

静压复得等静压送风管在电子 计算机通风系统中的应用

滕 明 生

提 要 静压复得等静压送风管在工程上具有广泛应用,但至今尚缺乏一个比较完善的数学模型。本文运用流体力学的基本知识,在静压复得原理基础上,建立起等静压送风管基本几何形状的数学模型,从而得出基本理论曲线,以及影响该曲线形状的主要物理和几何参数。为工程设计提供了理论参考。

本文还从实践出发,分析了在大型高速电子计算机通风系统中,采用静压复得等静压送风管的工程应用价值,及目前存在的主要问题。

利用静压复得原理设计等静压送风管,以实现电子计算机各插件腔均匀送风,在工程应用上具有十分明显的优越性。其突出优点是,不但能够比较有效地对各插件腔施行等量送风,而且使电子计算机结构紧凑,大大减小了通风系统所占有的结构空间和体积,从而缩短了电子计算机的内部走线长度、降低了讯号传输过程中的时间延迟和电源传输距离,这对保证电子计算机的运算速度及其他性能具有十分重要的意义。

众所周知,电子计算机必须在“低”和“均匀”的温度条件下工作才具有高的可靠性、稳定性和使用寿命。所谓“低”就是要控制电子计算机的温升,使组装电子计算机的各类元器件在允许的环境温度下工作。所谓“均匀”,就是要最大限度地减小电子计算机内部各环境区域之间、元(器)件之间、特别是线路相关的元(器)件之间的温差,以保证元(器)件之间具有最小的结温差。

温升对电子计算机工作可靠性、稳定性和使用寿命的影响已为大家所熟知。结温差的存在则使电子元(器)件的噪音容限下降,从而降低了电子元(器)件的抗干扰能力。例如,目前广泛应用于电子计算机的MECL10K固体电路,由于系统中电路相关的各组件之间的结温差的存在,使组件噪音容限高低电平的下陷率分别为 $1.4\text{mv}/^{\circ}\text{C}$ 和 $1.1\text{mv}/^{\circ}\text{C}$ 。

在电子计算机热设计中,采用强迫通风来降低电子计算机的温升,相对而言是比较容易的,而控制电子元(器)件之间的温差的技术措施就要困难和复杂得多。其中,在强迫通风系统中控制风量分配,对同类插件(主要指功耗量和板面功耗分布相同或相类似的插件)施行等量送风,则是最基本最通用的技术措施。在我国电子计算机的热设计

中, 实现等量送风的方式通常是用静压送风原理。即使送风管保持相当的静压度要求(通常要求达到动压小于 $0.06\text{mmH}_2\text{O}$, 或气流速度小于 1米/秒 的工程静压度), 然后用调节送风口面积大小来调节送风量。在工程上实现工程静压要求的主要手段是以控制风道出风口总面积与进风口总面积比 $\left(\frac{\sum F_{\text{出}}}{\sum F_{\text{进}}}\right)$ 来实现的。这个比值大小与进口风压、管道截面大小、长度及系统阻力情况等因素有关。

工程实践表明, 用静压原理实现等量送风, 其送风管结构尺寸十分庞大。这对实现结构紧凑化、缩短传输线长度十分不利。利用静压复得原理设计等静压送风管则是克服这种不足的有效技术途径。

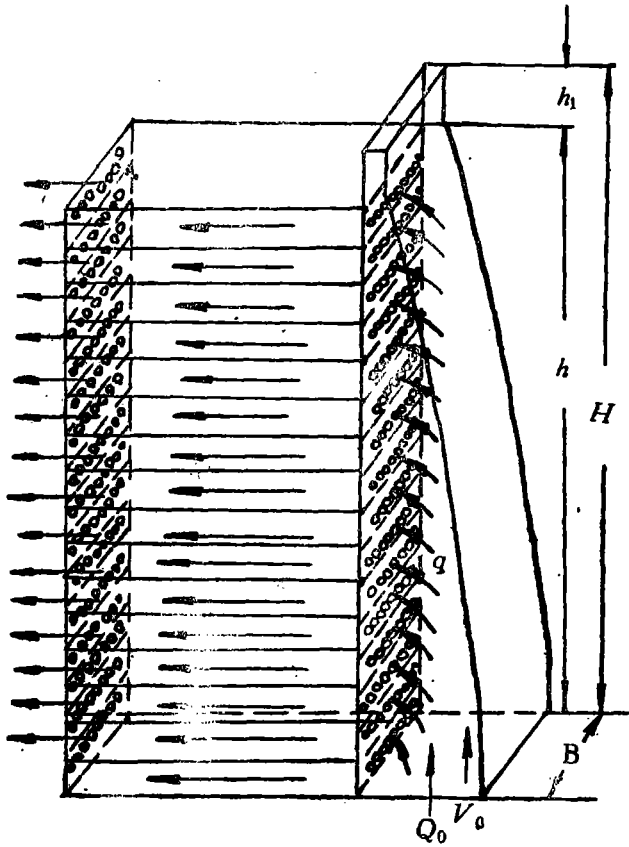


图 1

静压复得原理是, 借助于逐渐降低管段的动压(即降低气流速度)来增加管段的静压, 并使增加的静压等于管段的阻力损失。

假设图 1 为利用静压复得等静压送风管来对电子计算机各插件腔进行均匀送风的示意图。图 2 为该风管的纵截面形状图。下面我们来分析距离风管进风口为 y 的横截面上气流压力状况。

