

液体火箭发动机性能 可靠性的随机仿真方法

王海燕, 刘红军

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 分析了影响液体火箭发动机性能可靠性的随机扰动来源, 提出了一种基于随机仿真的发动机性能可靠性的预估方法, 并以某型号液氧/煤油补燃循环上面级发动机为研究对象, 采用随机仿真方法对该发动机的性能可靠性进行计算, 获得了该发动机主要性能参数的分布规律和在给定偏差范围内主要性能参数的可靠性。

关键词: 液体火箭发动机; 随机仿真; 可靠性

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2006)04-0026-05

Stochastic simulation method of performance reliability estimation on liquid propellant rocket engine

Wang Haiyan, Liu Hongjun

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: In this paper, the random disturbance factors that affect liquid propellant rocket engine performance are analyzed. An engine reliability estimation method that based on stochastic simulation is put forward. Using the stochastic simulation method, the reliability of a liquid oxygen/kerosene staged combustion cycle upstage engine is analyzed, and the regularity distribution of main performance parameters and the reliability of these parameters within certain deviation range are obtained.

Key words: liquid propellant rocket engine; stochastic simulation; reliability

收稿日期: 2006-01-08; 修回日期: 2006-03-06。

作者简介: 王海燕 (1979—), 女, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机系统设计。

1 引言

发动机性能的可靠性是指其性能参数落在给定范围内的概率。发动机性能参数的可靠性可以通过小偏差的方法进行计算^[1]。组件性能参数的偏差对发动机性能参数的影响通过误差传递原理来分析,但前提条件为各个干扰因素互相独立,如果干扰因素之间相互关联,分析则非常复杂。发动机系统静态非线性数学模型建立了干扰因素和发动机性能参数之间的光滑映射关系,当干扰因素服从一定分布规律时,发动机性能参数也具有相应的统计特性^[2]。采用非线性随机仿真计算结果直接进行可靠性分析,不需要考虑干扰因素之间是否存在关联关系,使得分析简化,但计算量大。

本文分析了发动机随机扰动来源,选择影响某发动机性能可靠性的主要随机干扰因素,在随机仿真的基础上,建立了利用非线性数学模型分析发动机性能参数可靠性的方法。

2 随机干扰因素的来源

发动机内部干扰因素通常是无法知道变化规律的随机变量,例如管路压降的变化量和涡轮效率的变化量等,它们是由于零件安装差异、组件液流试验测量误差以及由于使用了统计数据而造成的;外部干扰因素通常能够较为精确地测定出变化量,例如泵入口压力、温度的变化等,它们可以认为是非随机变量。非随机变量可以通过一定的措施控制,而随机变量是受很多因素影响的,且随机偏差不易减小。

影响随机变量的主要因素来源于:液流试验测量偏差;统计数据的偏差;不重复性偏差及试车测量偏差^[1]。

本文考虑的随机干扰因素包括模型发动机的氧泵扬程和功率试验测量误差;燃料泵扬程和功率试验测量误差;燃气发生器氧化剂路和燃料路压降试验测量误差;涡轮效率和流通面积统计偏差;推力室喉部直径尺寸以及喷管效率和燃烧效率统计偏差。表1中列举了以上随机干扰因素的相对偏差量。

表1 干扰因素相对偏差量

Tab.1 Relative deviation of disturbance factors

干扰因素	干扰因素相对偏差量/(%)
氧泵压升	± 0.76
氧泵功率	± 0.86
燃料一级泵压升	± 0.65
燃料一级泵功率	± 0.86
燃料二级泵扬程	± 2.26
发生器燃料路压降	± 0.43
发生器氧路压降	± 0.79
涡轮流通面积	± 2
推力室喉部直径尺寸	± 0.2
涡轮效率	± 1
喷管效率	± 1
燃烧效率	± 1

