

流控检测平板间气流流动的分析

郭金基
(数学力学系)

一、问题提出

利用流控装置完成逻辑控制功能的许多系统的测量,比较普遍的是应用位置或位移的传感器,检测出的物理量,成为实现逻辑控制功能的依据。在印刷过程中的误差流控检测器以及化工部门某种测料器,便是属于这一类的传感器。从负压流控装置的应用发现,检测缝隙的间距(Δ)、孔径(r_0)的大小直接影响元件的信号输出。为了提高检测精度,改善负压流控元件的性能及了解其动作原理,我们对平行检测板之间气流流动进行了理论的分析。

假设检测板尺寸较大,气流在检测两平行板间流动如图1所示,上检测板为固定板,下检测板(纸张、膜片或检测的工件)有时可以移动;但它的移动速度相对气流的速度来说很慢,对运动的影响甚微,因此也把它看作固定板。平行平板间四周与大气相通,压力较高;检测孔中心接负压气源,压力较低。在此压力差作用下,气流从外围逆矢径方向朝中心流动,气流雷诺数可用下式计算:

$$Re = \frac{U\Delta}{\nu} \quad (1)$$

式中 U ——平行板间气流的速度;
 Δ ——平行板间距;
 ν ——气体运动粘性系数。

由于气流速度很低,检测间距 Δ 数值很小(小于1公厘),所以雷诺数不大,气流可以认为是层流流动。为计算方便,我们把检测板视为园板。

平行园板间气流流动状况,文^[1]对正压气流作过分析。在小雷诺数条件下,已应用于精密测量的空气式测微计。本文直接从流体动力学运动微分方程(Navier-Stokes equation)出发,在引入一些假设条件下,推导出压力 p 、流量 Q 与检测板间距 Δ 、中心孔半径 r_0 之间的关系,并与实验相比较,也适用于正压气流流动的情形。

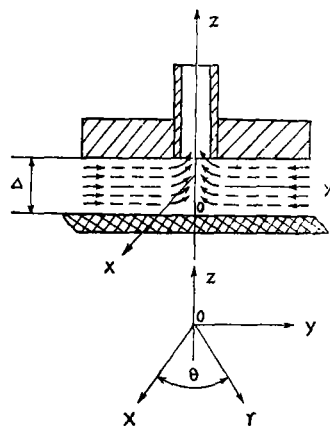


图 1

二、平行园板间气流流动的求解

我们假设气体是不可压缩的(因低速流动)和它的流动状态是不随时间变化的稳定流。选用园柱坐标, $r-\theta$ 平面为间距 Δ 的中点平行于两检测板的平面, z 方向与它垂直(如图1)。设沿径向 r 、切向 θ 及垂直方向 z 的气流速度分别为 U 、 V 、 W 。现在是平行园板间层流流动, 沿垂直方向没有速度分量, 同时流动状态是轴对称的和稳定的流动, 因此有:

$$W = 0, V = 0, \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial W}{\partial t} = 0, \frac{\partial U}{\partial \theta} = 0,$$

以园柱坐标表示的不可压缩流体的Navier-Stokes方程⁽²⁾可简化为:

$$\rho U \frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{U}{r^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

流体质量连续性方程化为:

$$\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} = 0 \quad (3)$$

式中 ρ ——气体的密度;
 μ ——动力粘性系数;

p ——气体中的压力, 为流场中任意一点各方向法向应力平均值,

把(3)式移项 $\frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{U}{r}$ 两边对 r 求偏导数, 将结果代入(2)式, 化简后可得:

$$\rho U \frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \quad (4)$$

平行园板固定边界条件为:

$$\text{当 } z = \pm \Delta/2 \text{ 时, } U = 0 \quad (5)$$

因此, 求解平行园板间气流流动状态的问题归结为求解方程(4)、(3)及边值条件(5)的数学问题。

1、近似解:

由于假设气体是不可压缩的, $\rho = \text{常数}$, (4)式中把 $\frac{\partial p}{\partial r}$ 移项, 同时将 ρU 并入偏导数内可得:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(p + \rho \frac{U^2}{2} \right) = \mu \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \quad (6)$$

