

# 射流技术讲义

—

射流元件基础

复旦大学射流工厂

## 毛主席语录

大学还是要办的，我这里主要说的是理工科大学还要办，但学制要缩短，教育要革命，要无产阶级政治挂帅，走上海机床厂从工人中培养技术人员的道路。要从有实践经验的工人农民中间选拔学生，到学校学几年以后，又回到生产实践中去。

工人阶级必须领导一切。

抓革命，促生产，促工作，促战备。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

# 前 言

射流技术是六十年代迅速发展起来的一门自动控制新技术。它是利用流体在特定元件中流动的某些物理现象来实现自动控制的，因此也是流控技术的一个重要组成部分。

射流控制装置具有结构简单、稳定可靠、易于制造、寿命长和适应性较高等特点，它适宜于大搞群众运动。目前国内外已广泛应用于机械、化工、仪表、轻工、电力、铸造、造船、纺织、医药、冶金等行业。它能耐高温、低温，防腐、防爆，抗辐射，抗振动等优点，在某些情况下，更明显地优于电子控制装置。它已迅速发展成为电子技术自动化的重要补充。

“卑贱者最聪明！高贵者最愚蠢。”

在无产阶级文化大革命以前，我国虽有少数单位从事这方面的研究工作，但是在反革命修正主义路线的影响下，被一小撮资产阶级反动技术“权威”所垄断，他们为了追逐逐利，从外国杂志的夹缝里找题目，关起门来一步一步地，浪费了大量资金，结果什么也没有搞出来。相反，他们故弄玄虚，胡说没有洋大套的设备，没有高深的流体力学知识，休想搞射流技术。妄图以此把广大工农兵拒之于射流技术的门外。

毛主席亲自发动的这场无产阶级文化大革命，打倒了教条、凶奸、工贼刘少奇，彻底批判了反革命修正主义路线，把科学技术的大权夺回到无产阶级手中，在毛主席“工人阶级必须领导一切”的伟大号令下，我国工人阶级昂首阔步登上了科技战线斗、批、修的午台，他们怀着深厚的无产阶级感情，遵照毛主席关于“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。”的伟大教导，发愤了就是用牙咬啃，也要把啃下来的精神，从一开始一把控刀控出了射流元件，到今日在许多行业普遍开花结果，不少成果和元件性能指标已赶上和超过了世界先进水平，创造出了为资产阶级庸人和右倾保守主义者

所幻想不到的奇迹，粉碎了“射流神秘说”、“射流发展悲观论”等种种奇谈怪论。

为了进一步推广和普及射流技术，更好地反映工人阶级在应用射流技术中的一些创造，同时对前时期举办的为期半年的第一期短训班下厂实习，课堂教学的一些实践体会加以总结提高，我们在校党委的领导下，组成了由工农兵学员、工宣队、革命教师参加的三结合教材编写组，对第一期短训班的教材进行了认真分析，并且走出校门到上海市的一些工厂、科学研究单位、高等院校进行了初步的调查研究，得到了广大工农兵与革命知识分子的大力支持，在此基础上我们编写了这本教材，在编写过程中我们学习了清华大学教育革命的经验，征求了一些工人老师对工农兵学员的意见，对这本教材注意革命性与科学性的统一，注意理论与实际的统一，注意教材要适于自学、教学过程的特点，努力使这本书通俗易懂、由浅入深。但是由于我们的教改实践比较少，法学法用马列主义、毛泽东思想不够，一定有不少的缺点和错误，我们诚恳地希望广大工农兵及革命知识分子读者提出批评意见，以便遵照毛主席关于“教材要彻底改革”的伟大教导，把无产阶级教育革命进行到底。

本讲义共分三册，第一册为《射流元件基础》，第二册为《射流技术应用及线路》，第三册为《常用射流附件》。

《复旦大学数学系射流工厂》  
三结合教材编写组

一九七一年八月。

# 目 錄

第一章	射流元件概况	1
§ 1	射流及其附壁效应	1
§ 2	附壁式元件的工作原理	7
第二章	射流元件的测试方法	40
§ 1	管路中流体运动的某些性质	40
§ 2	流动参数的测量	44
§ 3	射流元件的测试方法	51
第三章	射流元件性能指标讨论	53
§ 1	元件的负载特性	53
§ 2	元件稳定性的讨论	61
§ 3	元件几何参数对元件性能的影响	64
§ 4	元件的调试和修改	67
第四章	光敏微晶玻璃射流元件的制造工艺	79

