



世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材

制冷空调节能技术

张建一 李莉◎编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

免费电子课件

21 世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材

制冷空调节能技术

张建一 李 莉 编著
王如竹 主 审

机械工业出版社

前 言

制冷空调技术的发展水平是衡量一个国家国民经济和人民生活水平的重要标志之一。随着我国国民经济的发展,人民生活水平的提高,制冷空调行业也获得了迅速的发展。与此同时,制冷空调装置的能耗在我国总能耗中的比例也随之不断上升。因此,制冷空调装置的节能已成为社会关注的重要课题。

本书从制冷空调装置的设计、节能改造、操作调节、维护保养和节能管理五个方面,论述各个环节的节能原理和国内外实用节能新技术。其目的是针对国内工程实际,将各种节能技术系统化,构建一个实用的制冷空调装置节能体系,立足于实用。书中内容主要针对中等及中等以上容量(规模)的制冷空调装置(系统),其中的许多节能原理和措施也可用于小型制冷空调装置。

在阐明节能原理的基础上,编写中力求理论联系实际。书中大多数节能方法已在国内外使用,可以直接用于工程实际,获得直接的节能效益。2007年,机械工业出版社出版了作者的《制冷空调装置节能原理与技术》。根据教材的特点,作者重新组织,压缩精简了与其他课程相关的内容,更加突出重点,并补充了近年来国内外的新进展,包括作者的一些研究成果。

本书第1~4章,从设计制冷空调装置的角度,阐述了各个环节的节能原理和方法;第8章介绍了现役制冷空调装置的各种节能改造技术的原理和实践;第9章讨论了制冷空调装置操作调节中的节能技术;第10章是维护管理中的主要节能措施;第11章阐述了节能管理体系。考虑到空调的应用越来越广,由李莉教授撰写第5~7章,专门分析讨论了空调系统及热泵的节能。附录中收录了冷库管理规范、空气调节节能途径与方法、中央空调系统节能运行管理规定、制冷空调节能相关国家标准与规范目录等。

本书在编写过程中,参阅并引用了大量文献,在此谨向这些文献的作者表示诚挚感谢。本书由上海交通大学王如竹教授主审,王如竹教授提出了许多宝贵意见,谨在此表示衷心的感谢。在作者近几年的研究工作中,先后得到国家自然科学基金项目(50746021)、福建省科技厅项目(2009H2006,2008J04013,2006I0022)和厦门市科技局项目(3502Z20103022、3502Z20063018)资助。本书内容包括了这些项目的研究成果。特此向福建省科学技术厅和厦门市科学技术局致谢。同时,感谢研究生陈海洋、张庆岭、詹璠和魏鹏威为本书成稿所作的

贡献。

制冷空调装置的节能已经是社会的热点，但作为一门高校的课程时间尚短，还有待改进完善。本课程相当于制冷空调装置设计的优化，加上运行调节、维护管理的优化。对于制冷空调装置的设计人员、操作人员和管理人员，本书是一本实用性很强的专业技术用书。希望本书的出版，能对我国制冷空调装置的节能起到促进作用，为我国建设节约型社会尽一份力。限于作者的水平，错误和不当之处敬请读者批评指正。

张建一

于厦门集美学村

目 录

前言	
绪论	1
第1章 制冷方式、流程和控制方式的选择与优化	4
1.1 制冷方式的选择	4
1.2 压缩式制冷循环中制冷剂的选择	10
1.3 制冷空调装置的控制方式与节能	20
1.4 带有辅助回路的单级压缩制冷新流程	26
1.5 一次节流与两次节流的选择	30
思考题	31
第2章 制冷空调压缩机与设备的选择	32
2.1 制冷压缩机的特点和选型	32
2.2 制冷压缩机的台数与容量	37
2.3 制冷压缩机能量调节方式	38
2.4 冷凝器	42
2.5 蒸发器	45
2.6 膨胀与节流装置	48
思考题	55
第3章 制冷空调系统热负荷的控制	56
3.1 低温建筑和空调建筑的隔热	56
3.2 太阳辐射热	65
3.3 门洞及通风换气的冷损失	67
3.4 低温建筑和空调建筑内的热负荷	72
思考题	78
第4章 制冷空调装置电气系统的节能	79
4.1 变压器的合理选配	79
4.2 电动机的合理匹配	83
4.3 用户电力系统的功率因数	86
4.4 变频调速技术及其在制冷空调中的应用	95
思考题	101
第5章 空调系统的节能	102
5.1 空调节能评价	102
5.2 空调系统耗能的特点与节能途径	108
5.3 空调系统的节能分析	113
5.4 空调系统的热回收节能技术	132
5.5 空调系统总耗能量计算	137
思考题	142
第6章 蓄冷空调、蒸发冷却空调和温湿度独立控制空调	143
6.1 蓄冷空调的发展背景与特点	143
6.2 蓄冷空调技术原理与应用	145
6.3 蓄冷空调的效益	157
6.4 冰蓄冷与低温送风结合的经济性与能耗	159
6.5 蒸发冷却空调	163
6.6 温湿度独立控制空调	166
思考题	169
第7章 热泵节能技术与可再生能源利用	170
7.1 热泵节能技术	170
7.2 可再生能源利用	173
7.3 吸附式制冷及其进展	178
思考题	179
第8章 制冷空调装置的节能技术改造	180
8.1 压缩机所匹配的电动机的更新	180
8.2 电动机的磁性槽泥改造	182
8.3 电动机的 Δ -Y转换改造	184
8.4 用户电力负荷曲线的改进和变压器节能改造	187
8.5 水泵及水系统的节能改造	188
8.6 风机与风机系统的节能改造	191
8.7 隔热层的维修改造	193
8.8 盐水制冰装置的节能改造	195

