


高等学校建筑环境与设备工程专业规划教材

空气调节(第四版)

赵荣义 范存养 薛殿华 钱以明 编

 中国建筑工业出版社

高等学校建筑环境与设备工程专业规划教材

空 气 调 节

(第四版)

赵荣义 范存养 薛殿华 钱以明 编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

空气调节/赵荣义等编. —4 版. —北京: 中国建筑
工业出版社, 2008

高等学校建筑环境与设备工程专业规划教材

ISBN 978-7-112-10457-4

I. 空… II. 赵… III. 空气调节—高等学校—教
材 IV. TU831

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 171301 号

责任编辑: 齐庆梅

责任设计: 赵明霞

责任校对: 孟楠 关健

高等学校建筑环境与设备工程专业规划教材

空气调节

(第四版)

赵荣义 范存养 薛殿华 钱以明 编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19 $\frac{1}{2}$ 插页: 1 字数: 480 千字

2009 年 3 月第四版 2009 年 3 月第二十八次印刷

定价: 32.00 元

ISBN 978-7-112-10457-4

(17381)

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

本书可供高等院校建筑环境与设备工程专业和与制冷空调相关的专业选用。

本书以空气的热湿处理和调节为主体,适当加强空气净化和空气质量控制部分内容,介绍了当前在空调系统和设备方面的新进展。本书不单设“空调系统的节能措施”章节,而采取在有关章节中反映与空调系统紧密相关的节能和合理利用能量的技术措施。本书的多数章节经过改写和增删,以尽量反映本门学科的新发展。同时,在各章后增加了思考题与习题,并列出了主要参考文献。

本教材由赵荣义、范存养、薛殿华和钱以明合编,赵荣义担任主编。具体分工为:绪论、第一章、第五章、第七章及第九章由赵荣义执笔;第二章、第六章由钱以明执笔;第三章由薛殿华执笔;第四章、第八章由范存养执笔。

20世纪80年代,当本书形成的初期,曾由四个院校13位教师付出了辛勤劳动。1994年,由本书编者在前期教材的基础上,重新编写了新版教材,并曾得到现西安建筑科技大学的马仁民教授和已故路煜教授(现哈尔滨工业大学)的多方面指正。

本书编写者理论和专业水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳请读者批评指正。

| | | |
|-----|-------------|-----|
| 01 | 绪论 | 赵荣义 |
| 02 | 第一章 空气的热湿处理 | 赵荣义 |
| 03 | 第二章 空气的净化 | 钱以明 |
| 04 | 第三章 空气的调节 | 薛殿华 |
| 05 | 第四章 空气的除湿 | 范存养 |
| 06 | 第五章 空气的加湿 | 赵荣义 |
| 07 | 第六章 空气的冷却 | 钱以明 |
| 08 | 第七章 空气的加热 | 赵荣义 |
| 09 | 第八章 空气的混合 | 范存养 |
| 10 | 第九章 空气的循环 | 赵荣义 |
| 11 | 参考文献 | 主编 |
| 12 | 思考题 | 主编 |
| 13 | 习题 | 主编 |
| 14 | 附录 | 主编 |
| 15 | 索引 | 主编 |
| 16 | 参考文献 | 主编 |
| 17 | 思考题 | 主编 |
| 18 | 习题 | 主编 |
| 19 | 附录 | 主编 |
| 20 | 索引 | 主编 |
| 21 | 参考文献 | 主编 |
| 22 | 思考题 | 主编 |
| 23 | 习题 | 主编 |
| 24 | 附录 | 主编 |
| 25 | 索引 | 主编 |
| 26 | 参考文献 | 主编 |
| 27 | 思考题 | 主编 |
| 28 | 习题 | 主编 |
| 29 | 附录 | 主编 |
| 30 | 索引 | 主编 |
| 31 | 参考文献 | 主编 |
| 32 | 思考题 | 主编 |
| 33 | 习题 | 主编 |
| 34 | 附录 | 主编 |
| 35 | 索引 | 主编 |
| 36 | 参考文献 | 主编 |
| 37 | 思考题 | 主编 |
| 38 | 习题 | 主编 |
| 39 | 附录 | 主编 |
| 40 | 索引 | 主编 |
| 41 | 参考文献 | 主编 |
| 42 | 思考题 | 主编 |
| 43 | 习题 | 主编 |
| 44 | 附录 | 主编 |
| 45 | 索引 | 主编 |
| 46 | 参考文献 | 主编 |
| 47 | 思考题 | 主编 |
| 48 | 习题 | 主编 |
| 49 | 附录 | 主编 |
| 50 | 索引 | 主编 |
| 51 | 参考文献 | 主编 |
| 52 | 思考题 | 主编 |
| 53 | 习题 | 主编 |
| 54 | 附录 | 主编 |
| 55 | 索引 | 主编 |
| 56 | 参考文献 | 主编 |
| 57 | 思考题 | 主编 |
| 58 | 习题 | 主编 |
| 59 | 附录 | 主编 |
| 60 | 索引 | 主编 |
| 61 | 参考文献 | 主编 |
| 62 | 思考题 | 主编 |
| 63 | 习题 | 主编 |
| 64 | 附录 | 主编 |
| 65 | 索引 | 主编 |
| 66 | 参考文献 | 主编 |
| 67 | 思考题 | 主编 |
| 68 | 习题 | 主编 |
| 69 | 附录 | 主编 |
| 70 | 索引 | 主编 |
| 71 | 参考文献 | 主编 |
| 72 | 思考题 | 主编 |
| 73 | 习题 | 主编 |
| 74 | 附录 | 主编 |
| 75 | 索引 | 主编 |
| 76 | 参考文献 | 主编 |
| 77 | 思考题 | 主编 |
| 78 | 习题 | 主编 |
| 79 | 附录 | 主编 |
| 80 | 索引 | 主编 |
| 81 | 参考文献 | 主编 |
| 82 | 思考题 | 主编 |
| 83 | 习题 | 主编 |
| 84 | 附录 | 主编 |
| 85 | 索引 | 主编 |
| 86 | 参考文献 | 主编 |
| 87 | 思考题 | 主编 |
| 88 | 习题 | 主编 |
| 89 | 附录 | 主编 |
| 90 | 索引 | 主编 |
| 91 | 参考文献 | 主编 |
| 92 | 思考题 | 主编 |
| 93 | 习题 | 主编 |
| 94 | 附录 | 主编 |
| 95 | 索引 | 主编 |
| 96 | 参考文献 | 主编 |
| 97 | 思考题 | 主编 |
| 98 | 习题 | 主编 |
| 99 | 附录 | 主编 |
| 100 | 索引 | 主编 |

