国防科技大学学报
JOURNAL OF NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY
第 19 卷第 3 期　1997 年 6 月　Vol. 19 No. 3

# 内外干扰因素对液体火箭发动机的影响分析*

沈赤兵　吴建军　陈启智

(国防科技大学航天技术系　长沙　410073)

摘　要　在已有的液体火箭发动机稳态工况的非线性数学模型基础上,计算分析了单干扰因素对液体火箭发动机参数的影响,用非线性方法和小偏差方法对比分析了两个干扰因素分别和共同对发动机参数的影响。所得结论可用于泵压式燃气发生器循环的液体火箭发动机试验结果分析、可靠性及故障分析,也揭示了此类发动机参数随各种干扰因素的变化规律。

关键词　液体火箭发动机,非线性模型,稳态工况,干扰因素

分类号　V433

## Analysis of the Effects of Internal and External Interfering Factors on the Liquid Rocket Engine

Shen Chibing　Wu Jianjun　Chen Qizhi

(Department of Astronautical Technology, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** Based on the nonliear mathematical model for the steady state operation of a liquid rocket engine, the effects of each interfering factor on the parameters of liquid rocket engine are calculated. The comparative analysis is carried out for the effects of the interfering factors on the engine parameters by using both nonlinear method and method of small deviations. The results obtained can be used for the analysis of the pump-fed gas generator cycle liquid rocket engine test results, the reliability analysis and the fault analysis, and also for bringing to light the variation of the engine parameters with various interfering factors.

**Key Word** liquid rocket engine, nonlinear model, steady state operation, interfering factors

## 1　发动机的非线性数学模型及计算方法

文献[1]的(2.1)～(2.25)式中,$X(1)\cdots X(25)$为发动机参数,是变量;系数 $a_k$($k$= 0,

* 校试验研究基金资助项目
1996 年 9 月 9 日收稿

…, 25) 是定值, 按照发动机额定工况参数和试验数据求出; $D_k$ ($k$ = 1, …, 20) 是干扰因素, 可取定值, 通过改变干扰因素可分析干扰因素对发动机性能的影响, 还可根据故障模式调整 $a_k$, 使之反映故障的影响, 进行稳态故障效应仿真; $W_k$ ($k$ = 1, …, 4) 是用于计算涡轮效率的经验系数, 通过发动机试验而得到; $P_k^H$ ($k$ = 1, 2, 3) 表示由液柱高度引起的压降, 由调整计算结果推出; $W_k$、$P_k^H$ 均为定值。$X(k)$、$D_k$ 的含义及单位已分别列入文献[1] 的表 2.1、表 2.2 中, $a_k$ 的含义已列入文献[1] 的表 2.3 中, $D_k$ 的含义及单位列入本文的表 1 中。

对于上述非线性数学模型采用修正的 Gauss-Newton 法。详细的计算步骤从文献[3] 中可以查到。此方法不需对方程式作任何变形处理, 收敛精度达 $10^{-4}$ 以下, 与文献[2] 一致。文献[1] 的(2.1) 至(2.25) 式的导数值是可求的, 但由于文献[2] 中的计算方法未利用函数的梯度信息, 运算收敛速度较慢。

