

房间湿度的测量与调节

廖传善 杨逢春 王志忠 译

中国建筑工业出版社

房间湿度的测量与调节

廖传善 杨逢春 王志忠 译

中国建筑工业出版社

本书是按1982年M. Л. Мозгалевой的俄文译本翻译的。
而俄文译本则是根据1977年K. Kostyrko和B. Okolowicz-Grabowska合著的波兰再版原著节译的。

本书对空调设备、专用设备及人工气候装置等湿度测量、校验、标定、调节的理论、方法和设备作了系统而全面的介绍，它适用于从事上述各方面实际工作的同志。

为了帮助读者了解国际上在水分、湿度控制应用方面的最新研究成果与动态，书末附录了1985年“水分与湿度”国际会议论文综述。

Сокр. пер. с пол.

М. Л. Мозгалевой

Измерение и регулирование

Влажности в помещениях

Москва Стройиздат, 1982

* * *

房间湿度的测量与调节

廖传善 杨逢春 王志忠 译

*

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

北京市平谷县大华山印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米1/32 印张: 9¹/₄ 字数: 206千字

1987年4月第一版 1987年4月第一次印刷

印数: 1—7,305册 定价: 1.45元

统一书号: 15040·5126

译 者 的 话

关于本书的主要内容，作者在再版前言中已作了扼要说明。

我们决定将本书译成中文是因为国内外尚没有一本象这样系统而全面地介绍室内湿度测量与调节方面的书，而近年来实践表明，室内湿度测量与调节又是关系到人们舒适条件、工农业生产条件、物资保管储存条件的极为重要的问题。

由于近年来微电子技术迅速发展而原书出版于1977年，因此书中关于湿度调节及监控装置的某些部分没有反映1977年以后世界上新成就（为此我们在书末加了一个1985年“水分与湿度”国际会议论文综述，以补此不足）。但就全书各个方面来说，如湿度测量基础知识，人体对湿度感觉，湿度传感原理，基于调节理论的湿度调节系统的分析与综合，各种空气处理系统的湿度调节方案，湿度测量仪表的校验和标定，专用设备及人工气候装置的湿度调节等等，本书仍然是比较系统而全面的，对当前从事湿度测量、调节系统的设计、分析、运行管理，设备的研制，仪表的校验等实际工作的同志都具有实用和参考价值，这就是我们仍然决定将本书推荐给读者的原因。

本书第一、二、四章由廖传善翻译并撰写附录，第三、五、六章由杨逢春翻译，第七、八章由王志忠翻译，全书经过相互校阅最后由廖传善统一审定。

俄 文 版 前 言

本俄文译本系根据波兰克·科斯特尔科 (К. Костырко) 和博·奥科洛维奇-格拉博夫斯卡 (Б. Околович-Грабовска) 合著的“房间湿度的测量与调节”一书的再版本节译的。它广泛地阐述了房间内湿度测量与调节的问题。

作者利用各国和波兰的经验叙述了湿空气的热力学基础知识, 详细介绍了空气湿度的干湿球、吸湿及电测的测量方法和测量仪器的校正与标定方法。

书中分析了空气温度和湿度对人体感觉的影响, 列举了工业和公共建筑的空调房间所规定的空气参数的技术资料。

对苏联读者特别感兴趣的是以自动调节的理论方法为基础对各种空调系统的分析, 以及对空气调节装置的现代调节系统的介绍, 书中讨论了空气调节装置的新型集中监控系统及设备。

书中对各种专用装置, 其中包括人工气候室、植物培育室、干燥装置、冷藏装置等的湿度调节问题予以很大的注意。

本书还介绍了一些适用于住宅和公共建筑的空气干燥和加湿装置。

令人遗憾的是, 书中对近年来出版的有关参考书、期刊及教科书中所反映的苏联经验介绍得不够。

本书可供广大从事空调装置的运行管理技术人员和湿度测量仪器与设备的研究人员使用。

科技硕士 В.М. 鲁勃钦斯基

作者再版前言

由于波兰工业的不断发展，研究有关房间内湿度调节的问题具有重要的意义。现代生产工艺过程要求在生产厂房内保持合适的空气参数。因此，人工气候装置及其调节装置的需求量大量增加，还由于空气调节在商店、医院及观赏建筑物等获得广泛的应用而使这一需求更为增长。

