27
3.1.1 制冷系统的四大部件	27
3.1.2 制冷量与制冷系数	28
3.2 制冷系数最大化的探索	29
3.2.1 卡诺循环的诞生	30
3.2.2 逆卡诺制冷循环	31
3.2.3 湿蒸气区的逆卡诺循环	33
3.2.4 蒸气压缩式制冷饱和循环	34
3.2.5 饱和循环的热功计算	35
3.3 提高饱和循环性能的有效途径	38
3.3.1 饱和循环与逆卡诺循环的差异	38
3.3.2 饱和循环的节流损失和过热损失	39
3.3.3 性能提高途径1: 节流前过冷	40
3.3.4 性能提高途径2: 回热循环	41
3.3.5 性能提高途径3: 多级压缩循环	43
3.3.6 性能提高途径4: 复叠式循环	48
3.4 蒸气压缩式制冷实际循环特性分析	48
3.4.1 工况变化对制冷性能的影响	48
3.4.2 实际循环中的传热与流动损失	50
3.4.3 制冷循环内部损失的熵分析法	52
3.4.4 制冷循环内部损失的焓分析法	54
本章习题	57
本章参考文献	66
第4章 蒸气压缩式制冷压缩机	67
4.1 往复式制冷压缩机的结构与种类	67
4.1.1 往复式制冷压缩机的结构	67
4.1.2 往复式制冷压缩机的种类	71
4.2 往复式制冷压缩机的制冷量	74
4.2.1 往复式压缩机的工作过程	74
4.2.2 理想压缩机的制冷量	74
4.2.3 压缩机排气量影响因素分析	75
4.2.4 实际压缩机的容积效率	77
4.2.5 往复式压缩机的制冷量	81
4.3 往复式制冷压缩机的功率	81
4.3.1 往复式压缩机的功率	81
4.3.2 往复式压缩机的性能指标	83
4.3.3 往复式压缩机的工作与特性	83

4.4	螺杆式制冷压缩机的结构与特征	85
4.4.1	螺杆式压缩机的构造	85
4.4.2	螺杆式压缩机的分类	88
4.4.3	螺杆式压缩机的特点	92
4.4.4	螺杆式压缩机的发展	93
4.5	螺杆式制冷压缩机的制冷量与功率	93
4.5.1	螺杆式制冷压缩机的工作过程	93
4.5.2	螺杆式压缩机的排气量	97
4.5.3	螺杆式压缩机的容积效率与制冷量	98
4.5.4	螺杆式压缩机的功率	98
4.6	螺杆式压缩机的能量调节	100
4.6.1	螺杆式压缩机的滑阀调节	100
4.6.2	螺杆式压缩机的柱塞阀调节	103
4.6.3	螺杆式压缩机的内容积比调节	103
4.7	离心式制冷压缩机的结构与特点	105
4.7.1	离心式压缩机的结构与工作原理	105
4.7.2	离心式制冷压缩机的分类	110
4.7.3	离心式制冷压缩机的发展	110
4.8	离心式制冷压缩机能量损失与轴功率	112
4.8.1	离心式压缩机的能量损失	112
4.8.2	离心式压缩机热力计算方程	115
4.8.3	离心式压缩机的轴功率	118
4.8.4	离心式压缩机的最佳叶片形式	120
4.8.5	离心式压缩机的最大圆周速度	121
4.9	离心式制冷压缩机的特性与调节	122
4.9.1	离心式制冷压缩机的特性	122
4.9.2	离心式压缩机制冷量随工况变化关系	125
4.9.3	离心式压缩机制冷量调节方法	125
4.10	滚动转子式制冷压缩机	127
4.10.1	滚动转子式压缩机结构与工作过程	127
4.10.2	滚动转子式压缩机的种类及特点	130
4.10.3	滚动转子式压缩机的制冷量与功率	131
4.10.4	滚动转子式压缩机的能量调节	133
4.11	涡旋式制冷压缩机	135
4.11.1	涡旋式压缩机结构与工作过程	135
4.11.2	涡旋式压缩机的种类及特点	137
4.11.3	涡旋式压缩机的制冷量与功率	139
4.11.4	涡旋式压缩机的能量调节	140
	本章习题	140