8.9 异步电动机节电器及其应用	197	思考题	245
8.10 交流接触器的节能运行技术	198	第 11 章 制冷空调装置节能体系的建设	
8.11 废热(废冷)的回收利用	199	与管理	247
思考题	204	11.1 能源计量	247
第 9 章 制冷空调装置运行调节中的		11.2 制冷空调装置的工作日记	248
节能技术	205	11.3 能源统计分析 with 制冷运行指标	
9.1 制冷空调系统主要运行参数及其		及分析	252
控制	205	11.4 产品电耗定额的制定与管理	256
9.2 制冷系统的调整操作	210	11.5 制冷空调装置用户节能管理体系	
9.3 制冷系统不正常情况的分析和		的建设	259
排除	213	11.6 宏观节能管理体系的建设	260
9.4 制冷空调系统运行调节中的节能		思考题	264
技术	216	附录	265
思考题	224	附录 A 冷库管理规范(试行)	265
第 10 章 制冷空调装置的维护和		附录 B 冷库管理检查评比办法	270
保养	225	附录 C 空气调节节能途径与方法	271
10.1 制冷系统的维护和保养	225	附录 D 深圳市中央空调系统节能运行维护	
10.2 制冷压缩机的维护和检修	231	管理暂行规定	272
10.3 冷凝器和蒸发器的操作和维护	234	附录 E 评价企业合理用电技术导则	278
10.4 制冷空调装置中相关设施的维护	238	附录 F 制冷空调节能相关国家标准与规范	
10.5 制冷空调装置运行维护的综合		目录	280
管理	242	参考文献	283

绪 论

人类利用天然冷源来制冷已有悠久的历史。早在 3000 多年前,我国《诗经》上就有冬季采集冰雪储藏,到夏季取出降温的记载。但采用天然冷源,难以得到 0℃ 以下的低温,还要受到区域、季节等条件的限制,远远不能满足社会发展的需要。

工程技术上的人工制冷空调,就是利用一定的装置(制冷装置),消耗一定的能源,强制地使某一对象(空间或物体)的温度低于周围环境介质的温度,并维持这个低温的过程。

人工制冷技术是从 19 世纪中叶开始发展的。1834 年,英国人波尔金斯制成了用乙醚作制冷剂的一台制冷机。1844 年,美国人高斯发明了空气压缩式制冷机。1862 年,法国人卡尔里制成吸收式制冷机。1874 年,德国人林德发明了世界上第一台氨压缩机,使制冷技术进入实际应用的广阔天地。人工制冷不受季节、区域的限制,可以根据需要制取不同的低温。近 50 年来,随着现代科技的迅速发展,制冷技术已经成为现代社会不可缺少的技术,并且正在国民经济、人民生活、国防科研等领域发挥着日益重要的作用。

食品工业是应用制冷技术最早的部门。由于肉类、水产品、禽类、果蔬等易腐食品的生产,有较强的季节性和地区性,为了调剂旺、淡季节,保障供给,就需要将食品进行冷加工、冷藏及冷藏运输。这就需要制冷装置来装备冷库、冷藏车船等。在现代食品工业中,食品从生产、储藏到运输、销售,始终保持在低温状态。这种完整的冷藏网络称为冷链。冷链是保证食品质量,减小生产及分配过程中损耗的关键。

在石油化工,有机合成(如橡胶、塑料、化纤、药料、染料等)装置,基本化工(酸、碱等)工业中的分离、结晶、浓缩、提纯、液化等控制反应温度单元操作中,都要用到制冷技术。

在空调方面,冶金、纺织、印刷、精密仪表、电子工业等工厂,以及各种实验室、计量室,为了保证必要的恒温恒湿,需要进行空气调节,制冷则是空调装置中不可缺少的组成部分。20 世纪 90 年代以来,随着我国经济的发展和水平的提高,舒适性空调在住宅、公共建筑领域及交通工具中的应用得到迅猛发展。空调中应用的制冷装置规模已经大大超过食品工业,成为制冷应用最多的领域。

在产品性能试验、建筑工程、医药生产和医疗、农牧业、体育事业方面,都已广泛应用制冷技术。在许多近代尖端科学技术中,卫星通信、高速电子计算机、激光、超导、红外技术等,都离不开制冷技术。

制冷空调必须消耗能量。20 世纪 70 年代以来,能源问题已被列为世界五大问题之一。随着制冷空调技术应用的日益广泛,制冷空调装置消耗的能源也在迅速增加。制冷空调装置的节能正在引起人们越来越广泛地重视。

