

高等学校试用教材

空 气 调 节

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、空气调节系统与运行工况、气流组织与管道设计、消声与防振、测定与调整等，并介绍了某些特殊空调工程的设计特点和能源的有效利用。全书采用国际单位制。

本书也可供有关专业工程技术人员参考。

高等学校试用教材

空 气 调 节

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 1/4 插页：1 字数：525 千字

1981年4月第一版 1981年4月第一次印刷

印数：1—19,500册 定价：2.25元

统一书号：15040·4015

目 录

第一章 绪论	1
第一节 空气调节的任务和作用	1
第二节 空气调节的基本方法	2
第三节 空气调节技术的发展概况	3
第二章 湿空气的物理性质和焓湿图	5
第一节 湿空气的组成和物理性质	5
第二节 湿空气的焓湿图	12
第三节 湿球温度和露点温度	17
第四节 焓湿图的应用	21
第五节 温湿图($t-d$ 图)简介	26
第三章 室内热(冷)湿负荷与送风量的确定	29
第一节 室内空气计算参数的确定	29
第二节 室外空气计算参数的确定	32
第三节 太阳辐射热对建筑物的热作用	36
第四节 室内各种热(冷)湿负荷计算	42
第五节 空调房间送风量的确定	60
第四章 空气的热湿处理	64
第一节 空气热湿处理的途径及使用设备的类型	64
第二节 空气与水直接接触时的热湿交换	65
第三节 用喷水室处理空气	70
第四节 用表面式换热器处理空气	86
第五节 空气的其它热湿处理方法	106
第五章 空气的净化处理	121
第一节 室内空气的净化标准	121
第二节 大气尘的尘粒特性和含尘量	122
第三节 空气调节用过滤器的过滤机理及其主要特性	124
第四节 空气过滤器效率的检验和分类	123
第五节 空调工程常用过滤器介绍	130
第六节 空气除臭装置——活性炭过滤器	134
第七节 空气离子化在空调中的应用	135
第六章 空气调节系统	137
第一节 空气调节系统的分类	137
第二节 新风量的确定和空气平衡	138
第三节 普通集中式系统	140
第四节 双风道系统	152
第五节 变风量系统	155

第六节	诱导器系统	160
第七节	风机盘管机组系统	171
第八节	局部空调机组	175
第七章	空调系统的全年运行调节	178
第一节	运行工况分析的意义	178
第二节	室内热湿负荷变化时的运行调节	178
第三节	室外空气状态变化时的运行调节	184
第四节	集中式空调系统的自动控制	192
第五节	其他空调系统的运行调节	197
第八章	空调房间的气流组织	207
第一节	送、回风口空气流动规律	207
第二节	送、回风口的型式	214
第三节	空调房间的气流组织形式	217
第四节	气流组织的计算	222
第九章	空调系统的风道设计	237
第一节	风道系统的一般计算方法	237
第二节	用静压复得法计算风道系统	243
第三节	均匀送风管道的计算	248
第四节	空调系统风道设计中的若干问题	252
第十章	空气调节系统的消声与防振	255
第一节	噪声及其物理量度	255
第二节	噪声的主观评价和室内噪声标准	258
第三节	空调系统的噪声源	259
第四节	空调系统中噪声的自然衰减	261
第五节	消声器消声量的确定	263
第六节	消声原理和消声器的应用	265
第七节	空调装置的防振	270
第十一章	某些类型工程的空调应用	274
第一节	恒温恒湿室	274
第二节	环境试验室	277
第三节	净化空调工程	281
第四节	高大空间建筑的空气调节	284
第五节	高层建筑的空气调节	287
第十二章	空调系统的测定与调整	290
第一节	空调系统风量的测定与调整	290
第二节	空气处理过程和室内空气环境的测定	297
第三节	测试调整中所发现问题的分析及其改进办法	300
第十三章	空调系统的能源有效利用	305
第一节	能源有效利用的意义与途径	305
第二节	自然能的利用	306
第三节	热能的回收	309
第四节	其它利能与节能方法举例	315

