

流控式可调气蚀文氏管

张 锡 衡

摘 要

本文论述了一种新颖的文氏管,它应用流控引流原理,采用旁路分流法,以达到调整流量的目的。它的结构简单、无机械活动零件、可靠性高。用同一个流控式可调气蚀文氏管可调整至不同流量,既提高了文氏管的调整精度,又节约资金、减少试验工作量。

本文论述了理论设计、计算及试验结果的分析。

一、概 述

气蚀文氏管在火箭发动机上使用比较普遍,其主要用途是控制管道内流量。在气蚀裕度的

范围内能自动补偿下游管系流阻损失的变化,以保证流量不变。但在火箭发动机的实际生产中,气蚀文氏管的调试、挑选工作量却很大其主要原因有二:1.每台发动机根据实际流阻,对气蚀文氏管的参数要求不同;2.文氏管喉部的几何尺寸对流量的变化十分敏感,靠加工精度做到与理论计算一致是不可能的。因此,研制一种简便、可靠的可调式气蚀文氏管是十分必要的。

国外研究可调式文氏管的主要技术途径有两个方面:1.用机械方法来改变文氏管喉部面积;2.用流控方式来改变流量(图1)。前一类方案国外研究、设计比较多,如美国专利US3894562、3809127、4285318(图1-I)等。在这些设计中,将文氏管的喉部设计成一个可移动的游针,可任意改变文氏管的喉部面积。此设计方案已用于美国航天飞机发动机调节器中。西德专利DT2828-249(图1-V)的设计中,文氏管的喉部有一对径向可调活塞,可改变喉部通道的面积。英国专利GB1348383(图1-II),苏联专利840-502(图1-IV)的设计采用可塑型喉管部,用外力强使喉部变形,以改变喉部面积。美国专利US3837363(图1-III)比利时专利BE808988(图1-III)等文氏管设计中,

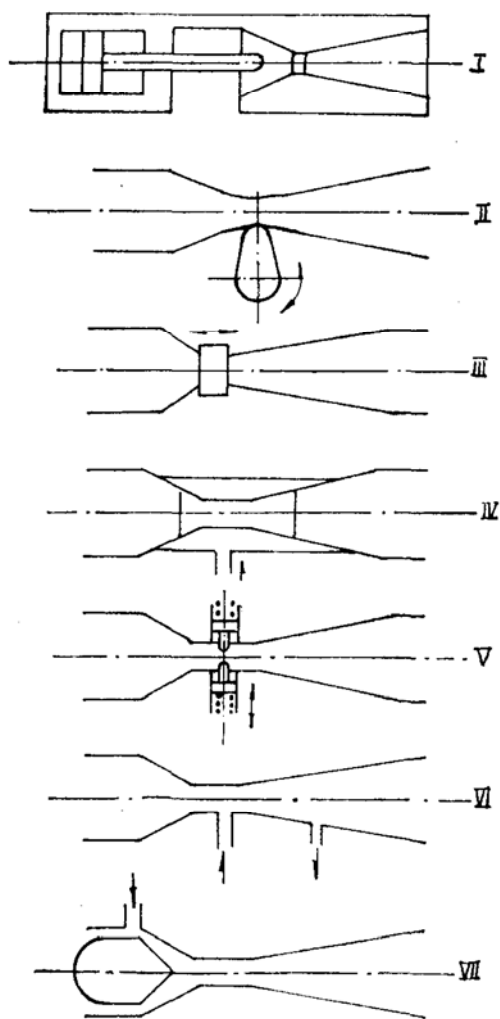


图1 国外文氏管设计专利

喉部是一个可轴向移动的活塞，用外界通气使活塞移动，改变喉部面积。此类设计，均有机机械活动零件，结构复杂可靠性低，流阻损失大。第二类的设计采用了流控节流原理，在喉部进行流量调整，例如苏联专利SU473-021(图1-VI)的设计，直接在文氏管的喉部开有一个偏流控制孔，偏流通过一小阀门进入，以改变主流流量，为减少偏流对主流的影响，减小流阻损失，在扩散部有一引出孔，引至低压区。英国专利GB1337745(图1-VII)也有类似结构。

