

制冷空调装置 节能原理与技术

张建一 李莉 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TB657.2/1

2007

制冷空调装置节能原理与技术

张建一 李莉 编著



机械工业出版社

本书取材立足于实用,从制冷空调装置的设计、节能改造、操作调节、维护保养及节能管理五个方面,论述各个环节的节能原理和国内外实用节能新技术。在阐明节能原理的基础上,力求理论联系实际。书中介绍的大多数节能技术已在国内的实践中使用,有些已在不同范围内推广,获得直接的节能效益。本书共有11章,各章都有思考题,便于学习时掌握相关要点。附录中收录了与节能有关的设备管理、运行维护管理、合理用电评价,以及相关国家标准与规范目录。

本书适合于制冷空调装置的设计人员、操作人员和管理人员阅读,也可作为制冷空调专业的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

制冷空调装置节能原理与技术/张建一,李莉编著. —北京:机械工业出版社,2007.1

ISBN 978-7-111-20677-4

I. 制... II. ①张...②李... III. 制冷—空气调节—节能 IV. TB657.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第165196号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:蒋有彩 版式设计:冉晓华 责任校对:樊钟英
封面设计:陈沛 责任印制:洪汉军
北京瑞德印刷有限公司印刷
2007年3月第1版第1次印刷
184mm×260mm·25印张·621千字
0001—4000册
标准书号:ISBN 978-7-111-20677-4
定价:42.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379734

封面无防伪标均为盗版

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着不断地上升。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。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,取材立足于实用。书中介绍的“制冷空调装置”,主要是指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的实践中试用过,有些已在不同范围内推广。多数节能方法和措施,制冷空调装置的设计者和使用者可以直接用于工程实际,获得直接的节能效益。

我于1999年在机械工业出版社出版了《制冷装置节能技术》。本书是在此书基础上,更新了相关内容,重点增加了中央空调装置的节能内容,补充了近年来国内外的新进展。其中包括我在美国留学时实地调研的第一手资料及近年的一些研究成果。

由我编写的第1章至第5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章是维护管理中的节能措施;第11章讨论了节能管理体系。上述各章兼顾了工业制冷和中央空调系统。考虑到空调的应用越来越广,由李莉同志撰写第6章和第7章,专门分析讨论了空调系统的节能。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。

本书在编写过程中,参阅了大量资料,在此谨向所有被引用资料的作者表示感谢。衷心感谢中国制冷学会副理事长吴元炜教授、国内贸易工程设计研究院叶尉南教授级高工、西安工程大学黄翔教授、同济大学陈汝东教授、合肥通用机械研究所张秀平高工对本书的编写提出的宝贵意见和建议。感谢上海冷藏库协会刘龙昌秘书长提供了宝贵资料。同时,感谢研究生厉珂和秘文涛为本书成稿作出的贡献。

在近几年的研究工作中，先后得到福建省科技厅项目（2003H033、D0510022、2006I0022）资助，厦门市科技局项目（3502Z20063018）资助。本书内容包括了这些项目的部分研究成果。特此向福建省科学技术厅和厦门市科学技术局致谢。

这是一本实用性很强的专业技术用书，对于制冷空调装置的设计人员、操作人员和管理人员具有参考价值，也可作为制冷空调专业的教学用书。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

2007年1月

于厦门集美大学

目 录

前言 绪论

第1章 制冷方式、制冷剂和控制方式的选择

1.1 制冷方式的选择	4
1.1.1 各种相变制冷方法的特点	4
1.1.2 气体节流和膨胀制冷	10
1.1.3 涡流管制冷	11
1.1.4 半导体制冷	13
1.1.5 制冷方法选择要点	14
1.2 压缩式制冷循环的设计参数	16
1.2.1 冷凝温度的确定	17
1.2.2 蒸发温度的确定	19
1.2.3 压缩机吸气温度的确定	21
1.2.4 节流前液态制冷剂过冷温度的确定	22
1.2.5 两级压缩制冷循环的中间压力(中间温度)的确定	22
1.3 压缩式制冷循环中制冷剂的选择	25
1.3.1 制冷剂选择的原则	25
1.3.2 制冷剂的热力完善度	32
1.3.3 非共沸混合制冷剂	36
1.4 制冷空调装置的控制方式与节能	37
1.4.1 工业制冷装置的控制方式与特点	38
1.4.2 中央空调系统的控制方式	43
思考题	43