上式左边括号内 $p + \rho \frac{U^2}{2}$ 实际上等于流线上各点的总压力, 记为 P , 即:

$$P = p + \rho \frac{U^2}{2} \quad (7)$$

在粘性流体流动中, 压力差 Δp 起抵消与运动方向相反的摩擦力作用, 建立粘性流体的边界层。在层流边界层理论中⁽²⁾, 雷诺数 Re 较大时可忽略边界层内横向加速度的影响, 即内压力 p 仅看作 r 的函数。此处平行平板的外围气流速度小, 雷诺数 Re_∞ 小, 但随着气流逆径向朝中心流动, 速度逐渐增加, 雷诺数 Re 也有所增大, 因此我们作忽略边界层内压力 p 的横向变化 (即 z 向) 的假设, 把 p 看作 r 的函数。在文⁽³⁾中, 由于在大深宽比的旋涡室建立了边界层的缘故, 速度矢量假设为二维管流引入当地平均流速的概念。本文讨论的情况与旋涡室不同, 我们在求解非线性方程(6)时采用逐级近似的方法。作为一级近似, 在计算总压力 P 时先把速度 U 仿照文⁽³⁾处理过的引入当地平均速度 $U = \frac{Q}{2\pi r \Delta}$ 的假设; 按(7)式算出 P , 代入(6)式考虑边界条件(5)求出一级近似的速度 U 。求出 U 之后, 同样按(7)式先算总压力 P , 再按(6)式及边界条件去求二级近似的速度 U , 依此计算下去逼近问题的解。我们这种做法, 实际上是将方程(4)的非线性项由给出某些物理假设进行数学处理, 把它化为线性方程, 用逐次迭代的方法求解。最后求出的速度 U 和压力 p 能否收敛于真确解尚待于证明。

由上所述, 作为一级近似初始把速度引入平均流速的假设计算总压力 P , (7)式表为:

$$P = p + \rho \frac{\bar{U}^2}{2} \quad (7')$$

$$\text{式中 } \bar{U} = \frac{Q}{2\pi r \Delta},$$

P 仅是 r 的函数, 这一假设以某些实验为依据, 间距 Δ 在某一数值范围才合理。

(7')式代入(6)式, 并注意到现在是圆周上各点朝向中心 (逆径向) 流动, 用 $-U$ 代替 U , 于是(6)式化为:

$$\frac{dP}{dr} = -\mu \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \quad (6')$$

将上式积分两次, 利用边界条件(5)式可得:

$$U = \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{dP}{dr} \cdot (z^2 - \Delta^2/4) \quad (8)$$

从不可压缩稳定流质量连续条件, 流量 Q 与流速 U 的关系可表为:

$$Q = \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} U dz (2\pi r) = \frac{\pi r}{6\mu} \cdot \frac{dP}{dr} \cdot \Delta^3 \quad (9)$$

假定当 $r = R_0$ 时, 压力 p 等于大气压 ≈ 0 (表压), [注1] 把(9)式移项:

$$dP = \frac{6\mu Q}{\pi \Delta^3} \cdot \frac{1}{r} dr$$

对 r 从 R_0 到 r 积分, 并用(7')式代入得到:

$$p = -\frac{6\mu Q}{\pi \Delta^3} (\ln R_0 - \ln r) - \frac{\rho Q^2}{8\pi^2 \Delta^2} \cdot \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \quad (10)$$

式中 R_0 ——检测板外径;

再由(8)式可得一级近似的速度:

$$U = \frac{3Q}{\pi \Delta^3} \left(Z^2 - \frac{\Delta^2}{4} \right) \cdot \frac{1}{r} \quad (11)$$

现在进行二级近似计算。我们将(11)式代入(7)式得:

$$P = p + \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{3Q}{\pi \Delta^3} \right)^2 \cdot \left(Z^2 - \frac{\Delta^2}{4} \right)^2 \cdot \frac{1}{r^2} \quad (7'')$$

