

液氧/煤油发动机稳态参数分布特性的仿真^{*}

刘红军

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 以某型液氧/煤油高压补燃火箭发动机为模型, 利用随机仿真(蒙特卡罗仿真)的方法, 研究在主要结构参数和发动机入口参数随机变化时发动机稳态参数的分布规律。通过对该发动机非线性稳态特性方程组进行大量的仿真计算并对结果进行统计推断, 获得了发动机稳态参数的概率密度分布特性。考虑的随机变化因素包括: 系统结构参数与组件性能参数变化、推进剂供应系统入口压力变化和环境温度变化等。

关键词: 液体推进剂火箭发动机; 仿真; 蒙特卡罗法; 稳态参数; 分布

中图分类号: V434.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2004) 05-0385-03

Monte Carlo simulation on static characteristics of a liquid oxygen/kerosene staged combustion cycle engine

LIU Hong-jun

(Shaanxi Engine Design Inst., Xi'an 710100, China)

Abstract: The statistic characteristics of the nonlinear static parameters of a liquid oxygen/kerosene staged combustion cycle engine are simulated by Monte Carlo method. Various stochastic interference effects, including the input propellant temperature and pressure stochastic deviations, parts performance and structure parameters stochastic deviations, are considered, and the probability density distribution curves of the static parameters are obtained and the distribution types are checked.

Key words: Liquid propellant rocket engine; Emulation; Monte Carlo method; Steady-state parameter; Distribution

1 引言

由于加工与装配误差、测量误差和环境变化的不可避免和随机性, 火箭发动机的稳态参数(性能参数)服从一定的统计规律, 获得火箭发动机性能参数的统计规律对火箭总体的设计优化(如弹道优化、推进剂有效利用等)来说是非常重要的。利用随机仿真方法研究发动机系统参数的分布规律有利于减少发动机热试车的数量和确定影响性能参数精度的主要因素。文献[1]针对常规推进剂燃气发生器循环火箭发动机, 利用随机仿真研究了发动机内部干扰因素对发动机性能参数的分布规律。本文主要以某型液氧/煤油高压补燃循环发动机为模型, 采用随机仿真的方法研究该型发动机稳态参数的分布规律。考虑的随机因素包括: 结构参数偏差与组件性能参数偏差、推进剂

性能参数变化、推进剂供应系统入口压力偏差等。

2 稳态参数分布特性的随机仿真分析方法

2.1 数学分析模型

对于所研究的液氧/煤油高压补燃循环发动机系统, 其稳态特性数学模型为由146个方程组成的非线性方程组^[2], 用矢量的形式可表示为

$$f(\mathbf{D}, \mathbf{X}) = 0 \quad (1)$$

式中 $\mathbf{D} = (D_1, D_2, \dots, D_m)^T$ 为随机扰动因素组成的矢量; $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为稳态参数组成的随机矢量。对确定的扰动因素矢量 $\mathbf{D}$, 用数值仿真方法可求出稳态参数^[3]。将式(1)的求解过程定义为算子:

$$\Psi: \mathbf{X} = \Psi(\mathbf{D}), \mathbf{D} \in N(\mathbf{D}), \mathbf{X} \in N(\mathbf{X})$$

则算子 Ψ 确定了从 $\mathbf{D}$ 的变量空间 $N(\mathbf{D}) \subset R^m$ 到 $\mathbf{X}$

^{*} 收稿日期: 2003-06-20; 修订日期: 2004-03-09。

作者简介: 刘红军 (1966—), 男, 博士, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机设计。E-mail: liuhj2003@263.net

的变量空间 $N(\mathbf{X} \in R^n)$ 的一个光滑映射。

在各随机扰动因素的分布规律已知的条件下,利用随机数产生器进行随机抽样,可获得一组相互独立的扰动因素 $\mathbf{D}$ 的随机值,然后利用算子 Ψ 计算得到一组稳态参数 $\mathbf{X}$ 值,经过数值仿真计算可以得到稳态参数随机值的样本空间。利用统计学方法对稳态参数随机值的样本空间进行统计推断可以得到各稳态参数的密度分布函数(曲线)与数字特征^[4]。

2.2 随机抽样方法

对于所考虑的随机扰动因素, $\mathbf{D} = (D_1, D_2, \dots, D_m)^T$ 的各随机扰动因素分量认为是相互独立的随机变量,且各随机扰动因素一般服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 。各随机扰动因素的均值和标准差可根据对产品加工误差的测量数据和组件试验数据的统计结果得到。在各扰动因素的均值和标准差已知的条件下,各扰动因素随机变量的抽样可用如下的方法进行^[5]:
(1) 利用同余法产生 $[0, 1]$ 区间上的伪随机数 y_1, y_2 ;
(2) 按公式 $y = \sqrt{-2\ln y_1} \cos 2\pi y_2$ 计算获得标准正态分布下的随机数 y ;
(3) 按公式 $d = y \cdot \sigma + \mu$ 计算得到一般正态分布的随机数 d 。

