



空气调节过程的设计

Г. А. 馬克西莫夫著

西安冶金学院专家办公室译

本书是苏联采暖通风专家、技术科学博士 Г. А. 馬克西莫夫教授在西安冶金学院为教师及研究生等讲课的讲稿。

本书系统地阐述了空气调节的原理、计算及设计方法等问题,着重从基本原理上分析了在设计中经常遇到的困难问题。书中较详细地讨论比较了空调系统及自动控制装置的各种设计方案,此外,对使用经营管理也给予了很大的注意。书中并有计算例题。

本书可供高等工业学校供热供煤气及通风专业的教师和学生、以及设计工作者、科学研究工作者等参考。

本书由西安冶金学院专家工作室于良燊、譚天祐等同志翻译校对。

空气调节过程的设计

Г. А. 馬克西莫夫著

西安冶金学院专家办公室译

高等教育出版社出版 北京宣武门内大街26号

(北京市书刊出版业营业许可出字第054号)

京华印书局印装 新华书店发行

统一书号 15·10 787 开本 850×1168 1/32 印张 3 插页 1
字数 68,000 印数 0001—4,000 定价(7) ¥0.46

1959年5月第1版 1959年5月第1次印刷

目 录

前言

1. 空气的物理性质.....	1
2. 湿空气图表.....	6
3. 用 $i-d$ 图繪制湿空气状态之改变过程	12
4. 空气与水之間的热交換	18
5. 空气与水温低于 100° 之水接触过程的可能形式.....	24
6. 空气与水接触之实际过程	32
7. 多級噴霧室	43
8. 用热水喷射空气(空气之湿式加热)	47
9. 关于水与空气接触时水之噴散性質的一般概念	48
10. 新蒸汽加湿空气	49
11. 过热水加湿空气	50
12. 空气的干式加热及干式冷却	51
13. 吸附法进行空气干燥	54
14. 空气联合处理过程	58
15. 空气調节的任务及計算气象条件	61
16. 自动装置簡要說明	65
17. 最簡單的空气調节設備配置及調节系統	68
18. 全面調节噴霧室的配置	72
19. 空气处理过程設計的举例	75

1. 空气的物理性质

为了设计改变空气状态的装置，必须对空气的物理性质具有清晰的概念。

空气的化学组成部分按体积的百分比为：

氮	78.8;
氧	20.7;
二氧化碳	0.03;
水蒸汽	0.47(不固定);
臭氧、氙	小于 1;
氢、氦、氩、氖	微量。

若从上述成分内除去水蒸汽，则组成部分的其他合成物即可称为：“干空气”。水蒸汽与干空气的混合物称为湿空气。每 1 立方公尺湿空气中所含的水蒸汽量(公斤)称为“绝对湿度”。

在与通风技术有关的温度及压力范围内可以认为波义耳-马略特及盖吕萨克定律是正确的，根据这一定律，对 1 公斤的气体可用下列关系表示：

$$PV = RT. \quad (1)$$

式中：P——绝对压力(公斤/平方公尺)；

V——每公斤气体的体积(立方公尺)；

T——绝对温度($T = t + 273$)；

R——气体常数。

若气体为混合气体，则上述方程式也适用于混合气体的各个组成部分。例如由两种不同气体组成的混合气体的各组成部分的状态方程式为：

$$P_1 \cdot V_{\text{cm}} = g_1 \cdot R_1 T; \quad (2a)$$

$$P_2 \cdot V_{\text{cm}} = g_2 \cdot R_2 T. \quad (26)$$

式中: g_1 及 g_2 ——混合气体中第一种和第二种成分所占的重量;

R_1 及 R_2 ——各成分的气体常数;

V_{cm} ——每公斤混合物所占的体积;

