

# 流量可调汽蚀文氏管喉部圆柱段长度的设计方法

国防科学技术大学 陈启智 高汉如

## 摘 要

为了提高流量可调汽蚀文氏管的压力恢复特性,其喉部设计有圆柱段,本文给出了在所研究的范围内该圆柱段长度的设计方法及其取值范围。文中给出了必要的解析表达式和图线。本文可供变推力液体火箭发动机和液体文氏管流量计研制人员参考。

可调汽蚀文氏管在六十年代就已成功地用在变推力液体火箭发动机上,能够精确地控制推进剂组元的配比,改善燃烧质量,提高燃烧效率,提高变推力火箭发动机的推力精度。减少飞行器的废重,增加有效载荷或增大火箭武器的有效射程。但其缺点是压力损失较大(约15%左右),因此,如何减少压力损失已成为一个引人注目的问题。

通过理论分析和实验研究发现,文氏管的其它条件不变,在喉部直径处适当增加一个圆柱段,会得到较高的压力恢复系数。这样就引出了该圆柱段与哪些参数有关以及如何确定该圆柱段长度的问题,对此我们采用实验研究与理论推证相结合的方法进行了扼要的分析。

## 一、压力恢复特性与喉部圆柱段长度的关系

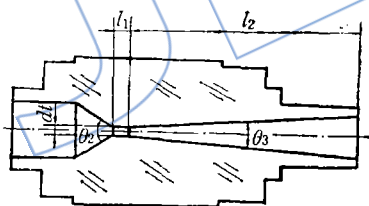


图1 文氏管试验件结构简图

**1. 试验件及其主要参数** 在研究过程中,利用了现有的文氏管试验台,用水作为工质进行试验,并设计了一套有机玻璃透明文氏管试验件,其结构与具体参数见图1及表1〔4〕。

文氏管喉部圆柱段长度,设计变化范围为 $(0 \sim 5)dt$ ,取值间隔3mm〔4〕,这是为了对试验结果进行正交多项式回归分析方便而进行的。

**2. 试验结果的经验关系式** 经过了相当数量的实验并对结果数据用最小二乘法进行回归分析。并令 $p^* = p_1/\bar{p}_1$ , (入口压力与设计高工况入口压力之比),  $h^* = H/H_1$ ,  $l^* = l_1/dt$ , 整理后得到文氏管压力恢复系数的经验公式〔4〕:

$$\varphi = 0.17560 + 0.10221p^* - 0.01590p^*h^* - 0.00167l_1^*{}^3h^{*2} + 0.22174l_1^*h^* + 0.11480h^* - 0.08681l_1^*{}^2h^* + 0.01605l_1^*{}^2h^{*2} + 0.00883l_1^*{}^3h^* - 0.03993l_1^*h^{*2} \quad (1)$$

为了研究喉部圆柱段长度 $l_1$ 的变化对压力恢复系数 $\varphi$ 的影响,对(1)式求导得:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial l_1^*} = (0.0265h^* - 0.005h^{*2})l_1^*{}^2 + (0.03211h^{*2} - 0.17363h^*)l_1^* + (0.22174h^* - 0.03993h^{*2}) \quad (2)$$

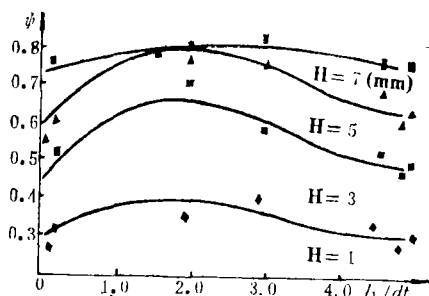


图2 经验公式(1)与试验结果的比较

令  $\partial\phi/\partial l_1^* = 0$ , 得到各开度下的  $l_1^*$  和  $l_1$  的最佳值<sup>[4]</sup>如表 2 所示。

