

907753

空气调节工程

Air Conditioning Engineering

[英] W.P.Jones 著

谭天祐 译
梁凤珍

中国建筑工业出版社



空气调节工程

[英] W.P.Jones 著

谭天祐 梁凤珍 译

中国建筑工业出版社

本书系英国W.P. Jones所著名著,原书自1967年至今已修订三版,印刷八次,十分畅销。本书根据1985年的第三版译出,在本版中对舒适条件、太阳得热、自动控制、制冷设备等章节都作了重要补充和修改,因而充分反映了当前空调技术的状况以及本领域的最新成就。

全书叙述系统而简明,深入浅出,用大量例题来加深对问题的理解,并有大量习题供思考和复习,这是英国教科书的一种独有的特点,可作为我国学习本课程的大专院校学生学习参考书用,也可供有关工程技术人员自学与参考。

Air Conditioning Engineering

3rd ed.

W.P. Jones

Edward Arnold 1985

* * *

空气调节工程

谭天祐 梁凤珍 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 1/16 印张: 22¹/₄ 字数: 537千字
1989年4月第一版 1989年4月第一次印刷
印数: 1—4,910册 定价: 13.00元

ISBN 7—112—00582—5/TU·412
(5739)

译 者 的 话

随着人们对生活和生产环境的要求日益提高，空调技术也引起了各国的重视并得到巨大的发展。W. P. Jones《空气调节工程》一书，第一次出版于1967年，1969年重印，1973年出第二版，并于1975、1977、1980及1982年重印，现在所译为该书第三版，出版于1985年。在这段时间内，由于空调技术的发展，作者在每次再版时都根据新近的研究成果作了大量补充和改写。例如在第三版中，对舒适条件、太阳得热、自动控制、制冷设备等章节都作了重要的修改。因而现在的版本内容丰富，能够充分反映当前空调技术的状况，以及在此领域中的新成就。

本书是作者给英国南岸工业大学学生讲课的讲稿，并作为英国采暖通风工程师协会（IHVE）会员资格考试的主要参考书。为适应这方面需要，作者对空调技术的基本原理，作了深入浅出，精练的阐述，同时以大量的例题帮助读者消化所述的内容。每章后面还附有大量习题，以启发读者思考，从而加深对空调基本内容的理解和运用。因而本书是一本较好的空调工程教学用书，也是对想要学习空调技术读者的良好参考书。

本书中采用的英国CIBS焓湿图，和我国目前习惯采用的焓湿图有所不同，但二者的基本原理和方法是相同的。并不难于掌握，因而翻译中并未加以改换。由于未找到CIBS焓湿图，所以只好在附录中选附了英国IHVE的焓湿图以作参考。本书可作为大专院校学生和有关工程技术人员的参考书。

由于我们水平有限，译文中的错误在所难免，请广大读者批评指正。

译 者

1988. 6.

目 录

| | |
|-------------------------|----|
| 第一章 空气调节的必要性..... | 1 |
| 1.1 空气调节的含意..... | 1 |
| 1.2 舒适空调..... | 1 |
| 1.3 工业空调..... | 2 |
| 第二章 空气及水蒸汽混合物的基本特性..... | 3 |
| 2.1 理论基础..... | 3 |
| 2.2 干空气的组成..... | 3 |
| 2.3 标准状态..... | 4 |
| 2.4 波义尔定律..... | 5 |
| 2.5 查理定律..... | 6 |
| 2.6 通用气体定律..... | 7 |
| 2.7 道尔顿分压力定律..... | 8 |
| 2.8 饱和水蒸汽压力..... | 9 |
| 2.9 湿空气中的水蒸汽压力..... | 11 |
| 2.10 相对湿度..... | 13 |
| 2.11 含湿量及湿度比..... | 14 |
| 2.12 饱和率..... | 15 |
| 2.13 露点温度..... | 16 |
| 2.14 比容..... | 17 |
| 2.15 焓：热力学背景..... | 18 |
| 2.16 实际中的焓..... | 18 |
| 2.17 湿球温度..... | 19 |
| 2.18 绝热饱和温度..... | 21 |
| 2.19 非理想情况..... | 22 |
| 2.20 三相点..... | 25 |
| 第三章 空调过程的焓湿学..... | 28 |
| 3.1 焓湿图..... | 28 |
| 3.2 混合..... | 29 |
| 3.3 显热与显冷..... | 31 |
| 3.4 去湿..... | 32 |
| 3.5 加湿..... | 35 |
| 3.6 喷水..... | 37 |
| 3.7 喷蒸汽..... | 39 |
| 3.8 具有再热的冷却和去湿..... | 41 |
| 3.9 具有再热的预热和加湿..... | 45 |
| 3.10 具有再热的混合和绝热饱和..... | 48 |