新中国成立以来,我国能源工业得到巨大发展。2007 年,我国一次能源生产总量 23.7 亿 t 标准煤,是改革开放初的 3.8 倍,约占全球能源生产总量的 14%。2008 年年底电力总装机达到 7.92 亿 kW,仅次于美国^[1]。但是,我国的能源形势仍然十分严峻。到 2007 年,中西部地区还有 1000 多万人口没有用上电^[1]。2008 年,全年共有 22 个省级电网的局部地区和部分时段出现短时电力紧张或拉限电情况^[1]。能源短缺一直是制约我国经济发展的一

个重要因素。

更加严重的问题是,我国的人均能源资源拥有量远低于世界平均水平。国务院2007年12月发布的《中国的能源状况与政策》白皮书指出,中国拥有较为丰富的能源资源,但人均能源资源拥有量较低。其中,煤炭和水力资源人均量相当于世界平均水平的50%,石油、天然气人均量仅为世界平均水平的1/15左右。并且,我国能源资源的地域分布明显不均,80%的能源资源分布在西部和北部地区,而60%的能源消费在经济比较发达的东部和南部地区,形成了西煤东运、北煤南运的巨大运输压力。煤炭运量占铁路运量的40%。

在能源短缺的同时,我国又存在着能源有效利用率低的矛盾。能源利用率是指有效利用的能量与能源所具有的能量之比。它是衡量能源利用水平的综合指标。我国的能源利用率目前仍然很低,比以发达国家为主要成员的经济合作与发展组织(OECD)国家落后约20年,利用率落后10个百分点^[2]。可见,我国有极大的节能潜力。

应该强调说明,能源不仅是资源问题,同时与环境问题紧密联系。能源的生产利用对当地的环境和全球大气环境会产生重要的影响。尤其是我国发电以煤炭为主,2010年燃煤的发电量占73.68%。据测定,燃烧一吨煤平均排放二氧化碳490kg,排放粉尘13.6kg,二氧化硫14.8kg^[3]。由于大量燃烧煤,我国二氧化硫和二氧化碳排放量已经分别居世界第一位和第二位,面临巨大国际压力。因此,节能的同时也在保护人们的生存和发展环境。

显然,我国人均能源资源占有量少,能源产地远离消费地区的基本情况无法改变。要保证我国国民经济持续发展,单凭加速投资于能源生产设施是不可能实现的。这不仅是因为我国能源资源有限,而且能源开发投资大、时间长,短期内很难有持久的大幅度增加,同时还受到运输和环境的制约。例如,不论是一个大型煤矿或一个相当规模的油田,还是一个大型水电站或一座核电站,从勘探、设计到建成投产,一般都要8~10年,甚至10年以上的时间。因此,应当开源与节流并举,节能是缓解我国经济发展中能源供需矛盾不可缺少的措施。

节能的中心思想是:采用技术上可行、经济上合理,以及环境和社会可接受的措施,提高能源效率,更有效地利用能源。我国在20世纪80年代,制定了能源建设“开发和节约并重,近期要把节能放在优先地位”的总方针,颁布了各种节能法规政策。1997年11月,第八届全国人大通过了《中华人民共和国节约能源法》,2007年10月我国颁布了新修订的《中华人民共和国节约能源法》,并从2008年4月开始施行。

中国经济未来能否保持快速增长,其中一个重要的先决条件就是能源供应是否充足。2006年9月,国务院印发了《国务院关于加强节能工作的决定》(国发[2006]28号),要求从战略和全局的高度,充分认识加强节能工作的极端重要性和紧迫性。国家“十二五”规划纲要明确规定,“十二五”期间单位国内生产总值能源消耗降低16%,单位国内生产总值二氧化碳排放降低17%^[4]。

我国已发展成为世界制冷空调设备生产大国,许多产品产量居世界前列,现有制冷空调设备制造企业1000余家。如果计入制冷空调设备制造所需专用配套件、专用材料的生产企业,我国制冷空调工业企业数量已达1800家左右^[5]。

制冷空调是耗能大的行业之一。目前广泛采用的压缩式制冷装置消耗大量的电能。2002年,我国冷冻空调设备用电负荷已占到电力总负荷的20%以上^[6]。我国许多城市夏季空调耗电量超过总用电量的40%^[7]。空调住宅能耗约为一般住宅能耗的6~7倍^[7]。因此,制冷

空调节能已经在我国节能工作中具有举足轻重的地位。

制冷空调的节能包括了制冷空调装置的设计、操作调节、维护管理及技术改造各个环节。有些人认为，节能只是节省部分的能源，减少一点运行费用，意义不太大。大量事实表明，制冷空调节能的效益是相当可观的。设计不合理、操作管理不善的制冷空调装置，其能耗水平可比节能的装置高 2~3 倍。

一套优化节能的制冷空调装置必然处于高效运行，能达到最大制冷生产能力，并保证所需的低温。同时，各机器设备都处于最佳运行状态，安全可靠提高，零部件的磨损减小，维修费用下降，使用寿命延长。因此，制冷空调装置的节能不仅对用户具有直接的经济效益，还具有多方面的综合经济效益。同时，节能还具有节约资源、保护环境的重大社会效益，涉及每一个公民。广大制冷空调工作者对此应有充分的认识，高度重视节能工作。