本章参考文献	142
第5章 制冷系统的冷凝器与蒸发器	143
5.1 冷凝器的种类与特点	143
5.1.1 水冷式冷凝器	143
5.1.2 空冷式冷凝器	145
5.1.3 蒸发式冷凝器	146
5.2 冷凝器设计计算方法	147
5.2.1 冷凝热量和平均传热温差	148
5.2.2 冷凝换热管及管束效应	150
5.2.3 冷凝器结构及管程计算	155
5.2.4 冷凝器换热系数的确定	157
5.2.5 冷凝器传热面积计算图解法	161
5.2.6 冷凝器冷却介质流动阻力	162
5.3 常用冷凝器设计计算案例	162
5.3.1 卧式冷凝器设计计算	162
5.3.2 空冷冷凝器设计计算	170
5.3.3 板式冷凝器设计计算	176
5.3.4 蒸发式冷凝器设计计算	184
5.4 蒸发器的种类与特点	189
5.4.1 满液式蒸发器	189
5.4.2 干式蒸发器	190
5.4.3 再循环降膜蒸发器	195
5.5 蒸发器设计计算方法	195
5.5.1 制冷量与平均传热温差	195
5.5.2 蒸发器换热管与沸腾换热	196
5.5.3 蒸发器传热系数的确定	204
5.5.4 蒸发器结构与传热面积计算	207
5.5.5 载冷剂的流量和阻力	208
5.6 常用蒸发器设计计算案例	209
5.6.1 干式蒸发器设计计算	209
5.6.2 满液式蒸发器设计计算	215
5.6.3 冷却空气蒸发器设计计算	220
5.6.4 板式蒸发器设计计算	226
本章习题	234
本章参考文献	236
第6章 制冷剂管路系统及功能部件与设备	238
6.1 制冷剂管路系统形式	238
6.1.1 制冷剂管路系统基本构成	238
6.1.2 典型制冷剂管路系统流程	240

6.1.3	蒸发器供液系统典型方式	245
6.2	节流机构工作原理与特性	248
6.2.1	节流机构的种类	248
6.2.2	手动节流阀原理与特性	249
6.2.3	浮球膨胀阀原理与特性	249
6.2.4	热力膨胀阀原理与特性	251
6.2.5	电子膨胀阀原理与特性	253
6.2.6	毛细管节流原理与特性	255
6.3	制冷剂管路系统中的功能部件与设备	258
6.3.1	制冷剂管路系统中的安全保护部件	258
6.3.2	制冷剂管路系统的功能调节部件	263
6.3.3	气液分离与干燥过滤处理设备	270
6.3.4	制冷剂中的润滑油处理设备	273
6.3.5	制冷剂中的不凝性气体处理设备	277
6.4	制冷剂系统的管路设计	280
6.4.1	管路系统的设计原则	280
6.4.2	管路系统管材的确定	283
6.4.3	管路系统的阻力计算	284
6.4.4	典型制冷剂系统的管径确定	287
6.5	制冷剂系统管路的防护	291
6.5.1	制冷剂管路系统的隔热	291
6.5.2	制冷剂管路系统的防潮与隔汽	292
	本章习题	294
	本章参考文献	295
第7章	制冷系统的安全保护与自动控制	296
7.1	制冷系统运行安全的自动保护	296
7.1.1	制冷压缩机的自动保护	296
7.1.2	制冷常用自动保护部件	301
7.2	蒸发器的自动控制	304
7.2.1	蒸发器的双位调节	304
7.2.2	蒸发器的台数调节	304
7.2.3	蒸发器的蒸发压力调节	306
7.2.4	蒸发器的供液量调节	307
7.3	压缩机的自动调节	315
7.3.1	压缩机启停双位调节	316
7.3.2	压缩机缸数或台数调节	316
7.3.3	压缩机吸气节流调节	319
7.3.4	压缩机热气旁通调节	319
7.3.5	压缩机变转速调节	323