目 录

| | |
|----------------------------|-----|
| 绪 论 | 1 |
| 第一章 湿空气的物理性质及其焓湿图 | 4 |
| 第一节 湿空气的物理性质 | 4 |
| 第二节 湿空气的焓湿图 | 8 |
| 第三节 湿球温度与露点温度 | 11 |
| 第四节 焓湿图的应用 | 14 |
| 第五节 空气状态参数的算法及另一种焓湿图 | 17 |
| 思考题与习题 | 19 |
| 主要参考文献 | 19 |
| 第二章 空调负荷计算与送风量 | 20 |
| 第一节 室内外空气计算参数 | 20 |
| 第二节 太阳辐射热对建筑物的热作用 | 29 |
| 第三节 通过围护结构的得热量及其形成的冷负荷 | 34 |
| 第四节 室内热源、湿源的散热散湿形成的冷负荷与湿负荷 | 50 |
| 第五节 空调房间送风量的确定 | 55 |
| 思考题与习题 | 59 |
| 主要参考文献 | 59 |
| 第三章 空气的热湿处理 | 60 |
| 第一节 空气热湿处理的途径及使用设备的类型 | 60 |
| 第二节 空气与水直接接触时的热湿交换 | 61 |
| 第三节 用喷水室处理空气 | 66 |
| 第四节 用表面式换热器处理空气 | 77 |
| 第五节 空气的其他加热加湿方法和设备 | 98 |
| 第六节 空气的其他除湿方法和设备 | 101 |
| 思考题与习题 | 112 |
| 主要参考文献 | 112 |
| 第四章 空气调节系统 | 114 |
| 第一节 空气调节系统的分类 | 114 |
| 第二节 新风量的确定和空气平衡 | 115 |
| 第三节 普通集中式空调系统 | 118 |
| 第四节 变风量系统 | 132 |
| 第五节 半集中式空调系统 | 138 |

| | | |
|--------|----------------------|-----|
| 第六节 | 局部空调机组及其系统化应用 | 152 |
| 思考题与习题 | | 159 |
| 主要参考文献 | | 160 |
| 第五章 | 空调房间的空气分布 | 161 |
| 第一节 | 送风射流的流动规律 | 161 |
| 第二节 | 排(回)风口的气流流动 | 166 |
| 第三节 | 空气分布器及房间气流分布形式 | 167 |
| 第四节 | 房间气流分布的计算 | 170 |
| 第五节 | 气流分布性能的评价 | 182 |
| 思考题与习题 | | 184 |
| 主要参考文献 | | 184 |
| 第六章 | 空调系统的运行调节 | 185 |
| 第一节 | 室内热湿负荷变化时的运行调节 | 185 |
| 第二节 | 室外空气状态变化时的运行调节 | 190 |
| 第三节 | 集中式空调系统的自动控制 | 195 |
| 第四节 | 变风量空调系统的运行调节 | 202 |
| 第五节 | 半集中式空调系统的运行调节 | 204 |
| 思考题与习题 | | 210 |
| 主要参考文献 | | 210 |
| 第七章 | 空气的净化与质量控制 | 211 |
| 第一节 | 内部空间空气中悬浮微粒的净化要求 | 211 |
| 第二节 | 空气悬浮微粒的特性及其捕集机理 | 212 |
| 第三节 | 空气过滤器 | 221 |
| 第四节 | 空气净化系统 | 227 |
| 第五节 | 室内空气品质控制 | 230 |
| 思考题与习题 | | 232 |
| 主要参考文献 | | 233 |
| 第八章 | 空调系统的消声、防振与空调建筑的防火排烟 | 234 |
| 第一节 | 噪声及其物理量度 | 234 |
| 第二节 | 噪声的主观评价和室内噪声标准 | 237 |
| 第三节 | 空调系统的噪声源 | 238 |
| 第四节 | 空调系统中噪声的自然衰减 | 239 |
| 第五节 | 消声器消声量的确定 | 242 |
| 第六节 | 消声器的种类和应用 | 243 |
| 第七节 | 空调装置的防振 | 248 |
| 第八节 | 空调建筑的防火排烟 | 252 |
| 思考题与习题 | | 259 |
| 主要参考文献 | | 260 |
| 第九章 | 空调系统的测定与调整 | 261 |