本书研究了许多空气湿度的调节问题，包括湿度测量理论概述和空气湿度的各种测量方法及仪器的介绍。

本书第一部分包括湿度测量领域的基础知识。在叙述湿空气的热工特性中利用实际气体理论。

第三章评价了空气湿度与温度对人体感觉的影响。

书中对空气调节所用的湿度测量仪器和传感器作了叙述，同时，除了测量原理和技术方案以外，还提出了各种仪表检验方法并对用来校正与标定湿度仪表和传感器的装置作了介绍。

根据线性系统的自动调节理论方法以人工气候装置作为调节对象进行了动态特性分析的示例。

书中给出了许多湿度调节系统的具体方案示例，以便非自动化方面专家的读者了解空气处理过程的自动调节问题。

作者没有只限于讨论湿度调节方法，所以书中有的材料超出了书名的主题范围，因为空气处理过程是综合性的。

本书适用于在空气调节以及热工测量方面从事人工气候装置自动调节系统设计或其运行管理工作的技术人员。

目 录

第一章 概论.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 气体定律.....	2
1.3 基本定义.....	6
第二章 房间湿度测量方法.....	14
2.1 干湿球湿度计方法	14
2.2 吸湿法	21
2.3 电测法	24
2.4 测量空气湿度仪表的标定和校正	37
第三章 决定空调房间空气温度和湿度调节必要性 的因素.....	55
3.1 湿度和温度对人体感觉的影响.....	55
3.2 空调房间的空气参数.....	60
第四章 用自动调节理论方法分析空调系统.....	71
4.1 空调设备自动调节系统的一般特点.....	71
4.2 空调设备及作为调节对象的房间.....	75
4.3 调节系统基本动态特性.....	78
4.4 利用频率特性法分析空调设备各部件的动态特性.....	92
第五章 湿度调节系统的元件.....	125
5.1 调节方式.....	125
5.2 调节装置的作用原理.....	125
5.3 调节器型式和调节系统结构的选择.....	146
5.4 调节装置单元.....	149
第六章 完全空调装置的调节系统.....	168

6.1 空气的各种处理过程及其分类.....	168
6.2 房间完全空调装置调节系统的基本类型.....	188
6.3 空气调节装置的集中监控系统.....	210
第七章 专用装置的湿度调节.....	223
7.1 气候小室.....	223
7.2 干燥设备的湿度调节.....	225
7.3 冷藏技术的湿度调节.....	227
7.4 防止金属表面出现水蒸汽冷凝.....	235
第八章 居住及公共建筑中干燥及加湿空气的.....	
专用装置.....	238
8.1 分离式空气调节设备与房间用干燥器及加湿器.....	238
8.2 利用固体和液体吸湿剂的干燥装置.....	249
8.3 冷藏技术使用的加湿器.....	261
附 录 关于1985年“水分与湿度”国际会议论文	
集综述	263
参考文献.....	285

第一章 概 论

1.1 前 言

湿度是气体和水蒸汽混合物的物理参数；湿度计量是该混合物中含有水蒸汽的分量。测量空气湿度的仪表称为湿度计（来源于希腊文*hygros*—湿的，潮的）。其中有一种仪表从词的来源上不同，称为干湿球湿度计，它是来源于希腊文*psychros*，即冷的，凉的，把冷却现象作为湿球温度计的先决条件。

湿空气是干空气和水蒸汽的混合物，空气中含有水蒸汽的量从干空气的零到饱和状态的极大值之间变化。早在十五世纪末至十六世纪初就有人试图确定空气中水蒸汽含量的变化。在1500年，列奥纳多·达·芬奇（Леонардо）制成了第一个湿度计。它是由棉或毛制成的球体，当它吸收了空气中的水分时，就改变了自身的质量，球体挂在天秤上，其差值就表示周围空气的湿度。十八世纪末，索秀尔（Сосьюр）制成了第一台完善的毛发湿度计，其形式一直沿用到今天。相对湿度概念1800年出现在吉利别尔塔（Гильберта）著作“年鉴（Ан-валы）”的第四册中，其中写道：“如果我们只利用绝对含湿量这个概念来谈论有关空气的干度，我们就无法确定这种（空气干度）状态。这里应引入空气的水蒸汽相对含量或空气饱和度的概念”。尽管湿度测量有这样悠久的历史，而在