P_1 及 P_2 ——混合气体各成分的分压力。

根据道尔顿定律, 该气体的分压力与其他气体之存在无关, 即其分压力值为其单独占据混合气体所占之整个体积时的压力。

方程式(2a)及(26)相加可得:

$$(P_1 + P_2) \cdot V_{\text{cm}} = (g_1 R_1 + g_2 R_2) T. \quad (3)$$

因气体之压力是用水银气压计测定, 故用公厘水银柱表示更较方便, 且以字母 h 代表之。

这时 P 与 h 之间有下列关系:

$$10333 \text{ 公斤/平方公尺} = 760 \text{ 公厘水银柱},$$

$$\text{故} \quad h = \frac{760}{10333} P = 0.07355 P. \quad (4)$$

干空气之气体常数为 $R_a = 29.27$, 而水蒸汽为 $R_v = 47.06$ 。下面我们来研究由 1 公斤空气和 x 公斤水蒸汽组成之混合物, 这时方程式(2a)及(26)可用下列形式表示:

对于空气:

$$\frac{h_a}{0.07356} \cdot V_{1+x} = 29.27 \times 1 \times T; \quad (5a)$$

对蒸汽:

$$\frac{h_v}{0.07356} \cdot V_{1+x} = 47.06 \times x \times T. \quad (56)$$

在这些方程式中, V_{1+x} 表示 1 公斤干空气和 x 公斤水蒸汽的混合物所占之体积。

方程式(5a)及(5b)整理后可采用下列形式:

$$h_n \cdot V_{1+x} = 2.153 T; \quad (6a)$$

$$h_n \cdot V_{1+x} = 3.461 x T. \quad (6b)$$

若用 B 表示公厘水銀柱之表压力, 則

$$B = h_n + h_{nn}. \quad (7)$$

將 $B - h_n$ 代入方程式(6a)內代替 h_n 值, 联合解方程式(6a)及(6b)可得:

$$\frac{V_{1+x}}{T} = \frac{2.153}{B - h_n} = \frac{3.461 x}{h_n}. \quad (8)$$

由此可得:

$$x = 0.622 \frac{h_n}{B - h_n}, \quad (9)$$

或
$$h_n = \frac{x \cdot B}{x + 0.622}. \quad (10)$$

在一定溫度及压力下, 1公斤干空气內的最大水蒸汽量(公斤)称为“湿容量”, 并用 x_H 表示, 这时之蒸汽分压力用 h_{nn} 表示。

1 公斤干空气內的实际水蒸汽量(公斤)(以前用 x 所表示者), 称为含湿量。

显然,
$$x_H = 0.622 \frac{h_{nn}}{B - h_{nn}}. \quad (11)$$

不同溫度及压力下之 h_{nn} 值載于專門的表中。

1 立方公尺湿空气內所含之水蒸汽的重量与該空气飽和水蒸汽的重量(即該空气中可能含有的最大水蒸汽的重量)之比称为空气之“相对湿度”, 并用 φ 表示之。

显然,

$$\varphi = \frac{\frac{x}{V_{1+x}}}{\frac{x_H}{V_{1+x_H}}} = \frac{V_{1+x_H} \cdot x}{V_{1+x} \cdot x_H}. \quad (12)$$

利用方程式(66),可写出:

$$\frac{h_n \cdot V_{1+s}}{h_{nn} \cdot V_{1+s_n}} = \frac{x}{x_n}.$$

由此可得:

$$\varphi = \frac{h_n}{h_{nn}}. \quad (13)$$

利用方程式(9),可写成下列等式:

$$\frac{x}{x_n} = \frac{0.622 \cdot h_n}{(B - h_n)} \cdot \frac{(B - h_{nn})}{0.622 h_{nn}} = \frac{h_n}{h_{nn}} \cdot \frac{B - h_{nn}}{B - h_n}.$$

