

亚音速气体喷射器的流控端口特性的研究及应用

郭金基

(数学力学系)

摘要

在文[1]的基础上列出喷射器的基本方程式,讨论喷射器流控端口特性(外部条件)对其性能的影响;从优先条件导出最佳截面比,利用自由射流束长度取极值条件及联系流控端口特性的方程确定其几何尺寸。列举实例讨论了喷射器的效率计算问题。所得的结果已在节约能源及工业生产中得到应用。

一、亚音速气体喷射器的基本方程式

图1为亚音速气体喷射器示意图。设喷射器其喷射端(记为“j”端)总压力为 p_j , 喷咀出口速度为 u_1 , 静压力为 p_1 , 则工作流体的贝努里方程为

$$p_j = p_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 (1 + \zeta_1) \quad (1)$$

式中 ρ 为气体密度, ζ_1 为局部阻力损失系数。

设喷射器的吸气端(记为“S”端)总压力为 p_s , 混合室入口压力和速度分别为 p_2 和 u_2 , 则引射流体的贝努里方程为:

$$p_s = p_2 + \frac{1}{2} \rho u_2^2 (1 + \zeta_2) \quad (2)$$

式中 ζ_2 为引射流体阻力损失系数。

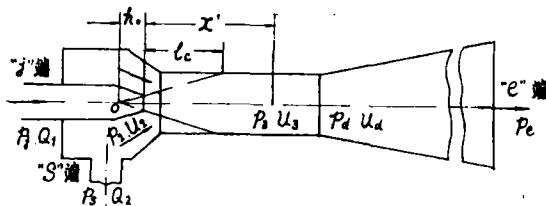


图1

通过文[1]一系列模型试验发现喷射流体横剖面压力梯度变化大, 接近固体壁边界

本文1982年10月收到。

的真空度比较中心附近急剧降低。假设接收管壁面足够光滑，而且接收管头部的锥度较小，引射流体入口的面积 F_2 与混合室的面积 F_3 相差不大，因此假设可以忽略接收管头部的侧壁面反作用力对冲量的影响〔注1〕，同时忽略沿程阻力对冲量的影响。文〔1〕列出流体的冲量方程，计算在混合室内 $x' > l_c$ 段的压力值，比文〔2〕等的计算结果为好，与实验数据十分接近。然而在混合室出口之前，由于流动状态的改变，对自由射流的速度函数产生了影响，按其计算的压力 p_3 与实验值对比出现了误差。为此要对该压力计算公式中包含与速度函数有关的项加以修正。若把混合室出口处的压力、速度分别记为 p_d, u_d ，则修正后的冲量方程为：

$$p_d F_3 / F_1 - p_1 - p_2 / \alpha = \rho u_1^2 \left[1 + \frac{4}{3} n^2 \alpha - \left(\frac{F_1}{F_3} \right) \cdot \frac{(1+n)^2}{2} \cdot \frac{Z_0^2 \phi(Z_0)}{\sigma^2(Z_0)} \cdot C_d \right] \quad (3)$$

式中 $Z_0 = d_3 / 2R$ ， $R = d_1 / 2h_0(h_0 + x')$ ， h_0 为极点深度， l_c 为自由射流束长度， $\phi(Z_0)$ 、 $\sigma(Z_0)$ 为 Z_0 的函数， C_d 为修正系数，与紊流度有关，由实验加以确定。

$$\alpha = F_1 / F_2, \quad n = Q_2 / Q_1 \quad (4)$$

式中 Q_1, Q_2 分别为工作流体与引射流体的流量， n 称为引射系数， F_1 为喷嘴面积， α 称为截面积比。

若把扩压段出口（记为“e”端）的压力和速度分别记为 p_e, u_e ，总压力记为 p_e ，则扩压段流体的贝努里方程写为：

$$p_d + \frac{1}{2} \rho u_d^2 (1 - \zeta_d) = p_e + \frac{1}{2} \rho u_e^2 = p_e \quad (5)$$

式中 ζ_d 为扩压段流体阻力损失系数。

二、最佳面积比的导出

我们从优化条件选择喷嘴出口面积与混合室面积之比（简称面积比）。在(3)式中，当压力 p_1, p_2 给定， n 及 α 由自由流束长度调节事先估算在某一数值范围时，混合室出口压力 p_d 可看作面积比 F_1 / F_3 的函数。

