

第41篇 流体控制元件及装置

主编单位:

上海工业自动化仪表研究所

合稿人:

刘建侯

特约编辑:

任克清

CAI/2414

常用符号表

<p>A——面积</p> <p>a——位差</p> <p>B (或 b)——射流宽度</p> <p>C——控制端或输入端</p> <p>D (或 d)——直径</p> <p>F——有效面积</p> <p>f——频率</p> <p>G——重量</p> <p>H (或 h)——射流元件厚度</p> <p>L——主通道出口到分流劈距离</p> <p>l——长度</p> <p>M (或 m)——质量</p> <p>N——消耗功率</p> <p>n——多变指数</p> <p>o——输出端</p> <p>P_c——切换压力或控制压力</p> <p>P_i——测量压力</p> <p>P_o——输出压力</p> <p>$P_{o\max}$——最大输出压力</p> <p>P_s——能源压力</p> <p>P_{sp}——给定压力</p> <p>Q_c——切换流量或控制流量</p> <p>Q_o——输出流量</p> <p>$Q_{o\max}$——最大输出流量</p>	<p>Q_s——能源流量</p> <p>R——流阻</p> <p>R_r——雷诺数</p> <p>R_g——气体常数</p> <p>r——半径</p> <p>S——能源供给端</p> <p>T——绝对温度</p> <p>u——流速</p> <p>v——线速度</p> <p>V——体积</p> <p>W_c——射流元件控制道宽度</p> <p>W_o——射流元件输出道宽度</p> <p>W_s——射流元件主通道宽度</p> <p>W_v——射流元件排流通道宽度</p> <p>α——射流元件张角</p> <p>γ——重度</p> <p>Δp——差压</p> <p>δ——射流元件输出口间距</p> <p>η_p——压力恢复</p> <p>η_o——流量恢复</p> <p>μ——动力粘性系数</p> <p>ν——运动粘性系数</p> <p>ρ——密度</p>
---	---

第1章 概 论

1 流控技术概述

流控技术是以流体作为工作介质，利用流体的动力现象（如流体本身或流体与流体之间的相互作用）或构件的机械运动来改变或控制流体流动的一门技术。作为控制元件，它主要又可分为无可动件的射流元件和有可动件的气动逻辑元件。

射流元件就是利用流体本身或流体与流体之间的相互作用来改变或控制流体流动的元件。

气动逻辑元件就是利用气体作为工作介质，通过构件的机械运动来改变或控制气体流动作数字逻辑动作的流体控制元件。

根据控制元件的不同功能，它们可以组合成不同要求的逻辑线路和运算放大线路，并和检出器、传感器、转换器、执行器等配套器件一起构成数字和模拟装置，对生产过程实现自动测量和控制。

2 流体控制的一些基本概念

2.1 自由射流

2.1.1 自由射流及其卷吸现象

一束从喷嘴中喷射出来的流体叫做“射流”。从喷嘴向半无限空间喷出的射流，不考虑界壁影响，通常称为自由射流。在大多数射流元件中，从喷嘴喷出的流体都是进入与射流有相同密度的流体介质中，这种射流称为淹没射流。对于深宽比在5以上的矩形喷嘴中喷出的射流一般看作二维自由射流。从圆形截面喷嘴喷出的射流属三维自由射流。

从喷嘴喷出的射流，由于流体的粘滞力，射流

内的流体和周围流体之间产生较大的速度梯度，把周围流体卷吸进去，增加了射流的流量，加宽了射流的宽度 b ，但降低了射流的速度，越往下游，射流边界越宽，流量越大，流速越小。于是，在自由射流内形成两个不同的区域，如图41.1-1所示，这种现象叫射流的卷吸现象。喷嘴中心线上速度 u_{max} 和喷出时的速度 u_s 相等的区域（CBEF）称为过渡区。在过渡区以下，喷嘴中心线上的流速逐渐减小，（FEGH）所围部分称为扩散区。在过渡区内，有一个不受流体粘滞力影响和卷吸作用干扰的核心区（CBD），核心区内的流速与喷嘴喷出时的流速相等。核心区的长度 X_0 与喷嘴形状、流体雷诺数有关，一般约为喷嘴宽度的5~8倍。射流宽度 b 和中心速度 u_{max} 与离喷嘴距离 X 的关系如表41.1-1所示。

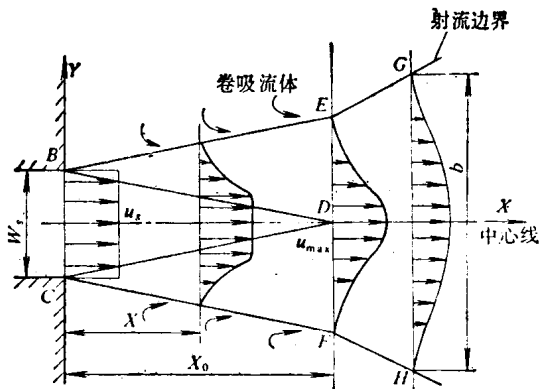


图41.1-1 自由射流的速度分布

W_s —喷嘴宽度 b —射流宽度 u_s —喷嘴出口处 ($X=0$) 的速度 u_{max} —喷嘴中心线上的速度 X_0 —核心区长度 X —离喷嘴距离

表41.1-1 射流宽度 b 及中心速度 u_{max} 离喷嘴距离 X 的关系

关系式	流动性质	流动状态	
		二 维	三 维
	层 流	$b = X^{2/3}, u_{max} = X^{-1/3}$	$b = X$ $u_{max} = X^{-1}$
	紊 流	$b = X, u_{max} = X^{-1/2}$	

2.1.2 自由射流的特性

自由射流研究的基本问题是这种流动的流场结构和速度分布问题。方法主要是根据附面层理论，对纳维—斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程简化，引入边界条件求解。对于紊动剪应力的不同假设可得出不同的理论模型。它的主要特征是：