将(7'')式代入(6)式, 并用 $-U$ 代替 U 可得:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\rho}{\mu} \cdot \left(\frac{3Q}{\pi \Delta^3} \right)^2 \cdot \frac{1}{r^3} \left(Z^2 - \frac{\Delta^2}{4} \right)^2 \quad (12)$$

继续利用边界层内压力 p 与 Z 向无关的假设和速度 U 的边值条件(5)式, 解方程可得:

$$U = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dr} \cdot \left(Z^2 - \frac{\Delta^2}{4} \right) + \frac{\rho}{\mu} \left(\frac{3Q}{\pi \Delta^3} \right)^2 \cdot \frac{1}{r^3} \left(\frac{Z^6}{30} - \frac{\Delta^2}{24} \cdot Z^4 + \frac{\Delta^4}{32} \cdot Z^2 - \frac{11}{1920} \cdot \Delta^6 \right) \quad (13)$$

考虑到流体质量连续条件 $Q = 2\pi r \int_{\Delta/2}^{\Delta/2} U dZ$, 把 U 代入积分化简后得:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{6\mu Q}{\pi \Delta^3} \cdot \frac{1}{r} + \frac{9}{140} \cdot \frac{\rho Q^2}{\pi^2 \Delta^2} \cdot \frac{1}{r^3} \quad (14)$$

应用 p 的边界条件, 积分后便得:

$$p = -\frac{6\mu Q}{\pi \Delta^3} \cdot (\ln R_0 - \ln r) - \frac{27}{140} \cdot \frac{\rho Q^2}{\pi^2 \Delta^2} \cdot \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \quad (15)$$

把(14)式代入(13)式, 于是得到二级近似的速度:

[注1]在负压膜式逻辑元件中, 当 $r = R_0$ 时, p 不等于大气压力, 而是膜式元件气室的压力 p_0 。这时求出的解(10), 以及后面的(15)、(27)式均要加 p_0 项。

$$U = -\left(\frac{3Q}{\pi\Delta^3} \cdot \frac{1}{r} + \frac{9}{280} \frac{Q^2}{\pi^2\Delta^2} \frac{\rho}{\mu} \cdot \frac{1}{r^3}\right) \left(Z^2 - \frac{\Delta^2}{4}\right) + \frac{9Q^2}{\pi^2\Delta^6} \cdot \frac{\rho}{\mu} \cdot \frac{1}{r^3} \left(\frac{Z^6}{30} - \frac{\Delta^2}{24} Z^4 + \frac{\Delta^4}{32} Z^2 - \frac{11}{1920}\Delta^6\right) \quad (16)$$

仿照上面的做法逐级计算下去。但由于计算量较大，同时作为二级近似计算的结果已与实验数据很接近，因此我们只做二级近似计算。

2、级数解：

$$\text{首先引进 } U^* = \frac{U}{U_\infty}, R^* = \frac{r}{\Delta}, Z^* = \frac{Z}{\Delta}, P^* = \frac{p}{p_\infty} \quad (\text{注}^2) \quad Re_\infty = \frac{U_\infty\Delta}{\nu}$$

把方程(4)化为无量纲方程：

$$Re_\infty U \frac{\partial U}{\partial R} = -\frac{p_\infty\Delta}{\mu U_\infty} \cdot \frac{\partial P}{\partial R} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2}$$

式中 $U_\infty, Re_\infty, p_\infty$ 分别为检测板入口处的速度，雷诺数及压力。

由(5)式可得 $\frac{\partial U}{\partial R} = -\frac{U}{R}$ ，并注意到现在是从外径向中心流动，用 $-U$ 代替 U 代入上式，可得：

$$Re_\infty \frac{U^2}{R} = \frac{p_\infty\Delta}{\mu U_\infty} \cdot \frac{\partial P}{\partial R} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \quad (17)$$

$$\text{引入 } \eta = \frac{z \cdot \sqrt{Re_\infty}}{\sqrt{R}}, \text{ 则 } \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\sqrt{Re_\infty}}{\sqrt{R}} \cdot U'(\eta),$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{Re_\infty}{R} \cdot U''(\eta), \quad (18)$$