表 2 工作行程  $H$  与最佳值  $l_1^*_{opt}$  和  $l_1_{opt}$  的关系

| $H$           | 1      | 3      | 5      | 7      |
|---------------|--------|--------|--------|--------|
| $l_1^*_{opt}$ | 1.7445 | 1.7440 | 1.8530 | 2.8020 |
| $l_1_{opt}$   | 6.385  | 6.493  | 6.782  | 10.255 |

表 1 试验件参数

|        |              |              |                        |
|--------|--------------|--------------|------------------------|
| 已知条件   | 调节最小秒流量      | $G_1$        | 0.071kg/s              |
|        | 调节最大秒流量      | $G_2$        | 0.296kg/s              |
|        | 最大相对误差       | $\xi$        | 0.05                   |
|        | 文氏管入口压力      | $P_1$        | 21.0kg/cm <sup>2</sup> |
|        | 文氏管喉部圆角半径    | $r_t$        | 0.1cm                  |
|        | 调节锥行程差       | $\phi$       | 0.5cm                  |
| 设计计算结果 | 调节比          | $E$          | 0.2399                 |
|        | 文氏管喉部直径      | $d_t$        | 0.3656cm               |
|        | 调节锥半角        | $\theta_1/2$ | 5°2'4"                 |
|        | $G_1$ 对应调节间隙 | $L_1$        | 0.01169cm              |
|        | $G_1$ 对应之行程  | $H_1$        | 0.1332cm               |
|        | $G_2$ 对应之行程  | $H_2$        | 0.6332cm               |
|        | 文氏管扩散角       | $\theta_3$   | 6°                     |
|        | 文氏管收敛角       | $\theta_2$   | 60°                    |

公式 (1) 与试验结果符合较好, 并且提出了在设计初如何根据已知条件确定  $l_1$  的问题。

## 二、圆柱段长度 $l_1$ 的取值范围

(2) 式可写成  $Xl_1^{*2} + Yl_1^* + Z = 0$ , 求解只取其中有意义的根:

$$l_1^* = (-Y - \sqrt{Y^2 - 4XZ}) / 2X \quad (3)$$

$$X = ah^* - bh^{*2}, Y = ch^{*2} - dh^*, Z = eh^* - fh^{*2} \quad (4)$$

由此可见,  $l_1$  的取值主要决定于  $h^* = H/H_1$ , 而  $H$  的取值范围应在  $H_1$  与  $H_2$  之间。

1.  $H_1$  与  $H_2$  的解析表达式 由文献<sup>[3]</sup>

$$H_1 = [-(4\delta\Phi + \Phi^2K) + \sqrt{(4\delta\Phi + \Phi^2K)^2 + 16\delta\Phi^2G_1}] / 8\delta$$

式中  $K = (G_2 - G_1)/\Phi$ ,  $\delta = \xi G_2(1 + \sqrt{E})^2/4$  (最大绝对误差), 而  $E = G_1/G_2$ ,

$$H_1 = \Phi \{ \sqrt{[(1 + \sqrt{E})\xi + (1 - \sqrt{E})]^2 + 4E\xi} - [(1 + \sqrt{E})\xi + (1 - \sqrt{E})] \} / 2\xi \quad (5)$$

由此可以看出行程  $H_1 = f(\Phi, E, \xi)$ ,  $H_2 = \Phi + H_1$  即

$$H_2 = \Phi \{ 1 + \{ \sqrt{[(1 + \sqrt{E})\xi + (1 - \sqrt{E})]^2 + 4E\xi} - [(1 + \sqrt{E})\xi + (1 - \sqrt{E})] \} / 2\xi \} \quad (6)$$

将  $E = 0.2399$ ,  $\xi = 0.05$ ,  $\Phi = 0.5$ cm 代入 (5), (6) 式验算得  $H_1 = 0.1332$ cm,  $H_2 = 0.6332$ cm, 结果与表 1 相符合。

2.  $l_1$  取值范围 因为  $h^* = H/H_1$  考虑到工作状态的最低工作点处  $H$  用  $H_1$  代入, 则  $h^* = 1$ , 于是  $X = a - b$ ,  $Y = c - d$ ,  $Z = e - f$ , 则得  $l_1^* \cong 7/4$ , 故  $l_1 \cong (7/4)d_t$ 。由表 1  $d_t = 0.3656$ cm, 则  $l_1 = 0.6398$ cm 该值在表 2 的取值范围内。

