

射流技术讲义

三

常用射流附件

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无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、中、小、轻、电、力、铸、造、造船、纺织、医药、冶金等行业。它能耐高温、低温、防腐、防辐射、抗振等，在某些情况下，更明显地优于电子控制装置。它已迅速发展成电子技术自动化领域的重要补充。

“卑贱者最聪明！高贵者最愚蠢。”

在无产阶级文化大革命以前，我国是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，这一小撮资产阶级反动技术“权威”所垄断，他们为了追名逐利，从外国杂志里找题目，关起门来一步一步地，浪费了大量资金，结果什么也没有造出来。相反，他们故弄玄虚，胡说没有洋大全套的设备，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，打倒了叛徒、内奸、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”的伟大会令下，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，有骨气，一定要在伟大的斗争中，赶上和超过世界先进水平”的伟大会训，发出了“就是用人肉啃，也要把它啃下来”的精神，从一开摆一把挂刀挂出了射流元件，到今日在许多行业普遍开花结果，不少成果和无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

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，更好地反映工人阶层的先进经验，我们组织了一些工人同志，组成由工农兵学员、工人、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的分析，并且走出了校门到工厂、科室、科研单位、高等院校进行了初步的调查，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的革命教育经验，征求了一些工人同志的意见，对这本教材注意革命性与科学性的统一，注意理论与实践的统一，注意教材要适于自学，由浅入深，通俗易懂，由浅入深，但是，由于我们的教改，实践比较少，法学法用写刘玉文，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。

本书讲义分三册，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》。

《复旦大学物理学系射流工厂》
三结合教材编写组

一九六一年八月。

目 录

第一章	绪论	1
§ 1	喷嘴—挡板机构	1
§ 2	节流机构	4
§ 3	阻容环节	5
第二章	气液系统	9
§ 1	空气压缩机	10
§ 2	气液净化装置	10
§ 3	调压阀	16
§ 4	气动定值口	20
§ 5	油雾口	23
第三章	发讯装置	25
§ 1	时间发讯	25
§ 2	位置、位移发讯	27
§ 3	液面发讯	30
§ 4	压力发讯	38
§ 5	流量发讯	40
§ 6	温度发讯	42
§ 7	转速发讯	45
第四章	气动延时口	47
§ 1	一种简单的延时口	47
§ 2	延时口中阻容环节的分析	49
§ 3	膜片式气动开关	53
§ 4	几种常用的延时口	54
第五章	转换口	64
§ 1	薄膜式单向功率放大口	64
§ 2	双向功率放大口	69
§ 3	气电转换口	72
§ 4	电气转换口	74
§ 5	气液转换口	76

§ 6	液气转换口	78
第六章	执行机构	80
§ 1	活塞式执行机构	80
(一)	单向作用缸	80
(二)	双向作用缸	82
(三)	差动式作用缸	84
(四)	能单独动作的双向作用缸	85
(五)	双活塞双向作用缸	85
(六)	带有缓冲装置的双向作用缸	87
(七)	气液阻尼缸	88
(八)	齿条活塞式油缸	101
(九)	转向油缸	101
(十)	顺序控制缸	102
(十一)	步进式油缸	103
(十二)	回转式气缸	104
§ 2	薄膜式执行机构	105
§ 3	棘轮式步进口	105

附录 I

1.	气缸设计的一般资料	107
2.	油缸能力推论	108
3.	油缸各部分的结构、材料及制造技术条件	109
4.	油缸壁厚公式与计算	114
5.	O形密封圈	115

附录 II

	调速控制阀图纸	118
--	---------	-----

附录 III

	三位五通和四通换向阀内部通路连通形式结构 原理图	120
--	-----------------------------	-----

第一章 绪论

伟大领袖毛主席教导我们说：“所有这些物质的运动形式，都是互相依存的，又是实质上互相区别的。”在射流技术应用中，除了有射流元件组成射流控制线路外，还应有多种附、配件，才能达到射流自动控制的目的。

