

文章编号: 1000-8055(2009)05-1187-05

液氧/煤油补燃发动机低频频率特性研究

李 斌¹, 杜大华², 张贵田¹, 张继桐²

(1. 西北工业大学 航天学院, 西安 710072; 2. 西安航天动力研究所, 西安 710100)

摘 要: 基于模块化层次化的建模技术, 建立液氧/煤油补燃发动机的线性小扰动频率特性仿真模型. 在建模过程中, 重点考虑了绝热流动假设和熵波影响下的气路模型. 依据交流流体网络理论, 运用传递函数法分析了该型发动机的低频频率特性, 为研究液体火箭的纵向耦合振动(POGO)及发动机动力学提供帮助.

关 键 词: 液氧/煤油补燃发动机; 频率特性; 传递矩阵

中图分类号: V430

文献标识码: A

Research on the low frequency characteristics of LOX/kerosene staged combustion cycle engine

LI Bin¹, DU Da-hua², ZHANG Gui-tian¹, ZHANG Ji-tong²

(1. School of Astronautics,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Based on the modeling technology of modularization and topology generation, a linear small perturbation dynamics transfer matrix model was developed for analysis of a LOX (liquid oxygen)/kerosene staged combustion cycle engine. In the process of modeling, the gas-path model of the adiabatic flow assumption was adopted, and the entropy wave affections were emphatically studied. As per the alternating current fluid network theory, the low frequency characteristics of the engine system were investigated by using transfer function method; the research of this paper can benefit the POGO and engine dynamics studies of liquid rockets.

Key words: LOX (liquid oxygen)/kerosene staged combustion cycle engine; frequency characteristics; transfer matrix

高压液氧/煤油补燃发动机的许多动力学、控制等问题往往具有频率范围较低的特点, 进行发动机的低频频率特性研究对分析系统的工作稳定性、液体火箭的纵向耦合振动(POGO)具有重要意义. 发动机的低频频率特性也是对发动机进行动力学修改、控制与调节的原始依据. 在对液体火箭发动机的频率特性研究中, 多集中于非补燃发动机和液路系统, 而对补燃发动机和燃气路特性的研究很少^[1-4]; 文献[5]介绍了对液体火箭发

动机的自动调节, 能够处理较复杂的情况. 本文正是以某大型泵压式液氧/煤油补燃发动机为研究对象, 首先采用模块化建模方法, 开发了发动机各组件的动力学传递模型, 在建模过程中重点研究了绝热流动假设和熵波影响下的气路模型; 其次, 依据交流流体网络理论, 通过流线传递将各组件模块耦合为发动机系统模型, 从而得到联系扰动量和系统参数变量的发动机传递矩阵方程; 最后, 运用传递函数分析技术, 采用 Matlab 语言编程进

收稿日期: 2008-08-28; 修订日期: 2008-12-25

作者简介: 李斌(1969-), 男, 河北泊头人, 研究员, 博士生, 研究领域为航空宇航推进理论与工程.

行仿真计算,研究发动机的低频频率特性.

1 系统数学模型

1.1 发动机系统

图 1 为某型液氧/煤油补燃发动机的系统简图.单个预燃室产生高压富氧燃气驱动涡轮,驱动涡轮后的燃气进入燃烧室再次燃烧.氧泵和煤油泵前均设置有预压泵;煤油泵设计为两级,一级泵向推力室供应煤油,二级泵通过流量调节器向预燃室供应小流量煤油.

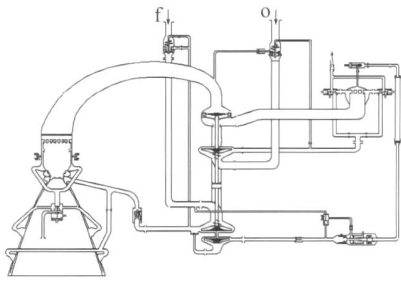


图 1 发动机系统
Fig.1 Schematic of engine system

1.2 建模

定义:①类,模型中最基本组件,一个模块用一类来实现;②基类,针对不同类模块所具有的相同属性,设计了基类;③子系统和系统,子系统可通过接口耦合成系统.

遵循模块划分原则与分段原则对发动机系统模块化分解,依据频率特性仿真的需要,共划分了

15 个液路模块、6 个气路模块和 2 个气液路接口模块,形成如图 2 所示的模块化层次结构.本文采用线性化、小扰动方法进行建模分析,下面介绍几个典型模块及整个系统的数学模型.