1) 由于从喷嘴向空气中喷射出来的射流处于压力均为大气压的流场中，所以这种流动是等压流动。

2) 因为是等压流动，所以从喷嘴喷出的射流把周围流体卷吸而作功，但并不对外做功。因此它服从动量守恒定律。若自由射流具有动量 J ，一般由下式给定：

$$J = \int \rho u^2 dA = C^{(1)} C_2$$

对于二维射流，由下式给定：

$$J_z = \rho_z u_z W_z h$$

$$J_x = C_1 \rho u_{max}^2 b h$$

由于 $J_z = J_x$ 得 $u_{max} = C_2 \frac{1}{\sqrt{X}} \sqrt{\frac{JX}{\rho}}$

$$= C_2 u_z \frac{1}{\sqrt{b}}$$

对于三维射流， $J = C \rho u_{max}^2 b^2$

$$u_{max} = C_2 \frac{1}{b} \sqrt{\frac{J}{\rho}} = C_2 u_z \frac{1}{X}$$

式中 J_z ——喷嘴出口时的动量

J_x ——离喷嘴距离 X 时的动量

ρ ——密度

C, C_1, C_2 ——常数

在二维射流中，射流的中心速度和离开喷嘴距离的平方根成反比；在三维射流中，中心速度和距离成反比。

3) 速度分布模型较多，这些模型的设定目的都在于使速度分布函数更接近于实际，并便于计算元件的有关特性。特别是过渡区的速度分布，更直接影响元件的输出性能。为了尽可能正确地表示流速分布，根据射流流速分布的实际测量结果，考虑表示各种流速分布的函数形式，介绍下面三种主要射流模型：

(1) 哥特勒 (Görtler) 模型 这是目前普遍采用的一种模型，对不可压缩二维射流的定型区

速度分布来说

$$u = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{J\sigma}{\rho X}} \operatorname{sech}^2 \left(\frac{\sigma Y}{X} \right)$$

式中 σ ——扩散系数，由实验决定，一般取 $\sigma = 7.57$

Y ——垂直于射流中心线到计算点的距离

X ——沿射流中心线自喷嘴处起算到计算点的距离

这种模型的主要问题是假设喷嘴出口宽度作为零而求得的，考虑射流从喷嘴喷出后还有一个过渡段的问题，射流的宽度是无限的，故不适合实际的射流。

(2) 阿尔伯特森 (Albertson) 模型 速度分布按高斯分布，即取流速为射流中心速度的0.605的位置 y^* 为标准，得流速分布为：

$$u_x = \exp \left\{ - \frac{\left(Y + \sqrt{\pi} C_1 \frac{X}{2} - \frac{W_s}{2} \right)^2}{2 (C_1 x)^2} \right\} \quad (\text{过渡区})$$

$$\frac{u_x}{u_s} = 1 \quad (\text{核心区})$$

$$\frac{u_x}{u_s} = \left(\frac{1}{\sqrt{\pi} C_1} \frac{W_s}{X} \right)^{1/2} \exp \left\{ - \frac{1}{2 C_1^2} \frac{Y^2}{X^2} \right\}$$

(扩散区)

C_1 由实验决定。对 $u_s = 12 \sim 55 \text{ m/s}$ 的空气射流， $C_1 = 0.109$ 。

(3) 查尔曼逊 (Zalmanson) 模型^{〔1〕〔2〕〔4〕}

对于三维射流的速度分布函数为：

当 $X < X_0$

$$\frac{u_x}{u_s} = \left[1 - \left(\frac{Y - 0.5W_s + 0.1x}{0.252x} \right)^{3/2} \right]^2$$

(过渡区)

当 $x > x_0$

$$\frac{u_x}{u_s} = \left\{ 1 - \left[\frac{Y}{(0.5W_s + 0.152X)} \right]^{3/2} \right\}^2 /$$

$$\left[0.3 + \left(\frac{0.14x}{W_s} \right) \right] \quad (\text{扩散区})$$

式中 X_0 ——核心区长度

u_x ——沿中心线方向离喷嘴距离 X 处的速度
无论用什么模型，射流在各截面的流量、能量都可以归纳为下列公式：

流量公式 $Q = \int_0^b u dY$

当 $X < X_0$ 时, $\frac{Q}{Q_0} = 1 + \alpha \frac{X}{X_0}$

当 $X > X_0$ 时, $\frac{Q}{Q_0} = (1 + \alpha) \left(\frac{X}{X_0}\right)^{1/2}$

能量公式 $E = \int_0^b u^2 dY$

当 $X < X_0$ 时, $\frac{E}{E_0} = 1 - \beta \frac{X}{X_0}$

当 $X > X_0$ 时, $\frac{E}{E_0} = (1 - \beta) \left(\frac{X}{X_0}\right)^{1/2}$

式中系数 α 、 β 见表41.1-2。

表41.1-2 各种模型时的系数 α 、 β

模 型	Albertson	Simson	余 弦	多项式
$1 + \alpha$	1.414	1.364	4/3	1.346
$1 - \beta$	0.826	0.821	5/6	0.830

〈注〉 Simson、余弦和多项式模型详见参考文献[1][2]。

过渡区长度 X_0 可由实验求出。按 Albertson 模型, 若给定 $X_0 = 5.2W_s$, 而 X_0 又因雷诺数而异。当 $Re = 10000 \sim 100000$, X_0 在 $5 \sim 7W_s$ 范围内。如果 X_0 变化, b/x 也变化, 自由射流的扩展角也随着变化。对不同的雷诺数, 求过渡区的长度, 其结果如图41.1-2所示。图41.1-3是射流流速分布示意图。