绪 论

人类改造客观环境的能力取决于社会生产力和科学技术的发展水平。面对地球表面自然气候的变化和自然灾害的侵袭，古代人类只能采用简单的防御手段来保持生命的延续。随着生产力和科学技术的发展，人类从穴居到建造不同功能和不同质量的建筑物，从取火御寒、摇扇驱暑到人工地创造受控的空气环境，经历了漫长的岁月。直到 20 世纪初，能够实现全年运行并带有喷水室的空气调节系统，才首次在美国的一家印刷厂内建成。这标志着空气调节技术已经发展到实际应用的阶段。将空气调节应用到民用建筑以改善房间内的空气环境，是首先在公共建筑物内实现的（1919~1920，芝加哥一家电影院）。我国于 1931 年首先在上海纺织厂安装了带喷水室的空气调节系统，其冷源为深井水。随后，也在一些电影院和银行实现了空气调节。

经过 20 世纪的发展，以热力学、传热学和流体力学为主要理论基础，综合建筑、机械、电工和电子等工程学科的成果，形成了一个独立的现代空气调节技术学科分支，它专门研究和解决各类工作、生活、生产和科学实验所要求的内部空气环境问题。

空气调节（Air Conditioning，简称空调）的意义在于“使空气达到所要求的状态”或“使空气处于正常状态”。据此，一个内部受控的空气环境，一般是指在某一特定空间（或房间）内，对空气温度、湿度、流动速度及清洁度进行人工调节，以满足人们工作、生活和工艺生产过程的要求。现代技术发展有时还要求对空气的压力、成分、气味及噪声等进行调节与控制。由此可见，采用技术手段创造并保持满足一定要求的空气环境，乃是空气调节的任务。

众所周知，一定空间内的空气环境一般要受到两方面的干扰：一是来自空间内部生产过程、设备及人体等所产生的热、湿和其他有害物的干扰；二是来自空间外部气候变化、太阳辐射及外部空气中的有害物的干扰。这些干扰因素有些是稳定的，有些不稳定，有些随季节变化。在保证内部空气环境的有关参数（温度、湿度、风速及清洁度）处于限定的变化范围内时，有的干扰因素在一定条件下会成为有利因素，如太阳辐射在冬季一般是有利的；而对于内部环境造成不利影响的湿、热及其他有害物等干扰因素就需要采取技术手段来克服它们的影响。所谓的技术手段主要是：采用换气的方法保证内部环境的空气新鲜；采用热、湿交换的方法保证内部环境的温、湿度，以及采用净化的方法保证空气的清洁度。因此，一定空间的空气调节，一般非指封闭空间的空气再造过程，而是置换、热质交换和净化过程。

由上可见，空气调节主要涉及以下内容：内部空间内、外扰量的计算；空气调节的方式和方法；空气的各种处理方法（加热、加湿、冷却、干燥及净化等）；空气的输送与分配及在干扰量变化时的运行调节等。在工程上，将只实现内部环境空气温度的调节技术称为供暖或降温，将为保持工业环境有害物浓度在一定卫生要求范围内的技术称为工业通风。显然，供暖、降温及工业通风都是调节内部空气环境的技术手段，只是在调节的要求

上及在调节空气环境参数的全面性方面与空气调节有别而已。因此，可以说空气调节是供暖和通风技术的发展。此外，空气调节所需的冷热源是为调节空气的温湿度服务的，可能是人工的，也可能是自然的。

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具有重要意义。这不仅意味着受控的空气环境对工业生产过程的稳定操作和保证产品质量有重要作用，而且对提高劳动生产率、保证安全操作、保护人体健康、创造舒适的工作和生活环境有重要意义。实践证明，合理应用空气调节来改善人们的工作和生活环境条件不是一种奢侈手段，而是现代化生产和社会生活中不可缺少的保证条件。

空气调节应用于工业及科学实验过程一般称为“工艺性空调”，而应用于以人为主的空气环境调节则称为“舒适性空调”。显示工艺空调重要作用的典型部门，有以高精度恒温恒湿为特征的精密机械及仪器制造业。在这些工业生产过程中，为避免元器件由于温度变化产生胀缩及湿度过大引起表面锈蚀，一般严格规定环境的基准温度和相对湿度，并制订了温度和相对湿度变化的偏差范围，如： $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ， $50 \pm 5\%$ 。在电子工业中，除有一定的温湿度要求外，尤为重要是保证室内空气的清洁度。对超大规模集成电路生产的某些工艺过程，空气中悬浮粒子的控制粒径已降低到 $0.1\mu\text{m}$ ，规定每升空气中等于和大于 $0.1\mu\text{m}$ 的粒子总数不得超过一定的数量，如 3.5 粒、0.35 粒等。在纺织、印刷等工业部门，对空气的相对湿度要求较高。如在合成纤维工业中，锦纶长丝的多数工艺过程要求相对湿度的控制精度在 $\pm 2\%$ 。此外，如胶片、光学仪器、造纸、橡胶、烟草等工业也都有一定的温湿度控制要求。作为工业中常用的计量室、控制室及计算机房，均要求有比较严格的空气调节。药品、食品工业以及生物实验室、医院病房及手术室等，不仅要求一定的空气温湿度，而且要求控制空气的含尘浓度及细菌数量。

