

补燃循环液体火箭发动机输送系统的频率特性^{*}

张黎辉, 张振鹏

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘 要: 以某大型泵压式补燃循环液体火箭发动机的输送系统为研究对象, 采用两种动态数学模型: 在低频区域为集中参数法, 在中频区域为分布参数法, 进行了发动机动态特性的评估、发动机调节系统的分析, 为发动机系统稳定性研究以及火箭飞行中的纵向稳定性计算提供原始数据。

主题词: 液体推进剂火箭发动机; 高压补燃火箭发动机; 数学模型; 频率响应

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2000) 01-0005-03

Frequency characteristic for liquid propellant staged combustion cycle rocket engine

Zhang Lihui, Zhang Zhenpeng

(School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Using feeding system of a pump-fed Liquid Propellant Staged Combustion Cycle Rocket Engine (LP-SCCRE) as research object, adopt two dynamic mathematical models to evaluate the dynamic characteristic of engine, to analyze the adjusting system of engine. The original data for studying the system stability and computing the rocket longitudinal stability in flight were obtained. This method is fit for developing rocket engine in initial stages.

Subject terms: Liquid propellant rocket engine; High pressure staged combustion rocket engine; Mathematical model; Frequency response

1 引 言

大型液体火箭在飞行过程中, 当“箭体-输送管路-发动机”各部分的动态特性组合不当时, 就可能出现纵向耦合振荡。这种情况已不是个别现象, 其危害有时是很严重的, 甚至可能造成火箭毁坏。因此, 研究液体火箭发动机的动态特性, 特别是频率特性, 对确定发动机的稳定性以及火箭在飞行中的纵向稳定性至关重要。

2 发动机系统物理数学模型

某高压补燃循环液体火箭发动机系统如图 1 所示。该系统主要由各自独立且并联的氧化剂涡轮泵、燃料涡轮泵以及两涡轮泵共同的预燃室、推力室和推进剂管路等组成。系统采用了富燃预燃室方案。

由于结构和工作过程的复杂性, 大型补燃循环液

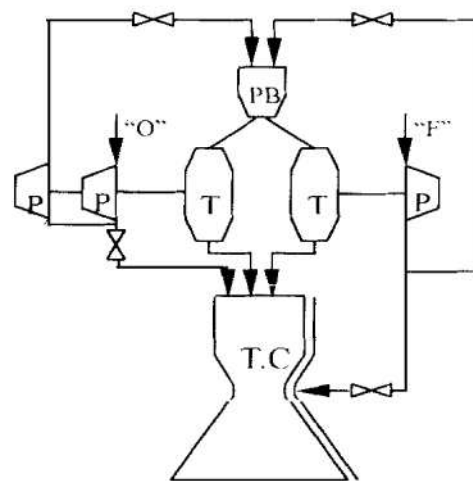


Fig. 1 Engine system diagram

体火箭发动机系统数学模型具有高维和非线性的特点。为简化起见, 在低频区域和较宽频率区域, 发动机系统可分别采用以下两种不同的模型:

(1) 具有集中参数的系统模型 (在低频区域);

* 收稿日期: 1999-01-25, 修订日期: 1999-07-12。

作者简介: 张黎辉 (1966-), 女, 博士, 副教授, 研究领域: 液体火箭发动机静态和动态特性。

(2) 具有分布参数的系统模型 (在较宽频率区域)^[1]。

在第一种情况下, 补燃循环液体火箭发动机系统各种组件的动态数学模型具有常微分方程或代数方程的形式:

$$\frac{dY}{dt} = f(Y, Z) \quad g(Y, Z) = 0$$

其中 Y , Z 分别为组件的输出和输入矢量。

将上述方程化为组件参数的变化量方程, 这里只列举出涡轮泵参数的变化量方程, 即为

$$\frac{\pi^2 J n^2}{900 N_t} \frac{d\delta n}{dt} = \delta N_t - \sum_i \frac{N_{pi}}{N_t} \delta N_{pi}$$

式中 J , n , N_t , N_{pi} 分别表示涡轮泵组件转动惯量、额定转速、涡轮和泵的额定功率。

把周期特解 $\delta y_i = \delta \bar{y}_i \exp(i\omega t)$ 等代入所有方程 (此处 δy_i , $\delta \bar{y}_i$ 表示第 i 个参数变化量和变化范围), 则可将低频范围内动态方程化为矩阵方程:

$$[i\omega A + B + C \exp(i\omega \tau)] \delta \bar{Y} = D \delta \bar{Z}$$

式中 A 表示参数变化量导数的系数方阵; B 表示参数变化量的系数矩阵; C 表示有滞后项的系数矩阵; D 表示外部干扰作用系数矩阵; τ 表示延迟矩阵; $\delta \bar{Y}$ 表示发动机参数变化量矩阵; $\delta \bar{Z}$ 表示外部干扰作用变化量矩阵。

在第二种情况下, 将圆柱形导管中一维可压缩流体的 N-S 方程、流体运动的连续方程和能量方程简化, 可得描述液路中液体的非稳态等温流动方程:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda}{4R} \rho u u = 0$$

描述气路中无粘气体的非稳态不等温流动方程:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} = 0$$

