

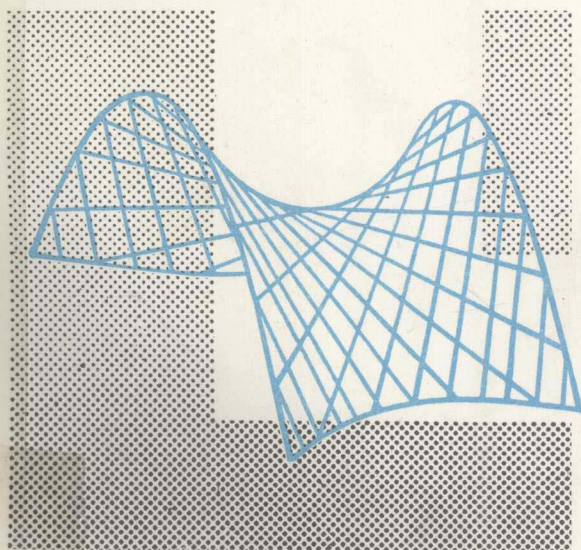
高等专科学校试用教材

空气调节

李岱森 主编

李岱森 万建武 曲云霞 编著

● 中国建筑工业出版社



高等专科学校试用教材

空 气 调 节

李岱森 主编

李岱森 万建武 曲云霞 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国建筑工程出版社

图书在版编目(CIP)数据

空气调节/李岱森主编. —北京:中国建筑工业出版社, 2000

高等专科学校试用教材

ISBN 7-112-04034-5

I. 空... II. 李... 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(1999)第 54737 号

本书是高等专科学校“供热通风与空气调节工程”专业及相关专业的试用教材。内容包括:湿空气的物理性质,热湿负荷和风量确定,热湿处理设备,空气调节系统,气流组织设计及计算,消声减振和测定调整,以及全年运行调节等。

本书亦可供高等职业教育、业余大学、函授学生或专业培训人员使用。也可供本科学生和有关专业技术人员参考。

高等专科学校试用教材

空气调节

李岱森 主编

李岱森 万建武 曲云霞 编著

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市彩桥印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:22 字数:531 千字

2000 年 6 月第一版 2000 年 6 月第一次印刷

印数:1—3,500 册 定价:22.40 元

ISBN 7-112-04034-5

TU·3161(9441)

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

本书是高等专科学校“供热通风与空气调节工程”专业及相近有关专业的试用教材。

高等工科院校“供热通风与空气调节”专业本科的“空气调节”教材,从1981年起至今已修订出版了三版。其内容充分反映了本门学科的新发展,有比较完整的理论体系。不少专科学校的“空气调节”课程,也多参照本科教材讲授。多年的教学实践证明,由于不同地区不同学校专科的培养目标、课程重点不同,采用本科的“空气调节”教材,给教学带来一定的困难。另外,本专业专科的其他教材如“供热工程”、“锅炉与锅炉房设备”等也已先后出版。为此,编写了本教材。

本教材是在全国高等学校供热通风空调及燃气工程学科专业指导委员会专科组指导下编写的。

为了适应从事空气调节工程设计,施工及运行管理工作的需要,本书基本内容包括:湿空气的物理性质,热湿负荷和风量确定,热湿处理设备,空气调节系统,气流组织设计及计算,消声减振和测定调整,以及全年运行调节等。为突出教材的实用性及简明性,外扰冷负荷计算只介绍冷负荷系数法在工程中的应用计算;空调系统和热湿处理设备,只介绍目前国内最常用的。增设了高层建筑的通风和防排烟和空调冷源及空调水系统两章。风机盘管的选择计算和空调系统的测定与调整,作了较深入的介绍。至于风道设计一章,可根据“工业通风”课程的内容取舍。

本书可供高等职业教育、业余大学、函授学生或专业培训人员使用。也可供本科学生和专业技术人员参考。

为了更好地配合教学,在各章之后均列有习题与思考题。

本教材由万建武(华南建设学院西院)、曲云霞(山东建筑工程学院)和李岱森(北京建筑工程学院)合编。李岱森担任主编。具体分工为:绪论、第十章、第十一章由李岱森执笔;第五章、第七章、第八章曲云霞执笔;第一章、第二章、第三章、第四章、第六章、第九章由万建武执笔。