随着射流技术的发展，射流附、配件也得到很快的发展，目前已涌现了多种多样适用于不同应用场合的射流附、配件。

毛主席教导我们说：“大家明白，不论做什么事，不懂得那件事的情形，它的性质，它和它以外的事情的关联，就不知道那件事的规律，就不知道如何去做，就不能做好那件事。”因此，在讲具体射流附、配件之前，先把组成这些附、配件的某些基本单元做个大概的分析，以帮助我们更好的了解射流附、配件的工作原理。

§1 喷嘴—挡板机构

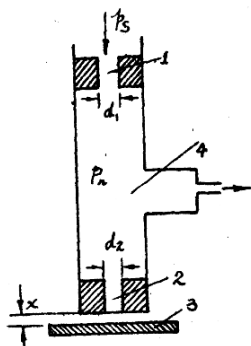
喷嘴—挡板机构的结构形式如图1-1所示。它是由挡板3，喷嘴2，恒节流孔1与通室4组成。当气流 P_s 经过内径为 d_1 的喷嘴1，进入通室4，再经过内径为 d_2 的喷嘴排向大气。显然，当挡板3与喷嘴2之间距离 x 改变时，通室4内压力 P_n 将随之改变。

为了了解喷嘴—挡板之间距离 x 与通室内压力 P_n 之间的关系，我们假设通过喷嘴—挡板的流体是不可压缩的，流动是定常的，而且认为当挡板的位置不变时，通过恒节流孔1的流量等于流过喷嘴2的流量 Q_2 。

由于通过恒节流孔1的流量为

$$Q_1 = \mu_1 A_1 \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma}} (P_s - P_n)$$

· 1 ·



- 1—恒节流孔 2—喷嘴
3—挡板 4—通室

图1-1 喷嘴—挡板机构

(1-1)

式中 μ_1 — 通过恒节流孔工作流体的流量系数；当雷诺数 Re 在 100~500 范围内变化时， μ_1 可以认为是一个常数，一般取值为 $\mu_1 = 0.6 \sim 0.7$ 。

A_1 — 恒节流孔通道截面积，即

$$A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \quad (1-2)$$

γ — 流体重量，

g — 重力加速度，

同样，流经喷嘴挡板的工作流体的流量 Q_2 (流入大气) 可表示为

$$Q_2 = \mu_2 A_2 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} p_n} \quad (1-3)$$

式中 A_2 — 喷嘴挡板之间的环形流通面积，即

$$A_2 = \pi d_2 x$$

其中 x 为喷嘴挡板之距离，一般说 $x < \frac{d_2}{4}$ ，

μ_2 — 工作流体流经喷嘴挡板的流量系数，一般可表示为

$$\mu_2 = \frac{1.095}{\sqrt{1 + \frac{305.5}{Re^{1.25}}}}$$

其中 Re 为流动雷诺数。

由于我们认为 $Q_1 = Q_2$ ，则由 (1-1) 与 (1-3) 得

$$\mu_1 A_1 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_3 - p_n)} = \mu_2 A_2 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} p_n}$$

从而得

$$p_n = \frac{p_3}{1 + \left(\frac{\mu_2 A_2}{\mu_1 A_1} \right)^2}$$

或

$$\frac{p_n}{p_3} = \frac{1}{1 + \frac{16 d_2^4}{d_1^4} x^2 \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^2} = \frac{1}{1 + 16 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4 \left(\frac{x}{d_2} \right)^2 \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^2} \quad (1-4)$$

当气流压力 p_3 ，恒节流孔 1 的直径 d_1 与喷嘴直径 d_2 及其流量系数 μ_1, μ_2 已知时，上式便给出了通室压力 p_n 与喷嘴挡板距离 x 之间的关系。 p_n/p_3 与 x/d_2 之间关系如图 1-2 所示，这称为喷嘴挡板的特性曲线。

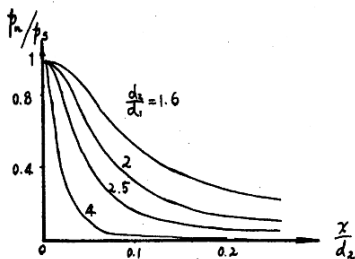


图 1-2. 喷嘴—挡板特性曲线。

由此地我们可以看出：

(1) 当喷嘴被挡板盖住时 (即 $x=0$)，此时 $p_n=p_3$ 达最大值。随着 x 的增大， p_n/p_3 逐步下降，当 x 达一定数值后，再增大 x 值已对 p_n 影响不大。