3 可靠性的随机仿真方法

发动机主要参数的给定范围通常是以偏差形式 $x_0 \pm \Delta x$ 给出。对于知道分布概率密度函数的参数,性能可靠性可以表示为:

$$R = \int_{x_0 - \Delta x}^{x_0 + \Delta x} f(x) dx \quad (1)$$

公式(1)适用于参数上下限均有要求的情况,对于只要求上限(下限)的情况,将下限(上限)设为负(正)无穷。

性能可靠性预测是根据组件的性能可靠性来推测发动机的性能可靠性。

对于所研究的补燃循环上面级发动机,系统静态数学模型可以表示成如下的形式:

$$\varphi(H, D, X) = 0 \quad (2)$$

式中, $H = (h_1, h_2, \dots, h_n)$ 为随机扰动因素组成的矢量; $D = (d_1, d_2, \dots, d_m)$ 为确定的入口参数、组件特性参数; $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ 为稳态性能参数组成的随机矢量。

通过将随机干扰因素的随机数代入系统数学

模型中求解,得到干扰因素共同作用下发动机性能参数的随机仿真结果,统计其分布规律可以得到发动机性能参数的概率密度函数。

对于正态分布的性能参数,如果假定系统偏差已经消除,且给定了发动机性能参数的对称偏差 $\pm\Delta x$,则性能可靠性与 $\frac{\Delta x}{\sigma_x}$ 有密切联系。例如当

$\frac{\Delta x}{\sigma_x}=1, 2, 3$ 时,由正态函数表可知参数 x 的可

靠性分别为 0.6827, 0.9545, 0.9973。因而可靠性预测可以转化为发动机参数均方差 σ_x 的预测。

3.1 干扰因素概率密度函数的确定

干扰因素可以从试验中得到大量的数据,可以通过统计分析来获得其分布规律,但工作量很大。由于发动机组件的主要参数受许多因素影响,而在这些影响因素中没有一项是特别突出的,因而根据概率论中的中心极限定理可以得出:发动机组件的主要参数服从正态分布^[1]。这样在得出参数的变化范围后,通过以下方法来确定干扰因素的概率密度函数。表 1 中参数变化范围按照“3 σ 规则”(服从正态分布的随机变量其值落在区间 $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$ 内几乎是肯定的,概率为 0.9973)给定,根据置信度为 $1-\alpha$ 的置信区间的定义可知:

$$P\{a \leq x \leq b\} = P\left\{Z_{\alpha/2} \leq \frac{x-\mu}{\sigma} \leq Z_{1-\alpha/2}\right\} = 1-\alpha \quad (3)$$

式中,取置信度 $1-\alpha=0.9973$ 时, $\alpha=0.0027$ 。则:

$$P\{a \leq x \leq b\} = P\left\{Z_{0.00135} \leq \frac{x-\mu}{\sigma} \leq Z_{0.99865}\right\} = 0.9973 \quad (4)$$

查标准正态分布表 $Z_{0.99865}=2.995$,所以

$\frac{b-\mu}{\sigma}=2.995$, $\sigma=\frac{b-\mu}{2.995}$ 。这样就确定了正态分

布随机干扰因素的均方差 σ 。数学期望 μ 是干扰因素的平均值。根据 μ 和 σ 可以确定服从正态分布的干扰因素的概率密度函数,并可以按照 3.2 节中的方法产生正态分布随机数。

3.2 干扰因素随机数的产生^[3]

产生服从均值为 μ 、方差为 σ^2 的正态分布随机变量的随机数 z 的计算公式为:

$$z = \mu + \sigma \left(\sum_{i=1}^{12} R_i - 6 \right) \quad (5)$$

式中, R_i 为 0~1 之间均匀分布的随机数,每求一个正态分布随机数需要产生 12 个 0~1 之间均匀分布的随机数 R_i 。

产生 12 个 0~1 之间均匀分布的随机数 R_i 的公式如下:

$$\begin{cases} y_i = \text{mod}(2053y_{i-1} + 13849, m) \\ R_i = y_i / m \end{cases}, i = 1, 2, \dots, 12 \quad (6)$$

式中, $m=2^{16}$; $\text{mod}()$ 为模除求余函数,选取不同的初值 y_0 ,则产生不同的随机数序列。

3.3 求解发动机性能参数随机数

按照以上方法,每个干扰因素产生 10000 组随机数,每次运算将每个干扰因素的任意一个随机数代入到发动机静特性非线性数学模型中,用 Broyden 秩 2 方法进行求解,求解 10000 次就可以得到 10000 组发动机的性能参数。