# 第一章 射流元件概况

## § 1. 射流及其附壁效应

什么叫射流：在工农业生产上和日常生活中碰到射流的例子是不少的，火车拉汽笛时冲出的那股气流是射流，救火时从喷枪中射出的液也是射流，又火机救火时喷出的二氧化碳气流，喷气飞机喷出的气流等也都是射流。综合这些流动的共同时，我们得到射流的初步概念，射流就是一束从喷嘴中喷射出来的气流或液流。但是这种初步概念还是属于感性阶段的认识，它只认识了射流的外表现象，还没有认识到射流的内在本质，毛主席教导我们：“感觉到了的东西，我们不能立刻理解它，只有理解了的东西才更深刻地感觉它。感觉只解决现象问题，理论才解决本质问题。”要真正理解射流、掌握射流，并利用它来为社会主义建设服务，我们必须了解射流流动的本质特性。

根据实验，射流具有下述几条规律：

### (一) 射流的卷吸效应。

当一束射流从喷嘴喷出进入大气时，射流边界上的小气团和大气中的静止小气团发生碰撞摩擦，使静止小气团运动起来，其结果就是使射流周围的气体也捲进射流中来，增加了射流的流量，加宽了射流的宽度，但却降低了射流的速度，越往下游，随着射流的向前推进，周围的气体不断被捲进射流中来，射流的边界就越宽，流量也越大，而射流的速度则越小，整个流动状态如图 1-1 所示。图中的卷吸流就是由周围的静止气体被捲进射流而形成的。这种现象我们称为射流的卷吸效应。