第2章 压缩式制冷循环的形式

2.1 单级压缩制冷的循环形式选择	45
2.1.1 过冷循环	45
2.1.2 过热循环	46
2.1.3 回热循环	47
2.1.4 带有辅助回路的单级压缩制冷新流程	50
2.2 压缩式制冷循环的压缩级数	54
2.2.1 活塞式制冷压缩机的压缩级数	55
2.2.2 离心式制冷压缩机的压缩级数	57

2.2.3 螺杆式制冷压缩机的压缩级数	59
2.3 两级压缩制冷的循环方案与节能	61
2.3.1 两级压缩制冷循环的型式	61
2.3.2 中间冷却型式的选择	64
2.3.3 一次节流与两次节流的选择	65
2.4 制冷系统的供液方式	69
2.4.1 直接膨胀供液系统	70
2.4.2 重力供液系统	71
2.4.3 泵循环供液系统	72
2.4.4 加压供液系统	74
2.4.5 喷射式供液系统	76
思考题	76

第3章 制冷空调压缩机与设备的选择

3.1 制冷压缩机的选型	78
3.1.1 常用制冷压缩机的特点	78
3.1.2 制冷空调压缩机的选型要点	80
3.2 制冷压缩机的台数与容量	83
3.3 制冷压缩机能量调节方式的选择	85
3.3.1 活塞式压缩机的能量调节方式	85
3.3.2 螺杆式制冷压缩机的能量调节	87
3.3.3 离心式制冷压缩机的能量调节	88
3.3.4 制冷压缩机的变速能量调节	89
3.4 冷凝器的选择	92
3.4.1 空气冷却式冷凝器	93
3.4.2 水冷式冷凝器	93
3.4.3 蒸发式和淋水式冷凝器	94
3.5 蒸发器的选择	96
3.5.1 蒸发器的种类及特点	96
3.5.2 蒸发器的选择	97
3.6 节流装置的选择	101
3.6.1 浮球调节阀	101
3.6.2 热力膨胀阀	103
3.6.3 电子膨胀阀	107
思考题	109

第4章 制冷空调系统热负荷的控制

4.1 低温建筑和空调建筑的隔热	111
------------------	-----

4.1.1	隔热材料	111	6.2.5	空气调节的节能途径与方法	170
4.1.2	低温建筑的隔热层厚度	114	6.3	空调系统的节能分析	170
4.1.3	防潮隔汽层	117	6.3.1	合理确定设计和运行参数	170
4.1.4	隔热结构的恶化	121	6.3.2	空气处理设备的节能	174
4.1.5	空调采暖建筑的隔热	123	6.3.3	输送系统的节能	178
4.2	太阳辐射热	124	6.3.4	空调系统的运行调节与节能控制	186
4.3	门洞及通风换气的冷损失	126	6.4	空调系统的热回收与可再生能源利用	191
4.3.1	冷库开门冷损失	126	6.4.1	热回收换热装置	191
4.3.2	减少门洞冷损失的措施	128	6.4.2	空调系统中的能量循环利用	195
4.3.3	通风换气的耗电量	130	6.4.3	可再生能源的利用	201
4.4	低温建筑和空调建筑内的热负荷	132	6.5	空调系统总耗能计算	206
4.4.1	设备发热产生的热负荷	133	6.5.1	当量满负荷运行时间法	206
4.4.2	低温和空调空间内人员和照明产生的热负荷	134	6.5.2	负荷频率表法	209
	思考题	139	6.5.3	度日法	210
第5章	制冷空调装置电气系统的节能	140	6.5.4	电子计算机模拟算法	211
5.1	变压器的合理选配	140		思考题	211
5.1.1	变压器的损耗和效率	140	第7章	蓄冷空调及温湿度独立控制空调	212
5.1.2	变压器的系列和容量选择	141		空调	212
5.1.3	变压器的台数选择	143	7.1	蓄冷空调的发展背景与特点	212
5.2	制冷装置中电动机的合理匹配	145	7.1.1	蓄冷空调的发展背景	212
5.2.1	异步电动机的工作特性	145	7.1.2	蓄冷空调的特点	213
5.2.2	单级制冷压缩机的电动机匹配	145	7.2	蓄冷空调技术原理与应用	214
5.2.3	两级压缩机的电动机匹配	146	7.2.1	蓄冷系统工作原理	214
5.3	用户电力系统的功率因数	148	7.2.2	冷负荷分布与蓄冷空调的适应性	215
5.3.1	电力网功率因数和无功补偿基本概念	148	7.2.3	水蓄冷空调系统	216
5.3.2	提高用户的自然功率因数	150	7.2.4	冰蓄冷空调系统	219
5.3.3	设置无功补偿装置	152	7.3	蓄冷空调的效益	227
	思考题	157	7.3.1	电力部门的效益	227
第6章	空调系统的节能	159	7.3.2	用户侧的效益	228
6.1	空调节能评价	159	7.3.3	蓄冷工程效益分析	229
6.1.1	相关的空调节能法规与标准	159	7.4	冰蓄冷与低温送风结合的经济性与能耗分析	235
6.1.2	节能评价水准	160	7.4.1	冰蓄冷与低温送风空调的结合形式	235
6.1.3	节能评价指数	161	7.4.2	低温送风系统的组成及特点	236
6.1.4	空调中的焓分析	165	7.4.3	低温大温差输配系统的经济性与能耗	237
6.2	空调系统耗能特点与节能途径	165	7.4.4	低温送风系统的风管得热与温升	241
6.2.1	建筑空调负荷的概念	166	7.5	温湿度独立控制空调的节能分析	246
6.2.2	减少空调负荷的原理	167			
6.2.3	影响空调系统耗能的主要因素	168			
6.2.4	空调系统耗能特点	169			