第 1 章

制冷方式、流程和控制方式的选择与优化

1.1 制冷方式的选择

在设计选择制冷装置时，首先要确定制冷的方式。目前人工制冷主要有四种方法，即相变制冷、气体膨胀制冷、涡流管制冷和热电制冷。每种制冷方法各有其特点。显然，只有针对制冷对象的具体条件，选择合理的制冷方法，才能满足制冷的要求，进而实现制冷中的节能。因此，对各种制冷方法应有深入的认识和理解。

1.1.1 常用相变制冷方法的特点

相变是指物质集聚态的变化，例如，冰变成水就是一种相变过程。物质发生相变时，必然伴随着一定数量的能量交换，这是一种物理现象。相变制冷就是利用某些物质相变时的吸热效应，达到降温的效果。

固体物质的溶解或升华，液体的汽化，都是吸热的相变过程，通过这些过程吸收热量，就可获得低温。例如，在大气压力下冰融解的温度为 0°C ，每 kg 冰可吸收 334.96kJ 的热量；干冰(固态二氧化碳)在大气压力下升华温度为 -78.9°C ，每 kg 干冰可吸热 573.62kJ。由于冰和干冰只能单次使用，不能连续使用，因此严格讲只是用冷，还不能称为制冷。

液体转化为蒸气称为汽化。在现代制冷技术中，广泛利用制冷剂(液体)在低压下的汽化过程来制冷。利用这种原理的制冷方式可分为蒸气压缩式制冷、吸收式制冷和蒸气喷射式制冷。

1. 蒸气压缩式制冷

在蒸气压缩式制冷中，工质(制冷剂)的蒸气首先被压缩到比较高的压力，被外部冷却介质(冷却水或空气)冷却而转变为液体，再经节流，使压力和温度同时降低，利用低压力下工质液体的汽化即可吸热制冷。汽化后的蒸气再由压缩机吸入压缩，不断循环。采用这种制冷方法时，所用的工质必须具有这样的特性：在常温和普通低温下能够液化。图 1-1 所示为蒸气压缩式制冷的循环系统图及其 $T-s$ 图和 $p-h$ 图。

蒸气压缩制冷的循环过程可以采用各种不同类型的压缩机，例如活塞式、螺杆式或离心式压缩机。蒸气压缩式制冷从 19 世纪 70 年代开始发展，至今已有 100 多年的历史，已发展到相当完备的程度。由于其具有许多明显的优点，因此蒸气压缩式制冷是目前国内外应用最广泛的制冷方式。其主要的特点如下：

1) 能达到的制冷温度范围广。从稍低于环境温度至 -150°C 均可实现, 可根据不同的温度要求选择不同的制冷剂和压缩级数。表 1-1 列出不同压缩级数和不同的制冷剂所能达到的最低蒸发温度。

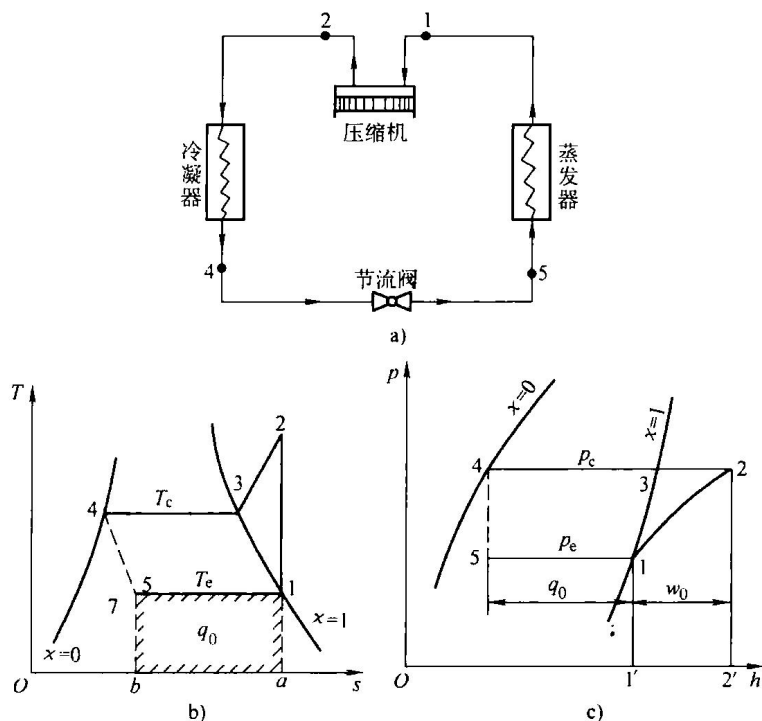


图 1-1 蒸气压缩式制冷

a) 单级压缩式制冷循环系统 b) $T-s$ 图 c) $p-h$ 图

表 1-1 压缩式制冷能达到的最低蒸发温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

压缩级数	制冷剂	冷凝温度		
		30	35	40
单级(压缩比=8)	R717	-25	-22	-20
	R22	-36	-34	-31
两级	R717	-65		
	R22	-75		
单级复叠	R22 + R13	-85 ~ -90		
单—两级复叠	R22 + R13	-110		
三级复叠	R22 + R13 + R14	-110 ~ -140		
单—两—单级复叠	R22 + R13 + R14	-110 ~ -140		

