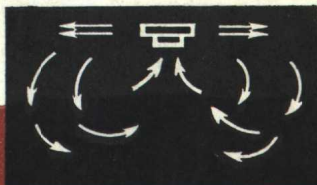


KONGTIAO SHEJICHU



[苏联] IO·II·西道洛夫著
吴礼本 李建坤译

空调

设计基础

中国铁道出版社

空 调 设 计 基 础

〔苏联〕 IO·II·西道洛夫著

· 吴 礼 本 译
· 李 建 坤

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 8 2 年 · 北 京

内 容 提 要

本书系统地论述了湿空气的热力学性质及其计算参数的选择方法和热湿处理的方法，列出了工业厂房和机车车辆空气调节的原理图，提供了空调系统各部件的设计计算方法，并附有例题。

本书原为苏联铁路运输高等院校教科书，可供从事空调系统设计 and 运用的工程技术人员及有关院校师生学习参考。

Основы кондиционирования воздуха на предприятиях железнодорожного транспорта и в подвижном составе

Ю. П. Сидоров
Москва. «транспорт» 1978

空调设计基础

(苏联) Ю. П. 西道洛夫著

吴礼本、李建坤 译

中国铁道出版社出版

责任编辑 林连照

封面设计 王毓平

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：7.25 字数：164千

1982年1月第1版 1982年1月第1次印刷

印数：0001—8,000册 定价：0.75元

目 录

前 言	1
第一章 空气的热力学性质	3
一、表示空气状态的主要参数	3
二、湿空气的I-d图	9
三、在I-d图上空气状态变化的描绘	13
四、空气状态变化的典型情况	15
五、在I-d图上空气的混合过程	16
六、空气湿度的测定	18
第二章 室内外空气的计算参数	26
七、空气的热物理状态对人体的影响	26
八、环境冷却能力的计算方法	28
九、生活和生产房屋内的空气参数	35
十、外界空气的计算参数	38
十一、机车车辆空调装置的计算空气 参数的选择特点	38
第三章 热湿平衡和换气量的确定	42
十二、房间的热平衡	42
十三、室内进湿量	53
十四、室内有害气体排泄量	57
十五、经过客车车体隔热壁进热量的计算特点	58
十六、热湿平衡和有害气体平衡之间的相互关系	62
十七、热湿平衡的分析和必需的换气量	65
十八、外气量的计算	68
第四章 空气除尘、除臭的方法和设备	70
十九、灰尘的物理化学性质	70
二十、除尘装置及其分类	71
二十一、除尘器	73
二十二、过滤器	75
二十三、空气的净化、除臭、臭氧处理和 电离化处理	80
第五章 空调系统中空气热湿处理的方法	83

二十四、空气热湿处理的基本原理	83
二十五、空气的加热	87
二十六、空气的加湿	96
二十七、空气的冷却	112
二十八、空气的干燥	121
第六章 工业用空调系统	130
二十九、空调系统的分类	130
三十、集中式单区空调系统	131
三十一、集中式多区空调系统	138
三十二、高压空调系统的特点	143
三十三、分散式空调系统	145
第七章 机车车辆用空调系统	149
三十四、客车空调系统的主要方式	149
三十五、机车司机室内所采用的空调系统	156
第八章 保证舒适条件的设备	153
三十六、房间内的送风方式	158
三十七、保证局部舒适条件的方法	165
三十八、客车和机车的送风方式	167
三十九、风道计算的基本概念	170
第九章 空调系统的供冷	173
四十、冷源	173
四十一、蒸气压缩式制冷装置	178
四十二、用热造冷的制冷装置	181
四十三、工业和运输空调系统中的供冷方式	185
四十四、空调系统中的热泵	137
第十章 空调系统的计算方法	190
四十五、工业企业空调系统的计算	190
四十六、客车空调系统的计算	206
附 录	211
附录 1 饱和空气的物理性质	211
附录 2 干空气的物理参数	212
附录 3 建筑材料的导热系数计算值	213
附录 4 I-d图	215
附录 5 本书主要符号表	217
参考文献	226