| | |
|------------------|-----|
| 3.11 过饱和 | 49 |
| 第四章 舒适感及室内设计条件 | 52 |
| 4.1 新陈代谢与舒适感 | 52 |
| 4.2 人体传热及体温控制的机理 | 52 |
| 4.3 新陈代谢率 | 54 |
| 4.4 衣着 | 54 |
| 4.5 环境对舒适的影响 | 56 |
| 4.6 对舒适感的其他影响 | 58 |
| 4.7 Fanger舒适方程式 | 58 |
| 4.8 综合舒适温标 | 60 |
| 4.9 测量仪器 | 61 |
| 4.10 环境的新鲜度 | 62 |
| 4.11 室内设计条件的选择 | 62 |
| 第五章 气候与室外设计条件 | 66 |
| 5.1 气候 | 66 |
| 5.2 风 | 67 |
| 5.3 局部风 | 67 |
| 5.4 露水的形成 | 68 |
| 5.5 雾 | 69 |
| 5.6 雨 | 70 |
| 5.7 温度的日变化 | 71 |
| 5.8 湿度的日变化 | 72 |
| 5.9 气象测量 | 73 |
| 5.10 室外温湿度的季节性变化 | 75 |
| 5.11 室外设计条件的选择 | 77 |
| 第六章 送风设计条件的选择 | 80 |
| 6.1 显热的排除 | 80 |
| 6.2 湿空气的比热 | 82 |
| 6.3 潜热的排除 | 83 |
| 6.4 房间热湿比线的斜率 | 85 |
| 6.5 来自风机功率的得热 | 88 |
| 6.6 无用的再热 | 89 |
| 6.7 合适送风状态的选定 | 92 |
| 第七章 来自太阳和其他热源的得热 | 96 |
| 7.1 得热的组成 | 96 |
| 7.2 太阳辐射的物理学 | 96 |
| 7.3 天空辐射 | 97 |
| 7.4 定义 | 98 |
| 7.5 太阳赤纬角 | 99 |
| 7.6 太阳高度角 | 101 |
| 7.7 太阳方位角 | 102 |

| | | |
|------------|-------------------|------------|
| 7.8 | 表面上的直射辐射强度 | 103 |
| 7.9 | 直射辐射的数值 | 105 |
| 7.10 | 外部遮挡 | 106 |
| 7.11 | 阴影几何学 | 107 |
| 7.12 | 通过玻璃传递的太阳辐射 | 109 |
| 7.13 | 玻璃的吸热 | 110 |
| 7.14 | 内遮阳与双层玻璃 | 110 |
| 7.15 | 散射辐射的数据 | 113 |
| 7.16 | 影响太阳得热的次要因素 | 114 |
| 7.17 | 通过墙体的得热 | 121 |
| 7.18 | 太阳-空气综合温度 | 123 |
| 7.19 | 通过墙体得热量的计算 | 124 |
| 7.20 | 透过玻璃的太阳得热造成的空调负荷 | 128 |
| 7.21 | 风管的传热 | 135 |
| 7.22 | 空气渗透 | 137 |
| 7.23 | 电灯照明 | 139 |
| 7.24 | 人群 | 140 |
| 7.25 | 电动机散逸的功率 | 141 |
| 第八章 | 冷负荷 | 146 |
| 8.1 | 冷负荷与得热 | 146 |
| 8.2 | 部分负荷 | 148 |
| 8.3 | 再热补偿冷负荷 | 150 |
| 8.4 | 旁通风的应用 | 152 |
| 8.5 | 迎面阀及旁通阀 | 155 |
| 8.6 | 冷却和后续加热系统 | 156 |
| 8.7 | 热区-冷区系统 | 157 |
| 8.8 | 双风管供冷负荷 | 157 |
| 8.9 | 空气-水系统的负荷 | 158 |
| 8.10 | 负荷的多样化 | 159 |
| 8.11 | 负荷图 | 159 |
| 第九章 | 蒸汽压缩制冷基础 | 164 |
| 9.1 | 基本概念 | 164 |
| 9.2 | 温度、压力、热量及流量 | 165 |
| 9.3 | 性能系数 | 168 |
| 9.4 | 压力-容积关系 | 171 |
| 9.5 | 制冷剂 | 174 |
| 第十章 | 冷却盘管和空气喷淋室 | 178 |
| 10.1 | 冷却盘管与空气喷淋室的区别 | 178 |
| 10.2 | 冷却盘管的结构 | 179 |
| 10.3 | 顺流及逆流 | 180 |
| 10.4 | 接触系数 | 181 |