2) 单机容量范围大, 规格多。蒸气压缩式制冷机的单机制冷量, 从最小的 100W 左右到数千 kW, 有大、中、小各种容量, 可以根据需要选择, 非常方便。

3) 在中、小容量范围, 设备比较紧凑, 可适应不同场合的需要。广泛应用于空气调节、冰箱、食品冷加工、冷藏、石油、化工等各领域。

4) 效率较高。蒸气压缩式制冷的最主要优点, 是在普冷领域的温度范围内, 制冷系数

较大,效率较高。例如,在冷凝温度 40°C ,蒸发温度 5°C 时,理论制冷系数可达4.26,实际制冷系数为2.3左右。因此,蒸气压缩式制冷的运行经济性较高。

5) 当制冷温度较低时,其综合性能变差。通常当制冷温度低于 -70°C 时,压缩级数增加。机器变得复杂,可靠性低,维护使用麻烦,成本也大大提高。

6) 要使用专门的制冷剂,这些制冷剂往往对环境有污染,对人体有害。例如常用的氨,会燃烧、爆炸,有毒和强烈刺激性气味。氯氟烃(CFC)、含氢氯氟烃(HCFC)制冷剂,对大气臭氧层有破坏作用。

在制冷技术的应用中,以 -50°C 以上的应用占绝大多数,故压缩式制冷在 -70°C 以下的缺点对使用影响不大。由于以上优点,压缩式制冷是目前制冷空调技术中的主流,在各行各业及生活中获得了广泛的应用。

2. 吸收式制冷

吸收式制冷也是利用液体(制冷剂)汽化来实现制冷的。其主要特点是以热能为动力,利用溶液的特性来完成工作循环。图1-2所示为氨水吸收式制冷原理图。

吸收器6中的浓氨水由溶液泵7升压后,送入发生器4。浓氨水在发生器内被加热,产生较高温度和较高压力的氨蒸气,进入冷凝器3被凝结为液体氨。液体氨经过膨胀阀2节流,降温降压后进入蒸发器1,从通过蒸发器的冷冻水(又称载冷剂)中吸取热量而蒸发,冷冻水即可作为冷源使用。发生器4中剩余的稀氨水通过减压阀5降压后,送入吸收器6进行喷淋,稀氨水在喷淋过程中吸收从蒸发器1引来的低压氨蒸气,成为浓氨水,然后继续循环。

吸收式制冷的工作原理虽然早在18世纪70年代就已提出,但直到1859年才试制成功第一台吸收式制冷机,即氨水吸收式制冷机。氨水吸收式制冷由于效率(热力系数)较低等原因,其应用受到限制。

随着制冷技术的发展,1945年出现了溴化锂吸收式制冷机,开创了吸收式制冷机的新局面。溴化锂吸收式制冷以水为制冷剂,以溴化锂溶液为吸收剂。由于溴化锂吸收式制冷机效率较高,并具有许多独特的优点,特别是节能效果好,引起了人们广泛的重视。氨水吸收式和溴化锂吸收式制冷装置具有一些共同的特点,但也有许多不同的特点。下面分别介绍。

氨水吸收式制冷装置有如下特点:

1) 耗电少。由于其耗能主要为热能,耗电量大大少于压缩式制冷装置。国内20世纪80年代开发的利用地热的实用装置^[8]用于冷库时,其耗电量比氨压缩式制冷节省65%。

2) 可利用废热、余热。由于吸收式制冷主要以热能为动力,可以直接利用工业废热和余热。

3) 变负荷容易,调节范围广。可在10%~100%范围内调制冷量。

4) 单级即可达到 -40°C 的低温。

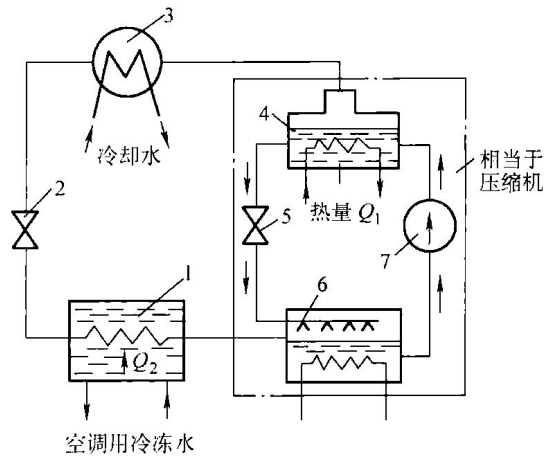


图1-2 氨水吸收式制冷原理图

1—蒸发器 2—膨胀阀 3—冷凝器 4—发生器
5—减压阀 6—吸收器 7—溶液泵

- 5) 可以露天布置, 操作方便, 易于维护管理。
- 6) 运行噪声低, 可靠性高。装置中除了泵外, 没有运动部件。
- 7) 换热设备面积大, 耗钢材量大。
- 8) 冷却水消耗量大。
- 9) 一次性投资大于活塞式制冷机。
- 10) 效率较低。
- 11) 没有系列成套的产品, 必须现场设计。