本教材承朱颖心教授审定。

由于编者水平有限,书中难免有许多不妥之处,恳请读者提出批评、指正。

目 录

绪论	1
第一章 湿空气的物理性质和 $i-d$ 图	4
§ 1-1 湿空气的组成和物理性质	4
§ 1-2 湿空气的焓湿图	9
§ 1-3 湿球温度与露点温度	12
§ 1-4 焓湿图的应用	17
第二章 空调负荷计算与送风量的确定	22
§ 2-1 室内空气计算参数的确定	22
§ 2-2 室外空气计算参数的确定	25
§ 2-3 太阳辐射热对建筑物的热作用	28
§ 2-4 空调房间的冷(热)、湿负荷计算	33
§ 2-5 空调房间的送风状态和送风量	46
第三章 空气的热湿处理	51
§ 3-1 空气热湿处理的各种途径	51
§ 3-2 用喷水室处理空气	52
§ 3-3 用表面式换热器处理空气	66
§ 3-4 空气的其它热湿处理方法	79
第四章 空气调节系统	87
§ 4-1 空气调节系统的分类	87
§ 4-2 新风量的确定和空气平衡	88
§ 4-3 普通集中式空调系统	92
§ 4-4 风机盘管空调系统	116
§ 4-5 局部空调机组	130
第五章 空调冷源及空调水系统	135
§ 5-1 空调冷源	135
§ 5-2 空调冷冻水系统	140
§ 5-3 空调冷却水系统	144
第六章 空调系统的全年运行调节	148
§ 6-1 分析运行工况的意义	148
§ 6-2 室内热、湿负荷变化时的运行调节	149
§ 6-3 室外空气状态变化时的运行调节	156
§ 6-4 集中式空调系统的自动控制	168
§ 6-5 风机盘管空调系统的运行调节	174
第七章 空调房间的气流组织	181
§ 7-1 送、回风口的气流流动规律	181

§ 7-2 常见送、回风口的型式	185
§ 7-3 气流组织的设计	188
§ 7-4 气流组织的计算	191
第八章 风道设计	202
§ 8-1 风道的阻力计算	202
§ 8-2 风道内的压力分布	204
§ 8-3 风道的设计计算	207
§ 8-4 均匀送风管道的设计计算	212
第九章 高层建筑的通风和防排烟	217
§ 9-1 概述	217
§ 9-2 高层建筑的天然排烟	218
§ 9-3 高层建筑的机械防排烟	225
§ 9-4 地下停车场的通风和防排烟	231
§ 9-5 机械防排烟及通风空调系统的防火控制	233
第十章 空调系统的消声与减振	236
§ 10-1 噪声及其物理量度	236
§ 10-2 人对噪声的感觉和室内噪声标准	240
§ 10-3 空调系统的噪声源	242
§ 10-4 空调系统中噪声的自然衰减	244
§ 10-5 消声器消声量的确定	248
§ 10-6 消声器	250
§ 10-7 空调装置的减振	256
第十一章 空调系统的测定与调整	263
§ 11-1 空调系统测定用仪表	263
§ 11-2 测定调整前的准备工作	273
§ 11-3 空调系统风量的测定与调整	273
§ 11-4 空气处理设备容量及系统工况的测定	285
§ 11-5 空调系统综合效果测定	289
§ 11-6 测定调整中发现问题的分析和解决方法	292
附录	296
附录 1-1 湿空气的密度、水蒸气压力、含湿量和焓	296
附录 1-2 湿空气焓湿图	298
附录 2-1 部分城市室外气象参数	299
附录 2-2 北纬 40° 太阳总辐射强度	300
附录 2-3 围护结构外表面的太阳辐射热吸收系数 ρ	301
附录 2-4 围护结构瞬变传热引起冷负荷计算的有关系数	301
附录 2-5 设备、用具、人体、照明散热冷负荷系数	308
附录 3-1 喷水室热交换效率实验公式的系数和指数	312
附录 3-2 部分空气加热器的传热系数和阻力计算公式	313
附录 3-3 部分水冷式表面冷却器的传热系数和阻力试验公式	314
附录 3-4 SRZ 型空气加热器技术数据	315
附录 3-5 水冷式表面冷却器的 ϵ_1 值线算图(适用于 $N \geq 4$ 排逆交叉流)	316

附录 3-6	水冷式表面冷却器的 ε_2 值	317
附录 3-7	JW 型表面冷却器技术数据	317
附录 5-1	活塞式冷水机组主要技术参数	318
附录 5-2	模块化冷水机组技术规格表	319
附录 5-3	单螺杆式冷水机组主要技术参数	320
附录 5-4	离心式冷水机组主要技术参数	321
附录 5-5	溴化锂蒸汽双效制冷机性能表(蒸汽压力 0.4MPa(相对压力))	323
附录 5-6	溴化锂直燃式冷温水机组性能表	324
附录 5-7	方形逆流式冷却塔主要性能参数	326
附录 7-1	送风口特性	327
附录 8-1	通风管道单位长度摩擦阻力线解图	329
附录 8-2	局部阻力系数	330
附录 8-3	圆形标准风管规格	338
附录 8-4	矩形标准风管规格	339
附录 8-5	矩形风管流量当量直径表	341
参考文献		343

绪 论

人类改造客观环境的能力,是随着社会生产力和科学技术的发展而逐渐发展的。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迁徙和防御手段来保持生命的延续。在漫长的岁月中,随着社会生产力和科学技术的发展,人类从穴居发展到建造不同功能和不同质量的建筑物;从取火御寒、摇扇驱暑发展到人工地创造受控的空气环境。直到本世纪初才首次在美国一家印刷厂内,建成了能够实现全年运行并带有喷水室的空气调节系统。这标志着空气调节技术已经发展到实际应用的阶段。以后,又将空气调节应用到民用建筑,以改善房间内空气环境。最早的应用是将空调用于大型公共建筑内(1919~1920,芝加哥——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,以深井水为冷源。随后,在一些电影院和银行大楼实现了空气调节。

