

高等学校试用教材

空气调节

(第二版)

清华大学 西安冶金建筑学院
同济大学 重庆建筑工程学院 编

中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

空气调节

(第二版)

清华大学 西安冶金建筑学院
同济大学 重庆建筑工程学院 编

中国建筑工业出版社

本书是高等学校供热通风专业《空气调节》课程试用教材。书中系统地叙述了空气调节的理论基础和国内外的先进技术与实践经验。内容包括：空气的物理性质、室内热湿负荷计算及送风量的确定、空气的各种处理方法及设备、空调房间的气流组织、空调系统与全年运行调节、能量消耗与节能措施、消声防振与空调建筑的防火排烟、测量与调整等。与第一版比较，本版内容做了较大调整，书中用了不少新材料和研究成果。

本书也可供有关专业的技术人员参考。

高等学校试用教材

空 气 调 节

(第二版)

清华大学 西安冶金建筑学院
同济大学 重庆建筑工程学院 编

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：21 插页：3 字数：506 千字

1986年12月第二版 1986年12月第四次印刷

印数：50,701—61,800册 定价：3.00元

统一书号：15040·5106

第 二 版 前 言

本次修订是根据第一版使用多年后所发现的存在问题以及近年来空调技术的进展情况进行的。全书是根据1983年6月在重庆教学大纲讨论会上和在1984年4月在苏州召开的修订、主审单位会议上对本书内容所作的详细安排编写的。

这次修订将原第五章空气的净化处理加以简化与原第四章合并；将气流组织调整到运行调节前面。当前大力开展节能是一项重要国策，也是世界各国的研究重点，为此，我们加重了原第十三章的内容，并将其放在消声防振前面。绪论由吴沈钊教授进行了重写，不再作为一章。这样安排似更符合对事物循序渐进的认识规律。

由于课时的压缩，原第九章风道设计归入《工业通风》课程内讲授，本书不再讲述；同时精简了原第十一章某些类型工程的空调应用。

原书第三章（现为第二章）有关室内冷（热）、湿负荷计算方法，由于近年来国内进行了大量研究工作，1982年城乡建设环境保护部评议通过了两种新的冷负荷计算方法，本版修订对此已作了详细介绍。

这次修订仍由编写第一版的四个院校负责。其中，清华大学负责修订第三（第一～五、七节）、七章（薛殿华、齐永系）；同济大学负责修订绪论、第三（第六节）、四、六、八章（吴沈钊、范存养、钱以明）；西安冶金建筑学院负责修订第二、九章（马仁民、史钟璋）；重庆建筑工程学院负责修订第一、五章（李惠风）。

本版仍承哈尔滨建筑工程学院通风及空气调节教研室徐邦裕、杜鹏久、路煜审定。

清华大学空调工程教研组

同济大学供热通风教研室

一九八五年十月三十日

目 录

绪论	1
第一章 湿空气的物理性质和焓湿图	7
第一节 湿空气的组成和物理性质	7
第二节 湿空气的焓湿图	14
第三节 通用焓湿图	18
第四节 湿球温度和露点温度	21
第五节 焓湿图的应用	25
第六节 另一种形式的焓湿图	30
第二章 室内冷(热)、湿负荷与送风量	32
第一节 室内外空气计算参数	32
第二节 太阳辐射热对建筑物的热作用	40
第三节 通过围护结构的得热量及其形成的冷负荷	46
第四节 室内热源、湿源的散热散湿形成的冷负荷与湿负荷	63
第五节 空调房间送风量的确定	67
第三章 空气处理及其设备	72
第一节 空气热湿处理的途径及使用设备的类型	72
第二节 空气与水直接接触时的热湿交换	73
第三节 用喷水室处理空气	78
第四节 用表面式换热器处理空气	97
第五节 空气的其他热湿处理方法	118
第六节 空气净化及其设备	132
第七节 空调箱	147
第四章 空气调节系统	149
第一节 空气调节系统的分类	149
第二节 新风量的确定和空气平衡	150
第三节 普通集中式空调系统	152
第四节 变风量系统	167
第五节 半集中式空调系统	172
第六节 低速集中式空调系统的风道设计	184
第七节 局部空调机组	186
第五章 空调房间的气流组织	191
第一节 送、回风口空气流动规律	191
第二节 送、回风口的型式及气流组织形式	199
第三节 气流组织的计算	206
第四节 房间气流组织性能的评价	222
第六章 空调系统的全年运行调节	225