| | | |
|------------------------|------------------|------------|
| 10.5 | 冷却盘管的U值 | 184 |
| 10.6 | 显冷 | 187 |
| 10.7 | 部分负荷运行 | 190 |
| 10.8 | “野”盘管的性能 | 191 |
| 10.9 | 喷淋式冷却盘管 | 192 |
| 10.10 | 自由供冷 | 193 |
| 10.11 | 直接蒸发盘管 | 195 |
| 10.12 | 空气喷淋室 | 195 |
| 第十一章 冷凝器和冷却塔的散热 | | 200 |
| 11.1 | 散热的方法 | 200 |
| 11.2 | 冷却塔的形式 | 201 |
| 11.3 | 理论上的考虑 | 202 |
| 11.4 | 蒸发式冷凝器 | 203 |
| 11.5 | 风冷式冷凝器 | 204 |
| 11.6 | 自动控制 | 204 |
| 11.7 | 实际上的考虑 | 205 |
| 第十二章 制冷设备 | | 208 |
| 12.1 | 膨胀阀 | 208 |
| 12.2 | 分液器 | 209 |
| 12.3 | 浮球阀 | 210 |
| 12.4 | 液体冷却蒸发器 | 210 |
| 12.5 | 直接蒸发式空气冷却盘管 | 212 |
| 12.6 | 往复式压缩机 | 213 |
| 12.7 | 风冷冷凝装置 | 215 |
| 12.8 | 冷凝装置-蒸发器的匹配 | 215 |
| 12.9 | 直接蒸发冷却盘管及冷凝装置的控制 | 216 |
| 12.10 | 冷水机组的性能 | 218 |
| 12.11 | 冷凝器 | 221 |
| 12.12 | 配管与贮液器 | 222 |
| 12.13 | 系统充液 | 222 |
| 12.14 | 离心式压缩机 | 223 |
| 12.15 | 螺杆式压缩机 | 226 |
| 第十三章 自动控制 | | 227 |
| 13.1 | 自动控制的原理 | 227 |
| 13.2 | 定义 | 228 |
| 13.3 | 测量与滞后 | 229 |
| 13.4 | 测量元件 | 230 |
| 13.5 | 系统的型式 | 231 |
| 13.6 | 控制方法 | 233 |
| 13.7 | 简单的双位控制 | 234 |
| 13.8 | 时间双位控制 | 234 |

| | | |
|--------------------------|----------------------|------------|
| 13.9 | 浮动控制 | 234 |
| 13.10 | 简单的比例控制 | 236 |
| 13.11 | 精确的比例控制 | 237 |
| 13.12 | 自动阀 | 238 |
| 13.13 | 自动蝶阀 | 244 |
| 13.14 | 应用 | 245 |
| 13.15 | 射流学 | 247 |
| 13.16 | 微处理机控制 | 248 |
| 第十四章 蒸汽吸收式制冷 | | 250 |
| 14.1 | 基本概念 | 250 |
| 14.2 | 溴化锂-水循环中的温度、压力、热量及流量 | 251 |
| 14.3 | 性能系数及循环效率 | 253 |
| 14.4 | 实际应用 | 254 |
| 14.5 | 其他吸收式系统 | 255 |
| 第十五章 风管中气体流动的基本规律 | | 257 |
| 15.1 | 粘性流及紊流 | 257 |
| 15.2 | 风管尺寸的基本计算方法 | 259 |
| 15.3 | 管网系统中的能量平衡 | 261 |
| 15.4 | 能量变化的基本概念 | 262 |
| 15.5 | 速度压(动压) | 263 |
| 15.6 | 吸入口的空气流动 | 263 |
| 15.7 | 入口系数(C_E) | 264 |
| 15.8 | 风管系统的排气口 | 265 |
| 15.9 | 简单风管系统中的空气流动 | 266 |
| 15.10 | 通过突然扩大管段的空气流动 | 267 |
| 15.11 | 通过渐扩管段的空气流动 | 267 |
| 15.12 | 通过突然收缩管段的空气流动 | 269 |
| 15.13 | 通过渐缩管段的空气流动 | 269 |
| 15.14 | 通过弯头的空气流动 | 270 |
| 15.15 | 通过送风支管的空气流动 | 273 |
| 15.16 | 通过吸风支管的空气流动 | 273 |
| 15.17 | 圆形断面换算成矩形断面 | 274 |
| 15.18 | 风机全压及风机静压的计算 | 275 |
| 15.19 | 风机特性及系统特性的相互关系 | 280 |
| 15.20 | 风机定律 | 282 |
| 15.21 | 功率-风量及效率-风量特性曲线 | 283 |
| 15.22 | 风管系统中改变风机风量的方法 | 285 |
| 15.23 | 开关支风管阀门的影响 | 288 |
| 15.24 | 风机并联与串联 | 290 |
| 第十六章 高速及其它系统 | | 294 |
| 16.1 | 发展概况 | 294 |