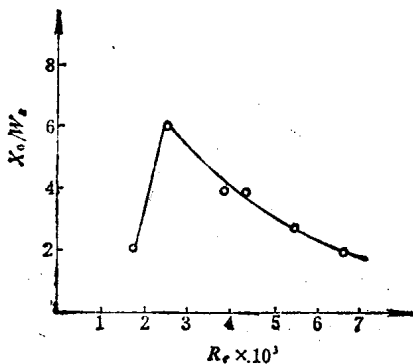


图41.1-2 过渡区的长度

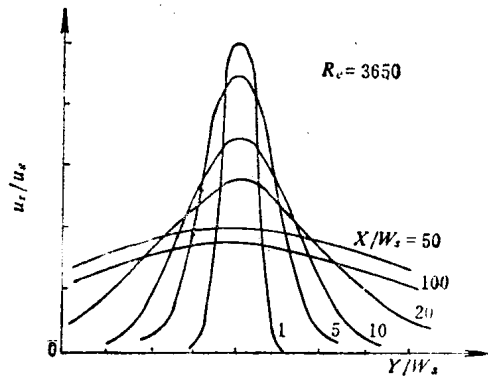


图41.1-3 射流流速分布示意图

2.2 附壁射流

2.2.1 射流的附壁效应

当射流从喷嘴喷出时, 如果把自由射流的流场限制在喷嘴两侧由壁面所围成的狭小空间中, 此时, 射流的卷吸作用将把两侧的流体卷走形成附加流动。设两壁面到喷嘴距离 a_1 、 a_2 不相等 (如图41.1-4中 $a_2 > a_1$), 使主射流两边在同一时间卷吸的外界流体不相等, 距离小的左侧不容易补充流体, 右侧补充流体较容易, 因而造成左侧压力降低, 使主射流两侧产生一个微小压力差 ΔP , 在这压差的作用下使射流进一步向左偏转, 左侧流体补充更加困难, 压力更低, 压差更大, 直至主射流完全贴附到左侧壁稳定流动为止。这种现象称为射流的附壁效应。

在没有外加信号的情况下, 主射流在两侧壁中任一侧壁能稳定附壁的, 称为双稳。一般情况下, 元件的几何尺寸和流动状态不可能完全对称, 即使元件几何尺寸做到理想的对称, 但由于流动的随机性, 主射流仍然会先附

到一个侧壁上。当加入信号后会改变射流附壁状态 而取掉信号后仍附于原来一侧的, 称为单稳。是双稳还是单稳, 要根据两侧壁的相对位置, 即壁与喷嘴的相对角度及壁的位差, 以及低压旋涡区与外部

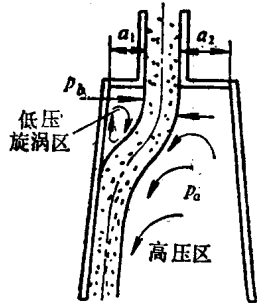


图41.1-4 射流的附壁现象

的连接孔的阻抗大小等而定。

2.2.2 附壁射流的结构^[2]

1) 附壁射流模型分析的假设条件

(1) 射流动量保持一定, 忽略上下盖板的摩擦, 考虑射流是不可压缩的二维流动;

(2) 喷嘴出口的速度分布是均匀的, 即虽存在低压旋涡区, 但并不影响射流的速度;

(3) 在低压旋涡区的压力 p_0 是均匀的, 射流中心线近似于半径为 r 的圆弧, 因此 $p_0 - p_b = \frac{J}{r}$, 式中 J ——射流动量。

(4) 在附壁射流中心线的垂直面上的速度分布与紊流的二维自由射流相当;

(5) 在附壁射流中心线上的静压等于大气压, 不考虑射流内的静压分布;

2) 附壁射流分析的二种模型

(1) 附壁点模型^{[1], [2]} 假设射流在附壁点 B 与侧壁以角度 θ 进行碰撞, 见图41.1-5, 恰好是自由射流与侧壁成角度为 θ 的碰撞, 由动量平衡方程式得附壁点模型的基本公式:

$$J \cos\theta = J_1 - J_2$$

式中 J ——附壁点射流动量

J_1 ——沿侧壁向下游的流动动量

J_2 ——从附壁点沿侧壁回流向低压旋涡区内的流动动量

(2) 控制面模型^{[1], [2]} 以图41.1-5中 ABC 所围部分作为控制区, 射流在压差 ΔP 作用下附壁, 同时, 弯曲的射流具有一定的质量而产生离心力(惯性力), 要使射流稳定地附壁流动, 这两个力

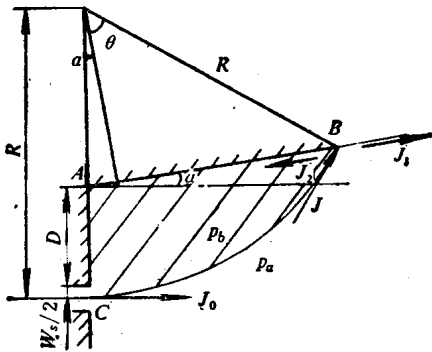


图41.1-5 附壁射流分析模型

J —射流在附壁前动量 p_0 —外气压 p_b —低压旋涡区压力 BC —射流中心线

必须相等。由附壁射流的运动方程可得到控制面模型的基本公式:

$$J \cos\theta = J_1$$

上述二种模型的差别在于, 附壁点模型中不考虑压差 $p_0 - p_b$, 而控制面模型中虽考虑这一压差, 但不考虑卷吸作用向低压旋涡区传送的动量 J_2 。

2.3 射流互作用

射流的互作用是流控流体力学中最具代表性的一个问题。由射流互作用而产生的偏流在很多地方得到应用, 如偏流型比例元件(见图41.1-6), 当不加控制射流时, 主射流不受干扰, 两个接受通道均匀地接受压力 $p_{01} = p_{02}$; 而当二控制通道有压差为 ΔP 的控制流输入时, 由于压差作用和动量互作用而使射流发生偏向, 由偏向而产生射流离心力效应, 以加剧(或减弱)射流的偏向, 最后在受通道得到与输入压差(或流量)成比例的输出压差(或流量)。为了考虑元件几何参数之间关系, 便于分析, 对主射流的偏向往往只考虑动量平衡关系, 即

$$J_c = W_c h p_c$$

$$J_s = W_s h p_s$$

$$\tan\theta = \frac{J_{c1} - J_{c2}}{J_s} = \frac{W_c}{W_s} \frac{\Delta P_c}{p_s}$$