根据静压复得原理:

$$dP_D = dP_L + dP_V \quad (1)$$

式中: dP_D —气流流至计算横截面时管段的动压降, 用以增加管段的静压。

dP_L —沿程阻力损失, 是由于气流流动与管壁摩擦而引起的阻力损失。

dP_V —局部阻力损失, 是由于气流流动过程中, 因方向及沿流程的有效断面突变而引起气流产生撞击或形成漩涡等消耗一定能量而产生的阻力损失。

$$dP_D = d \frac{\gamma V^2}{2g} \quad (2)$$

式中: γ —空气容重。由流体力学可知, 当气流速度小于 0.4 马赫 (即气流速度 $V < 340$ 米/秒 $\times 0.4 = 146$ 米/秒) 时, 可认为是不可压缩气流, 这时 γ 可看成常数。

g —重力加速度, $g = 9.81$ 米/秒²。

V —气流流至计算截面时的流速。

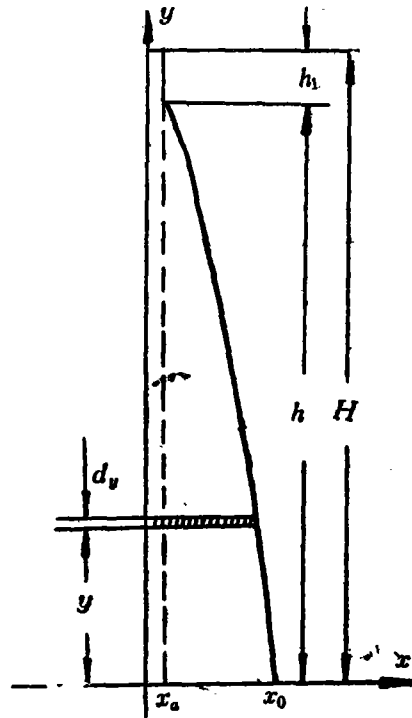


图 2

$$V = \frac{Q}{F}$$

式中: $F = B \cdot x$ 为计算截面面积 (B 为风道宽度, 见图 1)。 Q 为气流流过计算截面时的体积流量, 在这里因为被当作连续均匀分流, 所以 $Q = \frac{(h-y)}{h} Q_0$ (Q_0 为风管进口处的初始流量)。以 F 、 Q 值代入得

$$V = \frac{Q}{F} = \frac{(h-y) Q_0}{h B x} \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式得:

$$dP_D = d \frac{\gamma}{2g} \left[\frac{(h-y)}{h B x} Q_0 \right]^2 = d \frac{\gamma}{2g} \left(\frac{Q_0}{h B} \right)^2 \left(\frac{h-y}{x} \right)^2 = \frac{\gamma}{2g} \left(\frac{Q_0}{h B} \right)^2 d \left(\frac{h-y}{x} \right)^2 \quad (4)$$

$$dP_L = \frac{\lambda}{D_e} \frac{\gamma V^2}{2g} dy \quad (5)$$

式中: λ —沿程阻力系数。它是一个与流体动态特性 (雷诺数 R_e) 和管壁粗糙度 Δ 有关的参数, 下面将详细讨论其在不同情况下的取值。

D_e —风管当量直径。其值等于风管横截面积 F 与浸润周长 l 之比值的四倍, 即

$$D_e = \frac{4F}{l} = \frac{4Bx}{2B+2x} = \frac{2Bx}{B+x} \text{。以 } D_e \text{ 及 } V \text{ 代入(5)式得:}$$

$$dP_L = \frac{\lambda(B+x)}{2Bx} \frac{\gamma}{2g} \left[\frac{(h-y)}{hBx} Q_0 \right]^2 dy = \frac{\lambda(B+x)}{2Bx} \frac{\gamma}{2g} \left(\frac{Q_0}{Bh} \right)^2 \left(\frac{h-y}{x} \right)^2 dy \quad (6)$$

$$dP_V = \xi_m \frac{\gamma V^2}{2g} dn = \xi_m \frac{\gamma V^2}{2g} d \frac{y}{h_i} = \frac{\xi_m}{h_i} \frac{\gamma}{2g} V^2 dy = \frac{\xi_m}{h_i} \frac{\gamma}{2g} \left(\frac{Q_0}{hB} \right)^2 \left(\frac{h-y}{x} \right)^2 dy \quad (7)$$