第一节	运行调节的意义	225
第二节	室内热湿负荷变化时的运行调节	225
第三节	室外空气状态变化时的运行调节	231
第四节	集中式空调系统的自动控制	239
第五节	变风量空调系统的运行调节	245
第六节	半集中式空调系统的运行调节	248
第七章	空调系统的能量消费与节能措施	255
第一节	空调系统年耗电量的计算	255
第二节	空调系统的节能措施	256
第八章	空调系统的消声、防振与空调建筑的防火排烟	274
第一节	噪声及其物理量度	274
第二节	噪声的主观评价和室内噪声标准	277
第三节	空调系统的噪声源	278
第四节	空调系统中噪声的自然衰减	280
第五节	消声器消声量的确定	282
第六节	消声原理和消声器的应用	284
第七节	空调装置的防振	290
第八节	空调建筑的防火排烟	293
第九章	空调系统的测定与调整	299
第一节	概述	299
第二节	空调系统风量的测定与调整	299
第三节	空气处理过程的测定	305
第四节	室内空气参数的测定	308
第五节	测试调整中所发现问题的分析及其改进方法	310
附录		315
附录 1-1	湿空气的密度、水蒸汽压力、含湿量和焓	315
附录 1-2	湿空气焓湿图	插图
附录 1-3	湿空气通用焓湿图(中温部分)	插图
附录 1-4	SI单位制的焓湿图	插图
附录 2-1	夏季(7月)部分城市日射强度值	317
附录 2-2	夏季(7月)部分城市日射得热因数值	317
附录 3-1	喷水室热交换效率实验公式的系数和指数	318
附录 3-2a	高速喷水室构件规格与计算面积 F_1	319
附录 3-2b	高速喷水室每排喷水排管喷嘴数量	319
附录 3-2c	高速喷水室的喷嘴性能	319
附录 3-2d	高速喷水室的 η_B	320
附录 3-2e	高速喷水室的SWU	320
附录 3-2f	高速喷水室的阻力	320
附录 3-3	部分空气加热器的传热系数和阻力计算公式	321
附录 3-4	部分水冷式表面冷却器的传热系数和阻力试验公式	322
附录 3-5	SRZ型空气加热器技术数据	323
附录 3-6	水冷式表面冷却器的 e_1 值线算图	324

附录 3-7 水冷式表面冷却器的 ϵ_2 值..... 324

附录 3-8 JW型表面冷却器技术数据..... 325

附录 3-9 氯化锂溶液的比热..... 325

空调工程常用单位换算表..... 326

绪 论

一、空气调节的历史和沿革

空气调节的历史，与我们的祖先和前辈在采暖、通风、冷冻等几方面所积累的经验 and 成果是分不开的。

几千年以前，我国的燧人氏就有了钻木取火的实践。可以说，这开创了用木材作为燃料来采暖的途径。十五世纪二十年代，通过许多无名的能工巧匠的努力，在我国北京的皇宫大殿底下已经设置了供暖的地道。这无疑是地面辐射采暖技术的创举，到了十九世纪，欧美供暖技术进展较快，锅炉和放热设备等则已应用日广。

十五世纪末叶的文艺复兴时期，意大利的利奥纳多·达·芬奇(Leonardo da Vinci)制造出了第一个通风机。在无论哪种通风机系统或空气调节系统中，通风机都是必不可少的部件，它在五百年前就已出现，实为空气调节准备了基本的条件。

今天所谓完整的空气调节系统，则把具有制冷设备作为一项最基本的要求。在这方面，法国卡莱(Ferdinand Carré)已于1851年设计制成了第一台氨吸收式制冷机，美国波义耳(David Boyle)则于1872年设计制成了第一台氨压缩式制冷机。尔后，美国冷冻设备的制造厂家，纷纷兴起。制冷机除了用于冷藏事业外，也给空气调节系统夏季供冷奠定了重要的基础。一百多年来，制冷机的型式日渐增多，制冷剂的种类和型号数不胜数。

制造和发明总是“需要”的产物。十九世纪后半叶，随着先进国家纺织工业的发展，空气调节接受了巨大的挑战，其中加湿和清洁处理又成了主要的任务。从那时起，空气调节系统，就被公认为至少应具备下列功能：

1. 加热或降温，能够调节空气温度；
2. 加湿或减湿，能够调节空气湿度；
3. 能够使空气具有一定的流动速度；
4. 能够使空气具有一定的洁净程度。

当时，一位多面手工程师克勒谋(Stuart W. Cramer)负责设计和安装了美国南部约三分之一纺织厂的空气调节系统，都达到了上述四项要求。系统中，开始采用了集中处理空气的喷水室，装置了洁净空气的过滤设备，共包括了六十项专利。空气调节的英语名称air conditioning，就是他在1906年所定名的。

但是，那时除了供暖负荷计算已有德国人Rietschel等的经验而较成熟外，其他不少设计内容和计算数据，还很欠缺。例如：设备工况计算的理论依据欠缺，空气、水和制冷剂的特性数据不足，传热、蒸发和冷凝过程的可靠资料太少。

