

Theory and Practice for
Energy-saving Operational Management of
Central Air Conditioning System in
Green Buildings

绿色建筑中央空调系统 节能运行管理理论与实践

周 斌 程建杰 陆青松 编 著

中国建筑工业出版社

绿色建筑中央空调系统节能 运行管理理论与 实践

周 斌 程建杰 陆青松 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

绿色建筑中央空调系统节能运行管理理论与实践/
周斌,程建杰,陆青松编著. —北京:中国建筑工业
出版社,2017.6

ISBN 978-7-112-20639-1

I. ①绿… II. ①周…②程…③陆… III. ①生态
建筑-集中空气调节系统-节能-研究 IV. ①TU201.5
②TU831.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 069782 号

责任编辑:张文胜 齐庆梅

责任设计:谷有稷

责任校对:焦乐

绿色建筑中央空调系统节能运行管理理论与实践

周斌 程建杰 陆青松 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

北京科地亚盟排版公司制版

北京鹏润伟业印刷有限公司印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:11¼ 字数:272千字

2017年8月第一版 2017年8月第一次印刷

定价:35.00元

ISBN 978-7-112-20639-1

(29988)

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)



前 言

随着建筑节能和绿色建筑事业的不断发展，暖通空调系统能耗占建筑总能耗的比重较大，越来越受到能源管理部门和建筑主管部门的重视。然而，在整个建筑生命周期内，空调系统运行管理对于整个系统能否正常、安全、高效运行至关重要。

作为暖通空调系统运行的“人”的素质也已经成为不容忽视的因素。如何通过理论和实践结合、有针对性的案例，来培养从业人员的科学思辨能力和工程师素养？如何在暖通空调系统出现故障之前，能及时发现问题，并提出解决方案？这已经是暖通空调领域从业人员和教育工作者不得不直面的问题。

本书从绿色建筑、冷热源、风系统、水系统、空调系统节能运行管理几个方面展开，并通过工程教育理论与工程实际案例相结合进行阐述，以期建筑可持续运行、真正体现“绿色”“节能”提供智力保障。

感谢 2015 年江苏省高等教育教改研究立项课题（No. 2015JSJG173）、2016 年南京工业大学教育教学改革研究课题一般立项项目（No. 110）、国家自然科学基金项目（51508267）、江苏省自然科学基金项目（BK20130946）的大力支持。最后要感谢南京工业大学城市建设学院暖通工程系的师生同仁们，没有你们的支持，本书不可能得以出版。

由于时间仓促，本书难免有瑕疵，欢迎各位同仁提出宝贵意见。

2016 年 12 月
于南京亚青村

目 录

第 1 章 绿色建筑及中央空调系统	1
1.1 绿色建筑	1
1.1.1 绿色建筑产生的背景	1
1.1.2 绿色建筑的定义	1
1.1.3 绿色建筑的发展	1
1.1.4 我国绿色建筑的评价体系	2
1.2 中央空调系统	2
1.2.1 空调用制冷系统基本原理	2
1.2.2 空调系统的基本概念	6
第 2 章 冷源	10
2.1 活塞式冷水机组	10
2.1.1 原理	10
2.1.2 运行	11
2.1.3 管理	14
2.1.4 维修	20
2.2 螺杆式冷水机组	37
2.2.1 原理	37
2.2.2 运行	38
2.2.3 管理	41
2.2.4 维修	49
2.3 离心式冷水机组	67
2.3.1 运行	67
2.3.2 管理	69
2.3.3 维修	77
2.4 吸收式制冷机组	90
2.4.1 运行	90
2.4.2 管理	94
2.4.3 维修	104
第 3 章 热源	112
3.1 燃油燃气锅炉	112

