

液体推进剂发动机试验多工况流量控制方法

姬俊锋, 吴光中, 马利亚, 李久龙, 林 萌, 游良平

(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 分析了液体发动机试验多工况流量控制的难点及单个汽蚀管在流量控制中的缺点, 提出了一种汽蚀管组合方法来实现发动机试验多工况流量控制。利用汽蚀管的汽蚀裕度的特点, 指出了单个汽蚀管可以覆盖的工况范围。首先计算得到未确定汽蚀管工况中满足要求的具有最小喉部直径汽蚀管, 然后计算该汽蚀管可以覆盖的工况, 最后计算该汽蚀管与已得到的汽蚀管的组合所能覆盖的工况, 直到所有工况均已得到对应的汽蚀管或汽蚀管组。计算实例表明, 可以用较少的汽蚀管通过不同的组合方式来实现多工况流量控制。通过发动机试验证明, 本方法可以经济、有效地解决多工况流量控制问题。

关键词: 液体火箭发动机; 发动机试验; 流量控制; 汽蚀管

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 02-0071-05

Multiple-working-conditions flowrate control for liquid engine test

Ji Jun-feng, Wu Guang-zhong, Ma Li-ya, Li Jiu-long, Lin Meng, You Liang-ping

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: After analyzing the difficulty of the multiple-working-condition flowrate control during the liquid engine test and the shortcoming of the single cavitation venturi for the flowrate control, a cavitation venturi combination method is proposed. The characteristic of the cavitation margin of the venturi is considered in the method. The range of the working-conditions covered by the single venturi is pointed out in this paper. Firstly, the minimum throat diameter satisfying the demand of the working-conditions is obtained by computation, and then the working-conditions covered by this venturi are computed. Finally, the working-conditions covered by the combination of the venturi and the previously-obtained venturis are eliminated until no working-condition remains. The instance shows that less venturis can realize the flowrate control of the multiple-working-condition engine test and the cavitation margin affects the result. Test proves that the proposed method can solve the problem of the multiple-working-condition flowrate control effectively and economically.

Keywords: liquid rocket engine; engine test; flowrate control; cavitation venturi

收稿日期: 2010-10-25; 修回日期: 2010-11-11

基金项目: 国家航天技术支撑项目

作者简介: 姬俊锋 (1981—), 男, 博士, 研究领域为液体火箭发动机试验技术

0 引言

推进剂流量控制是液体火箭发动机控制过程中的重要内容^[1,2,3]。目前液体流量调节可采用专用的流量调节阀或者汽蚀文氏管。流量调节阀功能强,流量调节范围大,但是价格昂贵;汽蚀文氏管是常用的液体流量控制元件,结构简单、易加工,经标定后可实现流量的精确控制^[4],相对而言经济性高很多。其最大优点在于当汽蚀管喉部发生汽蚀时,流量只与汽蚀管的入口压力有关,而不受下游压力的干扰,但是受汽蚀管工作原理限制,单个汽蚀管调节范围相对较窄。

对于某些发动机试验,工况多达数十多个,一个试车台需要适应多种型号、多种工况的试验,其推进剂流量、发动机入口压力变化大,此时单个汽蚀管难以满足多工况的流量控制要求,若为每种工况单独设计一个汽蚀管也不现实。可调汽蚀文氏管虽然可以通过调节喉部截面积来调节流量范围,但是可调汽蚀文氏管在实际应用中存在针锥的具体位置与流量难以一一对应,滚珠丝杠自锁、电机调节精度和流量调节的可重复性差等问题^[5]。

文献 [6]、[7] 等从理论角度研究了汽蚀现象产生的机理及理论模型。文献 [8]、[9] 等研究了文氏管在两相流流量测量中的应用。本文作者针对液体推进剂发动机试验中多工况变流量试验需求,对流量控制方法进行了研究,提出了“汽蚀管组合流量控制方法”,即:采用数个不同喉部直径的汽蚀管并联组合,在每个汽蚀管前设置切断阀,通过控制阀门开关来实现不同汽蚀管并联组合工作,再限制汽蚀管入口压力,以实现多工况流量精确控制。本文对该方法和汽蚀管组的参数计算方法进行了描述。

1 问题分析

图 1 所示为一喉部带直线段汽蚀管内型面几何参数示意图。

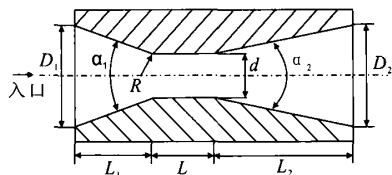


图 1 喉部带直线段汽蚀管内型面几何特征参数示意图

Fig. 1 Parameter schematic of cavitation venturi with straight line at the throat