因气压计之压力 B 比 h_{nn} 及 h_n 值大得多, 故在允许误差为 2—3% 时, 可认为:

$$B - h_{nn} \approx B - h_n.$$

在这种情况下:

$$\frac{x}{x_n} = \frac{h_n}{h_{nn}} = \varphi. \quad (14)$$

一般來說, 相对湿度用百分比表示较为方便, 即:

$$\varphi = \frac{x}{x_n} \cdot 100. \quad (15)$$

因此, 在许可精确度范围内, 相对湿度可理解为 1 公斤干空气中水蒸汽之重量与该空气中可能含有的最大水蒸汽量 (该空气饱和水蒸汽量) 之比 (用百分比表示)。

1 公斤干空气和 x 公斤水蒸汽的混合物由 0° 加热到温度 t 时所需的热量称为湿空气的含热量 i 。

显然,

$$i = 0.24t + x(595 + 0.46t) \text{ (千卡/公斤)}. \quad (16)$$

湿空气的含热量可能是正的, 也可能是负的。

湿空气的热容量, 亦即将 $1+x$ 公斤蒸汽空气混合物的温度提高 1°C 所必须的热量, 将等于:

$$c_{\text{в.л.в}} = \frac{0.24 + 0.46x}{1+x} \text{ (千卡/公斤} \cdot \text{度)}. \quad (17)$$

利用方程式(6a), (6b)及(7)可求出湿空气的比容。

已知: $(h_B + h_n)V_{1+x} = (2.153 + 3.461x)T$,

$$B \cdot V_{1+x} = (2.153 + 3.461x)T.$$

为了求得 1 公斤混合气体所占之体积, 亦即比容 V_0 。必须用 $(1+x)$ 公斤除等式的左右两端, 得:

$$V_0 = \frac{(2.153 + 3.461x)T}{(1+x)B}. \quad (18)$$

显然, 湿空气的容重 $\gamma_{\text{вл}}$ 等于:

$$\gamma_{\text{вл}} = \frac{1}{V_0} = \frac{(1+x)B}{(2.153 + 3.461x)T}. \quad (19)$$

公式(19), 可改变成下列形式:

$$\gamma_{\text{вл}} = \frac{(1+x)B}{(x+0.622) \cdot 3.461 T}.$$

由公式(10)得:

$$x + 0.622 = x \frac{B}{h_n},$$

将此方程式代入上式中, 可得:

$$\gamma_{\text{вл}} = \frac{(1+x)B \cdot h_n}{x \cdot B \times 3.461 T} = \frac{(1+x)h_n}{x \cdot 3.461 T} = \left(\frac{1}{x} + 1\right) \frac{h_n}{3.461 T}.$$

化简得:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{вл}} &= \left(\frac{B}{0.622 h_n} - \frac{0.378 h_n}{0.622 h_n} \right) \frac{h_n}{3.461 T} = \\ &= \frac{B}{0.622 \times 3.461 T} - \frac{0.378 h_n}{0.622 \times 3.461 T}. \end{aligned}$$

设 $h_n = \varphi h_{\text{нн}}$, 得:

$$\gamma_{\text{вл}} = \frac{B}{2.153 T} - 0.175 \frac{\varphi h_{\text{нн}}}{T}. \quad (20)$$

右端之第一项不是别的, 而是干空气之容重 $\gamma_{\text{сух}}$, 以 $x=0$ 代入公式(19)中, 即可确信。

因此:

$$\gamma_{\text{вл}} = \gamma_{\text{сyx}} - 0.175 \cdot \frac{\varphi \cdot h_{\text{вл}}}{T}, \quad (21)$$

或用公斤/平方公尺表示压力:

$$\gamma_{\text{вл}} = \gamma_{\text{сyx}} - 0.0129 \frac{\varphi \cdot P_{\text{в}}}{T}. \quad (22)$$

最后应当指出: 表压力经常不以水银柱表示, 而以毫巴表示。1 毫巴 = (达因 · 10⁶ / 平方公尺 10³)。由此可得:

$$P_{\text{毫巴}} = 1.3338 \text{ 公厘水银柱。}$$

干空气运动粘滞系数, 在温度由 0° 到 60° 的范围内, 可认为等于:

$$\nu = 0.000013 + 0.0000001165t \text{ (平方公尺/秒)}。$$

动力粘滞系数可按下列公式求出:

$$\mu = \frac{\nu \cdot \gamma}{g},$$

式中: g —— 重力加速度 = 9.81 (公尺/秒²)。

2. 湿空气图表

湿空气之基本参数可用最简便的形式, 亦即拉姆金 (Л. К. Рамзин) 教授最先提出的所谓湿空气图表表示。此图表在给定气压下连系了许多数值, 即将空气温度 t , 含湿量 x (公斤/公斤), 含热量 i , 相对湿度 φ 及空气中水蒸汽分压力 $h_{\text{в}}$ 连系起来。此图表不仅能求出上述各参数, 同时也为湿空气状态改变过程的图表分析计算方法的原理。