根据以上特点, 氨水吸收式制冷适用于有余热可利用或燃料低廉的场合。用蒸汽加热的氨水吸收式制冷机, 适用于电、热、冷相结合的企业; 利用化工废热的氨水吸收式制冷机, 适用于在化工过程高温放热, 而在低温下又需要冷量的工艺过程; 直接燃烧的氨水吸收式制冷机, 其制冷温度可达 $-20 \sim -60^{\circ}\text{C}$ 。

溴化锂吸收式制冷机有如下特点:

1) 以热能为动力, 耗用电能很少, 耗电量仅为蒸汽压缩式的 $3\% \sim 5\%$ 。对热源要求不高, 可以利用各种废热、余热。例如高于 20kPa 表压的蒸汽、高于 75°C 的热水, 以及地热、太阳能等均可利用。利用废热、余热时具有很好的节电、节能效果。

2) 整个机组除了功率很小的泵外, 没有其他的运动部件, 振动小, 噪声低。

3) 机器处于真空下运转, 无爆炸危险。溴化锂溶液作为工质, 无毒、无臭、无公害、安全可靠, 有利于保护环境。

4) 冷量调节范围宽。随着外界负荷的变化, 一般可在 $20\% \sim 100\%$ 冷量范围内无级调节。即使低负荷运行, 热效率几乎不下降, 性能稳定, 能很好地适应负荷变化的要求。

5) 对外界条件变化适应性强。如标准外界条件为: 蒸汽压力 588kPa 表压, 冷却水进口温度 32°C , 冷媒水出口温度 10°C 的蒸汽双效机。实际运行表明, 在蒸汽压力 $196 \sim 784\text{kPa}$ 表压, 冷却水进口温度 $25 \sim 40^{\circ}\text{C}$, 冷媒水出口温度 $5 \sim 15^{\circ}\text{C}$ 的范围内, 能够稳定运行。

6) 成套出厂, 国内已有蒸气型、热水型、直燃型等系列产品。用户购买的是机组形式, 安装时只需一般校平, 按要求连接气、水、电即可。由于机器运行时振动小, 基础无须防振, 只要考虑静负荷即可。安装位置不限, 可以安装在室外、底层、楼层或屋顶。

7) 制造简单, 操作、维修保养方便。机组中除屏蔽泵、真空泵和真空阀等附属设备外, 几乎都是静止的换热设备, 制造比较容易, 操作比较简单, 机组的维护保养主要是保持其气密性。

8) 用水作制冷剂时, 只能获得 5°C 以上的冷量。在有空气的情况下, 溴化锂溶液对普通碳钢具有强烈的腐蚀性。这不仅影响机组的寿命, 而且影响机组的性能和正常的运转。

9) 机组在真空下运行, 空气容易漏入。即使漏入微量的空气, 也会严重地损害机组寿命, 而且影响机组性能。为此, 制冷机要求严格密封, 这给机器的制造和使用增加了困难。

10) 制冷剂蒸气的冷凝过程和吸收过程均为排热过程, 故机组的排热负荷较大。此外, 对冷却水的水质要求也比较高。在水质差的地方, 应进行专门的水质处理。

根据以上特点, 溴化锂吸收式制冷主要应用于空气调节制冷, 和为生产工艺提供 0°C 以上的冷媒水。由于其运行噪声小, 对能源要求低, 在需要安静和有余热的场合使用更为适宜。当有廉价热源可利用时, 其运行经济性高于压缩式制冷。当有余热、废热可利用时, 其优势最为突出。在以下情况下应优先应用:

1) 在具有大量热能或余热资源的部门, 利用热能或余热制取冷量, 既可减少企业排热的热污染, 又可以节能, 明显提高企业能源综合利用的效率。

2) 与热电厂联合组成热、电、冷三联供系统, 实现能源梯级利用, 提高能源的利用率。

3) 与燃气轮机和余热锅炉组成电、冷联供系统。即发电的燃气轮机排出的高温烟气, 进入余热锅炉产生蒸汽或热水, 驱动吸收式制冷机产生低温冷水。

4) 在生活、工艺流程中已配有锅炉, 而锅炉负荷有余量时, 可选配吸收式冷水机组供冷。

我国的吸收式制冷机在 20 世纪 90 年代获得迅猛的发展。吸收式制冷机的年产量, 从 1991 年的 103 台, 上升到 2000 年的 3800 台, 增加了 36 倍。2000 年的 3800 台中, 直燃机为 2600 台, 占总年产量的 68% 以上^[9]。目前的生产能力可达到 1 万台/年, 实际年产量为 3500~4500 台, 产量位居世界前列。

目前我国吸收式制冷技术的总体水平已接近和达到国际领先水平, 并处于不断创新和发展的过程中。吸收式制冷机已经由单纯的制冷, 发展到可同时供应冷水和热水、供应热水或蒸汽等多种机型(表 1-2)。它已成为我国大型空调设备的主要机型之一, 为不同场合、不同用户提供了更多的选择方案。