3.4 性能参数的分布特性和概率密度函数的确定

对 10000 组发动机性能参数的解进行无量纲化处理和统计分析。绘制“频率/组距~无量纲性能参数”直方图。根据此图可以推测无量纲性能参数可能服从的分布规律,并估计统计分布数。由 χ^2 拟合优度检验法^[4]检验假设是否成立。

3.5 可靠性分析

在验证了性能参数服从某种分布规律之后,就可以按照这种分布规律来估计参数的概率密度函数。根据给定的发动机参数偏差 Δx ,由概率密度函数算出可靠性。

对于给定了正负偏差的性能参数,可靠性计算公式为:

$$R = \int_{x_0-\Delta x_1}^{x_0+\Delta x_2} f(x)dx = \int_{-\infty}^{x_0+\Delta x_2} f(x)dx - \int_{-\infty}^{x_0-\Delta x_1} f(x)dx \quad (7)$$

对于服从正态分布的性能参数,可以根据 $\frac{\Delta x_1}{\sigma_x}$

和 $\frac{\Delta x_2}{\sigma_x}$ 查阅正态分布表,计算可靠性 R ,可靠性计算公式为:

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\Delta x_1}{\sigma_x}}^{\frac{\Delta x_2}{\sigma_x}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\int_{-\infty}^{\frac{\Delta x_2}{\sigma_x}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \int_{-\infty}^{-\frac{\Delta x_1}{\sigma_x}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right] \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\int_{-\infty}^{\frac{\Delta x_2}{\sigma_x}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt + \int_{-\infty}^{\frac{\Delta x_1}{\sigma_x}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right] - 1 \end{aligned}$$

(8)

4 计算结果及分析

表征发动机综合性能的主要参数是真空推力、真空比冲和发动机混合比。图 1~图 3 是发动机这三个性能参数无量纲化后的仿真结果图。左图是无量纲性能参数仿真值图，右图是“频率/组距~无量纲性能参数”直方图。左图中的横线是仿真结果的均值。无量纲性能参数的均值是通过统计仿真结果与性能参数额定值的商得到的。由表 2 均值计算结果可以看出性能仿真结果的均值与额定值十分接近，左图中仿真结果也具有以均值为中心的随机性。由右图可以看出无量纲性能参数在均值附近出现的概率大，与均值相差较大的值出现的概率比较小，参数分布比较集中，具有对称、单峰性质。由直方图假设无量纲性能参数服从正态分布，用 χ^2 拟合优度检验法检验假设是否成立。表 3 是假设检验的结果。由结果可以看出各个性能参数的检验统计量均小于 χ^2 分布数，证明假设成立，无量纲性能参数服从正态分布。