3.1.1	原理	112
3.1.2	运行管理	113
3.2	板式换热器	118
3.2.1	原理	118
3.2.2	运行管理	118
3.3	热泵	119
3.3.1	原理	119
3.3.2	地源热泵运行管理	120
3.3.3	水源热泵系统运行管理	122
第4章	空调风系统	127
4.1	空调末端	127
4.1.1	AHU 空气处理柜	127
4.1.2	风机盘管 (FCU)	131
4.1.3	空气幕	137
4.1.4	风口	140
4.2	风机	141
4.2.1	风机分类及组成	141
4.2.2	主要性能参数	143
4.2.3	运行管理	144
4.2.4	风机常见故障及检修	145
4.3	风管及绝热层	146
第5章	空调水系统	148
5.1	冷却塔	148
5.1.1	原理	148
5.1.2	运行管理	148
5.1.3	管理工作	152
5.1.4	维修工作	154
5.2	水泵	155
5.2.1	工作原理	155
5.2.2	运行管理	156
5.2.3	维修	157
5.2.4	水泵的节能运行	158
5.3	膨胀水箱 (罐)	159
5.3.1	原理	159
5.3.2	运行管理	159
5.3.3	膨胀罐原理	160
5.3.4	运行管理	160

5.4 空调水系统常用阀门及管路附件	160
5.4.1 中央空调水系统常用阀门	160
5.4.2 中央空调水系统附件	162
5.4.3 运行管理	164
第6章 空调系统节能运行管理案例	168
6.1 风机单位风量功耗案例	168
6.1.1 标准和规范限定值	168
6.1.2 工程案例	169
6.2 空调冷热源系统节能案例分析	170
参考文献	173

第 1 章 绿色建筑及中央空调系统

1.1 绿色建筑

1.1.1 绿色建筑产生的背景

据相关统计,建筑物在其建造、使用过程中消耗的能源约占全球总能源消耗量的一半,产生的污染物约占污染物总量的 35%。由于全球环境问题日益严峻,建筑业的可持续发展成为人们日益关注的焦点,各国对建筑业的可持续发展也愈加重视。

我国人均耕地面积只有世界人均耕地面积的 1/3,水资源仅是世界人均占有量的 1/4,而污水回用率仅为发达国家的 1/4。我国正处在城镇化率上升的阶段,据国务院发展研究中心的数据,城镇化率每提高 1%,新增能耗约为 6000 万 tce,新增建筑用地约为 1000km² 甚至更多,新增钢材、水泥、砖木等建材总量约 6 亿 t。目前我国单位建筑面积的能耗是发达国家的 2~3 倍以上,我国的发展将面临巨大的资源和环境压力,为了实现建筑业的可持续发展,我们必须走绿色建筑之路。

1.1.2 绿色建筑的定义

绿色建筑是指在建筑的全寿命周期内,最大限度节约资源,节能、节地、节水、节材、保护环境和减少污染,提供健康适用、高效使用,与自然和谐共生的建筑。绿色民用建筑的核心是“四节一环保”,即节能、节地、节水、节材和保护环境;绿色工业建筑的核心是“四节二保一加强”,即节能、节地、节水、节材、保护环境、保障职工健康和加强运行管理。

绿色建筑能全面集成建筑节能、节地、节水、节材及保护环境等多种技术,是一种解决建筑的保护环境、保证人员健康及舒适的方案。大力发展绿色建筑,能够有效利用资源和减轻对环境的负面影响。综上所述,推广绿色建筑不仅是转变建筑业发展方式,而且关系到国计民生。

1.1.3 绿色建筑的发展

1. 国外绿色建筑的发展

20 世纪 60 年代,在美国提出了生态建筑(Eco-building)的新理念,将建筑看成一个生态系统,通过设计达到一种高效、低耗、无废、平衡的建筑环境。

1980 年,世界自然保护联盟(World Conservation Union)正式提出“可持续发展”的口号,与此同时,建筑节能体系逐渐完善,并在德、英、法、加拿大等发达国家广泛应用。

1987 年,联合国环境署发表《我们共同的未来》报告,确立了可持续发展的思想。

1990 年世界首个绿色建筑标准 BREEAM 在英国发布。

之后世界各国纷纷推出自己的评价标准,如美国的 LEED,德国的可持续建筑认证标准 DGNB 等。

2. 我国绿色建筑的发展

我国绿色建筑的发展大体经历了三个阶段:

第一阶段（2006~2010年）：采取自愿申报的办法，使绿色建筑从零起步，每年获得100个以上的标识项目。这一阶段已顺利完成。

第二阶段（2011~2015年）：每年获得标志的建筑应达到300个，采取把工业性、区域性的强制要求与商业性的自愿相结合。目前绿色建筑正面临大规模的发展。

第三阶段（2016~2020年）：使绿色建筑进一步覆盖所有建筑类型，还要进一步增强商业性的经济激励政策，使绿色建筑基本得到全面推广。

1.1.4 我国绿色建筑的评价体系

1. 《绿色建筑评价标准》GB/T 50378—2014

《绿色建筑评价标准》GB/T 50378—2014是为贯彻落实完善资源节约标准的要求，总结近年来我国绿色建筑方面的实践经验和研究成果，并结合近年来《绿色建筑评价标准》GB/T 50378—2006的实施情况和实践经验，参考有关国外标准而制定的绿色建筑综合评价标准。在编制过程中，广泛地征求了有关方面的意见，对主要问题进行了专题论证，对具体内容进行了反复讨论、协调和修改，并经审查定稿。

2. 与旧版标准的区别

(1) 将标准适用范围由住宅建筑和公共建筑中的办公建筑、商场建筑和旅馆建筑，扩展至各类民用建筑。

(2) 将评价分为设计评价和运行评价。

(3) 绿色建筑评价指标体系在节地与室外环境、节能与能源利用、节水与水资源利用、节材与材料资源利用、室内环境质量和运行管理六类指标的基础上，增加“施工管理”类评价指标。

(4) 调整评价方法，对各评价指标评分，并以总得分率确定绿色建筑等级。相应地，将旧版标准中的一般项改为评分项，取消优选项。

(5) 增设加分项，鼓励绿色建筑技术、管理的创新和提高。

(6) 明确单体多功能综合性建筑的评价方式与等级确定方法。

(7) 修改部分评价条文，并为所有评分项和加分项条文分配评价分值。

3. 评价体系

绿色建筑评价指标体系由节地与室外环境、节能与能源利用、节水与水资源利用、节材与材料资源利用、室内环境质量、施工管理、运营管理7类指标组成。每类指标包括控制项和评分项，并统一设置加分项。其中控制项的评定结果为满足或不满足；评分项和加分项的结果为分值。绿色建筑分为一星级、二星级、三星级3个等级。3个等级的绿色建筑均应满足本标准所有控制项的要求，且每类指标的评分项得分不应小于40分。当绿色建筑总得分分别达到50分、60分、80分时，绿色建筑等级分别为一星级、二星级、三星级。

1.2 中央空调系统

1.2.1 空调用制冷系统基本原理

制冷指的是用人工方法在一定时间和一定空间内将该空间内的流体或物体冷却，使其低于环境温度，并保持这个低温。

根据制冷原理，制冷系统包括蒸气压缩式、吸收式、蒸气喷射式和吸附式几种形式。本节对常见的前两种系统的基本原理进行介绍。

1. 蒸气压缩式系统的基本原理

(1) 利用液体蒸发进行制冷

假设一杯温度为 0°C 的水放在室温为 28°C 的房间内时，水分会蒸发形成水蒸气进入空气中，同时水分蒸发会从周围空气中吸收热量，使房间温度降低，同时杯子中剩余的水温会升高，如图 1-1 所示。在没有外来干扰的条件下，水温和室温会平衡，并保持相同。该制冷过程不能进行持续制冷。

如液态水一样，利用液态制冷剂的蒸发吸热来进行制冷。假设液态制冷剂可以像日常生活中的液化气一样存储在制冷剂罐内（见图 1-2），压缩的液态制冷剂通过管道时膨胀，压力降低，其蒸发温度相应降低，制冷剂吸收了房间里的热量后蒸发，从而降低房间温度。除了考虑制冷剂直接排放到大气会造成环境破坏之外，通过更换制冷剂罐可以进行制冷。通过制冷剂罐进行制冷，其持续时间比敞开式的液体蒸发式制冷更长。