依然引入压力 P 可以忽略边界层内横向变化的假设，则

$$R \frac{\partial P}{\partial R} = R \frac{dP}{dR} = \varphi(R) \quad (19)$$

式中 $\varphi(R)$ 为待定函数。

把式(18)、(19)代入(17)式，化简后得：

$$U^2(\eta) = \frac{p_\infty}{\rho U_\infty^2} \cdot \varphi(R) + U''(\eta) \quad (20)$$

它类似于平板附面层的布拉修斯问题⁽⁴⁾，利用级数方法求解，

$$U(\eta) = A_0 + \frac{A_2}{2!} \eta^2 + 2 \frac{A_0 A_2}{4!} \eta^4 + \frac{6A_2^2 + 2A_0 A_2}{6!} \eta^6 + \dots \quad (21)$$

[注2]以下为了书写方便，把 * 字去掉，它们为无量纲量。

$$\text{式中 } A_2 = A_0^2 - \frac{p_\infty}{\rho U_\infty^2} \cdot \varphi(R) \quad (22)$$

利用边界条件(5), 当 $Z = \pm \Delta/2$ 时,

$$U(\eta) = A_0 + \frac{A_2}{2!} \left(Re_\infty \frac{\Delta}{4r} \right) + 2 \frac{A_0 A_2}{4!} \left(Re_\infty \frac{\Delta}{4r} \right)^2 + \dots = 0 \quad (23)$$

目前我们使用负压流控装置流量不大, 检测板入口处速度 U_∞ 较小, 检测板间距 Δ 约 0.5 毫米左右, 雷诺数 Re_∞ 不大 (23) 式中 $\frac{1}{4!} \left(Re_\infty \frac{\Delta}{4r} \right)^2$ 项看作高一级小量, 因而可以被忽略。于是(23)式可化为:

$$A_0 + \frac{A_2}{2!} \left(Re_\infty \cdot \frac{\Delta}{4r} \right) = 0 \quad (24)$$

由流体质量连续条件 $Q = 2\pi\gamma \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} U dz$, 同样忽略高一级小量后可得:

$$A_0 + \frac{A_2}{2!} \left(Re_\infty \cdot \frac{\Delta}{12r} \right) = \frac{Q}{2\pi U_\infty \Delta r} \quad (25)$$

由(24)、(25)式解得:

$$A_0 = \frac{3Q}{4\pi \Delta U_\infty r}, \quad A_2 = \frac{6\mu Q}{\pi \Delta^3 (\rho U_\infty^2)} \quad (26)$$

把(22)、(26)式代入(19)式, 取积分限从 R_0 到 r , 对 r 积分后仍表为有量纲形式, 并设入口处压力近似为 0, 可得:

$$p = -\frac{6\mu Q}{\pi \Delta^3} (\ln R_0 - \ln r) - \frac{9}{32} \frac{\rho Q^2}{\pi^2 \Delta^2} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \quad (27)$$

$(R_0 \leq r \leq r_0)$

三、实验与理论计算结果比较

理论计算步骤于下: 低速气体流动, $t = 20^\circ\text{C}$ 时选取粘性动力系数 $\mu = 0.1808 \times 10^{-3}$ (泊), 密度 $\rho = 0.1228$ 公斤·秒²/米⁴(⁵), 测量出检测板外径 (R_0)、间距 (Δ) 和实际流量 Q , 代入(10)、(15)、(27)式可求出距中心为 r_i 的点对应的压力 p_i 。于是, 根据(10)式可求得一级近似解的压力 p :

$$p_i = -5.867 \times 10^{-2} \frac{Q^*}{\Delta^3} (\ln R_0 - \ln r_i)$$

$$-0.432 \frac{Q^{*2}}{\Delta^2} \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \quad (10')$$

根据(15)式, 可求得二级近似解的压力 p_i :

$$p_i = -5.867 \times 10^{-2} \frac{Q^*}{\Delta^3} (\ln R_0 - \ln r_i) - 0.6665 \frac{Q^{*2}}{\Delta^2} \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \quad (15')$$

