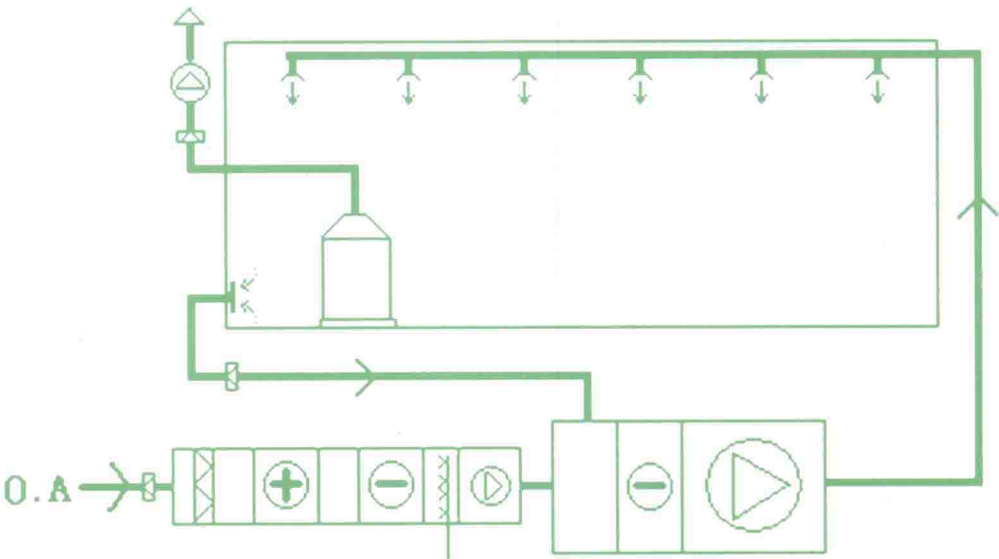


空调工程设计理论与实践

KONGTIAO GONGCHENG SHEJI
LILUN YU SHIJIAN

周祖毅 著



中国建筑工业出版社

周祖毅 著

空调工程设计 理论与实践

KONGTIAO GONGCHENG SHEJILUN YU SHIJIAN



中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

空调工程设计理论与实践/周祖毅著. —北京:中国建筑工业出版社, 2014. 7

ISBN 978-7-112-17150-7

I. ①空… II. ①周… III. ①空气调节系统—系统设计 IV. ①TU831.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第186764号

本书重点论述诸如恒温恒湿空调、低温空调、人工环境气候试验室空调等工艺性、多样性、特殊性空调工程设计问题,对系统节能运行赋予了高度重视。比如:对恒温恒湿空调取消二次加热,杜绝冷热抵消这一课题的长期实践和思考;对低温空调工程空气处理的无霜去湿、融霜技术的深入分析;在人工环境气候试验室空调中对自然冷源利用理念的强调;为大型直接膨胀式低温空气冷却器摆脱传统沿用的收敛式控制,直接采用供液量控制实现一步到位的精确温度控制方面的努力;螺杆式制冷机组多种温度工况下内容积比自适应调节等。鉴于自动控制技术对节能运行的关键性作用,书中在讨论各种空气处理过程时重视结合自动控制原理的描述并力求采用国际标准图式予以表达。

责任编辑:姚荣华 张文胜

责任校对:张颖 王雪竹

空调工程设计理论与实践

周祖毅 著

*

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

北京京点图文设计有限公司制版

环球印刷(北京)有限公司印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:17¼ 字数:327千字

2015年1月第一版 2015年1月第一次印刷

定价:48.00元

ISBN 978-7-112-17150-7

(25908)

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)

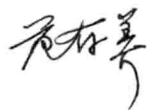


序 言

多少年来，我们专业出版的书籍，较多的是专业基础的理论教科书、设计手册、规范及其条文解释等，近年则开始关注绿色生态、节能减排的理念和应用。而对于工程设计、施工运行等方面出现和存在的问题及其解决方法，则较少有系统性总结与归纳，更少能反映在专业出版物中。这可说是知识水平提高和技术发展循环过程中断裂的一环。本书——《空调工程设计理论与实践》的出版，恰恰可以在弥补这种缺陷方面作出相应贡献。