本文所叙述的可调式气蚀文氏管，应用了流控引流原理，采用旁路分流法，直接将偏流从入口经偏流孔引入喉部下游，并在偏流孔上加以控制，以达到调整流量的目的。并且结构简单，无机械活动零件，调整方便，流阻损失小，可靠性高。这样，就避免了上述专利中所存在的缺点。经试验表明，它的性能良好，可在主流流量的10~12%内任意调整。

下面将可调气蚀文氏管设计原理、计算方法与试验结果分叙如下：

二、设计原理与计算方法

流控技术是用一股或多股流体来调节、控制另一股或多股流体的技术。可调气蚀文氏管应用引流流控原理，采用旁路分流法，以达到最小的损失，最大的流量调节范围。因此它是一种理想的流量型调节元件。

从文氏管的工作原理知道，当流体进入管子的收敛段后，流速增加，静压减小。如果流体进一步加速到其静压小于当地温度的饱和蒸气压时，流体便产生气蚀。此时在文氏管最小截面上形成一个气蚀区。从一般气蚀研究中得知，在气蚀区的中心部分是高速液体射流，而在其周围却是饱和蒸气。如果在此区间的管壁上开有小孔或缝隙，只要用较小的压力便能从此偏流孔（缝隙）中输入较多的流量。而当偏流孔中的液体输入压力稍大于当地静压时，偏流孔中就有流量输入主管与主流汇合，使汇合流流量增加。但偏流的输入并不都是使汇合流流量增加。因为在此处的流态对各种参数的变化十分敏感，由于偏流的输入，在汇合处主流与偏流的能量交换是十分复杂的，其结果流量可能增加，也可能减小。由于偏流的输入，偏流与主流相遇，主流的一部分被阻挡，在交汇处形成一个涡流区，使此处的静压升高。此现象的形成一方面使主流流量相应地减小，能量有损失，同时背压的升高使偏流量的输入也受影响。因此汇合流的大小，取决于综合能量平衡的结果。结构设计、理论计算的目的是如何选取合理的结构参数，使达到最小损失、最大的汇合流的调整。

1. 主通道计算

可调气蚀文氏管主通道计算，即偏流等于零时的文氏管计算，可按一般气蚀文氏管计算公式进行。主管的喉部直径计算如下：

$$D_h = D_1 \cdot \sqrt{\frac{G_{10}^2}{2g\left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \gamma \cdot D_1^4 \cdot \mu_{10}^2 \cdot (P_{10} - P_s) + G_{10}^2}} \quad (1)$$

式中 D_1 ——入口直径

P_{10} ——入口压力

P_s ——当地温度饱和气压

μ_0 ——流量系数

γ ——流体密度

G_{10} ——偏流量等于零时的主流流量

此时 G_{10} 的选取, 应按下式进行

$$G_{10} = C \cdot G^* \quad (2)$$

$$C = 0.95 \sim 0.97$$

G^* ——为发动机实际所需流量。

C 值为可调气蚀文氏管流量减小的调整范围。当偏流量不等于零时, 主流要发生变化。在主管结构参数确定的情况下, 进行下一步偏流孔选择与特性计算。

2. 特性计算

此处主要研究可调气蚀文氏管的流控特性, 即主流、汇合流与偏流输入的相互关系, 运用此关系便能计算出可调气蚀文氏管的工作能力, 即理论的 $G_{2\max}$ 、 $G_{\min}$ 的调整范围。为计算主流、汇合流、首先建立计算模型(图2)。在偏流孔附近取截面1—1、2—2、3—3,