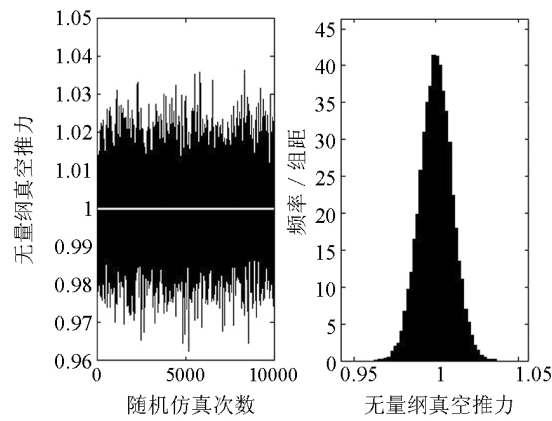


图1 真空推力随机仿真结果

Fig.1 Vacuum thrust stochastic simulation results

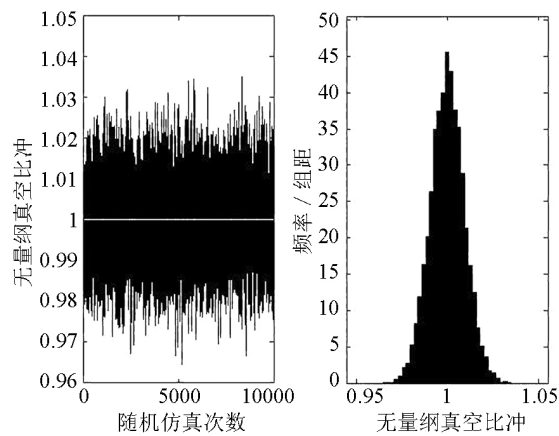


图2 真空比冲随机仿真结果

Fig.2 Vacuum impulse stochastic simulation results

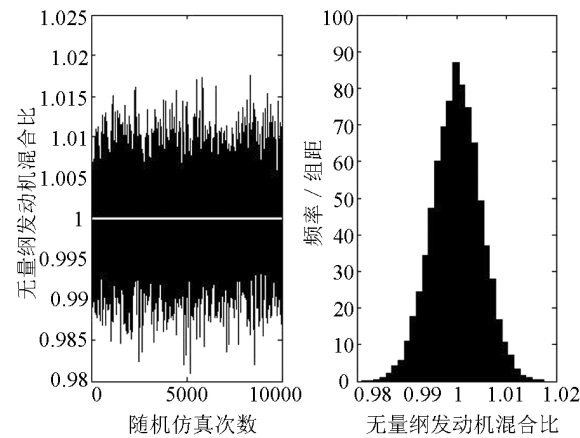


图3 发动机混合比随机仿真结果

Fig.3 Mixture ratio stochastic simulation results

表 2 是发动机主要性能参数无量纲化后计算得到的样本均值、标准差。

表 2 无量纲性能参数的均值和标准差

Tab.2 Means and standard deviations of dimensionless performance parameters

	均值	标准差
真空推力	1	0.0096226
真空比冲	1	0.0093549
发动机混合比	0.99996	0.008862

表 3 假设检验结果

Tab.3 Assumed distribution and significance test results

	假设分布	$\sum_{i=1}^r \frac{(N_i - n\hat{p}_i)^2}{n\hat{p}_i}$	χ^2
真空推力	$N(1, 0.0096226^2)$	18.308	44.985
真空比冲	$N(1, 0.0093549^2)$	25.325	38.885
发动机混合比	$N(0.99996, 0.008862^2)$	28.122	40.113

通过以上分析确定了发动机无量纲性能参数的统计分布规律, 根据公式 (8), 利用得到的统计结果可以在已知性能参数的分布范围的情况下, 确定性能参数的可靠性。

由于各组件的均方差不是精确值, 同时由于有考虑不到的因素, 因而取一安全系数, 根据经验安全系数可取 1.2, 即 $\sigma'_x = 1.2\sigma_x$ 。根据工程经验, 发动机真空推力、真空比冲和发动机混合比三个性能参数的偏差范围一般为 $\pm 3\%$ 。考虑这三个参数的偏差范围为 $\pm 3\%$, 根据公式 (8), 可直接求出其可靠性:

$$R_{F_{sv}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\Delta F_{sv}}{\sigma_{F_{sv}}}}^{\frac{\Delta F_{sv}}{\sigma_{F_{sv}}}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 0.9906 ;$$

$$R_{I_{sv}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\Delta I_{sv}}{\sigma_{I_{sv}}}}^{\frac{\Delta I_{sv}}{\sigma_{I_{sv}}}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 0.9924 ;$$

$$R_{rc} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\Delta rc}{\sigma_{rc}}}^{\frac{\Delta rc}{\sigma_{rc}}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 0.9952$$

5 结论

本文提出了一种预测液体火箭发动机性能可

靠性的随机仿真方法, 采用该方法计算分析了某型液氧/煤油补燃循环上面级发动机主要性能参数的可靠性。采用随机仿真方法估计发动机性能可靠性只需统计干扰参数的分布规律, 可以减少发动机整机试车次数, 这对于已定型发动机性能可靠性的评估或者在研发发动机性能可靠性的预估都具有重要的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 董锡鉴. 液体火箭发动机设计 (下) [M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [2] 刘红军. 液氧/煤油发动机稳态参数分布特性的仿真[J]. 推进技术, 2004 (10).
- [3] 徐士良. FORTRAN 常用算法程序集[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [4] 盛骤. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [5] 王宁, 王永忠. 传感器在火箭发动机试验中的应用[J]. 火箭推进, 2002, 28 (5).

(编辑: 马 杰)