这些缺点，不久由开利尔(Willis H. Carrier)逐步予以解决。他对空气调节事业的进步和发展所作的贡献，是超过当代其他任何人的。1901年，他创建了第一所暖通空调方面的实验研究室，提出了好几个实践验证理论的计算方程式。1902年，他通过实验结

果，设计和安装了彩色印刷厂的全年性空气调节系统。在1905年以前，他把喷嘴和挡水板装置在喷水室内，改善了温湿度控制的效果，使全年性空调系统能够满意地应用于二百种以上不同类型的工厂。在1911年12月，他得出了空气干球、湿球和露点温度间的关系，以及空气显热、潜热和焓值间关系的计算公式，绘制了湿空气的焓湿图。这是空气调节史上的一个重要里程碑。美国人称他为“空气调节之父”。事实上，他的成功，既离不开前人的功绩，也离不开他的同事们的努力。

在空气调节的沿革上，制冷设备这方面，压缩式制冷机由往复式进步到离心式，制冷剂由氨发展到无毒害的氟利昂，是一项重大的改革。离心式制冷机的结构较为紧凑，节省不少材料，费用大为经济，特别适应于采用低压制冷剂。而离心式制冷机，则是由Carrier在1922年发明的。空调系统方面，由全空气系统进展到空气-水系统，是空气调节又一次重大改革。大部分的大截面风道，改由水管来代替，既节约了许多金属材料，又节省了风道所占建筑物的空间，经济效益很大。而空气-水系统的诱导器装置，则又是Carrier在1937年所发明的。这种装置，虽然到了本世纪六十年代，都已改为风机盘管，但在以前二十年中的旅馆、公寓、医院或办公楼等公共建筑，曾经风行一时。风机盘管消除了诱导器噪声大和耗能较多、调节不易等主要缺点，使空气-水系统更加具有生命力，因此在世界各国一直盛行到现在。

美国舒适空调的发展，远远迟于工业空调。直到本世纪二十年代，才开始在几百家影剧院设置全空气空调系统。这类公共建筑物空间较大，有足够地方可装大风道，温湿度只需要总的调节，所以迄今仍用单风道或双风道的全空气系统。全空气系统的一大进步则是变风量的应用，可以按负荷变化而改变通风量，起了节能的作用。近十年来，各国采用变风量的全空气系统日渐增多。

除了集中式的空气调节系统外，二十年代末期也出现了整体式的空调机组。这是包括制冷机、通风机、空气处理装置等组合在一起的成套空调设备。五十多年来，空调机组发展迅速，现在通用的已有柜式、窗式和悬挂式等好几类机组。在冬季不太冷的地区，利用机组的制冷设备作逆向循环，从周围环境的低位热能中吸取热量作供暖用，这种热泵的作用，则是近期的发展。

在我国，空气调节的发展并不太迟。工业空调和舒适空调几乎是同时起步的。三十年代抗战之前，曾有过一个高峰时期。上海一地，许多纺织厂已有了空气调节系统。几座高层建筑的大旅馆，和几家所谓“首轮”电影院，先后设置了全空气式的空气调节系统。有一家电影院和一家银行，还安装了离心式制冷机。当时，高层建筑装有空气调节，上海是居全亚洲之冠的。但到1937年，我国不幸遭受日本侵略者的破坏，空气调节事业的发展被迫中断。

解放以后，在党的领导下，我国人民急起直追。高等学校设置了暖通空调专业，出版机构印出了暖通空调的书籍，设计院有了暖通空调设计组，制造厂生产了暖通空调的设备。现在，各大城市的高级旅馆，先后装置了空气调节系统，工业空调和舒适空调受到并重。各种型式的制冷机，以及整体式的空调机组，已由许多工厂进行生产。

目前全国从事暖通空调方面的各种工作人员已有两万多人。这是一支庞大的队伍。在中国建筑学会下，设有暖通空调学术委员会，会员很多，正与其他有关学会的会员联系在一起，为中国的空气调节事业作出努力。

二、空气调节的任务和作用

我国幅员辽阔，东起东经135度，西至东经74度，南起北纬3度，北至北纬54度，面积近一千万平方公里。全国最热的地方最高温度在45°C以上，夏季常见高温达38°C。全国最冷的地方最低温度在-42°C以下，冬季常见低温为-35°C。大气压力，在沿太平洋的平原地区接近于标准大气压，但在西部高原城市拉萨，只有0.64标准大气压。各地自然环境、气象条件差异之大，我国在全世界是首屈一指的。

盛夏的酷暑和隆冬的严寒，会给工农业生产和人民生活带来很大的威胁和妨碍。特别是有些特殊疾病的治疗过程，要求保持严格的室内气候环境，否则会受很大影响。

空气调节的任务，就是在任何自然环境下，将室内空气维持在一定的温度、湿度、气流速度以及一定的洁净程度。这也是所有空气调节系统一般的要求。所要求数值的大小和允许波动范围，则视各种工业建筑和民用建筑的类别和性质而有所不同。