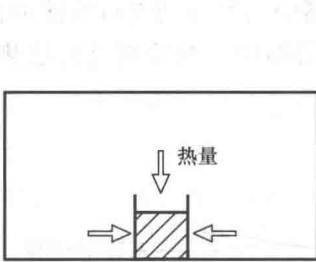


图 1-1 液体蒸发冷却制冷

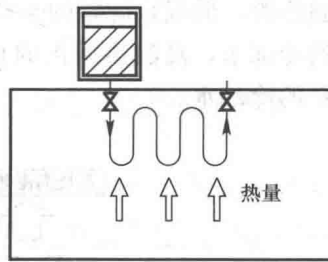


图 1-2 压缩液体蒸发冷却制冷

(2) 制冷剂液体再生装置

为了实现持续制冷，需要考虑如何将排向大气的气态制冷剂回收，并还原为液体。气体冷凝为液体需要放热，考虑到温度总是从高温释放给低温，需要想办法使冷却介质的温度低于制冷剂的冷凝温度。

考虑到一般房间或环境的温度比制冷剂的冷凝温度高，有一种假想的办法是将制冷剂管道通过充满液态氮的房间（见图 1-3），但是这样一来，制作液态氮的成本上升。这种假想的办法不合适。

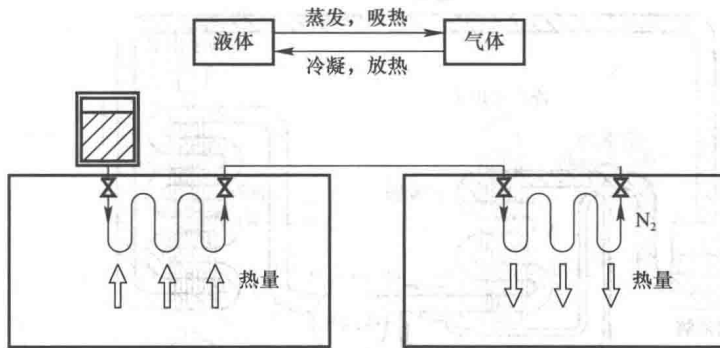


图 1-3 气态制冷剂冷凝的假想办法

大家知道一种生活常识，将一壶水烧开，在平原上需要达到 100°C ，在高原上当水温低于 100°C 时就已经沸腾了。在平原上的大气压高于高原上的大气压，所以当提高气态制冷剂的压力时，在该压力下制冷剂的冷凝温度变大。

要实现气体制冷剂的冷凝，通常用空气或水，而且要求空气或水的温度必须低于制冷剂的冷凝温度。由于可用的空气或水的温度总是高于制冷剂吸收房间热量后的沸腾温度，制冷剂离开房间后总不能被冷凝。为了使蒸气冷凝，必须提高制冷剂蒸气的压力，使得该压力下对应的制冷剂冷凝温度高于空气或水，这样制冷剂就可以从气态冷凝为液态。

为了提高气态制冷剂的压力，通常使用压缩机（蒸气压缩式系统）。液态制冷剂发生冷凝的场所称为“冷凝器”。

压缩机与冷凝器是制冷剂液体再生装置，即将制冷剂气体还原为液体的装置。接下来对蒸气压缩式系统及其工作过程进行简单介绍。

(3) 蒸气压缩式系统简介

蒸气压缩式系统由压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器四大部件组成，制冷剂在系统中进行循环，经历膨胀、蒸发、压缩和冷凝四个基本过程，见图 1-4。该系统中涉及一个低温热源和一个高温热源，低温热源指的是在蒸发器中与制冷剂进行换热的被冷却介质，如图 1-4 (b) 所示的冷冻水，高温热源指的是在冷凝器中与制冷剂进行换热的被加热介质，如图 1-4 (b) 所示的冷却水。