因 $x = \frac{d}{1000}$, 故無論用 $i-x$ 图或 $i-d$ 图均可得相同結果。

$i-d$ 图示于图 1 (見插頁)。

橫坐标軸所示者为含湿量 d (克/公斤) 及分压力 h_n (公厘水銀柱), 而纵坐标軸为干球温度 t , 斜綫表示蒸汽空气混合物之含热量 i (千卡/公斤) [更正确者应为千卡/(1+x)公斤]。

图上并有相对湿度曲綫 φ , 其間距为 10%。該图边綫之曲綫 $\varphi=100\%$, 取名为饱和曲綫。

图表用法示例:

設空气温度为 $+25^\circ$, 含湿量为 8 克/公斤。

求此空气之相对湿度 φ , 水蒸汽分压力 h_n 及含热量 i 。

答: $\varphi=40\%$; $h_n=0.8$ (公厘水銀柱), $i=10.9$ (千卡/公斤)

下面研究利用 $i-d$ 图的某些重要問題。設在 $i-d$ 图上以 A 点表示湿空气之状态 (图 2)。因 A 点位于曲綫 $\varphi=100\%$ 上, 故空气已达水蒸汽之饱和极限。这时之温度 t_n 及水蒸汽压力 h_n 均符合于饱和状态。 B 点所示之状态說明水蒸汽之温度 t_1 高于饱和温度, 从而蒸汽处于过热状态。所以在 $\varphi<100\%$ 之空气蒸汽混合物內, 水蒸汽是处于过热状态之中。

至于 C 点, 則它說明水蒸汽之温度 t_2 低于饱和温度 t_n 。显然在此种情况下将产生湿蒸汽, 即蒸汽与处于悬浮状态之凝結水滴 (雾) 的混合物。

湿空气图表一般用于标准气压 $B=760$ (公厘水銀柱), 如气压改变时, 則整个图表应相应地改变。气压愈小, 曲綫 $\varphi=100\%$ 愈低 (图 3)。

利用 $i-d$ 图除能求得湿空气之基本参数外, 还能求出其湿球温度。可以认为: 湿空气湿球温度一定的讀数相应于該空气一定的含热量对实际应用是足够准确的。由此也可以得出用 $i-d$ 图确

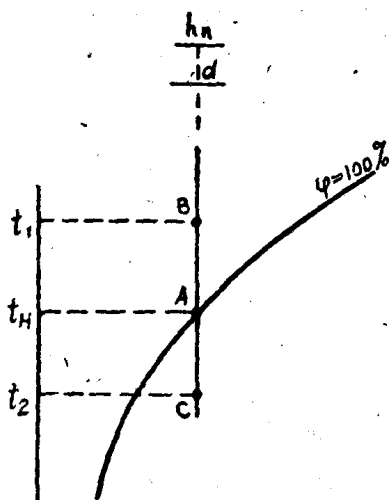


图 2.

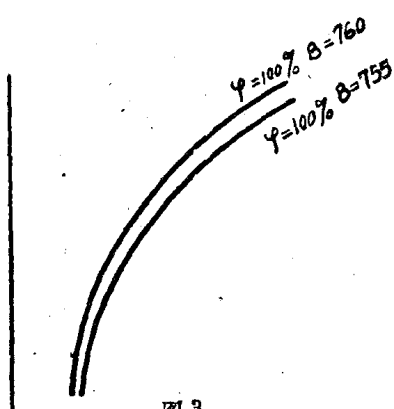


图 3.