7.5.1 温湿度独立控制空调的工作原理	246	第 9 章 制冷空调装置运行调节中的节能技术	278
7.5.2 温湿度独立控制空调的能效分析	247		
7.5.3 温湿度独立控制空调系统及应用	248		
思考题	249	9.1 制冷空调系统主要运行参数及其控制	278
第 8 章 制冷空调装置的节能技术改造	250	9.1.1 蒸发温度和蒸发压力	278
8.1 压缩机所匹配的电动机的更新	250	9.1.2 冷凝温度和冷凝压力	280
8.2 电动机的磁性槽泥改造	252	9.1.3 压缩机的吸气温度	281
8.2.1 磁泥改造的节电原理	252	9.1.4 压缩机的排气温度	282
8.2.2 磁性槽泥材料	252	9.1.5 两级压缩循环的中间温度	283
8.2.3 磁性槽泥改造施工工艺	253	9.2 制冷系统的调整操作	284
8.2.4 采用磁性槽泥改造电动机的节电效果和注意事项	254	9.2.1 不同制冷系统的调整要点	284
8.3 电动机的 Δ -Y转换改造	255	9.2.2 配用压缩机要点	285
8.4 用户电力负荷曲线的改进和变压器节能改造	257	9.2.3 系统供液与压缩机的调整	285
8.5 水泵及水系统的节能改造	259	9.2.4 压缩机发生湿行程的操作调整	286
8.5.1 水泵特性、管路特性与工作点	259	9.3 制冷系统不正常情况的分析和排除	287
8.5.2 现役水泵的技术改造	260	9.3.1 制冷系统正常运转的标志	287
8.5.3 水系统的管路改造	262	9.3.2 制冷系统中的不正常现象及排除方法	289
8.6 风机与风机系统的节能改造	263	9.4 制冷系统运行调整中的节能技术	291
8.7 隔热层的维修改造	265	9.4.1 适当调高冷凝压力实现节能	292
8.7.1 外贴隔热层法维修和改造冷库	266	9.4.2 采用较高的蒸发温度实现节能	293
8.7.2 内贴隔热层的维修改造	267	9.4.3 制冷装置夜间运行的节能	294
8.8 盐水制冰装置的节能改造	268	9.4.4 食品冷却过程中的节能	298
8.9 异步电动机节电器及其应用	270	9.4.5 食品冻结过程中的节能	299
8.10 交流接触器的节能运行技术	271	9.4.6 系统能量管理技术	300
8.11 制冷空调装置的热(冷)回收利用	272	9.5 制冷空调设备和系统的效率指标	304
8.11.1 制冷压缩机排气显热的回收利用	272	9.5.1 制冷压缩机或机组的性能系数	304
8.11.2 制冷空调装置全部冷凝热的回收利用	274	9.5.2 制冷空调系统的效率指标	308
8.11.3 从空调排风中回收冷(热)量	275	思考题	309
8.11.4 制冷装置中“废冷”的回收利用	276	第 10 章 制冷空调装置的维护和保养	310
思考题	277	10.1 制冷系统的维护和保养	310
		10.1.1 制冷系统中的不凝性气体	310
		10.1.2 制冷系统中的润滑油	314
		10.1.3 制冷系统中的机械杂质	319
		10.1.4 制冷装置中的水	320
		10.2 制冷压缩机的维护和检修	322
		10.2.1 压缩机维护和检修的必要性和计划	322
		10.2.2 制冷压缩机的正常维护保养	324
		10.2.3 制冷压缩机定期检修的内容	325
		10.3 溴化锂制冷装置的操作维护	326