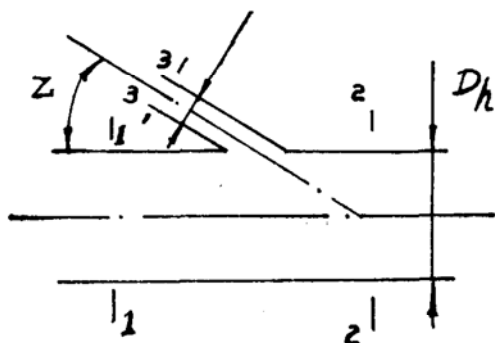


图2 理论计算模型

并假设

(1) 主流 G_1 经1—1面进入汇合区, 与偏流 G_3 汇合, 经2—2面后流体已均匀混合形成汇合流 G_2 。

(2) 流体为一元流, 在截面1—1、2—2、3—3上压力场、速度场均匀分布。

在有偏流输入的情况下, 流量连续方程为

$$G_2 = G_1 + G_3 \quad (3)$$

$$G_1 = \mu_{1-2} \cdot G_{10} \quad (4)$$

$$G_3 = \mu_{3-2} \cdot G_{30} \quad (5)$$

μ_{1-2} 、 μ_{3-2} ——分别为汇合时流量损失系数。

建立 μ_{1-2} 、 μ_{3-2} 与偏流 G_3 及有关结构参数关系。按能量守恒方程, 并建立 K_{1-2} 、 K_{3-2} 与 μ_{1-2} 、 μ_{3-2} 之间关系。

$$K_{1-2} = \frac{\Delta H_{1-2}}{\frac{V_2^2}{2g}} = \frac{\left(\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma}\right) - \left(\frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma}\right)}{\frac{V_2^2}{2g}} \quad (6)$$

K_{1-2} 定义为: 当主流与偏流汇合后, 主流总压头损失与汇合流动能之比。假设 $P_1 \approx P_2$ 。

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} (1 + K_{1-2}) \quad (7)$$

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + K_{1-2}}} \cdot V_1 = \mu_{1-2} \cdot V_1 \quad (8)$$

$$\mu_{1-2} = \frac{1}{\sqrt{1 + K_{1-2}}} \quad (9)$$

以相同的方法可得偏流的损失系数 μ_{3-2}

$$\mu_{3-2} = \frac{1}{\sqrt{1 + K_{3-2}}} \quad (10)$$

损失系数 K_{1-2} 、 K_{3-2} 并不是常数, 它们与偏流的输入量, 流控面积比, 入射角等有关, 按照 Gardel 半经验公式计算。

$$K_{1-2} = 0.03(1-Q)^2 - Q[1 + (1.62 - \sqrt{R})(\cos Z/A - 1) - 0.8(1-A)] + (2-A) \cdot Q \cdot (1-Q) \quad (11)$$

$$K_{3-2} = -Q^2[(1.2 - \sqrt{R})(\cos Z/A - 1) + 0.8(1 - 1/A^2) - (1-A)\cos Z/A] + (2-A) \cdot Q \cdot (1-Q) - 0.92(1-Q)^2 \quad (12)$$

R——偏流孔入主管处的倒角

$$R = \frac{r}{D_h}$$

Z——主管轴线与偏流孔轴线的夹角

Q——相对偏流输入量

A——流控面积比

$$Q = \frac{G_3}{G_2}$$

$$A = \frac{A_{30}}{A_{10}} \quad \begin{array}{l} \text{——偏流孔面积} \\ \text{——主管喉部面积} \end{array}$$

$$\text{偏流 } Q_3 = \frac{G_3}{G_{10}} = \mu_{1-2} \frac{Q}{1-Q} \quad (13)$$

$$\text{汇合流 } Q_2 = \frac{G_2}{G_{10}} = \mu_{1-2} \frac{1}{1-Q} \quad (14)$$

3. 偏流通道面积计算

偏流的调整杆与孔所形成面积 S_3 为月牙形, 可按下列公式计算(图3)。

$$S_3 = \frac{A_{30}}{\pi} \cdot \eta \quad (15)$$

$$\eta = \pi - \frac{\pi \cdot \theta}{180^\circ} + \sin \theta \quad (16)$$

$$\theta = 4 \sin^{-1} \sqrt{\frac{H}{2D_3}} \quad (17)$$

$$\frac{l}{D_3} = \frac{D_3 - H}{D_3} = 1 - \frac{H}{D_3} \quad (18)$$

偏流输入也可写成

$$\begin{aligned} Q'_3 &= \frac{G_3}{G_{10}} = \frac{G_{30}}{G_{10}} \cdot \mu_{3-2} = \frac{S_3}{A_{10}} \cdot \mu_{3-2} \\ &= \frac{S_3}{A_{30}} \cdot \frac{A_{30}}{A_{10}} \cdot \mu_{3-2} \end{aligned} \quad (19)$$