式中： ξ_m ——各分流口处局部阻力系数平均值。

h_i ——分流口间距（这里等于插件间距）。

n ——分流口数。

将(4)、(6)、(7)各式代入(1)式得：

$$\frac{\gamma}{2g} \left(\frac{Q_0}{hB} \right)^2 d \left(\frac{h-y}{x} \right)^2 = \frac{\lambda(B+x)}{2Bx} \frac{\gamma}{2g} \left(\frac{Q_0}{Bh} \right)^2 \left(\frac{h-y}{x} \right)^2 dy + \frac{\xi_m}{h_i} \frac{\gamma}{2g} \left(\frac{Q_0}{hB} \right)^2 \left(\frac{h-y}{x} \right)^2 dy$$

$$\text{约简得：} \quad d \left(\frac{h-y}{x} \right)^2 = \frac{\lambda(B+x)}{2Bx} \left(\frac{h-y}{x} \right)^2 dy + \frac{\xi_m}{h_i} \left(\frac{h-y}{x} \right)^2 dy \quad (8)$$

$$\text{令} \quad f = \left(\frac{h-y}{x} \right)^2, \quad \text{即} \quad df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy = -\frac{2(h-y)^2}{x^3} dx - \frac{2(h-y)}{x^2} dy$$

$$\text{代入(8)得：} \quad -\frac{2(h-y)^2}{x^3} dx - \frac{2(h-y)}{x^2} dy = \frac{\lambda(B+x)}{2Bx} \left(\frac{h-y}{x} \right)^2 dy + \frac{\xi_m}{h_i} \left(\frac{h-y}{x} \right)^2 dy$$

$$\text{即} \quad \frac{-2(h-y)^2}{x^3} dx = \frac{\lambda(B+x)}{2Bx} \left(\frac{h-y}{x} \right)^2 dy + \frac{\xi_m}{h_i} \left(\frac{h-y}{x} \right)^2 dy + \frac{2(h-y)}{x^2} dy$$

$$\text{即} \quad \frac{-(h-y)}{x^2} \cdot \frac{2(h-y)}{x} dx = \left[\frac{\lambda(B+x)}{2Bx} (h-y) + \frac{\xi_m}{h_i} (h-y) + 2 \right] \frac{(h-y)}{x^2} dy$$

$$\text{约简得：} \quad \frac{-2(h-y)}{x} dx = \left[\frac{\lambda(B+x)}{2Bx} (h-y) + \frac{\xi_m}{h_i} (h-y) + 2 \right] dy$$

$$\text{所以} \quad y' = \frac{dy}{dx} = \frac{-2(h-y)}{x \left[\frac{\lambda(B+x)}{2Bx} (h-y) + \frac{\xi_m}{h_i} (h-y) + 2 \right]} = \frac{-2(h-y)}{\frac{\lambda(B+x)}{2B} (h-y) + \frac{\xi_m}{h_i} (h-y)x + 2x}$$

$$\text{即} \quad y' = \frac{-4Bh_i(h-y)}{\lambda(B+x)(h-y)h_i + 2B\xi_m(h-y)x + 4Bh_ix} \quad (9)$$

(9)式即为静压复得等静压送风管道纵截面形状曲线的微分式，它代表了曲线上各点切线斜率。其几何特性为：

一、 y' 为无因次量，其中 B 、 h 、 h_i 、 λ 、 ξ_m 为参变量， x 为自变量。当在一定条件下的各参变量确定时，根据若干个 x 值就可以求出相应的 y 及 y' 的数值解，从而可以在 $x-y$ 坐标系中描绘出相应的曲线。这些曲线即为满足静压复得等静压送风管在相应条件下的纵截面理论曲线。

二、由(9)式可以看出，当 $y < h$ 、 x 取正数时， y' 永远是负值。说明在这个范围内，曲线上任何一点的切线斜角皆大于 90° 。

三、 $|y'|$ 随 y 增大而变小，当 $y \rightarrow h$ 时， $|y'| \rightarrow 0$ 。说明曲线斜率随 y 增大而递减，

愈接近顶端各点的切线愈趋于水平。而当 $y=0$ 时, $|y'|$ 最大,说明该点切线最趋垂直。

四、从(9)式可以看出, y 不能等于 h 。因为当 $y=h$ 时, $|y'|=0$, 说明此点已不能满足静压复得等静压条件。因此, 在工程设计中为保证满足等静压管段的有效高度, 风管实际高度 H (见图 2) 大于理论曲线高度 h 某一值 ($h_1 = H - h$) 是有好处的。从而, 在风管厚度方向上也相应地要出现一个 x_0 值。这时, 在运用该式进行设计计算时, 式中的 h 要被 H 代替。

下面我们来讨论沿程阻力系数 λ 和局部阻力系数 ξ_m 在不同情况下的取值, 及其在相应情况下(9)式的微分式形式。

如前述, 沿程阻力系数 λ 是雷诺数 R_e 和管壁粗糙度 Δ 的函数。根据尼古拉兹 (J. Nikuradse) 实验可分为下列几种主要情况:

第一, 层流区 ($R_e < 2320$): 在这种情况下, λ 与管壁相对粗糙度 $\frac{\Delta}{D_e}$ 无关。这时取经验公式 $\lambda = \frac{64}{R_e}$, 代入(9)式得:

$$y' = - \frac{-4Bh_i(h-y)}{\frac{64}{R_e}(B+x)(h-y)h_i + 2B\xi_m(h-y)x + 4Bh_ix}$$

$$= \frac{-2R_e B h_i (h-y)}{32(B+x)(h-y)h_i + R_e B \xi_m (h-y)x + 2R_e B h_i x} \quad (10)$$