10.3.1 溴化锂机组的正常运转操作	326	11.3.2 单位产品耗电量计算	354
10.3.2 溴化锂制冷装置的维护保养	327	11.3.3 制冷空调辅助材料消耗量	355
10.4 制冷空调中静止工作设备的操作与 维护	329	11.3.4 制冷运行指标分析	356
10.4.1 冷凝器的操作和维护	329	11.4 产品电耗定额的制定与管理	358
10.4.2 蒸发器的操作和维护	330	11.5 制冷空调装置用户节能管理体系的 建设	361
10.4.3 风机盘管的维护和保养	333	11.5.1 用户管理节能与科技进步节 能	361
10.4.4 空调机组设备的维护和保养	334	11.5.2 用户节能管理体系的建设	362
10.4.5 辅助设备的操作和维护	335	11.6 宏观节能管理体系的建设	363
10.5 制冷空调装置中相关设施的维护	338	11.6.1 加强节能管理队伍建设和基础 工作	363
10.5.1 冷却水系统与冷冻水系统	338	11.6.2 建立健全节能保障机制	364
10.5.2 冷库建筑的正确使用和维护	342	11.6.3 培育节能服务体系	365
10.6 制冷空调装置运行维护的综合 管理	343	11.6.4 建立节能目标责任制和评价 考核体系	366
10.6.1 制冷空调装置综合管理的 主要任务	343	11.6.5 我国节能法制建设的发展与 现状	367
10.6.2 综合管理规章制度的建立 和贯彻	344	思考题	368
10.6.3 设备管理学科的发展	345	附录	369
思考题	346	附录 A 冷库管理规范(试行)	369
第 11 章 制冷空调装置节能体系的 建设与管理	347	附录 B 冷库管理检查评比办法	374
11.1 能源计量	347	附录 C 空气调节节能途径与方法	375
11.2 制冷空调装置的工作日记	348	附录 D 深圳市中央空调系统节能运行维护 管理暂行规定	376
11.2.1 压缩机车间(机房)工作 日记	350	附录 E 评价企业合理用电技术导则	382
11.2.2 冷加工产品的产量统计	351	附录 F 制冷空调节能相关国家标准与规范 目录	384
11.3 能源统计分析分析与制冷运行指标 分析	352	参考文献	388
11.3.1 能源统计分析	352		

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°C 以下的低温,还有受到区域、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做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。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。它可以保证食品的质量,减少生产及分配过程中的损耗;在满足人民生活需要方面发挥重要的作用。

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。因此,制冷空调装置的节能正在引起人们越来越广泛的重视。

建国以来,我国能源工业得到巨大发展。2003 年,我国一次能源总产量 16.03 亿 t 标准煤,约占全球能源生产总量的 11%。仅次于美国,居世界第二位。截至 2004 年底,我国发

电设备容量达到 44070 万 kW, 发电量突破 21870 亿 kW·h^[1]。但是, 我国的能源形势仍然十分严峻。2004 年全国拉闸限电省份达到 26 个, 2005 年电力紧张有所缓解, 但仍然有 12 个省份不得不拉闸限电。能源短缺一直是制约我国经济发展的一个重要因素。

到 2003 年底, 我国边远地区还有 29000 个村庄, 近 700 万个农村家庭, 约占全国 3.55% 的人口没有用上电。2003 年我国人均用电量 1205.5kW·h, 只有世界人均水平的 58%、经济合作与发展组织国家 (OECD) 的 17%, 相当于世界主要工业国家 20 世纪 50~70 年代水平^[1]。