附 录	317
附录 2-1 湿空气的密度、水蒸汽压力、含湿量和焓	317
附录 2-2 湿空气焓湿图	插页
附录 3-1 室外气象参数	319
附录 3-2 北京市太阳辐射强度	319
附录 3-3 北京市透过普通玻璃窗的太阳总辐射强度	320
附录 4-1 喷水室热交换效率实验公式的系数和指数	321
附录 4-2 部分空气加热器的传热系数和阻力计算公式	322
附录 4-3 部分水冷式表面冷却器的传热系数和阻力试验公式	323
附录 4-4 SRZ型空气加热器技术数据	324
附录 4-5 水冷式表面冷却器的 ε_1 值线算图	325
附录 4-6 水冷式表面冷却器的 ε_2 值	325
附录 4-7 JW型表面冷却器技术数据	326
附录 4-8 氯化锂溶液的比热	326
附录 9-1 当量直径线算图	327
附录 9-2 风道阻力线算图	328
附录 9-3 若干通风管件局部阻力系数表	329
附录 9-4 三通局部阻力系数线算图	332
附录 9-5 静压复得计算图	333
附录 9-6 $L^{0.62}$ 计算图	333
附录 9-7 软风管(直管部分)的阻力表	334
空调工程常用单位换算表	334

第一章 绪 论

第一节 空气调节的任务和作用

人类在长期与自然环境的斗争中,主要是解决外界环境对人类生存的威胁和影响。夏季的酷热或冬季的严寒给人类的生产和生活带来极大的妨害,有时甚至会危及人体健康和生命安全。随着社会的发展,人类在抵御自然环境侵害的能力方面,手段越来越多,从消极防御逐步发展到能动地去控制环境,并且从保证人类生存的基本条件逐步发展到创造一定的使人感到舒适的空气环境。

同时,伴随社会生产力的发展和提高,各种生产过程和科学实验过程也都要求建立严格受控的空气环境,以保证产品质量和科学实验过程的正常进行。

人、生产过程和科学实验所要求的空气环境,是指某一特定空间的空气温度、湿度、清洁度和空气流动速度能满足工艺和舒适要求。在现代技术发展中,有时还对空气的压力、成分和气味等提出一定的要求。采用人工的方法,创造和保持满足一定要求的空气环境,就是空气调节的任务。

空气调节对国民经济各部门的发展和对人民物质文化生活水平的提高,有着重要的作用。如在各种精密机械和仪器的生产过程中,由于加工产品的精度提高,装配及检验过程十分精密严格,因此需要把空气的温度和湿度控制在相当小的波动范围内。象某些计量室要求全年保持空气温度为 $20 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 $50 \pm 5\%$ 的空气环境;而某些加工和装配车间除空气湿度有一定要求外,还要求保持空气温度在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 等不同等级范围内波动。

又如在电子工业的发展中,产品体积高度微型化,从个别电子器件装配生产的电子设备到大规模集成电路,产品体积缩小数千倍。而大规模集成电路的生产不仅对空气温度、湿度有一定的要求,而且对空气中含有尘粒的大小和数量也有相当严格的要求。一粒较大颗粒的灰尘(如大于 0.5 微米)在集成电路的生产过程中常会引起极细的导线间的短路或断路,并且落在硅片上的灰尘还有可能造成额外的杂质或腐蚀,使整个集成电路报废。因此,在电子工业中近年来大量建立“洁净室”,以提高产品合格率。这种洁净室就是利用高效过滤技术,将每升空气中含有的以十万甚至以百万计的灰尘颗粒,降低到每升空气中只含有几粒至几百、几千粒的不同净化等级,以控制空间的含尘数量。

净化技术不仅对电子工业是极为重要的,而且对原子能工业中防止放射性污染、医药卫生及生物制品生产环境的无菌作业、高纯物质的提取和食品工业等都是不可缺少的。

在现代工业和科学技术的许多部门中,由于需要对产品的高可靠性和稳定性进行检验,又由于一些科学实验过程要求建立可控的或某种特殊的空间气候,因而需要建立“人工气候室”(或环境实验室),以模拟高温、高湿、低温、低湿及高空空间环境。

纺织、合成纤维、印刷、电影胶片洗印等轻工业的生产车间,重工业大型生产过程的

控制室,各种计算机室,都要求对环境的温湿度进行不同程度的控制。例如某些合成纤维生产车间,要求维持 $20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的温度条件,而对个别生产过程则要求空气的相对湿度控制在 $\pm 2 \sim 3\%$ 的高精度范围内。

在农业方面,大型温室、机械化畜类养殖场和生物生长室等同样需要空气调节;而对于种子库、粮食仓库等,则需要创造适于粮食保存的空气环境。

此外,地下工程(洞库、坑道、隧道及地下铁道等)的通风减湿,水下与宇宙空间特殊环境的创造和控制,对军事、交通与宇航事业的发展具有重要的作用。

在我国人民物质文化生活水平不断提高的前提下,不仅对一些现代化的大型公共建筑,如大会堂、影剧院和体育馆等要求设置完善的通风空调系统,而且一些图书馆、医院、学校、商店、旅馆和展览馆等,也在逐步设置保证人体舒适的空气调节系统。一般建筑物的空调,虽然短期内不会有很大发展,但是,就其前景而言,逐步实现的趋势是确定无疑的。