式中 h ——元件厚度

J_c ——控制通道射流的动量

J_s ——主喷嘴射流的动量

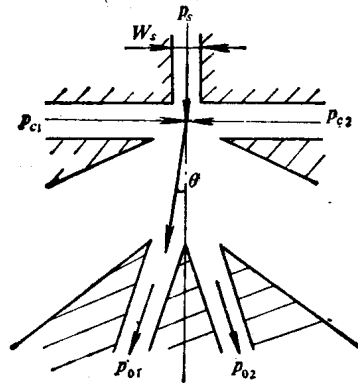


图41.1-6 偏流型比例元件偏向原理

在实际设计和分析元件时, 为了达到性能最佳化要求, 必须把压差、动量和离心力三种因素均考虑在内, 对控制口、互作用区、侧壁形状、深宽

比、控制偏压、排空效应、接受口以及主射流本身等方面进行详细考察研究。利用射流相互作用原理不仅可以制成比例放大、与门、等价等控制元件，而且还可以构成射流阀和传感器等。

2.4 涡流和旋动射流^{[2][3]}

涡流和旋动射流在流控技术中有特别应用的场合。在各种射流元件中，绝大多数类型对主射流起分流作用，而涡流阀能对主射流起节流作用，因而有功率控制的作用，也可用作传感器、二极管等。

2.4.1 涡流流动原理 (见图41.1-7)

把一股或多股切向射流与主射流碰撞，产生旋涡流；由于离心力关系，流程增长，流阻增大，涡流的中心速度加快，压力降低；利用这一现象可以制成涡流放大器、涡流二极管、涡流阀和涡流式位置传感器等。由于这些元件中形成的是一种三维附面层流动，流动情况比较复杂，因此目前只有一些半经验性的流动分析方法。

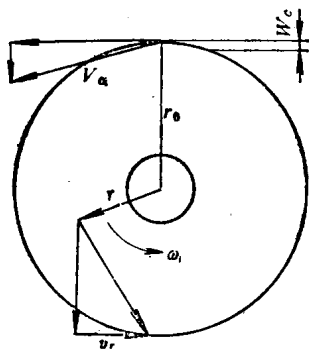


图41.1-7 涡流室内的流动
 v_r —旋涡半径上的速度 ω —旋转角速度
 W_c —流入口半径方向的宽度

为简化起见，假设涡室内是二维轴对称非粘性流动，则对于旋涡半径 r 上的压力分布可简化为^[2]：

$$p_0 - p_r = \frac{\rho v_0^2}{2} \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^2 - 1 \right]$$

式中 v_0 ——旋涡容器最外侧的流速

r ——旋涡半径

r_0 ——最外侧旋涡半径

p_0 ——最外侧压力

p_r ——旋涡半径为 r 上的压力

当流入速度沿切线方向时，设流入口半径方向

的宽度为 W_c ，则有：

$$p_0 - p_r = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^2 - 1 \right] \left[1 - \left(\frac{W_c}{2\pi r_0} \right)^2 \right]$$

如果用 p_s 表示供给压力， p_c 表示控制压力，则控制流路内的流速 v_c 为：

$$v_c = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_c - p_s)} \quad (\text{当 } p_c > p_s \text{ 时})$$

若主射流喷嘴的宽度用 W_s 表示，则由于控制流的注入而产生的旋涡器的最外侧流速为：

$$v_0 = \frac{W_c}{W_s + W_c} v_c = \frac{W_c}{W_s + W_c} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_c - p_s)}$$

2.4.2 旋动射流模型

旋动射流通常由旋动发生器产生，主要作用方式有切向注入式和斜叶导流式。我国通常采用切向注入式。具体结构有由内部转子转动而产生旋动射流的涡流转速传感器(见图41.1-8)。它的基本原理是，当转子处于静止状态时，气流从外气室由多孔环经涡室均匀的以径向直线流的形式从输出口输出压力；当转子旋转时，在涡室中产生一个切向速度分量，如果涡室内的流动作为非粘性流求解，根据纳维—斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程：

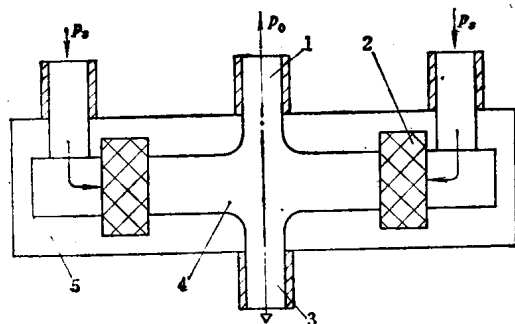


图41.1-8 涡流转速传感器

1—输出口 2—多孔环 3—排气口 4—转子 5—本体

$$\text{对于 } r \text{ 方向 } \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + F_r$$

$$\text{对于 } \theta \text{ 方向 } \frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta}$$

$$+ V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_r V_\theta}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + F_\theta$$

$$\text{对于 } z \text{ 方向 } \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z$$

式中 下标 r 、 θ 、 z 为空间直角坐标系的三个方向, V_r 、 V_θ 、 V_z 为三个方向的速度分量。

由于考虑涡流传感器内的流动状态处在轴对称, 近似的无轴向流动, 因此 Navier-Stokes 偏微分方程退缩成一组 Navier-Stokes 的常微分方程组。假定在 z 轴上线性吸收的定常二维轴对称的条件为:

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial}{\partial \theta} = 0 \quad \frac{\partial}{\partial z} = 0$$

$$V_\theta = V_\theta(r), \quad V_r = V_r(r), \quad p = p(r)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \rightarrow \frac{d}{dr}$$

则得到方程 $v_r \frac{dv_\theta}{dr} + \frac{v_r v_\theta}{r} = F_\theta$

连续性方程为 $\frac{dv_r}{dr} + \frac{v_r}{r} = 0$

将外力考虑为柯利奥莱力 $F_\theta = -2\omega v_r$

若为径向流入, 当 $r = R$, 有 $v_\theta = 0$, 可推导得:

$$v_\theta = \omega \left(\frac{R^2}{r} - r \right)$$

考虑到涡室内, 在上下盖板面上由于粘性摩擦作用而存在着边界层, 这样可用下式表示:

$$V_\theta = \omega \left(\frac{R^2}{r} E - r \right)$$

式中 v_θ ——切向速度 m/s

ω ——旋转角速度 rad/s

R ——涡室半径 mm

r ——径向某一点的涡室半径 mm

E ——粘性效率, 其与流量(Q)、流路高度(2*b*)、运动粘性系数(γ)、涡流半径

R 、 r 有关的系数

当给定一 r 值时, 切向速度 v_θ 与旋转角速度 ω 成正比。对任意一个给定的 ω 值, r 越小, v_θ 值越大。即越接近中心处, 切向速度的值越大。所以, 这股流体经过涡室后就成为螺旋形的管流(旋动射流)输出。