若设 $\beta = F_1 / F_3, \quad a(Z_0) = \frac{Z_0^2 \cdot \phi(Z_0)}{\sigma^2(Z_0)}$ (6)

方程(3)可写成下式：

$$p_d = (p_1 + p_2 / \alpha) \beta + \rho u_1^2 \left(1 + \frac{4}{3} n^2 \alpha \right) \beta - \frac{1}{2} \rho u_1^2 (1+n)^2 \cdot a(Z_0) \cdot C_d \cdot \beta^2 \quad (3')$$

上式中 $a(Z_0)$ 是 Z_0 的函数。 Z_0 与距离 x' （见图1）成反比，且与 β 有关。但当混合室

〔注1〕若考虑侧壁面反作用力对冲量的影响，则(3)式左边增加 $\int_{F_3}^{F_2} p dF$ 项。由于接收管头部锥度很小， F_2 与 F_3 相差不大，且接近侧壁面真空度低（表压 ≈ 0 ），因而可忽略这部分对冲量的影响，与实验结果很接近。至于接收管头部锥度较大时，将另文进行讨论。

出口处距喷嘴足够远, 即 Z_0 充分小时, $a(Z_0)$ 趋于一个定数, 与 β 无关。不难证明,

$$\lim_{z_0 \rightarrow 0} \frac{da(Z_0)}{d\beta} = \lim_{z_0 \rightarrow 0} \frac{da(Z_0)}{dZ_0} \cdot \frac{dZ_0}{d\beta} = 0,$$

即(3')式 p_d 对 β 求导数时, $a(Z_0)$ 对 β 的微商为零 ($Z_0 \rightarrow 0$), 最佳面积比的选择由 p_d 取极值条件来确定, 要求 $\frac{dp_d}{d\beta} = 0$, 由此可得:

$$\beta = \frac{p_1 + p_2/\alpha + \rho u_1^2 (1 + \frac{4}{3} n^2 \alpha)}{\rho u_1^2 (1+n)^2 a(Z_0) \cdot C_d} \quad (7)$$

把(7)式代入(3')式, 消去含有 $a(Z_0) \cdot C_d$ 项, 可得:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{F_3}{F_1} = \frac{p_1 + p_2/\alpha + \rho u_1^2 (1 + \frac{4}{3} n^2 \alpha)}{2p_d} \quad (8)$$

式中 p_1 、 p_2 及 p_d 由(1)、(2)、(5)式决定, 均以绝对压力计算。为了计算方便, 注意到 $Q_d = Q_1 + Q_2$, $u_d = Q_1 \cdot \frac{1+n}{F_3}$, $u_2 = \frac{Q_2}{F_2} = n\alpha \cdot Q_1/F_1$, 方程(2)、(5)可改写成:

$$p_s = p_2 + \frac{1}{2} n^2 \alpha^2 \rho u_1^2 (1 + \zeta_1) \quad (2')$$

$$p_d + \beta^2 \cdot \frac{1}{2} \rho u_1^2 (1+n)^2 (1 - \zeta_d) = p_e \quad (5')$$

将(5')代入(8)式可得:

$$\rho u_1^2 (1+n)^2 (1 - \zeta_d) \beta^2 + \left[p_1 + p_2/\alpha + \rho u_1^2 (1 + \frac{4}{3} n^2 \alpha) \right] \beta = 2p_e \quad (9)$$

于是得到反映喷射器性能的可达到参数和最佳面积比的重要关系式。从(8)式看出, 在气源压力较低时, 为了获得较高的真空度(即按绝对真空起算, p_1 、 p_2 较小), 如果喷嘴面积 F_1 固定时, 面积 F_3 需要缩小, 这更证实了文[1]缩小混合室面积获得真空的论述。再从(9)式可看到, β 随 p_e 变化而变化, 当压力 p_e 要求较高时, β 值也随之增加。若 F_3 固定, 则要求 F_1 增大, 这与我们设计在节能使用的几个喷射器的结果相一致。