2.3 稳态参数密度分布函数的确定方法

记仿真获得的样本空间的容量(子样数)为 N ,为计算稳态参数 x 的分布函数,将区间 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 分为 Z 个长度为 $\Delta x = (x_{\max} - x_{\min})/Z$ 的统计区间 $[x_i, x_{i+1}]$, $(x_i = x_{\min} + (i-1)\Delta x, i = 1, 2, \dots, Z)$,根据落入第 i 个统计区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 的相对子样数 Z_i/N 即可以近似得到分布密度关系:

$$f_i \left| \frac{x_i + x_{i+1}}{2} \right| = \frac{Z_i}{N \cdot \Delta x}$$

在本文的计算中,仿真次数即样本空间的子样数 N 取 10000,统计区间分区个数 Z 取 21。

由分布密度曲线的形状根据皮尔逊准则进行 χ^2 -检验可以确定分布密度函数。

3 随机仿真计算的结果与分析

图 1 和图 2 给出了发动机真空推力和混合比的随机仿真结果。图中同时标出了均值和额定参数的计算值,可以看出随机仿真结果的均值与额定点计算值非常一致。由图可以看出所计算的结果具有以均值(额定点)为中心的随机性。包含其他稳态参数的均值、标准差以及与额定点计算数据的对比见表 1。

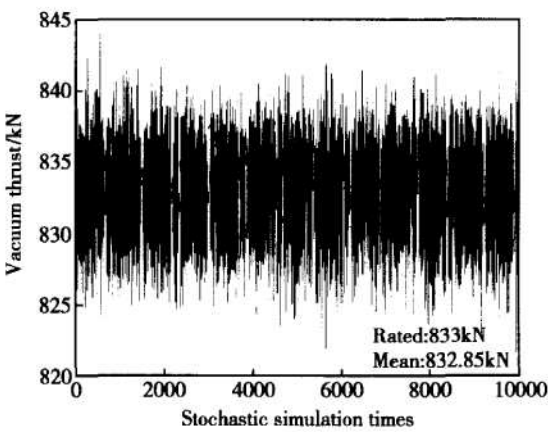


Fig. 1 Vacuum thrust stochastic simulation results

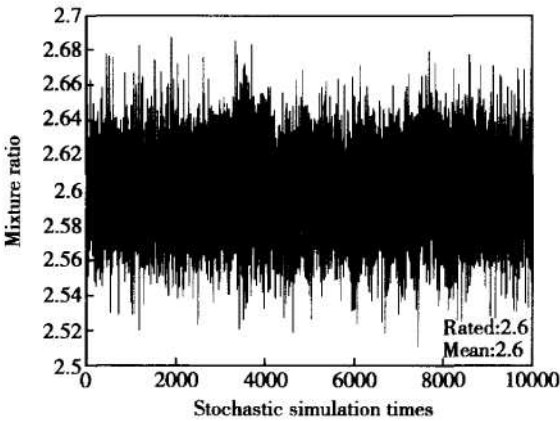


Fig. 2 Mixture ratio stochastic simulation results

Table 1 Means and standard deviations of the stochastic simulation results

	Rated	Mean	Standard deviation
Vacuum thrust/kN	833	832. 85	2. 9969
Mixture ratio	2. 6	2. 60	0. 0232
Vacuum impulse/ (m/s)	3430	3430. 06	1. 8155
Temperature in the preburner/K	734	734. 20	4. 4289
Spin speed of turbopump/ (r/min)	19230	19230. 51	54. 2803
Combustion chamber pressure/MPa	16. 28	16. 27	0. 5193

图 3 给出了该发动机真空推力、混合比、真空比冲、预燃室富氧燃气温度等部分稳态参数的密度分布曲线。从图中各曲线可以看出真空推力、混合比等稳态参数的密度分布与正态分布较为接近。假设各稳态参数服从均值和标准差为表 1 所示的正态分布,计算得到 χ^2 -检验的结果见表 2 所示。由表 2 可知,在显著

性水平为 $\alpha=0.05$ 时,各稳态参数随机仿真结果的 χ^2 -检验值 χ^2_q 满足: $\chi^2_q < \chi^2_{0.05}$, 因此,各稳态参数服从均值和标准差为表 1 所示的正态分布的假设是可以接受的。这与其它发动机型号试车数据的统计结果一致。