局部阻力系数 ξ_m 与流体流向及沿流程的有效断面的变化情况有关。在这里有效断面的变化沿流向形成渐缩管, 无突变现象。根据流体力学知识, 普通渐变管当中心角小于 30° 时, 局部阻力损失可以忽略。又因流体流动的主方向是顺风管不变的, 各分流量相对主流量而言很小, 且为均匀分流。因此局部阻力损失在这里认为是可以忽略的, 即 $\xi_m = 0$ 。这时(10)式则为:

$$y' = \frac{-2R_e B (h-y)}{32(B+x)(h-y) + 2R_e B x} \quad (11)$$

第二, 紊流光滑管区: 此时沿程阻力系数亦与管壁粗糙度无关。而 λ 的取值在雷诺数 R_e 的不同区段是不同的。当 $4 \times 10^3 < R_e < 10^5$ 时, 采用勃拉休斯 (H. Blasius) 归纳的经验计算式 $\lambda = \frac{0.3164}{R_e^{0.25}}$; 当 $10^5 < R_e < 3 \times 10^6$ 时, 则采用尼古拉兹 (J. Nikuradse) 归纳的经验计算式 $\lambda = 0.0032 + 0.221R_e^{-0.237}$ 。此时(9)式则分别为:

$$y' = \frac{-2R_e^{0.25} B h_i (h-y)}{0.1582(B+x)(h-y)h_i + R_e^{0.25} B \xi_m (h-y)x + 2R_e^{0.25} B h_i x} \quad (12)$$

$$y' = \frac{-4Bh_i(h-y)}{(0.0032 + 0.221R_e^{-0.237})(B+x)(h-y)h_i + 2B\xi_m(h-y)x + 4Bh_ix} \quad (13)$$

当 $\xi_m = 0$ 时, (12)式及(13)式则分别为:

$$y' = \frac{-2R_e^{0.25} B (h-y)}{0.1582(B+x)(h-y) + 2R_e^{0.25} B x} \quad (14)$$

$$y' = \frac{-4B(h-y)}{(0.0032 + 0.221R_e^{-0.237})(B+x)(h-y) + 4Bx} \quad (15)$$

第三, 紊流光滑管向粗糙管过渡区 $\left[26.98 \left(\frac{D_e}{\Delta} \right)^{\frac{8}{7}} < R_e < 4160 \left(\frac{D_e}{2\Delta} \right)^{0.85} \right]$: 这种情况下的沿程阻力系数与相对粗糙度和雷诺数都有关。其计算可按兰格(M. Lange)归纳的经验公式 $\lambda = 0.0096 + \sqrt{\frac{\epsilon'}{D_e}} + \sqrt{\frac{2.88}{R_e}}$ (ϵ' 是代表一种正比于管壁平均凹凸的粗糙长度。不同材料的 ϵ' 可查参考文献[2]P.105), 以 D_e 值代入 λ , 并将 λ 代入(9)式则得:

$$y' = \frac{-4Bh_i(h-y)}{\left(0.0096 + \sqrt{\frac{\epsilon'(B+x)}{2Bx}} + \sqrt{\frac{2.88}{R_e}} \right) (B+x)(h-y)h_i + 2B\xi_m(h-y)x + 4Bh_ix} \quad (16)$$

当 $\xi_m = 0$ 时, (16)式则为:

$$y' = \frac{-4B(h-y)}{\left(0.0096 + \sqrt{\frac{\epsilon'(B+x)}{2Bx}} + \sqrt{\frac{2.88}{R_e}} \right) (B+x)(h-y) + 4Bx} \quad (17)$$

第四, 紊流粗糙管平方阻力区 $\left[R_e > 4160 \left(\frac{D_e}{2\Delta} \right)^{0.85} \right]$, 此时沿程阻力系数仅为相对粗糙度 $\left(\frac{\Delta}{D_e} \right)$ 的函数, 而与雷诺数 R_e 无关。取经验公式为 $\lambda = 0.11 \left(\frac{\Delta}{D_e} \right)^{\frac{1}{4}}$, 即

$$\lambda = 0.11 \left[\frac{\Delta(B+x)}{2Bx} \right]^{\frac{1}{4}}$$

代入(9)式得

$$y' = \frac{-4Bh_i(h-y)}{0.11 \left[\frac{\Delta(B+x)}{2Bx} \right]^{\frac{1}{4}} (B+x)(h-y)h_i + 2B\xi_m(h-y)x + 4Bh_ix} \quad (18)$$

当 $\xi_m = 0$ 时, (18)式则为:

$$y' = \frac{-4B(h-y)}{0.11 \left[\frac{\Delta(B+x)}{2Bx} \right]^{\frac{1}{4}} (B+x)(h-y) + 4Bx} \quad (19)$$

(10)、(11)、(12)、(13)、(14)、(15)、(16)、(17)、(18)、(19)各式为在不同的流体动态特性和管壁表面状况下, 静压复得等静压送风管纵截面形状曲线的微分式。从上述各式看出, R_e 、 Δ (或 ϵ')、 h_i 、 ξ_m 等均为各微分式参变量, 其值对一定的风管结构和送风系统而言是一定的, 但对不同的风管结构和送风系统来说有不同值, 因而得出的曲线斜率也是不同的。这说明流体动态特性、管壁表面状态 (Δ 或 ϵ' 决定沿程阻力大小)、局部阻力系数、分流口间距及分布均匀性等都是影响静压复得等静压送风管形状的主要物理和几何参数。此外我们从对边界条件的分析中, 还可以看出初始进风量 Q_0 也是影响