$$Q'_3 = \frac{S_3}{A_{30}} \cdot A \cdot \mu_{3-2}$$

l——两圆心距, 即开度

θ ——扇形角

$$\frac{S_3}{A_{30}} = f\left(\frac{H}{D_3}\right) \text{ 具体计算可查图10}$$

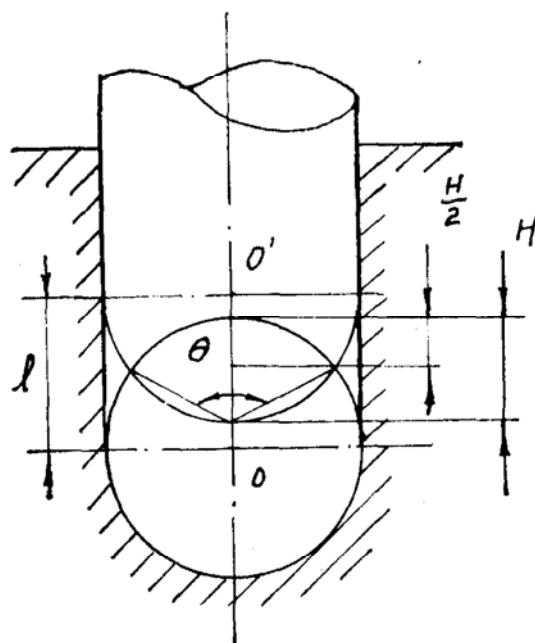


图3 偏流孔开度

三、特性分析与结构参数选择

可调气蚀文氏管的全特性可用输入特性、输出特性和流控特性^{[1][2]}来描述。现运用理论计算的流控特性来分析, 讨论汇合流 G_2 与偏流 G_3 及各种结构参数的相互关系。以选择较合

理的结构参数,达到最小的损失、最大的增益与调整范围。

流控特性的定义为: $G_2 = f(G_3, P_3)$, 或无因次量 $Q'_2 \cdot Q'_1 = f(Q'_3)$

$$P_1 = \text{const}, A = \text{const}, Z = \text{const}$$

增益的定义为: 汇合流的增量比偏流输入的增量, 也就是流控曲线的一次导数。增益为正值说明汇合流量增加, 增益为负值说明汇合流量减小了。

$$C_G = \frac{\delta \Delta G_2}{\delta \Delta G_3} = \frac{G_2 - G_{20}}{G_3 - G_{30}} \quad (20)$$

$$G_2 = G_1 + G_3 > G_{10} \quad (+ C_G)$$

$$G_2 = G_1 + G_3 < G_{10} \quad (- C_G)$$

$$G_2 = G_1 + G_3 = G_{10} \quad (C_G = 0)$$

1. 增益与流控面积比关系

流控面积比决定了理论流控能力的大小。

在同一个入射角 Z 的情况下, 流控面积比越小增益越大, 但流控面积比的减小, 其绝对的输入量也减小(见图 5、6)。

因此在满足所需要的调整范围的情况下, 应采用最小的流控面积比 A 。从计算结果中看出, 当流控面积比增大时, 偏流的输入使其流量损失系数 μ_{1-2} 值下降得很快, 偏流输入量加大使主流的动能损失也加大, 影响汇合流的增益。

2. 增益 C_G 与入射角关系

入射角 Z 对汇合流的增益关系较大。

入射角超过 45° 时增益下降很快, 入射角超过 100° 时增益成为负值。偏流的入射角过大时, 偏流的输入使主流的动量消耗太大, 以至汇合流能量下降, 可调文氏管就不能工作了, 而管子的性质变为节流管了。入射角的选取与相对偏流量的大小有关。在极小的偏控流输入情况下, 汇合流 Q'_2 对入射角的变化并不敏感, 因此入射角可取大一些, 在要求调整范围较大时, 流控面积比需取大些, 此时入射角只能取 $Z > 20^\circ$ 。入射角越小则汇合流的增益越大, 文氏管的效率越高。