(2) 当 d_2/d_1 较小时，特性曲线较平坦，即灵敏度较低，同时当挡板全开，即 $x=d_2/4$ 时， p_n 降不到零值；反之，当 d_2/d_1 较大时，特性曲线较陡，灵敏度较高，但增加喷嘴挡板密封的困难。

(3) 假设 $\mu_1=\mu_2$ ，根据 (1-4) 式可得

$$\text{当 } x = \frac{0.577}{4} \frac{d_1^2}{d_2} \text{ 时,}$$

使喷嘴挡板机构具有最大的灵敏度，此时 $p_n=0.75p_3$ 。

从上面分析，我们知道，喷嘴—挡板机构实际上是位控压力转换装置，当改变喷嘴—挡板之间的微小位移，便可使输出压力 p_n 从最小值 (接近零值) 增大到最大值 (接近

气流压力 P_3)。在决定具体尺寸时, 应根据灵敏度要求, 耗气量大小, 信号压力大小等因素适当地加以选择。当我们将喷嘴挡板机构用作比例放大时, 应将其工作区取在特性曲线线性范围之内。

§ 2 节流机构

我们知道, 流体在运动中总会受到一定的阻力, 因而产生压力降。线路中用来对流体产生阻力的元件称为节流机构, 或称为流阻。通常有线性流阻与非线性流阻两种。

(一) 线性流阻:

如果通过流阻时, 流量 Q 与压降 Δp 成线性关系, 即

$$Q = R \Delta p$$

则称为线性流阻, 其比例系数 R 便表示阻值大小。

根据流体力学结果知道, 要使流量 Q 与压降 Δp 成线性关系, 只有在通过流阻时的流体流动呈层流状态时才有可能, 此时有

$$\text{重量流量 } Q_G = \gamma A V = \frac{\pi d^4 \gamma}{128 \mu l} \Delta p \quad [\text{公斤/秒}] \quad (1-5)$$

及

$$\text{体积流量 } Q_V = A V = \frac{\pi d^4}{128 \mu l} \Delta p \quad [\text{厘米}^3/\text{秒}] \quad (1-5)$$

式中 γ — 流体重度, 在 20°C 时在标准大气压下

$$\gamma = 1.205 \times 10^{-6} \text{ 公斤/厘米}^3$$

μ — 流体动力粘性系数, 空气在 20°C 时

$$\mu = 1.846 \times 10^{-10} \text{ 公斤·秒/厘米}^2$$

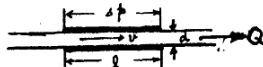
l — 管道长度,

d — 管道直径,

由此可见, 线性流阻阻值可按

下式计算:

$$R_G = \frac{\Delta p}{Q_G} = \frac{128 \mu l}{\pi d^4 \gamma} \quad [\text{秒/厘米}^2] \quad (1-6)$$



$$R_v = \frac{\Delta p}{Q_v} = \frac{128 \mu l}{\pi d^4} \quad [\text{秒}^2/\text{厘米}^4] \quad (1-6)$$

为了得到线性流阻，流动必须是层流状态的，因而这种流阻口一般都是具有长而狭窄的管道，例如毛细管就是线性流阻的一种。

(二) 非线性流阻：

如果流体通过流阻时，流量 Q 与压降 Δp 不成线性关系，则称为非线性流阻。此时流体流动状态是处于紊流状态的，流量与压降一般可表为如下形式：

$$Q_a = C_f A_0 \sqrt{2gY \Delta p} \quad (1-7)$$

或

$$Q_v = C_f A_0 \sqrt{2g \Delta p / \gamma}$$

式中 C_f — 流量系数（一般由实验确定）。

A_0 — 节流孔截面积，

g — 重力加速度。

这就是说，流量与压降 Δp 的平方根成比例。因而得流阻阻值表达式为

$$R_a = \frac{\Delta p}{Q_a} = \frac{\sqrt{\Delta p}}{C_f A_0 \sqrt{2gY}} \quad (1-8)$$

$$R_v = \frac{\Delta p}{Q_v} = \frac{\sqrt{\gamma \Delta p}}{C_f A_0 \sqrt{2g}}$$