由上推导可以看出  $l_1$  取值的下限由 (4) 式中试验所得系数本身决定, 而且其倍数是一个定值  $l_1 \cong (7/4)d_t$ 。当然, 由于试验的局限性, 在更广泛的范围内还需进一步的验证。

将  $H_2$  代入  $h^* = H/H_1$  式则  $h^* = 4.7594$ ,  $l_1^* = 2.0508 (\cong 2)$ , 此时  $l_1 = 7.5059$ mm 也在表 2 的范围内。因此根据本试验件试验所得的结果, 在其工作范围内, 可按  $\Phi$ ,  $E$ , 最大相对误

差 $\xi$ 来确定 $H_1$ 与 $H_2$ 使 $l_1$ 在 $(7/4 \sim 2)d_t$ 的范围内(图2)<sup>[4]</sup>。

由图2可见, $H=1, 3, 5(\text{mm})$ 时,对应最大压力恢复系数的 $l_1^*=l_1/d_t$ 的值相接近(见表2)。而 $H=7(\text{mm})$ 时 $\varphi=f(l_1/d_t)$ 曲线当坐标 $l_1/d_t$ 在 $(7/4 \sim 2)$ 之间时,变化率不显著。因此,可以考虑设计 $l_1$ 时取用低工况对应 $H=H_1$ 时的 $l_1$ 值。

当然,如果流量可调汽蚀文氏管经常工作点是在高工况时(此时对应较大的秒流量 $G_2$ ),则可选用对应 $H=H_2$ 时的 $l_1$ 值。这就是说, $l_1$ 的选取与文氏管的工作过程和程序有关。

3. 考虑最大相对误差 $\xi \rightarrow 0$ 时 $H$ 的表达式 (5),(6)式已经明确地给出了 $H$ 与 $\Phi, E, \xi$ 的关系,其中特别是反映了在全工作范围内秒流量的最大相对误差 $\xi$ 。在实际工作过程中,为了得到好的秒流量特性,不希望 $\xi$ 值较大。例如美国的LMDE FCV可调汽蚀文氏管 $\xi$ 值为0.54%左右<sup>[5]</sup>,此时文氏管的工作流量特性曲线已接近线性,对于控制系统来说这将是非常方便的。在某些已知参数下,需要通过特殊的结构型面设计才能实现这一目标。但使 $\xi \rightarrow 0$ 是可行的,按此条件推证出行程 $H$ 的表达式,将会得到令人满意的、应用上十分方便的结果。

对(5)式求当 $\xi \rightarrow 0$ 时的极限:

$$\lim_{\xi \rightarrow 0} H_1 = \Phi E / (1 - E) \quad (7)$$

$$\text{于是 } H_2 = \Phi / (1 - E) \quad (8)$$

由上推导可以得出很有意义的结论,即在流量可调汽蚀文氏管工作范围内 $\xi = 0$ 时,行程只与行程差 $\Phi$ 和调节比 $E$ 有关。虽然大多数文氏管在 $\xi \neq 0$ 的情况下工作,但 $\xi$ 相对较小时,这结论也是有实际意义的。可以利用(7),(8)式进行流量可调汽蚀文氏管的结构设计。

4.  $h_{\pi}^*$ 的表达式及其应用 我们定义 $h_{\pi}^* = H_2/H_1$ ,则 $\xi = 0$ 时

$$h_{\pi}^* = [\Phi / (1 - E)] / [\Phi E / (1 - E)] = 1/E \quad (9)$$

而 $\xi \neq 0$ 时的 $h_{\pi}^*$ 表达式可由(5)、(6)式推得,并得 $h_{\pi}^*(\xi \neq 0) / h_{\pi}^*(\xi = 0) = \lambda$ 为

$$\lambda = \frac{(1 + \sqrt{E}) \{ \sqrt{[(1 + \sqrt{E})\xi + (1 - \sqrt{E})]^2 + 4E\xi} + [(1 + \sqrt{E})\xi + (1 - \sqrt{E})] \}}{2} \quad (10)$$