表 1-2 吸收式制冷机的分类

分类方式	机组名称	特点和应用
用途	制冷机组	供应 0℃ 以下冷量
	冷水机组	供应冷水
	冷热水机组	交替或同时供应冷水和热水
	热泵机组	供应热水或蒸汽, 或直接处理空气用于空调
工质对	氨/水	氨为制冷剂, 水为吸收剂
	水/溴化锂	水为制冷剂, 溴化锂溶液为吸收剂
	其他	采用其他工质对
驱动热源	蒸汽型	利用蒸汽的潜热
	直燃型	利用燃料(油或气)的燃烧热
	热水型	利用热水的显热
	余热型	利用工业或生活余热
	其他型	利用太阳能、地热等其他热源

随着吸收式制冷技术不断取得进步, 效率和性能不断改善, 蒸气喷射式制冷的应用越来越少。目前, 蒸气喷射式制冷仅在特殊场合仍具有生命力, 其他三种制冷方式——气体膨胀制冷、涡流管制冷和热电制冷——在大中型制冷系统中应用很少, 故本书不进行讨论。

1.1.2 制冷方法选择要点

如上所述, 压缩式和吸收式制冷各有其特点。在工程设计中, 要根据特定的制冷要求选择一种合理的制冷方法, 必须进行深入的调查分析, 全面综合比较才能确定。以下是综合比较中必须考虑的要点。

1. 消耗能量的形式

制冷过程需要消耗大量的能量，因此，从节能的角度，选择制冷方法时首先应考虑能量消耗问题，当要求的制冷量大时更是如此。各种制冷方法中消耗的能量可分为两大类：一类是消耗电能或机械能；另一类是消耗热能。当有廉价热能，尤其是有废热、余热可利用时，首先应考虑采用消耗热能的制冷方法。这对于节能和节电都有重要意义，并且有最佳的经济效益。

2. 应用的温度范围

各种制冷方法各有其适用的低温范围，因此，只有正确地选择了制冷方法，才能满足所设计工程的温度要求。例如，溴化锂吸收式制冷和蒸气喷射式制冷都不能获得 0°C 以下的低温。

3. 一次性投资(初投资)

对于用户而言，在达到相同制冷要求时，显然一次性投资越少越好。实践表明，对于相同的制冷量、相同的温度范围，不同的制冷方法一次性投资是不同的，有时甚至差别很大。参考文献[10]介绍了某纺织厂空调制冷机采用不同机型时的相对价格和运行费相对比值(表1-3)。虽然表1-3所示的价格是多年前的数据，但仍可以说明选择不同的制冷方法(装置)时，一次性投资可能差别很大。因此，除了典型的常规情况外，应该对各种不同的制冷方法、不同方案进行技术经济分析，全面地比较衡量，然后确定最合理的方案。

表 1-3 制冷机类型不同时投资和运行费比较

制冷剂类型	相对价格	运行费对比
蒸气喷射式制冷机	1	1
活塞式制冷机	2.84	0.971
离心式制冷机	3.78	0.813
溴化锂吸收式制冷机	5.75	0.952

注：本表是在空调工况，制冷量1745kW下进行比较的。价格为1996年价格。

4. 运行费

对于制冷量大、全年运行时间长的制冷装置，显然，其运行费的高低比一次性投资更加重要。设计者和用户往往对一次性投资比较重视，对于常年运行费不够重视。由于各种制冷方法特点不同，全年运行管理费也不相同，设计选择时应该对各种方案作细致的分析比较。

5. 运行的可靠性

根据制冷对象的不同，对制冷过程运行的可靠性要求也不同。对于制冷降温过程不允许中断的重要场合，显然应选择可靠性高的制冷方法，防止造成重大损失。

6. 操作维护的方便性

不同的制冷方法，采用不同的制冷装置，它们的操作调节和日常维护的方便性也各不相同。操作维护方便性直接关系到操作维护人数和工作量，即人工费。

7. 安全和环境保护

不言而喻，制冷装置的安全性是一项重要的指标。目前各种制冷方法的工作压力不算太高，人们往往重视不够。应该注意，部分制冷剂对人体有危害，使用这些制冷剂时必须特别注意采取足够安全的措施。我国规定在人口稠密的场合和船舶上，不能使用会燃烧爆炸的有

毒制冷剂。尽管制冷装置中的设备只处于中压或低压，但作为压力容器，同样具有爆炸等危险，应按规定严格管理。

应该强调说明，在目前淘汰 CFC 和 HCFC 类制冷剂的过渡时期，天然制冷剂氨又得到人们的重新评价。虽然氨具有毒性、燃烧性和爆炸性，但它具有优良的热力性质，并且属于环境友好制冷剂。我国冷库长期广泛采用氨作为制冷剂，美国公用冷库采用氨的约占 85%^[11]，发达国家冷库也广泛用氨。国内外长期的工程实践充分说明，只要加强设计和使用中的安全措施，工业制冷系统选用氨作为制冷剂是合理的。

制冷空调装置与保护环境的关系，设计者和用户往往不够重视。现在人们已经逐渐认识到环境与经济可持续发展的关系，并且随着生活水平的提高，对环境质量也提出了更高的要求。因此，在选择制冷空调装置时，应该认真考虑环境保护问题。具体说，有三个方面是必须重视的：①制冷剂对环境，例如对大气臭氧层的破坏性；②制冷剂对任何生物的直接危害性；③制冷空调装置运行的噪声。