这种旋动射流由于离心力的作用比无旋动射流扩散快, 对周围空气的卷吸量也大, 因而沿轴线方向上的速度分量衰减更为显著, 输出管内压力降低。所以, 当转子的转速增加时, 气流流动加快, 轴向流速降低, 输出压力降低。利用这一现象可以制成涡流转速传感器等。

第2章 射流元件及装置

技术的特点

及其所采用的器件具有一些独特的优

较小。能耐高温、低温、冲
辐射, 并能在爆炸性的气氛

在同一介质中工作,

要中间转换。

测能力和能进行

, 既起控

制作用又起执行作用, 在某种意义上已引起机械结构的改革。

5) 射流系统结构简单, 易于维修, 只要保证工作介质净化, 使用寿命可很长, 并能获得极高的可靠性。

但与电子技术比较, 射流技术有下列主要缺点:

1) 信号传递速度较慢, 长距离传送时存在信号衰减和相移的问题, 管路连接效率低, 遥控不方便。

2) 射流装置缺乏关断能力, 因而在间歇操作和周转时间长的系统中, 耗气量大。对气源净化要

求很高。

2 元件设计要点

流控流体力学及其控制理论是一门正在形成的新学科。由于流动状态的变化,相互作用的产生以及作用机理都发生在特定形状和尺寸较小的元件和管道中,这些器件内部流动较特殊、复杂,目前还缺少一套完整的元件设计方法。根据国外文献介绍及国内有关单位多年探索经验,本篇仅介绍几种主要设计方法的要点。

2.1 凑试法

1) 通过对典型元件研究的经验,选择具有一定功能,性能参数比较好的元件作为设计的原型元件。

2) 根据所需元件的性能要求,经过定性分析,修改典型元件几何参数之间关系,设计新元件,试制样品。

3) 通过性能测试,反复修改参数,最后确定符合需要性能的元件几何参数。

2.2 正交实验法

1) 选择有关典型元件并确定元件设计的主要几何参数,一般取3~4个因素。

2) 根据典型元件几何参数之间关系或元件计算机辅助设计的数据,确定主要几何参数的取值范围,一般取3~4种。

3) 查正交设计表,确定试验次数和参数搭配关系,进行设计。

4) 按所需指标要求测试各组元件的性能,进行正交分析,选择最好的参数搭配作为所需元件的几何参数。

2.3 计算机辅助设计法^[11]

1) 根据动量方程、流量方程和运动方程,列出元件有关流体力学和几何参数之间关系的方程式。

2) 按性能要求确定元件的指标函数。

3) 通过计算机解出有关几何参数。在指标函数为最佳的前提下,根据有关参数,设计元件并进行性能测试。

4) 在一般情况下,还可进行正交实验设计,

对局部参数进行修正,以达到所需的较满意的效果。

无论数字元件、模拟元件以及功率射流元件都可以采用上述三种方法。

3 射流逻辑元件

射流逻辑元件是用来完成逻辑动作的元件。它用流体(气体、液体)作介质,并利用流体流动的物理现象来工作。它的主要作用是用控制输入信号来变换输出流,与配套器件配合使用就能组成各种射流自动控制装置和系统。

3.1 元件分类、结构、性能特点和主要用途

射流逻辑元件按其主要作用原理可以分为附壁元件、动量互作用元件、紊流元件和聚壁元件等。其典型结构如图41.2-1所示。

从射流流动的一些主要物理现象可以看出,要构成一个射流逻辑元件还必须具备若干外界条件。以附壁射流元件为例,射流从喷嘴喷出后要进入一个腔室(如图41.1-4),这个腔室由两块附壁面及上下两块夹板包围起来,边壁位置由两个因素:离喷嘴的距离 α (位差)以及边壁与喷嘴中心线的夹角 α (张角)来决定。正是由于边壁的存在才使射流有壁可附,这是射流附壁的必要条件。

射流附着壁面上流动,是由于射流本身的卷吸现象和边壁的存在,使射流的二边产生压差而引起的。因此,我们要改变射流的附着状态,只要改变压差就可以了。若在二边壁上游处分别开二小孔,使流体可以补充到低压涡旋区,在压力、流量足够大的条件下就能使附壁流改变流动方向,这样就造成了逻辑元件所具备的切换条件,如图41.2-2所示。

射流自喷嘴喷出后是要扩散的,因此附壁流可能有一部分要扩散到非附壁边去,为了解决这一矛盾,在二壁之间针对喷口的中心线上,放一个分流劈,构成二条输出通道,使输出状态互不干扰。但在此情况下,当有流体流动的输出口接上其他器件时,流体无路可走,就会向另一边的输出口流去。一般解决的办法是在输出通道上游处各开一个小孔,供多余的流体排出,这个孔称为排流孔。图41.2-1 a)就是一个典型的附壁双稳元件结构简图。各种射流逻辑元件功能、性能特点、典型线路