1.2.1 液路直管

考虑圆柱形导管典型结构,管壁为刚性,流动为轴对称层流,流体粘性不变.根据流体的波动方程、连续方程和状态方程,联系管道始末端流体状态参数的四端网络传递方程为

$$\begin{bmatrix} \delta p_e \\ \delta Q_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch } \gamma x & -Z_c \text{sh } \gamma x \\ -\frac{1}{Z_c} \text{sh } \gamma x & \text{ch } \gamma x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p_i \\ \delta Q_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 γ 为传播常数, Z_c 为流体特征阻抗.

1.2.2 泵

泵将推进剂供给预燃室与推力室,根据泵的动态方程和连续方程^[6],泵的集中参数模型传递方程为

$$\begin{bmatrix} \delta p_{ep} \\ \delta Q_{ep} \end{bmatrix} = T_p \begin{bmatrix} \delta p_{ip} \\ \delta Q_{ip} \end{bmatrix}$$

$$T_p = \begin{bmatrix} (m+1) + sC_b(R_p + sL_p) & -(R_p + sL_p)(1 - sM_b) \\ -sC_b & (1 - sM_b) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中 R_p, L_p, C_b, M_b 和 $(m+1)$ 分别表示为泵阻力、惯性、气蚀柔性、质量流量增益因子和动增益.

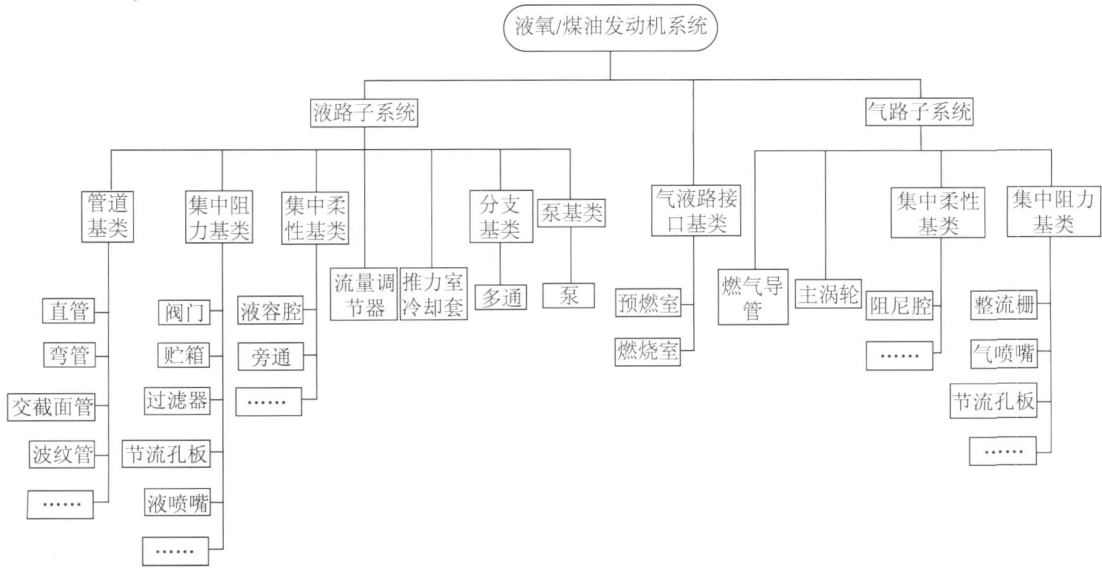


图 2 发动机系统模块化分解
Fig.2 Modules of the engine system

1.2.3 燃气导管

建立气路模型时,必须考虑熵波的影响,并且采用分布参数绝热模型.认为燃气为一维绝热可压缩的形式流动(不考虑摩擦、扩散、热交换和质量源);当所分析的燃气波长并不远大于导管长度