上式是对不可压缩流体而言。为了确定具体阻值，需要知道流体通过特定流阻口时的流动规律。但是在实际上，往往直接测出流阻两端的压降与通过的流量，从而直接估计出流阻之值。

§3 阻容环节

在射流技术中，流容以及流阻、流容组成的阻容环节是经常遇到的，下面作些简单介绍：

(一) 流容

流容就是在一定压力下的流体容量，严格说来，只有可压缩流体才有流容，因此气体的容量效应大，而且工作压力越高时，流容效应越显著。在线路中用来对气体运动产生储能或容性阻抗的元件称为气容，简称气容。

一个容口或一段管道的气容值大小可由下式表示

$$C_g = \frac{V}{\gamma n R^* T} \quad [\text{厘米}^3]$$

(1-9)

或

$$C_v = \frac{V}{\gamma n R^* T} \quad [\text{厘米}^3 / \text{公斤}]$$

式中

V — 容口的容积 $[\text{厘米}^3]$

T — 气体绝对温度 $[\text{°K}]$

R^* — 气体常数 ($R = 2927 \text{ 厘米}^3 / \text{公斤} \cdot \text{°K}$)

γ — 气体重度 $[\text{公斤}/\text{厘米}^3]$

n — 多变指数

多变指数 n 是根据压力变化的快慢而定，如果变化缓慢，容口内能量变化被侧壁吸收，使温度基本不变，叫做等温过程，此时 $n=1$ ；如压力变化很快，加给容口的能量不被侧壁吸收，气体温度随着变化，这叫绝热过程，此时 $n=1.41$ （空气），故实际上 $1 < n < 1.41$ ，一般说，对低频讯号取 $n=1$ ，对高频讯号则取 $n=1.41$ 。

(二) 阻容环节：

利用气阻、气容组合，可得到阻容 (RC) 环节。如图 1-3 所示。

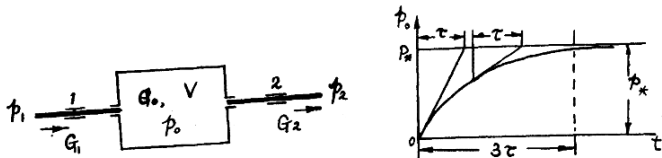


图 1-3 阻容环节特性

显然，当容口充气时，容口内压力逐步上升；而当放气时，容口内压力逐渐降低。

如果以 G_0 表示容积为 V 的容口内空气的重量，则

$$G_0 = V \frac{p_0}{R^* T}$$

将上式对时间微分，得

$$\frac{dG_0}{dt} = \frac{V}{R^* T} \frac{dp_0}{dt} = G$$

式中 G 是容口中单位时间内空气的重量增量，等于空气单位时间通过节流孔 1 流入容口和通过节流孔 2 流出容口的重量流量之差，即

$$\frac{V}{R^* T} \frac{dp_0}{dt} = G_1 - G_2$$

另一方面，假定节流孔 1 和 2 是线性气阻，即

$$G_1 = \alpha_1 (p_1 - p_0)$$

$$G_2 = \alpha_2 (p_0 - p_2)$$

式中 α_1, α_2 为节流孔 1 和 2 的比例系数，

因而经适当整理后得

$$\frac{V}{R^* T (\alpha_1 + \alpha_2)} \frac{dp_0}{dt} + p_0 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} p_1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} p_2$$

或

$$\tau \frac{dp_0}{dt} + p_0 = k_1 p_1 + k_2 p_2$$

式中

$$\tau = \frac{V}{R^* T (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad \text{— 阻容环节的时间常数，}$$

$$k_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}, \quad k_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad \text{— 阻容环节的放大系数，}$$