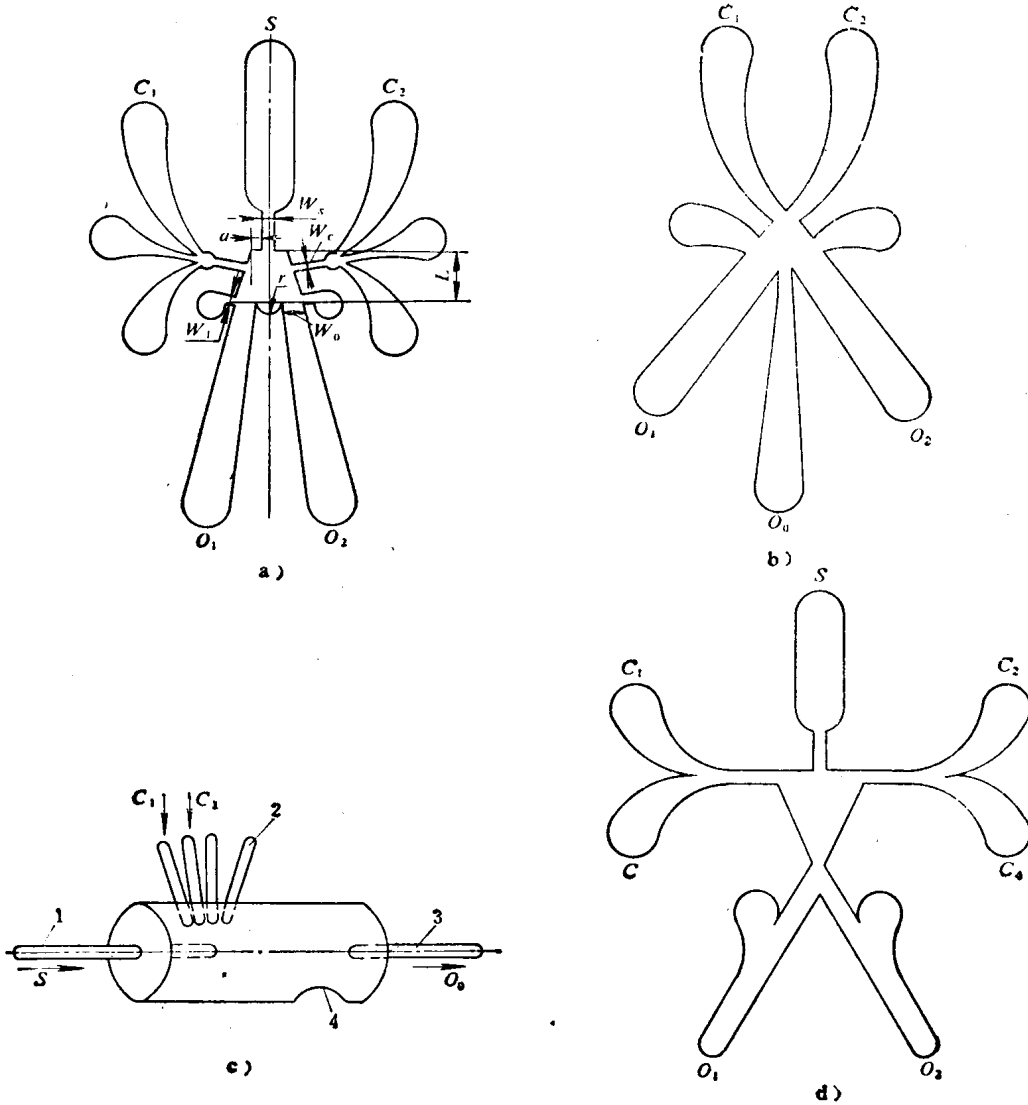


图41.2-1 射流逻辑元件的典型结构简图

a) 附壁双稳元件 b) 动量相互作用与门元件 c) 管状紊流元件 d) 聚壁双稳元件

和主要用途见表41.2-1至表41.2-4。

其它元件如振流元件、引流元件等目前极少采用，本篇不再介绍。

3.2 元件性能指标和测试方法

3.2.1 性能指标

1) 压力恢复 η_p 元件为盲端输出 ($Q_0 = 0$) 时，最大输出压力(表压力，下同) p_{0max} 与能源压力 p_s 之比。它是一个无量纲的百分数。

$$\eta_p = \frac{p_{0max}}{p_s} \times 100\%$$

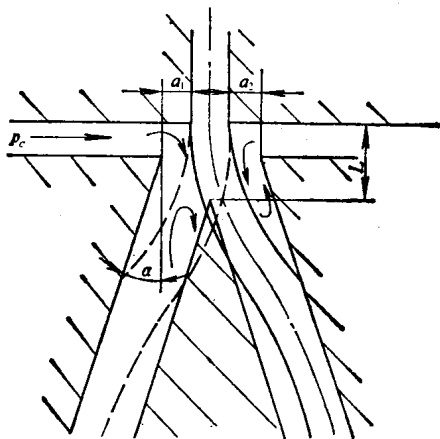
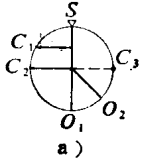
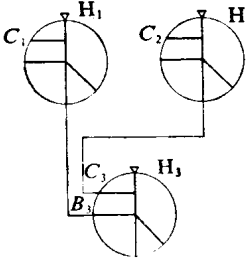
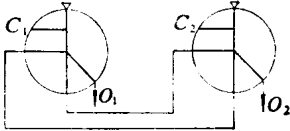
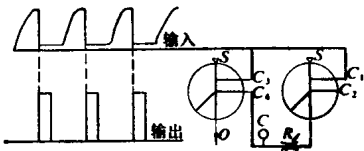
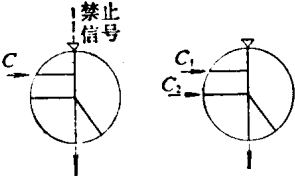
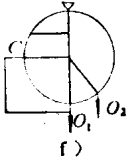
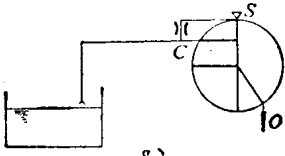