前 言

空气调节装置是用在公共场所、工业厂房、住宅以及客车和机车中使之创造和保持人工气候（主要是空气的温度、湿度、洁净度和流动性）的装置。

为了满足规定的卫生要求，在房间内采用舒适性空调系统。而为了工艺性的需要，则采用生产性空调系统。生产性空调系统用以保证实验室内所需要的空气温、湿度，材料的恒定含湿量，化学过程的规定流程，抛光表面不凝聚水分等。舒适性空调系统在公共文化体育活动场所、疗养院、休养所、设计室以及其它各种厂房，特别是在没有天窗和窗户的建筑物内，都是不可缺少的设备。

最近，空调系统在铁路运输中得到了更为广泛的应用。

德意志民主共和国和匈牙利为苏联制造的客车以及苏联自己制造的客车都装有空调系统。近几年来空调系统还安装在内燃机车和电力机车的驾驶室内。

在50年代末和60年代初，空调系统就已得到广泛的应用。因为在那个时候已掌握了供风量为 $10,000\sim 60,000$ 米³/小时的集中式空调器和供风量为 $500\sim 3,500$ 米³/小时的分散式空调器的生产技术，而由于集中式空调器零部件的批量生产，设计部门就有可能在空调系统中采用标准设备。同时随着需要生产性和舒适性空调系统的大型企业建筑物的不断增加，要求空调装置的品种也不断增加。

“空气调节”这个术语在技术文献中出现得较晚。这个术语首次使用是在20世纪初期。当时在测定和调节纺织品的

湿度中，把含湿量用“调节”这个词来表达，随后又把这个词扩大到使室内保持所需要的空气湿度而采用的方法上。

但是，从1908年起已经把“调节”这个词理解为不仅是湿度调节，而且是包括空气的冷却、加热、净化和干燥的全部过程。空气调节主要是在室内造成具有预先给定的一种恒定的或随时间而变动的空气参数的环境。这一任务由通风、采暖、制冷和干燥系统来分担。譬如，采暖系统必须使室内保持一定的温度（室温 t_B > 外温 t_H ），因此整个采暖系统是按在已知计算温差（ $\Delta t = t_B - t_H$ ）下为补偿室内热损耗而计算确定的。实际上，外温不断变化，而室内可能有附加热源。因此，为保持室温 t_B 不变，必须不断地改变采暖系统的工况。对于干燥间和制冷间，保持空气的恒定湿度具有很大的意义。在某些情况下，在空气环境中还需要一定的气体成分。

显然，用手动控制来保持2、3个空气参数是很困难的，因此必须采用自动控制仪表。

基于上述情况，空调装置已有以下全新的含义：

第一，它能在经济工况下工作。因为这种装置可以保证室内空气有预先给定的成分和状态，并保持它们不变。如果采暖时室内空气温度超过给定温度 t_B ，那么在这种情况下采暖系统的工作便被认为是不经济的。

第二，它能保证空气温度和湿度恒定。在许多情况下这是顺利实现一定工艺过程的必要条件。

第三，它可以使室内创造和保持一种与外界环境无关的气候。

空调概念不仅意味着室内空气温湿度恒定，而且也包括空气的一定流动性。此外，空调装置在必要时能消除气味和使空气电离。

第一章 空气的热力学性质

一、表示空气状态的主要参数

干空气和水蒸气的混合物称为湿空气（简称空气）。由氧、氮、二氧化碳和惰性气体组成的大气总是含有少量的水蒸气的。大气中的干空气的成分示于表 1 中。

表 1

成 分	化 学 式	含 量 (%)	
		重量含量	容积含量
氮	N ₂	75.55	78.13
氧	O ₂	23.1	20.9
氩、氖、氦、氢等	Ar, Ne, He, H ₂	1.3	0.94
二氧化碳	CO ₂	0.05	0.03

在计算时把湿空气视作理想气体的混合物误差不大。混合气体中的每一种气体（包括水蒸气在内）具有与在整个混合气体中相同的容积 V 。它们的温度与混合气体温度 T 一样，但具有各自的分压力，后者按克拉贝龙方程式确定

$$p_i = \frac{M_i RT}{V \mu_i} = \frac{\nu_i}{V} RT = \frac{M_i R_i T}{V} \quad (1)$$