经过本世纪的发展,以热力学、传热学、流体力学和建筑环境科学为基本理论基础,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。

空气调节的意义就是“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(如房间、船舱、汽车)内,对空气的温度、湿度、空气流动速度及清洁度,进行人工调节,以满足工艺生产过程和人体舒适的要求。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。因此,采用现代技术手段,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:一方面是来自空间内部的生产过程、设备、照明及人体等所产生的热、湿和其他有害物的干扰;另一方面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,有些是不稳定的,有些则随着季节而变化。在保证内部空气环境的有关参数(温度、湿度、风速及清洁度等)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热、湿及其他有害物等干扰因素,则需要采取技术手段来克服它们的影响。通常采用的技术手段主要有:(1)采用换气的方法以保证内部环境的空气新鲜;(2)采用热、湿交换的方法以保证内部环境的温、湿度要求;(3)采用净化的方法以保证空气的洁净度。因此,一定空间的空气调节,并非是对封闭的空气再造过程,而主要是置换和热质交换过程。

由上述空气调节的任务可见,空气调节主要涉及以下内容:

- (1)内部空间内、外干扰量的计算;
- (2)空气调节的方式和方法;
- (3)空气的各种处理方法,如加热、加湿、冷却、干燥及净化等;
- (4)空气的输送与分配;
- (5)处理空气所需的冷热源以及在干扰量变化时的运行调节。

由于空气调节是实现空间内空气温度、湿度、清洁度和空气流动速度等各参数的调节和控制。因此,在工程上将只实现空气温度调节和控制的技术手段称为供暖或降温;将只实现空气的清洁度处理和控制在一定的卫生要求范围内的技术手段,称为工业通风。实质上,供暖、工业通风及降温,都是调节和控制内部空气环境的技术手段。只是在调节和控制的要求上,以及在空气环境参数调节的全面性方面,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,也可能是天然的。强调空气调节必须有人工制冷,是一种狭隘的理解。

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各种工业生产过程的稳定运行和保证产品的质量和产量有重要作用;而且对提高劳动生产率,保护人体健康,创造舒适健康的工作和生活环境有重要意义。实践证明,空气调节是现代化生产和现代文明社会生活中不可缺少的保证条件。

空气调节应用于现代工业生产及科学实验过程中,一般称为“工艺性空调”;而应用于以满足人的生活和工作要求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,而影响产品精密度,一般都严格规定环境的基准温度和湿度,并制订了温度和湿度的偏差范围,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洁净度。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为 $\pm 2\%$ 。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。作为工业生产部门常用的计量室、控制室及大型计算机房,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、医院的手术室、高级病房等不仅要求一定的空气温、湿度,而且要求控制空气中的含尘浓度及细菌数量。

在公共与民用建筑中,大会堂、会议厅、图书馆、展览馆、影剧院、体育馆、办公楼、商场、火车站、飞机场等均需设空气调节。随着旅游业及其他国际交流的发展,空气调节在宾馆、酒店、商贸中心、游乐场所等已很普遍。在居住房间内,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,也在逐年高速上升。

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。

交通运输工具如飞机、船舶、汽车及火车,有的必须设置空气调节,有的空气调节的装备率也在逐年上升。

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,空气调节技术和手段的发展,则依赖于现代化。

目前,一些发达国家使用空气调节手段维持内部环境已很普遍,同时对空气调节的广泛应用也提出了挑战。这主要表现在全球变暖和大气臭氧层破坏这两个全球性问题以及内部

空间的空气质量问题。由于空气调节要消耗能量,在一些工业企业(如电子工业)空调耗能约占全部能耗的40%以上,而所消耗的电能或热能,大多来自电站、热电站或独立的工业锅炉房。其燃烧过程的排放物,是造成大气层温室效应的根源。因此,节约能量消耗不仅关系到能源的合理利用,而且关系到对地球环境的保护。在这种形势下,空气调节不但要提高设备的能量转换效率,改善系统能量综合利用效果,尽可能寻求合理的运行调节方法,从而达到节约用能的目的。而且应重视能源的开发,尤其是自然清洁的能源开发利用,如太阳能、地热及风能等。其次,采用压缩机制冷的空调冷源所用工质多为卤化烃(CFCs)物质,该类物质中尤以空调制冷中常用的氟里昂类物质对臭氧层破坏性最大,国际上已列为限用以至禁用。因此寻求过渡性乃至永久性替代物已迫在眉睫。

