

水力模拟与固体火箭 发动机流场分析

张 中 钦

(北京航空航天大学)

摘 要: 水力模拟技术的发展, 可以对固体发动机流场进行范围广泛的水力模拟。例如: 轴对称流场、定常和非定常流动、亚音和超音流动具有激波的流动等。作者介绍了水力模拟的基本理论、轴对称流动水力模拟的主要对应关系以及水力模拟试验装置的简要情况。

主题词: 水动力模拟, 水流试验, 流场显示, 固体推进剂火箭发动机

HYDRAULIC ANALOGY AND SOLID ROCKET MOTOR FLOW FIELD ANALYSIS

Zhang Zhongqin

(Beijing University of Aeronautics & Astronautics)

Abstract: The reliability of solid rocket motors (SRM) has become an important problem in motor designs. Designers have a hope to know the flow field in SRM in detail. Due to high temperature and high pressure of gas in SRM, direct measurement of the flow field is very difficult. Then the technic of the hydraulic analogy to flow field analysis of SRM has been developed. The hydraulic analogy can be applied qualitatively to the following types of compressible gas flow: rocket nozzle flow, subsonic and supersonic, steady and nonsteady, rocket nozzle exhaust plume, etc. In this paper, some fundamental theory of hydraulic analogy and schematic of water table are introduced.

Keywords: Hydrodynamic simulation, Water flow test, Flow visualization, Solid propellant rocket engine

1 固体火箭发动机水利模拟的意义

随着对发动机可靠性的要求不断提高, 发动机的设计计算工作也越做越深入、越细致。在

设计过程中,人们希望对发动机内的流场有尽可能详细而准确的了解。迄今,已经发展了许多不同的用于流场分析的数值计算方法。在发展高级数值计算方法的过程中,始终存在如何确知计算结果正确性的问题。由于固体火箭发动机内的燃气在高温高压下流动,测量试验状态下的参数是相当困难的。为此,有人曾经在冷流条件下进行试验^[1],虽然也得到一些有益的结果,但也因存在模拟技术和设备方面的困难,没有得到推广。水力模拟技术可以将液体(水)流过水床上的模型,模拟发动机中可压缩气体的流动,从而得到许多非常重要的(定性或定量的)结果。另一方面,水力模拟装置的设备简单,试验费用便宜,便于操作,能够经常的反复多次对发动机内的流场进行观测。因此,水力模拟技术对于分析发动机内的流场来说是一种非常有用的工具。

流场的水力模拟是一个古老的课题,历史上许多著名的科学家例如:儒可夫斯基、普朗特、斯德多拉、冯-卡门等人都对这个问题进行过研究,对发展水力模拟技术作出了自己的贡献。

目前水力模拟的发展水平,可以对固体火箭发动机内的流动进行如下模拟:

- (1) 轴对称可压缩气体的流动;
- (2) 定常和非定常流动;
- (3) 亚音和超音流动;
- (4) 内流和羽流;
- (5) 具有激波的流动等。

利用水力模拟技术,可以提供固体发动机流场的静压、静温、密度以及马赫数等参数。

2 水力模拟试验装置——水床

典型的水力模拟装置——水床如图1所示。

由图1可见,水床的结构相当简单,它由台架系统、泵压和管路系统、光源和测量系统等组成。对水床设计的要求可以归纳如下:

(1) 试验台平面应是透明的,有荧光源从下方照射,以便对流场的定性观察。在试验区内,试验台平面应十分平整,不允许翘曲,同时应十分光滑,不平度应小于0.008cm。