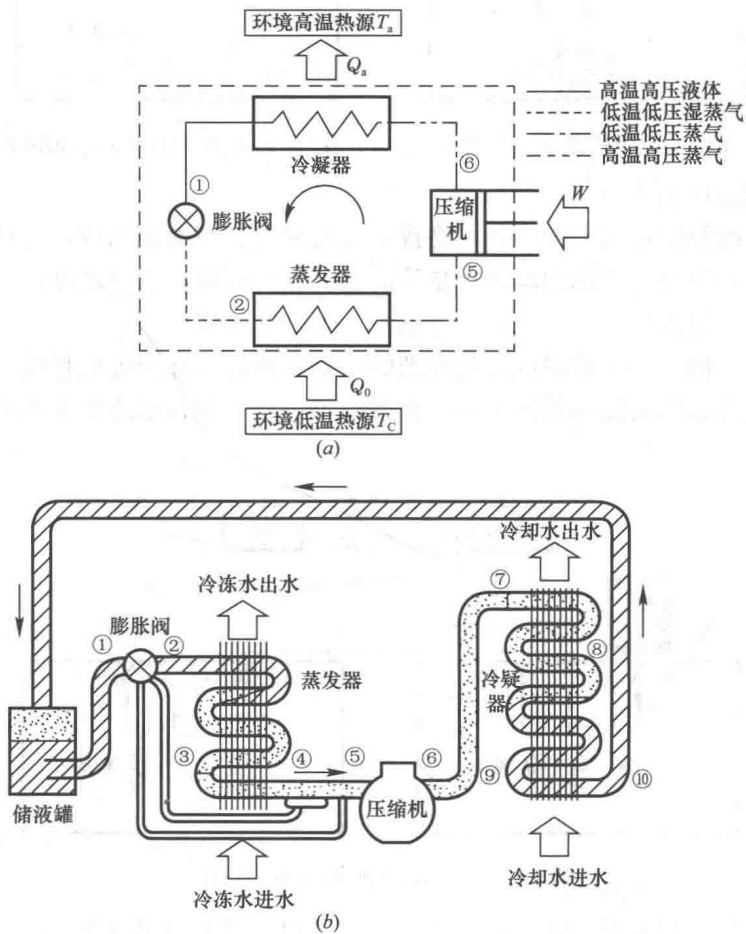


图 1-4 蒸气压缩式制冷系统图
(a) 四大部件简图；(b) 系统详图

膨胀阀内膨胀过程：高温高压的液态制冷剂经过膨胀阀节流降压（①→②），其中一部分液体蒸发，变成低温低压的湿蒸气，湿蒸气的压力等于蒸发器的工作压力，温度低于流过蒸发器的冷冻水温度。

蒸发器内蒸发过程：湿蒸气在蒸发器内吸收冷冻水的热量进行蒸发（②→③）。为了确保压缩机吸入的制冷剂是气体，制冷剂在蒸发器内进一步蒸发，得到有一定过热度的制冷剂蒸气（③→④→⑤）。制冷剂在蒸发器内的整个换热过程压力保持恒定。假设环境低温热源温度恒定，为 T_c ，制冷剂蒸发从该低温热源吸取的热量表示为 Q_0 。

压缩机内压缩过程：在压缩机中，过热的低压制冷剂蒸气经压缩后成为高温高压的制冷剂蒸气（⑤→⑥）。制冷剂的输入功表示为 W 。

冷凝器内冷凝过程：高温高压的制冷剂蒸气在冷凝器内将热量释放给冷却水，成为高压低温的制冷剂湿蒸气（⑦→⑧→⑨）。液态制冷剂在冷凝器内部进一步冷却，成为高压低温的液态制冷剂（⑨→⑩）。假设环境高温热源温度恒定，为 T_a ，制冷剂蒸发向该高温热源排放的热量表示为 Q_a 。

为了保证蒸发器工作所需要的稳定液态制冷剂流量，在冷凝器和膨胀阀之间设置了储液罐（⑩→①）。

为了评价蒸气压缩式制冷系统的能量转化效率，需要引入制冷剂的性能系数 COP (Coefficient of Performance)，其定义为： $COP = Q_0 / W$ ，其中 Q_0 为在蒸发器里吸收被冷却介质的热量（即制冷量）； W 为制冷系统压缩机、冷却水泵、风机等消耗功率之和。

根据经验，在空调系统中，冷凝温度越低或在满足被冷却介质所需低温的情况下蒸发温度越高， COP 越大。因此，在实际操作中，一切使冷凝温度升高和无故降低蒸发温度的做法将都会使系统制冷运行经济性变差。

2. 溴化锂吸收式系统的基本原理

溴化锂吸收式系统由吸收器、发生器、热交换器、溶液泵、冷凝器、膨胀阀和蒸发器组成，见图 1-5。它和蒸气压缩式系统都是利用低温低压的制冷剂液体在蒸发器中汽化吸热，达到连续制冷的目的，制冷剂在两种系统中都经历膨胀、蒸发和冷凝基本过程，主要不同之处在于：（1）前者压缩机的功能被吸收器、发生器、热交换器、溶液泵、膨胀阀 II 和相应的溶液回路所取代，它们的作用都是吸收蒸发器产生的制冷剂蒸气，并通过做功或