根据(27)式, 可求得级数解的压力 p_i :

$$p_i = -5.867 \times 10^{-2} \frac{Q^*}{\Delta^3} (\ln R_0 - \ln r_i) - 0.972 \frac{Q^*}{\Delta^2} \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \quad (27')$$

式中 Q^* 为实测出的流量, 单位〔升/分〕, Δ 、 R_0 、 r_i 单位〔毫米〕, $\ln R_0$ 、 $\ln r_i$ 是指以 e 为底 R_0 、 r_i 的对数。以上各已式进行了量纲的换算, Q^* 、 Δ 、 R_0 、 r_i 均用无量纲数值代入, 求出的压力 p_i 单位是毫米水柱。

为了便于比较, 我们还列出雷诺数很小时, 文^[1]中求得线性化计算的公式:

$$p_i = -\frac{6\mu Q}{\pi \Delta^3} (\ln R_0 - \ln r_i) = -5.867 \frac{Q^*}{\Delta^3} (\ln R_0 - \ln r_i)$$

式中 Q^* 、 Δ 、 R_0 、 r_i 的求法与上面各式相同。

我们在印刷机上使用QB-40型风泵和射流实验室使用2xQ-3型真空泵进行实验。

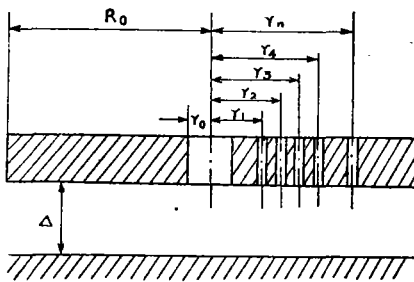


图 2

检测平板外径选取 $\phi 50\text{mm}$, 检测中心孔内径分别选取 $\phi 4$ 、 $\phi 3$ 、 $\phi 5$, 测缝间距 Δ 逐次调节, 从 0.172mm 变化到 0.80mm 。用U形测压管依次测量距检测中心孔为 r_i 的点的压力 p_i (如图2), 并利用湿式或浮子流量计测出流量 Q_i 。

现将其部分的实验结果与理论计算进行比较, 附表于下, 表1—

3 给出当检测板间距 Δ 固定时, 距中心为 r_i 的各点的压力分布。表4给出距中心为 r 等于 3.3mm 处的压力 p_i 随间距 Δ 增加而变化的情况。表5列出当 $\Delta = 0.18\text{mm}$, 孔径为 $\phi 3$ 、 $\phi 4\text{mm}$ 时一级近似解计算的的压力及实验数据。表5说明: 检测孔大小对信号强弱也有较大的影响。

表 1 $\Delta = 0.172mm, R_0 = 25mm, r_0 = 2.5mm, Q = 4.5$ 升/分

$r_i(mm)$	2.5	3.3	3.8	4.5	6.5	7.2	10.7
p_i (毫米水柱)							
p 线性解 ⁽¹⁾	-119.50	-105.08	-97.76	-88.98	-68.89	-64.60	-43.55
p 近似解 1	-166.31	-131.74	-118.18	-103.10	-75.41	-69.83	-45.61
p 近似解 2	-191.72	-146.21	-129.27	-110.77	-78.95	-72.67	-46.73
p 级数解	-224.82	-165.07	-143.71	-120.75	-83.56	-76.37	-48.19
p 实验	-182	-132	-122	-107	-83	-78	-55

表 2 $\Delta = 0.34mm, R_0 = 25mm, r_0 = 25mm, Q = 11.3$ 升/分

$r_i(mm)$	2.5	3.3	3.8	4.5	6.5	7.2	10.7
p_i (毫米水柱)							
p 线性解 ⁽¹⁾	-38.85	-34.16	-31.78	-28.93	-22.72	-21.00	-14.15
p 近似解 1	-114.44	-77.21	-64.75	-51.73	-33.25	-29.44	-17.48
p 近似解 2	-155.48	-100.58	-82.65	-64.11	-38.97	-34.02	-19.29
p 级数解	-208.99	-131.02	-105.96	-80.23	-46.41	-39.99	-21.64
p 实验	-124	-94	-84	-75	-54	-42	-27