(2) 上游和下游溢水堰的高度可以调节,以满足不同试验的要求。

(3) 不得渗漏。

(4) 泵压和管路系统的流量可以改变,以满足不同试验的要求。

(5) 泵压系统与试验区之间应有隔震装置,防止泵工作时的震动而影响试验区的参数。

(6) 水床可以是固定式的,也可以是移动式的。对于移动式水床应装有滚轮。水床应具有螺旋式支柱,在不平的地面上可以调整高度,使试验台平面处于水平位置。

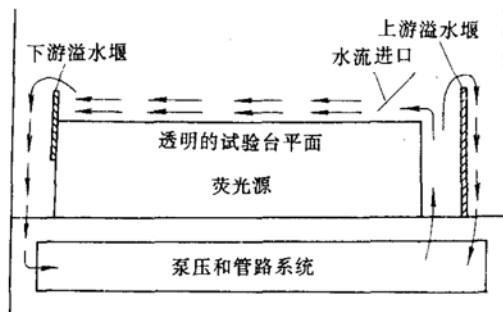


图1 水力模拟试验装置——水床简图

3 水力模拟理论

3.1 基本理论

人们早就发现,可压缩气体流动中的许多现象在明渠流动中都有它的对应现象,例如:音

波对应于长水波、正激波对应于水跃等等。为了说明参数之间的对应关系，以一维流动条件下的可压气体流动和水平明渠流动的控制方程为例，进行分析。

对于无摩擦等截面管道一维可压流的连续方程为：

$$\frac{dV}{V} + \frac{d\rho}{\rho} = 0 \quad (3.1)$$

其动量方程为

$$VdV + \frac{d\rho}{\rho} = 0$$

为了与明渠流动对比，将上式改写为

$$VdV + \frac{dp}{\rho} \frac{d\rho}{\rho} = 0 \quad \text{或} \quad VdV + a^2 \frac{d\rho}{\rho} = 0 \quad (3.2)$$

对于等宽的水平明渠（见图 2），连续方程为

$$\frac{dV}{V} + \frac{dh}{h} = 0 \quad (3.3)$$

其动量方程为

$$VdV + gh = 0$$

为了比较起见，将上式改写为

$$VdV + gh \frac{dh}{h} = 0 \quad (3.4)$$



图 2 水平明渠简图

现在，比较式 (3.1) 和 (3.3)，可以发现在形式上它们是非常相似的。两者的速度项之间直接对应，而液体的深度似乎与气体的密度相对应。然后比较动量方程，如果将量 gh 与音速 a^2 认为是同一的，则在连续方程比较中所建立的相似关系也可以适用于动量方程。然而由水力学可知，无限小的水位 (h) 的扰动传播速度 C 正好等于 $\sqrt{gh}$ 即

$$gh = C^2 \quad (3.5)$$

由以上的简单对比中可以发现：如果将 h 对应于 ρ ，无限小水位高度扰动的传播速度对应于气体中的音速（可理解为无限小密度扰动的传播速度），则可压气体流动的规律（微分方程）完全与明渠流动的规律（微分方程）相同。这就是水力模拟的基本理论。

但是，为了使两种情况下的流动完全相似，问题远非这样简单。例如，对于可压气体的音速 $a = \gamma RT$ ，利用状态方程和等熵关系式 $p/\rho^\gamma = C_k$ ，上式可写为

$$a = \sqrt{C_k \gamma \rho^{\gamma-1}} \quad (3.6)$$

将式 (3.6) 与 (3.5) 比较, 并由相似关系已知 ρ 对应于 h , 为了在数值上使 a 等于 C , 则必须有

$$\gamma = 2, \quad C_k = g/2 \quad (3.7)$$

只在式 (3.7) 表示的条件下, 式 (3.6) 才能写为

$$a = \sqrt{\frac{g}{2} \cdot 2h^{(2-1)}} = \sqrt{gh}$$

换句话说, 若式 (3.7) 中的关系式得到满足, 则两种情况下的控制方程就完全相同, 它们的解也相同, 两种情况之间就可以进行定量模拟。也就是说, 水在明渠中的流动不仅在定性方面, 而且在定量方面可以模拟可压气体的流动。但是, 火箭发动机燃气的 γ 在 1.2~1.25 左右。事实上被模拟流动的气体过程指数不可能等于 2, 因此, 为了得到定量的模拟关系, 在模拟理论方面还有问题待解决。