在空间内部空气质量方面,由于大量合成材料用于建筑装饰和保温,同时为了节能尽量提高建筑物的密闭性,降低新风供给量,造成空间内部空气卫生质量下降,出现了“令人疲倦和致病”的建筑物。人们长期生活和工作在这种人工控制的环境内,则会产生闷气、粘膜刺激、头疼及昏睡等症状。初步研究表明,空气调节系统本身也是一个重要污染源。空气中的负离子经过过滤,管道及换热器等器件,也将会大为减少。

再有,长期在空调环境内生活的结果,一些人产生“空调适应不全”,即空调系统长期维持的“低温”,使皮肤汗腺和皮脂腺收缩,腺口闭塞,导致血流不畅,神经功能紊乱等各种症状。

由此可见,空气调节技术的发展,不仅要在能源利用、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更合理的运行规律,系统的技术经济分析和优化及计算机控制等方面继续研究和开发,而且要在更广泛的范围内,研究创造有利于健康的、适于人工作和生活的环境。

可以预料,空气调节将由目前主要解决空间环境的温度与湿度控制,即所谓温、湿环境工程,发展到对空间环境的质量全面调节与控制,即所谓人工环境工程。这一发展过程既包含着诸多研究工作成果,也包含着将这些成果加以实际应用。本书虽然主要阐述了温、湿环境工程的原理和设计方法,但也涉及了空气净化技术。从空间空气质量控制的角度而言,这显然是很不够的,还需要进一步发展。

总之,空气调节的发展前景是广阔的。随着我国社会生产力的发展,科学技术的进步,还会有一些新的领域需要从事这一事业的人们去开拓。

第一章 湿空气的物理性质和 $i-d$ 图

在空调工程中,研究与改造的对象是空气环境,所使用的媒介物往往也是空气。因而,首先需要对空气的物理性质有所了解。在这一章里,讨论下述三个问题:(1) 空气的组成和物理性质;(2) 空气的状态参数;(3) 焓湿图的绘制和应用。

§ 1-1 湿空气的组成和物理性质

一、湿空气的组成

在空调工程中,我们把空气看做是由干空气和水蒸气两部分所组成的混和物;即:

$$\text{湿空气} = \text{干空气} + \text{水蒸气}$$

为什么要这样来划分呢?这是因为,在正常情况下,大气中干空气的组成比例基本上是不变的,如表 1-1 所示。虽然在某些局部范围内,可能因为某些因素(如人的呼吸作用使氧气减少,二氧化碳的含量增加,或在生产过程中,产生了某些有害气体污染了空气),使空气的组成比例有所改变。但这种改变可以认为对于干空气的热工特性影响很小。这样,在研究空气的物理性质时,可以把干空气作为一个整体来看待,以便分析讨论。

干空气的主要组成成分 表 1-1

主要组成成分	分子量	体积百分比(%)
氮	28.016	78.084
氧	32.000	20.946
氩	39.944	0.934
二氧化碳	44.010	0.033

相对来说,湿空气中的水蒸气的数量虽然很少,但却不是固定不变的。常常随着气象条件的变化和水蒸气的来源情况而改变。例如,在南方多雨地区,空气就比较潮湿,湿衣服就不容易干。夏天,会感到身上的汗老不干,很不舒服。而在北方的兰州,乌鲁木齐等地区,由于空气干燥,在同

样的温度下,就要舒适的多。

空气中水蒸气的多少,除了对人们的日常生活有影响外,对工业生产也十分重要。例如,在纺织车间,相对湿度小时,纱线变粗变脆,容易产生飞花和断头。可是空气太潮湿也不行,纱线会粘结,不好加工。

因此,从空气调节的角度来说,空气的潮湿程度是我们十分关心的问题。这也是把水蒸气专门划分出来的原因之一。

热力学中把常温常压下的干空气视为理想气体。所谓理想气体,就是假设气体分子是一些弹性的、不占有空间的质点,分子相互之间没有作用力。因为空调工程中所涉及的压力和温度都可以看作属于这个范畴。因此,空调工程中的干空气也可看做是理想气体。此外,湿空气中的水蒸气由于数量很少,而且处于过热状态,压力小,比容大,也可近似看做理想气体。这样,水蒸气状态参数之间的关系也可用理想气体状态方程来表示,即:

$$PV = mRT \quad (1-1)$$

式中 P —— 气体的压力, Pa;

V —— 气体的总体积, m^3 ;

m —— 气体的总质量, kg;

T —— 气体的热力学温标, K;

R —— 气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 取决于气体的性质。其中干空气和水蒸气的气体常数分别为: $R_g = 287 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $R_q = 461 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

二、湿空气的状态参数

空气有许多物理性质, 通常用一些称为状态参数的指标来衡量。例如, 空气的冷热程度用温度来衡量, 潮湿程度用相对湿度来衡量等。与空气调节最密切的状态参数有以下几个。