### (二) 射流中的速度分布。

根据实验测量，射流可以划分为两个区域：

(1) 速度核心区，在射流的喷嘴附近，有一个三角区，如图 1-2 中的 ABC 区，这个区域内的气流的速度是一样的，而且和喷嘴里的气流的速度一样，它比周围气

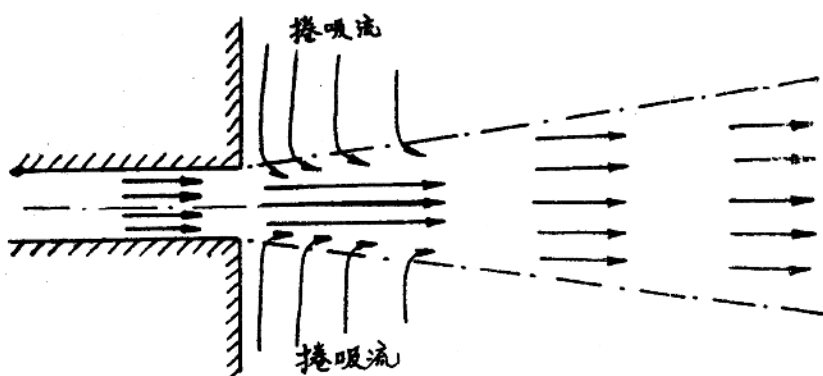


圖 1-1 射流的流动状态

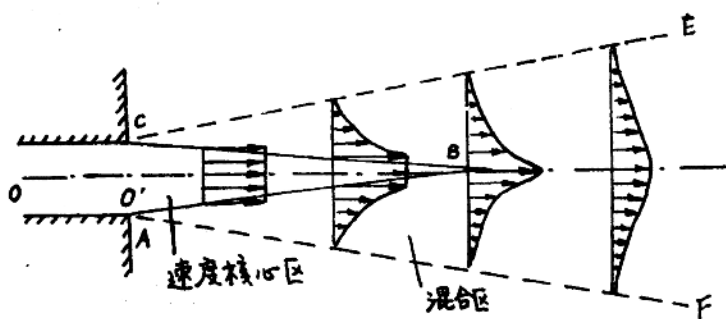


圖 1-2 射流的速度分布图

速度要大得多，这三角区的高度  $o'b$ ，大约是喷嘴宽度  $AC$  的 6 倍左右（由实验所得）

(2) 混合区，在速度核心区和射流的边界线  $CE$ 、 $AF$  之间的区域叫射流的混合区。在这个区域内，被射流带动的周围静止气体加入到射流中来一起流动。其速度分布的特点是：第一是流动的速度从射流中线起，向两边连续下降，到区域的边界线  $CE$ 、 $AF$  上速度（纵向速度）下降为 0，第二是越往下游，射流中心线上的速度越低。

(3) 射流的边界和扩散角，射流的边界通常是这样规定的：在边界  $CE$ 、 $AF$  上流动的纵向速度为 0，但可以有横

的速度，特别是在喷嘴附近，在 CE、AF 线上和线外的流体，是有一定程度的横向速度的。这是因为射流在喷嘴附近的卷吸作用特别强烈所造成的，一般地讲，在 CE、AF 线以外的气体，它的速度很小，可以认为是静止的。

射流的扩散角是指边界线 CE (或 AF) 和射流中心线  $oo'$  之间的夹角，如果气体射流进入静止空气，其扩散角一般是  $12^\circ \sim 15^\circ$ 。

(四) 射流的附壁效应

设有一股射流从喷嘴喷出进入一个腔室，如图 1-3 所示，又设腔室的右壁到喷嘴的距离  $S_1$  和  $S_2$  是不相等的，右边的位差  $S_1$  小，左边的位差  $S_2$  大，两壁对射流中心线的倾角  $\theta_1$  和  $\theta_2$  暂设为相等，即  $\theta_1 = \theta_2$ ，则当射流进入腔室后，立刻就附着到右壁上去。

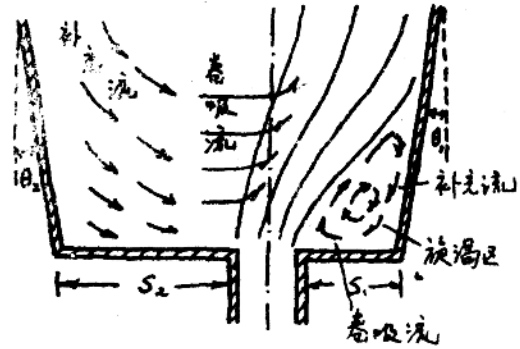


图1-3 射流的附壁现象 ( $S_2 > S_1$ )

这种现象叫做射流的附壁效应。这种现象对于我们说：“在复杂的事物的发生过程中，有许多矛盾存在，其中必有一种是主要的矛盾，由于它的存在和发展，规定或影响着其他矛盾的存在和发展。”我们在前面已介绍过，射流从喷嘴喷出后，具有卷吸周围静止流体的作用，两靠近喷嘴两侧的卷吸作用更为强烈，因此在射流的左右两侧都出现了卷吸流，如图 1-4 所示。随着喷嘴附近的流体被卷吸，喷嘴两侧的压力就降低，降低得比大气压还要低，这时离喷嘴较远处的压力为大气压的气体就要补充过来，因而又产生左右两股补充流，补充流又有增强喷嘴两侧的压力作用，因此，在射流左右两个区域中，卷吸流和补充流就组成一对矛盾在互相作用互相斗争着，现在由于左右两壁距喷嘴都比较近且又不相等，两壁对补充流的影响就很大，但影响的程度



知了，不，区，相，同，的，要，求，刚，的，这，样，就，不，得，卷，吸，一，定，的，流，向，更，后，壁，上。  
射，流，的，压，力，差，果，不，样，存，在，去，附，射，位，置，到，某  
附，壁，是，由，于，左，右，区，域，中，的，流，速，不，同，所，以，在，射，流，的，压，力，差，果，不，样，存，在，去，附，射，位，置，到，某  
附，壁，是，由，于，左，右，区，域，中，的，流，速，不，同，所，以，在，射，流，的，压，力，差，果，不，样，存，在，去，附，射，位，置，到，某

