

双级延伸喷管等效力学模型

北京航空航天大学 阎德元** 张彦雨 张景升 张筱红

【摘要】 通过对延伸锥及作动筒的运动分析和受力分析,建立了双级延伸喷管的等效力学模型,即等效力和等效质量,这样就可以将一复杂机构的动力学问题转化为一个等效构件的动力学问题,使其能模拟原机构的力学特性,从而使问题简化和便于计算。

主题词: 火箭发动机 喷管 物理模型
分类号: V435

1 求解双级延伸喷管动特性方程

套筒式双级延伸喷管,如图 1、图 2 所示^[1]。此喷管设有 4 个均置的双级刚性作动筒的内

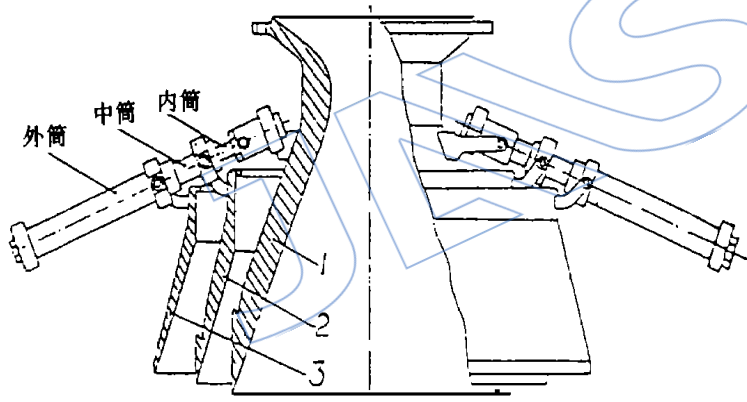


图 1 延伸喷管收拢状态图(1. 基础锥 2. 一锥 3. 二锥 4. 内筒 5. 中筒 6. 外筒)
筒,中筒及外筒是由滑轮和钢丝绳连接。支撑滑轮的杆固定在中筒顶端,钢丝绳一端固定在内筒顶端,另一端绕过滑轮与外筒顶端固连。这样从内筒进气后,外筒将牵动中筒一起轴向伸长,从而带动一级延伸锥,二级延伸锥(下称一锥、二锥)平行移动。一锥的速度为二锥速度的二分之一,致使一锥、二锥同时展开到位,到位前瞬间内,靠延伸锥大端的弹簧锁片缓冲和锁紧。

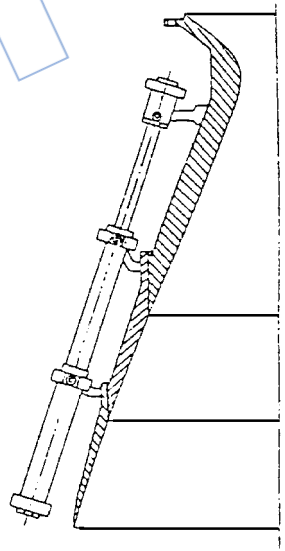


图 2 延伸喷管展开状态图

由贮气瓶经减压阀向延伸喷管作动筒充气使其展开,通过已知的双级延伸喷管的一组耦合常微分方程组^[2,3] (1),求解二锥的速度 v_2 , 加速度 a_2 及贮气瓶的初始压力 p_{b0} 对延伸锥展开时间 t 的影响。式中: $n = 1.3, K = 1.4, R = 287, p_s|_{t=0} = p_{b0}, s, v$ 和 a 为外筒沿其轴线的位移、速

1998 年 1 月收稿, 1998 年 4 月收到修改稿。

** 男 58 岁 副教授 北京航空航天大学机械设计教研室 100083

度、加速度: $T_{b0}, V_{b0}, p_{b0}, p_s$ 和 q 分别为贮气瓶内的初始温度、体积、压力, 瞬时出口压力, 流量; T_{11}, p 和 A_{ol} 分别为作动筒入口温度、筒内压力、有效作用面积, L_{20} 为结构参数, q_m 为进入单个作功筒的流量。方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{dp_s}{dt} = \frac{-KRT_{b0}q}{V_{b0}} \left(\frac{p_s}{p_{b0}} \right)^{(n-1)/n}, & \frac{ds}{dt} = v, & \frac{dv}{dt} = \frac{pA_{ol} - F}{m} = a \\ \frac{dp}{dt} = \frac{KRT_{11}q_m}{(S_o + S - S_{ol})A_{ol}} - \frac{Kp}{S_o - S - S_{ol}}v, & p|_{t=0} = p_a \\ v_2 = \frac{S}{S^2 - L_{20}^2} \frac{ds}{dt}, & a_2 = \frac{dv_2}{dt} = \frac{-L_{20}^2}{(S^2 - L_{20}^2)^{3/2}} \left(\frac{ds}{dt} \right)^2 + \frac{S}{S^2 - L_{20}^2} \frac{d^2s}{dt^2} \end{cases} \quad (1)$$