如果比例系数 $\alpha_2 = 0$ ，则上述方程可简化为

$$\tau \frac{dp_0}{dt} + p_0 = p_1 \quad (1-10)$$

这是具有一个气阻的节流—直管的充气方程式。

如果以恒压气流 p_* 对盲室充气，那末盲室的压力 p_0 是方程 (1-10) 的解，满足条件 $p_0(0)=0$ ，由方程 (1-10) 得解为

$$p_0 = p_* (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-11)$$

式中 e —自然对数底 ≈ 2.718 ，

式 (1-11) 的图象是指数曲线，见图 1-3 所示。

从图 (1-3)，我们可以看出：

(1) 充气时容腔压力 p_0 随时间 t 而增加，其变化规律是一指数曲线。

(2) 刚开始充气时，压力 p_0 上升很快，随后越来越慢，只有经过很长时间后，容腔压力 p_0 才接近于充气压力 p_* ；但在实用上，在 $t=3\tau$ 之后，已认为 p_0 已基本接近于 p_* 了。

(3) 容腔压力 p_0 上升速度取决于时间常数 τ 。根据上节分析，我们不难看出时间常数 τ 与 RC 成正比，即

$$\tau \propto RC$$

此地 R —节流孔 1 的气阻值， C —气容。

因而改变气阻 R 的大小或改变气容 C 的大小，均可达到改变容腔压力 p_0 变化速度的目的，这便是延时口的理论基础。

(4) 如在 (1-11) 式中令 $t=\tau$ ，则得

$$p_0 = p_* (1 - e^{-1}) = p_* (1 - \frac{1}{2.718}) = 0.632 p_*$$

这说明，阻容环节的时间常数 τ 的含义就是对阻容环节突然加上一个压力 p_* ，气容内压力 p_0 上升到 p_* 的 63.2% 时所需要的时间。

上面我们是对充气过程进行讨论的，对于放气过程，阻容环节也有类似的特性，但是阻容环节的充气、放气时间是不相等的。

第二章 气 流 系 统

一般在气动射流系统中，需要输入洁净的并且具有一定压力的压缩空气来作为控制系统和执行机构的工作。如果没有这样的能源，整个气动射流系统是不能工作的。而这种空气的获得是靠气流系统来完成的。可见，气流系统在气动射流技术中占有一定的地位。

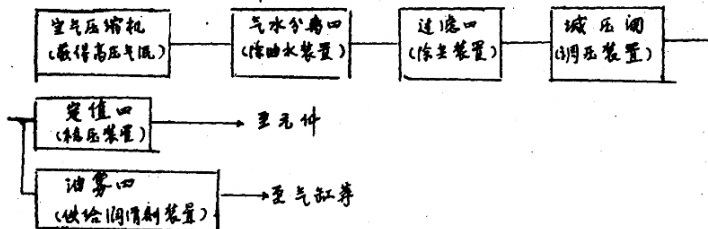
空气压缩机是气流系统中供给能源的装置，它产生具有一定压力的压缩空气。

从空压机输出的压缩空气尚不能直接供给控制系统和执行机构使用，因为这时的压缩空气常常带着不少的水份、油污和尘埃等杂质。这些杂质如不除去，将使气动系统各部件容易生锈、腐蚀或提高磨损；特别在使用小型气动射流元件时更易导致元件喷嘴和控制口的堵塞，造成元件动作失灵。所以必须由净化装置对压缩空气进行净化。

经过净化的压缩空气仍不符合使用要求，因为一方面有时嫌压力过大，另一方面压力也不够稳定，所以必须再经过调压、稳压装置进行调压和稳压，最后才能符合使用要求。

综上所述，气流系统是由能源供给装置（空压机）、净化装置、调压、稳压装置等所组成。（在气动射流系统中使用气缸等需注入润滑油气动元件的场合，为减少摩擦和延长其使用寿命，有时需在气缸等部件中注入润滑油，这就还需要供给润滑油的装置——油雾器）

气流系统的简单工作框图如下



§1 空气压缩机

空压机是产生具有一定压力的压缩空气的装置。由于它在工业上应用很广泛，故此仅作简单介绍。

一. 工作原理

空压机的基本原理是利用曲轴的偏心作用，将轴的旋转运动变成气缸活塞上下的往复运动，而产生压缩空气，如图 2-1 所示。

空压机的工作情况是这样的：当活塞在最高位时，在蝶形弹簧 D、E 的作用下，气阀片 C、F 堵住了进气口、出气口与气缸的通路，使进气口 A 与出气口 B 都处于关闭状态。当活塞向下快速移动时，气缸活塞上部腔室中的压力将低于外界的大气压力，气阀片 C 在大气压力的作用下克服蝶形弹簧 D 的作用力，迅速下移，于是进气口 A 被打开，外界略经过滤的空气被吸入缸内，此时在蝶形弹簧 E 的作用下，出气口 B 仍处于关闭状态。当活塞又向上快速移动时，缸内气体被压缩，压力将增高，此压力作用在气阀片 C、F 上使进气口 A 被关闭，而出气口 B 被打开，于是缸内具有压力的空气经出气口 B、输出管被压入气桶储存。