风管曲线的主要参数之一。

上述各式为复合函数, 可以表示为: $y' = f(y, x) = f[y(x, c), x] = g(x, c)$, 其中 $y = y(x, c)$ 为不定积分, c 为积分常数。说明根据上述各式都可以得到一族曲线。

常数 c 决定于边界条件。参看图 2, 当 $x = x_0$ 时, $y = y(x, c) = y_0 = 0$, 由此可以求得相应的常数 c , 得到相应的几何曲线。

x_0 是与所要求的 Q_0 有关的。因为 $Q_0 = F_0 V_0 = B x_0 V_0$ (V_0 —初始进风速度), 所以 $x_0 = \frac{Q_0}{B V_0}$, 则 $y_0 = y|_{x=x_0} = \frac{Q_0}{B V_0} = 0$ 。由此可见, 在 B 和送风压力给定的情况下, 当要求不同的 Q_0 值时, 就有不同的 x_0 值, 也就有不同的积分常数 c , 因而得到不同的对应曲线。这就表明, 初始进风量 Q_0 的大小也是影响风管曲线的主要物理参数之一。

现以(18)、(19)式为例, 来说明在工程设计中如何运用上述各式进行理论计算。我们可以归纳为如下几个步骤:

第一, 根据插件的热负荷及其所要求的风量 q , 和结构设计所确定的每机柜上插件装插排数 n 及间距 h_i , 计算风管的初始进风量 Q_0 及风管的有效高度 h 。 $Q_0 = q \cdot n$; $h = h_i \cdot n$, 并预选一延伸高度 h_1 (可在 50mm—150mm 之间), 则风管实际高度

$$H = h + h_1.$$

第二, 在结构设计给定风管宽度 B (贴机柜) 和空调系统给定送风压力部的情况下, 求风管厚度, 设为 x_0 , $x_0 = \frac{Q_0}{B V_0}$ 。因为 $P = \frac{\gamma V_0^2}{2g}$, 所以 $V_0 = \sqrt{\frac{2gP}{\gamma}}$, 故 $x_0 = \frac{Q_0}{B \sqrt{\frac{2gP}{\gamma}}}$ 。由前面分析可知, 通过 x_0 有一条相应的曲线。

第三, 在 5mm—15mm 范围内预选 x_a , 将 $x_a - x_0$ 分若干等分, 并将各等分点值代入(18)式 (当 $\xi_m = 0$ 时则为(19)式, 其电算程序是相同的), 通过一定的电算程序在电子计算机上求出各等分点的对应 y 值。得到各组对应值在 $x-y$ 坐标系中的对应点, 若干个点的点则可描出一条相应的曲线, 这就是所求的风管纵截面理论曲线。

在这里特别需要注意的是计算方向必须是从 $x_0 \rightarrow x_a$ 。计算结果 $y_a = y(x_a)$ 可能出现下述几种情况:

一、 $h \leq y_a < H$, 说明送风管高度和进风口面积在该送风压力下能满足热设计要求, 如图 3 中的曲线①所示。

二、如果 y_a 不满足 $h \leq y_a < H$, 但落在 h_1 区段附近, 则可通过调节 x_a 来满足要求。

1. 当 y_a 在 h_1 区段以下附近, 则将 x_a 减为 x_{a1} , 使曲线高度延伸为 $y_a \geq h$ 。这种情况相当于压缩了风管向上延伸段的宽度, 而风管总高度不变。如图 3 中曲线②。

2. 当 y_a 落在 h_1 区段以上附近 (超过 H) 时 (如曲线③), 这说明在不变更 x_a 的情况下, x_0 还可以缩小。如果不考虑压缩 x_0 , 则可将 x_a 调整到 x_{a2} , 而风管总高 H 仍保持不变。这时因曲线有效高度已超过了插件装插的有效高度, 所以无需再要延伸段。