为保证人体舒适的空气调节(或简称为舒适性空调)与保证生产过程的空气调节(或简称为工艺性空调),二者在多数情况下,既要满足生产过程的需要,又要保证人体的健康和舒适,因此应该是互相统一的。但对那些有特殊要求的生产工艺过程,或不需人长期停留的生产环境,则可能根据生产需要,建立单纯考虑生产工艺所要求的空气环境。

人体的舒适性,是一个客观存在的尺度,它反映人的机体对周围环境的适应状况。在空气品质(如 CO , CO_2 的含量等)和洁净度适宜的前提下,人体通过对流、辐射和蒸发等途径与周围环境进行热湿交换的总效果,反映了人体的冷、热感觉和舒适感。创造舒适的环境,不仅对人体健康有利,而且是提高劳动生产率的重要因素。不少国家至今还在研究人体在不同情况下的舒适性条件。我国在这方面的研究工作,则有待于更好的开展。

综上所述,空气调节技术与工农业、科学技术和国防事业的发展紧密相联,与劳动人民物质文化生活水平的提高息息相关。因此,可以断言,在我国实现四个现代化的进程中,空气调节将在更大范围内发挥它的重要作用,将在更高的需求下得到发展和提高。

第二节 空气调节的基本方法

如所周知,既定空气环境的干扰源主要来自两个方面:一方面来自环境内部生产过程和人所产生的热、湿和其它有害物发生量的变化,另一方面来自环境外部太阳辐射和室外气候条件的变化。在上述两方面干扰源的综合作用下,内部空气环境参数将偏离人和生产过程的需要值。因此,采取适当的方法和手段,用以消除来自内部和外部影响环境的主要干扰量,从而达到控制该空气环境的目的,这就是空气调节的基本方法。

图 1-1 给出了一个空气调节系统的简图。图中虚线框内的第 I 区,表示受控的工作区(亦称空调区,通常指离地面 2 米,距外墙 0.5 米以内的空间),亦即在此区域内,应保持规定的空气参数。第 II 区为空调系统的输送和分配部分。这主要是指通风机(有时同时设置送风机与回风机)、管道和为使工作区内气流分布合理、均匀而设置的送风口和回风口。第 III 区为空气处理部分。它包括能对空气进行过滤净化、加热、冷却、加湿或减湿处理的各种设备,并可根据内部环境的需要,利用自动调节装置调节其处理量的大小。最后第 IV 区是空气处理设备的冷、热源部分,包括制冷系统和供热系统。为简化起见,这两种

系统的简图未包括在图1-1内。

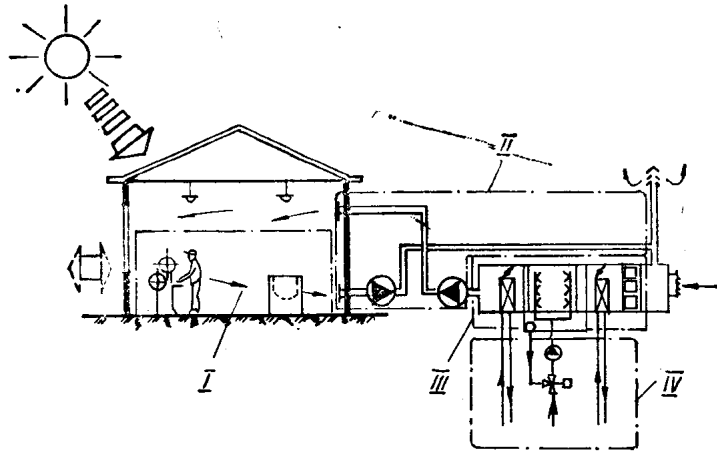


图 1-1 空调系统简图

由上可见，保证工作区空气环境满足给定要求，是通过对空间输送并合理分配一定质量的空气（根据内部环境需要经过处理的空气），与内部环境的空气之间进行热质交换，以克服影响环境的主要干扰量来实现的。