问题严重的是我国的人均能源资源拥有量也远低于世界平均水平。2003 年, 我国人均石油可采储量只有 2.48t, 人均天然气可采储量只有 1408m³, 分别为世界平均值的 10% 和 5%。我国能源资源中拥有量最多的煤炭, 2003 年人均可采储量也只有 89t, 仅为世界平均值的 57%^[1]。并且, 我国的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。因此, 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。能源有效利用率是指能源所具有的能量与实际有效利用的能量之比值。它是衡量一个国家、一个企业能源利用水平的综合指标, 并直接关系到国民经济的发展。根据文献 [2], 当前我国的能源效率 (包括能源加工、转换、储运和终端利用) 约为 31.2%, 发达国家在 20 世纪 90 年代初为 41%。我国能源利用存在很大的浪费, 能源转换效率低下, 单位面积的采暖能耗量是同样气候条件的发达国家的 2~3 倍。可见, 我国有极为广阔的节能空间。

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, 2001 年燃煤的发电量占 78.4%。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, 当前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我们的生存和发展环境。

显然, 我国人均能源资源占有量少 (仅为世界平均水平的 40%~50%), 能源产地远离消费地区的基本情况无法改变。国情决定了我国在今后很长时期内, 能源结构仍然要立足于国内资源。要保证我国国民经济持续、快速、健康发展, 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, 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。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。根据国内专家的预测, 按目前经济发展和能源发展的速度, 我国未来的能源缺口在 10% 以上。因此, 节能对保证我国经济发展十分重要。

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》, 并从 1998 年 1 月开始生效。

中国经济未来能否保持快速增长, 一个重要的先决条件就是能源供应是否充足。国家“十一五”规划纲要把节约资源作为基本国策, 明确规定“十一五”时期, 单位 GDP 能耗

降低 20% 左右作为约束性指标^[4]。2006 年 9 月，国务院以国发〔2006〕28 号文印发了《国务院关于加强节能工作的决定》，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。

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]。许多城市的空调负荷占到电网尖峰负荷的 30% ~ 40%，有些城市甚至占到 50% 以上^[7]。空调节能，正在成为政府、消费者和业界广泛关注的焦点。因此，制冷空调装置的节能不仅是我国节能工作中的一环，而且作为电能消耗大户，制冷空调节能已经在我国节能工作中具有举足轻重的作用。

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。在一套节能运行的制冷装置中，各机器设备都处于最佳运行状态，零部件的磨损减少，维修费用下降，安全可靠性能提高，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要社会效益，涉及我们每一个公民。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、制冷剂和控制方式的选择

1.1 制冷方式的选择

在设计选择制冷装置时，第一个问题就是确定制冷的方式。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，进一步实现制冷中的节能，达到良好的经济效益。因此，对各种制冷方法应有深入的认识和理解。

1.1.1 各种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。物质在发生相变时，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，达到降低温度的效果。

固体物质的融解或升华，液体的汽化，都是吸热的相变过程，通过这些过程吸收大量热量，就可获得低温。例如，在大气压力下冰融解的温度为 0°C ，每公斤冰可吸收 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 ，每公斤干冰可吸热 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取冷量。利用这种原理的制冷方式可分为蒸气压缩式制冷、吸收式制冷和蒸汽喷射式制冷。

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示出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，而且已发展到相当完备的程度。由于具有许多明显的优点，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列出不同压缩机级数和不同的制冷剂所能达到的最低蒸发温度。