周祖毅先生是新中国成立后最早一批赴苏联留学的学生，毕业于列宁格勒建筑工程学院，较早接受过系统的通风、空调专业技术培养，回国后一直致力于我国建筑行业，特别是机电工业的通风与空调工程设计和运行，数十年如一日，退休后仍力所能及地积极参与很多工程的设计咨询，平时注重总结、笔耕不辍，多年来担任若干专业刊物的编辑和顾问，并关注大学的人才培养。这次他将多年的工作经验结合专业技术理论知识，为读者提供《空调工程设计理论与实践》一书，值得庆贺。

作者从专业的基本理论知识出发，结合自身亲历亲为的舒适性空调工程、恒温恒湿空调工程、低温空调工程及人工环境试验室工程等设计经验与教训作了系统叙述。书中体现了作者深入观察、勤于思考、理智分析、总结规律、触类旁通的思维方式，这些都弥足珍贵。为此，我十分乐于把本书推荐给同行读者。



于2014年6月



前言

本书的取材主要源自作者数十年来自身专业工程设计及亲历的相关工程设计、咨询、评审等活动中，遇到的一些疑难、复杂工程实践。对于所引述工程设计实例中的正误、得失、经验和教训，均力求客观、真实地反映，目的只在于为后来者提供借鉴，避免重蹈覆辙。

回想在成书过程中曾受到同行专家和朋友们热心帮助，终生难忘。特别是作为本人良师益友的同济大学范存养教授，家藏图书资料用汗牛充栋也不足形容，屡屡不厌其烦地帮我从浩瀚的藏书中寻找资料，我深感其浓浓情意，难以为报。我的同窗挚友清华大学薛殿华教授，帮我审阅了部分书稿，提出了不少很有见地的意见。上海海事大学卢士勋教授每每帮我出点子、提建议。还有中国船舶工业总公司第九设计研究院朱伟民高工多次百忙中帮我查图纸、找材料。中国建筑工业出版社的姚荣华编审和张文胜编辑早在本书初创酝酿阶段，即就新书书名提供了宝贵的建言。作者谨在此一并表示深切谢意。

最后，作者想说的是，书中所表述的观点和见解仅是一己之见，难免主观、片面，甚至错误，恭请读者来电、来函指正（zhouzuyi@sina.com）。

目 录

第 1 章 空气性质的基础理论知识及其应用	001
1.1 湿空气的物理性质	002
1.1.1 湿空气的组成	002
1.1.2 湿空气的状态参数	002
1.2 湿空气的焓湿图	007
1.2.1 焓湿图的构成及绘制	007
1.2.2 露点温度和机器露点温度	011
1.2.3 湿球温度	012
1.3 焓湿图的应用	015
1.3.1 确定湿空气状态参数	015
1.3.2 表示湿空气状态的变化过程	016
1.3.3 确定两种不同状态空气混合后的状态参数	019
第 2 章 空调自动控制基本原理和应用	021
2.1 概述	022
2.2 选择控制和分程控制的基本概念	022
2.2.1 选择控制的基本原理	022
2.2.2 分程控制基本原理	023
2.3 空气加热过程及其控制	025
2.4 空气冷却过程及其控制	027
2.4.1 冷水空气冷却器 (含乙二醇水溶液空气冷却器)	027
2.4.2 喷水室空气处理方式	032
2.4.3 喷水式空气冷却器	034
2.4.4 直接膨胀式空气冷却器	034
2.5 空气加湿过程及其控制	036
2.6 水系统的压力控制和流量控制	037

2.6.1	闭式水系统负荷侧供水、回水管恒定压差的控制	037
2.6.2	开式水系统落水管压力的控制	041
2.7	电子式控制	042
2.7.1	控制信号选择控制环节	042
2.7.2	全空气式舒适性空调中应用的分程控制	043
2.7.3	室内温度设定值的自动再调控制环节	045
2.7.4	送风温度高、低限值控制环节	045
2.7.5	新风量控制环节	047
2.8	集中空调系统的计算机控制	051
2.8.1	微型计算机的监控应用	051
2.8.2	集中空调系统的 DDC 控制	053
第 3 章	舒适性空调工程	055
3.1	概述	056
3.2	全空气式空调系统的设计误区	057
3.2.1	影剧场、礼堂变味的全空气式空调系统的设计方案	057
3.2.2	某些商场采用的貌似全空气空调系统	058
3.3	大超市、大卖场冬季室外、室内冰火两重天现象	060
3.3.1	室内热环境的失调和舒适感的缺失	060
3.3.2	现状和原因分析	060
3.3.3	相关设计规范和设计标准的规定	064
3.3.4	正确和合理的空调系统设计	064
第 4 章	恒温恒湿类空调工程	069
4.1	恒温恒湿空调工程技术在我国 60 多年来的发展沿革	070
4.2	温度和相对湿度与工业生产工艺的关联	074
4.2.1	温度因素	074