在实践中，作为组成空调系统的各组成部分可能具有不同形式，如某些小型空调机组将处理和输送分配部分合为一体，本身并带有独立的冷源，可以直接安装在被调空间内就地工作。

空气调节技术涉及的主要内容包括：内部空气环境各项参数控制指标的确定；影响环境的各种干扰量（通常主要指热、湿负荷）的确定；各种空气处理设备的选择；管道设计与风机选择；内部气流的合理组织；保证系统全年正常而经济运行的工况分析，以及在此基础上提出相应的自动调节方案。因此，本课程是以《流体力学、泵与风机》，《工程热力学》与《传热学》为基础，同时，又与《工业通风》、《制冷技术》、《供热》、《锅炉》及《自动控制》等课程密切相关。在实际工作中，需要综合应用上述各方面（包括机电方面）的理论与实际知识，在各工种（土建、生产工艺和其它有关工种）的密切配合下，才能完成一个空调对象的设计、施工安装和运行管理任务。

第三节 空气调节技术的发展概况

空气调节技术的形成是在本世纪初开始的，它随着工业发展和科学技术水平的提高而日趋完善。现在，一些工业发达国家已相当普遍地在各个领域中使用空气调节技术。因此，从事空调领域的研究、设计、制造、管理和销售人员的队伍相当庞大。同时，经过不断改进，空调设备在定型化、系列化的基础上，采取大规模工业化生产方法，组装成套产品出售。

我国在解放前，除少数洋行输入外国设备，在少数大城市建有“冷气”工程外，我国自己独立的空调事业几乎是个空白。新中国成立后，随着国民经济的发展，空调技术逐步成长起来。现在已能独立设计、制造和装配多种空调系统，如高精度的恒温恒湿、洁净

室、地下除湿、人工气候室以及大型公共建筑和高层建筑的空调系统。一些专门生产空调设备的工厂，已达到部分定型化、系列化生产各种空气处理设备和不同规格的空调机组。配用在空调系统上的测量和控制仪表以及控制机构的生产，也有了一定的基础。在全国范围内，从事暖通空调专业的设计、研究和施工管理队伍，已具有相当的规模。不少大专院校设有供热通风或空调专业以培养专门技术人材。因此，在现有条件的基础上，坚持从我国的实际出发，自力更生，奋发图强，同时努力学习外国的先进技术和经验，在不长的时期内，一定能使我国的空调技术达到世界先进水平。

目前国际上由于第三世界的觉醒，过去依赖掠夺廉价石油资源大量挥霍浪费的资本主义国家，遭受到“能源危机”的冲击。由于暖通空调的耗能量占有相当大的份额，所以一些普遍应用空调的国家一方面采取降低室内空气环境标准，缩短空调设备运行时间和其它减少耗能的措施，另一方面又在大力开发新的能源。在这种背景下，新能源（如太阳能、地热等）的利用、研究能量的节约和回收、改进能量转换和传递设备的性能、提高系统能量的综合利用效果和寻求系统耗能最少的运行规律性等项研究，均大规模迅速开展起来。

在我国，暖通空调工程的耗能量也很大，某些工业（如电子工业）的空调耗能量达总耗量的40%以上。因此，随着实现四个现代化的进程，必须从现在起就十分注意能源的合理利用和新能源的开发。在空调技术的发展中，要结合我国的具体情况，认真学习外国的先进经验，避免重犯外国的错误。

总之，学习掌握空调技术是实现四个现代化的需要。我们应当在新长征的伟大实践中，不断丰富它的内容，提高它的水平。

第二章 湿空气的物理性质和焓湿图

由前述可知，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层称为大气。从通风空调技术的角度来看，大气是由干空气和水蒸汽两部分组成的。其中，干空气是由氮、氧、氩、二氧化碳、氦和其它一些微量气体所组成的混合气体。各组成气体按容积百分比计算时，其含量如下：

空气中除了干空气之外，还包含有水蒸汽，所以，我们通常将干空气和水蒸汽的混合气体称为湿空气。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。

干空气的组成成分表 表 2-1

组 成 气 体	百分比(按容积计)
氮	78.084
氧	20.946
氩	0.934
二氧化碳	0.033
氦	0.0018

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。

大气中干空气的组成比例虽然基本不变，但在局部范围内，可能因某种气体的混入而影响到空气组成比例的改变。如室内空气由于人的呼吸作用而使氧气的含量减少，二氧化碳气的含量增加，当空气中二氧化碳气含量达到一定程度时，就会严重影响人体的健康。干空气组成比例的变化是与通风空调工程的任务密切相关的，我们就是要通过通风空调技术来保持所需要的成分，减少和消除有害成分的影响。但是，这种空气成分的变化可以看作对于干空气的热工计算没有任何影响。所以，在研究空气物理性质时，允许将干空气作为一个整体来考虑。