三、在选定 x_a 的调节范围后, 如果 y_a 在 h_1 区段以下较远处, 则需要从结构高度

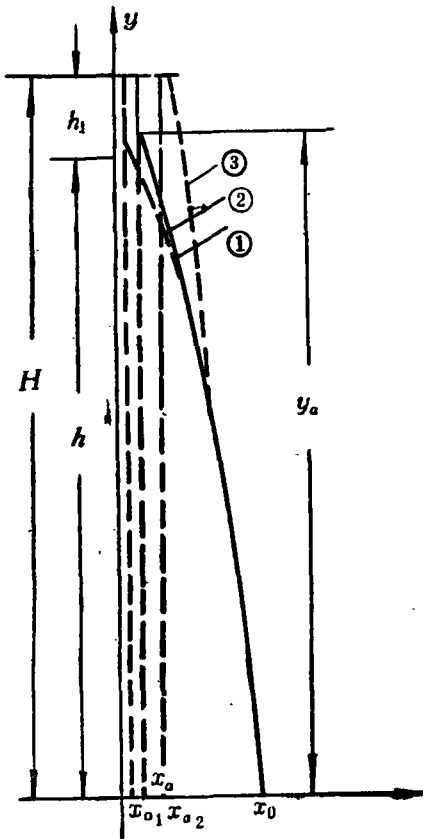


图 3

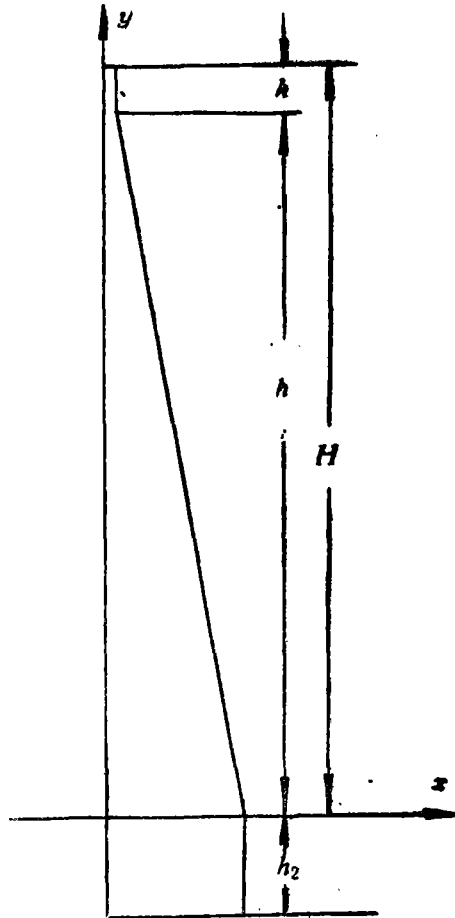


图 4

或空调送风压力两方面来更改设计。这就是说，当 x_0 不能增大时，要么降低插件装插的有效高度 h （即减少装插排数 n ），使降低后的 $h \leq y_0$ ；要么提高送风压力来满足要求。否则只能增大风管厚度 x_0 值。

在选定 x_0 的调节范围后，如果 y_0 超出 H 高度较远，说明风管厚度 x_0 可以压缩，或送风压力可以降低，一般说来这种情况比较好处理。

总之，在理论设计过程中，要通过各参数的配合选择，力求得到最合理的设计。必须指出的是，在确定送风压力大小时，除了从风量要求考虑外，还必须根据电子元（器）件的热特性，在保证风速要求的情况下，考虑系统的阻力情况。因此，实际送风压力可能要比计算值高得多。最后的工程设计方案必须在理论计算的指导下，利用实验模型进行模拟实验后来确定。

在 $\xi_m \rightarrow 0$ 的情况下，计算结果表明，得到的曲线接近于一条斜线。为简化制造工艺，在工程上常常把曲线简化成一条斜线，如图 4。经过实验测试对斜率作适当调节，使送风不均匀性误差达到最小值，从而得到最佳工程设计方案。

为了提高风管初始段的送风均匀性，在风管进风口的的前段，按风口尺寸逆流向前延伸

一直通管段是有好处的，我们把该管段叫稳流段。其长度 $h_2 = (5 \sim 8) D_s$ 。一般说来，进口风压越高， h_2 应取得越长。

为验证上述公式对工程设计的指导价值，用(19)式来验算一模型机柜送风管的结构尺寸。该模型机插件功耗为 35瓦/插件，每插件风量为 $q = 16 \text{米}^3/\text{小时}$ ，风速为 2.5米/秒。插件间距 $h_i = 15 \text{mm}$ ，每机柜平插 $n = 98$ 块插件。机柜贴风管面宽 $B = 400 \text{mm}$ ，要求送风管厚 $x_0 \leq 150 \text{mm}$ 。

在尚未得出上述各微分计算式前，用 1600mm 高的斜形风管对各插件腔进行送风，经多次调节风管斜度，并在满足风量和风速要求的送风压力下，对九十八个送风口压力进行反复测试，最后得到在最佳均匀性送风条件下的风管尺寸为：总高 $H = 1600 \text{mm}$ （有效高 h 超过九十八个送风口），风管进风口面积为 0.05m^2 ，顶端面积为 0.006m^2 。这

样，风管厚 $x_0 = \frac{0.05 \times 10^6}{400} = 125 \text{mm}$ ，顶端延伸段厚 $x_a = \frac{0.006 \times 10^6}{400} = 15 \text{mm}$ 。

利用(19)式进行理论计算的过程为：

1. $Q_0 = q \times n = 16 \text{米}^3/\text{小时} \times 98 = 1568 \text{米}^3/\text{小时}$ （取 $Q_0 = 1600 \text{米}^3/\text{小时}$ ）

2. $h = h_i \times n = 15 \text{mm} \times 98 = 1470 \text{mm}$ 。

取 $H = 1600 \text{mm}$ ，则延伸段 $h_1 = 130 \text{mm}$ 。

风管宽 $B = 400 \text{mm}$ 。

3. 查表取 $\Delta = 0.15 \text{mm}$ 。

4. 取风管厚 x_0 分别为 125mm, 130mm, 135mm, 140mm, 145mm, 150mm。令在这些值下 $y = y|_{x=x_0} = 0$ 。

5. 初定 $x_a = 5 \text{mm}$ ，由 $x_0 \rightarrow x_a$ 取计算间距为 1。采用 FORTRAN IV 语言，其计算程序如表 1 所列。在 PDP-11/70 电子计算机上进行计算，其计算结果如表 2 所列（表 2 列出的计算间距增大到 5）。将 x 、 y 值计入坐标对应点，得图 5 所示六条曲线，它们所对应的 x_0 值分别为 150mm、145mm、140mm、135mm、130mm、125mm。由这些计算数值和曲线可以看出，它们与模型机送风管结构尺寸是很接近的。这说明(19)式是具有工程应用价值的。其它各式对工程设计的指导意义尚需实验验证。