在求解方程组(1)时, 其难点是 $a = dv/dt = (pA_{ol} - F)/m$ 这一方程中, F 是由摩擦力、支反力 R_{ij} 、惯性力耦合而成。由于该机构为一复合运动机构, 运动复杂、参数多, 按常规动力学求解 $R_{ij}F^n$, 方法复杂、难度大, 为了使问题简化便于计算, 本文采用了等效力、等效质量方法, 这样就可以将一复杂机构的动力学问题转化为一个等效构件的动力学问题, 使其能模拟原机构的力学特性, 从而使问题简化和便于计算。

2 等效力学模型的建立^[4]

在双级延伸喷管机构中为了建立主动力与运动的关系, 选外筒为等效构件, 将其他运动部件按照运动学原理等效到外筒上, 使其符合牛顿第二定律, 并具有最简单形式: $ma = pA_{ol} - F$ 。式中 m 和 F 分别为等效质量和等效力。其方法如下: 分别选取一锥、二锥、整体作动筒、中筒、外筒五个构件为动力学研究对象, 据达朗贝尔原理建立包含支反力 $R_{ij}(i, j = 1, 2)$, 加速度 $dv/dt = a$, 对由 5 个方程组成的方程组, 进行联立化简, 得: $ma = pA_{ol} - F$

$$\begin{cases} \text{其中: } m = (1/2) \left[2m_o + m_M/2 + \frac{F_{R5}F_{R12} + F_{R6}S}{S^2 - L_{20}^2} \right] \\ F = \frac{1}{2} [F_{oM} + F_{MI} - F_{R9} - (2m_o + m_M)a_A \sin\theta + (2F_{R2} + F_{R1})F_{R8} - F_{R7}v^2 - F_{R5}F_{R15}] \end{cases} \quad (2)$$

中间变量 $F_{R1} = \frac{1}{4} \sum p_{E1} - \frac{1}{4} m_{E1} g \cos\alpha + F_1 - F_2 - \frac{1}{4} m_{E1} g \sin\alpha \frac{L_{11}}{L_{12}} - \frac{1}{4} m_{E1} a_A$

$$F_{R2} = \frac{1}{4} \left[\sum P_{E2} - m_{E2} g \cos\alpha - m_{E2} \sin\alpha \frac{L_{21}}{L_{22}} - m_{E2} a_A \right] + F_2$$

$$F_{R3} = L_{20} \frac{1 - \left(\frac{L_{20}}{S} \right)^2}{S^2 - L_{20}^2}, \quad F_{R4} = \frac{\frac{2L_{20}}{S} \left[1 - \left(\frac{L_{20}}{S} \right)^2 \right] + \frac{L_{20}^3}{S^2 - L_{20}^2}}{S^2 - L_{20}^2}$$

$$F_{R5} = 2\cos\theta/s \cdot \sin\theta, \quad F_{R6} = (\sin\theta + \cos^2\theta \sin\theta) / (m_{E2}/2 + m_{E1}/8)$$

$$F_{R7} = - (L_{20}^2 / (S^2 - L_{20}^2)^{3/2}) F_{R6} - F_{R5}F_{R13}, \quad F_{R8} = \sin\theta + \cos^2\theta / \sin\theta = 1/\sin\theta$$

$$F_{R9} = [(S/2 + L_M)m_M + 2(S + L_0)m_0] \omega^2$$

$$F_{R10} = [m_L L^2 + m_M (S/2 + L_M)^2 + m_0 (S + L_0)^2]$$

$$F_{R11} = \left[2m_0 (S + L_0) + m_M \left(\frac{S}{2} + L_M \right) \right] \frac{L_{20}}{S^2 - \left(L_{20}/S \right)^2}$$

$$F_{R12} = (J + F_{R10})F_{R3}, \quad F_{R13} = (J + F_{R10})F_{R4} - F_{R11}$$

$$F_{R15} = [m_l L_1 + m_M (S/2 + L_M) + m_0 (S + L_0)] a_A \cos \theta$$

式中: $R_{xij}, R_{yij} (i, j = 1, 2)$; $N_i, F_i, O_{Ei}, m_{Ei}, \sum p_{Ei} (i = 1, 2)$ 分别为一锥、二锥的支反力, 弹簧锁片作用在锥体的正压力、摩擦力, 质心, 质量, 锥体内高压气体阻力沿轴向合力; a_A 为火箭加速度, α 为喷管轴线与铅直方向夹角, g 为重力加速度; $L_{ij} (i, j = 1, 2)$ 为结构参数, J 为作动筒的转动惯量。