式中 ν_i —— 混合气体中第 i 种气体的摩尔数，其值为：

$$\nu_i = \frac{M_i}{\mu_i},$$

M_i —— 第 i 种气体的质量（公斤）；

T ——混合气体的温度 (K)；

μ_i ——第 i 种气体的摩尔质量 (公斤/摩尔)；

R ——通用气体常数；

R_i ——第 i 种气体的气体常数；

V ——气体容积 (米³)。

通用气体常数的计量单位根据压力和容积的测量单位而定。如果容积为米³，压力为公斤力/米²，那么 $R = 0.848$ 公斤·厘米/度·克·摩尔；如果压力单位为毫米水银柱，则 $R = 0.06237$ 毫米水银柱·米³/度·克·摩尔。

在国际单位制中，压力用牛顿/米²来表示，通用气体常数 $R = 8.314$ 焦耳/摩尔·度。在绝对单位制中 $R = 8.314 \times 10^7$ 尔格/摩尔·度。

气体质量 M_i 与混合气体体积 V 之比称为该气体在混合气中的浓度 ω_i ，或称为分密度 ρ_i 。

根据道尔顿定律，混合气各气体的分压力之和等于混合气的总压力，即

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum p_i \quad (2)$$

可以很近似地把空气看作是由水蒸气和一种换算的单一气体（即其分子量 $\mu_B \approx 29$ 的干空气）组成的两元混合物。

此时，空气的压力可视为干空气和水蒸气分压力之和，即

$$p_s = p_B + p_H \quad (3)$$

由于空气和过热水蒸气组成的混合气称为未饱和空气，而由于空气和饱和水蒸气组成的混合气称为饱和空气。

1. 空气的相对湿度

空气的相对湿度是未饱和空气的水蒸气浓度与在同样温度和压力下饱和空气的水蒸气浓度之比值，即

$$\varphi' = \frac{\omega_{\Pi}}{\omega_{\Pi H}} \quad (4)$$

式中 ω_{Π} , $\omega_{\Pi H}$ ——分别为未饱和及饱和空气的水蒸气浓度 (公斤/米³)。

显然, 饱和空气的相对湿度等于 1, 而干空气的相对湿度等于零。

空气的相对湿度也可用水蒸气分压力的比值来表示。

利用公式 (1) 可以得到

$$\frac{\omega_{\Pi}}{\omega_{\Pi H}} = \frac{P_{\Pi}}{P_{\Pi H}}$$

因此

$$\varphi' = \frac{P_{\Pi}}{P_{\Pi H}} \quad (5)$$

式中 P_{Π} , $P_{\Pi H}$ ——分别表示未饱和及饱和空气中水蒸气的分压力。

相对湿度值常用百分比表示, 即

$$\varphi = \varphi' \times 100\%$$

饱和水蒸气的压力只是温度的函数, 可从有关图表中查出。它也可近似地按 M·И·弗里涅公式 [10] 计算, 计算结果与表列数据非常吻合。弗里涅公式形式如下:

$$\lg p_{\Pi H} = \frac{156 + 8.12t_H}{236 + t_H} \quad (6)$$

2. 空气的含湿量

空气的含湿量是水蒸气的质量 (克) 与混合气体中干空气的质量 (公斤) 之比, 即

$$d = \frac{M_{\Pi}}{M_B} \quad (7)$$

如果这两个质量都用公斤来表示, 则含湿量用字母 x 表示。因此, x 与 d 之间有以下关系:

$$x = \frac{d}{1000} \quad (8)$$

如果用公式(1)写出水蒸气和干空气的分压力,那么含湿量可用以下形式表示:

$$x = 0.622 \frac{\varphi' p_{\text{PH}}}{p_s - \varphi' p_{\text{PH}}} \quad (8a)$$

或

$$d = 622 \frac{\varphi' p_{\text{PH}}}{p_s - \varphi' p_{\text{PH}}} \quad (8b)$$

从所得到的含湿量计算公式中可以看出,含湿量与空气的表压力成比例关系,并且是水蒸气分压力的函数。

为了确定未饱和空气的分容积,可以从下式导出 V :

$$(p_{\text{H}} + p_{\text{B}}) \cdot V = (M_{\text{H}} \cdot R_{\text{H}} + M_{\text{B}} \cdot R_{\text{B}}) T \quad (9)$$

考虑到干空气的质量 M_{B} ,则每公斤干空气的分容积为

$$v = \frac{V}{M_{\text{B}}} = (x + 0.622) \frac{R_{\text{H}} \cdot T}{p} \quad (10)$$