图 6 为(18)式中局部阻力系数 ξ_m 对曲线形状的影响。可以看出， ξ_m 对送风管形状的影响是十分明显的，因此控制局部阻力损失十分重要。

初步实践使我们体会到，在电子计算机通风系统中采用静压复得等静压送风管，具有下述几个明显的优点：

第一，为实现对各插件腔的均匀送风，在同样送风条件下，比静压送风管的横截面尺寸缩小了 1.5 倍左右。这对缩短机柜之间的跨接线十分有利。目前讯号线的传输质量平均约为 6 毫秒/米 (10^{-9} 秒/米)，即连接线每缩短 1 米，其传输速度可提高 6 毫秒，这对保证电子计算机速度十分有利。

此外，为保证讯号传输质量，要求同一种电源在各机柜的任何两点之间具有最小的电压差。为此，常常需要在各机柜汇流条之间设置“均压线”以均衡电压。此时，电压差的大小主要取决于均压线的压降。而该压降的大小是与均压线的长度成正比的。所以

(18)式(19)式在 PDP-11/70 电子计算机上的电算程序 表 1

```

1  DOUBLE PRECISION H,X,Y,Z,K1,K2,K3,K4,
   X1, X2, Y1, Y2, Y3, A (150), B (150)
200 TYPE 200
   FORMAT (1X, 'H= ', $)
   READ (5, 10) H
42  WRITE (5, 42) H
   FORMAT (1X, 'H= ', D24. 17)
   TYPE 20
20  FORMAT (1X, 'Y= ', $)
   READ (5, 10) Y
   TYPE 21
21  FORMAT (1X, 'X= ', $)
   READ (5, 10) X
10  FORMAT (1X, D24, 17)
11  FORMAT (1HO, 10X, 'Y= ', D24. 17)
22  FORMAT (1HO, 10X, 'X= ' D24. 17)
   TYPE 40
40  FORMAT (1X, 'N= ', $)
   READ (5, 41) N
41  FORMAT (1X, 13)
   WRITE (6, 11) Y
   WRITE (6, 22) X
   DO 12 I=1, N
   CALL W (X, Y, Z)
   K1=H*Z
   X1=X+K1/2. DO
   Y1=Y+O. SDO*N1
   CALL W (X1, Y1, Z)
   K2=H*Z
   Y2=Y+K2/2. DO
   CALL W (X1, Y2, Z)
   K3=H*Z
   X2=X+H
   Y3=Y+K3
   CALL W (X2, Y3, Z)
   K4=H*7
   A(I)=Y+(K1+2.DO*K2+2.DO*K3+K4)/6. DO
   Y=A (I)
   B (I) =X2
12  X=X2
   WRITE (6, 13) (B (I), A (I), I=1, N)
13  FORMAT (2 (10X, D24. 17) /)
   STOP
   END
   SUBROUTINE W (X, Y, Z)
   DOUBLE PRECISION X, Y, Z
   Z=1600. DO*(Y-1600. DO)/(O. 11DO*
1  (O. 15DO*(X+400. DO)/(800. DO*X))**0.25DO*
2  (X+400. DO)*(1600. DO-Y)+1600. DO*X)
   RETURN
   END