显然，不同的制冷空调装置，以上三个方面的指标是不同的，有的指标差别很大。因此，选择制冷方法时，应注意考虑对环境的影响。为了便于比较，现将各种制冷方法的适用范围列于表 1-4。

表 1-4 各种制冷方法的适用范围

制冷及制冷机种类		耗能形式	适用温度范围/℃	单机制冷量/kW	安全性	主要用途
相变 制冷	蒸气压缩式	机械能、电能	-140 以上	0.1 ~ 34890	随工质而定	广泛用于工、农业及民用生活各领域
	溴化锂吸收式	热能(可利用 余热、废热)	5 以上	70 ~ 23260	高	各种工业和民用空调或工艺低温水
	氨吸收式		-50 以上	10 ~ 854(产品)	中	化工工艺过程, 空调
	蒸气喷射式		0 以上	35 ~ 3489	高	工业空调和工艺低温水
气体压缩	空气制冷机		机械能、电能	-150 以上	6 ~ 1163	高
膨胀制冷	气体回热式	机械能、电能	-100 ~ -253	0.0005 ~ 25	高	液氮、红外技术等
涡流管制冷		机械能、电能	-70 以上		高	微型制冷器等
热电制冷		电能	-150 以上	10 ⁻⁶ ~ 3489	高	医用和仪器用、军事装备

1.2 压缩式制冷循环中制冷剂的选择

在制冷装置中不断循环以实现制冷的工作介质，称为制冷剂或制冷工质。在蒸气压缩式制冷中，就是利用制冷剂的相变来转移热量的。它在蒸发器中吸收被冷却物体的热量而汽化；在冷凝器中经过冷却介质(水或空气)的冷却，放出热量而冷凝。制冷剂是实现制冷不可缺少的物质。对于一个实用的制冷装置，制冷剂的不同不仅直接关系到装置的结构形式及操作管理，更直接关系到运行的能耗(经济性)。

1.2.1 制冷剂选择的原则

制冷剂应具备一些基本条件,在选择时可以从热力学、热物理性质、化学性质、经济性及环境保护方面来考虑。

1. 热力学的要求

1) 在大气压力下,制冷剂的蒸发温度要低,这是一个必要条件。

2) 压力适中。在蒸发器内制冷剂的压力最好和大气压力相近,并稍高于大气压力。因为,当蒸发器中压力低于大气压时,外部的空气就可能从不密封处渗漏进来,降低制冷装置的制冷能力。另外,制冷剂在冷凝器中的压力不应过高,一般不应超过1.2~1.5MPa。这样可以减小制冷设备承受的压力,降低对密封性的要求,降低制冷剂渗漏的可能性。

3) 单位容积制冷量应尽可能大。单位容积制冷量是指压缩机吸入 1m^3 的制冷剂蒸气所能产生的冷量,其单位为 kJ/m^3 。在制冷量一定时,单位容积制冷量大,则制冷剂的循环量小,从而缩小压缩机的尺寸和减少压缩机的重量和金属消耗量。不过,对于小型、微型制冷装置,则可以使用单位容积制冷量小的制冷剂,这样可避免机器流道太窄而降低效率,并可避免机器尺寸太小而增加制造加工的难度。

应该说明,同一种制冷剂在不同的蒸发温度和冷凝温度下,其单位容积制冷量是不同的。在相同的温度范围内,不同制冷剂的单位容积制冷量也是不同的。表1-5列出了冷凝温度在 30°C ,蒸发温度为 -15°C 时常用工质的单位容积制冷量。

表1-5 常用工质的单位容积制冷量($t_c = 30^\circ\text{C}$ 、 $t_e = -15^\circ\text{C}$ 时)

工质	R717	R12	R22	R502	R134a	R290	R600	R600a
单位容积制冷量 /(kJ/m^3)	2167.6	1277.9	2098.3	2060.6	1225.7	1807.9	457.4	660.6
相对氨的比值	1	0.59	0.968	0.951	0.565	0.834	0.211	0.305
工质	R123	R227	R32	R404A	R407C	R410A	R744	R507
单位容积制冷量 /(kJ/m^3)	160.7	718.3	1093.7	2063.9	1801.2	3134.9	7905.2	2154.4
相对氨的比值	0.074	0.331	0.505	0.952	0.831	1.446	3.647	0.994

4) 临界温度要高,凝固温度要低。临界温度高,便于用一般的冷却介质(水或空气)进行冷凝。现有大多数制冷剂的临界温度一般在 $50\sim 200^\circ\text{C}$ 之间,所以,它们可以用环境空气或者水去冷凝。低温制冷剂R13的临界温度为 28.8°C ,用一般冷却介质无法冷凝,只能用于复叠式制冷装置的低温部分。

5) 等熵指数 κ 要小。等熵指数 κ 为比定压热容 c_p 和比定容热容 c_v 的比值,即 $\kappa = c_p/c_v$ 。不同制冷剂的等熵指数是不同的。在等熵压缩过程中,工质参数间存在如下关系,即

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (1-1)$$

由式(1-1)可见,在气体初始温度 T_1 和压力比不变时,等熵指数越大,则压缩终了温度 T_2 就越高,即排气温度越高。反之,等熵指数越小,压缩终了的温度就越低。例如,R12的