连续充满管道的液体流经汽蚀管收缩型面并产生汽蚀时,汽蚀管质量流量 q_m 按下式计算^[10]

$$q_m = C \cdot A \sqrt{2(p_{iv} - p_s) \cdot \rho_{iv}} \times 10^3 \quad (1)$$

式中: q_m 为液体汽蚀条件下的质量流量, kg/s; C 为流量系数, 通常取值 0.8~0.95, 与汽蚀管几何形式有关; A 为汽蚀管喉部截面积, m^2 ; p_{iv} 为汽蚀管入口液体静压力, MPa; p_s 为液体在当地温度条件下的饱和蒸气压, MPa; ρ_{iv} 为汽蚀管入口液体密度, kg/m^3 。汽蚀管流量系数的选取可参照几何参数相似及雷诺数相同的已有汽蚀管的流量系数值选取。汽蚀管相对压力损失定义为^[10]

$$\delta_r = \frac{p_{iv} - p_{ev}}{p_{iv}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: δ_r 为相对压力损失; p_{ev} 为汽蚀管在给定入口压力下喉部刚发生汽蚀时汽蚀管出口压力, 即初始压力。相对压力损失与汽蚀管几何参数及喉部粗糙度有关, 可通过调整汽蚀管出口扩压段轴向长度、喉部区域表面粗糙度及喉部工作段轴向长度等来调整。汽蚀管相对压力损失通常为 9%~25%。在实际使用中, 为了确保系统在规定入口压力下流过汽蚀管的流体质量流量为规定值, 汽蚀管的出口压力必须小于初始压力, 即相对压力损失要给一定的汽蚀裕度^[10]

$$\Delta\delta = \delta - \delta_r \quad (3)$$

$$\delta = \frac{p_{iv} - p_{ov}}{p_{iv}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\Delta\delta$ 为汽蚀管的汽蚀裕度, δ 为实际压力损失, p_{ov} 为汽蚀管在过渡汽蚀情况下汽蚀管的出口压力。一般 $\Delta\delta$ 取 3%~5%, 对具有推进剂利用系统的发动机汽蚀管, 汽蚀裕度可适当放宽。

由式 (1) 可知, 当汽蚀管达到汽蚀条件通过汽蚀管的流体流量只与汽蚀管入口压力有关。如发动机试验工况只有流量要求, 则只需改变汽蚀管入口压力即可。但是一方面汽蚀管入口压力受上游压力限制, 不能无限提高; 另一方面, 试验工况通常有汽蚀管出口压力要求。固定喉部直径的汽蚀管虽然可以通过调节入口压力来调节流量, 但此时出口压力未必满足工况要求。

因此, 首先由各工况汽蚀管出口压力及相对压力损失 δ_i 确定汽蚀管入口压力, 再通过设计汽蚀管喉部直径 d 保证流量 q_m 。由于有汽蚀裕度 $\Delta\delta$ 存在, 在给定入口压力下, 出口压力可以在 p_{ev} 与 p_{ov} 之间调节。如果多个工况的流量及出口压力符合某种条件, 单个汽蚀管也可以覆盖多个工况。此外, 不同汽蚀管组合使用, 在同样的入口压力下, 流量也会比单个汽蚀管增加, 因而可以覆盖更多的工况。本文即基于该思想来设计多工况流量控制汽蚀管组合方法, 方法原理见图 2。

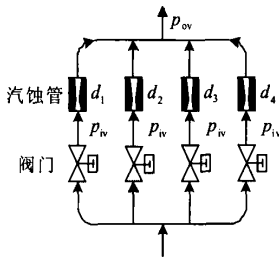


图 2 多工况流量控制汽蚀管组合方法原理简图

Fig. 2 Schematic of cavitation venturi set for multiple-working-conditions flowrate control

如图 2 所示, 假设 4 个不同喉部直径汽蚀管并联且最多允许两个汽蚀管同时使用, 则最多有 $C_4^1+C_4^2$ 共 10 种组合方式。通过合理计算选择汽蚀管几何尺寸及放宽汽蚀管的汽蚀裕度, 在实际试验过程中, 控制汽蚀管前阀门的通断来使用不同的汽蚀管组合, 由此可以覆盖较多的试验工况。

2 组合计算方法

设工况集合为 $S=\{(q_m, p_{ov})\}, i=1,2, \cdots, N,$

其中 q_m 为推进剂质量流量, p_{ov} 为汽蚀管出口压力, N 为工况个数。

首先假设每个工况的汽蚀管的出口压力为汽蚀管刚发生汽蚀情况下的出口压力, 为了保证一定发生汽蚀, 给定此时汽蚀裕度为 3%, 则每个工况的入口压力 p_{iv_i} 为

$$p_{iv_i} = \frac{p_{ov_i}}{(1-\delta_i-3\%)} \quad (5)$$

将 p_{iv} 代入公式 (1), 即可计算得到每个工况为汽蚀管恰发生汽蚀状态时所对应的汽蚀管喉部直径 $d_i, i=1,2, \cdots, N$ 。在此基础上, 本文给出的汽蚀管组合计算算法流程如下:

- 1) 剩余未确定汽蚀管的工况中 (初始为所有工况), 对应于最小汽蚀管喉部直径 $\min d_i$ 的工况 (q_m, p_{ov}) 即可选定该汽蚀管。
- 2) 根据入口压力 p_{iv} 及流量 q_m 关系

$$p_{iv} = \frac{q_m^2}{(2\rho_{iv} \cdot C^2 \cdot A^2)} \times 10^{-6} + p_s \quad (6)$$

可得到 $p_{iv}-q_m$ 曲线, 该曲线为一条二次曲线, 同时可得到 $p_{ev}-q_m$ 、 $p_{ov}-q_m$ 曲线, 如图 3 所示。有关进出口压力与流量之间的关系, 由于进口受上游压力限制, 存在入口压力最大值 p_{max} , 因此流量也存在极值 q_{max} 。

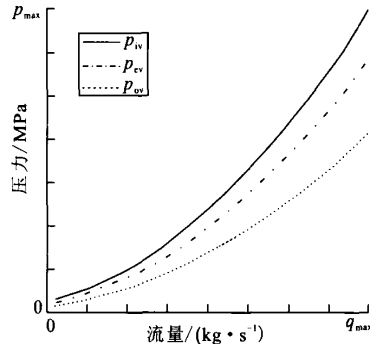


图 3 进出口压力与流量之间的关系

Fig. 3 Inlet and outlet pressure versus flowrate

- 3) 考察剩余工况, 如果其流量小于图 3 中的 q_{max} , 且汽蚀管出口压力位于 p_{ev} 与 p_{ov} 之间, 则认为该工况可采用 1 中所确定的汽蚀管。
- 4) 将 1) 中所确定的汽蚀管与之前已经确定

的汽蚀管进行组合，其流量公式应为

$$q_m=C\cdot(A_0+A')\sqrt{2(p_w-p_s)\cdot\rho_{iv}}\times10^3\tag{7}$$

式中： A_0 为1)中所确定的汽蚀管的喉部截面积， A' 为已确定的某一汽蚀管的喉部截面积。

- 5) 重复2)~3)步骤后转1)。
- 6) 若已无未确定汽蚀管的工况，结束该流程。

3 计算实例与分析

以某试验为例，试验工况见表1。设定汽蚀管流量系数为0.9，相对压力损失为15%，汽蚀管入口压力范围0~25 MPa。经计算，工况12所需汽蚀管喉部直径最小，为4.75 mm，当汽蚀管入口最大压力为25 MPa时，所能达到的最大流量为3.69 kg/s。考察工况1~11，其中工况9、11中流量小于该值。设汽蚀裕度为20%，反算这两个

工况的入口压力 p_w 分别为16.75 MPa、19.23 MPa， p_{ev} 分别为14.24 MPa、16.35 MPa， p_{ov} 分别为10.89 MPa、12.5 MPa。可知并不满足工况9、11出口压力要求；即该汽蚀管只能覆盖工况12。

考察剩余工况1~11，得到第二个汽蚀管，喉部直径为5.14 mm，可覆盖工况10、11。

将该汽蚀管与工况12所对应的汽蚀管进行组合，可覆盖工况8。重复上述步骤，得到的全部汽蚀管参数如表2所示。各个工况所需的汽蚀管或汽蚀管组合如表3所示。若汽蚀裕度扩大到30%，本算法得到汽蚀管参数如表4所示。各个工况所需的汽蚀管或汽蚀管组合如表5所示。

由公式(1)及图3可以看出，一支汽蚀管是否可以覆盖更多的工况，主要决定于其允许的汽蚀裕度是否足够大。若汽蚀裕度足够大，则 p_{ev} 与 p_{ov} 之间会覆盖更大的面积，即可同时覆盖更多的工况。通过本文实例也可以得到该结论。

表 1 发动机试验各工况流量及出口压力要求

Tab. 1 Flowrate and outlet pressure of each working-condition during engine test

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
流量/ (kg·s ⁻¹)	6.01	4.95	3.76	7.5	5.53	5.01	6.97	5.57	3.01	4.03	3.23	2.81
出口压力/ MPa	8.64	8.57	6.04	6.04	4.43	4.87	10.63	9.34	4.08	15.53	11.61	12.01