研究空气处理问题中只是在十九世纪末才开始采用它，这时开始引入加湿过程。从此在空气调节中出现了新的参数即空气湿度。

1.2 气 体 定 律

如果密度为 ρ_w ，温度为 T 的液相或固相的水处在密闭容器 V 中，水就产生蒸发，这是由于分子运动，使水分子渗透为气相的缘故。同时还有水分子被液相所吸收。由于这两个过程的结果就在恒定的容积内建立了液相（或固相—冰）—气相的动态平衡。平衡状态只决定于温度值 T 。在冰或水表面上建立的水蒸汽压力，即为饱和蒸汽压力 P_w^* 。

如果体积 V 中冰或水的质量在温度 T 时全部蒸发还不足以达到饱和压力，这就是过热水蒸汽。在这种情况下，被干气体吸收的水质量小于最大可能值，即过热水蒸汽的分压力 P_w 小于 P_w^* 。

道尔顿（Дальтон）关于气体混合物定律确立了混合物压力 and 该混合物各组成部分分压力之间的关系。如果湿空气（饱和或未饱和状态下）处于标准大气压力下则可以将道尔顿定律应用于它，误差不大。

由于空气和水蒸汽组成的混合物处于温度为 T 的一定密闭体积 V 内，按道尔顿定律，混合物压力 P 等于分压力之和：

$$P = P_w + P_g \quad (1-1)$$

式中 P ——全压，Pa；

P_g ——干空气压力，Pa；

P_w ——水蒸汽压力，Pa。

理想气体的气体定律确定了气体压力，体积和温度之间的关系。根据这一定律，由 n_g mol干空气在温度 T 、压力 P_g 下的体积 V 可以表示为下式关系

$$V = \frac{n_g R T}{P_g} \quad (1-2)$$

式中 V —— 体积, m^3 ;

n_g —— 干空气克分子量, mol ;

T —— 温度, K ;

R —— 理想气体普适气体常数 ($R = 8.3143 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$)。

在该同一体积 V 中同时还有相同温度 T 而分压力为 P_w 的 n_w mol水蒸汽, 即:

$$V = \frac{n_w R T}{P_w} \quad (1-3)$$

体积 V 也可以表示为气体混合物克分子总量 ($n_g + n_w$) 和该混合物全压的比例关系。按照道尔顿定律:

$$V = \frac{n_g R T}{P_g} = \frac{n_w R T}{P_w} = \frac{(n_w + n_g) R T}{P} \quad (1-4)$$

从式(1-4)得到混合物组成部分分压力 P_w 和 P_g 之间的关系, 其组成部分的 mol 数 N

干空气为

$$N_g = \frac{n_g}{n_g + n_w}; \quad P_g = N_g P \quad (1-5)$$

水蒸汽为

$$N_w = \frac{n_w}{n_g + n_w}; \quad P_w = N_w P \quad (1-6)$$

在一定体积 V 和温度 T 时干气体要达到饱和压力 P_w'' 相对应的饱和状态, 只能吸收一定的最大质量的水蒸汽。如果

$$N_w^* = \frac{n_w^*}{n_g + n_w^*} \quad (1-7a)$$

是湿空气中饱和水蒸汽的mol数，则饱和蒸汽分压力可用下式表示：

$$P_w^* = N_w^* P \quad (1-7b)$$

由式(1-7b)可知，当大气压力为 10^5Pa ，温度低于 100°C 时，除了饱和水蒸汽以外还有其他气体组成部分，如干空气。

如在水表面上还有第二种气体，则在充有两种气体的空间里，水蒸汽浓度和压力将会增高。在任意温度下增高值可表示为该压力下有第二种气体时的水蒸汽浓度与纯相水蒸汽浓度的比值。此值称为该气体中水蒸汽挥发度，可表示为：