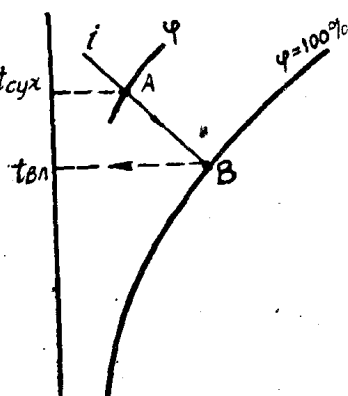


图 4.

定湿球温度 t_{BH} 的方法。假定在图上用 A 点表示空气的状态(图 4), 經这点引一条 $i = \text{常数}$ 的綫, 并在其与飽和曲綫 ($\varphi = 100\%$) 交点处求得 B 点。显然, A 点和 B 点相应于湿球温度之同一讀数。因为在 $\varphi = 100\%$ 的情况下, 干球与湿球温度的讀数是完全一样的, 所以 B 点就是符合于 B 点又符合于 A 点的湿球温度 t_{BH} 。

实际証明, 在温度 $+30^\circ$ 以內时, 可以利用 $i-d$ 图根据阿思曼

干球溫度計的讀數 (t_{cyx} 及 $t_{\text{B.H.}}$) 確定濕空氣之相對濕度 φ 。在這種情況下，使用 i - d 圖的方法必須採取與上述相反的步驟進行。

利用 i - d 圖還可以確定濕空氣其狀態用 A 點表示的露點溫度 τ_0 。

為此(見圖 5)，由 A 點往下引一條垂直線，並與飽和曲線相交於 F 點。因 A 點和 F 點都在同一垂直線上，所以 A 點所決定的空氣參數之含濕量及 F 點所決定的

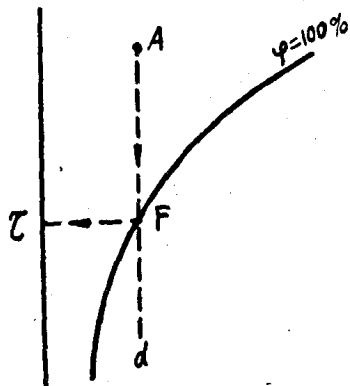


圖 5.

空氣參數之含濕量都是相同的。因 F 點所表示的空氣濕度等於 100%，所以符合於此點的干球溫度 τ 即為露點溫度。

例。已知 $t = +23^\circ$ 及 $\varphi = 60\%$ ，求空氣之露點溫度。

答： $\tau = +15^\circ$ 。

利用濕空氣圖表不僅可以求出表示該空氣狀態之全部參數，而且也能求出具有不同參數不同數量之空氣混合物的參數。

下面研究由兩種成分所組成之混合物最簡單的情況，其參數在 i - d 圖上(圖 6)各用 A 點及 B 點表示。

各個成分的重量 G_A 及 G_B ，也是已知的。

顯然，混合物之含濕量 d_0 及

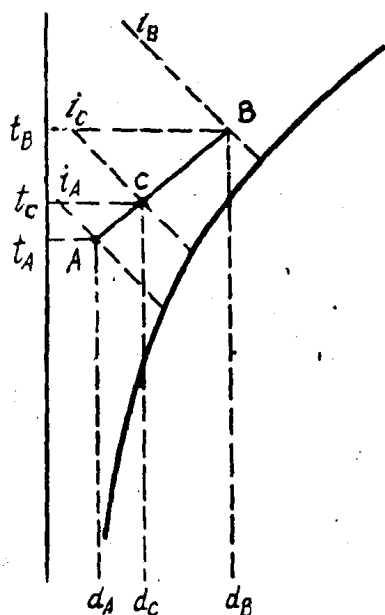


圖 6.