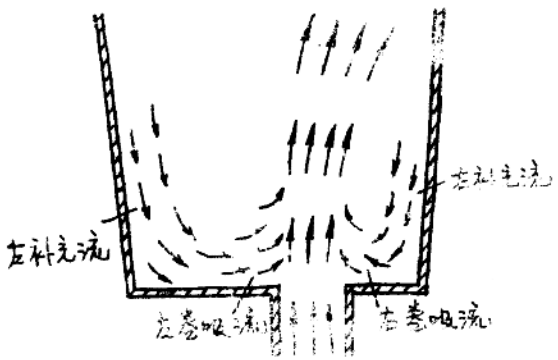


图 1-4

了，不，区，相，同，的，要，求，刚，的，这，样，就，不，得，卷，吸，一，定，的，流，向，更，后，壁，上。  
射，流，的，压，力，差，果，不，样，存，在，去，附，射，位，置，到，某  
附，壁，是，由，于，左，右，区，域，中，的，流，速，不，同，所，以，在，射，流，的，压，力，差，果，不，样，存，在，去，附，射，位，置，到，某

右，侧，的，射，流，速，比，左，侧，的，射，流，速，快，所，以，右，侧，的，射，流，先，达，到，右，壁，而，左，侧，的，射，流，后，达，到，左，壁，这，样，就，在，右，壁，处，形，成，一，个，涡，旋，区，域，而，在，左，壁，处，形，成，一，个，流，速，慢，的，区，域，这，样，就，在，左，壁，处，形，成，一，个，流，速，慢，的，区，域。  
右，侧，的，射，流，速，比，左，侧，的，射，流，速，快，所，以，右，侧，的，射，流，先，达，到，右，壁，而，左，侧，的，射，流，后，达，到，左，壁，这，样，就，在，右，壁，处，形，成，一，个，涡，旋，区，域，而，在，左，壁，处，形，成，一，个，流，速，慢，的，区，域，这，样，就，在，左，壁，处，形，成，一，个，流，速，慢，的，区，域。

不确定的，可以是左壁，也可以是右壁。若问，会怎样呢？毛主席教导我们：“矛盾的诸方面，……，其本质的形态则是不平衡。”一方由于造型方正使左右两壁做得不可能完全对称；另一方由于射流从喷嘴出来时，总带有一点微小的偏向或左右抖动，假如射流是偏向左壁或一开始是先向左抖动，那末，按照上方所讲的道理，左边补充流的通道就要小一些，射流就长贴附到左壁上流动。反之，如射流有向右的微小偏向或先向右作小抖动，它就长贴附到右壁上流动，如图 1-5 所示。

当位差不大，或张角太小时，两壁对补充流的补正很小，左右两区域内的条件就基本一样，因而也就不会出现附壁现象。

实践还表明，射流的速度对附壁性能有影响，射流速度加大时，附壁效应会加强，这是因为速度提高了，卷吸作用就加强了，从而使射流两侧的压力差加大，于是射流的附壁性能就加强了。