此外，大气中还悬浮有灰尘、烟雾、微生物（细菌、病毒）等，它们将影响空气的清洁度，这将在第五章中予以考虑。

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：

$$Pv = RT \quad (2-1)$$

$$\text{或} \quad PV = mRT \quad (2-2)$$

式中 P ——气体的压力， N/m^2 ；

v ——气体的比容， m^3/kg ；

R ——气体常数，取决于空气的性质， $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ；

T ——气体的热力学温度， K ；

V ——气体的总容积， m^3 ；

m ——气体的总质量， kg 。

· 当气体的总质量采用千克分子量为单位时：

$$PV_m = R_0 T \quad (2-3)$$

式中， V_m 为1千克分子量的体积（ m^3/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 $P=101325\text{N/m}^2$ ， $T=273.15\text{K}$ 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1千克该气体的气体常数 R ：

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

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

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2-2。

大气压力不是一个定值，它随着各个地区的海拔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。例如，我国东部的上海市海拔4.5m，夏季大气压力为

大气压力单位换算表

表 2-2

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^{-5}	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

1005mbar, 冬季为1025mbar; 而西部青海高原的西宁市海拔2261.2m, 夏季大气压力为773mbar, 冬季为775mbar, 气压就比沿海城市低多了。大气压力不同, 空气的状态参数也要发生变化, 因此在设计和运行中使用的一些空气参数, 如果不考虑当地的气压大小, 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:

$$\text{压力} = \text{当地大气压} + \text{工作压力} \quad (2-4)$$

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:

$$P = P_g + P_q \quad (2-5)$$

式中 P ——湿空气压力, 即大气压力;

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。

(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 。它是从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 $^{\circ}C$ 表示。摄氏温标 $1^{\circ}C$ 和开氏温标 $1K$ 的间隔是相等的, 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所组成，其中每公斤干空气所含有的水蒸汽量称为含湿量 d ，即：

$$d = \frac{m_q}{m_g} \quad \text{kg/kg}_{\text{干空气}} \quad (2-6)$$

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公斤干空气及 d 公斤水蒸汽，则湿空气质量应为 $(1 + d)$ 公斤。

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。

$$\text{对于水蒸汽:} \quad P_q V_q = m_q R_q T_q \quad (2-7)$$

$$\text{对于干空气:} \quad P_g V_g = m_g R_g T_g \quad (2-8)$$

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 $R_q = 461 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 、 $R_g = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 。将以上关系代入公式(2-6)、(2-7)、(2-8)中，经整理得：

$$d = \frac{R_g P_q}{R_q P_g} = 0.622 \frac{P_q}{P_g} \quad \text{kg/kg}_{\text{干空气}} \quad (2-9)$$

$$\text{或} \quad d = 0.622 \frac{P_q}{B - P_q} \quad \text{kg/kg}_{\text{干空气}} \quad (2-10)$$

式中 B ——大气压力。

考虑到湿空气中水蒸汽的含量较少，因而 d 的单位也可用 $\text{g/kg}_{\text{干空气}}$ 表示，则公式(2-10)变为 $d = 622 \frac{P_q}{B - P_q}$ 。

公式表明，当大气压力一定时，水蒸汽分压力和含湿量近似为直线关系。水蒸汽分压力愈大，含湿量也就愈大。如果含湿量不变，水蒸汽分压力将随着大气压力的增加而上升，随着大气压力的减小而下降。

空气湿度的表示方法，除含湿量以外，还可用绝对湿度，即每立方米湿空气中所含有的水蒸汽量 ($\text{kg/m}^3_{\text{湿空气}}$) 来表示，但绝对湿度使用起来并不方便，因为在水分蒸发和凝结时，湿空气中的水蒸汽质量是变化的，而且湿空气的容积还随温度而变。因此，即使水蒸汽质量不变，由于湿空气容积的改变，绝对湿度亦将相应地变化，因而不能确切地反映湿空气中水蒸汽量的多少。而干空气在温度和湿度发生变化时其质量不变，含湿量仅随水蒸汽量而变，因此它可以方便地度量空气中的水蒸汽量。在空气调节中，含湿量和温度一样也是重要的参数，在空气的加湿、减湿处理过程中都用含湿量来衡量空气中水蒸汽量的变化。

(四) 相对湿度

在一定的温度下，湿空气所含的水蒸汽量有一个最大限度，超过这一限度，多余的水

蒸汽就会从湿空气中凝结出来。这种含有最大限度水蒸汽量的湿空气称为饱和空气。饱和空气所具有的水蒸汽分压力和含湿量，叫做该温度下湿空气的饱和水蒸汽分压力和饱和含湿量。如果温度发生变化，它们也将相应地随着变化，如表2-3所示。