在公共与民用建筑中，为保证大会堂、会议厅、图书馆、展览馆、影剧院、办公楼等的使用功能均需设空气调节。空气调节在宾馆、酒店、商业中心、游乐场所也是不可缺少的。在居住房间内随着人民生活水平的提高对实现空气调节的要求也与日俱增。我国家用空调的装备率在逐年上升。

交通运输工具如汽车、飞机、火车及船舶，空气调节的装备率有的已经很高，有的在逐步提高。

现代农业的发展也与空气调节密切相关，如大型温室、禽畜养殖、粮种贮存等都需要对内部空气环境进行调节。

另外，在宇航、核能、地下与水下设施以及军事领域，空气调节也都发挥着重要作用。

因此可以概括地说：现代化发展需要空气调节，空气调节技术的提高与发展则依赖于现代化。

空气调节在 20 世纪的发展使人类人工控制内部空间环境不受外界自然环境的影响成为可能。这是人类社会过程中一项重要的技术进步。然而，和世间一切事物一样，空气调节除在各领域显示出其重要作用外，也暴露出以下诸方面的负面影响：

(1) 长期生活在与多变的自然环境隔离的空调环境中，会使人体的新陈代谢机能弱化，抵抗力下降。空调长期维持的相对“低温”会使皮肤汗腺和皮脂腺收缩，腺口闭塞，导致血流不畅、神经功能紊乱等症状，产生“空调适应不全”症。

(2) 由于大量人工合成材料用于建筑装饰和家具制作,造成多种挥发性有机化合物向内部空间散发。同时,通风或新鲜空气的供给得不到保证,导致相当数量的建筑物成为“病态建筑”。长时间在这种建筑物内停留和工作的人群就会产生闷气,黏膜刺激,头疼及昏睡等各种症状,成为“病态建筑综合症”。特别需要指出的是:作为提供“舒适”环境的空调设备和系统本身竟也成为“病态建筑”的污染源之一。传统使用的纤维过滤器,产生凝水的表冷器、接水盘和加湿器及传动皮带等是产生气味、挥发性有机物、霉菌和灰尘的根源。

(3) 伴随经济发展,工业、公共及商用建筑中的空调能耗迅速增长。考虑到我国是人口大国,空调进入千家万户,尤其是广大农村,将使空调耗能量大幅上升。空调所消耗的电能或热能大部分来自热电站或锅炉房,其燃烧过程的排放物是造成大气层温室效应的主因。

综上所述,空调技术面临很大的挑战。为应对挑战,促进空调技术的不断完善和发展,应该着力研究如何使人与自然和谐,创新性地研发新型健康、低能耗的空调手段;重视能量的合理利用和能量转换、传递设备的性能改进,使空气调节名副其实地为提供健康、满意和经济上可以承受的室内环境服务。

可以预料,空气调节将由目前主要解决空气热湿环境的调节和控制发展到内部空间环境质量的全面调节和控制,即所谓的内部空间的人工环境工程。这一发展过程需要有诸多的研究成果及通过这些成果的实际应用检验才能完成。本书主要阐述了空气热湿环境的调节原理和设计方法,部分地涉及了空间空气质量控制,但这只是初步的,还需要进一步发展。

总之,空气调节的发展前景是广阔的,面对新的挑战,相信从事这一事业的人们将把握机遇,开拓进取。

| | | | |
|----------|---|-----------------------|------------------------|
| 14.00392 | * | 0.0014 | 氯(Ar) |
| 21.183 | — | 0.0018 | 二氧化碳(CO ₂) |
| 1.0032 | — | 0.0023 | 氩(Ar) |
| 83.86 | — | 0.0014 | 氩(Ar) |
| 131.30 | — | 0.000087 | 氩(Xe) |
| 2.01324 | * | 0.0007 | 氩(H ₂) |
| 16.04303 | * | 0.00012 | 甲烷(CH ₄) |
| 14.0128 | * | 0.0007 | 氟化氢(HF) |
| 17.3082 | * | 0.000007 | 臭氧(O ₃) |
| 17.0282 | * | 0.000002 | 苯 |
| 04.0828 | * | 0.00001 | 二氧化硫(SO ₂) |
| 16.0092 | * | 0.000002 | 二氧化氮(NO ₂) |
| 15.03081 | * | 微量 | 氨(NH ₃) |
| 28.01022 | * | 微量 | 一氧化碳(CO) |
| 222.8038 | * | 0.000001 | 氟(F ₂) |
| + | ? | 8 × 10 ⁻¹⁰ | 氡(Rn) |