三、流控端口性质及有关参数的确定

方程式(9)的应用必须了解流控端口的特性。所谓流控端口特性, 是指喷射器各端口("j"、"S"及"e"端)的压力、速度、流量、阻力系数以及它们之间相互制约的关系。这种制约关系是由喷射器内部流动规律而产生的。若要了解这些端口的流动特性, 仍然依赖于模型试验, 实测输入、输出的压力与流量特性曲线。由实测的压力、流量, 再通过方程(1)、(2)及(5)式计算流体阻力损失系数。图2表示喷射器 ($d_1 = 2.95 \text{ mm}$, $d_3 = 5 \text{ mm}$)

实测输入、输出的压力与流量特性曲线。这些流阻系数与端口的几何形状、流体的雷诺数等有关，通常要经过试验确定其数值范围。

文[2]讨论流控端口特性，按一维不可压缩流体取平均速度计算压力、流量增益与压力增益。该文考虑吸气端（即“S”端）封闭（相当于 $\zeta_2 \rightarrow \infty$ ）和敞开（相当于 $\zeta_2 \approx 0, p_s \approx p_e$ ）两种极端情形。在各阻力系数下，计算压力增益、引射系数分别与截面积比 α 的一组关系曲线。该文的优化标准选取“S”端两种极端情况（ $\zeta_2 \rightarrow \infty, \zeta_2 \approx 0$ ）相对应的压力增益和引射系数的一半，求得的 n^*, α^* 等参数作为设计的根据。

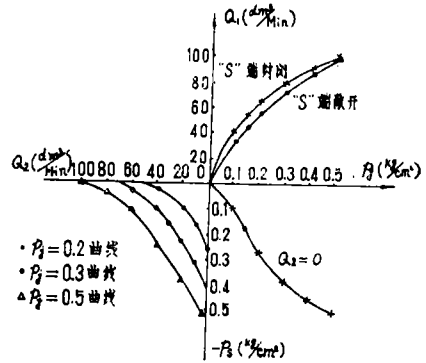


图 2

本文采用新的方法确定方程(9)的参数 n, α 。回顾文[1]曾提出自由射流束长度 l_c 的计算问题。

$$\frac{l_c}{x_0 - h_0} = 1 - \sqrt{2.392(g - k)} \tag{10}$$

式中 $f = 1 - 1.28n + 3.04n^2\alpha$ (11)

$$g = 1.21 - 0.339n + 2.065n^2\alpha \tag{12}$$

$$k = \sqrt{g^2 - 0.836f^2} \tag{13}$$

$x_0 - h_0$ 为自由流束过渡段长度，可由模型试验观察而得。

从自由流束长度 l_c 的表达式中，若把 α 当作参变数，则 l_c 为 n 的函数。由于 $\frac{dl_c}{dn} \approx f \cdot \frac{df}{dn}$ ，即 $f = 0$ 或 f 的极值点与 l_c 对 n 取极值点十分靠近；然而 $f = 0$ 或 f 取极值点很

易从(11)式求得。它依赖于参数 α 的选取， f 与 n 的关系曲线如图3(a)、(b)所示。找出 $f = 0$ 或 f 取极值点对应的 n, α 之后，用逐点试探法很易找到 l_c 的极值点。例如，当 $\alpha = 0.211, n = 1$ 时， f 取极小值；而 $n = 1.06, l_c$ 取极大值。

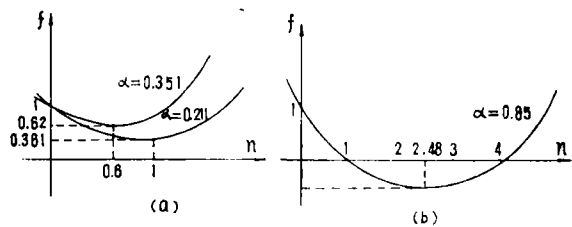


图 3

又如，当 $\alpha = 0.08, n = 4$ 时， $f = 0$ ，

亦即 l_c 取极大值点。求得的 n, α 值，还必须满足方程(9)式；即必须满足联系流控端口特性与内流动特性的条件。

四、应用举例

依照生产实际问题给出喷射器各端口特性的条件及欲达到的引射系数，要求设计喷射器的几何尺寸，现举例说明：

例 1、某化工节能装置使用的气体喷射器，工作流体压力 $P_i = 1.2 \text{ kg/cm}^2$ （绝对压力，下同）， $Q_1 = 120 \text{ dm}^3/\text{min}$ ， $\zeta_1 = 1.28$ ；引射流体压力 $P_s = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ ， $\zeta_2 = 4.3$ ；扩压段压力 $P_e = 1.05 \text{ kg/cm}^2$ ， $\zeta_d = 0.35$ ；引射系数 $n = 2/3$ ，试设计喷射器的几何尺寸。