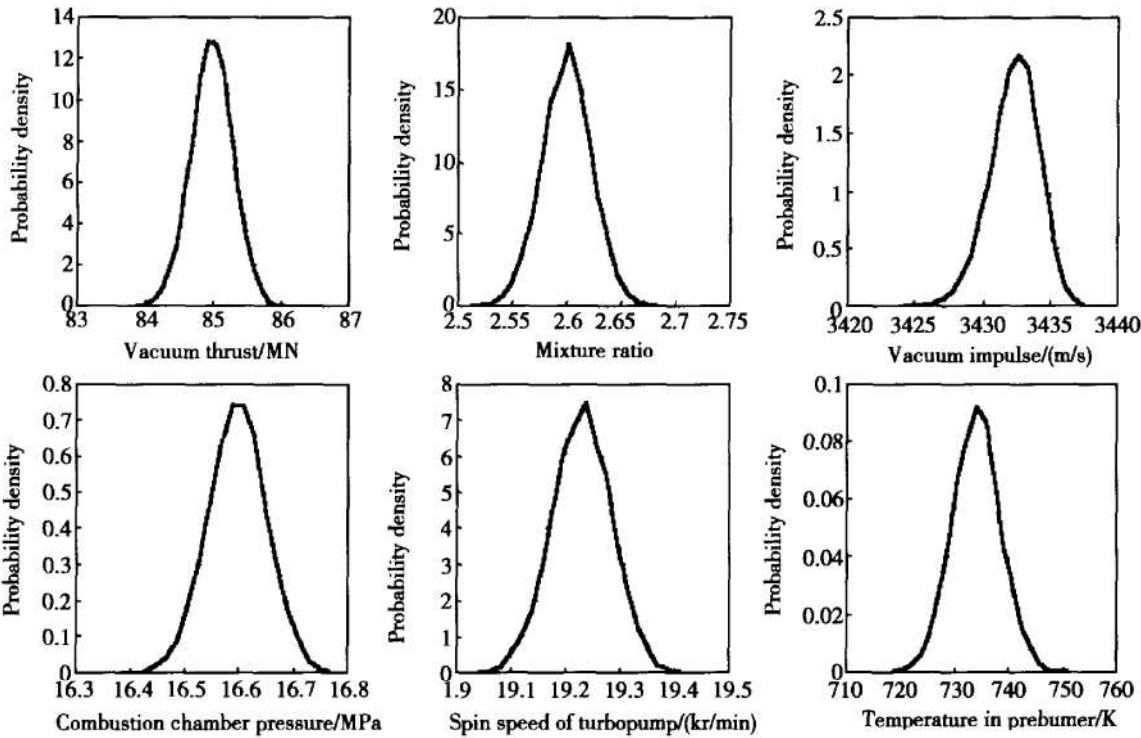


Fig. 3 Probability density distribution of static performances

Table 2 Means and standard deviations of the stochastic simulation results			
	Assumed distribution	χ^2_q	$\chi^2_{0.05}(18)$
Vacuum thrust/kN	$N(832.85, 2.9969^2)$	17.5770	28.869
Mixture ratio	$N(2.60, 0.0232^2)$	24.5705	
Vacuum impulse/(m/s)	$N(3430.06, 1.8155^2)$	24.9197	
Temperature in preburner/K	$N(734.20, 4.4289^2)$	27.4006	
Spin speed of turbopump/(r/min)	$N(19230.51, 54.2803^2)$	22.1445	
Combustion chamber pressure/MPa	$N(16.27, 0.5193^2)$	17.5361	

4 结 论

采用蒙特-卡罗方法对某型液氧/煤油高压补燃循环发动机稳态参数的分布特性进行了随机仿真计算,获得了各稳态参数的分布规律和统计数字特征。通过统计推断表明,在服从正态分布的随机扰动因素的干扰下,补燃循环火箭发动机各稳态参数较好地服从正态分布。本文所得的结果对于评估该型发动机的性能参数精度具有一定的参考意义。

参考文献:

[1] 沈赤兵,吴建军.内部干扰因素对液体火箭发动机性能影响的仿真[J].中国空间科学技术,1999,(1).

[2] 刘红军.液氧/煤油高压补燃火箭发动机非线性稳态模型——考虑推进剂温升与密度变化[J].推进技术,1999,20,(2).(LIU Hong-jun. Advanced model of static characteristic for liquid oxygen/ kerosene propellant staged combustion rocket engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(2).)

[3] 刘红军,张恩昭,董锡鉴,等.基于混合遗传算法的液氧/煤油补燃循环火箭发动机非线性稳态特性仿真[J].推进技术,1998,19(2).(LIU Hong-jun, ZHANG En-zhao, DONG Xi-jian, et al. Simulation of nonlinear static characteristics of liquid oxygen/ kerosene propellant staged combustion rocket engine VIA combined genetic algorithms[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1998, 19(2).)

[4] 胡昌寿,何国伟.可靠性工程[M].北京:宇航出版社,1988.

[5] 郑敦兵,张永敬,肖刚.液体火箭发动机性能参数的数字仿真[J].推进技术,1996,17(3).(ZHENG Dun-bing, ZHANG Yong-jing, XIAO Gang. Numerical simulation on performances of liquid rocket engines[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1996, 17(3).)

(编辑:梅 瑛)