注:不同和室的不同,造成材料标准值有较大差别。

十具有放射性,由Rn-222和Rn-220两种同位素组成,因此同位素含量的测定方法不同,故以Rn-222表示(Rn-222半衰期3.82d)。

氡(Rn-222, Rn-220半衰期3.82d)。

第一章 湿空气的物理性质及其焓湿图

创造满足人类生产、生活和科学实验所要求的空气环境是空气调节的任务。湿空气既是空气环境的主体又是空气调节的处理对象，因此熟悉湿空气的物理性质及焓湿图，则是掌握空气调节的必要基础。

第一节 湿空气的物理性质

大气是由干空气和一定量的水蒸气混合而成的，一般称其为湿空气。干空气的成分主要是氮、氧、氩及其他微量气体，多数成分比较稳定，少数随季节变化有所波动，但从总体上可将干空气作为一个稳定的混合物来看待。为统一干空气的热工性质，便于热工计算，一般将海平面高度的清洁干空气成分作为标准组成。目前推荐的干空气标准成分见表 1-1 所示。

干空气的标准成分 (推荐) 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；

+ 氡有放射能，由 Rn²²⁰ 和 Rn²²² 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 54s, Rn²²² 半衰期 3.83 日)。

空气环境内的空气成分和人们平时所说的“空气”，实际是干空气加水蒸气，即湿空气。

在湿空气中水蒸气的含量虽少，但其变化却对空气环境的干燥和潮湿程度产生重要影响，且使湿空气的物理性质随之改变。因此研究湿空气中水蒸气含量的调节在空气调节中占有重要地位。

地球表面的湿空气中，尚有悬浮尘埃、烟雾、微生物及化学排放物等，由于这些物质并不影响湿空气的物理性质，因此本章不涉及这些内容。

在热力学中对湿空气的物理性质以及焓湿图已有过论述。本书作必要的重复，在于强调其重要性并要求牢固地掌握它们。

在常温常压下干空气可视为理想气体，而湿空气中的水蒸气一般处于过热状态，且含量很少，可近似地视作理想气体。这样，即可利用理想气体的状态方程式来表示干空气和水蒸气的主要状态参数——压力、温度、比容等的相互关系，即

$$P_g V = m_g R_g T \quad \text{或} \quad P_g v_g = R_g T \quad (1-1)$$

$$P_q V = m_q R_q T \quad \text{或} \quad P_q v_q = R_q T \quad (1-2)$$

式中 P_g, P_q ——干空气及水蒸气的压力，Pa；

V ——湿空气的总容积， m^3 ；

m_g, m_q ——干空气及水蒸气的质量，kg；

R_g, R_q ——干空气及水蒸气的气体常数， $R_g=287J/(kg \cdot K)$ ， $R_q=461J/(kg \cdot K)$ ；

T ——湿空气的热力学温度，K；

$v_g = \frac{V}{m_g}$ ， $v_q = \frac{V}{m_q}$ ，分别为干空气及水蒸气的比容， m^3/kg ，而干空气及水蒸气的密度

则等于比容的倒数，即 $\rho_g = \frac{m_g}{V} = \frac{1}{v_g}$ ， $\rho_q = \frac{m_q}{V} = \frac{1}{v_q}$ 。

根据道尔顿定律，湿空气的压力应等于干空气的压力与水蒸气的压力之和，即

$$B = P_g + P_q \quad (1-3)$$

B 一般称为大气压力，以Pa或kPa（千帕）表示。海平面的标准大气压为101325Pa或101.325kPa，相当于1013.25mbar（毫巴）。多种大气压力之间的换算见表1-2。

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 |

大气压力随海拔高度的变化如图1-1所示。大气压力值一般在±5%范围内波动。

下面着重说明湿空气的主要参数及其确定法。

1. 湿空气的密度 ρ

湿空气的密度等于干空气密度与水蒸气密度之和，即

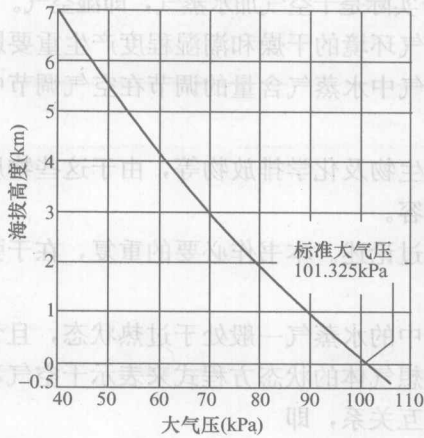


图 1-1 大气压与海拔高度的关系

$$\rho = \rho_g + \rho_q = \frac{P_g}{R_g T} + \frac{P_q}{R_q T}$$

$$= 0.003484 \frac{B}{T} - 0.00134 \frac{P_q}{T} \quad (1-4)$$

在标准条件下（压力为 101325Pa，温度为 293K，即 20℃）干空气的密度 $\rho_g = 1.205\text{kg/m}^3$ ，而湿空气的密度取决于 P_q 值的大小。由于 P_q 值相对于 P_g 值而言数值较小，因此，湿空气的密度比干空气密度小，在实际计算时可近似取 $\rho = 1.2\text{kg/m}^3$ 。

2. 湿空气的含湿量 d

采用湿空气中水蒸气密度作为含有水蒸气量的度量是一种方法。考虑到在近似等压的条件下，湿空气体积随温度变化而改变，而空调过程经常涉及湿空气的温度变化，因此采用水蒸气密度作为衡量湿空气含有水蒸气量的参数会给实际计算带来诸多不便。