含热量 i_C 将等于:

$$d_C(G_A + G_B) = d_A G_A + d_B G_B;$$

$$i_C(G_A + G_B) = i_A G_A + i_B G_B.$$

经过简单的代数计算, 上述公式可化成下列形式:

$$\frac{d_B - d_C}{d_C - d_A} = \frac{i_B - i_C}{i_C - i_A} = \frac{G_A}{G_B}.$$

从上述等式中可看出混合物 C 点之横坐标 d_C , 以其与混合物的重量成反比地将 $d_A - d_B$ 线段分成两段, 而其纵坐标 i_C 也以同样之比例将 $i_A - i_B$ 线段分成两段。由图上之作图可得出结论: 若将决定这两种成分之参数的点用直线联起来, 则在此直线上将其分为两段, 而各段与混合量(重量)成反比之点即为混合物之参数点。因此为了求出混合物之参数, 甚至不需知道其绝对值 G_A 及 G_B , 而只需知其比值 $\frac{G_A}{G_B}$ 即足够。

例. 二份(按重量计)参数为 $t = +20^\circ$, $\varphi = 60\%$ 的空气与三分(按重量计)参数为 $t = +30^\circ$, $\varphi = 40\%$ 的空气相混合, 求混合物之参数。

解: 找出代表第一及第二种成分之状态点, 用直线将两点联接, 且将其分为 $2 + 3 = 5$ 等分。所求之点即位于距表征第二种成分之参数点两份及距表征第一种成份之状态点三份处。于是可得 $t = +26^\circ$, $\varphi = 47\%$ 。

若混合之成分大于 2 时, 则混合物之参数点应按下列方法作图(图 7)。

首先找出两种成分的混合物 C 点, 其次把 C 点当作新的成分进行研究, 以求出这成分与第三种成分 E 的混合点 C' 。但这时不得忘记在求 C' 点时, 各成分之重

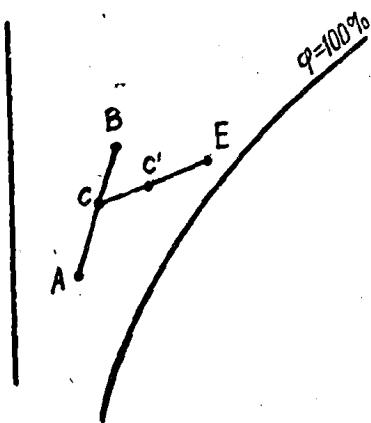


图 7.

量比等于:

$$\frac{G_E}{G_G} = \frac{G_E}{G_A + G_B}$$

在这种情况下,若混合物 C 点处于饱和曲线范围以外,则它已经不能表征混合物之参数(图 8)。实际上,如果表征空气状态点越出 $\varphi=100\%$ 的界限,则将由空气中开始析出凝结水。

因混合物气态部分之相对湿度不可能大于 100% ,故表征气态混合物之参数点 C' 应处于饱和线上。此外,为保持热平衡,必须使气态混合物及析出之水分的含热量总和等于相应于 C 点之含热量。

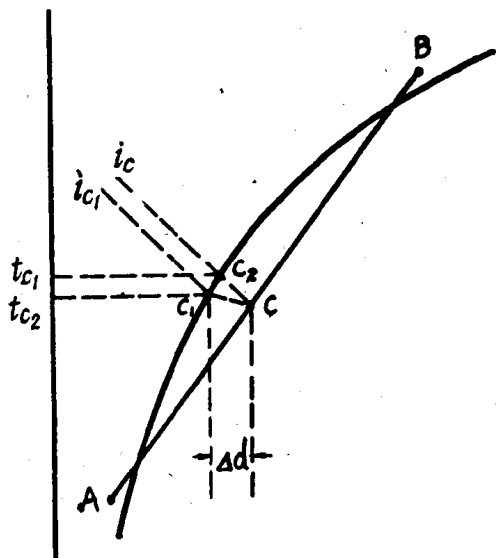


图 8.

$$i_C = i_{C_1} + \frac{\Delta d}{1000} \cdot t_{C_1} \quad (23)$$

式中: i_{C_1} ——混合物气态部分之含热量(千卡/公斤干空气);

Δd ——析出之水分量(克/公斤);

t_{C_1} ——水之温度,它与混合物气体之温度相等。

为了求出 C_1 点,在 $i-d$ 图上列数条 i 线,这些线比 i_C 稍小,它们与饱和曲线相交之点,将符合于混合物各种不同温度 t_C 及各种不同之析出水分量 Δd 。用试选法可以找出 i_{C_1} 线,该线与 $\varphi=100\%$ 曲线相交的 C_1 点及相应于该点的 t_{C_1} 及 Δd ,使方程式(23)成为恒等。