$$f = \frac{N_w''}{N_w^*} \quad (1-8)$$

式中 N_w'' ——湿气体中水蒸汽mol数（在压力 P 和温度 T 条件下），

N_w^* ——在压力 P 和温度 T 纯水（或冰）水表面上饱和水蒸汽mol数。

但是，通常情况下采用下式：

$$f = N_w'' \rightarrow \frac{P}{P_w} = \frac{P_w''}{P_w^*} \quad (1-9)$$

如果在任意温度下，第二种气体浓度值降低为零，则气体中水蒸汽挥发度值趋向于1。

温度 25°C 压力 10^5Pa 时，由于气体状态偏离理想状态而引起空气中水蒸汽浓度增大0.5%，而在压力为 10^6Pa 时就达到3.2%。

为了计算气体中水蒸汽浓度，在用不同单位表示的计算

湿度的公式中，在湿度计对比标准湿度校正计算中以及在气象或空调的精确计算中，引入了湿空气中水蒸汽挥发度值。空气中低气压范围内的水蒸汽挥发度值如图 1 所示。

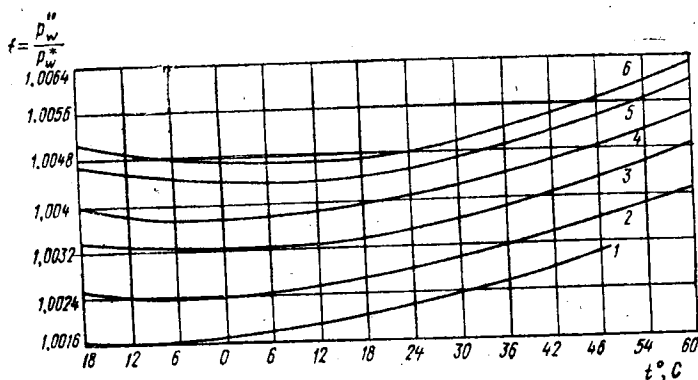


图 1 在温度 -18 至 60°C 和绝对压力 (kPa) 范围内湿空气中水蒸汽挥发度

实际气体状态方程式可以用分解成幂级数的状态系数的形式来表示。

相对于摩尔体积:

$$\frac{PV}{RT} = 1 + \frac{B_{\text{mix}}}{V} + \frac{C_{\text{mix}}}{V^2} + \dots \quad (1-10)$$

或相对于压力

$$\frac{PV}{RT} = 1 + B_{\text{mix}} \frac{P}{RT} + (C_{\text{mix}} - B_{\text{mix}}^2) \left(\frac{P}{RT} \right)^2 + \dots \quad (1-11)$$

式中 P —— 绝对压力;

V —— 混合物摩尔体积;

B_{mix} ——混合物的二次状态系数；

C_{mix} ——混合物的三次状态系数。

状态系数仅与温度有关，如已知气体中分子间作用势能，则采用统计力学定律，状态方程式是可解的。二次状态系数表示两分子相互作用，三次状态系数表示三分子相互作用等。

水蒸汽、干空气以及湿空气的状态系数值见湿度测量专门文献。

1.3 基本定义

绝对湿度 单位湿空气体积中含有的水量称为绝对湿度

$$H = \frac{m_w}{V} \quad (1-12)$$

式中 m_w ——湿空气中含有水蒸汽质量，g；

V ——湿空气体积， m^3 。

绝对湿度也即水蒸汽密度 $H = \rho_w$ 。

按照理想气体定律，可以把温度为 T 的空气绝对湿度表示为温度为 T 的水蒸汽分压力 P_w 的关系：

$$H = \frac{m_w}{V} = \frac{P_w}{R_w T} \quad (1-13)$$

同样，混合物在饱和状态下的绝对湿度 H'' 表示为

$$H'' = \frac{m_w'}{V} = \frac{P_w'}{R_w T} \quad (1-14)$$

式中 m_w' ——体积 V 中含有的饱和水蒸汽质量。

含湿量 在空气处理技术上为了确定湿空气状态，经常采用单位含湿量 d 。含湿量就是在单位质量干空气中含有的

水蒸汽质量。

$$d = \frac{\rho_w}{\rho_g} = \frac{m_w}{m_g} \quad (1-15)$$

式中 m_w ——体积 V 中水蒸汽质量, g;

m_g ——体积 V 中干空气质量, kg;

ρ_w ——水蒸汽密度 ($\rho_w = m_w/V$), g/m³;

ρ_g ——干空气密度 ($\rho_g = m_g/V$), kg/m³。

含湿量和绝对湿度的关系可用下式表示

$$d = \frac{m_w}{V} \frac{V}{m_g} = nH \frac{R_g T}{P - P_w} \quad (1-16)$$

式中 n ——系数 (如 d 为 g/kg, $n = 10^3$, 如 d 为 kg/kg, $n = 1$)。

混合物中含湿量可以通过乘有各自 mol 数的水和空气的 mol 数的比值来表示

$$d = \frac{m_w}{m_g} \frac{n_w}{n_g} \quad (1-17)$$

按式 (1-5), (1-6) 将 n_w/n_g 关系式代入后, 并考虑道尔顿定律 (1-1), 可得

$$d = n \frac{m_w}{m_g} \frac{P_w}{P - P_w} = 0.622n \frac{P_w}{P - P_w} \quad (1-18)$$