将所得到的每公斤干空气的分容积除以 $(1+x)$ 公斤,则得混合气的单位分容积(我国习惯上称为比容——译者注)

$$v_{\text{CM}} = (x + 0.622) \frac{R_{\text{H}} \cdot T}{(1+x)p} \quad (11)$$

3. 空气的密度

空气的密度是空气的质量和容积之比,即

$$\rho_{\text{CM}} = \frac{M}{V} \quad (12)$$

考虑到 M 值是干空气和水蒸气质量之和,公式(12)可以写成

$$\rho_{\text{CM}} = \omega_{\text{B}} + \omega_{\text{H}} \quad (13)$$

利用公式(8)和(13),可以写成

$$\rho_{CM} = \omega_B \left(1 + \frac{d}{1000} \right) \quad (14)$$

干空气的浓度等于其密度，因为这时 $d = 0$ 。

气体的密度与压力成正比，与温度成反比。因此，混合气中干空气的浓度可以认为是在分压力 P_B 作用下的干空气密度，即

$$\omega_B = \rho_{B_0} \cdot \frac{P_B}{P_{60}} \cdot \frac{273}{T} \quad (15)$$

式中 ρ_{B_0} —— 在 $t = 0^\circ\text{C}$ 和 $P_{60} = 760$ 毫米水银柱下的干空气密度。

P_{60} —— 标准状态下的空气压力，其值为 760 毫米水银柱（译者注）。

根据公式 (15)、(14) 和 (8) 可以把湿空气的密度用下式表示：

$$\rho_{CM} = \rho_{B_0} \cdot \frac{273}{T} \cdot \left[\frac{P_6}{760} - \left(1 - \frac{\mu_{II}}{\mu_B} \right) \frac{P_{II}}{760} \right]$$

或

$$\rho_{CM} = 1.293 \cdot \frac{273}{T} \cdot \left(\frac{P_6}{760} - 0.378 \frac{P_{II}}{760} \right) \quad (16)$$

因为水蒸气的分子重量比空气的分子重量小，所以，由上式可看出，湿空气总比干空气轻。如果某种气体的分子重量比空气的分子重量大，那么，由这种气体和空气构成的混合气就比干空气重。这一点是在计算工业空调的供风系统时必须考虑的问题。

至于温度对密度的影响，则上述两种情况都是相同的。

4. 空气的比热

湿空气的比热和含湿量一样，也是与干空气的质量单位作对比的，

$$c_{CM} = c_B + c_{\Pi} \frac{d}{1000} \quad (17)$$

式中 c_B ——干空气的平均比热 [在 $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内 $c_B = 1.003$ 千焦耳/(公斤·度)]；

c_{Π} ——水蒸气的平均比热 [$c_{\Pi} = 1.8$ 千焦耳/(公斤·度)]。

5. 空气的焓

湿空气的焓也是与单位干空气的质量作对比的。

$$\text{干空气的焓为} \quad I_B = c_B t \quad (18)$$

$$\text{饱和蒸气的焓为} \quad I_{H\Pi} = c_{\text{ж}} t_H + r \quad (19)$$

式中 $c_{\text{ж}}$ ——水的比热 [千焦耳/(公斤·度)]；

r ——水的单位蒸发潜热 (千焦耳/公斤)；

t_H ——饱和空气温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

r 值与饱和温度有关，它可由 M·И·弗里涅所提出的经验公式来确定

$$r = 2500 - 2.38 t_H \quad (20)$$

根据上式和 $c_{\text{ж}} = 4.187$ 千焦耳/(公斤·度)，可得出饱和水蒸气的焓值为

$$I_{H\Pi} = 2500 + 1.807 t_H \quad (21)$$

在温度为 t 的湿空气中所含有的过热水蒸气的焓为

$$I_{\Pi\Pi} = I_{H\Pi} + c_{\Pi}(t - t_H) \approx 2500 + 1.807 t \quad (22)$$

因此，根据公式 (18) 和 (22) 可得湿空气的焓为

$$\begin{aligned} I_{CM} &= c_B t + I_{\Pi\Pi} \frac{d}{1000} \\ &= 1.005 t + (2500 + 1.807 t) \frac{d}{1000} \quad (23) \end{aligned}$$