| | | |
|-------------|-----------------|-----------------|
| 16.2 | 周边诱导系统 | 294 |
| 16.3 | 转换与非转换系统 | 296 |
| 16.4 | 诱导系统的焓湿学 | 299 |
| 16.5 | 诱导系统的水管布置 | 301 |
| 16.6 | 诱导系统的风管布置 | 303 |
| 16.7 | 风机盘管系统 | 305 |
| 16.8 | 冷顶棚 | 306 |
| 16.9 | 单风管系统 | 308 |
| 16.10 | 双风管系统 | 308 |
| 16.11 | 冷风管空气量的计算 | 309 |
| 16.12 | 热风管空气量及温度的计算 | 310 |
| 16.13 | 双风管系统的类型 | 312 |
| 16.14 | 水环式热泵 | 313 |
| 16.15 | 变风量系统 | 313 |
| 16.16 | 建筑物热平衡的设计 | 315 |
| 16.17 | 壳与核系统 | 319 |
| 第十七章 | 通风与衰减方程式 | 321 |
| 17.1 | 通风的必要性 | 321 |
| 17.2 | 衰减方程式 | 323 |
| 17.3 | 衰减方程式用于焓的变化 | 328 |
| 第十八章 | 过滤 | 333 |
| 18.1 | 粒子大小 | 333 |
| 18.2 | 粒子的性能及捕集 | 334 |
| 18.3 | 效率 | 335 |
| 18.4 | 按效率的分类 | 338 |
| 18.5 | 油过滤器 | 339 |
| 18.6 | 干式过滤器 | 339 |
| 18.7 | 电过滤器 | 340 |
| 18.8 | 湿式过滤器 | 34 ² |
| 18.9 | 离心式除尘器 | 342 |
| 18.10 | 吸附式过滤器 | 342 |
| 附录 | IHVE焓湿图 | 344 |

第一章 空气调节的必要性

1.1 空气调节的含意

全面空气调节的含意,是指为人类或为动物的舒适,或者为保证某些工艺过程和科研过程的良好条件而需要的大气环境自动控制。形容词“全面”就是要求所控制的空气清洁度、流动速度、温度及相对湿度处于设计所规定的范围内(对于某些场合,有可能还要求控制环境中的空气压力)。空气调节这一名词经常被滥用,例如用它来表示一简单的通风系统,这是不精密的甚至是错误的。只有当除其它的目的外,还预定有冷却和去湿作用时,才能真正正确地称为空气调节。这意味着,空气调节经常与制冷联系在一起,从而也是造成空调造价高的原因。制冷设备属于精密制造的机械,它是空调设备中造价的主要组成部分,因此,建筑物空气调节的造价大约是仅有采暖的造价的四倍。相对湿度并不经常需要进行全面控制,由于这一原因,出现了相当众多的部分空气调节,它们之所以仍然称之为空气调节,是因为它包含了制冷设备,从而可以进行冷却和去湿。