例如：纺织工业、印刷工业、钟表工业、胶片工业、食品工业、卷烟工业、地下建筑、水下隧道、粮食仓库、农业温室等部门，都不可缺少空气调节系统。公共建筑如大会堂、展览馆、影剧院、音乐厅、图书馆、博物馆、体育馆、游泳池、医院、妇产生、学校、幼儿园、宾馆、旅馆、餐厅、商场等等，都必须具备象上述四项要求的全面的空气调节系统。其中与人民身体健康关系密切的如医院和妇产生等，尤应优先设置空气调节系统。

再如：电子工业、仪表工业、精密机械工业、合成纤维工业、以及有关工业生产过程和有关科学研究过程所需的控制室、计量室、检验室、计算机房等，都要求除了上述四项目的外，同时还规定温度、湿度的上下波动幅度，规定气流速度不得大于或小于一定范围，并规定室内含尘浓度不得超过某个数值。象室内空气温度的波动幅度，要求在 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的范围内，相对湿度的波动幅度，要求在 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 的范围内等。这就是恒温恒湿空气调节的任务。

又如：制药工业和医院的手术室、烧伤病房等，不但要求室内空气具有一定的温、湿度，还要求不超过一定的含尘浓度，而且规定其所含细菌数的最大限度。这就是无菌净化的空气调节的任务。

此外，象航天飞行中的座舱，它的周围气候环境瞬息万变，而仍须规定舱内温、湿度在一定范围。这就要求用空气调节技术来解决这问题，说明空气调节对宇宙航行事业的发展，同样是休戚相关的。

我国空气调节的应用，已经日趋广泛。很多公共建筑物以及各种工厂的有关车间，都已设置了空气调节系统。空气调节的耗能量愈来愈大。几个工业先进国家的空调所耗电能，包括供暖通风在内，已占全国耗电总量的30%左右。这个约计数字可供我国参考。这就要求我们不仅要掌握暖通空调的用能，而且要研究暖通空调的节能。

最重要的空气调节的节能工作，应该在系统设计中完成。就是要设计一个尽量讲究能量节约的空调系统。其次是设法回收能量，使空调系统中的热能，回收再利用。现在已有回收热能的设备。例如我国上海嘉定光机所、南京金陵饭店、北京长城饭店等，已经装置了转轮式的空调热回收设备。这仅仅是一个开端，以后有大量工作等待进行。

由此看来，空气调节技术将在我国四化建设中起很大的作用。总结空气调节的主要用途，可以列为下述几点：

1. 造成合适的室内气候，以利于工业生产及其科学研究。保证各种需要特定气候的工

业产品得以顺利地进行生产，保证各项需要特定环境的科学实验得以理想的进行。

2. 创造舒适环境，以利于人们工作、学习和休息。使能增进人们的健康，保证工作和学习效率的提高。

3. 形成适应于特殊医疗的气候条件，以利于病员有效医治，使一些需要特定气候环境的手术和治疗得以安全进行，保证病员早日恢复健康。

4. 保持住适宜的室内气候，以利于建筑物抵抗自然侵蚀。使能防护建筑物遭受干裂、潮损、虫蚀等各种侵袭，使其寿命得以延长。

5. 为妥善保存珍贵物品、博物馆藏、图书馆藏等创造条件，以利于它们的珍藏。使能保护它们不受霉潮的侵害，以期长久保存。

三、空气调节系统的一般组成

为了达到空气调节的目的，发挥空气调节的作用，就必须有空气调节的措施和方法。一般空气调节的基本措施，要求其系统结构包含下面几个部分：

1. 进风部分

空气调节系统必须取入室外空气，常称“新风”。取入多少，主要由系统的服务用途和卫生要求决定。在要求严格的场合，例如有大量毒害物或放射性物质的车间或实验室，不允许室内空气作再循环时，也有全部采用新的。新风的进出口，应设置在其周围不受污染影响的建筑物的部位。这种进出口，连同新风引入通道与阻止外来异物的结构等，就是空气调节系统的进风部分。

2. 空气过滤部分

空气调节系统的新风取入后，首先应经过一次预过滤，清除掉较大的尘粒。过滤到什么程度，视系统所送调节空气的清洁要求而定。通常空气调节系统设有两级空气过滤装置（即预过滤器和主过滤器），过滤器的种类较多，型式不一。根据过滤能力的大小，过滤效率的高低，过滤器可分为初效过滤器、中效过滤器和高效过滤器。预过滤器用的一般是低效的粗过滤器。

3. 空气热湿处理部分

将空气加热和加湿，降温和减湿，将有关处理过程综合在一起，总称为空气调节系统的空气处理部分。这个部分采用表面式换热器（冬季通入热媒为蒸汽或热水，夏季通入冷媒为冷冻水或制冷剂）。或者可采用喷淋冷水或热水的喷水室起到降温、减湿或加热、加湿的作用。过去大多数空气调节系统设置喷水室作为空气处理部分，现在用表面式换热器的方式逐渐增加。