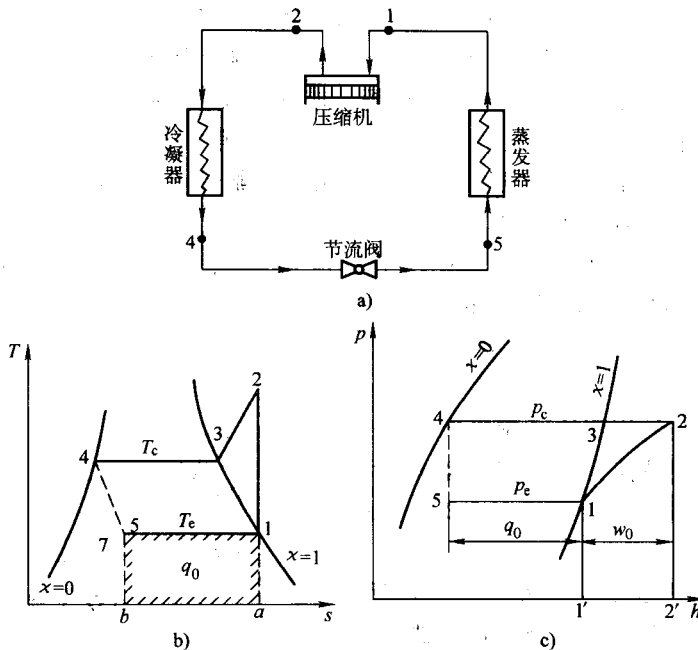


图 1-1 蒸汽压缩式制冷

a) 单级压缩制冷循环系统 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
	R12	-36	-34	-31
	R22	-36	-34	-31
	R502	-39	-36	-34
两级	R717		-65	
	R22		-75	
	R12		-68	
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。蒸汽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。蒸汽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。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、有强烈刺激性。常用的氯氟烃 (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，故压缩式制冷在低温 (-70°C) 下不利的缺点影响不大。由于以上的优点，压缩式制冷是目前制冷空调技术中的主流，在各行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。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 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，这些氨蒸气进入冷凝器 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，特别是节能效果较好，引起了人们广泛的重视。

氨水吸收式制冷装置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。下面分别介绍这两种制冷装置的特点。

氨水吸收式制冷装置的特点：

1) 耗电少。由于其动力主要为热能，耗电量大大少于压缩式制冷装置。据国内 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可节省 65%。

2) 可利用废热、余热。由于吸收式制冷以热能为动力，许多情况可以直接利用工业生

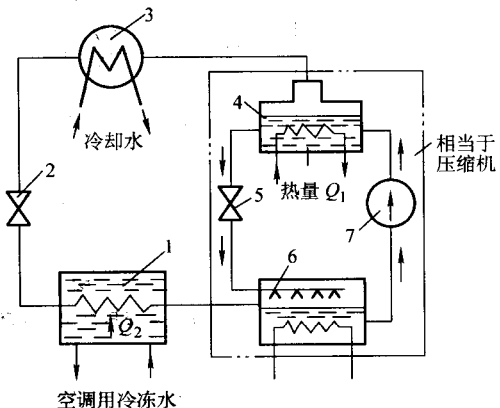


图 1-2 吸收式制冷原理图

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

产中的废热和余热。

- 3) 变负荷容易, 调节范围广。可在 10% ~ 100% 范围内调节制冷量。
- 4) 单级即可达到 -40°C 的低温。
- 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; 直接燃烧的氨吸收式制冷机, 其制冷温度可达 $-20 \sim -60^{\circ}\text{C}$, 当制冷量大于 1163kW 时, 利用廉价燃料是比较经济的。

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, 耗电量仅为蒸气压缩式的 3% ~ 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、有利于环境保护。
- 4) 冷量调节范围宽。随着外界负荷的变化, 一般机组可在 20% ~ 100% 的范围内进行冷量的无级调节。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, 能在蒸汽压力 $196 \sim 784\text{kPa}$ 表压, 冷却水进口温度 $25 \sim 40^{\circ}\text{C}$, 冷媒水出口温度 $5 \sim 15^{\circ}\text{C}$ 的宽阔范围内稳定运转。
- 6) 成套出厂, 国内已有蒸汽型、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, 按要求连接汽、水、电即可。由于机器运转时振动小, 基础无须防振, 只要考虑静负荷。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。由于机组性能稳定, 对外界条件变化的适应性强, 因而操作比较简单。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的寿命, 而且影响机组的性能。为此, 制冷机要求严格密封, 这就给机器的制造和使用增加了

困难。

10) 机组的排热负荷较大, 因为冷剂蒸汽的冷凝和吸收过程均为排热过程。此外, 对冷却水的水质要求也比较高。在水质差的地方, 使用时应进行专门的水质处理, 避免影响机组性能的正常发挥。

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℃ 以上的冷媒水。由于其运行噪声小, 对能源要求低, 所以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、废热可以利用时, 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, 利用热量或余热制取冷量, 既可减少企业排热的热污染, 又可以节能, 可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, 实现能源的梯级利用, 提高一次能源的利用率。

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, 可根据锅炉的参数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 37 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。产量仅次于日本, 国际排名第二。

我国的吸收式制冷机产品市场的迅速扩展, 并赢得用户的信赖和社会重视。关键在于产品质量和可靠性的大幅度提高, 在于技术进步和创新。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。现行的溴化锂制冷机国家标准主要有: GB/T18431—2001《蒸汽和热水型溴化锂吸收式冷水机组》, GB/T18362—2001《直燃型溴化锂吸收式冷(温)水机组》, GB18361—2001《溴化锂吸收式冷(温)水机组安全要求》。

随着技术的发展, 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(见表 1-2), 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