1. 压力

(1) 大气压力

气体的压力是指单位面积上所受到的气体的作用力, 在国际单位制(SI)里, 压力的单位是帕(Pa), $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ (式中 N 表示牛顿)。地球表面单位面积上所受到的大气的压力称为大气压力或大气压。大气压力不是一个定值, 随着海拔高度的增加而减小, 图 1-1 是大气压力与海拔高度的关系。即使在同一个海拔高度在不同的季节和不同的天气状况下, 大气压力也有变化。通常把在 0°C 下、北纬 45° 处海平面上作用的大气压力作为一个标准大气压(atm), 其数值为

$$1\text{atm} = 101325\text{Pa} = 1.01325\text{bar}$$

在空调系统中, 空气的压力常用压力表来测定, 仪表指示的压力是所测量空气的绝对压力与当地大气压力的差值, 称为工作压力(或表压力), 工作压力与绝对压力的关系为:

$$(\text{空气的})\text{绝对压力} = \text{当地大气压} + \text{工作压力(表压力)}$$

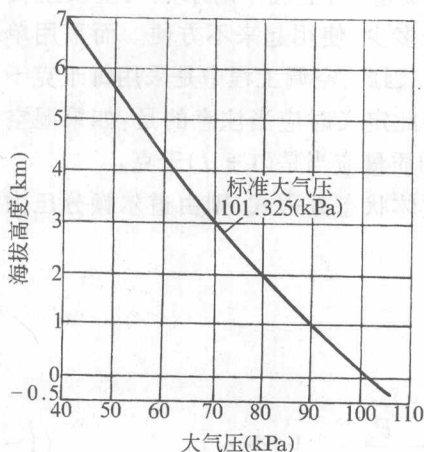


图 1-1 大气压力与海拔高度的关系

如果没有特别指出, 空气的压力都是指绝对压力。由于大气压力不是定值, 因地而异。因此, 在设计和运行中应当考虑由于当地大气压的不同所引起的误差修正。由于工作压力是空气压力与当地大气压力的差值, 它并不代表空气压力的真正大小, 只有绝对压力才是空气的一个基本状态参数。

(2) 水蒸气分压力

湿空气中水蒸气的分压力, 是指湿空气中的水蒸气单独占有湿空气的体积, 并具有与湿空气相同温度时所具有的压力。根据气体分子运动论的学说, 气体分子越多, 撞击容器壁面的机会越多, 表现出的压力也就越大。因而, 水蒸气分压力的大小也就反映了水蒸气含量的多少。

根据道尔顿分压力定律: 混合气体的总压力等于各组成气体的分压力之和。湿空气的总压力就等于水蒸气分压力与干空气分压力之和, 即

$$B = P_g + P_q \quad \text{Pa} \quad (1-2)$$

式中 B ——湿空气的总压力,即当地大气压,Pa;

P_g ——干空气分压力,Pa;

P_q ——水蒸气分压力,Pa。

2. 温度

温度是分子热运动的宏观表现。空气温度的高低,通常用表示热力学温度的开尔文温标 $T(\text{K})$ 和摄氏温标 $t(^{\circ}\text{C})$ 来表示。

开尔文温标是以气体分子热运动的平均动能趋于零时的温度 0K 为起点,以水的三相点为定点,定为 273.16K 。 1K 就是水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。摄氏温标是以水的冰点(即 273.15K)为零点,水的沸点为 100°C 。两种温标的分度间隔是相等的,换算关系为:

$$t = T - 273.15 \quad ^{\circ}\text{C} \quad (1-3)$$

工程中可近似的采用 $t = T - 273^{\circ}\text{C}$ 。

3. 含湿量

在空气的加湿和减湿处理过程中,常用含湿量这个参数来衡量空气中水蒸气的变化情况。其定义为:每公斤干空气中所含有的水蒸气量,即

$$d = m_q / m_g \quad \text{kg水蒸气/kg干空气}$$

式中 m_q ——水蒸气的质量,kg;

m_g ——干空气的质量,kg,下标 g 表示干空气, q 表示水蒸气。

为什么要这样定义呢? 先来试看其他的定义方法就不难理解了。假如把含湿量定义为单位质量的湿空气所含有的水蒸气量,即

$$d = m_q / (m_g + m_q)$$

从定义式中不难看出,因为分母中含有水蒸气的质量,当空气中的水蒸气量发生变化时,分子分母都在变化,就不能很好的反映水蒸气量的多少,使用起来不方便。而采用单位质量的干空气做基准(分母),就不会出现这样的问题。因此,空调工程中是采用每千克干空气中所含有的水蒸气量来表示空气中的含湿量。使用此定义时应当注意的是:如果湿空气中含有 1 千克干空气和 d 千克水蒸气,那么,湿空气的质量应当是 $(1 + d)$ 千克。

如果对于湿空气中的干空气和水蒸气分别应用气体状态方程式,则由道尔顿分压力定律有:

$$P_q V = m_q R_q T$$

$$P_g V = m_g R_g T$$

从中解出 m_q, m_g 代入含湿量的定义式有:

$$d = \frac{R_g P_q}{R_q P_g} = \frac{287}{461} \cdot \frac{P_q}{B - P_q} = 0.622 \frac{P_q}{B - P_q} \quad \text{kg/kg干空气} \quad (1-4)$$