表 2 汽蚀裕度 20%情况下得到的汽蚀管及其参数

Tab. 2 Cavitation venturi and its parameters obtained at Δδ=20%

汽蚀管编号	1	2	3	4
喉部直径/mm	4.75	5.14	6.53	7.56
喉部截面积/mm ²	17.73	20.74	33.46	44.94

表 3 汽蚀裕度 20%各工况所需汽蚀管组合

Tab. 3 Cavitation venturi combination needed by each working-condition with Δδ=20%

工况序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
汽蚀管编号	4	3	3	4+1	3+2	3+1	4	2+1	3	2	2	1

表 4 汽蚀裕度 30%情况下得到的汽蚀管及其参数

Tab. 4 Cavitation venturi and its parameters obtained at Δδ=30%

汽蚀管编号	1	2	3
喉部直径/mm	4.75	5.33	6.53
喉部截面积/mm ²	17.73	22.29	33.46

表 5 汽蚀裕度 30%各工况所需汽蚀管组合

Tab. 5 Cavitation venturi combination needed by each working-condition with $\Delta\delta=30\%$												
工况序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
汽蚀管编号	2+1	3	3	3+2	3+1	3+1	2+1	2+1	3	2	1	1

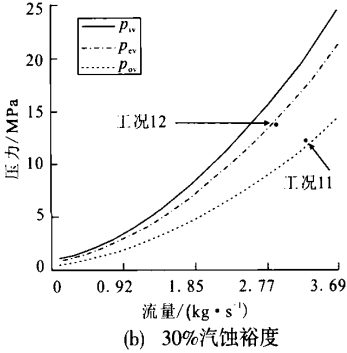
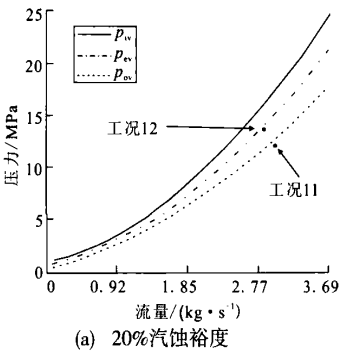


图 4 喉部直径 4.73 mm 汽蚀管不同汽蚀裕度时所能覆盖工况比较

Fig. 4 Working-conditions covered with different $\Delta\delta$ of same cavitation venturi (throat diameter=4.73 mm)

以第一支汽蚀管为例, 在汽蚀裕度 20% 及 30% 情况下, 该汽蚀管 (喉部直径 4.75mm) 可以覆盖的工况分别如图 4 (a)、(b) 所示。

发动机试车结果表明, 该方法可实现多工况流量精确控制, 稳态时流量控制精度可达 1%。

4 结论

提出了一种发动机试验多工况流量控制汽蚀管组合计算方法, 研究成果如下:

- 1) 给出一种算法, 在给定多个试验工况的情况下, 得到数个不同参数的汽蚀管。通过不同汽蚀管的组合, 可以覆盖相对较多的试验工况。
- 2) 汽蚀管的汽蚀裕度对最终数量起着主要的影响, 汽蚀裕度大, 则单个汽蚀管及汽蚀管组可以覆盖更多的工况, 需要的汽蚀管数量更少。
- 3) 该方法既保留了汽蚀管原有流量控制只受上游压力影响的特点, 易实现流量精确控制, 又能以较少的汽蚀管实现大范围多工况流量控制, 且使用方便、适应性好、经济性强。

参考文献:

[1] XU C, HEISTER S D, COLLICOTT S C. Modeling cavitating

venturi flows [J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18 (6): 1227-1234.

[2] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验 [M]. 北京: 宇航出版社, 1990.

[3] 丁猛, 吴继平, 梁剑寒, 等. 文氏管在煤油燃料超燃冲压发动机中的应用[J]. 推进技术, 2005, 26(1): 16-19.

[4] 张小斌, 曹潇丽, 邱利民, 等. 液氧文氏管汽蚀特性计算流体力学研究[J]. 化工学报, 2009, 60(7): 1638-1643.

[5] 沈赤兵, 吴继平. 可调汽蚀文氏管试验研究 [J]. 推进技术, 2004, 25(5): 473-476.

[6] HOSANGADI A, AHUJA V. Numerical study of cavitation in cryogenic fluids [J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127 (2): 267-281.

[7] RHEE S H, KAWAMURA T, LI H Y. Propeller cavitation study using an unstructured grid based Navier-Stokes solver [J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127 (5): 986-994.

[8] 岳伟挺. 基于文丘里管的气液两相流参数检测方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.

[9] 艾卫国, 周月桂, 徐通模, 等. 非标准文氏管气固两相流阻力特性的研究 [J]. 热能动力工程, 2000, 25 (6): 607-610.

[10] 中国航天工业总公司. QJ 1783A-96 液体火箭发动机汽蚀文氏管通用规范[S]. 北京: 中国航天工业总公司第七〇八研究所, 1997.

(编辑: 陈红霞)