这样一来,消除显热及潜热的能力是空气调节系统的基本特征,并且在通常的应用中,“空气调节”这一名词,意味着包括制冷的含意。

1.2 舒适空调

人类生活于一种不利的环境中,但是不利的程度将因每年的各个季节及地理位置而不同。这样我们就可以假定,设置空气调节的理由完全是基于气候的考虑,虽然这些理由在热带地区及亚热带地区是正确的,但随着社会结构的工业化及生活标准的提高,对于温带地区设置空调却不完全是因为气候的原因。

简言之,由于下述理由必需设置空气调节。由太阳光及电力照明会产生得热量,如果不开窗,这些得热能引起室内不适的高温,如果开窗,则甚至在中等风速下也会产生过大的抽力,这对于高层建筑物上部各楼层是不利的。其次,打开窗户时,建筑物下部各楼层的噪声很大,灰尘也将侵入室内,造成不良影响,特别是市区和工业区更为严重。在任何情况下,自然通风通过开窗所造成的换气,仅在离窗户深约6 m范围内才有效。由此可以看出,开窗对高层建筑的内部区域并不真正能得到好处。同时考虑到这些中心区域需要功率大的连续电力照明,缺乏适当的通风就意味着将对居住者造成许多不适。不带制冷的机械通风只能局部解决问题。的确这种方式提供了一种使气流能以控制和均匀分布的方法,以代替由于开窗所得的不良结果(风及烟囱效应会产生断续的自然通风,同样,这对高层建筑更为明显),但是这只在冬季才能克服那些不适的室内气温。对于春季、秋季以及夏季的大多数时间内,室内气温将比室外气温高几度,为了增强机械通风的效果就需要开窗。

舒适空调系统的设计要求,为在夏季具有显热得热,而在冬季具有显热损失的情况下,全年为人们提供舒适的环境。夏季可能需要去湿,但是冬天到来时空调房间的相对湿度可以允许低一些。为什么允许这样,有两个理由:第一,人们感到舒适的湿度有一个相当大的范围(从约60%到约20%);第二,如果冬季湿度要求太高,则在单层玻璃窗的内表面上会出现凝结水。

因此,这种空调系统的技术条件,例如可规定为:在室外夏季干球温度 28°C ,湿球温度 20°C 的情况下,能够保证室内干球温度 22°C ,饱和度50%,而在室外状态为 -2°C 全饱和时,室内干球温度下降到 20°C (相当湿度无要求)。

舒适空调的基本特点是它的目的在于创造一种绝大多数居住者感到舒适的环境。绝对舒适是从来也达不到的,但是单独房间采用独立的自动控制,可大大有助于满足大多数人的要求。

1.3 工业空调

工业空调的情况是千差万别的。一个工艺过程和科研过程,只有当它在温度及湿度处于严格确定的极限范围内的环境中进行时,才可能顺利地完。偏离这些极限,就可能破坏所进行的工作。由此可以看出,选择室内的设计条件不是基于人们主观感觉的统计调查,而是基于工艺所要求的明确规定的状态。

因此,这种空调系统的技术条件,例如可以规定为:在室外状态处于干球温度 29.5°C 、湿球温度 21°C ,到干球温度 -4°C 全饱和之间时,能够保持室内干球温度 $21^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$,饱和度 $50\% \pm 2.5\%$ 。

第二章 空气及水蒸汽混合物的基本特性

2.1 理论基础

学习焓湿学的学生最初遇到的主要问题可能是：所研究的工作流体是两种不同气态物质的混合物，其中之一（干空气）它的本身就是数种气体的混合物，而另一种（水蒸汽）是饱和状态或过热状态下的蒸汽。理解这一事实是很重要的，因为在简单的分析中，人们将理想气体定律分别应用于这两种物质的每一种，正好像它们并没有与另一种混合一样。这样作的目的是要建立能用简单的方式表达空气及水蒸汽混合物物理特性的方程式。这就是说，这些方程式能够求解，并且利用这些解能制成焓湿参数表或焓湿图。

道尔顿的分压力定律已经证实了用这种简单的处理方法分别考虑空气和水蒸汽的正确性，并且在考虑每种物理特性时首先要给出它的定义。

必须承认理想气体定律并不非常准确，特别在高压下更是如此。虽然应用这些定律可以得到过去认为足够准确的答案，但是不能给出气体状态的真实情况，因为它忽略了分子间的力的作用。最近的焓湿参数表（CIBS1970）是建立在更为完善的处理方法的基础上，这将在2.19节中加以讨论。但是，理想气体定律仍然可用于确定非标准大气压下的焓湿数据，这在实际上是足够准确的。