射流附壁以后，整个附壁射流的流动状况如图 1-6 所示：

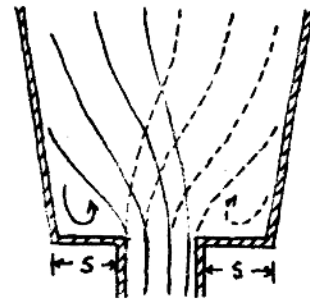


图 1-5 位差、张角部相等时的流动状况

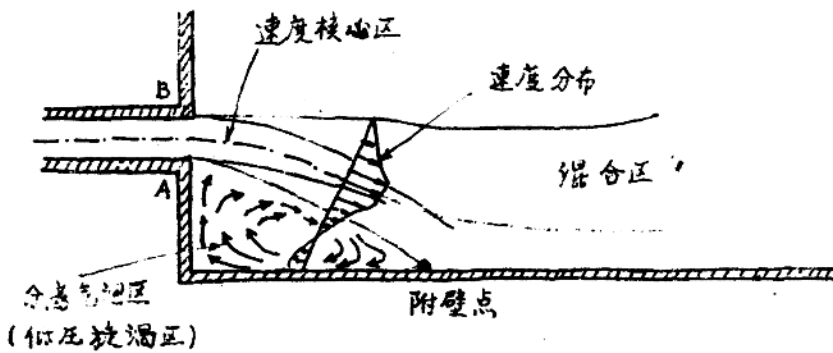


图 1-6 附壁射流示意图

从喷嘴的靠近附壁侧的端点A发出的一条流线将与壁面相交，这一个接触点我们称为附壁点，附壁点的下游称为射流的扩散区；上游称为回流涡区，或称分离气泡区，这是一个很主要的区域，在一定程度上，它反映了射流的附壁状况。

在射流和附壁时，分离气泡区反正是射流和壁面之间的一个区域，该区域内存在着卷吸流和补充流的矛盾运动，其中的补充流完全来自外界大气，当变为分离气泡区后，原来补充流的末路被射流冲断了，代之而起的是新的补充流，它由射流中的一小部分，即在附壁点邻近的那一小部分射流倒流回去所组成。为什么会倒流回去呢？这是因为射流在附壁点附近冲撞壁面，造成在附壁点附近的压力特别高，这可由下图实验曲线得到证明，图1-7是沿壁面测得的压力曲线，其中abc段就代表分离气泡区内的压力分布，由此图可见附壁点c附近的压力比分离气泡区的大部分地方的压力（由ab段所代表）要大，因此附壁点附近的一部分气流是倒流回去。

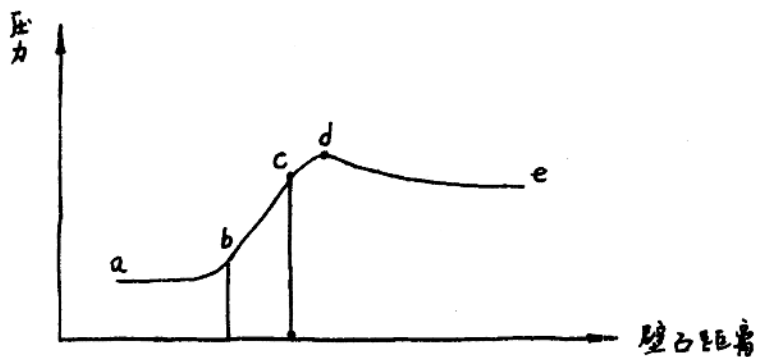


图 1-7 壁上测得的压力曲线

毛主席教导我们：任何运动形式，其内部都包含着本身特殊的矛盾。在分离气泡区内的特殊矛盾的两个方面就是：一方面是卷吸流，它有使分离气泡区内的压力继续

续下降及使分离气泡区继续缩小的作用；另一方面是新的补充流，它有补偿压力下降及使分离气泡区逐渐扩大的作用。这样两个矛盾着的方面“互相斗争”又“互相依存”就构成了分离气泡区内的矛盾运动。斗争的结果，在一定的条件下达到一定程度的相对平衡。图 1-7 中由实验测得的相对稳定的压力曲线就是这种相对平衡的标志与结果。但是，毛主席指出：“对立的统一是有条件的、暂时的、相对的，而斗争的互相排斥的斗争则是绝对的。”分离气泡区内两种流动的平衡只能是相对的，即使在这种相对平衡和相对稳定的情况下，卷吸流和新的补充流的斗争也一直在进行着，它们之间的矛盾斗争是绝对的。因此在条件一改变时，原来的平衡就要被破坏，这在下面讨论到射流的“切换”时就会看到。

## § 2 附壁式元件的工作原理

### (一) 附壁式元件的成型

毛主席教导我们：“马克思主义的哲学认为十分重要的问题，不在于懂得了客观世界的规律性，因而能够解释世界，而在于认识了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。”我们掌握了射流的附壁效应这个规律，就要应用到实践中去，现在我们介绍怎样利用附壁效应组成射流元件。