空气温度与饱和水蒸汽分压力、饱和含湿量的关系

表 2-3

空气温度 t (°C)	饱和水蒸汽分压力 $P_{q,b}$ (N/m ²)	饱和含湿量 ($B=101325$ N/m ²) d (g/kg干空气)
10	1225	7.63
20	2331	14.70
30	4232	27.20

所谓相对湿度，就是空气中水蒸汽分压力和同温度下饱和水蒸汽分压力之比：

$$\varphi = \frac{P_q}{P_{q,b}} 100\% \quad (2-11)$$

式中 φ ——相对湿度；

P_q ——空气的水蒸汽分压力；

$P_{q,b}$ ——同温度下空气的饱和水蒸汽分压力。

由式(2-11)可知，相对湿度表征空气接近饱和的程度。 φ 值小，说明空气饱和程度小，吸收水汽的能力强； φ 值大则说明空气饱和程度大，吸收水汽的能力弱。当 φ 为100%时，指的是饱和空气；反之， φ 为零，指的是干空气。相对湿度 φ 和前面所讲的含湿量 d 都是表示空气湿度的参数，但意义却有不同： φ 能够表示空气的饱和程度，但不能表示水蒸汽的含量；而 d 恰与之相反，能表示水蒸汽的含量，却不能表示空气的饱和程度。

前面谈到了湿空气的饱和水蒸汽分压力 $P_{q,b}$ ，它是一个随温度而变的值。道尔顿定律指出：混合气体中各组成气体的分压力与其它气体的存在无关，而系单独占据混合气体体积时的压力。由此看来，湿空气中的水蒸汽既然是处于其自身的压力作用之下，那么水蒸汽的饱和压力与温度之间的对应关系也同样地适用于湿空气中的水蒸汽。因而，湿空气的饱和水蒸汽分压力 $P_{q,b}$ 值，可由有关水蒸汽的饱和压力和温度关系表而查得。

相对湿度还可另外的形式来表达，按公式(2-10)，

$$\text{对于湿空气:} \quad d = 0.622 \frac{P_q}{B - P_q}$$

$$\text{对于饱和空气:} \quad d_b = 0.622 \frac{P_{q,b}}{B - P_{q,b}}$$

式中 d_b ——空气的饱和含湿量，kg/kg干空气。

上面两式相比可得：

$$\begin{aligned} \frac{d}{d_b} &= \frac{P_q}{P_{q,b}} \cdot \frac{B - P_{q,b}}{B - P_q} = \varphi \frac{B - P_{q,b}}{B - P_q} 100\% \\ \varphi &= \frac{d}{d_b} \cdot \frac{B - P_q}{B - P_{q,b}} 100\% \end{aligned} \quad (2-12)$$

式中 B 比 $P_{q,b}$ 和 P_q 大得多，如果把 $\frac{B - P_q}{B - P_{q,b}}$ 视为1，只会造成2~3%的误差。因

此, 相对湿度 φ 又可近似表达为:

$$\varphi = \frac{d}{d_b} \cdot 100\% \quad (2-13)$$

式中 $\frac{d}{d_b}$ ——湿空气的饱和湿度比。

将 $P_q = \varphi P_{q,b}$ 代入 (2-10) 式, 可得含湿量的另一表达式:

$$d = 0.622 \frac{\varphi P_{q,b}}{B - \varphi P_{q,b}} \quad \text{kg/kg}_{\text{干空气}} \quad (2-14)$$

(五) 焓

在空调工程中, 湿空气的状态经常发生改变, 常需要确定此状态变化过程内热量的交换量。例如对空气进行加热或冷却时, 常需要确定空气所吸收或放出的热量。从热工基础可知, 在压力不变的情况下, 焓差值等于热交换量, 而在空调过程里, 湿空气的状态变化过程可以看成是在定压下进行的, 所以能够用湿空气状态变化前后的焓差值来计算空气得到或失去的热量。

1 公斤干空气的焓和 d 公斤水蒸汽的焓两者的总和, 称为 $(1 + d)$ 公斤湿空气的焓。如果取 0°C 的干空气和 0°C 的水的焓值为零, 则湿空气的焓表示如下:

$$i = i_g + d \cdot i_q \quad \text{kJ/kg}_{\text{干空气}} \quad (2-15)$$

式中 i ——对应于 1 公斤干空气的湿空气之焓, $\text{kJ/kg}_{\text{干空气}}$;

i_g 、 i_q ——分别为 1 公斤干空气和 1 公斤水蒸汽的焓, kJ/kg 。

而

$$i_g = c_{p,g} \cdot t$$

$$i_q = 2500 + c_{p,q} \cdot t$$

式中 $c_{p,g}$ ——干空气的定压比热, 在常温下 $c_{p,g} = 1.005 \approx 1.01$, $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$;