表 3 $\Delta = 0.67mm, R_0 = 25mm, r_0 = 2.5mm, Q = 20.3$ 升/分

$r_i(mm)$	3.3	3.8	4.5	6.5	7.2	10.7
p_i (毫米水柱)						
p 线性解 ⁽¹⁾	-8.02	-7.46	-6.79	-5.33	-4.93	-3.32
p 近似解 1	-43.80	-34.86	-25.74	-14.08	-11.95	-6.09
p 近似解 2	-63.22	-49.74	-36.03	-18.83	-15.76	-7.59
p 级数解	-88.53	-69.10	-49.43	-25.02	-20.73	-9.55
p 实验	-63	-52	-41	-25	-21	-8

表4 $r = 3.3mm, R_0 = 25mm, r_0 = 2.5mm, \Delta = 0.50mm,$
 $Q = 15.7$ 升/分; $\Delta = 0.84mm, Q = 23.8$ 升/分

$\Delta(mm)$	0.172	0.34	0.50	0.67	0.84
p_i (毫米水柱)					
p 线性解 ⁽¹⁾	-105.08	-34.16	-14.92	-8.02	-4.77
p 近似解 1	-132.74	-77.21	-53.35	-43.80	-36.06
p 近似解 2	-146.21	-100.58	-74.21	-63.22	-53.06
p 级数解	-165.07	-131.02	-101.39	-88.52	-75.17
p 实验	-132	-94	-76	-63	-55

表5 $\Delta = 0.18mm$

$p_0(mm)$	1.5	2
p_i (毫米水柱)		
p 近似解 1	-538	-397
p 实验	-594	-437

四、讨 论

从表中可看出：当间距 Δ 较小时，按一级近似(10)式计算的压力与实验较靠近，它说明初始引入“当地平均速度”的假设计算总压力有一定的合理性。当间距 Δ 增大时，按一级近似解求出的压力与实验差距增大，它可以由方程(4)包含粘性力和惯性力的项影响较大，引入平均速度计算压力已经不适应实际情况来解析。虽然近似解的收敛性未加证明；然而二级近似计算已考虑到包括粘性力和惯性力的项的影响，使计算结果与实验数据十分靠近。本文的级数解，提供解流体动力学运动方程(4)的另一方法。由于中心孔附近流动状况较复杂，加上级数解选取的项较少，致使在中心孔附近计算的结果不太理想。但离中心孔稍远的点，由于流态基本属层流流动，求出的压力与实验较接近。

上述平行检测板气流流动的分析，可应用到印刷机上误页流控检测器及化工部

门某种测料器中去。我们以双张检测器为例。当检测板间距 Δ 过小时,从表1可看出,单张纸输入,元件已有-180毫米水柱以上的信号输出(中心孔 $r_0 = 2.5mm$ 的压力我们近似为元件的输出压力),以致出现误动作。如果间距过大,元件对双张信号不灵敏(输出太低),因此间距 Δ 调节在某一范围,提高检测精度起较大的作用,通常选取0.3—0.8毫米范围内。

我们以上的讨论完全适用于正压气源,即气流从中心沿矢径方向朝外运动的情况,只要将各计算公式改变一个符号即可。当雷诺数 Re 很小时,把(4)或(17)式忽略非线性项便得出书^[1]中空气式测微计的计算公式。

空气测微计是平行园板间流动的一个实用例子,如图3所示。 p_0 由稳压器保持给定值,流量 Q_0 因间距 Δ 的改变而变化,由此可确定出工件的误差是否在允许范围内。有不少实验表明,精密测量用的气动量仪压力 p_0 与流量 Q_0 的关系并非线性关系,考虑(4)或(17)式必须包含惯性力的非线性项的影响,特别是间距 Δ 较大时尤其需要。因此,以上的计算结果为气动量仪提供参考的算式。