7.4	冷凝器的自动调节	323
7.4.1	水冷式冷凝器的压力调节	323
7.4.2	风冷式冷凝器的压力调节	325
7.5	典型制冷系统的运行控制	326
7.5.1	制冷系统运行前的准备及试运行	326
7.5.2	小型商用制冷系统的控制调节	330
7.5.3	直膨式空调制冷系统的控制调节	332
7.5.4	螺杆式冷水机组的控制调节	334
7.5.5	热泵式空调器的计算机自动控制	336
7.5.6	VRV 空调系统的计算机自动控制	340
7.6	制冷系统的故障分析与对策	344
7.6.1	制冷系统的故障分析	345
7.6.2	常用制冷机组故障排除对策	345
	本章习题	349
	本章参考文献	350
第 8 章	溴化锂吸收式制冷	351
8.1	吸收式制冷原理及发展概述	351
8.1.1	吸收式制冷的原理及特点	351
8.1.2	吸收式制冷循环的热力系数	353
8.1.3	吸收式制冷技术发展概述	354
8.2	溴化锂水溶液的性质	355
8.2.1	溴化锂水溶液的物理特性	355
8.2.2	溴化锂水溶液的腐蚀性	359
8.2.3	溴化锂溶液的热力图表	360
8.3	单效溴化锂吸收式制冷机	363
8.3.1	单效溴化锂吸收式制冷机工作原理	363
8.3.2	单效溴化锂吸收式制冷机结构特点	366
8.3.3	单效溴化锂吸收式制冷机热力计算	369
8.3.4	单效溴化锂吸收式制冷性能影响因素	374
8.4	双效溴化锂吸收式制冷机	377
8.4.1	双效溴化锂吸收式制冷机工作原理	377
8.4.2	双效溴化锂吸收式制冷机结构特点	383
8.4.3	双效溴化锂吸收式制冷机热力计算	383
8.4.4	双效溴化锂吸收式制冷机的性能	389
8.5	直燃型溴化锂吸收式冷热水机组	389
8.5.1	冷却水回路用作热水回路的直燃型冷热水机组	390
8.5.2	热水和冷水共用同一回路的直燃型冷热水机组	391
8.5.3	专设热水回路的直燃型冷热水机组	393
8.6	溴化锂吸收式制冷机组的自动控制	394

8.6.1	安全保护系统	394
8.6.2	能量调节系统	396
8.6.3	启停控制流程	398
8.6.4	计算机自动控制	399
	本章习题	402
	本章参考文献	404
第9章	建筑冷源工程	405
9.1	载冷剂种类与制冷量输送	405
9.1.1	载冷剂种类	405
9.1.2	制冷量输送系统形式	409
9.2	建筑冷源系统设计	410
9.2.1	常用冷源设备及选择计算	410
9.2.2	空调冷水系统设计	417
9.2.3	空调冷却水系统设计	425
9.2.4	空调水系统管路水力计算	429
9.2.5	蓄冷空调系统设计	433
9.3	建筑冷源方案经济性分析	447
9.3.1	建筑冷源规划基本思路	447
9.3.2	建筑冷源选择原则	447
9.3.3	建筑冷源技术经济性分析	451
9.4	建筑冷源监测控制系统	454
9.4.1	建筑冷源监测控制需求	454
9.4.2	水泵工况调节与联合运行	455
9.4.3	建筑冷源监控系统组成及通信网络	459
9.4.4	建筑冷源监控系统设计	465
9.5	制冷机组与制冷系统性能测试	471
9.5.1	测试原理	472
9.5.2	测试方法	472
9.5.3	测试数据处理	474
9.6	制冷机组与系统性能测试实践教学案例	475
9.6.1	制冷循环原理与循环系统认知实践	475
9.6.2	制冷机组性能测试实践	482
	本章习题	487
	本章参考文献	488
附录	常用制冷剂相关物性参数	489
附录1	制冷剂的标准符号	489
附录2	R22的lg <i>p</i> - <i>h</i> 图	490
附录3	R123的lg <i>p</i> - <i>h</i> 图	491
附录4	R134a的lg <i>p</i> - <i>h</i> 图	492