计算过程如下：

按实际要求 $n = Q_2/Q_1 = 0.667$ ，由(11)式 f 对 n 取极小值条件： $n = \frac{1.28}{6.08\alpha}$ ，取 $n_0 = 0.6$ ， $\alpha_0 = 0.351$ ，现以 α_0 为参数，选取 $n = 0.65, 0.66, 0.67, 0.70$ 分别计算 l_c 值，可得 $\alpha = \alpha_0 = 0.351$ ， $n = 0.667$ 时， l_c 取极大值。（若 α_0 对应的 n 不是 0.667 ，则要重选 n_0 ，算出 α ，再重算）

取 $u_1 = 150 \text{ m/sec}$ ， $\rho u_1^2 = 0.2763 \text{ kg/cm}^2$ ，由(1)式算出 $p_1 = 0.884$ ； $Q_2 = nQ_1 = 80 \text{ dm}^3/\text{min}$ ， $\zeta_2 = 4.3$ （已知），由(2')算得 $P_2 = 0.96 \text{ kg/cm}^2$ 。

再将 n, α, p_1, p_2, p_e 及 ζ_d 诸值代入(9)式，可得：

$$0.4713\beta^2 + 3.945\beta - 2.1 = 0$$

从而求得最佳面积比 $\beta = 0.502$ ，

依据 u_1, Q_1 可算出 $d_1 = 4.1 \text{ mm}$ ， $F_3/F_1 = \frac{1}{\beta} = 1.99$ ， $F_3 = 26.27 \text{ mm}^2$ ， $d_3 = 5.785 \text{ mm}$ ，由 $\alpha = F_1/F_2$ 得： $F_2 = 37.6 \text{ mm}^2$ 。

实际加工尺寸： $d_1 = 4.1 \text{ mm}$ ， $d_2 = 8.2 \text{ mm}$ ， $d_3 = 5.85 \text{ mm}$ 。实测流量 $Q_1 = 119 \text{ dm}^3/\text{min}$ ， $Q_2 = 79.13 \text{ dm}^3/\text{min}$ ， $n = 0.665$ ，设计的数据与实验基本相符。

在生产实际中常遇到相反的问题，即喷射器的几何参数已给出，例如已知面积比 $\beta = \beta_0$ ， α 通过自由射流调节也可确定其范围；并且已知流控端口的压力条件，要求确定引射系数 n 。

根据已知的条件，方程(9)式可改写为下式：

$$\rho u_1^2 \left[\frac{4}{3} \alpha \cdot \beta_0 + (1 - \zeta_d) \beta_0^2 \right] n^2 + 2(1 - \zeta_d) \rho u_1^2 \cdot \beta_0^2 n = 2p_e - \beta(p_1 + p_2/\alpha + \rho u_1^2) - (1 - \zeta_d) \beta_0^2 \cdot \rho u_1^2 \quad (14)$$

方程(14)的解 n 随 α 增加而增加。问题是如何合理地选择截面积比 α ，既要满足于方程(14)，又要满足自由射流束长度 l_c 取极值条件？考察(10)式可知，由 $f = 0$ 或 $\frac{df}{dn} = 0$

的条件对应的 n 与 α 的关系。 n 随着 α 的增加而减小，与(14)式正好相反，两者关系的曲线见图4。这两条曲线的交点 (n^*, α^*) ，即我们要找寻的 α 值。由此确定的引射系数 n 为本问题的解。它们可通过自由射流的调节来实现。

例 2、抽吸循环水冷却装置的喷射器，喷嘴 $d_1 = 3 \text{ mm}$ ， $d_3 = 5 \text{ mm}$ ， $\beta = 0.36$ ；已知 $P_j = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ ， $P_1 = 0.704 \text{ kg/cm}^2$ ， $P_2 = 0.77 \text{ kg/cm}^2$ ， $\rho u_1^2 = 0.5566 \text{ kg/cm}^2$ ， $P_e = 1.02 \text{ kg/cm}^2$ ， $\zeta_d = 0.35$ 。通过自由射流调节， α 可在 $0.2 \sim 0.25$ 之间变化，试决定引射系数 n 。