图 1-8 是附壁式元件的示意图，有喷口，具有一定位差和锥角的腔室，控制道，分流臂，输运道和排气孔等几个部分。

喷口是用来喷出射流的，腔室的位差  $S$  和锥角  $\theta$  必须适当，使射流进入腔室后就能贴附到一个壁上流动，如果位差和锥角不大，射

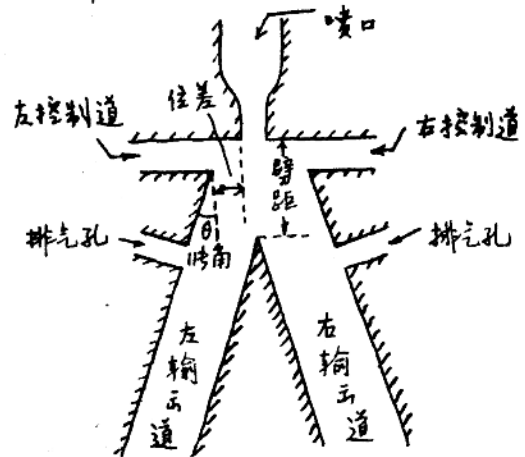


图 1-8 附壁式元件示意图

流将不能附壁，太小的话，射流将同时附于两壁而形成扩散流。因此，位差和裕量是决定射流附壁的主要因素。

控制道。为了使附壁射流能够完成预定的逻辑动作，还需要有改变射流附着状态的办法，即由附着这一壁改变为附着到另一壁的办法。射流附壁是由射流两侧的压力差造成的，而压力差又是射流两侧卷吸流和补充流矛盾斗争的结果，因此，为了能够改变射流的附着状态，就需要在腔室的侧壁上开一个通道，称为控制道，并从低压区的控制道输入一定压力的控制气流（如图1-9，此压力通常为射流压力的10%左右）使低压区的压力增高到大于另一侧的压力，射流就会离开原附着壁而贴附到另一壁上，这一过程我们叫“切换”。输入控制气流如何会使主射流切换的呢？毛主席教导我们：“外周通过内因而起作用。”注入控制流后，低压区中矛盾斗争的条件改变了；这时的补充流除了原来从附壁点附近脱离主射流而来的“倒流”外，还有新加入的控制流。因此，补充流就强比卷吸流，在低压区中就会有气体堆积，这就使分离气泡区扩大，附壁点往下移，并且使原来低压区的压力升高，当分离气泡区的压力升高到大于另一侧的压力时，主射流就“切换”了。这种藉注入控制气流来切换主射流的方法叫正压切换。

需要说明的是即使未输入控制气流，开了控制道和未开控制道的情况也有所不同。开了控制道后，低压区的补充气流就已经由两部分组成的，一部分还是从附壁点来的那一部分“倒流”，另一部分就是从控制道吸入的气流。而非附壁侧的补充气流，也是从两个地方来的，即除了原来侧壁来的补充流以外，还会从控制道把外界的气吸入来，所以开了控制道后，主射流两侧

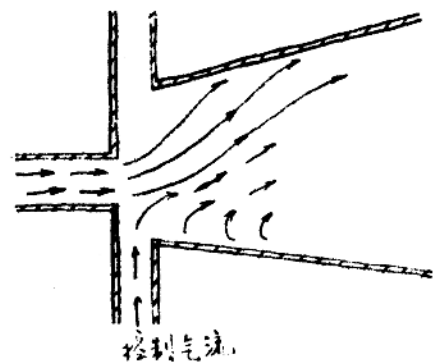


图1-9 正压切换示意图

的条件就已经改变了，只不过这些条件只能对两侧区域中的矛盾引起一定程度的量变，还不足以达到质变的地步，只有从低压区的控制道注入控制流，并把控制流的压力增大到一定程度后，才会由量变发展到质变，使主射流切换。

从上面的说明中，我们还可以看出，除了“正压切换”外，还可以有其他切换方式。譬如，对左右控制道都是吸气的射流元件，如果我们将堵死非附壁边的控制道，也可

以把主射流切换过来（如图1-10所示），因为非附壁一侧的控制道被堵死后，由于主射流的卷吸作用，堵死的控制道内的气体逐渐被卷吸出去，此通道内的压力就逐渐降低，等到降低到比附壁侧的压力还低时，主射流就会切换过来，因此这一种切换方式叫作负压切换。