图41.2-2 射流的切换

p_c —控制压力 a_1 、 a_2 —位差 L —劈距 α —张角

表41.2-1 各种附壁元件

元件类型	符号和真值表	典型线路和简单应用	性能特点和用途																				
或	 <p>a) 或非元件</p> <p>正压切换</p> <table border="1" data-bbox="290 660 476 895"> <tr> <td>C_1</td> <td>C_2</td> <td>O_1</td> <td>O_2</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </table>	C_1	C_2	O_1	O_2	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	 <p>b) 与门</p> <p>$I_0 = C_1 C_2$</p>  <p>c) 双稳</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) 具有或门和非门的双重作用 2) 输出具有对偶性 3) 几何形状不对称, “非”侧位差较小 4) 切换方式分正压切换和负压切换 5) 分流劈形状有尖劈和凹劈 6) 元件的压力恢复约为40% P_s, 流量恢复大于(或等于)100% Q_s 7) 输出端一般可带同类元件3~4个, 对负载不敏感 8) 各控制口串气压力小于4% 9) 可以组成与门(b)、双稳(c)、整形线路(d)、禁门(e)和振荡器(f)等 10) 可直接用来控制液位如(g)所示
	C_1	C_2	O_1	O_2																			
0	0	1	0																				
1	0	0	1																				
0	1	0	1																				
1	1	0	1																				
非	<p>负压切换</p> <table border="1" data-bbox="271 952 501 1091"> <tr> <td></td> <td></td> <td>O_1</td> <td>O_2</td> </tr> <tr> <td>偏压孔</td> <td>不堵死</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>C_3</td> <td>堵死</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </table>			O_1	O_2	偏压孔	不堵死	1	0	C_3	堵死	0	1	 <p>d) 整形线路</p>  <p>e) 禁门</p>  <p>f) 振荡器</p>  <p>g) 液位控制</p>									
		O_1	O_2																				
偏压孔	不堵死	1	0																				
C_3	堵死	0	1																				

(续)

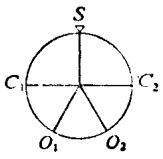
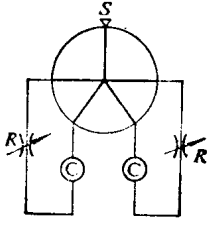
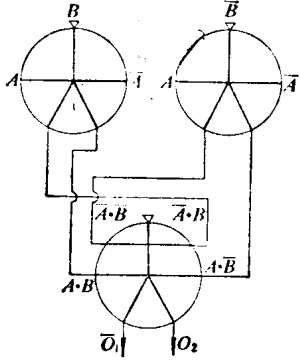
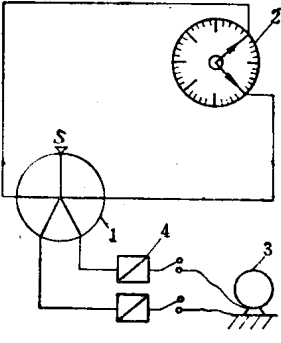
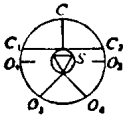
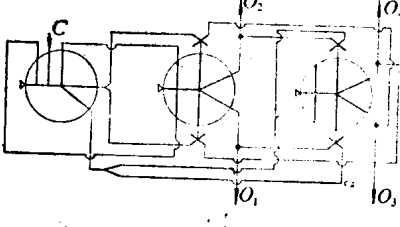
元件类型	符号和真值表	典型线路和简单应用	性能特点和用途																														
双 稳	 <p style="text-align: center;">h) 双稳元件</p> <table border="1" data-bbox="224 649 417 885"> <thead> <tr> <th>C₁</th> <th>C₂</th> <th>O₁</th> <th>O₂</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	C ₁	C ₂	O ₁	O ₂	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	 <p style="text-align: center;">i) 振荡器</p>  <p style="text-align: center;">j) 数字检频线路</p>  <p style="text-align: center;">k) 压力控制线路 1—双稳元件 2—压力检出器 3—泵 4—气电转换器</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) 几何形状对称 2) 分流劈形状有尖劈和凹劈 3) 元件的压力恢复约为40% P_s，流量恢复大于(或等于)110% Q_s 4) 输出端一般可带同类元件4~5个 5) 各控制口串气压力小于4% 6) 可以组成振荡器(i)，数字式检频线路(j)等 7) 可直接用作压力控制(k) 										
C ₁	C ₂	O ₁	O ₂																														
0	0	1	0																														
1	0	0	1																														
0	0	0	1																														
0	1	1	0																														
计 数 触 发	 <p style="text-align: center;">1) 计数触发元件</p> <table border="1" data-bbox="185 1665 422 1829"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>O₁</th> <th>O₂</th> <th>O₃</th> <th>O₄</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	C	O ₁	O ₂	O ₃	O ₄	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	 <p style="text-align: center;">m) 计数触发线路</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) 可由二只附壁双稳元件或一只附壁双稳一只聚壁双稳元件或二只双稳一只或非元件(m)连接而成 2) 每输入一个脉冲信号，元件的输出方向就改变一次 3) 可组成各种计数线路(参见3.3节)
C	O ₁	O ₂	O ₃	O ₄																													
0	0	0	1	0																													
1	0	1	0	1																													
0	0	1	0	1																													
1	1	0	1	0																													
0	1	0	1	0																													