表 1　干扰因素说明

| 含义 | 代号 | 符号 | 单位 |
|---|---|---|---|
| 氧化剂泵效率 | $D_1$ | $\eta_{po}$ | |
| 燃料泵效率 | $D_2$ | $\eta_{pf}$ | |
| 涡轮效率 | $D_3$ | $\eta_t$ | |
| 涡轮落压比 | $D_4$ | $\gamma_{bd}$ | |
| 伺服功率 | $D_5$ | $N_U$ | kW |
| 声速喷嘴面积 | $D_6$ | $A_{ej}$ | $m^2$ |
| 涡轮喷嘴面积和 | $D_7$ | $A_{ei}$ | $m^2$ |
| 氧化剂泵入口压力 | $D_8$ | $P_{ipo}$ | MPa |
| 燃料泵入口压力 | $D_9$ | $P_{ipf}$ | MPa |
| 氧化剂饱和蒸汽压 | $D_{10}$ | $P_{bo}$ | MPa |
| 氧化剂副系统汽蚀系数 | $D_{11}$ | $k_{0f}$ | M Pa.$s^2$/$kg^2$ |
| 蒸发器汽蚀管汽蚀系数 | $D_{12}$ | $k_{0v}$ | M Pa.$s^2$/$kg^2$ |
| 燃料饱和蒸汽压 | $D_{13}$ | $P_{bf}$ | MPa |
| 燃料副系统汽蚀系数 | $D_{14}$ | $k_{ff}$ | M Pa.$s^2$/$kg^2$ |
| 推力室喉部面积 | $D_{15}$ | $A_{tc}$ | $m^2$ |
| 燃料室燃烧效率 | $D_{16}$ | $\eta_c$ | |
| 氧化剂密度 | $D_{17}$ | $\rho_o$ | kg/$m^3$ |
| 燃料密度 | $D_{18}$ | $\rho_f$ | kg/$m^3$ |
| 喷管出口面积与排气管面积之和 | $D_{19}$ | $A_e$ | $m^2$ |
| 环境压力 | $D_{20}$ | $P_o$ | MPa |

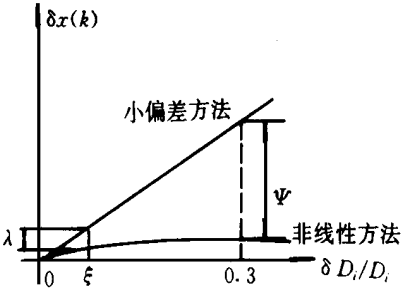



图 1 非线性方法与小偏差方法计算结果的对比

## 2　计算结果及分析

### 2.1　单干扰因素对发动机参数的影响

为了分析干扰因素对发动机参数的影响, 选定了 6 个发动机参数来评定发动机的变化, 这 6 个参数也是在试车时可测出的参数, 以下用 A ⑦B ⑦C ⑦D ⑦E ⑦F ⑦分别来表示这 6 个参数的相对变化量: A ⑦= $\delta \dot{m}_o / \dot{m}_o$, B ⑦= $\delta \dot{m}_f / \dot{m}_f$, C ⑦= $\delta P_{\alpha} / P_{oc}$, D ⑦= $\delta P_f^L / P_f^L$, E ⑦= $\delta n / n$, F ⑦= $\delta F / F$。

上述 6 式中, 分子均为变化量, 分母为发动机参数的额定工况值, 各参数的具体含义是: A ⑦表示发动机氧化剂流量的相对变化量, B ⑦表示发动机燃料流量的相对变化量, C ⑦

表示氧化剂喷前压力的相对变化量，$D$⑦表示燃料主管路分支处压力的相对变化量，$E$⑦表示涡轮泵转速的相对变化量，$F$⑦发动机推力的相对变化量。

在每个干扰因素的相对变化量相同时，计算结果表明：发动机参数对干扰因素 $\eta_{po}$、$\eta_{pf}$（即 $D_1$、$D_2$）发生改变时的敏感程度最大；发动机参数对干扰因素 $k_{0v}$（即 $D_{12}$）发生改变时的敏感程度较小；发动机推力对干扰因素 $P_o$、$A_e$（即 $D_{20}$、$D_{19}$）发生改变时的敏感程度较大，而其它发动机参数对 $P_o$、$A_e$（即 $D_{20}$、$D_{19}$）发生改变时的敏感程度非常小。因此，在分析干扰因素对发动机参数的影响时，除了要考虑发动机参数对干扰因素的敏感程度以外，还要结合干扰因素的实际变化量进行具体分析。