由上推证可知 $h_{\pi}^*(\xi \neq 0)$ 的值等于 $h_{\pi}^*(\xi = 0)$ 的值乘以系数 $\lambda$ ,这个系数是由调节比 $E$ 和最大相对误差 $\xi$ 所决定的。而由(9)式可见 $h_{\pi}^*(\xi = 0)$ 只与调节比 $E$ 有关, $h_{\pi}^* = 1/E$ 是一个等边双曲线方程,坐标轴就是该曲线的渐近线(图3)。式中 $E$ 的取值范围在 $0 \sim 1$ 之间。由此可以看出,当 $E$ 较大时,即文氏管工作调节范围较小,曲线斜率相对讲较小, $h_{\pi}^*$ 较小;而当 $E$ 较小时,文氏管工作调节范围较大,曲线斜率变化大,则 $h_{\pi}^*$ 变化也较大。因此,在高调节比情况下,调节比对 $l_1$ 还是相当敏感的。这时只要 $E$ 确定了,则可根据已知参数决定 $l_1$ 的值。

如果是含有不同 $\xi$ 的情况,则需要通过系数 $\lambda$ 进行修正,即可求得 $h_{\pi}^*(\xi \neq 0)$ 的值,进而确定 $l_1$ 。 $\lambda = f(\xi, E)$ 的关系见图4。

通过图4可以清楚的看到, $\xi$ 与 $E$ 已知时可以很方便的得到 $\lambda$ ,进而确定文氏管喉部圆柱段长度。若 $E$ 在 $0.01 \sim 0.5$ 和 $\xi$ 在 $0 \sim 0.05$ 范围内(包含了可能工作的绝大部分),则 $\lambda$ 的变化范围不是很大的,而且调节范围愈大( $E$ 愈小),则 $\lambda$ 的数值愈较集中。在 $\xi = 0$ 时, $\lambda$ 与 $E$ 呈线性关系。在相对误差较大时,例如 $\xi = 0.15$ ,则由图4可见 $\lambda$ 随 $E$ 的变化范围很小。

当 $H_2 \rightarrow H_1$ 时,即 $\Phi \rightarrow 0$ 为中心含有锥的不调节汽蚀文氏管的情况,则存在 $l_1 = (7/4)d_t$ 的结果。该结论可供设计时参考,当然根据条件与工作状态要进行必要的修正。

应该说明, $h_{\pi}^*(\xi \neq 0)$ 只随 $E$ 变化的结论是在本文所限定的条件下得到的。在研究单一 $l_1$

对恢复系数  $\varphi$  的影响时, 同时限定了入口压力  $P_1$  等因素〔见公式(1)〕, 并且还未考虑扩散角  $\theta_3$  变化时所产生的影响, 这些问题已经进行了部分试验, 有待进一步研究。关于扩大限定条件的试验研究, 还要继续进行深入的工作。

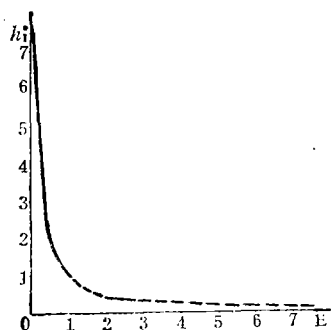


图 3  $h_{II}^*$  随  $E$  的变化曲线 ( $\xi = 0$ )