2.2 干空气的组成

干空气是五种主要气体与其它许多微量气体共同组成的混合物。完全有根据把所有这些气体当作为一种单一气态物质，而将其中的水蒸汽单独对待，因为水蒸汽在常压和常温下可能会冷凝，而相应的干气体则不会冷凝。

区别气体与水蒸汽的方法之一，是水蒸汽仅在压力变化的情况下就能够液化，而干气体则除非其温度降低到某一临界值以下，否则是不可能液化的。每种气体都有其各自的临界温度，氮及氧（干空气的主要组成成分）的临界温度远低于空气调节中所涉及的温度。另一方面水蒸汽的临界温度（ 374.2°C ）则远高于空调中的温度，因此，与大气中干空气混合的水蒸汽，当其压力增加时，就可以从气态改变为液态，而不需降低其温度。这时，干空气当然仍为气态。

图2.1(a)及2.1(b)说明了这种情况。图上分别表示干空气及水蒸汽的压力-体积图。图2.1(a)中的A点代表 21°C 时干空气的状态。由此可以看出，无论压力增加到多少，都不可能使空气通过其液相区，但是当其温度降低到 -130°C （即刚好低于临界等温线 t_c 值）时，则仅增加其压力，即使温度不变也可能迫使空气通过液相区。

第二个图（图2.1(b)）表示蒸汽的类似情况。这里，S点代表与上述干空气所考虑的

相同温度(21°C)时的水蒸汽。显然,大气中的干空气与水蒸汽,由于它们是完全混合的,其温度自然都相同,但是可以看出,蒸汽是过热的,它远低于其临界温度,因此仅增加其压力就足以使其液化。

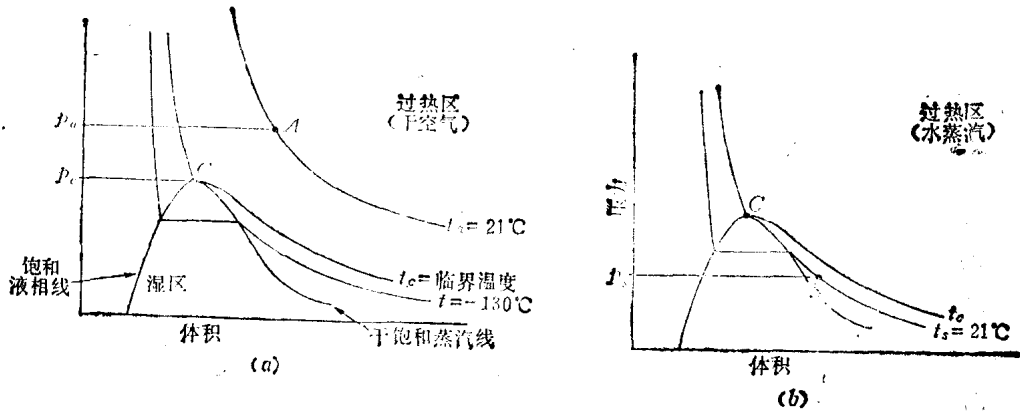


图 2.1 干空气及水蒸汽的压力-体积图

t_a —空气温度, 21°C; t_s —水蒸汽温度, 21°C

其次,大气中的干空气可以看作是数种实际气体的组合,这些气体按下表比例混合,以形成工作流体的主要部分:

| 气 体 | 比 例 (%) | 分 子 量 |
|------|---------|-------|
| 氮 | 78.03 | 28.02 |
| 氧 | 20.99 | 32.00 |
| 二氧化碳 | 0.03 | 44.00 |
| 氢 | 0.01 | 2.02 |
| 氩 | 0.94 | 39.91 |

根据上表,可以计算出干空气的平均分子量:

$$M = 28.02 \times 0.7803 + 32 \times 0.2099 + 44 \times 0.0003 + 2.02 \times 0.0001 + 39.9 \times 0.0094 = 28.97$$