4.2.2	相对湿度因素	075
4.3	几种常见恒温恒湿室对温度、 相对湿度及其精度的控制要求	076
4.4	恒温恒湿室用空调系统的基本构成	077
4.5	恒温恒湿空调工程中常见的若干技术问题	079
4.5.1	一般恒温恒湿空调机组的结构及其温度、湿度控制原理	079
4.5.2	水冷表面式空气冷却器应用中控制参数的失控问题	081
4.5.3	固定露点温度控制	083
4.5.4	固定露点温度控制中露点温度传感器的选用	085
4.6	恒温恒湿空调工程设计中常见问题	085
4.6.1	某三坐标测量室的恒温恒湿空调工程设计和系统运行实况	085
4.6.2	某数据处理机房的空调工程设计方案	090
4.7	恒温恒湿空调工程设计实例	099
4.7.1	某涤纶长丝生产厂房和涤纶长丝侧吹风 冷却系统的空调工程	099
4.7.2	上海某医用仪器厂空调工程	108
4.7.3	上海某公司光导体厂镀膜间洁净空调工程及其自动控制	115
4.7.4	某机床厂恒温恒湿空调工程的改造	128
第 5 章	现代实验室通风与空调工程设计	139
5.1	概述	140
5.2	实验室通风工程设计基本原则	140
5.3	传统的实验室通风工程设计模式	141
5.3.1	老式通风柜的结构、操作及其性能	141
5.3.2	多台传统型通风柜并联运行的系统典型模式	142
5.3.3	采用定风量型通风柜排风系统和相应房间全室通风的传统模式	143

5.4	实验室变风量排风柜	144
5.4.1	变风量排风柜及其工作原理	144
5.4.2	多台变风量排风柜并联运行系统的自动控制	146
5.5	作为压力无关型变风量装置文丘里阀的构造和工作原理	147
5.6	现代自动化、智能化实验室的通风空调工程设计	149
5.6.1	单一区域（房间）情况下的变风量排风系统和空调送风系统	149
5.6.2	多区域（房间）情况下合用的变风量排风系统和空调送风系统	154
5.7	实验室通风空调工程设计及其竣工验收面临的评价和审查	157
第 6 章	低温环境空调工程	161
6.1	上海某血液制品公司生产厂房的常温和低温空调工程	162
6.1.1	工程概况	162
6.1.2	生产工艺简介	163
6.1.3	厂房建筑简介	164
6.1.4	空调用冷、热源设备	165
6.1.5	项目中主要常温空调工程	166
6.1.6	低温洁净空调工程	168
6.1.7	工程设计总结	177
6.2	某中药研究所种质资源库制冷与空调工程	179
6.2.1	工程概况	179
6.2.2	中药种质库的工艺技术要求	180
6.2.3	建筑设计简介	180
6.2.4	低温空调工程设计	181
6.2.5	工程的施工、调试和验收	186
6.2.6	工程设计经验、教训与反思	189

第 7 章 人工环境气候试验室空调工程	193
7.1 概述	194
7.2 汽车电子喷射匹配试验中心工程设计简介	197
7.3 发动机试验室	199
7.3.1 工艺设计简介	199
7.3.2 关于通风与空调系统原理示意图的解读	201
7.3.3 几个“谜团”的释疑	202
7.3.4 节能措施与分析	203
7.3.5 需要说明的其他问题	205
7.4 排放试验室	207
7.4.1 工艺设计简介	207
7.4.2 关于通风与空调系统原理示意图的解读	208
7.4.3 室内热负荷计算	210
7.4.4 通风与空调工程和系统的实施	210
7.4.5 各种运行工况的解读	214
7.4.6 制冷与供冷系统	218
7.4.7 通风与空调系统的自动控制	227
7.4.8 总结和评说	227
7.5 低温试验室	230
7.5.1 工艺设计简介	230
7.5.2 关于通风与空调系统原理示意图的解读	231
7.5.3 室内热（冷）负荷计算	232
7.5.4 通风与空调系统的实施	232
7.5.5 总结和评说	240