C_1 点也即所求之点。因 $\frac{\Delta d}{1000} \cdot t_{C_1}$ 值非常之小，故一般可以忽略，而用 C_2 点表示混合物之参数。

3. 用 $i-d$ 图繪制湿空气状态之改变过程

湿空气能吸收及放出热量和水分，从而改变其本身之参数。空气参数之改变取决于空气所吸收或放出的热量 Q 及水分量 A 之比值。同时空气状态的改变过程是逐渐进行的，因为无论是吸收或放出热及水分都需经过一定的时间间隔，假定传热及传湿的过程将要经过 n 个时间单位，这时，如果传热及传湿过程将以同样的速度进行，则在每一单位时间内空气都将吸收或失去 $\frac{Q}{n}$ (千卡) 的热量和 $\frac{A}{n}$ (公斤或克) 的水分。

因此，在任一时刻空气所吸收或失去的热量 and 水分量之比都可用同一数值表示。

令 $\frac{Q}{A} = \xi$ ，并取名为热湿比或过程的角系数。

显然，参与过程改变的空气总量所吸收及失去的热量 and 水分量之比值与相应于 1 公斤干空气的相同，故

$$\xi = \frac{Q}{A} = \frac{i_2 - i_1}{x_2 - x_1} = \frac{i_2 - i_1}{\frac{d_2 - d_1}{1000}} = \frac{\Delta i}{\frac{\Delta d}{1000}} \quad (24)$$

空气状态的变化过程可以在 $i-d$ 图上表示，以 A 点表示空气的最初状态，而 B 点表示最终状态 (图 9)。这时传给空气的热量等于 $i_2 - i_1$ (千卡/公斤干空气)，而水分量则为 $\frac{d_2 - d_1}{1000}$ (公斤/公

斤干空气)。在 $i-d$ 图上用连接空气初状态及终状态之点的直线表示空气参数逐渐改变的过程，因为该线上的任一点（例如 C 点）都符合下列比例关系：

$$\frac{i_3 - i_1}{d_3 - d_1} = \frac{i_2 - i_1}{d_2 - d_1} = \xi = \text{常数}。$$

亦即只有用直线所表示的过程才能满足于以同样速度进行传热及传湿的条件。

为了减轻空气状态变化过程的制作图工作，若已知热湿比则可事先作出相应与这比值的各不同数值的一系列

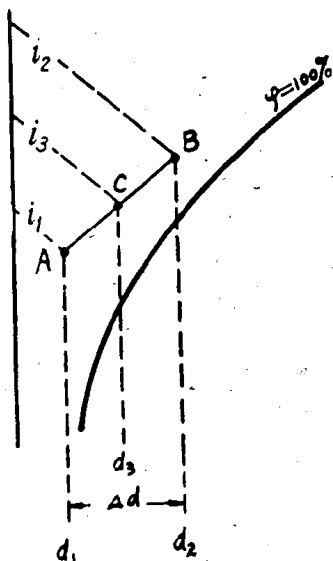


图 9.

直线。这些直线一般称为空气状态变化过程的射线。但是，为使这些射线不遮住 $i-d$ 图表，只好将射线的末端划到图的范围以外，并在其上算出符合于各线之热湿比值。为了作出过程的射线，必须用直线将图上符合于 $t=0$ ，及 $i=0$ 的零点与相应的射线终点相连接。平行所得射线的任何直线都符合于同一热湿比。

经空气最初状态点引同样的直线，可用图解法表示在该热湿比的情况下，空气参数改变过程是怎样进行的。根据传给空气或由空气中夺取热量和水分的性质及其大小的不同，

$$\frac{i_2 - i_1}{d_2 - d_1} = \frac{\Delta i}{\Delta d}$$

值的大小及符号也各不相同。

当 $i_2 > i_1$ 及 $d_2 > d_1$ 时，则热湿比的分子及分母均为正值，而 ξ 本身也将为正值(+)。