```

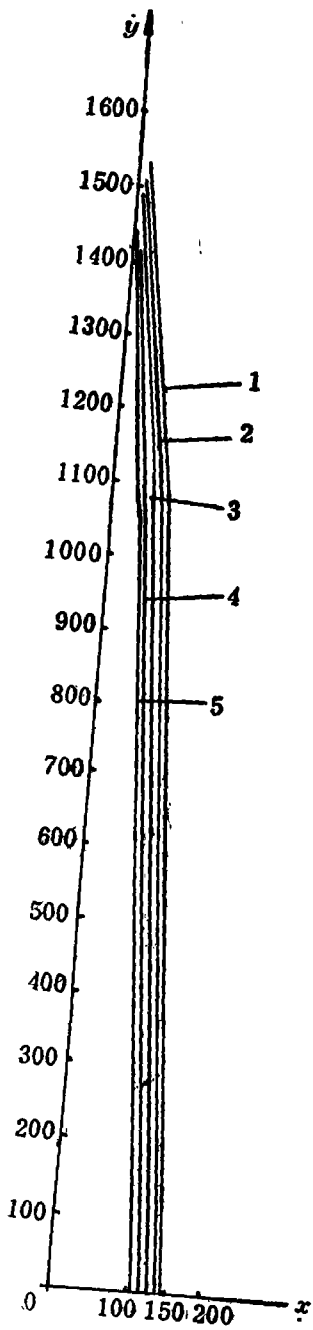



图 5 在不同 x_0 值积分曲线

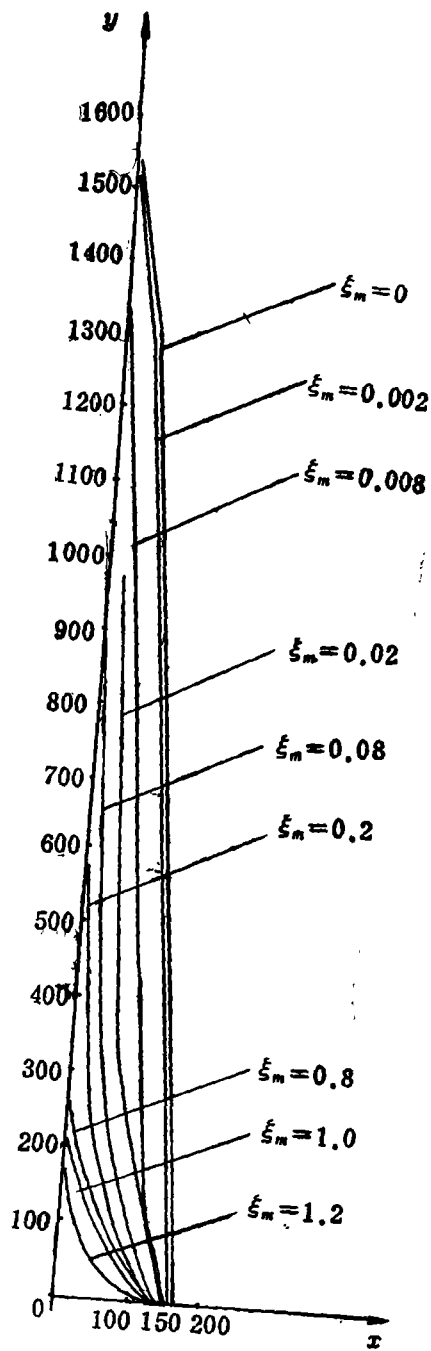


图 6 在不同 ξ_m 下的积分曲线

缩短机柜之间的距离对减小均压线的长度、降低电压差也很有利，从而也提高了讯号传输质量。

第二，易于实现平行短风路送风，使整个机柜各插件腔形成相互独立的并联送风系统。这种通风系统不但由于风路短，使各插件的整个热交换过程处于气流非稳定段而提高了散热效果，而且也避免了插件之间的相互热干扰。此外，也便于对各风路进行单独调节。

第三，这种送风系统不受电子线路调试、检测等各种操作的干扰，也不对操作人员发生干扰。

第四，易于实现计算机结构的标准化和系列化。当电子计算机插件标准化后，只要根据机器插件装插有效高度的变化改变风管高度，调节风管进口面积，计算机结构形式和尺寸就基本确定下来了。从而为计算机结构工艺的自动化和批量生产提供了有利条件。这对提高电子计算机质量、降低成本创造了有利条件。

在电子计算机通风系统中采用静压复得等静压送风管实现均匀送风，目前存在的主要问题是怎样保证排风畅通并实现各插件腔进风口两端的压差均衡。为此，对插件设计要求较高，特别是插件板面设计要求尽可能一致。必要时需要在板面上设置假元件，以保证各插件腔内部对气流的阻力状况相似。

排风不畅会引起各插件腔进风口两端的压差不一致。为了改善排风道下端的排风状况，可以采取在排风道下端开出风口的办法，以使排风道下端热风直接从开孔中排出机外。

利用静压复得原理设计等静压送风管这一方案的提出，是在整机结构方案讨论过程中，陈福接、王振清副教授根据静压的获得是控制进、出风口面积比，因而可以用斜风管代替直风管的思想指导下提出来的。这一提出开导了我们的思路。在方案设计、理论分析和计算以及后来的技术总结过程中，先后得到清华大学暖通教研室赵荣毅同志，湖南大学流体力学教研室汪兴华同志，同济大学供热通风教研室武建勋同志，本校一〇一教研室吴桂馥同志和软件研究室蹇贤福同志的帮助和指导，并经一〇三教研室姚职中同志审阅，在这里顺致感谢。特别需要说明的是，这个推算和总结是在我们全组同志工程实践的基础上进行的，邓善贵、王惠两同志参加了工程设计和实验的全过程，李秀梅同志也参加了后阶段的效果检验性测试工作，没有这个工程实践过程，是不可能进行这种推算和总结的。

参 考 文 献

- [1] 马仁民主编，《空气调节》，西安冶金建筑学院。
- [2] 山东工学院、东北电力学院合编，《工程流体力学》。
- [3] 清华大学建工系供热通风专业编，《流体力学与流体机械》。
- [4] “等摩阻法及静压复得算法”，《凯利亚系统设计手册》（美）。
- [5] 蓝品生，“高速送风系统静压复得算法——通风管道算法”，《暖通技术》，1974.2。

The Static Pressure Regain Blast Pipe Equalizing Static Pressure is Applied in Blowout Wind System of Electronic Computer

Teng Ming—sheng

Abstract

The static pressure regain blast pipe equalizing static pressure is applied widely in engineering. However, so far it lacks a more perfect mathematical model.

Using basic knowledge of Fluid Dynamics, this paper establishes mathematical model of basal geometry of blast pipe equalizing static pressure based on the pressure regain principle. Therefor basal theoretical curve is obtained, and cardinal physical and geometric parameters which effect geometric form of the curve. The theoretical guide for engineering design is provided.

Also from practice, this paper analysed advantages of using static pressure regain blast pipe equalizing static pressure in blowout wind system of large and high speed electronic computer and volue of engineering application, and main questions.