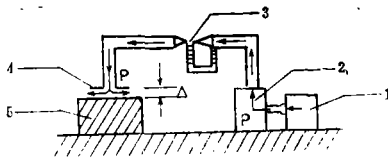


图 3

- 1—气源 2—稳压器 3—流量计
- 4—检测器 5—工件

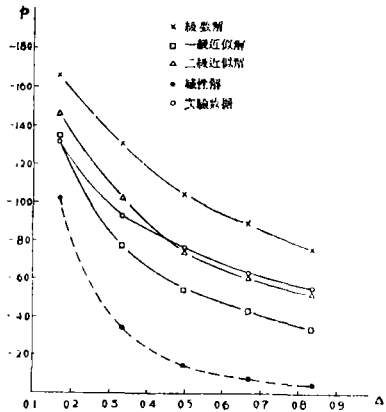


图 4

利用流体力学的原理和射流流动特性可以制成各种传感器^[6],书中介绍许多传感器的工作原理、性能和应用情况,然而这些传感器是在正压气源条件下工作的。对于负压气源流动状况和在此条件工作的传感器,因为它的流态很难保持一束流体所具有的特性,流场的速度、压力分布与正压气源有所不同,因而有些理论问题要重新进行研究。按照流控检测板的理论计算和实验数据,根据表4给出的数值,我们描绘出压力 p 和间距 Δ 的关系曲线,如图4所示。从图中可看出,只要检测板间距 Δ 限制在某一范围内, $p-\Delta$ 关系曲线可以用近似的直线来代替,这一线性段是很有用的。我们可仿照喷嘴—挡板型传感器或空气测微计应用到测量工件的尺寸、纸张的厚薄、料位的高低等方面去。有些印刷厂正在研制选纸机,用负压流控传感器进行分选纸张,检查其质量提供了新的途径。它与光电控制选纸器比较有它的独

特优点例如不受环境光源、温度、电压波动和放大电路的稳定性等影响，且结构简单、成本低廉。

为了提高负压流控元件的稳定性，我们还利用 $p-\Delta$ 曲线某一范围的线性特性，引用波纹膜片与平板检测装置组成的比例调节系统，自动调节元件内气源压力，这种元件已在印刷机上使用了。同时在负压膜片式逻辑元件的设计中，我们探讨检测平板与膜片之间间距 Δ 的变化引起局部阻力的变化，作为元件发讯的理论依据之一。例如负压膜式双稳元件，如图 5 (只画出半边)，把控制孔 4 瞬间封闭，元件气室内真空度提高，调节阀座 2 与膜片 1 之间间距 Δ 大为减小。这时即使再把控制孔放空，由于间距 Δ 很小，压力 p 负值大，而另一侧负值小，由压力差使膜片继续靠这一侧，讯号孔输出保持不变，起到记忆作用。这一切换机理的讨论，涉及到负压气流在检测板间流动的分析。

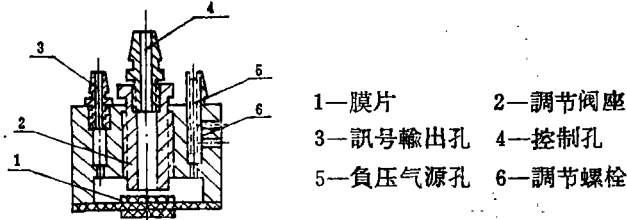


图 5

平行板间气流流动的另一应用例子是气动二极管。气动二极管简化模型中把气流流动分成一个强汇流及一个弱涡流。强汇流部分的计算可参考本文计算的一些结果。

本文的结果还可应用于计算平行平板间层流流动的阻力 (流阻) 和平板所受的作用力。

参 考 文 献

- [1] 張也影等, 水力学与水力机械(上册), 人民教育出版社, 1961.
- [2] И.П.洛强斯基, 液体与气体力学, 林鸿藻等译, 高等教育出版社, 1959.
- [3] W.F.哈依斯, C.提克, 旋涡式排气的双稳元件及比例式流体放大器的阻抗匹配, Fluid Amplification Symposium 第三次会议论文集, 331—359.
- [4] И.П.洛强斯基, 层流边界层, 王殿儒等译, 国防工业出版社, 1965.
- [5] 柴志明编, 实用机械工程手册(下册), 1956.
- [6] 原田正一、尾崎省太郎, 射流工程学, 科学出版社, 1977.