现取湿空气中的水蒸气密度与干空气密度之比作为湿空气含有水蒸气量的指标，换言之，即取对应于 1kg 干空气的湿空气所含有的水蒸气量。所以有

$$d = \frac{\rho_q}{\rho_g} = \frac{R_g}{R_q} \cdot \frac{P_q}{P_g} = 0.622 \frac{P_q}{P_g}$$

或
$$d = 0.622 \frac{P_q}{B - P_q} \quad (\text{kg/kg}_{\text{干}} \text{ 或 } \text{kg/kg}_{\text{干空气}}) \quad (1-5)$$

考虑到湿空气中水蒸气含量较少，因此含湿量 d 的单位也可用 $\text{g/kg}_{\text{干}}$ 表示，这样公式 (1-5) 则可写成

$$d = 622 \frac{P_q}{B - P_q} \quad (\text{g/kg}_{\text{干}}) \quad (1-5)'$$

3. 相对湿度 φ

另一种度量湿空气水蒸气含量的间接指标是相对湿度，其定义为湿空气的水蒸气压力与同温度下饱和湿空气的水蒸气压力之比，即

$$\varphi = \frac{P_q}{P_{q,b}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 $P_{q,b}$ ——饱和水蒸气压力，Pa。

由式 (1-6) 可见，相对湿度表征湿空气中水蒸气接近饱和含量的程度。式中 $P_{q,b}$ 是温度的单值函数，可在一些热工手册中查到，表 1-3 只列出常用的几个数据。 $P_{q,b}$ 的具体计算式则可在本章的第五节内查得。

空气温度与饱和水蒸气压力及饱和含湿量的关系

表 1-3

| 室气温度 t (°C) | 饱和水蒸气压力 $P_{q,b}$ (Pa) | 饱和含湿量 d_b (g/kg _干) ($B=101325\text{Pa}$) |
|---------------|------------------------|--|
| 10 | 1225 | 7.63 |
| 20 | 2331 | 14.70 |
| 30 | 4232 | 27.20 |

湿空气的相对湿度与含湿量之间的关系可由式 (1-5) 导出。根据

$$d = 0.622 \frac{P_q}{B - P_q} = 0.622 \frac{\varphi P_{q,b}}{B - \varphi P_{q,b}}$$

及

$$d_b = 0.622 \frac{P_{q,b}}{B - P_{q,b}}$$

故

$$\frac{d}{d_b} = \frac{P_q(B - P_{q,b})}{P_{q,b}(B - P_q)} = \varphi \cdot \frac{(B - P_{q,b})}{(B - P_q)}$$

所以

$$\varphi = \frac{d}{d_b} \cdot \frac{(B - P_q)}{(B - P_{q,b})} \times 100\% \quad (1-7)$$

式 (1-7) 中的 B 值远大于 $P_{q,b}$ 和 P_q 值, 认为 $B - P_q \approx B - P_{q,b}$ 只会造成 1%~3% 的误差。因此相对湿度可近似表示为

$$\varphi = \frac{d}{d_b} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 d_b 为饱和含湿量, $\text{kg}/\text{kg}_\text{干}$ 或 $\text{g}/\text{kg}_\text{干}$ 。

4. 湿空气的焓 h

在空气调节中, 空气的压力变化一般很小, 可近似于定压过程, 因此可直接用空气的焓变化来度量空气的热量变化。

已知干空气的定压比热 $c_{p,g} = 1.005 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 近似取 1 或 1.01;

水蒸气的定压比热 $c_{p,q} = 1.84 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; 则

干空气的焓: $h_g = c_{p,g} \cdot t$, $\text{kJ}/\text{kg}_\text{干}$;

水蒸气的焓: $h_q = c_{p,q} \cdot t + 2500$, $\text{kJ}/\text{kg}_\text{干}$ 。

式中 2500 为 $t = 0^\circ\text{C}$ 时水蒸气的汽化潜热 (r_0)。

显然湿空气的焓 h 应等于 1kg 干空气的焓加上与其同时存在的 $d \text{kg}$ (或 g) 水蒸气的焓, 即

$$h = c_{p,g} \cdot t + (2500 + c_{p,q} \cdot t) d$$

或

$$h = c_{p,g} \cdot t + (2500 + c_{p,q} \cdot t) \frac{d}{1000} \quad (1-9)$$

上式 d 以 $\text{kg}/\text{kg}_\text{干}$ 计, 下式 d 以 $\text{g}/\text{kg}_\text{干}$ 计。当 $t = 0^\circ\text{C}$ 时, $h = 2.5d$, 不为 0 (d 以 g 计)。

已知水的质量比热为 $4.19 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 因此 $t^\circ\text{C}$ 时水蒸气的汽化潜热为 $r_t = r_0 + 1.84t - 4.19t$ 或 $r_t = 2500 - 2.35t$, kJ/kg 。

上述式 (1-5) 及 (1-9) 构成了湿空气特性的主要方程组, 应牢固掌握。

【例 1-1】 已知大气压力为 101325Pa , 温度 $t = 20^\circ\text{C}$, (1) 求干空气的密度; (2) 求相对湿度为 90% 时的湿空气密度。