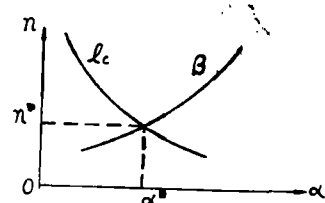


图 4

β 指(14)式计算曲线
 l_c 指(11)式计算曲线

计算过程如下:

仿前讨论,由(10)式按自由射流束长度 l_c 取极值条件, 计算得:

$\alpha = 0.21, n = 1.07.$

依据方程式(14)将已知 $p_1, p_2, \rho u_1^2, p_e, \zeta_d$ 各数值代入, 由给出 $\alpha = 0.2 \sim 0.25$ 的条件, 依次计算得:

当 $\alpha = 0.20$ 时, $n = 0.8542;$

当 $\alpha = 0.21$ 时, $n = 1.074;$

当 $\alpha = 0.22$ 时, $n = 1.19.$

由此选择 $\alpha^* = 0.21, n^* = 1.07$ 为所求.

实测 $Q_1 = 90.29 \text{ dm}^3/\text{min}, Q_2 = 97.4 \text{ dm}^3/\text{min}, n = 1.079$ 与计算的值很接近.

喷射器与流控元件组合已广泛应用于节能的项目中. 如图 5 为: (a) 给出循环水冷却; (b) 用喷射器抽取油池的废水; (c) 代替酸泵, 抽吸酸碱液; (d) 代替机械增压等装置的示意图.

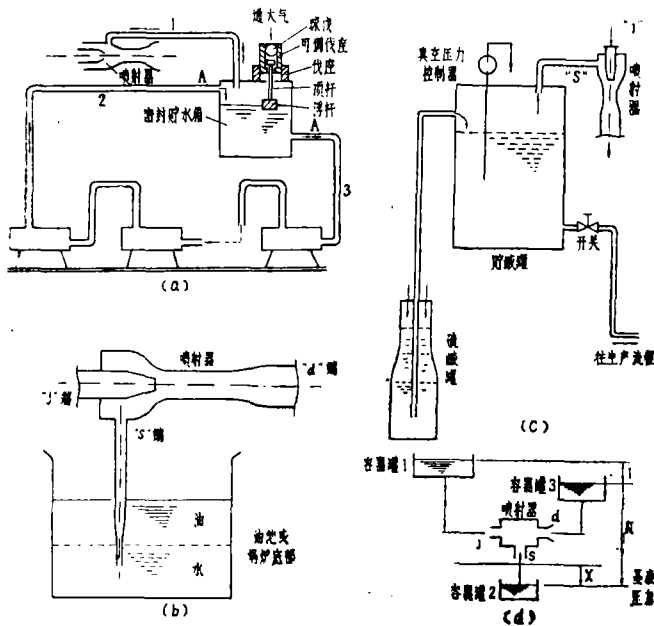


图 5

五、喷射器效率的计算

研究喷射器的流控端口特性可以计算喷射器的效率. 本文仍按三种典型的基本气路⁽³⁾(见图 6), 由端口特性推算其效率, 并指出其实际应用的概况.

设喷射器输出功率记为 W_1 ; 输入功率记为 W ; 效率记为 η , 则

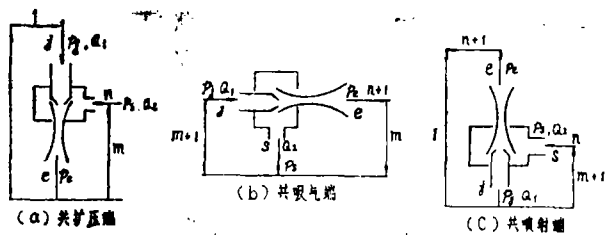


图 6

$$\eta = W_1/W \quad (15)$$

喷射器的压力增益 m , 定义为:

(a) 共扩压端

$$\text{输出功率 } W_1 = Q_2 \cdot (p_e - p_s) \quad \text{输入功率 } W = Q_1 \cdot (p_j - p_e) \quad (16)$$