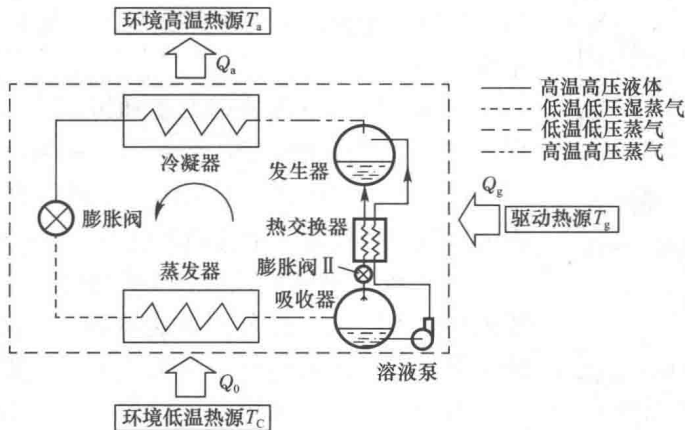


图 1-5 LiBr 吸收式制冷系统图

热量传递实现增压升温的效果；(2) 前者使用的是单一的制冷剂，而后者使用的是“溴化锂—水”组成的二元溶液工质对。

溴化锂在常温和低温下能吸收水蒸气，在高温下又能将其吸收的水分释放出来。利用该特点，溴化锂成为吸收剂，水作为制冷剂。它们在吸收器和发生器内组成了溶液，并进行相应的吸收和解析过程。

在溴化锂吸收式系统中存在两个循环：水循环和溴化锂溶液循环。

从蒸发器出来的低温低压水蒸气首先进入吸收器，吸收器中充有溴化锂浓溶液，用它来吸收水蒸气，变成溴化锂稀溶液，然后用溶液泵把稀溶液泵送到发生器里面，在发生器内溴化锂稀溶液被蒸气或其他热源加热，水分蒸发，形成浓溶液。产生的高温高压的水蒸气进入冷凝器，从而与蒸气压缩式制冷一样进行制冷循环；产生的浓溶液通过热交换器，由于浓溶液和稀溶液的密度差进入吸收器。为了保持发生器和吸收器之间的压力差，在两者的连接管道上安装了膨胀阀Ⅱ。

溴化锂浓溶液在吸收器中吸收水蒸气时，需要释放大量的溶解热，该热量需要由冷却水或其他冷却介质带走。

假设吸收式制冷系统由恒温热源来驱动，如图 1-5 所示，则由热力学定律可以得到：

$$Q_a = Q_0 + Q_g, \quad \frac{Q_a}{T_a} = \frac{Q_0}{T_c} + \frac{Q_g}{T_g}$$

$COP = \frac{1 - T_a/T_g}{T_a/T_c - 1}$ ，该式说明在三个恒温热源之间工作的可逆吸收式制冷机，制冷系数 COP 只与热源温度有关；高温热源温度 T_g 越低、低温热源温度 T_c 越高或驱动热源温度 T_a 越高， COP 越大。

与蒸气压缩式制冷空调系统相同，冷凝温度越低或蒸发温度越高， COP 越大。此外，通过提高驱动热源的温度 T_g ，也可以提高 COP 。

1.2.2 空调系统的基本概念

空调是空气调节的简称，指的是用人工方法对空气进行处理，实现空气温度、湿度、速度和洁净度等参数的调节和控制。

空调系统一般由被调对象、空气处理设备、空气输送设备和空气末端设备所组成，见

图 1-6。其中空调系统的冷热源一般布置在冷冻站和热交换站，常见的冷源由蒸气压缩式制冷系统和 LiBr 吸收式制冷系统提供。

空调系统的空气处理设备和风机一般都集中在空调机房。空气处理设备包括：换热器、加湿器、风机和过滤器等，这些设备集中到一个箱体中，则称为空调机组。图 1-6 中的空气处理设备 2 中各功能段的分布如图 1-7 所示。