7.6 高温试验室	241
7.6.1 工艺和建筑设计简介	241
7.6.2 关于通风与空调原理示意图的解读	243
7.6.3 相关工艺设备的容量	245
7.6.4 局部排风系统 56E1 和 56E2 风量的计算	245
7.6.5 供暖与供冷负荷计算	246
7.6.6 空调系统主要空气处理设备容量的计算	248
7.6.7 最大功率 200kW 发动机短暂性能试验工况的校核计算	251
第 8 章 集中供电、供热和供冷的区域能源中心	255
8.1 能源的综合、高效利用 —— 热电联产、冷、热、电 三联供	256
8.2 热电联产的典型方式	257
8.3 热电联产系统的运行模式	259
8.4 综合能源利用型区域能源中心工程实例	260
8.4.1 上海浦东国际机场能源中心	260
8.4.2 日本福冈 4 个规模不等的区域能源中心	262
8.5 关于现代能源中心设计的节能评价	269
8.5.1 传统型能源中心与现代型能源中心	269
8.5.2 关于生活热水供应温度问题的探讨	270
8.5.3 能源中心的能耗指标和节能性判据	271
参考文献	273

第 1 章

空气性质的基础 理论知识及其应用

1.1 湿空气的物理性质

1.1.1 湿空气的组成

通风与空调技术表明,大气是由干空气和水蒸气组成的混合物,称为湿空气。更形象一点,可用图 1-1 表示。

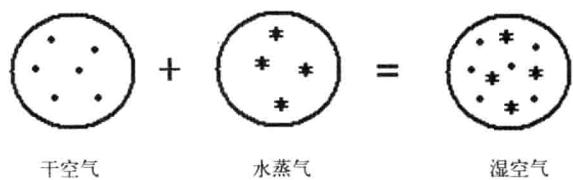


图 1-1 湿空气与干空气和水蒸气之间的关系

干空气也是一种混合气体,其组成中有氮(约 78%)、氧(约 21%)、氩(约 0.1%)以及二氧化碳、氦、氖等其他一些微量气体。后面这些微量气体的总量很小,不到 1%。干空气中除二氧化碳外,其他气体的含量是非常稳定的。而二氧化碳的含量则会随地球上包括人类在内一切生物的生长、生活和生产活动等因素有所变化。如今已经得到公认并越来越引起人们重视的一个大问题,即是由于人类在生产活动中能源的无序和滥用,巨量二氧化碳的排放导致地球大气层的严重温室效应,破坏了人们赖以生存的环境。所以,节能减排成为了当今世界共同的紧迫任务。

湿空气中的水蒸气含量虽然很少,但是它对空气性质的影响却很大。水蒸气在湿空气中所占百分比却是不稳定的,时常会随着地域、海拔、季节、气候、地表、水体等因素的差异而发生显著变化。它可以引起大气干、湿程度的改变,使湿空气的物理性质随之发生变化,从而对人体的舒适、生产工艺、设备和材料的使用寿命、产品质量等都会产生直接的影响。所以,它也就成为通风与空调工程技术关注、研究和处理的重要和主要对象之一。

当然,除此之外,在接近地球表面的大气中,还会有由于地球生态环境、自然条件和人类活动产生的浮尘、烟雾、细菌、微生物以及各种排放物等,这些物质对空气品质的影响及其处理,也是构成通风与空调工程技术的另一大方面。

1.1.2 湿空气的状态参数

在空气调节工程技术中无处不在的室内环境及其建立与保持,总离不开湿

空气的状态参数及其变化等问题。湿空气的状态通常可以用压力、温度、相对湿度、含湿量及焓等参数来度量和表征。表征湿空气状态的这些参数便称为湿空气的状态参数。

1. 压力

(1) 大气压力 p_a

环绕地球的空气层对单位地球表面积形成的压力称为大气压力，这里用符号 p_a 表示。大气压力的计量单位通常采用 Pa（帕）或者 kPa（千帕）表示。大气压力不是一个定值，它随各地海拔高度的不同而不等。通常以北纬 45° 处海平面的全年平均气压作为标准大气压力，其数值为 101325Pa。海拔越高的地方，大气压力越低。比如，地处我国西藏高原的拉萨市海拔高度 3658m，夏季的平均大气压力为 65230Pa，冬季为 65000Pa。大气压力不仅与海拔高度有关，还会随季节和气候的变化略有波动。