【解】 (1) 已知干空气的气体常数 $R_g = 287 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 此时干空气压力即为大气压力 B , 所以

$$\rho_g = \frac{B}{287 \cdot T} = 0.00348 \frac{B}{T} = 0.00348 \frac{101325}{293} = 1.205 \text{kg}/\text{m}^3$$

(2) 由表 1-3 查得, 20°C 时的水蒸气饱和压力为 $P_{q,b} = 2331 \text{Pa}$, 利用式 (1-6) $p_q = \varphi P_{q,b}$ 代入式 (1-4) 即可得湿空气的密度:

$$\begin{aligned}\rho &= 0.003484 \frac{B}{T} - 0.00134 \frac{\varphi P_{q,b}}{T} \\ &= 0.003484 \frac{101325}{293} - 0.00134 \frac{0.9 \times 2331}{293} \\ &= 1.195 \text{kg/m}^3\end{aligned}$$

可见在大气压力相同时湿空气的密度比完全干空气的密度要小一些。

【例 1-2】 试求例 1-1 (2) 中空气的含湿量及焓值。

【解】

按式 (1-5) 计算含湿量:

$$\begin{aligned}d &= 0.622 \frac{\varphi P_{q,b}}{B - \varphi P_{q,b}} = 0.622 \frac{0.9 \times 2331}{101325 - 0.9 \times 2331} \\ &= 0.0132 \text{kg/kg}_T\end{aligned}$$

按式 (1-9) 计算焓值:

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

第二节 湿空气的焓湿图

在空气调节中,经常需要确定湿空气的状态及其变化过程。单纯地求湿空气的状态参数用前述各计算式即可满足要求,或可查业已计算好的湿空气性质表(见附录 1-1)。而对于湿空气状态变化过程的直观描述则需借助于湿空气的焓湿图。

根据第一节中式 (1-5)、(1-6) 及 (1-9),加上 $P_{q,b} = f(t)$ 的函数关系,在反映湿空气的 B 、 t 、 d 、 φ 、 h 及 P_q 等状态参数之间的联系上,取不同的坐标系可以得到不同的线图形式。

常用的湿空气性质图是以 h 与 d 为坐标的焓湿图 ($h-d$ 图)。为了尽可能扩大不饱和湿空气区的范围,便于各相关参数间分度清晰,一般在大气压力一定的条件下,取焓 h 为纵坐标,含湿量 d 为横坐标,且两坐标之间的夹角等于或大于 135° (见图 1-2 及附录 1-2)。在实际使用中,为避免图面过长,常将 d 坐标改为水平线。

在选定的坐标比例尺和坐标网格的基础上,进一步确定等温线、等相对湿度线,水蒸气分压力标尺及热湿比等。

1. 等温线

根据公式 $h = 1.01t + (2500 + 1.84t)d$,当 $t = \text{常数}$,公式化为 $h = a + bd$ 的形式,因此只须给定两个值,即可确定一等温线。显然 $1.01t$ 为等温线在纵坐标轴上的截距, $(2500 + 1.84t)$ 为等温线的斜率。可见不同温度的等温线并非平行线,其斜率的差别在于 $1.84t$,又由于 $1.84t$ 与 2500 相比很小,所以等温线又可近似看作是平行的(参见图 1-3)。

2. 等相对湿度线

由式 (1-5),可得

$$P_q = \frac{B \cdot d}{0.622 + d}$$

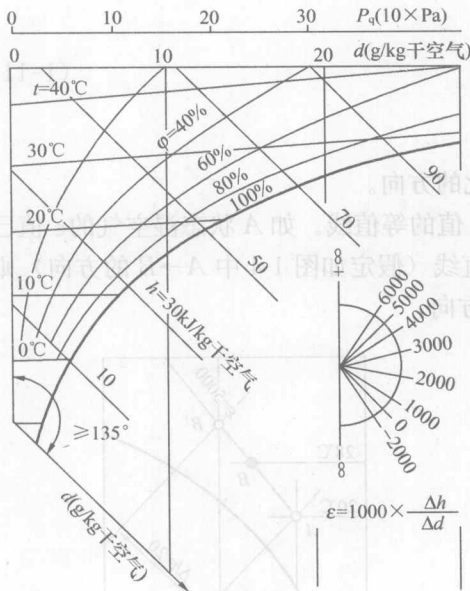


图 1-2 湿空气焓湿图

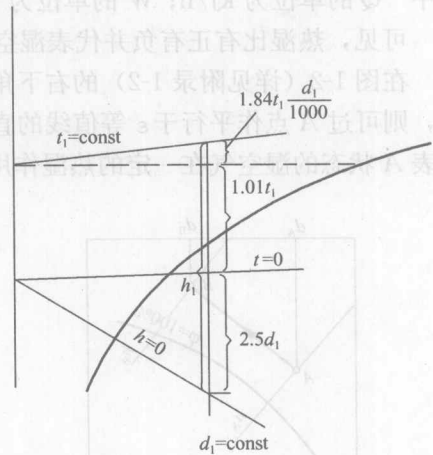


图 1-3 等温线在 $h-d$ 图上的确定

因此，给定不同的 d 值，即可求得对应的 P_q 值。在 $h-d$ 图上，取一横坐标表示水蒸气分压力值，则如图 1-2 所示。

在已建立起水蒸气压力坐标的条件下，对应不同温度下的饱和水蒸气压力可从附录 1-1 中查到，或由 $P_{q,b} = f(t)$ 的经验式求得（见本章第五节）。连接不同温度线和其对应的饱和水蒸气压力线的交点即可得到 $\varphi = 100\%$ 的等 φ 线。又据 $\varphi = \frac{P_q}{P_{q,b}}$ 式或 $P_q = \varphi P_{q,b}$ ，当 $\varphi = \text{常数}$ ，则可求得各不同温度下的 P_q 值，连接在各等温线与 P_q 值相交的各点即成等 φ 线。