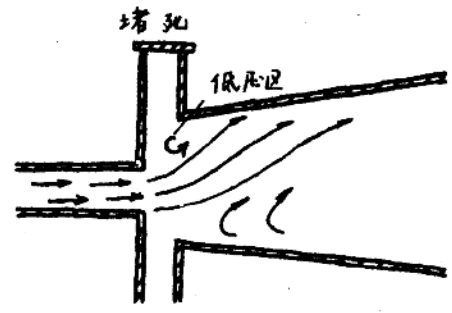


图1-10 负压切换示意图

分流劈和输运通道：射流贴附在一壁上流动时，它也要扩散，随着它在腔室内扩散，它的能量也要扩散，因此当我们把它当作输运信号时，就不能得到足够强度的输运信号，而且在一定条件下，附壁射流还会扩散到对面壁上，这就产生了矛盾，为解决这个矛盾，我们在二壁之间安放一块“分流劈”，把腔室分成两条输运通道，这样既能引导射流，防止射流扩散而造成能量损失，更能防止射流扩散到对面去，造成信号误输运。但分流劈的位置安放得适当，换言之，就是分流劈到喷口的距离（前称劈距）是选得适当。

排气孔：在射流控制线路中，射流元件的输运通道，有时完全开放畅通，有时只能部分畅通，有时甚至需要完全堵死而只接受气流的压力强度。单纯的输运通道是不能适应这些不同的要求的，这就出现了矛盾，例如当输运

通道一旦被堵死时，附壁气流就会倒流另找出路，从而会使射流自动“切换”到另一通道去。为了避免出现这种情况，遵照毛主席的教导：“不同质的矛盾，只有用不同质的方法才能解决。”我们在两壁互的一走位置处各开一个排气孔，当输运道不畅通或完全堵位时，多余的气流就可以从排气孔排出。排气孔的位置、大小和形状当然是开得适当，最好是按具体的线路要求，即输运道的不同畅通程度开不同大小的排气孔。但这将会对元件的生产带来很多困难，不易实现，因此在元件生产中，一般是开固定类型的排气孔的，在使用时，如不合线路的要求，使用者可以自己作适当的修改。

有了喷咀、具有一定位置和张角的腔室、控制道、输运通道和排气孔后，就基本上构成了一点附壁式射流元件。我厂目前生产的射流元件，就是由图 1-8 所示的元件片，加上盖板 and 底板，用螺钉紧固而成的，如图 1-11 所示。

由于实际生产斗争的需要，要求射流元件有各种不同的功能，在气动的附壁式射流元件中，基本的类型有“或非”、“双稳”、“计数触发”、“异或”等，此外还有一个非附壁式的射流元件“与门”，它是经常和上述三种元件联合使用的。这四种元件（还有“半加”元件）我们将在下面分别介绍。

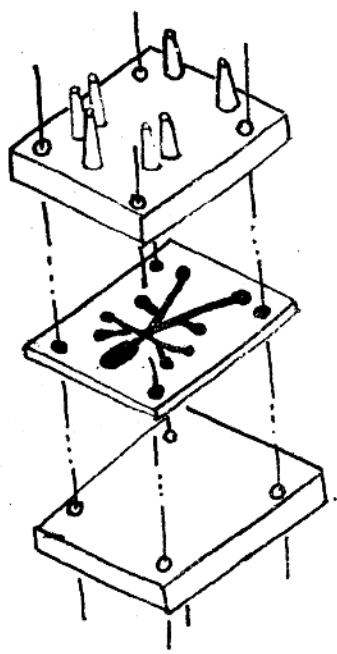


图 1-11 射流元件

(二) “或非”元件

如图 1-12 所示，它相当于“或”门和“非”门的组合。为了认识“或非”元件，我们先介绍“非”门和“或”门。

“非”门元件的示意图如图 1-13，它的形状的特点是左右不对称，即一边的位差大于另一边的位差，因此当主射流从喷嘴喷出后，就稳定地附着于小位差的一壁。在图 1-13 中就是附着于左壁，并从左输出道输出。当左控制道输入一股足够大的（压力和流量足够大）的控制信号流时，主射流就立刻切换至右壁，从右输出道输出，（如图 1-13 (2)），也就是说，左输出道的输出信号被“非”了，被“非”了。当左控制信号去掉后，主射流又会返回到左壁从左输出道输出。这种左控制道有信号输入，左输出信号就被“非”了的元件就叫“非”门。