在空调和制冷技术中，气体压力一般都是采用仪表来进行计测的。仪表上指示的压力称为工作压力（过去称为表压力）。工作压力与绝对压力之间的关系可用式（1-1）表示：

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

作为湿空气状态参数之一的压力参数指的只能是绝对压力。换言之，只有绝对压力才是湿空气的状态参数。

(2) 水蒸气分压力 p_q

在一定温度下，湿空气中水蒸气单独占有湿空气的体积所呈现的压力，称为水蒸气分压力，可用 p_q 表示。根据道尔顿定律，理想混合气体的总压力等于组成该混合气体的各种气体的分压力之和。

在热力学中，处于常温常压下的干空气和水蒸气可近似地被视作理想气体，所以，两者的混合气体——湿空气也可视为理想气体。如果湿空气的总压力，亦即大气压力为 p_a ，则 p_a 应是干空气分压力 p_g 与水蒸气分压力 p_q 之和，即：

$$p_a = p_g + p_q \quad (1-2)$$

(3) 饱和水蒸气分压力 $p_{q, b}$

从微观角度看，气体的压力是由于气体分子运动撞击容器壁而产生的效应。温度越高，分子撞击容器壁的机会越多，气体压力越高。显然，水蒸气分压力的大小直接反映了水蒸气含量的多少。在一定温度下，湿空气中的水蒸气含量越多，空气就越潮湿，水蒸气分压力也就越大。如果空气中水蒸气的数量超过

某一限度,多余的水蒸气就会凝结成液态水,从空气中析出。在一定温度条件下,当湿空气中水蒸气含量达到最大限度时,此时的湿空气即处于饱和状态。此湿空气称为饱和空气。其时相应的水蒸气分压力称之为饱和水蒸气分压力,可用 $p_{q, b}$ 表示。 $p_{q, b}$ 值仅取决于温度,温度越高, $p_{q, b}$ 值越大。

2. 温度

空气的温度是表示空气的冷热程度,其高低是用温标来衡量的。如今国际上通用的有绝对温标,表示热力学温度,又称开氏温度,符号为 T ,单位为 K ;摄氏温标,符号为 t ,单位为 $^{\circ}C$ 。这两种温标之间的转换关系为:

$$t = T - 273.15 \approx T - 273 \quad (1-3)$$

式中 T —— 绝对温度, K ;

t —— 摄氏温度, $^{\circ}C$ 。

3. 密度 ρ

单位容积湿空气所具有的质量称为密度,用符号 ρ 表示,即:

$$\rho = m / V \text{ (kg / m}^3\text{)} \quad (1-4)$$

式中 m —— 湿空气的质量, kg ;

V —— 湿空气占有的容积, m^3 。

4. 比体积 n

单位质量湿空气所占有的容积称为比体积,用符号 n 表示。即:

$$n = V / m = 1 / \rho \text{ (m}^3 / \text{kg)} \quad (1-5)$$

式中符号及单位同上。

5. 湿度

(1) 含湿量 d

湿空气中与 $1kg$ 干空气同时共存的水蒸气量称为含湿量,符号用 d 表示,即:

$$d = m_q / m_g \text{ (kg / kg}_{\text{干}}\text{)} \quad (1-6)$$

式中 m_q —— 湿空气中水蒸气的质量, kg ;

m_g —— 湿空气中干空气的质量, $kg_{\text{干}}$ 。

由于干空气在温度和湿度变化时其质量不变,含湿量只随水蒸气的多少而改变,所以,用含湿量可以确切而且方便地表示空气中的水蒸气含量。在空调工程技术中对空气进行加湿、除湿处理时,都是用含湿量来计算空气中水蒸气

量的变化的。所以, 含湿量是湿空气的一个重要的状态参数。

若湿空气中含有 1kg 干空气和 d kg 水蒸气, 则湿空气质量为 $(1+d)$ kg。

由于常温常压下干空气和水蒸气都可以被视作为理想气体, 因此, 两者均应遵循理想气体状态方程式。

$$\text{对于水蒸气有: } p_q V = m_q R_q T \quad (1-7)$$

$$\text{对于干空气有: } p_g V = m_g R_g T \quad (1-8)$$

式中 p_q 、 p_g —— 水蒸气、干空气的分压力, Pa;

m_q 、 m_g —— 水蒸气、干空气的质量, kg;