$c_{p,q}$ ——水蒸汽的定压比热, 在常温下 $c_{p,q} = 1.84 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$;

2500 —— 0°C 时水的汽化潜热, kJ/kg 。

将比热值代入, 得湿空气焓计算式:

$$i = 1.01t + d(2500 + 1.84t) \quad \text{kJ/kg}_{\text{干空气}} \quad (2-16)$$

或

$$i = (1.01 + 1.84d)t + 2500d \quad \text{kJ/kg}_{\text{干空气}} \quad (2-17)$$

由式 (2-17) 可看出, $[(1.01 + 1.84d)t]$ 是随温度而变化的热量, 称之为“显热”。而 $(2500d)$ 是 0°C 时 d 公斤水的汽化热, 它仅随含湿量变化, 而与温度无关, 故称为“潜热”。由此可见, 湿空气的焓将随着温度和含湿量的升高而加大, 随其降低而减小。在使用焓这个参数时必须注意, 2500 较 1.84 和 1.01 大得多, 因而在空气温度升高的同时, 若含湿量有所下降, 其结果湿空气的焓不一定会增加。

(六) 密度和比容

单位容积空气所具有的质量称为空气的密度 ρ 。而单位质量的空气所占有的容积称为空气的比容 v 。两者互为倒数, 因此只能视为一个状态参数。其表达式为:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{RT} \quad \text{kg/m}^3 \quad (2-18)$$

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} = \frac{RT}{P} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (2-19)$$

式中 m ——空气的总质量, kg ;

V ——空气的总容积, m^3 。

由前述已知, 湿空气为干空气与水蒸汽的混合物, 两者混合均匀并占有相同的容积。因此不难理解, 湿空气的密度 ρ 为干空气密度 ρ_g 与水蒸汽密度 ρ_q 之和, 即:

$$\rho = \rho_g + \rho_q = \frac{P_g}{R_g T} + \frac{P_q}{R_q T} \quad (2-20)$$

将 $P_g = B - P_q$ 、 $P_q = \varphi P_{q,s}$ 及 R_g 、 R_q 值代入上式, 经整理得:

$$\rho = 0.00349 \frac{B}{T} - 0.00134 \frac{\varphi P_{q,s}}{T} \quad \text{kg/m}^3 \quad (2-21)$$

综上所述, 干空气、水蒸汽及湿空气三者之间的关系可归纳如下图:

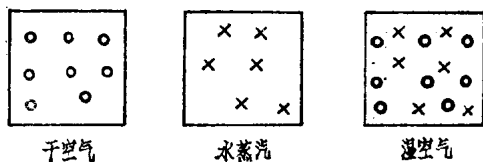


图 2-1 干空气、水蒸汽及湿空气的关系图

温度: $T_g = T_q = T$; 容积: $V_g = V_q = V$; 质量: $m_g + m_q = m$; 密度: $\rho_g + \rho_q = \rho$; 压力: $P_g + P_q = P(B)$; 焓: $i_g + di_q = i$

湿空气的部分状态参数可查阅附录 2-1, 也可用公式计算得出。计算虽较烦琐, 但通过它可以对空气的物理性质及各状态参数间的关系有透彻的了解。

【例2-1】 试计算当大气压力 $B = 101325 \text{N/m}^2$ 、温度 $t = 20^\circ\text{C}$ 时干空气的密度 ρ 。

【解】

已知干空气的气体常数 $R_g = 287 \text{J/kg} \cdot \text{K}$, 干空气压力 P 即是大气压力 B , 则公式 (2-18) 可变为如下形式:

$$\rho = \frac{B}{287 \cdot T} = 0.00349 \frac{B}{T}$$

上式也可由式 (2-21), 将其中 φ 代为零而求得。

将已知数代入上式, 得干空气密度:

$$\rho = 0.00349 \frac{101325}{(273 + 20)} = 1.205 \quad \text{kg/m}^3$$

【例2-2】 在大气压力、温度与上题相同的条件下, 试计算相对湿度 $\varphi = 90\%$ 的湿空气密度。并比较两题计算之结果。

【解】

由附录2-1查得 20°C 时饱和水蒸汽分压力 $P_{q,s} = 2331 \text{N/m}^2$, 将已知数代入 (2-21) 式, 得湿空气密度:

$$\begin{aligned} \rho &= 0.00349 \frac{B}{T} - 0.00134 \frac{\varphi P_{q,s}}{T} \\ &= 0.00349 \frac{101325}{(273 + 20)} - 0.00134 \frac{0.9 \times 2331}{(273 + 20)} \\ &= 1.19 \quad \text{kg/m}^3 \end{aligned}$$