室外新风通过粗效过滤器后与回风在混合段中相遇，新风管段和回风管段分别设置风阀，可以调节新风和回风的比例。为了使风阀能全部关闭、减少空气经过导流叶片产生的噪声、减少风阀对气流均匀性的影响，一般采用对开多叶调节阀。

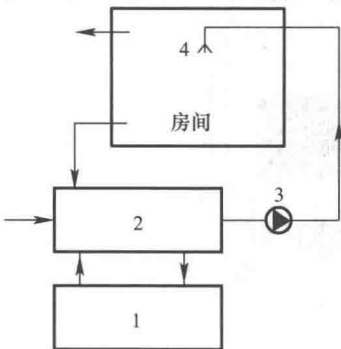


图 1-6 空调系统的基本组成
1—冷/热源；2—空气处理设备；
3—空气输送设备；4—空气末端设备

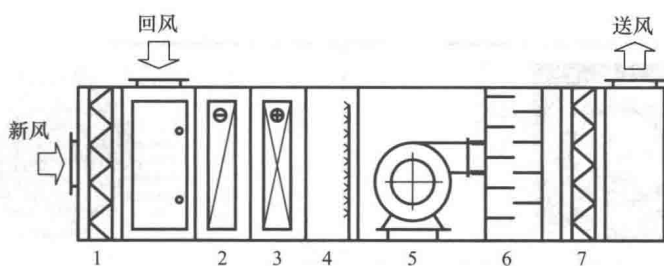


图 1-7 空调机组功能段

1—粗效过滤器；2—表冷器；3—加热器；4—加湿段；5—风机；6—消声段；7—中效过滤器

空调机组中的换热器有表面式空气加热器和表面式空气冷却器。目前中央空调系统中的表面式空气加热器大多采用翅片式的结构。当热媒用热水、冷媒用冷水时，两者通用，此时称为表面式换热器，实现夏季供冷、冬季供热。表面式空气冷却器常用冷冻水进行冷却。

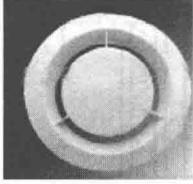
为了满足空气含湿量要求，需要对空气进行加湿处理，加湿方式包括：喷水加湿、喷蒸气加湿、电加湿和超声波加湿等。喷水加湿功能段在加湿的同时，还能吸收空气中一定的可溶性气态污染物，具有一定的空气净化能力。

图 1-6 中空气末端设备 4 分为送风末端、回风末端和排风末端几种（见表 1-1~表 1-3）。送风末端包括风机盘管和各种形式的送风口。

各种送风末端装置图

表 1-1

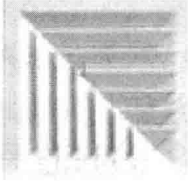
(a) 风机盘管	(b) 球形喷口
(c) 单层百叶送风口	(d) 双层百叶送风口
(e) 铝合金百叶方形散流器	(f) 圆形散流器