附录 5	R717 的 $\lg p-h$ 图	496
附录 6	R407c 的 $\lg p-h$ 图	494
附录 7	R410a 的 $\lg p-h$ 图	495
附录 8	常用制冷剂的基本热力性质参数	496
附录 9	R22 饱和状态下的热力性质表	497
附录 10	R123 饱和状态下的热力性质表	500
附录 11	R134a 饱和状态下的热力性质表	503
附录 12	R717 饱和状态下的热力性质表	506
附录 13	R22 过热状态下的热力性质表	509
附录 14	R123 过热状态下的热力性质表	515
附录 15	R134a 过热状态下的热力性质表	520
附录 16	R717 过热状态下的热力性质表	525

第 1 章 绪 论

1.1 建筑的供冷需求

1.1.1 空调冷负荷

建筑作为人类休养生息的基本场所，通过围护结构、空气渗透及专用系统，时刻与室外环境进行着物质和能量的交换，构建了可以满足人们生产、生活、工作和学习要求的建筑室内环境。在此过程中，某一时刻由建筑内外热源进入室内环境的热量总和构成了建筑的得热量，为了维持一定的室内温湿度设定值而在某时刻需要从室内除去的热量构成了建筑的冷负荷。此外，为保证室内空气卫生要求，需要从室外引入一定量的新风，此部分新风在夏季也会形成新风冷负荷。

上述建筑冷负荷和新风冷负荷就成了建筑夏季供冷的最直接需求——空调冷负荷。另外，内部发热量较大的大型建筑在冬季和过渡季节，也可能有供冷需求，比如，具有大面积内区的大型商业建筑、程控交换机房和网络服务器机房建筑等。图 1-1 给出了空调冷负荷构成，明晰了建筑供冷需求的原因。

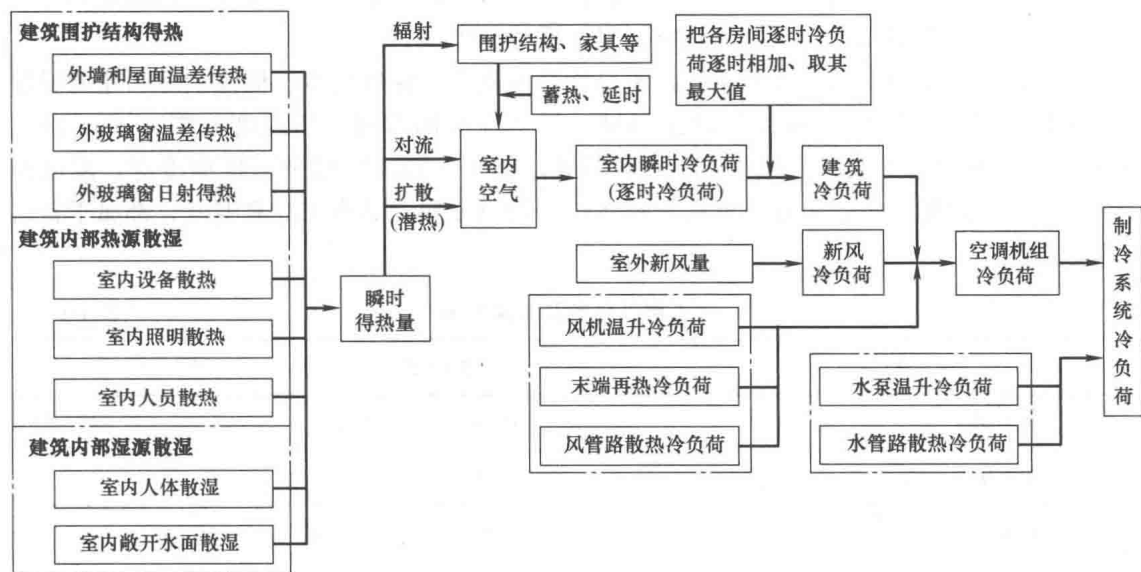


图 1-1 建筑空调冷负荷及其供冷需求^[1]