3 算例及结果

由气瓶经减压阀向延伸喷管作动筒供气, 使其展开。已知双级延伸喷管动特性数学模型的一组耦合的常微分方程组 (1) 及其中的对应等效力学模型。

主要参数: 气瓶 $T_{b0} = 293 \text{ K}$; $V_{b0} = 0.04 \text{ m}^3$; p_{b0} (见表 1)。减压阀 $\mu = 0.6$; $p_1 = 0.5 \text{ MPa}$; $A = 0.204 \times 10^{-2} \text{ m}^2$; 作动筒 $A_{01} = 0.001 \text{ m}^2$; $S_{01} = 0.135 \text{ m}$; $m_l = 0.76 \text{ kg}$; $m_M = 0.561 \text{ kg}$; $m_0 = 0.51 \text{ kg}$; $L_l = 0.12 \text{ m}$; $L_M = 0.0981 \text{ m}$; $L_0 = 0.069 \text{ m}$ 。

表 1 贮气瓶初始压力与展开时间

p_{b0} / MPa	1.5	2.5	3.0	4.0
T_i / s	0.2678	0.2445	0.2387	0.2271

表 1 为贮气瓶初始压力与展开时间的关系。图 3 和图 4 分别为二锥速度、加速度随时间变化曲线。理论计算结果与试验曲线基本一致, 这说明关于双级延伸喷管的理论分析基本能反映其展开特性。

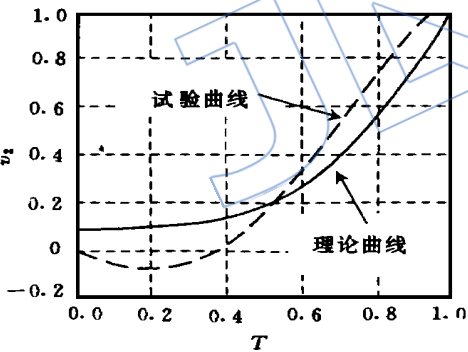


图 3 二锥速度时间曲线

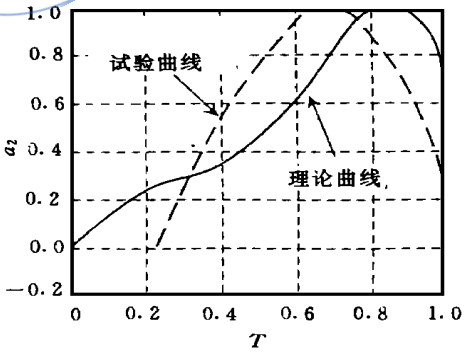


图 4 二锥加速度时间曲线

此方法给最后采用龙格库塔法求解微分方程组带来了很大方便。

参 考 文 献

1 汤荣芳. 美国研制可延伸喷管的情况综述. 国外导弹与宇航, 1984, (4)
2 陈汉超著. 气压传动与控制. 北京: 北京工业学院, 1984
3 张彦雨. 火箭发动机双级延伸喷管动特性分析: [硕士论文]. 北京航空航天大学, 1993
4 [美] B 保罗著, 汪一麟等译. 机构运动学与动力学. 上海: 上海科学技术出版社, 1989

one, because the designed stress is usually based on the tension strength of the blades.

Key Words Blade Damage Residual Life Vibration Fatigue

SIMILARITY TRANSFORMATION OF FIGHTER ENGINE DESIGN LOADING SECTIONS

Yi Jun and Zhao Fuxing

(Air Force Engineering Institute, Beijing 100076)

ABSTRACT This paper deals with a similarity – transformation method for obtaining engine design loading section. The principal method of flight dynamics is used and the thrust of the engine serves as the key of the transformation. The loading sections of other similar engines can be obtained from transforming the measured section of a prototype engine with success. This method has been applied in engineering practice.

Key Words Aircraft engine Loading spectrum Similarity

NUMERICAL SIMULATION OF COMBUSTION PROCESS IN A LIQUID H₂/ O₂ ROCKET ENGINE

Liu Weidong and Wang Baoguo

(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

ABSTRACT Numerical simulation is employed in calculation of the combustion processes in the rocket engine which uses liquid hydrogen and oxygen as propellants. A random spray model is used to describe the initial conditions of oxygen droplets. The evaporation rate of the oxygen droplets at high pressure is calculated by ZKS model. The Arrhenius model is adopted to compute the chemical reaction rates. PISO algorithm extended by the authors is used to calculate the spray combustion flow. The convection terms of the governing equations are discretized by a second – order upwind scheme.

Key Words Spray combustion Algorithms Hydrogen/ oxygen engines

AN EQUIVALENT MECHANIC MODEL OF DOUBLE EXTENDIBLE NOZZLE

Yan Deyuan, Zhang Yanyu, Zhang Jingsheng, Zhang Xiaohong

(10th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT In order to simplify the kinematics of double extendible nozzle and make it easy to calculate, its equivalent mechanic model is established with equivalent forces and masses by means of loading and kinematic analyses of its actuators and extendible cone. Then the kinematics of the complex mechanism is turned into that of equivalent components and its mechanic characteristics can be simulated and calculated.

Key Words Rocket engines Jet nozzles Physical models