二. 使用保养注意事项

1. 空压机须放在空气流通、清洁、阴凉处；不要放在空气污浊、多含尘土、煤灰或油类燃料之蒸发废气等环境下工作；
2. 经常检查空压机的自动控制系统及安全阀；
3. 经常检查润滑油情况；
4. 空气过滤器，在正常情况下使用 250 小时后，要进行清洗。

§2 气流净化装置

一. 分水滤气口

分水滤气口是将压缩空气进行净化，除去其中的水分，油分 and 颗粒较大的尘埃的广泛应用的净化装置。常用的 QSL

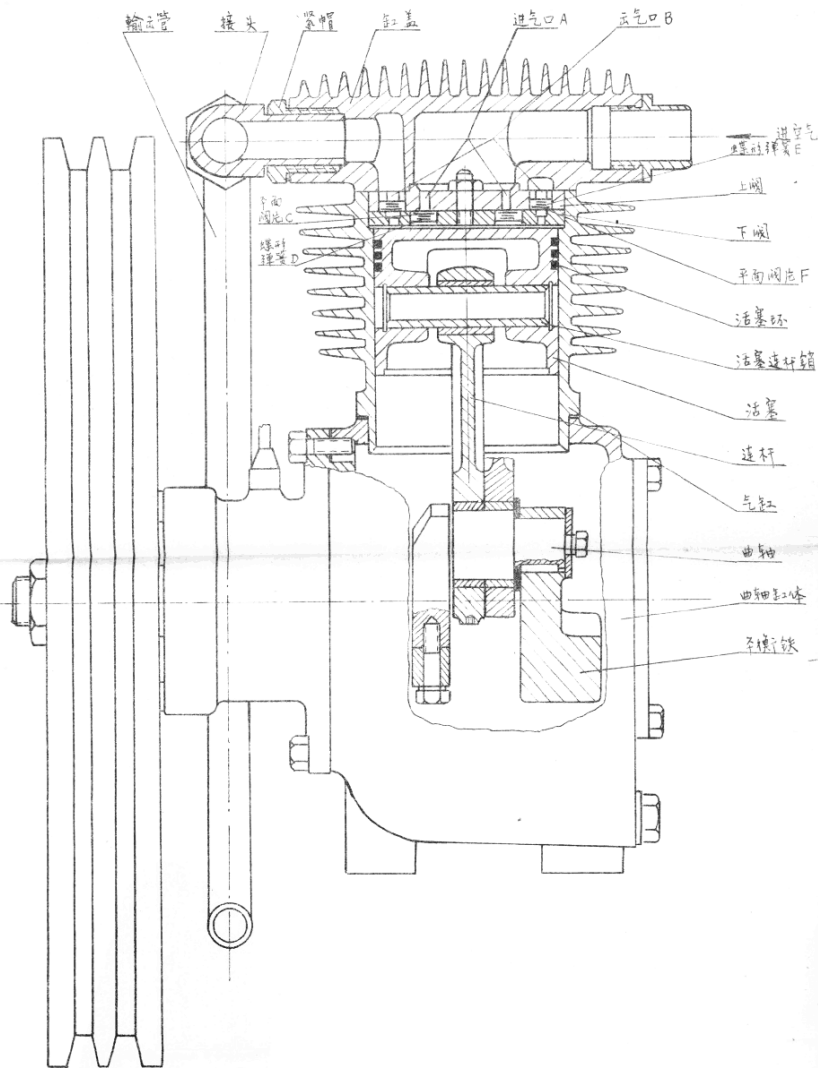


图 2-1 移动式空气压缩机的气缸结构图