由于空气中的水蒸气含量很少, d 的单位也可用克来表示,即

$$d = 622 P_q / (B - P_q) \quad \text{g/kg干空气} \quad (1-4a)$$

4. 相对湿度 φ

从含湿量的概念可知,其大小只表明了空气中水蒸气含量的多少,而看不出空气的潮湿

程度。而且,从 d 的表达式还会造成这样一个错觉:空气中的含湿量是随着水蒸气分压力的增加而增加。但是,实际上 d 和 P_q 的这种关系,只是在一定的范围内是正确的。因为,在一定的温度下,湿空气中所能容纳的水蒸气量有一个最大限度。超过了这个限度,多余的水蒸气就会从湿空气中凝结出来。

这种含有最大限度水蒸气量的湿空气称为饱和空气。饱和空气所具有的水蒸气分压力和含湿量分别称为该温度下饱和水蒸气分压力和饱和含湿量。表 1-2 中所列的数据说明了 $P_{q,b}$, d_b 和温度 t 之间的这种关系。

空气温度与饱和水蒸气分压力、饱和含湿量的关系 ($B = 101325\text{Pa}$) 表 1-2

空气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和水蒸气分压力 $P_{q,b}(\text{Pa})$	饱和含湿量 $d_b(\text{g/kg干空气})$
10	1225	7.63
20	2331	14.70
30	4232	27.20

从表 1-2 中可以看到,当温度增加时,湿空气的饱和水蒸气分压力和饱和含湿量也随之增加。那么,怎样才能判断空气的潮湿程度呢?下面引入的相对湿度这个参数可以解决这个问题。相对湿度的定义为:

$$\varphi = P_q / P_{q,b} \quad (1-5)$$

式中 P_q ——湿空气中的水蒸气分压力, Pa;

$P_{q,b}$ ——相同温度下湿空气的饱和水蒸气分压力, Pa。

从上面含湿量 d 的计算式可以看出:当大气压力不变时,空气的水蒸气分压力 P_q 增加时, d 也随之增大。因此,当温度 t 不变时,空气的潮湿程度增大。所以,湿空气中的水蒸气分压力 P_q 与同温度下饱和水蒸气分压力 $P_{q,b}$ 的接近程度就反映了空气的潮湿程度。相对湿度 $\varphi = 0$ 时,是干空气, $\varphi = 100\%$ 时为饱和湿空气。

对于 φ 有两点需要注意:

(1) φ 和 d 的区别: φ 表示空气接近饱和的程度,也就是空气在一定温度下吸收水分的能力,但并不反映空气中水蒸气含量的多少;而 d 可表示空气中水蒸气的含量,但却无法直观地反映出空气的潮湿程度和吸收水分的能力。

例如有温度为 $t = 10^{\circ}\text{C}$, $d = 7.63\text{g/kg干空气}$ 和 $t = 30^{\circ}\text{C}$, $d = 15\text{g/kg干空气}$ 两种状态的空气。从表面上看,似乎第一种状态的空气要干燥些。其实却并非如此。从表 1-2 中可知,第一种状态的空气已是饱和空气,而第二种状态的空气距离饱和状态的含湿量 $d_b = 27.2\text{g/kg干空气}$ 还很远。这时, $\varphi = 55\%$ 左右,还有很大的吸湿能力。

(2) 饱和水蒸气分压力是温度的单值函数,即: $P_{q,b} = f(t)$

由工程热力学的知识我们知道,水在定压汽化过程中,在如图 1-2(b) 所示的湿蒸汽区里,温度和压力都不变,饱和压力和饱和温度维持 $P_s = f(t)$ 的关系。而饱和水蒸气状态点是在湿蒸汽区的饱和线上,因而服从这种关系。根据这个特点,湿空气的饱和水蒸气分压力 $P_{q,b} = P_s = f(t)$,即可从有关的水蒸气图表中查取。