考虑到 $c_{CM} = 1.005 + 1.8 \times \frac{d}{1000}$ ，则湿空气的焓值可

以写成下列形式：

$$I_{CM} = c_{CM}t + 2500 \times \frac{d}{1000} \quad (24)$$

相应于工程单位制，比热 $c_{CM} = 0.24 + 0.43 \times \frac{d}{1000}$ 千卡/（公斤干空气·度），那么，湿空气的焓值为

$$I_{CM} = c_{CM}t + 597.4 \times \frac{d}{1000} \quad (24a)$$

关系式 (23) 只是在空气含湿量 d 等于或者小于在同一温度下的饱和空气含湿量 d_H ，即 $d \leq d_H$ 时才是正确的。如果空气中含有液体珠滴状态的雾，即 $d > d_H$ ，则必须附加液态水的焓值。在这种情况下，可以使用如下的关系式：

$$I_{CM} = c_{BT} + I_{HH} \frac{d_H}{1000} + \left(\frac{d - d_H}{1000} \right) c_{HT} \quad (25)$$

式中 c_{HT} ——水的比热。

如果空气中含有结晶冰，还必须在式中再加入融解热 $L_{HH} = 79.7$ 千卡/公斤 = 333 千焦耳/公斤以及冰的比热 $c_{HT} = 0.5$ 千卡/（公斤·度）= 2.095 千焦耳/（公斤·度）。

由于 0°C 的液态水的焓值等于零，所以冰的焓值为负值。这时，带有结晶冰雾滴的空气焓值为

$$I_{CM} = c_{BT} + I_{HH} \frac{d_H}{1000} - \left(\frac{d - d_H}{1000} \right) (L_{HH} - c_{HT}t) \quad (26)$$

二、湿空气的 I-d 图

在确定与湿空气状态有关的干燥、空调和其它的一些计算中，I-d 图得到广泛的应用。这种图表示在一定的压力下空气主要参数 (t, φ, p_H, d, I) 之间的图线关系。1918 年 H·K·拉姆金教授首次绘制了 I-d 图，其两坐标轴 (I 和 d) 之间的夹角 $\alpha = 135^\circ$ (图 1)。在辅助轴 $0d_1$ 上，每一格表示含湿量相差 1 克，通过这些格点引出垂直线 ($d = \text{常数}$)。

沿纵坐标，每一格表示焓值 I 相差 1 千卡/公斤干空气，

或1千焦耳/公斤干空气，0点代表湿空气温度 $t=0^{\circ}\text{C}$ 和含湿量 $d=0$ ，0点以上代表正焓值，0点以下代表负焓值。通过这些格点画出与 $d=\text{常数}$ 线呈 135° 夹角的等焓线，这些等焓线与主轴 $0d$ 平行。在这些格线上再画出等温线和等相对湿度线。

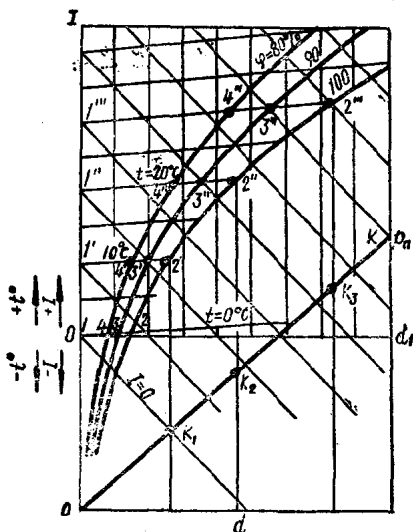


图1 湿空气的I-d图

如果取 $t = \text{常数}$ ，公式(23)即为直线方程式。由此表明，等温线在图域中是一条直线。为了画出等温线，必须确定表示湿空气两个极限状态的两个点。例如要画出 $t = 0^{\circ}\text{C}$ 的等温线，可选取这样两个点：1) $\varphi = 0\%$ 和2) $\varphi = 100\%$ 。

在第一种情况下，当 $t_1 = 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\varphi_1 = 0\%$ 时，含湿量 $d_1 = 0$ ，按公式(20)得 $I_1 = 0$ 。因此，这个点位于坐标原点上(命名为点1——译者)。

当 $\varphi_2 = 100\%$ 时，用公式(6)和(8)可得到相应的含湿量 d_2 ，并用公式(23)可求得相应的焓值 I_2 (由 I_2 和 d_2 所