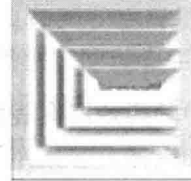
(g) 圆盘形散流器



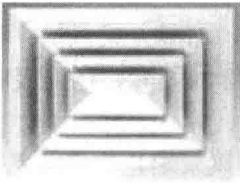
(h) 圆环形叶片散流器



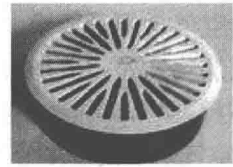
(i) 两面出风散流器



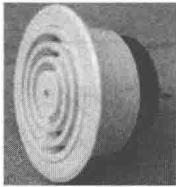
(j) 三面出风散流器



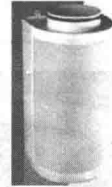
(k) 矩形散流器



(l) 放射状地板送风口



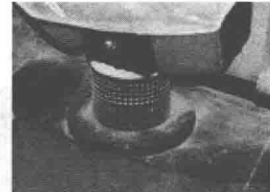
(m) 圆形地板送风口



(n) 置换送风口



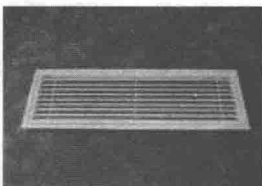
(o) 座椅送风装置



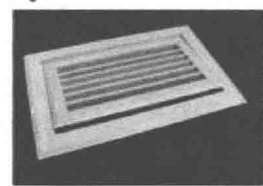
(p) 座椅送风图

各种回风末端装置图

表 1-2

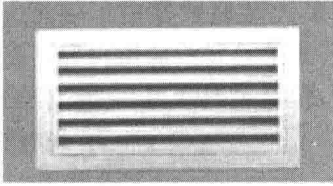


(a) 门铰型回风口

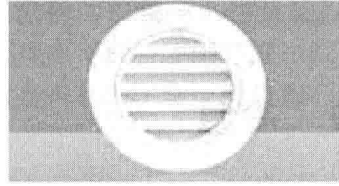


(b) 可开带网回风口

续表



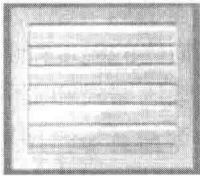
(c) 固定百叶回风口



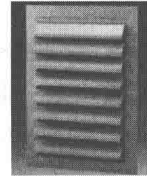
(d) 圆形回风口

各种排风末端装置图

表 1-3



(a) 室外自垂百叶排风口 (关闭状态)



(b) 室外自垂百叶排风口 (开启状态)

第2章 冷源

空调系统的冷源，就是向空气处理装置提供冷量的装置。冷源分为两类：一类是天然冷源，如冰或者深井水；另一类是人工冷源，即利用机械设备，从低于环境温度的某一空间或物体中吸取热量，并将其转移给环境介质。以消耗能量为代价，实现热量按人的需要进行转移的目标。

要提供冷量，就必须制冷，所谓制冷就是使某一空间或物体的温度降低于周围环境温度，并维持其低温状态。制冷设备常用的分为两大类：蒸气压缩式和蒸气吸收式。其中蒸气压缩式分为活塞式、螺杆式和离心式三种。

2.1 活塞式冷水机组

2.1.1 原理

如图 2-1 所示，压缩机的活塞在气缸中作往复运动，通过吸气、压缩、排气、膨胀四个工作过程，吸入来自蒸发器的低温低压制冷剂蒸气，压缩后使蒸气的体积变小，压力和温度升高，变成高温高压的过热蒸气，排入冷凝器中，制冷剂蒸气在冷凝器中向环境介质（空气或水）散热，冷却成为高压过冷液体，经节流阀减压节流后，以饱和湿蒸气状态喷入蒸发器内汽化，吸收空气（或冷媒）的热量后，又变成低温低压的饱和干蒸气，被压缩机吸回，进行往复循环。

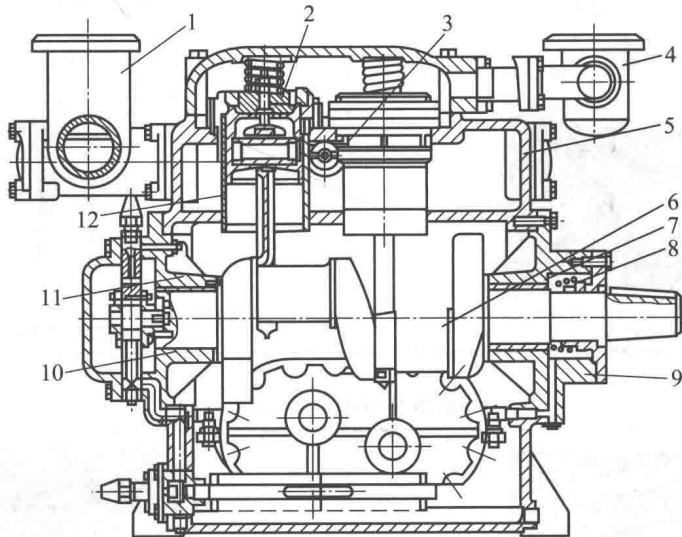


图 2-1 活塞式制冷压缩机的总体结构图

- 1—吸气管；2—假盖；3—连杆；4—排气管；5—汽缸；6—曲轴；7—前轴承；8—轴封；
9—前轴承盖；10—后轴承；11—后轴承盖；12—活塞