5. 焓

由热力学理论可以知道,在定压过程中,空气变化时初、终状态的焓差,就反映了状态变

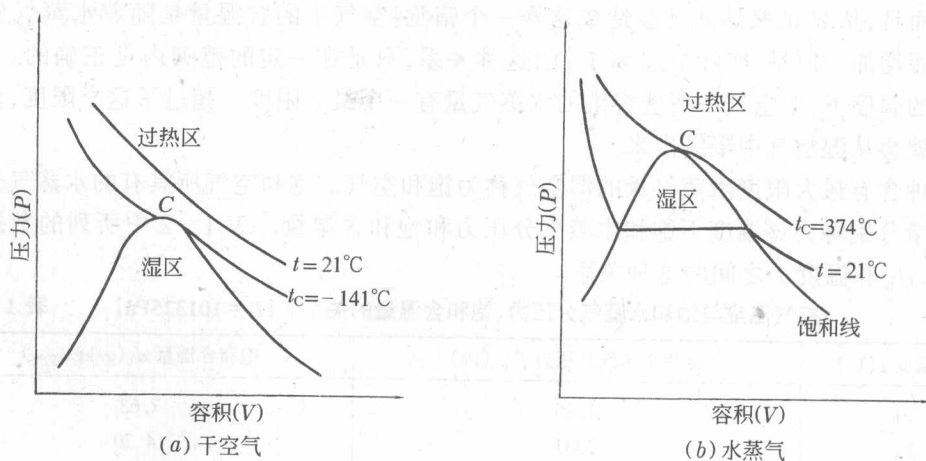


图 1-2 水蒸气的压力-容积图

化过程中热量的变化。因为在空调工程中,湿空气的状态变化过程可以近似看做是定压过程。所以,湿空气状态变化前后的热量变化就可以用它们的焓差来计算。

湿空气的焓也是以 1kg 干空气做为计算基础。即 1kg 干空气的焓加 d kg 水蒸气的焓的总和,称为 $(1+d)$ kg 湿空气的焓。如果取 0°C 的干空气和 0°C 的水的焓为零,则湿空气的焓可用下式表示:

$$i = i_g + d \cdot i_q$$

式中 i ——含有 1kg 干空气的湿空气所具有的焓, kJ/kg 干空气;

i_g —— 1kg 干空气的焓, kJ/kg 干空气, 可用下式计算

$$i_g = c_{p,g} \cdot t = 1.01t$$

i_q —— 1kg 水蒸气的焓, kJ/kg 水蒸气, 可用下式计算

$$i_q = 2500 + c_{p,q} \cdot t = 2500 + 1.84t$$

式中 2500 —— 0°C 时水的汽化潜热, kJ/kg;

$c_{p,g}$ ——干空气的定压比热, 为 1.01 kJ/(kg·°C);

$c_{p,q}$ ——水蒸气的定压比热, 为 1.84 kJ/(kg·°C)。

把 i_g 和 i_q 的表达式代入湿空气焓的计算式中整理可得:

$$i = (1.01 + 1.84d)t + 2500d \quad (1-6)$$

从上式可以看到:(1) $(1.01 + 1.84d)t$ 是随温度而变化的量, 通常称为“显热”。2500d 是 0°C 时 d 千克水的汽化潜热, 仅与含湿量 d 有关, 称为“潜热”; (2) 因为 2500 比 $(1.01 + 1.84d)$ 大得多, 因而, 当温度升高时, 若含湿量有所下降, 则综合后的结果有可能是湿空气的焓不一定会增加。

6. 密度和比容

单位容积的气体所具有的质量称为密度, 即

$$\rho = m/V$$

式中 ρ ——气体的密度, kg/m³;

m ——气体的质量, kg;

V ——气体所占有的容积, m³。

单位质量的气体所具有的容积称为比容。比容和密度实际上是两个相关的参数。两者呈倒数关系,即

$$v = V/m = 1/\rho$$

式中 v ——气体的比容, m^3/kg 。

由于湿空气是由干空气和水蒸气组成的混合物,两者具有相同的温度并占有相同的容积,即:

$$m = m_g + m_q$$

上式各项同除以容积 V ,则湿空气的密度等于干空气的密度加水蒸气的密度,即

$$\rho = \rho_g + \rho_q$$

将理想气体状态方程代入上式有

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

注意到 $P_g = B - P_q$, $P_q = \varphi \cdot P_{q,b}$, $R_g = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $R_q = 461 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 代入上式整理可得湿空气密度的计算式为:

$$\rho = 0.00349B/T - 0.00134\varphi \cdot P_{q,b}/T \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-7)$$

从式中结果可知:在大气压力和温度相同的情况下,湿空气的密度比干空气小,即湿空气比干空气轻。

§ 1-2 湿空气的焓湿图

上面介绍了空气的 7 个状态参数, t 、 d 、 B 、 φ 、 i 、 P_q 和 ρ , 其中只有 t 、 d 和 B 三个是独立的状态参数,其余的状态参数都可以从这三个状态参数计算出来。但是在工程计算中,用公式计算和用查表方法来确定空气状态和参数是比较繁琐的,而且,对空气的状态变化过程的分析也缺乏直观的感性认识。因此,为了便于工程应用,通常把一定大气压力下,各种参数之间的相互关系作成线算图来进行计算。根据所取坐标系的不同,线算图也有好几种。国内常用的是焓湿图,简称 $i-d$ 图。

$i-d$ 图是取两个独立参数 i 和 d 作坐标轴。另一个独立状态参数 B 取为定值。为了使各种参数在坐标图上的反映清晰明了,两坐标轴之间的夹角取为 135° 。如图 1-3 所示。