4. 空气输送部分

通风机和通风管道，可称为空气的输送部分。通风机是空调系统主要噪声源所在，工程设计中常需采用消声器。有的空气调节系统设有两台通风机，一台送风机，一台回风机，则称“双风机”系统。空气调节系统的通风机都要保温，防止冷、热量损失。通风道大多采用矩形风道。但由于空调风速一般较低，矩形风道截面较大，占去建筑空间势必较多，这正是普通空调系统的缺点。有些高速空调系统，则多用圆形风道。

5. 冷热源部分

空调装置的冷源分自然冷源和人工冷源两种，前者指深井水，由于城市大量利用深井水对地层下沉等有影响，一般已禁止使用。而人工冷源都是以液体气化制冷法来获得的。

其中包括蒸汽压缩式制冷、吸收式制冷以及蒸汽喷射制冷等多种方式。目前我国使用最广泛的是活塞式压缩制冷机和离心式制冷机，其制冷工质则以氟利昂为主。

空调装置的热源也有自然和人工的两种，自然热源指太阳能和地热，但目前使用都受到技术上的限制，因而并不普遍。人工热源指以煤、石油、煤气作燃料的锅炉所产生的蒸汽或热水。

利用制冷机的放热部分（冷凝器）所排出的热量同样也是极有效的热源。

直接用电能供热是不经济的，因而不是可取的热源。

由上述组成部分构成的空调系统即所谓的集中式空调系统（又称全空气系统）。这种系统出现最早并是至今用得最多、最基本的方式。其特点是，空气处理设备集中在空气处理室（空调机房），冷热源也集中在一起（如单独设置的机房），处理后的空气用风道分送到各空调房间，因而系统便于集中管理和维护。此外，某些空气处理的质量也可以达到较高的水平（如温湿度精度、洁净度、噪声标准等）。

如果将前述空气处理设备和制冷机、风机等组合在一起成为一种整体的机组——即空调器或空调机组。它们又称为局部式空调系统。它可以直接将此机组设在要求空调的房间内进行空调。也可以放在相邻的房间用很短的风道与房间相连接。一般地说，此类系统可满足不同房间的不同空调要求，使用灵活，移动方便，但装置总功率必然较大。

具有集中处理空气（一般只处理新风）的空调箱和风道，同时又在各空调房间内设有局部处理装置（或称末端装置，如诱导器、风机盘管等）的空调系统称半集中式空调系统，它们如诱导器空调系统和风机盘管系统。此类系统与集中式相比省去了回风管道，缩减了送风管断面，却同样有效地利用了再循环空气，因而占用面积减少了。此类系统多用于高层建筑。

四、空气调节的发展趋势

五十年前，空气调节从全空气系统发展到空气-水系统，主要是由于节省建筑空间的需要，节省设备材料的需要，以及便于调节控制的需要。就是说，既要给使用者便利，又要使投资和运行费用较为经济。

近来，空气调节从定风量系统发展到变风量系统，则是由于节约能量的需要。空调设备的应用日广，随之而来的势必是耗能日多。工业先进国家用于空气调节的电能耗占全国所耗电能的20~30%。在我国，这个比例也是愈来愈大。所以，空调节能已提到议事日程上来了。

这些发展情况的例子，说明空气调节一方面在提高工业产品质量，提高工作效率，以及改善人民生活环境，另一方面正在力求改变人们普遍认为空调是“奢侈品”的旧观念。也惟有这样，空气调节的应用才可以普及化。

总的来说，我国空气调节装置的日渐普遍，是一种可以预见的发展趋势。而空气调节要求大量节约用能，大量节约投资，也将是必然的发展趋势。

目前节能问题已是一个世界性问题。虽然有些国家水力资源特别丰富，有些国家尽量利用风力资源，但他们仍然非常重视节能。节能既包括用能的节约，也包括能源的开发。例如瑞典，1982年全年总耗电量一千亿kWh，其中来自水力发电55%，核能发电40%，燃烧燃料发电5%。到1990年，他们计划完全不用燃烧燃料来发电。同时，他们执行节约用能的措施，已到了家喻户晓的地步。实际上，这种例子并不仅是在个别的国家。

展望我国的空调事业，对于加强节能措施，势将放到首要的地位。在回收热量方面，目前已有转轮式热交换器、板翅式热交换器和热管等。估计几年之后，肯定将有结构更好、效率更高的节能设备。

在节约热源方面，目前的分散性锅炉群，既是增多燃料消耗，又会造成空气污染，势必逐步淘汰。估计本世纪末，将代之以区域供热的热网，遍设于各大城市，随时供应热水或蒸汽到空气调节系统。