把(4)、(16)式代入(15)式可得喷射器的效率:

$$\eta = \frac{Q_2 \cdot (p_e - p_s)}{Q_1 \cdot (p_j - p_e)} = m \cdot n \quad (17)$$

文[2]讨论属于这种气路的接法。若把(1)、(2')、(5')式代入上式, 则化为由内部流动特性计算喷射器的效率。气体浓度传感器、空气—乙烯燃烧器、抽吸硝酸、抽吸液氯等装置使用的喷射器相当于共扩压端口的情形。气体浓度传感器的喷射器的喷嘴尺寸很小, 但对引射系数要求较严格。例如设喷射器 $p_j - p_e = 0.5 \text{ kg/cm}^2$, $p_s - p_e = 0.2 \text{ kg/cm}^2$, $Q_2 = 0.3 \text{ dm}^3/\text{min}$, $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.563$, $\zeta_d = 0.25$, $d_1 = 0.267 \text{ mm}$, 欲使引射系数 $n = 0.32$, 按本文(9)式计算得 $\beta = 0.62$, $d_3 = 0.34 \text{ mm}$ 。这种微型的喷射器多在流控线路中使用。

(b) 共吸气端

因为以吸气端口 p_s 为基准, 输出功率 $W_1 = (p_e - p_s)(Q_1 + Q_2)$

$$\text{输入功率 } W = (p_j - p_s)Q_1$$

把(4)、(16)式代入(15)式, 化简后得共吸气端口的喷射器效率:

$$\eta = \frac{(p_e - p_s) \cdot (Q_1 + Q_2)}{(p_j - p_s) \cdot Q_1} = \frac{m}{m+1} \cdot (1+n) \quad (18)$$

鉴于我们设计的喷射器, 流量增益 n 通常大于1, 即扩压端出口的流量为工作流体的流量的 $(1+n)$ 倍。虽然扩压端出口的压力比工作流体的压力低, 但相对于吸气端的压力是升高的。从(18)式可看出其效率 η 可以不降低。提高流体的压力而不直接消耗机械能量是喷射器的重要特点之一⁽⁴⁾。凡有压力源的地方, 用以代替机械增压设备以及能源回收、节约能源等方面, 有广泛应用的前景。

(c) 共喷射端

仿前讨论, 其效率为

$$\eta = \frac{(p_j - p_s) \cdot Q_2}{(p_j - p_e) \cdot (Q_1 + Q_2)} = (1+m) \cdot \frac{n}{1+n} \quad (19)$$

这种接法对吸气端而言压力增益较高, 可在叶轮泵上应用以防止气蚀。

喷射器除作为功率元件外, 还朝微型化发展作为控制元件使用。可以实现简单的“非门”、“与门”、“或门”逻辑动作, 并可作为传感器使用。喷射器能产生真空气源, 它与负压逻辑元件配套使用可实现真空控制技术的许多动作的要求。

本文讨论喷射器的流控端口特性及自由射流束长度取极值条件, 选择最佳的截面积比及引射系数的方法与其它文献不同, 为喷射器的设计与理论计算提供新的途径。

参 考 文 献

- 〔1〕 郭金基, 中山大学学报(自然科学版), 1981, 1.
- 〔2〕 N.F.Macia, R.L.Woods, *Fluidics Quarterly*, 11(1979), 2.
- 〔3〕 J.R.Tippetts, *Fluidics Quarterly*, 11(1979), 1.
- 〔4〕 Г.А.索科索夫等(黄秋云译), 喷射器, 科学出版社, 1977.

The Study and Application of the Fluidic Port Characteristics of Subsonic Air Ejectors

Guo Jinji

Abstract

This paper sets up the fundamental equation of the ejector with reference to paper〔1〕 and points out how the fluidic port characteristics of the subsonic air ejector can influence its operating properties. The optimum of sectional ratio is derived from optimal conditions. According to experimental data we could obtain the coefficient of resistance of the fluidic port. Geometrical size of the ejector can be determined by using its maximum conditions of the free jet length and the equation of the fluidic port characteristics. This paper also discusses computing problem of the efficiency of the ejector. The results obtained as mentioned in this paper have been applied to industrial production.