图中 d 为横坐标, i 为纵坐标。与 i 轴平行的各条线是等焓线。与 d 轴平行的直线是等含湿量线。此外,图上还作出了以下几条线。

1. 等温线

等温线是根据公式 $i = 1.01t + (2500 + 1.84t)d$ 绘制的。当 $t = \text{常数}$ 时,上式是一直线方程。其中 $1.01t$ 是截距, $(2500 + 1.84t)$ 是斜率。当温度取某一定值时,根据过两点可作一条直线的原理,任选 d_1 和 d_2 ,由上式算出 i_1 和 i_2 。则可由 (i_1, d_1) 和 (i_2, d_2) 在 $i-d$ 图上作出该条等温线。

下面简要说明等温线的绘制过程。

如绘制 $t = 0^\circ\text{C}$ 的等温线。 $t = 0^\circ\text{C}$ 时,任取 $d_1 = 0$ 和 $d_2 = d_x$,则可计算出 $i_1 = 0$ 和 $i_2 = 2500d_x$,由 $(0, 0)$, 和 $(2500d_x, d_x)$ 在 $i-d$ 图上可定出两个状态点 O 和 A ,则 OA 直线就是 $t = 0^\circ\text{C}$ 的等温线,如图 1-4 所示。

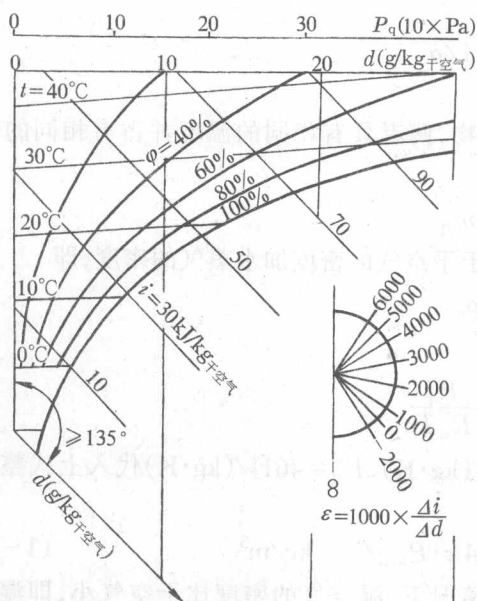


图 1-3 湿空气的焓湿图

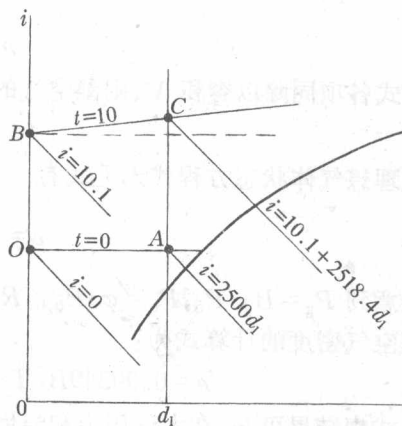


图 1-4 等温线的绘制

如需绘制 $t = 10^\circ\text{C}$ 的等温线, 则当 $t = 10^\circ\text{C}$ 时, 取 $d_1 = 0$, 可计算出 $i_1 = 10.1$, 取 $d_2 = d_x$, $i_2 = 10.1 + 2518.4d_x$, 因为 $(1.01, 0)$ 在纵轴上, 即可由 0 点向上截取 OB 段 (截距等于 10.1) 得到 B 点, 又根据 $(10.1 + 2518.4d_x, d_x)$ 可在 $i-d$ 图上定出状态点 C , 则 BC 直线就是 $t = 10^\circ\text{C}$ 的等温线。

当 t 取 $1^\circ\text{C}, 2^\circ\text{C}, 3^\circ\text{C}, \dots$ 等一系列的常数时, 用上面同样的方法可绘出一簇不同的等温线。因为等温线的斜率 $(2500 + 1.84t)$ 随着 t 值的不同有微小变化, 所以各条等温线是不平行的。但由于 $1.84t$ 的数值比 2500 小的多, t 值变化对等温线斜率的影响很小, 因此, 各条等温线可近似看作是平行的。

2. 等相对湿度线

等相对湿度线是根据公式

$$d = 622 \varphi \cdot P_{q,b} / (B - \varphi \cdot P_{q,b}) \quad \text{g/kg 干空气}$$

绘制。从公式可知, 含湿量是大气压力 B 、相对湿度 φ 和饱和水蒸气分压力 $P_{q,b}$ 的函数。即 $d = f(B, \varphi, P_{q,b})$ 。但是, 因为大气压力 B 在作图时已取为定值, 在本式中作为一常数。饱和水蒸气分压力 $P_{q,b}$ 是温度的单值函数, 可根据空气温度 t 从水蒸气性质表中查取。所以, 实际上有:

$$d = f(\varphi, t)$$

这样当 φ 取一系列的常数时, 即可根据 d 与 t 的关系在 $i-d$ 图上绘出等 φ 线。例如当 $\varphi = 90\%$ 时有

$$d = 622 \times 0.9 P_{q,b} / (B - 0.9 P_{q,b}) \quad \text{g/kg 干空气}$$

任取温度 t 查取 $P_{q,b}$, 然后由上式计算出含湿量 d 。当 t 取不同的值 t_i ($i = 1, 2, \dots$)