时,要考虑导管内的声学效应.根据圆柱形导管中可压缩流轴向运动的 Navier-Stokes 方程、连续方程和熵变方程^[6],得联系气体管路两端压力、流量和温度参数扰动的六端网络传输方程,其传递矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left[e^{\left(\frac{j\bar{\omega}}{1-Ma} \right)} + e^{\left(-\frac{j\bar{\omega}}{1+Ma} \right)} \right] & -\frac{\alpha}{2} \left[e^{\left(\frac{j\bar{\omega}}{1-Ma} \right)} - e^{\left(-\frac{j\bar{\omega}}{1+Ma} \right)} \right] \frac{\bar{p}}{Q} & 0 \\ -\frac{1}{2\alpha} \left[e^{\left(\frac{j\bar{\omega}}{1-Ma} \right)} - e^{\left(-\frac{j\bar{\omega}}{1+Ma} \right)} \right] \frac{\bar{Q}}{\bar{p}} & \frac{1}{2} \left[e^{\left(\frac{j\bar{\omega}}{1-Ma} \right)} + e^{\left(-\frac{j\bar{\omega}}{1+Ma} \right)} \right] & 0 \\ \frac{\kappa-1}{2\kappa} \left[e^{\left(\frac{j\bar{\omega}}{1-Ma} \right)} + e^{\left(-\frac{j\bar{\omega}}{1+Ma} \right)} - 2e^{\left(-\frac{j\bar{\omega}}{Ma} \right)} \right] \frac{\bar{T}}{\bar{p}} & -\frac{\alpha(\kappa-1)}{2\kappa} \left[e^{\left(\frac{j\bar{\omega}}{1-Ma} \right)} - e^{\left(-\frac{j\bar{\omega}}{1+Ma} \right)} \right] \frac{\bar{T}}{Q} e^{\left(-\frac{j\bar{\omega}}{Ma} \right)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\bar{\omega}$, Ma 为无量纲角频率及马赫数; α , κ 为折算波阻和燃气比热比; $\bar{p}$, $\bar{Q}$, $\bar{T}$ 为分段内燃气的稳态压力、流量和温度.

1.2.4 涡轮

由于涡轮泵轴扭转振动的频率一般为中高频,在低频模型中不考虑涡轮泵轴的功率平衡及振动影响.对于在液体火箭发动机中如涡轮喷嘴类有临界阻力比的部件,由于燃气要做功,须考虑温度振荡对流量脉动、压力脉动的影响,则有涡轮(气涡轮)的传输方程

$$\begin{bmatrix} \delta p_{et} \\ \delta Q_{et} \\ \delta T_{et} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\bar{p}_{et}}{\bar{p}_{it}} & -\frac{1}{\varepsilon} \frac{\bar{p}_{et}}{\bar{Q}_t} & -\frac{1}{2\varepsilon} \frac{\bar{p}_{et}}{\bar{T}_{et}} \\ 1 + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\bar{Q}_t}{\bar{p}_{it}} & -\frac{1}{\varepsilon} & -\left(1 + \frac{1}{\varepsilon} \right) \frac{\bar{Q}_t}{2\bar{T}_{et}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p_{it} \\ \delta Q_{it} \\ \delta T_{it} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 ε 为通过涡轮的燃气流量与其前后静压比关系曲线的无量纲斜率; $\bar{Q}_t$, $\bar{p}_{it}$, $\bar{p}_{et}$, $\bar{T}_{et}$ 为分别为通过涡轮的燃气稳态流量、涡轮前稳态压力、涡轮后稳态压力和温度.

1.2.5 预燃室与燃烧室

预燃室具有最大的特征时间常数与熵波幅值,其对发动机频率特性的影响较大.假设推进剂进入预燃室后,经过一个纯时滞在燃烧区瞬间燃烧;忽略声学效应的影响,认为燃气处于绝热条件且是理想的 ($f < 400$ Hz). 则预燃室接口模块的传递矩阵方程为(液-液型燃烧组件)

$$\begin{bmatrix} \delta p_{gg} \\ \delta Q_{gg} \\ \delta T_{gg} \end{bmatrix} = e^{-s\tau_r} \begin{bmatrix} \frac{K_{co}}{(1+s\tau_c)} & \frac{K_{cf}}{(1+s\tau_c)} \\ 1 & 1 \\ \phi \frac{\bar{T}_{gg}}{Q_{ox}} & -\phi \frac{\bar{T}_{gg}}{Q_F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta Q_{ox} \\ \delta Q_F \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 τ_r , τ_c 分别为燃烧时滞、时间常数; K_{co} , K_{cf} 为相对于氧化剂秒流量、燃料秒流量的压力放大系数; $\bar{Q}_{ox}$, $\bar{Q}_F$ 和 $\bar{T}_{gg}$ 为分别为喷嘴后稳态氧化剂流量、燃料流量和预燃室静温; ϕ 为燃烧产物温度 T 与组元质量混合比 k_m 关系曲线的无量纲斜率,

$$\phi = \frac{k_m}{T} \frac{\partial T}{\partial k_m}.$$

燃烧室的建模与预燃室类似,将其视为可累积工质和热量的容腔,忽略气喷嘴与燃烧室内燃气之间的耦合,有燃烧室接口模块的传递矩阵方程(气-液型燃烧组件)

$$\begin{bmatrix} \delta p_c \\ \delta Q_c \\ \delta T_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{co}}{(1+s\tau_c)} & \frac{K_{cf}}{(1+s\tau_c)} e^{-s\tau_r} \\ 1 & e^{-s\tau_r} \\ \phi \frac{\bar{T}_c}{Q_g} & -\phi e^{-s\tau_r} \frac{\bar{T}_c}{Q_F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta Q_g \\ \delta Q_F \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $\bar{Q}_g$ 和 $\bar{T}_c$ 分别为喷嘴后富氧燃气稳态流量和燃烧室静温.