决定的点为点 z ——译者)。通过 1 、 z 点画出的直线即为 $t = 0^\circ\text{C}$ 的等温线。

用类似的方法可画出任意的等温线。例如 $t = 10^\circ\text{C}$ 的等温线。

在 $t = 10^\circ\text{C}$ 和 $\varphi = 100\%$ 时，用公式 (6) 或按表 30 (见附录 1) 可得到在饱和时的分压力 $P_{\text{HH}} = 9.21$ 毫米水银柱。

用公式 (8) 求得 $d = 7.63$ 克/公斤干空气。

按公式 (23) 可得到相应的 I 值为

$$I = 29.35 \text{ 千焦耳/公斤干空气}$$

当 $t = 10^\circ\text{C}$ 和 $\varphi = 0\%$ 时， $d = 0$ 和 $I = 1.005 \times 10 = 10.05$ 千焦耳/公斤干空气。

根据所得到的 I 和 d 值，在图上找出点 $1'$ 和点 z' ，通过这两点画出直线，即为 $t = 10^\circ\text{C}$ 的等温线。

因此，在 I - d 图上可以画出一组等温线。

在用图时应注意，等温线之间并不平行，特别是在高温区域内更为明显。在画等温线时， z 、 z' 、 z'' 等点表示饱和线 $\varphi_2 = 100\%$ 的空气状态，将这些点连接成一平滑的曲线，就得到 $\varphi_2 = 100\%$ 的等相对湿度线。位于这条曲线以上的区域适应于水蒸气未饱和的空气。

为了画出 $\varphi_3 = 90\%$ 、 $\varphi_4 = 80\%$ 等等的相对湿度曲线，应按公式 (8) 确定相应的含湿量 d_3 、 d_4 等等，这些数值都是适应于不同温度下的空气相对湿度值。

与给定的相对湿度和温度相适应的等温线和等含湿量线的交点应该位于给定的相对湿度的曲线上。

将这样所得到的点连接成平滑的曲线，就可以得到各种相对湿度的曲线。

为了在 I - d 图上画出湿空气的等分容积线，需要使用公式 (11)。将不同的温度和含湿量值代入公式后求解，最后

可得到具有相等分容积值的几何位置点。将这些点连起来，即可得到等分容积线。

为了画出分压力线，从 I-d 图右面与纵坐标平行的线上画出分压力的刻度，从 $p_{H} = 0$ 一直到在该图范围内的最大可能值 p_{H}^{*} 。例如，在所使用的 I-d 图范围内，最大可能的饱和温度 t_H 等于某一数值 t_H^{*} ，那么最大的蒸气分压力值 p_{H}^{*} 应适应这一温度。刻度比例应该这样选取，即使 p_H 线不与曲线 $\varphi = 100\%$ 相交。在通过 $\varphi = 100\%$ 的曲线和 $t =$ 常数的等温线交点的垂直线上，按所选取的比例画出线段 OK_1 ， OK_2 等，使其等于在相对应温度值下饱和空气内水蒸气分压力的数值，将 O, K_1, K_2 等连成一平滑的线，此即为所求的水蒸气分压力曲线。

这样就把图作成了。借助于 I-d 图，根据任意两个已知的空气参数，就可以求出其余的参数。

假设已知参数为 $t = 20^\circ\text{C}$ 和 $\varphi = 50\%$ 。这个点是在 I-d 图上 $t = 20^\circ\text{C}$ 等温线与 $\varphi = 50\%$ 的等相对湿度曲线的交点（见附录 4 的图）。

由该点沿 $d =$ 常数的线向下，在横坐标轴上得到相应的值 $d = 7.4$ 克/公斤干空气。因为 $t = 20^\circ\text{C}$ ， $\varphi = 50\%$ 两线交点在等焓线 $I_1 = 30$ 和 $I_2 = 40$ 千焦耳/公斤干空气之间，所以为了确定焓值，必须测量相邻两条等焓线之间的距离和该点到一条等焓线间的距离。找出线段比例后，即可得到 $t = 20^\circ\text{C}$ 和 $\varphi = 50\%$ 两线交点的空气焓值。在上面研究的例题中，该点的焓值 $I = 39$ 千焦耳/公斤干空气。分压力值是从所研究的点沿等分压力线 ($p_H =$ 常数) 找到横坐标轴上加以确定。按所选定的比例 $p = 12$ 毫巴。

最后还应指出，许多国家广泛采用 1923 年发表的 P·莫利亚编制的 I-d 图。它与 П·К·拉姆金教授不同之处在于纵坐