R_q 、 R_g —— 水蒸气、干空气气体常数, 分别为 461 J/(kg·K) 和 287 J/(kg·K);

V —— 湿空气的总体积, m³;

T —— 湿空气的热力学温度, K。

将上述关系和常数代入式 (1-6), 经整理可得:

$$d = (R_g \cdot p_q) / (R_q \cdot p_g) = 287 p_q / 461 p_g = 0.622 p_q / p_g \quad (1-9)$$

$$\text{或 } d = 0.622 p_q / (p_a - p_q) \text{ (kg / kg}_{\mp}) \quad (1-10)$$

考虑到湿空气中水蒸气含量较少, 因此, 含湿量 d 的单位更常用每千克干空气中含有水蒸气的克数, 即 g / kg_(干) 来表示。这样, 式 (1-10) 便可改写为:

$$d = 622 p_q / (p_a - p_q) \text{ (g / kg}_{\mp}) \quad (1-11)$$

(2) 相对湿度 ϕ

相对湿度是指空气中水蒸气分压力与同一温度下饱和水蒸气分压力之比, 一般用符号 ϕ 表示, 即:

$$\phi = (p_q / p_{q, b}) \times 100\% \quad (1-12)$$

式中 p_q —— 空气中的水蒸气分压力;

$p_{q, b}$ —— 相同温度下饱和水蒸气分压力。

由式 (1-12) 可知, 相对湿度反映的是湿空气中水蒸气含量接近饱和的程度。 ϕ 值小, 表示空气离饱和程度远, 空气较为干燥, 进一步吸收水蒸气的能力强; ϕ 值大, 表示空气离饱和程度近, 空气较为潮湿, 进一步吸收水蒸气的能力弱。当 ϕ 值为零时, 则为干空气; 当 ϕ 值等于 100% 时, 则为饱和空气。所以, 根

据 ϕ 值的大小, 可以直接看出空气的干湿程度。

相对湿度和含湿量都是表示空气湿度的参数, 但是意义却不相同: 相对湿度 ϕ 能够表示空气接近饱和状态的程度, 却不能表示水蒸气的含量多少; 而含湿量 d 能表示水蒸气含量的多少, 却不能表示空气距离饱和状态的程度。湿空气的相对湿度与含湿量之间的关系可由式 (1-10) 和 (1-12) 导出:

$$d = 0.622 \frac{p_q}{p_a - p_q} = 0.622 \frac{\phi p_{q, b}}{p_a - \phi p_{q, b}} \quad (\text{kg} / \text{kg}_{\text{干}}) \quad (1-13)$$

$$d_b = 0.622 \frac{p_{q, b}}{p_a - p_{q, b}} \quad (\text{kg} / \text{kg}_{\text{干}}) \quad (1-14)$$

式中 d_b —— 饱和空气的含湿量, 即饱和含湿量, $\text{kg} / \text{kg}_{\text{干}}$ 。

于是:

$$\frac{d}{d_b} = \frac{p_q (p_a - p_{q, b})}{p_{q, b} (p_a - p_q)}$$

$$\phi = \frac{p_q}{p_{q, b}} \times 100\% = \frac{d}{d_b} \times \frac{(p_a - p_q)}{(p_a - p_{q, b})} \times 100\%$$

由于式中的 p_a 的量值要比 p_q 和 $p_{q, b}$ 大得多, 所以, 可以认为 $p_a - p_q \approx p_a - p_{q, b}$ 。这样处理后引起的误差仅为 1% ~ 3%。因此相对湿度可近似地表达为:

$$\phi \approx \frac{d}{d_b} \times 100\% \quad (1-15)$$

6. 比焓 h

在空气调节工程中, 往往需要确定空气状态变化过程中发生的热量交换。湿空气的状态经常发生变化, 但是压力的变化一般很小, 近似于等压过程。根据工程热力学原理, 在等压过程中热交换量可用焓差来表示, 即:

$$\Delta Q = q \times \Delta h$$

湿空气的比焓是以 1kg 为计算基础。1kg 干空气和 d kg 水蒸气比焓的总和即为 $(1 + d)$ kg 湿空气的比焓。如果取 0℃ 的干空气和 0℃ 水的比焓为零, 则湿空气的比焓可表达为:

$$h = h_g + dh_q = c_{p, g} \cdot t + d (2500 + c_{p, q} \cdot t) \quad (\text{kJ} / \text{kg}_{\text{干}})$$