1.2.6 模块组装及系统模型

对于介质流动耦合部件,工质的进、出口就是模块的输入、输出接口,依据入口状态矢量 H_i 和出口状态矢量 H_{i+1} 有模块的通用传递矩阵方程:

$$H_{i+1} = T_i H_i \quad (7)$$

式中 T_i 为模块 i 的特性矩阵. 模块之间的连接关系与实际的物理连接直接对应, 模块的连接可通过软件实现, 也可自己组装. 对于本文所研究的发动机系统, 通过预燃室接口和燃烧室接口将氧化剂路和燃料路联系起来. 依据交流流体网络理论, 通过流线传递将各组件模块耦合为发动机系统的总传递矩阵方程

$$H_{n+1} = \left(\prod_{h=1}^n T_{n-h+1} \right) H_0 \tag{8}$$

2 频率特性分析

在建立发动机系统的数学模型之后, 引入推力室喉部边界条件 $\frac{\delta Q_{th}}{Q_{th}} = \frac{\delta p_{th}}{p_{th}} - 0.5 \frac{\delta T_{th}}{T_{th}}$ (其中 $\bar{p}_{th}$, $\bar{Q}_{th}$ 和 $\bar{T}_{th}$ 分别为喉部处稳态压力、流量和温度), 求得所分析系统的入口阻抗 Z_i , 从而分析得到系统的频率传递函数, 运用传递函数可直接分析发动机系统的频率特性(频率法).

本文采用 Matlab 语言编程进行仿真计算, 分析了氧贮箱至氧泵入口、氧贮箱至预燃室、氧贮箱至燃烧室和煤油贮箱至煤油一级泵入口的频率特性. 干扰因素取为氧贮箱、煤油贮箱的箱底脉动压力 δp_{to} 和 δp_{to} ; 频率响应参数有: 氧泵、煤油一级泵入口脉动压力 δp_{ipo} 和 δp_{ipt} , 预燃室脉动压力 δp_{pg} 和燃烧室的脉动压力 δp_c , 脉动流量 δQ_c 和温度波动 δT_c . 仿真时取液氧输送管长 8 m, 煤油输送管长 2.5 m.

由图 3 可知, 由于氧泵前液氧输送管路相比煤油一级泵前输送管路长、氧预压泵后的燃气掺混段具有较大的分布柔性、氧泵相比煤油一级泵具有更大的气蚀柔性等, 故氧泵前输送路的一阶

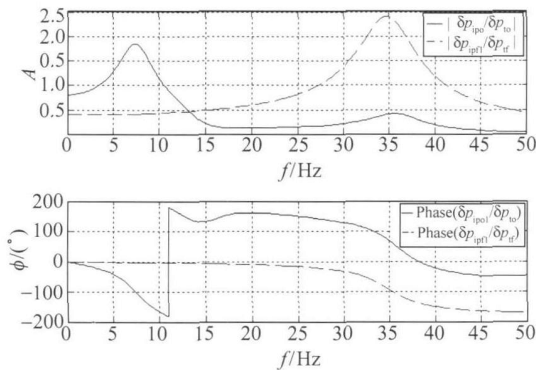


图 3 泵入口参数随贮箱压力脉动的幅相频曲线
Fig. 3 Amplitude and phase frequency curves of pump inlet-tank bottom pressure fluctuations

谐振频率比煤油一级泵前输送路低得多, 氧泵前输送系统的低频动特性可能会直接影响到箭体的 POGO 稳定性, 研究发动机的低频特性则主要关注于氧化剂系统.

分析图 3~图 5, 发动机系统的一阶谐振频率主要取决于氧泵前系统(含泵入口气蚀柔性), 氧泵后系统对发动机一阶频率的影响则相对很小; 氧泵及其后系统对发动机低频特性的影响主要表现为: 一是使得压力脉动在第一峰以上的低频范围内有较大的动态增益(泵、预燃室和燃烧室具有较大的动态放大系数), 二是富氧燃路的时滞补充相位差. 当气流路的长度相比燃气的分析波长小得多时, 气路的声学效应对发动机系统低频特性的影响就可忽略不计. 同时还可以看出, 对于补燃发动机, 各组件耦合作用强烈, 表现在频率上就是宽通频特性, 几乎所有参数的幅相频特性都随频率变化, 且任何频率的干扰都会经过燃气导管从预燃室进入燃烧室.