在改善冷源方面，有些地方，区域供冷可能是一种措施。目前通用的制冷剂和制冷机，不久将会被成本较低、功效较好的新制冷剂和制冷机来代替。新制冷剂的试制工作，许多国家都在大力进行研究。

在节省电能方面，把太阳能或地热等天然能源，直接应用到空气调节的机械设备上，将会是一种发展趋势。至于空调设备改善到可以配用较小功率的原动力，则将是近期可达到的目标。

在节约风量方面，目前变风量设备的装置已在国内逐渐推广。估计将来全空气空调系统存在的场合，大多将是变风量式的系统。

在我国空调事业的发展上，还有一个最关键的问题，就是应使投资费用减小到最低程度。在节约材料方面，不论管材、板材……，金属材料用得愈少愈好。象空气-水系统中，水管代替风道，节省不少金属材料。估计若干年后，空调系统将会发展成为基本上免除风道的结构。

在节省建筑空间方面，目前民用建筑物内每层的层高，已趋向尽量降低，空调系统势必不能多占建筑空间。从这点看，一般全空气空调系统的应用范围，将渐趋狭小。至于公共建筑的高大厅堂，则将大多是变风量的全空气系统，已如上述。

在节约空调出风设备方面，目前我国也已制成送风与照明合在一起的空调风口灯，既节省了送风与照明总设备投资费用，又免除了两者在顶棚上位置的矛盾。依此类推，在现阶段，空调系统和其他系统合用的设备，值得研制。

关于空气调节技术上的精度水平，工业先进国家发展得较快。例如瑞士，早已有了恒温精度 $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ 的实验室。美国，则恒湿精度早已达到 $\pm 0.25\%$ ，空气洁净度早已达到 $0.1\mu\text{m}10$ 级水平，我国的空调，也在向高精度发展。但高精度的代价是不小的。应该注意，若是实用上不需要某种高级的精度而盲目采用，将是一种严重的浪费。

在空气调节设计上，有些重要的基本数据，应根据我国的情况，自行研究决定。例如：中国人的人体发热量，不能用外国人的数据，应由自己测定；我国各地的室外设计温度，应该根据各地的气象记录来决定，等等。

各种设计和各项研究工作以及空调系统的运行管理，一切都将用计算机在自动化基础上进行，这肯定是我国空调发展中的趋势。以上这些任务，正等待着我们空调工作者去完成。

第一章 湿空气的物理性质和焓湿图

空气调节的任务是创造一个生产、科研及人们生活所需要的空气环境。为此，就要对空气进行种种处理，如加热、冷却、加湿、减湿等。因而，我们首先要了解空气的组成成分以及空气的物理性质，同时还要熟悉反映空气物理性质的焓湿图并掌握空气处理过程在焓湿图上的表示方法。

第一节 湿空气的组成和物理性质

一、湿空气的组成

环绕地球周围的空气称为大气。大气中含有多种气体、水蒸汽和污染物质。从大气中除去全部水蒸汽和污染物质时，所剩即为干空气。而干空气与水蒸汽的混合气体称为湿空气。干空气是由氮、氧、氩、二氧化碳、氦和其他一些微量气体所组成的混合气体。湿空气中的水蒸汽含量很少，它来源于海洋、江河、湖泊表面的水分蒸发，各种生物（人、动植物等）的生理过程以及工艺生产过程。在空气中，水蒸汽所占的百分比是不稳定的，常常随着季节、气候、湿源等各种条件的变化而改变。

湿空气中水蒸汽的含量虽少，但其变化会引起湿空气干、湿程度的改变，进而对人体感觉、产品质量、工艺过程和设备维护等都有直接影响，这是不容忽视的。同时，空气中水蒸汽含量的变化又会使湿空气的物理性质随之改变，所以本章将着重研究有关这方面的问题。

广泛的测定结果表明，干空气的组成还是比较稳定的。只有少数成分随时间、地理位置、海拔高度等因素有少许变化。在空调工程中，为了进行热工计算，必须确定干空气的热工性质，而热工性质又与干空气的组成成分有关。因此有必要将干空气的成分标准化。目前推荐的一种海平面附近清洁的干空气的标准成分如表1-1所示。

干空气中氮、氧、氩的量是非常稳定的。而二氧化碳的含量则随植物生长状态、气象条件、海水表面温度、污染状态等有较大的变化。然而由于其平均含量非常小，所以其含量的变化对干空气性质的影响，可以不予考虑。在研究空气物理性质时，允许将干空气作为一个整体来对待。