这样作出的 $h-d$ 图则包含了 B 、 t 、 d 、 h 、 φ 及 P_q 等湿空气参数。在大气压力 B 一定的条件下，在 h 、 d 、 t 、 φ 中，已知任意两个参数，就可确定湿空气状态，在 $h-d$ 图上也就是有一确定的点，其余参数均可由此点查出，因此，将这些参数称为独立参数。但 d 与 P_q 则不能确定一个空气状态点，因而 P_q 与 d 只能有一个作为独立参数。

3. 热湿比线

一般在 $h-d$ 图的周边或右下角给出热湿比（或称角系数） ϵ 线。热湿比的定义是湿空气的焓变化与含湿量变化之比，即

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} \text{ 或 } \epsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} \times 1000 \quad (1-10)$$

若在 $h-d$ 图上有 A 、 B 两状态点（见图 1-4），则由 A 至 B 的热湿比为

$$\epsilon = \frac{h_B - h_A}{d_B - d_A} \times 1000$$

进一步，如有 A 状态的湿空气，其热量（ Q ）变化（可正可负）和湿量（ W ）变化

(可正可负) 已知, 则其热湿比应为

$$\epsilon = \frac{\pm Q}{\pm W} \quad (1-11)$$

式中 Q 的单位为 kJ/h ; W 的单位为 kg/h 。

可见, 热湿比有正有负并代表湿空气状态变化的方向。

在图 1-2 (详见附录 1-2) 的右下角示出不同 ϵ 值的等值线。如 A 状态湿空气的 ϵ 值已知, 则可过 A 点作平行于 ϵ 等值线的直线, 这一直线 (假定如图 1-4 中 $A \rightarrow B$ 的方向) 则代表 A 状态的湿空气在一定的热湿作用下的变化方向。

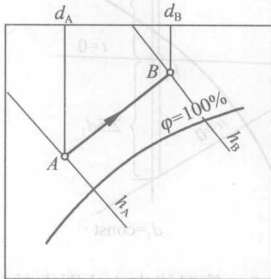


图 1-4 ϵ 值在 $h-d$ 图上的表示

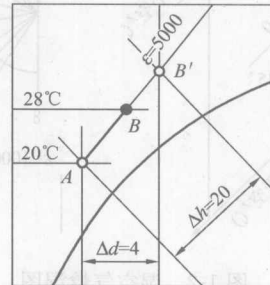


图 1-5 例 1-3 示图

【例 1-3】 已知 $B = 101325\text{Pa}$, 湿空气初参数为 $t_A = 20^\circ\text{C}$, $\varphi_A = 60\%$, 当加入 10000kJ/h 的热量和 2kg/h 湿量后, 温度 $t_B = 28^\circ\text{C}$, 求湿空气的终状态。

【解】 在 $B = 101325\text{Pa}$ 的 $h-d$ 图上, 据 $t_A = 20^\circ\text{C}$, $\varphi_A = 60\%$ 找到空气状态 A (图 1-5)。求热湿比:

$$\epsilon = \frac{+Q}{+W} = \frac{10000}{2} = 5000$$

过 A 点作与等值线 $\epsilon = 5000$ 的平行线, 即为 A 状态变化的方向, 此线与 $t = 28^\circ\text{C}$ 等温线的交点即为湿空气的终状态 B 。由 B 点可查出 $\varphi_B = 51\%$, $d_B = 12\text{g/kg}_\text{干}$, $h_B = 59\text{kJ/kg}_\text{干}$ 。

过某状态点作热湿比线, 可不使用 $h-d$ 图中的 ϵ 线标尺而直接由 $h-d$ 图上通过作图求得, 利用例 1-3 数据, 已知 $Q = 10000\text{kJ/h}$, $W = 2000\text{g/h}$, 则

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{10000}{2000} = 5$$

亦即 $\Delta h : \Delta d = 5 : 1$ 。过 A 点任选一 Δd (或 Δh) 线段长度, 按 $5 : 1$ 的比例求出 Δh (或 Δd) 的值, 按 $h_A + \Delta h$ 的等 h 线与 $d_A + \Delta d$ 的等 d 线的交点与 A 的连线即符合 $\frac{\Delta h}{\Delta d}$ 的热湿比线。如图 1-5 中 B' 所示。

此外, 值得提出的是, 附录 1-2 给出的 $h-d$ 图是以标准大气压 $B = 101.325\text{kPa}$ 作出的。当某地区的海拔高度与海平面有较大差别时, 使用此图会产生较大的误差。因此, 不同地区应使用符合本地区大气压的 $h-d$ 图。当缺少这种 $h-d$ 图时, 简便易行的方法是利用标准大气压的 $h-d$ 图加以修改。已知