表41.2-2 各种动量相互作用式元件

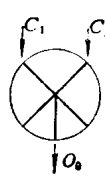
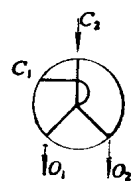
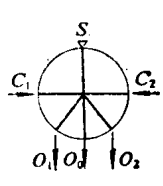
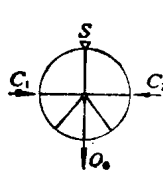
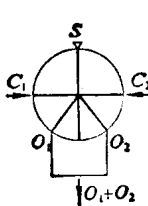
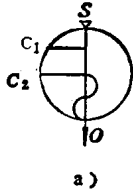
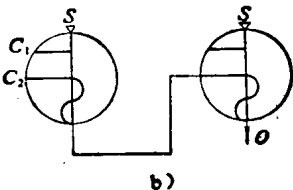
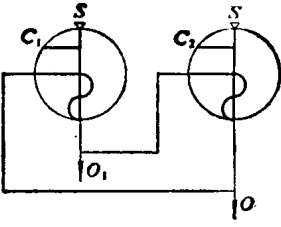
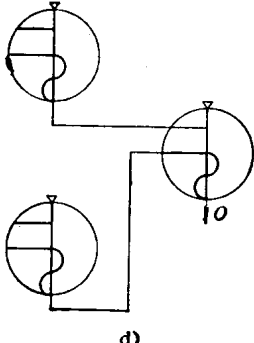
元件类型	符 号	真 值 表	性 能 特 点																									
与 门	 <p>a) 与门元件</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>C_1</th> <th>C_2</th> <th>O_0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	C_1	C_2	O_0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1) 几何形状对称 2) 无源元件										
C_1	C_2	O_0																										
1	0	0																										
0	1	0																										
1	1	1																										
0	0	0																										
半 加	 <p>b) 半加元件</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>C_1</th> <th>C_2</th> <th>O_1</th> <th>O_2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	C_1	C_2	O_1	O_2	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1) 相当于或门和与门的组合 2) 无源元件					
C_1	C_2	O_1	O_2																									
0	0	0	0																									
0	1	1	0																									
1	0	1	0																									
1	1	0	1																									
等 价	 <p>c) 等价元件</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>C_1</th> <th>C_2</th> <th>O_1</th> <th>O_2</th> <th>O_0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	C_1	C_2	O_1	O_2	O_0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	可实现等价运算和独或(异或)运算  <p>d) 等价运算</p>  <p>e) 独或运算</p>
C_1	C_2	O_1	O_2	O_0																								
0	0	0	0	1																								
1	0	0	1	0																								
0	1	1	0	0																								
1	1	0	0	1																								

表41.2-3 紊流元件的特点和典型线路

元件类型	线 路	特 点
非 门	 <p>a)</p>	<p>和附壁式元件相比有如下特点</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 可以作成管状和片状紊流元件, 但结构尺寸较大 2) 具有较大输出能力, 可同时切换 8~10 个同类元件, 具有多达 8~10 个输入口 3) 元件的切换时间较长, 但切换时输入阻抗不变 4) 具有信息的隔离作用, 使元件容易互连 5) 可以组成各种逻辑线路和计算线路, 如加法器, 减法器, 计数器, 等等 6) 可直接用作压力检出, 位置检出和计数等⁽¹⁾
或 门	 <p>b)</p>	
双 稳	 <p>c)</p>	
与 门	 <p>d)</p>	

3.2.2 测试方法

射流元件和晶体管一样，有静态和动态性能。静态性能通常用三组曲线——输入特性、输出特性和传递特性曲线来描述。

输入特性指在一定的气源压力和一定的负载下，输入压力（或压差）与输入流量之间的关系曲线。它代表输入阻抗 $[\Delta P_c / \Delta Q_c]_{(p_{o1} + p_{o2}) = \kappa}$ 的大小。双稳元件和或非元件的输入特性分别见图41.2-3和图41.2-4。

输出特性指元件在一定的气源压力下，负载从

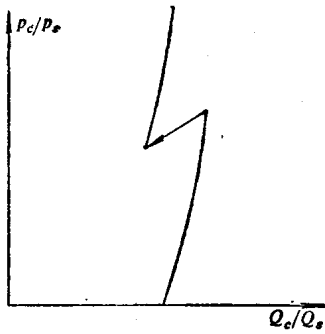


图41.2-3 双稳元件的输入特性

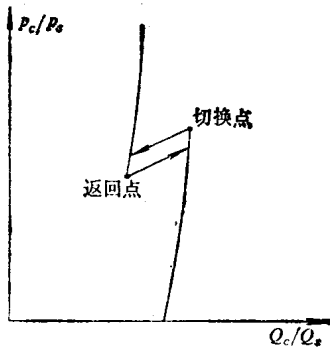


图41.2-4 或非元件的输入特性

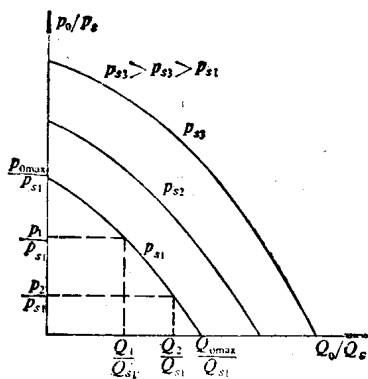


图41.2-5 双稳、或非元件的输出特性

接近于零阻抗（流量最大）变到接近于无限大（输出端堵塞）时，输出流量和输出压力之间的关系曲线。它代表输出阻抗 $[\Delta P_o / \Delta Q_o]_{P_c = \kappa}$ 的大小。双稳元件和或非元件的输出特性见图41.2-5。

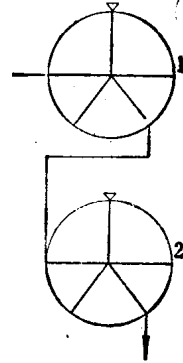


图41.2-6 两个双稳元件的级联

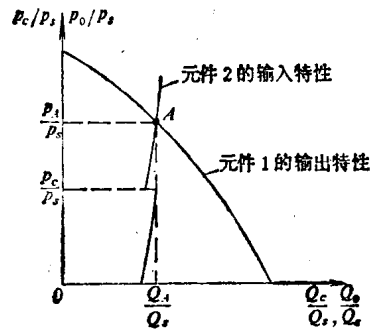


图41.2-7 两元件的级联特性曲线

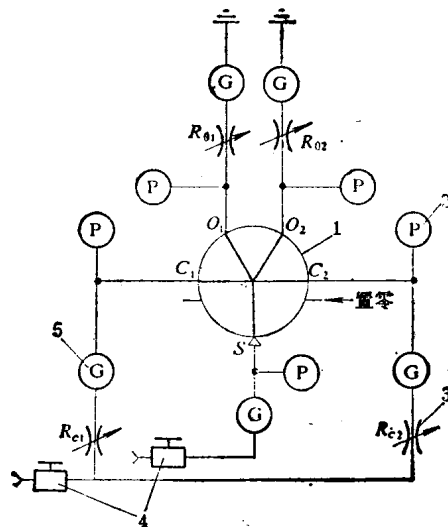


图41.2-8 有源元件静特性测试线路
1—射流元件 2—单管压力计 3—可变气阻
4—定值器 5—流量计