此外，在接近地球表面的大气中，还悬浮有尘埃、烟雾、微生物（细菌、病毒等）、以及废气、化学排放物等。它们对于空气清洁程度的影响及处理方法，将在有关章节中介绍。

二、湿空气的状态参数

湿空气的物理性质除和它的组成成分有关外，还决定于它所处的状态。湿空气的状态通常可用压力、温度、比容等参数来表示，这些参数我们称为湿空气的状态参数。

在热力学中，我们将常温常压下（空调属于此范畴）的干空气视为理想气体，存在于

海平面附近清洁干燥大气标准成分

表 1-1

成分气体(分子式)	成分体积百分比(%)	对于成分标准值的变化	分子量(C-12标准)
氮(N ₂)	78.084	—	28.013
氧(O ₂)	20.9476	—	31.9988
氩(Ar)	0.934	—	39.934
二氧化碳(CO ₂)	0.0314	*	44.00995
氖(Ne)	0.001818	—	21.183
氦(He)	0.000524	—	4.0026
氪(Kr)	0.000114	—	83.80
氙(Xe)	0.0000087	—	131.30
氢(H ₂)	0.00005	?	2.01594
甲烷(CH ₄)	0.00015	*	16.04303
氧化氮(N ₂ O)	0.00005	—	44.0128
臭氧(O ₃) 夏	0~0.000007	*	47.9982
冬	0~0.000002	*	47.9982
二氧化硫(SO ₂)	0~0.0001	*	64.0828
二氧化氮(NO ₂)	0~0.000002	*	46.0055
氨(NH ₃)	0~微量	*	17.03061
一氧化碳(CO)	0~微量	*	28.01055
碘(I ₂)	0~0.000001	*	253.8088
氡(Rn)	6×10 ⁻¹³	?	+

注：* 随时间和场所的不同，该成分对标准值有较大变化；
+ 氧有放射能，由Rn²²⁰和R²²²两种同位素构成，因为同位素混合物的原子量变化，所以不作规定。(Rn²²⁰半衰期54秒，Rn²²²半衰期3.83日)

湿空气中的水蒸汽由于处于过热状态，加之压力低、比容大、数量微少，也可以近似地当作理想气体来对待。所以，由于空气和水蒸汽所组成的湿空气，也应遵循理想气体的规律，其状态参数之间的关系，可以应用下列理想气体状态方程式表示：

$Pv = RT$ (1-1)

或 $PV = mRT$ (1-2)

式中 P ——气体的压力，Pa；
 v ——气体的比容，m³/kg；
 R ——气体常数，取决于气体的性质，J/kg·K；
 T ——气体的热力学温度，K；
 V ——气体的总容积，m³；
 m ——气体的总质量，kg。

当气体的总质量采用kmol为单位时：

$PV_m = R_0 T$ (1-3)

式中， V_m 为1kmol的体积（m³/kmol）。由阿伏加德罗定律可知，对于一切具有相同 P 、 T 值的气体，其 V_m 相同。当 $P = 101325\text{Pa}$ ， $T = 273.15\text{k}$ 时，实验测得 $V_m = 22.4145\text{m}^3/\text{kmol}$ ，因而

$R_0 = \frac{PV_m}{T} = \frac{101325 \times 22.4145}{273.15} = 8314.66\text{J/kmol} \cdot \text{K}$

R_0 称为通用气体常数，即物理学中的普适气体常数。

将 R_0 除以任何气体的分子质量 M ，则得 1 kg 该气体的气体常数 R ：

对于干空气
$$R_g = \frac{R_0}{M_g} = \frac{8314.66}{28.97} = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

对于水蒸汽
$$R_q = \frac{R_0}{M_q} = \frac{8314.66}{18.02} = 461 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

式中角标 g 表示干空气， q 表示水蒸汽。

下面分述空调工程中湿空气的几种常见状态参数。

(一) 压力

1. 大气压力

地球表面的空气层在单位面积上所形成的压力称为大气压力，它的单位以帕（Pa）或千帕（kPa）表示。

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

除此以外，大气压力还有多种使用单位，如气象上习惯以巴（bar）或毫巴（mbar）表示，物理上习惯以标准大气压或物理大气压（atm）表示，上述各单位间的关系见表 1-2。

大气压力不是一个定值，它随着各个地区的拔海高度的不同而存在差异，同时还随着季节、天气的变化而稍有高低。海平面上的标准大气压力为1013.25mbar。大气压力随海拔高度的变化关系如图1-1所示。例如，我国东部的上海市海拔高度4.5m，夏季压力为1005mbar，冬季为1025mbar；而西部青海高原的西宁市海拔2261.2m，夏季压力为773mbar，冬季为775mbar，气压比沿海城市低很多。大气压力不同，空气的状态参数也要发生变化。因此在空调系统设计和运行中使用的一些空气参数，如果不考虑当地气压的大小，就会造成一定的误差。