2.2　非线性方法与小偏差方法的计算结果对比

当相同的单干扰因素在相同的范围内变化时，用非线性方法可以计算出“发动机参数偏差量—干扰因素相对变化量”的曲线，用小偏差方法可以计算出“发动机参数偏差量—干扰因素相对变化量”的直线，从理论上讲，这两条线是相切的，而且切点所对应的发动机参数值就是额定工况点，即图 1 中的 0 点，随着干扰因素相对变化量的增大，上述曲线和直线的差别将增大。图 1 中的纵轴是发动机某个参数的变化量，横轴是某个干扰因素的相对变化量，图中的直线是小偏差方法的计算结果，曲线是非线性方法的计算结果。在图 1 中的 $\delta D_i / D_i = \xi$ 处，非线性方法的计算结果与小偏差方法的计算结果出现了明显的差别，也就是说，当 $0 \leq \delta D_i / D_i < \xi$ 时，非线性方法的计算结果与小偏差方法的计算结果是非常接近的；当 $\xi \leq \delta D_i / D_i$ 时，非线性方法的计算结果与小偏差方法的计算结果出现明显的差别。从计算得到的许多曲线中发现，当 $\epsilon = \lambda / \Psi = 0.05$ 时，非线性方法的计算结果与小偏差方法的计算结果出现了明显的差别，因此，取 $\epsilon = \lambda / \Psi = 0.05$ 时所对应的干扰因素相对变化量为 $\xi$ 值。$\lambda$、$\Psi$ 的具体含义从图 1 中可以看出。当然，也可根据实际情况调整 $\Psi$ 所对应的干扰因素相对变化量或改变 $\epsilon$ 的大小。$\xi$ 随不同的干扰因素而不同，也随不同的发动机参数而不同。

表 2　非线性方法与小偏差方法出现明显差别时的 $\xi$ 值

| $i$ | $\delta D_i / D_i$ | $A$⑦ | $B$⑦ | $C$⑦ | $D$⑦ | $E$⑦ | $F$⑦ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0～-0.3 | -0.18 | -0.1 | -0.1 | -0.1 | -0.1 | -0.1 |
| 2 | 0～-0.3 | -0.18 | -0.1 | -0.1 | -0.1 | -0.1 | -0.1 |
| 4 | 0～0.3 | 0.16 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| 5 | 0～0.3 | 0.3 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 6 | 0～0.3 | 0.3 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.06 | 0.02 |
| 7 | 0～0.3 | 0.1 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| 8 | 0～0.3 | 0.22 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 9 | 0～0.3 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 10 | 0～0.3 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 11 | 0～0.3 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 12 | 0～0.3 | 0.08 | 0.02 | 0.12 | 0.02 | 0.02 | 0.04 |
| 13 | 0～0.3 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 14 | 0～0.3 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 15 | 0～0.3 | 0.04 | 0.04 | 0.1 | 0.04 | 0.02 | 0.04 |
| 16 | 0～-0.3 | -0.08 | -0.02 | -0.04 | -0.02 | -0.02 | -0.02 |
| 17 | 0～0.3 | 0.3 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.04 | 0.02 |
| 18 | 0～0.3 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |

表 2 给出了单干扰因素在一定范围内变化时小偏差方法与非线性方法所得的“发动机参数偏差量—干扰因素相对变化量”曲线出现明显差别时的干扰因素相对变化量 ξ 值。

表 2 给出了 17 个干扰因素分别在发动机的 6 个参数下所确定的 ξ 值。由表 2 可知, 在 102 个 ξ 值中, $\delta D_1/D_1$(即 $\delta\eta_{po}/\eta_{po}$)、$\delta D_2/D_2$(即 $\delta\eta_{pf}/\eta_{pf}$)的绝对值最大, 其次是 $\delta D_4/D_4$(即 $\delta\gamma_{td}/\gamma_{td}$)。因此, 当 $\eta_{po}$、$\eta_{pf}$、$\gamma_{td}$ 在低于 10% 的范围内变化时, 用小偏差方法分析它们对发动机性能的影响, 计算结果与非线性方法的计算结果一致。表 2 的 102 个 ξ 值中, 有 69 个 ξ 的绝对值小于 5%, 这说明小偏差方法与非线性方法计算结果相互接近的范围太小, 除了 $\eta_{po}$、$\eta_{pf}$、$\gamma_{td}$ 以外, 还有 14 个干扰因素在变化时用小偏差方法和非线性方法分别计算的结果将出现较大的差别。建议工程上针对此类发动机在分析干扰因素对发动机参数的影响时, 可根据干扰因素的实际相对变化量并参考表 2 来确定采用非线性方法或小偏差方法。