式中 n ——系数与公式 (1-16) 中系数相同。

对饱和状态的湿空气, 则含湿量的公式为

$$d = 0.622n \frac{P_w^s}{P - P_w^s} \quad (1-19)$$

为了表征极小含湿量值采用 ppm (百万分之一, 即 $1 \cdot 10^6$) 或百万分之分数的单位。

ppm 质量单位定义为

$$1 \text{ ppm}_M = \frac{1 \text{ g 水}}{10^6 \text{ g 干空气}}$$

可以表示为下式

$$\text{ppm}_M = n' x \quad (1-20)$$

式中 n' ——系数, d 为 g/kg 时 $n' = 10^3$, d 为 kg/kg 时 $n' = 10^6$

以 ppm_M 表示的与湿度有关的数据, 可以表示为确定的压力、温度参数, 它可用与式(1-16)算式相等效的关系来说明。

$$\text{ppm}_M = 10^6 H \frac{R_g T}{P - P_w} \quad \text{kg/kg} \quad (1-21)$$

ppm_M 值与气体种类有关, 因此式(1-21)引入 R_g 值。

空气中水蒸汽体积百分数 下式是以干空气体积计算的水蒸汽百分数的值

$$\text{vol} \% = \frac{V_w}{V_g} 100 \% = \frac{P_w}{P_g} 100 \%$$

式中 V_w ——水蒸汽体积;

V_g ——干空气体积。

实际上, 为了计算水蒸汽体积百分数采用单位 $\text{ppm}_{\text{vol}} = 10^{-6} \text{ vol} \%$

单位 ppm_{vol} 定义为下式:

$$1 \text{ ppm}_{\text{vol}} = \frac{1 \text{ cm}^3 \text{ 水蒸汽}}{1 \text{ m}^3 \text{ 干空气}} = \frac{1 \text{ cm}^3 \text{ 水蒸汽}}{10^6 \text{ cm}^3 \text{ 干空气}}$$

采用下式可把 ppm_{vol} 换算到 ppm_M

$$1 \text{ ppm}_{\text{vol}} = \frac{R_w}{R_g} 1 \text{ ppm}_M \quad (1-22)$$

从式(1-16), (1-20), (1-22) 可得到 ppm_{vol} 和绝对湿度 H 之间的关系。

$$1\text{ppm}_{\text{vol}} = 10^6 H \frac{R_w T}{P - P_w} \quad (1-23)$$

ppm_{vol} 单位的优点在于它和气体种类无关。这个单位用来确定低湿度空气。

露点温度 湿空气的热力学上的露点温度 t^* 定义为这样的温度，就是在此温度下，处于纯水或冰的表面空间的绝对恒定压力为 P 的湿气体变为饱和状态。也就是气体含湿量等于饱和状态的含湿量的温度。

在一定的湿空气的露点温度下，利用专门图表可以确定空气中水蒸汽压力。根据该露点温度测量值利用式 (1-18) 可确定含湿量 d 。应当把对应于热力学上露点温度状态的饱和水蒸汽分压力值 $P_w^*(t^*)$ ，代替式中小蒸汽分压力值 P_w 。(按理想气体考虑的) 空气含湿量为

$$d = 0.622n \frac{f_{(P, t^*)} P_w^*(t^*)}{P - f_{(P, t^*)} P_w^*(t^*)} \quad (1-24)$$

式中 $f_{(P, t^*)}$ ，——在恒定压力 P 下，水蒸汽由于冷却而达到饱和状态时水蒸汽空气混合物中水蒸汽挥发度；

$P_w^*(t^*)$ ，——在热力学露点温度 t^* 下饱和蒸汽压力。

如果不精确计算，系数 f 可不考虑，在式 (1-18) 中代入与露点温度对应的值 P_w^*

$$d = 0.622n \frac{P_w^*}{P - P_w^*} \quad (1-25)$$

图2表示了水蒸汽体积部分 ppm_{vol} 和含湿量 ppm_{wt} 单位与露点温度的关系。用使气体冷却达到饱和状态的方法并观察由气体充满的空间开始出现雾状或者受到气体作用的冷却表面上开始结露时的温度即为对应于气体中每一种含湿量的