以上所述仅是水力模拟的基本理论和问题。为了使水力模拟技术有实用价值, 至少要解决轴对称流动的模拟方法。

3.2 轴对称流动水力模拟的主要对应关系

为了对水力模拟有一个概括的了解, 下面以列表形式给出轴对称流动与水力模拟之间的主要对应关系。

参 数	可压气体流动	水的明渠流动
1. 坐标系 空 间 时 间	x, y t	x, y t
2. 波的传播	$a = \sqrt{\gamma RT}$	$C = \sqrt{gh}$
3. 流动速度	$v = \sqrt{2C_p(T_0 - T)}$	$v = 2g(h_0 - h)$
4. 速度比	马赫数 M $M = \frac{v}{a} = \sqrt{\left(\frac{2}{\gamma - 1}\right)\left(\frac{T_0 - T}{T}\right)}$	弗劳德数 F $F = \frac{v}{C} = \sqrt{2\left(\frac{h_0 - h}{h}\right)}$
5. 密度比	ρ/ρ_0	$k_\rho(h/h_0)$
6. 温度比	T/T_0	$k_T(h/h_0)$
7. 压力比	p/p_0	$k_p(h/h_0)^2$
8. 亚音流动 超音流动	$M < 1$ $M > 1$	$F < 1$ $F > 1$

说明: 表中 k_ρ, k_T, k_p 为 $\gamma \neq 2$ 时的修正系数

4 水力模拟计算

水力模拟试验模型及进口截面的参数 (符号参阅图 3) 如下

$$h_s/h_0 = 0.882/0.935 = 0.943 \quad w_1/w^* = 2.5/1.5 = 1.67$$

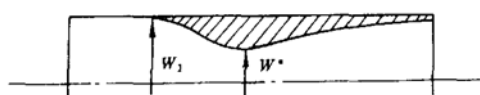


图 3 喷嘴的水力模拟试验

试计算被模拟喷嘴的进口参数, 解:

(1) 进口截面的弗劳德数

$$F_1 = \sqrt{2\left(\frac{h_0}{h_1} - 1\right)} = \sqrt{2\left(\frac{1}{0.943} - 1\right)} = 0.35$$

(2) 若可压气体的 $\gamma = 2$, 则所对应的进口条件为:

$$\rho_1/\rho_0 = h_1/h_0 = 0.943 \quad p_1/p_0 = (h_1/h_0)^2 = 0.89$$

$$T_1/T_0 = h_1/h_0 = 0.943 \quad M_1 = F_1 = 0.35$$

(3) 但可压气体的 $\gamma \neq 2$, 假如它是空气, $\gamma = 1.4$, 则所得结果需进行修正, 在此条件下, 相应的修正系数为

$$K_p = 0.9989 \quad K_\rho = 1.0348 \quad K_T = 1.0359$$

$$\text{因此} \quad \rho_1/\rho_0 = 0.9989 \times 0.943 = 0.941 \quad p_1/p_0 = 1.0348 \times 0.89 = 0.921$$

$$T_1/T_0 = 1.0359 \times 0.943 = 0.976 \quad A_1/A^* = 1.778$$

5 结 语

本文简要介绍了水力模拟技术的概况。根据国外资料报道, 利用水床可对固体火箭发动机中的许多过程进行模拟, 例如: 内弹道、沿轴向加质量对气流参数的影响、纯气相和二相喷嘴流动、喷嘴造型对性能的影响、向大气或排气锥的羽流研究、管槽式药柱中槽内气流与主气流的混合过程、发动机工作的不稳定性等。

水力模拟试验的主要优点是投资少、使用方便、直观性强。在工作过程仿真研究中, 这个有用的工具将会发挥重要作用。

参 考 文 献

- [1] Traineau J C, Horvat P, Kuentzmann. Cold-Flow Simulation of a Two-Dimensional Nozzleless Solid Rocket Motor. AIAA 86-1447
- [2] Gupta P O. An Analytical Method for Evaluating the Optimum Depth in Hydraulic Analogy Experiment. J. AIAA, 1965, 3 (10)
- [3] Sabersky R H, Acosta A J, Hauptmann F G. Fluid Flow. Macmillan Publishing Company, 1989