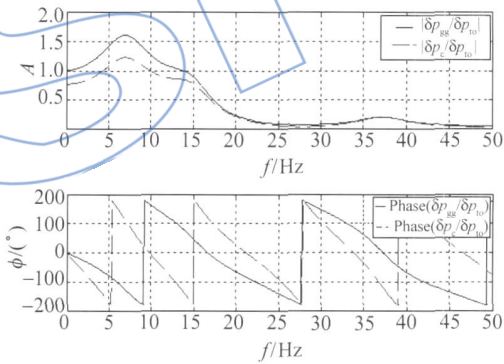


图 4 预燃室、燃烧室参数随氧贮箱压力脉动的频率特性
Fig. 4 Frequency characteristic curves of gas-generator and combustor-LOX tank bottom pressure fluctuations

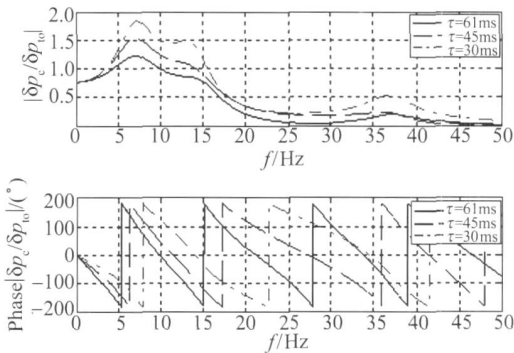


图 5 燃气路时滞对发动机频率特性的影响
Fig. 5 Combustor-LOX tank bottom frequency characteristics under different gas line time-lags

由图 6 可知:考虑气路熵波(绝热模型)和不考虑气路熵波(瞬时混合模型)两种情况下,分析结果得到的发动机频率特性有着明显的差别.重要的是不考虑熵波而把气路视为流容元件,这将会漏掉一些特征信息,熵波对发动机的动力学特性有重大影响;无气流分离区和逆流区的气路相对来说在低频过程更趋于绝热,且在低频、中高频都必须将其看成分布参数系统,也就是需考虑熵波的影响.

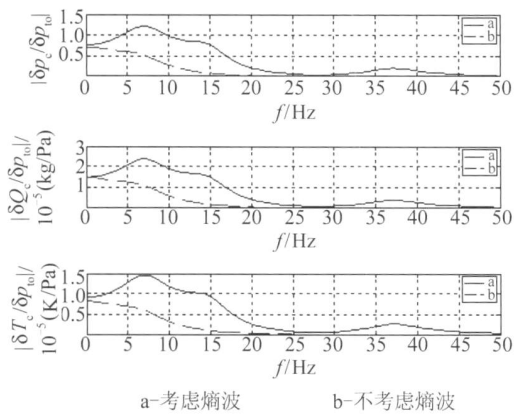


图 6 考虑、不考虑熵波对发动机频率特性的影响
Fig. 6 Combustor-LOX tank bottom frequency characteristics with or without entropy wave effects

3 结束语

液氧/ 煤油补燃发动机系统复杂、各部件耦合

紧密,采用模块化建模方法所建数学模型和运用传递函数的频率特性分析技术可很好地研究发动机系统的低频频率特性.系统的一阶频率主要取决于氧泵前系统(含泵入口柔性),氧泵及其后系统主要影响动态增益因子及相位.氧预压泵后的多相流场、氧泵和燃气路特征对发动机的低频特性起着重要的作用,考虑与不考虑熵波影响时系统的频率特性有较大差异等,这些应予以重视.本研究是 POGO 分析所需动特性参数获取试验的前期工作,采用本文中的建模分析方法对发动机系统的动态特性和稳定性进行深入研究,这仍有待继续.

参考文献:

[1] Holster J L. Analytical model for liquid rocket propellant feeding dynamics[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1974, 11(3): 180-187.
[2] WANG Qizheng, GAO Wanyong. POGO stability, reliability and parameters analysis[R]. AD-A244 379.
[3] Oppenheim B W, Rubin S. Advanced POGO stability analysis for liquid rockets[R]. AIAA1992- 2454.
[4] Goertz C. A modular method for the analysis of liquid rocket engine cycles[R]. AIAA95-2966.
[5] 格列克曼 БФ 液体火箭发动机自动调节[M]. 顾明初, 译. 北京:宇航出版社, 1995.
[6] Rubin S. An interpretation of transfer data for a cavitating pump[R]. AIAA2004-4025.