正像下面即将看到的那样,这是在应用通用气体定律时,确定干空气中特定气体常数时要用到的。同样还必须了解水蒸汽的特定气体常数,为此也需要计算水蒸汽的平均分子量。

由于水蒸汽不是各种独立物质的混合物,它本身就是一种化学化合物,因而不能采用上述比例的方法,而是需要按化学方程式将各组成元素的质量相加:

$$M = 2 \times 1.01 + 1 \times 16 = 18.02$$

2.3 标准状态

一般来说,这里所采用的标准状态,就是CIBS^①在“现行实用手册”(Guide to Cur-

①The Chartered Institution of Building Services (CIBS) 注册建筑业研究所

rent Practice)中所采用的标准。其中主要的数据有:

空气密度: 1.293kgm^{-3} (101325Pa及 0°C 时的干空气);

水的密度: 1000kgm^{-3} (4°C)及

998.23kgm^{-3} (20°C);

大气压: 101325Pa (1013.25mbar)

标准状态下的温度及压力分别为 0°C 及101325Pa, 重力取为 9.807Nkg^{-1} (准确值为 9.80665Nkg^{-1})。气象学中通常用mbar表示压力, 这里 $1\text{mbar} = 100\text{Pa}$ 。

2.4 波义尔定律

波义尔定律可表述为: 对实际气体, 在温度不变时压力与体积的乘积为常数。
于是可写出下列方程式:

$$pV = \text{const} \quad (2.1)$$

此方程式在图上可表示成一组等轴双曲线, 其中每条曲线都表明在给定温度下气体的压力和体积是如何变化的。气体特性的这一概念是由早期的试验得出的, 并且为随后的理论研究证实。这一理论被称之为气体运动理论, 其基础是将气体当作为一群球形分子, 而这些分子是完全弹性体并作随机运动。此外, 还有一些其它假设, 其目的是要简化问题的处理方式。考虑到运动分子的动能是气体含能量的尺度, 以及考虑到分子碰撞到盛气体的器壁上的动量变化即表示气体的压力, 于是可以得出与波义尔定律相同的方程式。

然而, 即使采用简单的波义尔定律, 它也不能代表实际气体的行为。因此, 当人们谈及气体, 都假设其为像理想气体一样服从于波义尔定律。还有其他几个简单的定律, 如查理定律、道尔顿分压力定律、阿佛加德罗定律、焦耳定律及盖·吕萨克定律等, 这些定律并不是绝对真实的, 但已经得到广泛采用。所有这些定律都称为理想气体定律。

为了准确表示气体的性能, 曾经作过一些努力。看来目前已经清楚, 不可能用一简单的代数式表示温度不变情况下压力与体积的变化。目前, 优于波义尔定律又能给出最准确结果的方程式, 其形式为一无限收敛级数:

$$pV = A \left(1 + B/V + C/V^2 + D/V^3 + \dots \right) \quad (2.2)$$

常数A、B、C、D……称为维里系数, 在不同温度下, 其数值也各不相同。

有时, 更习惯于用稍为不同的形式来表示上述级数:

$$pV = A' + B'p + C'p^2 + D'p^3 + \dots \quad (2.3)$$

压力很低时, 方程式右端的第二项及以后各项都很小, 因而该式便变成与波义尔定律相同的方程式。可见, 如果压力足够小, 则采用波义尔定律, 不会产生明显误差。

第二个维里系数B是很重要的。已经发现, 对于给定的气体, B值由温度很低时的负值, 变为温度很高时的正值, 其中通过零点。B为零时的温度称为波义尔温度, 在这一温度下, 即使到很高的压力, 该气体也还都服从于波义尔定律。氮(大气中的主要成分)的波义尔温度大约为 50°C 。看来, 在这一温度下, 在压力约高达1.9MPa时, 气体仍服从于波义尔

定律的，其精度在0.1%以内。另一方面，0°C时，即使压力在0.2MPa以下，与波义尔定律的偏差仍为0.1%。

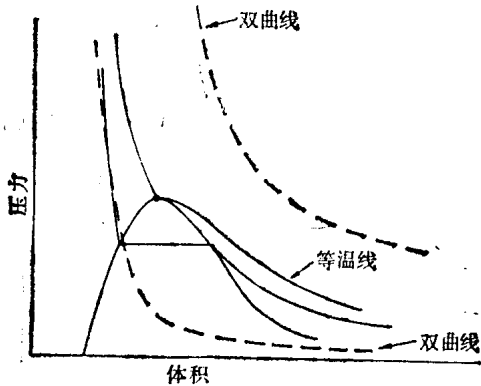


图 2.2 波义尔定律及气体的实际性能

由此可以得出结论，在很多情况下采用波义尔定律表示空调工程师所关心的大气的物理特性是合理的。

图2.2是以最通常的方法表示为此目的采用的波义尔定律的意义。由图上可以看出，当压力低时波义尔定律为双曲线，其形状类似于表示气体实际性能的曲线。同样如果考查过热区内的状态，则似乎仍然保持曲线的相似性。然而，可以认为，在饱和干蒸汽曲线附近以及在湿区内，其性能并不是理想气体的性能。