1.1.2 制冷的概念

建筑的供冷需求自古至今历史悠久。人类居所（原始时期还称不上建筑）的避暑降温

始于建筑被动式的通风、遮阳、隔热等措施，在距今两千多年的吐鲁番交河故城，古车师人在房屋侧壁上开凿了通风口与旁边的水井相通，利用深井水蒸发冷却产生的凉气来防暑降温（见图 1-2）。我国《艺文志》记载，秦国“以水晶为柱拱，内实以冰”建造了五宫殿，并“遇夏开放”，这可谓我国最早的主动式“空调房间”。中世纪古西班牙摩尔王在其宫殿中采用了溪水蒸发冷却降温技术。上述用于室内降温的深井水、溪水和冰均来自自然界，称为天然冷源。此外，室外冷空气、雪、海水等也可以作为天然冷源用于室内降温。

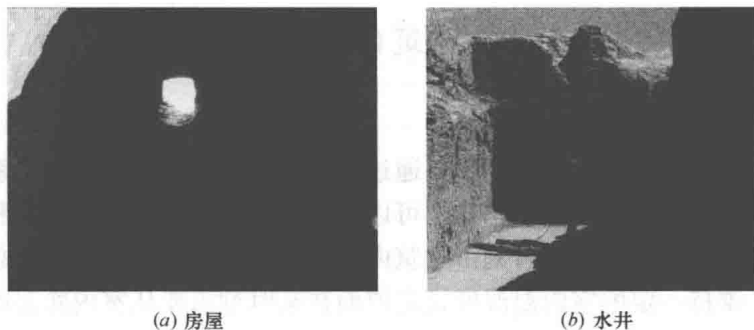


图 1-2 交河故城的房屋及隔壁水井

在实际应用中，天然冷源受地理位置、季节和环保等条件的限制，不便获得低于环境温度、特别是低于 0°C 的温度，因此，天然冷源的应用受到很大限制。于是，人们开始了探索人工制冷的途径。

制冷就是将某一空间（或物体）内多余的热量移送到周围环境，从而冷却该空间，并保持其温度在所要求的范围之内。制冷应包括两个过程：一是将空间冷却，如将冰箱冷藏室温度从 20°C 冷却到 5°C ；二是使该空间温度保持下去。

根据制冷温度的不同，人工制冷技术分为普通制冷、深度制冷、低温制冷和超低温制冷，其温度范围见表 1-1。在民用建筑领域，舒适性空调房间全年温度范围为 $18\sim 28^{\circ}\text{C}$ （相对湿度不超过 65%）；在食品冷冻冷藏领域，低于 -17.8°C 以下为低温冷冻，温度在 $1.6\sim 7.2^{\circ}\text{C}$ 之间称为中温冷藏。可见，舒适性空调温度和食品冷冻冷藏温度，都属于普通制冷的范围。

人工制冷分类及温度范围

表 1-1

分 类	温度范围
普通制冷	$120\text{K}(-153^{\circ}\text{C})$ 以上
深度制冷	$20\sim 120\text{K}(-253\sim -153^{\circ}\text{C})$
低温制冷	$0.3\sim 20\text{K}(-272.7\sim -253^{\circ}\text{C})$
超低温制冷	$0.3\text{K}(-272.7^{\circ}\text{C})$ 以下

根据实现制冷的途径不同，人工制冷又分为相变制冷、气体绝热膨胀制冷、温差电制冷、热声制冷等。在民用建筑领域，空气调节所要求的制冷常用途径是相变制冷，而工程中常用的相变制冷方法主要有蒸汽压缩式制冷和溴化锂吸收式制冷。