四、流控式可调气蚀文氏管试验结果分析

流控式可调气蚀文氏管的设计、试验首先采用低压 $1.96 \times 10^6 - 2.45 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、大流量 50—60 kg/sec 行研究试验, 证实对低压、大流量进行流控满足要求后, 再设计、改进本流控式可调气蚀文氏管, 并进行特性试验, 试验结果分析如下:

流控面积比 A	入射角 Z	流控位置 $\frac{l}{D_h}$	偏流量 $Q'_3 \%$	汇合流 $Q'_2 \%$	可调范围 $\Delta Q'_2 \%$	增益 C_G
~0.066	60°	~1.3	max 4.275	max 103.6	3.6	0.77
~0.066	60°	~1.6	max 4.29	103.7	3.7	0.87
0.066	120°	~0.007	3	93.2	—	-2.3
0.066	120°	~0.4	5	94.2	—	-2.5

1. 流控特性分析

大流量的模拟件试验表明,用流控法来调节流量其性能是良好的,在取流控面积比 $A = 0.066$ 时,其可调整范围为 $3.6 \sim 3.7\%$ 的主流流量。试验结果说明该管在深度气蚀条件下工作时,偏流孔的位置应离喉部稍远一些,离喉部越远,则偏流的输入对主流的影响越小,虽然相对输入量 ($Q'_{3\max}$) 要小些,但主流损失也相应减小,因此总的汇合流的增益是上升的。

2. 输出特性分析

流控式可调气蚀文氏管的输出特性(工作特性)可用两组曲线来表示,一组为某偏控流下的气蚀特性,另一组为管道的节流特性。它们的交点即为在该管道阻抗条件下的工作点(图 8、9、10)。对一般气蚀文氏管在定进口压力下其气蚀特性只有一条,而对本管就有一组气蚀特性。不同的偏流量就有不同的特性线。试验结果表明,当偏流量加大时,气蚀特性线向上移动,气蚀点向左方移动。这说明偏控流的增大,使文氏管在一新的等效喉部面积下工作,必须进一步加大压降,才能到达气蚀点,相应临界压力损失系数稍有增加。

五、结 论

1. 流控式可调气蚀文氏管的设计原理是可行的,其理论计算和试验结果基本一致。
2. 流控式可调气蚀文氏管的可调整范围为主流的 12.5% , 结构可靠,调整精度仅取决于仪表和测试精度。
3. 当偏流量增大至 $Q'_{3\max}$ 时,相对压力损失增加至 3% , 但提高精工质量,损失可减小。

参 考 文 献

- (1) 张锡衡、教富仁:流控式可调文氏管(研究报告)。
- (2) 张锡衡:流控与流控管。《第一次全国管道与阀门论文集、下集》。
- (3) 张锡衡:流控管特性研究。
- (4) 教富仁:关于降低气蚀管的压力损失研究。

附图:

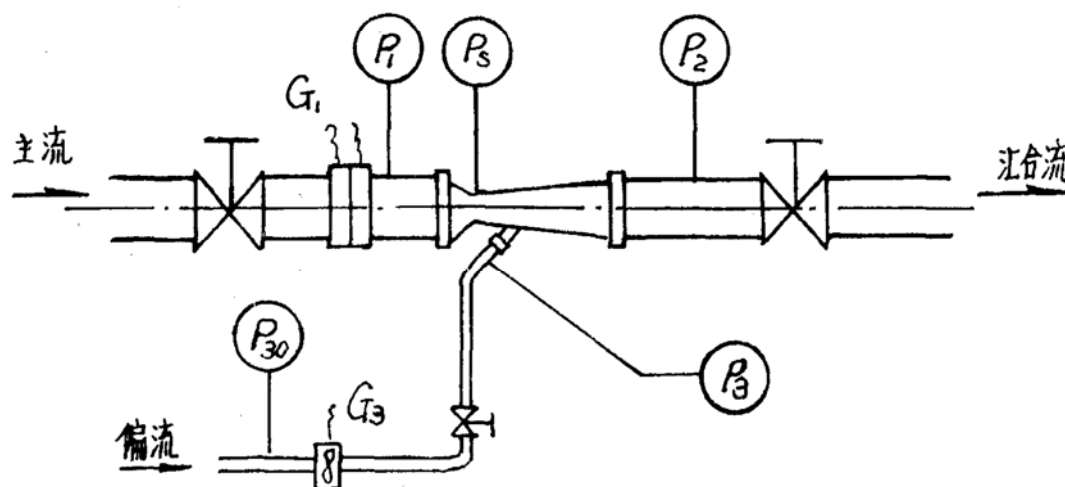


图 4 试验系统简图

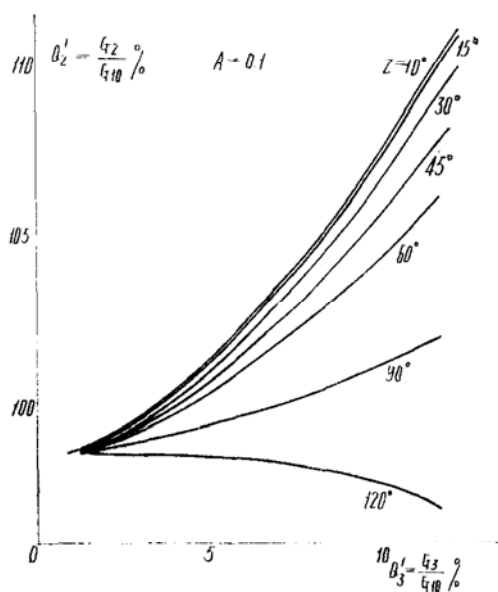


图5 流控输入量 Q'_3 与汇合流关系

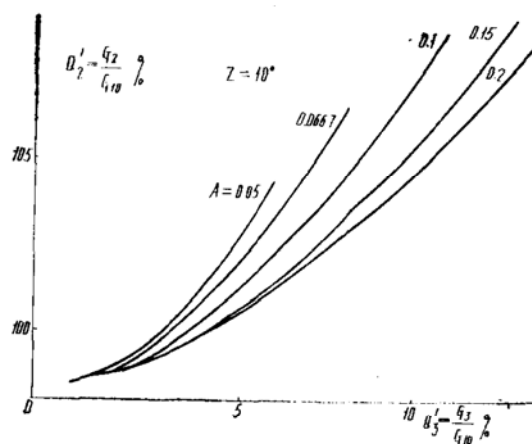


图6 流控输入量 Q'_3 与汇合流关系

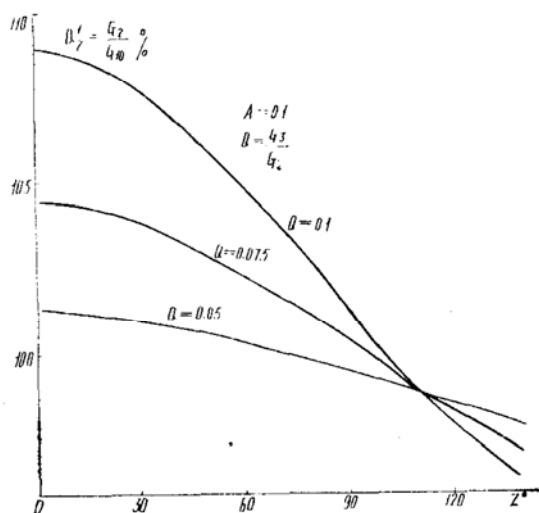


图7 输入孔夹角 Z , 流量与汇合流关系

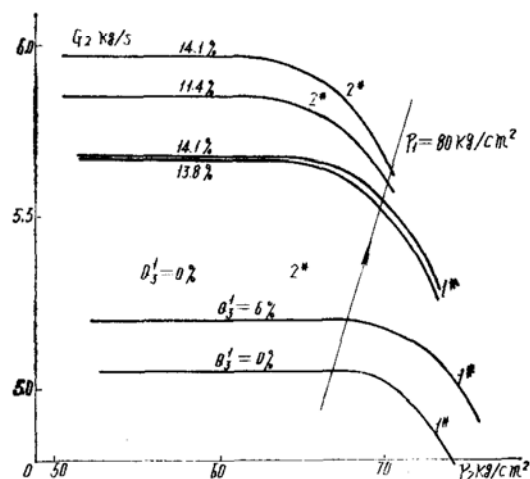


图8 可调气蚀文氏管输出特性