式中 p , u , ρ , R 分别表示流路内的压力、速度、密度和半径; a 表示声速; λ 表示摩擦阻力系数; s 表示熵。

在以上各表达式中, 用参数的平均稳态值与参数变化量之和来代替各变量, 可得到关于参数变化量的方程。各参变量以指数函数的形式代入, 则得到发动机组件复数形式的解。如管路和燃烧室方程分别表示

$$\text{为}^{[1]} \begin{vmatrix} \delta \bar{p} (0) \\ \delta \bar{u} (0) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \bar{\omega} & i\alpha \sin \bar{\omega} \\ (i/\alpha) \sin \bar{\omega} & \cos \bar{\omega} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \delta \bar{p} (1) \\ \delta \bar{u} (1) \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} \delta \bar{u} (0) \\ \delta \bar{p} (0) \\ \delta \bar{s} (0) \end{vmatrix} =$$

$$\begin{vmatrix} F+H & \frac{F-H}{\gamma Ma} & 0 \\ \gamma Ma (F+H) & F+H & 0 \\ 0 & 0 & \exp(i\omega' Ma) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \delta \bar{u} (1) \\ \delta \bar{p} (1) \\ \delta \bar{s} (1) \end{vmatrix}$$

式中 α 表示无量纲液体波动阻力; $\bar{\omega}$ 表示无量纲角频率; M 表示马赫数; γ 表示燃气绝热指数

$$F = 0.5 \exp [(i\omega' (1+Ma))],$$

$$H = 0.5 \exp [-i\omega' (1-Ma)] .$$

一般情况下, 第二种数学模型比第一种数学模型要复杂。对第二种数学模型加以着重研究是很有意义的, 因为它比较通用, 而且在频率范围方面又不受多大的限制。用上述两种数学模型计算系统频率特性时, 采用了通常求解复数项矩阵方程的方法^[3]。

3 计算结果与分析

对第一种数学模型的计算, 得到发动机系统参数相对变化量 (燃烧室压力 δp_c 、预燃室压力 δp_b 、预燃室燃料流量 δm_{fb} 、预燃室氧化剂流量 δm_{ob}) 分别随氧化剂泵入口压力相对变化量 δp_{ip} 和燃料副系统管路上阀门流通面积相对变化量 δF_v 的幅频特性曲线见图 2 和图 3。由图可见, 发动机所有参数的幅频特性都随频率的变化而发生变化, 这是补燃循环发动机所具有的宽通频特性。此外, 还有比较大的 (谐振处的幅值同其静态值相比增大 6~7 倍)、角频率 ω 约为 452 s^{-1} 的谐振。当改变燃料副系统管路上的阀门流通面积时, 流经预燃室的燃料流量变化量会有最大的静态放大系数, 这对于发动机系统的调节分析是很重要的。同时, 计算还表明, 该发动机系统在其它参数 (诸如发动机燃料泵入口压力、氧化剂主副系统以及燃料主系统管路上的阀门流通面积) 变化时, 也会产生同等频率的谐振, 只是幅值相对较小而已。

对第二种数学模型的计算, 得到了发动机系统参数相对变化量 (预燃室压力、预燃室燃料流量、预燃室氧化剂流量、燃烧室温度 δT_c 、预燃室温度 δT_b) 随氧化剂泵、燃料泵入口压力相对变化量 δp_{ip} 的幅频特性曲线见图 4 和图 5。由图可见, 当泵入口压力改变

行发动机系统动态特性的评估,发动机调节系统的分析。计算结果可为分析火箭飞行中的纵向稳定性提供原始数据。

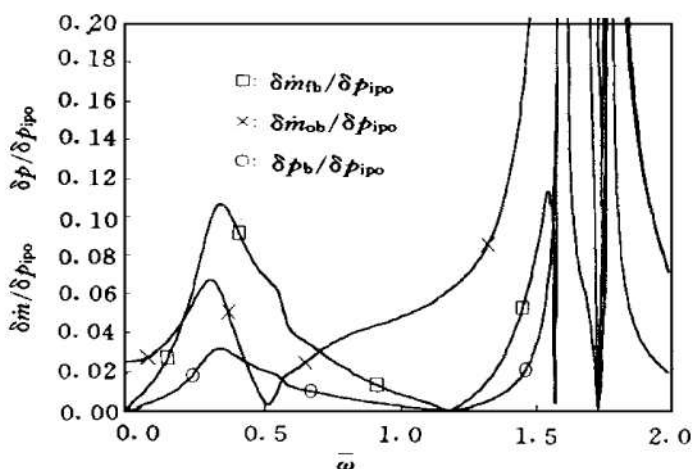


Fig. 4 Amplitude-frequency curves on pressure of oxidant pump's entrance (aim at II model)

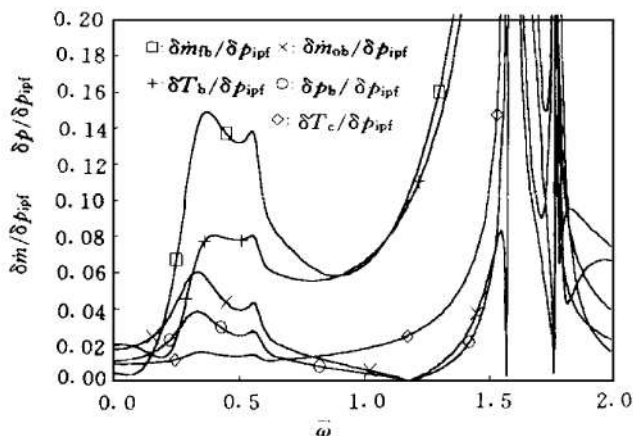


Fig. 5 Amplitude-frequency curves on pressure of fuel pump's entrance (aim at II model)

参考文献

- 1 ••к•ао • •, ••ца кВВ,ШБ ТДА к цаокБ кд•ш о Б
а•То Б д•кА ТБ [М] • а копь ШБкБ 1986.
- 2 •БГ•ц • •, •а•око • •, •аА•Б•ца • •• д •БцкГ
а•ца кВВ,ЩА а•БкГ а•То • к д•кА БГ•к [М] •
• а копь ШБкБ 1978.
- 3 徐士良.FORTRAN 常用算法程序集 [М] . 北京: 清华大学出版社. 1995.

(责任编辑: 盛汉泉)