2.3 两个干扰因素对发动机参数的影响

在众多的干扰因素中, 推进剂密度、泵入口压力、环境压力发生变化的可能性较大, 下面列举图 2～图 4 以反映它们对发动机参数的影响, 其中, 图 4 中的 2 条线均表示 $A_e$、$P_o$ 发生相同的相对变化量时 $F$ 的变化量。

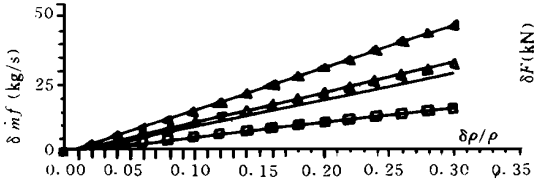



图 2 组元密度对燃料流量的影响

△ 非线性方法, 燃料密度变化
▲ 小偏差方法, 燃料密度变化
□ 非线性方法, 燃料、氧化剂密度同时变化
— 小偏差方法, 燃料、氧化剂密度同时变化

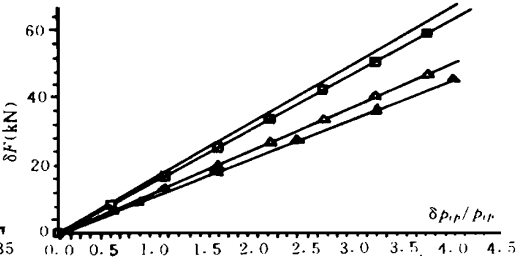



图 3 泵入口压力对发动机推力的影响

△ 非线性方法, 氧化剂泵前压力变化
▲ 小偏差方法, 氧化剂泵前压力变化
□ 非线性方法, 氧化剂、燃料泵前压力同时变化
— 小偏差方法, 氧化剂、燃料泵前压力同时变化

## 3 结论

在单干扰因素的相对变化量相同时, 发动机参数对干扰因素 $\eta_{po}$、$\eta_{pf}$ 发生改变时的敏感程度最大; 发动机参数对干扰因素 $k_{0v}$ 发生改变时的敏感程度较小; 发动机推力对干扰因素 $P_o$、$A_e$(即 $D_{20}$、$D_{19}$)发生改变时的敏感程度较大, 而其它发动机参数对 $P_o$、$A_e$ 发生改变时的敏感程度非常小。

对比分析了非线性方法与小偏差方法的计算结果, 小偏差方法与非线性方法计算结果相互接近的范围太小, 除了 $\eta_{po}$、$\eta_{pf}$、$\gamma_{td}$ 以外, 还有 14 个干扰因素在变化时用小偏差方法和非线性方法分别计算的结果将出现较大的差别。

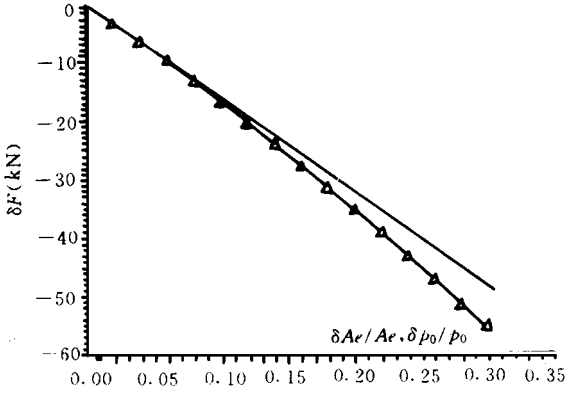



图4　喷管出口面积和环境压力对发动机推力的影响

△ 由非线性方法算出　　— 由小偏差方法算出

## 参 考 文 献

1　吴建军. 液体火箭发动机故障检测与诊断研究: [ 学位论文] . 长沙: 国防科技大学, 1995

2　吴建军, 张育林, 陈启智. 液体火箭发动机稳态故障仿真及分析. 推进技术, 1994( 3) : 6～13

3　薛履中. 工程最优化技术. 天津大学出版社. 1989, 3: 125～128

( 责任编辑　石少平)