$\rho = 1.19$ 小于上题计算的结果 (1.205), 说明在相同大气压力及温度下, 干空气的密度大于湿空气的密度。此结论从公式 (2-21) 中亦可看出, 等式右边第一项为干空气密度, 它与 $0.00134 \frac{\varphi P_{q,s}}{T}$ 之差为湿空气密度, 故同容积的湿空气比干空气轻。

【例 2-3】 试求例2-2中空气的含湿量及焓值。

【解】

按式 (2-14) 计算含湿量:

$$d = 0.622 \frac{\varphi P_{g,b}}{B - \varphi P_{g,b}} = 0.622 \frac{0.9 \times 2331}{101325 - 0.9 \times 2331} = 0.0132 \text{ kg/kg 干空气}$$

按式 (2-15) 计算空气焓值:

$$\begin{aligned} i &= 1.01t + d(2500 + 1.84t) \\ &= 1.01 \times 20 + 0.0132(2500 + 1.84 \times 20) \\ &= 53.7 \text{ kJ/kg 干空气} \end{aligned}$$

第二节 湿空气的焓湿图

上节中介绍了空气的主要状态参数: t 、 d 、 B 、 φ 、 i 、 P_g 及 ρ 。其中温度 t 、含湿量 d 和大气压力 B 为基本参数, 它们决定了空气的状态, 并可由此计算出该空气状态的其余参数值。但是这些计算是相当繁杂的, 在设计和运行中需要有一个线算图, 它既能联系

以上七个参数, 又能表达空气状态的各种变化过程, 这就是本节要介绍的焓湿图。

线算图有各种形式, 我国现在使用的是以焓和含湿量为纵横座标的焓湿图, 见图2-2和附录2-2。

上图中除座标轴以外, 还有 t 、 φ 两组等值线、 P_g 线及 ε 过程线。为了更好地掌握和运用它, 下面首先介绍该图的制作过程。

一、座标的选定

一般平面图形仅能有两个独立的座标。而湿空气的状态取决于 t 、 d 、 B 三个基本状态参数, 因而应有三个独立的座标。为了能在平面图形上确定空气的状态, 就必须假设一基本参数为已知。通常选定大气压力 B 为已知 (在空气调节中, 空气的状态变化过程可认为是在一定的大气压力下进行的), 这样, 只剩下 t 、 d

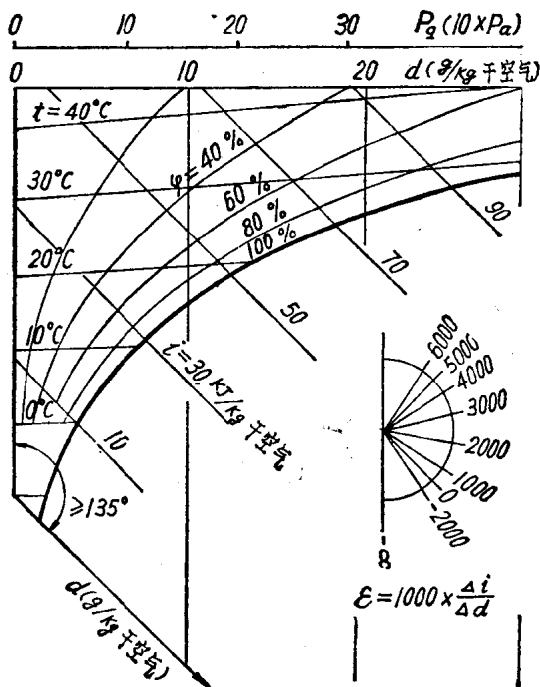


图 2-2 焓湿图

两个座标参数, 就可以进行图形的绘制了。但是, 焓 i 与温度 t 有关, 为使用方便起见, 可用焓 i 代替温度 t , 因此选定了 i 、 d 为座标轴。

图的横座标为含湿量 d , 纵座标为焓 i 。为使图面开阔、线条清晰, 两座标轴之间的夹角大于或等于 135° 。在确定座标比例尺之后, 就可以在图上绘出一系列与纵座标平行的等 d 线及与横座标平行的等 i 线。实用中, 为避免图面过长, 常取一水平线代替实际的 d 轴。