“或”门的示意图如图 1-14。当左输入道或右输入道有输入时（即两输入道中任一有输入时）输出道 3 就有输出，这种元件就叫“或”门。（当然，两输入道都有输入时，输出道 3 仍有输出）

“或非”元件就是把“或”门和“非”门结合起来，组合成一只元件，所以



图 1-12 或非元件示意图

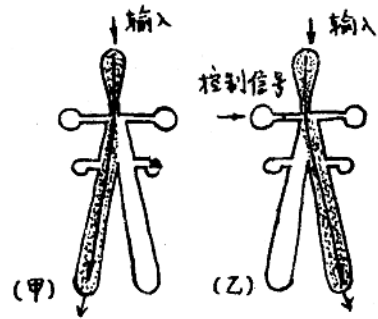


图 1-13 非门元件示意图

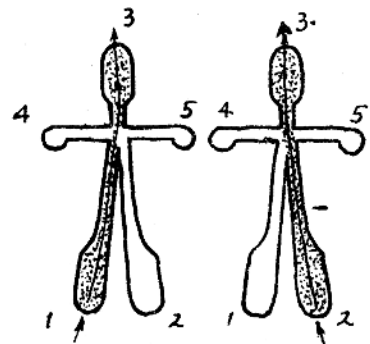


图 1-14 或门示意图

1.2 — 输入道    3 — 输出道  
4.5 — 排气孔



有“或”门和“非”门的实质作用，在形状上，“或非”元件和“非”门元件的不同之处，就是多了一个控制道（=控制道或非）或多了几个控制道（多控制道或非），以二控制道“或非”为例（如图 1-15），它的工作原理是：

1. 当左边二个控制孔  $C_1$  和  $C_2$  都没有输入信号时，主射流稳在左边，由  $J_1$  输出，如图 1-15 之 (甲) 所示，

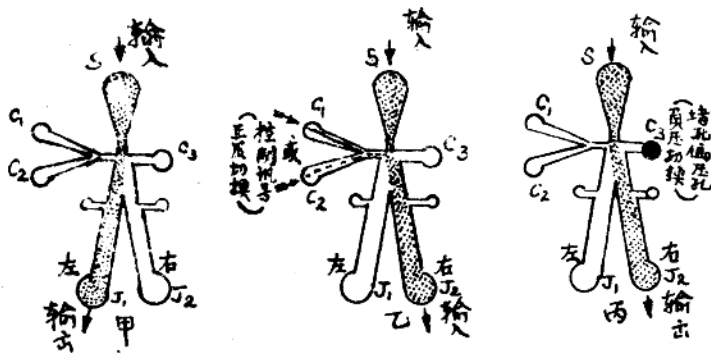


图 1-15

或非元件的工作过程

2. 当左边任一控制孔  $C_1$  或  $C_2$  有一定强度的信号流（即一定压力的气流）输入时（也可以两个控制孔皆有信号流），主射流就被“正压切换”，从右输出道  $J_2$  输出，这时，左输出道  $J_1$  就“非”了，如图 1-15 之 (乙)，能使主射流切换的最小控制气流的压力称为“或非”元件的切换压力，消除控制信号后或控制气流的压力降到一定程度后，主射流又回复到左边从  $J_1$  输出，使主射流开始跳回到从  $J_1$  输出的控制流的压力称为“或非”元件的返回压力（或简称回跳）。

3. 通常在“或非”元件的另一边还开有一个偏压孔（图中右边的  $C_3$ ），利用它，可以对主射流进行负压切换，即当堵死右边的偏压孔时，主射流也会切换到右边从  $J_2$  输出，如图 1-15 之 (丙)。

所以如果我们把左输出道  $J_1$  当作输出信号的工作道时，