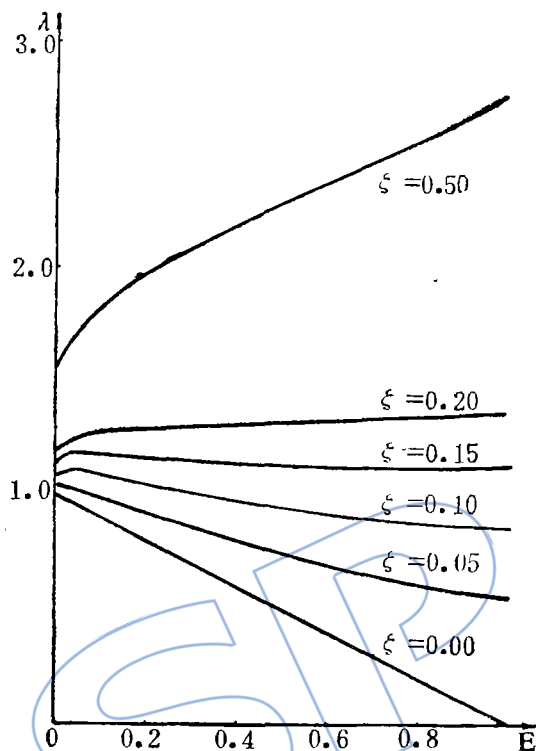


图 4  $\lambda = f(\xi, E)$  关系图

### 参 考 文 献

- 〔1〕 Harvey, D.M., "Throttling venturi valves for Liquid rocket engines", AIAA Paper NO.70-703.
- 〔2〕 陈启智、高汉如, "流量可调汽蚀文氏管的若干问题", 国防科技大学"工学学报", 1979年, 第4期。
- 〔3〕 高汉如、李晓滨, "线性可调汽蚀文氏管研究", 国防科技大学学报, 1983年, 第4期。
- 〔4〕 曹跃云, "流量可调汽蚀文氏管压力恢复特性", 国防科技大学, 硕士学位论文, 1985年。
- 〔5〕 高汉如, "液体火箭发动机变推力用流量可调汽蚀文氏管设计中几个问题的分析", 国防科技大学"工学学报", 1978年, 第2期。
- 〔6〕 Hammitt, F.G., Wakamo, C.L., Chu, P.T., Cramer, V.L., "Fluid-Dynamic Performance of a Cavitating Venturi", Part I, E14059 and Part II, E14060.

(责任编辑 王慧玉)

## A DESIGN METHOD FOR LENGTH OF CYLINDRICAL SEGMENT IN A THROTTLING CAVITATION VENTURI THROAT

Gao Hanru and Chen Qizhi

(National University of Defence Technology)

### Abstract

A throttling cavitation venturi is one of the key components of the space variable-thrust liquid rocket engine. In order to reduce its pressure loss and improve its pressure recovery characteristics, a cylindrical segment is designed to be inserted in the venturi throat.

Based on the experimental results obtained from the cold flow tests, the empirical formula is proposed for the pressure recovery characteristics of the throttling cavitation venturi. Through the theoretical analysis, the procedure for designing the length of the cylindrical segment in the range studied and the available interval for choosing are presented. The analytical expression for the function of venturi taper stroke  $H$  versus stroke difference  $\Phi$ , maximum relative error  $\xi$  and throttling ratio  $E$  is derived. With the aid of correction factor  $\lambda$ , the value of the cylindrical segment length for  $\xi \neq 0$  can be calculated from that for  $\xi = 0$ . The related graphics are also given. It is found that the throttling ratio  $E$  has a pronounced effect on the determination of the cylindrical segment length.

## EXPERIMENTAL STUDY ON ATOMIZATION OF PLAIN JET INJECTOR IN HIGH PRESSURE CO-AXIAL AIRFLOW

Yang Guixian and Jin Rushan

(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

### Abstract

An experimental study has been carried out on the effect of high ambient air pressure on the spray characteristics of a plain jet injector in coaxial high velocity airflow. The air pressures tested range from 1 to 16 atm, the airflow velocity from 60 to 120 m/s and the pressure drops of the injector tested from 0.2 to 2 MPa. Working fluid is water. The key feature of the experiment is to use a convergent-disvergent nozzle to maintain a high air pressure in the test chamber and at the same time to maintain a high airflow velocity in the atomization zone. It totally eliminates the air recirculation and problem of slow droplet settling in a commonly used pressurized vessel for high pressure atomization. The results show that SMD decreases monotonously with the increase of ambient air pressure, and at different air velocities the effect of the air pressure is different. The drop size distribution parameter  $N$  in Rasin-Rammler distribution decreases slightly with the increase of ambient air pressure.