2.5 查理定律

显然从波义尔定律可以得出，对于给定的气体， pV 的乘积可用作为该气体的温度指示，事实上，这也就是温标的基础。可以证明，对于理想气体，压力不变时，体积与温度成线性关系。试验结果证实了此种情况，图2.3表明这是如何进行的。假定实验结果允许在A及B两点间作一直线，并作为体积与温度的关系。如果将该直线延长到与横坐标相交于P点，其温度为 -273.15°C ，显然，将坐标系的原点向左移 273.15°C ，则可得出一一直线方程式，其形式为：

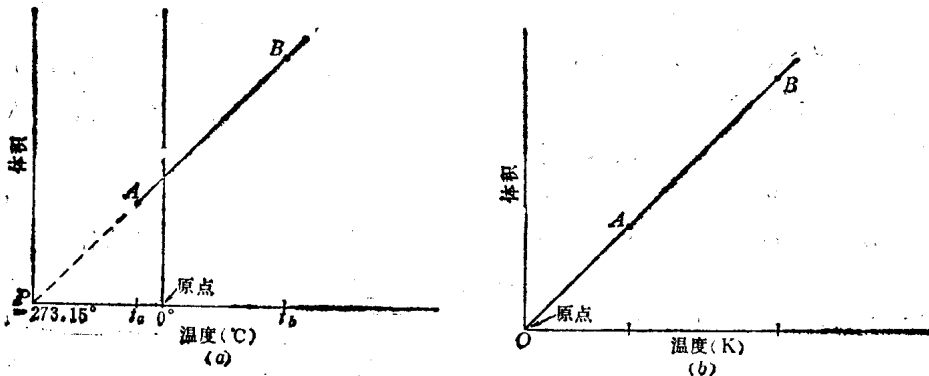


图 2.3 查理定理及绝对温度

$$V = \alpha T \quad (2.4)$$

式中 T ——新坐标系上的温度，
 α ——表示直线斜率的常数。

显然
$$T = 273.15^{\circ} + t \quad (2.5)$$

表示查理定律的图表明，气体的体积与其温度之间存在正比关系（如同在新横坐标系中所示）。该图同样表明，采用新的温标是可行的。这一新温标即为绝对温标，它之所以称为绝对温标，是因为可以证明所有的分子在其零点处停止运动。因而气体的内能为零，从而它的温度就是绝对零度。绝对温度用开尔文表示，单位为K，用符号T代替t，以区别于摄氏温标的相对温度。

【例2.1】

温度为27°C的15m³s⁻¹的空气，通过一冷却盘管，温度降至13°C。然后用风机将该空气送至一加热器，将其温度提高到18°C，最后送入室内。

试计算风机的送风量及送入室内的空气量。

【解】

根据查理定律：

$$V = \alpha T$$

这就是说：

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1}$$

因此，风机的送风量为：

$$15 \frac{(273 + 13)}{(273 + 27)}$$

$$= 14.3 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$$

送入室内的空气量为：

$$15 \frac{(273 + 18)}{(273 + 27)}$$

$$= 14.55 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$$

人们进一步发现，当温度降到绝对零度以下，仍假设气体的体积与温度成正比是明显错误的，因为在达到此温度前，气体就已经液化了。

2.6 通用气体定律

波义尔定律与查理定理可以合并为一个方程式：

$$pV = mRT \tag{2.6}$$

式中 p ——气体压力，Pa；

V ——气体体积，m³；

m ——气体质量，kg；

R ——比例常数；

T ——气体的绝对温度，K。

阿佛加德罗假说表明，在温度和压力相同的条件下，不同气体在同体积中所包含的分子数均相同，根据这一假说并取质量的单位为kmol，则以kg表示的质量，其数值上等于气体的分子量，由此可确定普适气体常数；