在空调系统中，空气的压力是用仪表测出的，但仪表指示的压力不是空气压力的绝对值，而是与当地大气压力的差值，称之为工作压力（过去叫表压力）。它不能代表空气压力的真正大小，只有空气的绝对压力才是空气的一个基本状态参数。工作压力与绝对压力的关系为：

$$\text{压力} = \text{当地大气压} + \text{工作压力} \quad (1-4)$$

凡未指明是工作压力的，均应理解为绝对压力。

2. 水蒸汽分压力

所谓气体分压力，就是混合气体中各组成气体单独占有混合气体容积、并具有与混合气体相同的温度时所产生的压力。道尔顿定律指出：混合气体总压力等于各组成气体分压力之和。大气既然是由干空气和水蒸汽组成，那么大气压力也就必然是水蒸汽分压力和干空气分压力之和，即：

$$P = P_g + P_q \quad (1-5)$$

式中 P ——湿空气压力，即大气压力；

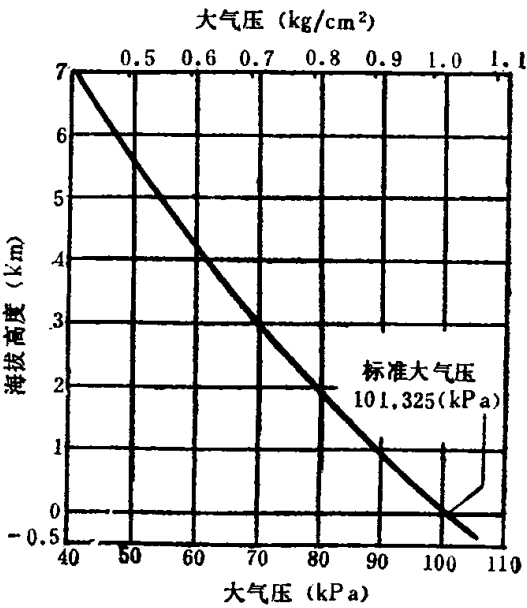


图 1-1 大气压与海拔高度的关系

P_g ——干空气的分压力;

P_q ——水蒸汽的分压力。

从气体分子运动的观点来看, 气体分子愈多, 即撞击容器壁的机会愈多, 表现出来的压力也就愈高。因此, 水蒸汽分压力的大小反映了水蒸汽含量的多少。

大气压力单位换算表 表 1-2

帕 (Pa)	千 帕(kPa)	巴 (bar)	毫巴 (mbar)	物理大气压(atm)	毫米汞柱(mmHg)
1	10^{-3}	10^{-5}	10^{-2}	9.86923×10^{-6}	7.50062×10^{-3}
10^3	1	10^{-2}	10	9.86923×10^{-3}	7.50062
10^5	10^2	1	10^3	9.86923×10^{-1}	7.50062×10^2
10^2	10^{-1}	10^{-3}	1	9.86923×10^{-4}	0.750062×10^{-1}
101325	101.325	1.01325	1013.25	1	760
133.332	0.133332	1.33332×10^{-3}	1.33332	1.31579×10^{-3}	1

(二) 温度

温度是分子动能的宏观结果。为了度量温度的高低, 必须有一个公认的标尺, 简称“温标”。

一种是表示热力学温度的开尔文温标, 简称开氏温标, 符号为 T , 单位为K。它是以气体分子热运动平均动能趋于零的温度为起点, 定为0K, 以水的三相点温度为定点, 定义为273.16K, 1K即为水三相点热力学温度的 $\frac{1}{273.16}$ 。

另一种是目前国际上实用的摄氏温标, 符号为 t , 单位以 $^{\circ}\text{C}$ 表示。摄氏温标 1°C 和开氏温标1K的分度是相等的, 两者的关系为:

$$t = T - 273.15 \approx T - 273$$

式中273.15是冰点的热力学温度。

温度是空气调节中的一个重要参数。当空气受热后其内部分子动能增大, 则表现为温度的升高。

(三) 含湿量

湿空气是由干空气和水蒸汽组成的, 其中每 kg干空气所含有的水蒸汽量称为含湿量 d , 即:

$$d = \frac{m_q}{m_g} \quad \text{kg/kg}_{\text{干空气}} \tag{1-6}$$

式中 m_q ——湿空气中水蒸汽质量, kg;

m_g ——湿空气中干空气质量, kg。

若湿空气中含有 1 kg干空气及 d kg水蒸汽, 则湿空气质量应为 $(1 + d)$ kg。

由于干空气和水蒸汽在常温常压下都可当作理想气体, 因此能够分别应用理想气体状态方程式。

对于水蒸汽: $P_q V_q = m_q R_q T_q$ (1-7)

对于干空气: $P_g V_g = m_g R_g T_g$ (1-8)

由于空气中气体分子的自由度很大, 因此湿空气中干空气和水蒸汽是均匀混合的, 两者具有相同的容积和相等的温度, 即 $V_q = V_g$ 、 $T_q = T_g$; 又知气体常数 $R_q = 461\text{J/kg}\cdot\text{K}$ 、