

液氧/甲烷火箭发动机性能敏感性分析

巩岩博, 郑大勇, 王维彬

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘要:为了弥补极差分析法在发动机性能敏感性分析方面的不足,提高低温火箭发动机性能敏感性分析的准确度,引入了方差分析法,以某型液氧/甲烷发动机为例开展了性能敏感性分析,并通过 F 检验得到了每个干扰因素对发动机性能影响的显著性指标,与传统的极差分析法相比,提高了液体火箭发动机性能敏感性分析的准确度。结果表明:发动机推力和混合比对同一因素的敏感性存在差别,其中对发动机推力和混合比的影响最大的是涡轮泵效率,均呈现高度显著;紧随其后,对推力影响显著性最高的是副系统流阻特性,而对混合比影响最高的则是主系统流阻特性。研究表明,方差分析法可以有效提高敏感性分析的准确度,既为该型发动机的研制提供了理论支持,也为其他发动机的敏感性分析提供了新的参考。

关键词:敏感性分析;火箭发动机;方差分析法;正交试验

中图分类号:V434 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2020)01-0059-10

Performance sensitivity analysis of liquid oxygen/methane rocket engine

GONG Yanbo, ZHENG Dayong, WANG Weibin

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to make up for the deficiency of range analysis method in engine performance sensitivity analysis and improve the accuracy of performance sensitivity analysis of cryogenic rocket engine, variance analysis method was introduced in this paper. Taking a liquid oxygen/methane engine for example, performance sensitivity analysis was carried out, and the significance index of each interference factor on engine performance was obtained through F test. Compared with the traditional range analysis method, the variance analysis method improves the accuracy of performance sensitivity analysis of liquid rocket engine. The results show that the sensitivity of engine thrust and mixing ratio to the same factor is different, among which the turbopump efficiency has the greatest influence on both engine thrust and mixing ratio. The second most significant impact on thrust is the flow resistance characteristics of the subsystem, while the second most significant impact on mixing ratio is the flow resistance characteristics of the main system. The results of this study show that ANOVA can effectively improve the accuracy of sensitivity analysis, which not only provides theoretical support for the development of this type of engine, but also provides a new reference for sensitivity analysis of other engines.

Keywords: sensitivity analysis; rocket engine; variance analysis; orthogonal test

收稿日期:2019-03-28;修回日期:2019-05-09

作者简介:巩岩博(1994—),男,硕士,研究领域为液体火箭发动机系统仿真

0 引言

大推力液体火箭发动机结构复杂,涉及到流体、燃烧、传热、力学、机械、控制等专业,是一个复杂的非线性系统,其性能受到自身部件特性和外部边界条件的影响。在研制过程中,掌握对发动机性能影响较大的参数并在组件研制阶段对其加以关注和控制,对于保证发动机稳定可靠地工作是非常必要的^[1]。

工程中常使用敏感性来评价影响因素与关键参数的相关性和对关键参数的影响程度^[2]。将发动机性能参数随内外影响因素的变化而产生的相对变化量叫做发动机性能对影响因素的敏感性。相对变化量越大,敏感性就越高,表明该影响因素对发动机性能参数的影响越大^[3]。可见,通过敏感性分析可以定量地确定各影响因素对发动机性能参数影响程度的量级和大小,筛选出对性能影响较大的关键因素,忽略对性能影响微弱的次要因素,让设计人员在发动机研制过程中能够做到主次分明,有的放矢,一方面可以提高发动机的设计水平,另一方面还可以减轻设计人员的工作负担。

设计人员对发动机组合件的参数敏感性^[4-6]和整机的性能敏感性^[1,3,7-8]均进行过相关研究,但到目前为止,在发动机整机性能的多因素敏感性分析时使用的均是极差分析法,不能很好地反映影响因素对性能参数的影响显著性^[9]。为了提高发动机性能敏感性分析的准确度,本文基于发动机非线性静态特性模型,使用方差分析法对某型液氧/甲烷发动机进行性能敏感性分析,得到各内外影响因素对发动机性能影响的显著性大小,从中筛选出对发动机性能影响较大的关键因素,并对关键因素进行

分析,为该型发动机的设计和试验提供理论依据。

1 原理与方法

敏感性分析可以确定发动机内部组件特性和外部边界条件对发动机性能影响的量级与大小。本文通过发动机静态特性的非线性模型建立目标参数与各影响因素的关系。由于影响因素众多,因此可以对单个因素作用时的影响进行分析,也可以对多个因素同时作用时的影响进行分析。前者叫做单因素敏感性分析,后者叫做多因素敏感性分析^[10]。

1.1 发动机静态特性非线性模型

根据发动机部件的特点建立各部件的静态特性方程,然后根据发动机的系统组成对发动机各流路建立压力平衡、流量平衡和功率平衡的关系式,最终建立如下的发动机系统非线性模型

$$F_i(D, X) = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: $D(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 为关注的目标参数; $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为发动机推力和混合比,为包含随机信息的发动机各部件参数。

求解非线性方程组可以使用数值方法,其中拟牛顿法因其具有计算量小和收敛速度快的特点而被广泛使用。该方法设 $(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ 是方程组的一组近似值,围绕这组近似解可以再构造 n 组近似解;第 j 组近似解 $(x_1^{(kj)}, x_2^{(kj)}, \dots, x_n^{(kj)})$ ($j = 1, 2, \dots, n$) 与 $(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ 除第 j 个分量相差一个常数 $h > 0$ 外,其余均相同,即

$$\begin{cases} x_i^{(kj)} = x_i^{(k)} + h, i = j \\ x_i^{(kj)} = x_i^{(k)}, i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\partial f_i(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})}{\partial x_j} \approx \frac{f_i(x_1^{(kj)}, x_2^{(kj)}, \dots, x_n^{(kj)}) - f_i(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})}{h}, (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$\begin{cases} f_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) + \sum_{j=1}^n \frac{f_1(x_1^{(kj)}, x_2^{(kj)}, \dots, x_n^{(kj)}) - f_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})}{h} \Delta x_j^{(k)} = 0 \\ f_2(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) + \sum_{j=1}^n \frac{f_2(x_1^{(kj)}, x_2^{(kj)}, \dots, x_n^{(kj)}) - f_2(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})}{h} \Delta x_j^{(k)} = 0 \\ \vdots \\ f_n(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) + \sum_{j=1}^n \frac{f_n(x_1^{(kj)}, x_2^{(kj)}, \dots, x_n^{(kj)}) - f_n(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})}{h} \Delta x_j^{(k)} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\Delta x_i^{(k)} = x_i - x_i^{(k)}, (i = 1, 2, \dots, n)$$

当系数行列式不等于零时,上述方程组有唯一解。于是由上式得到的解为

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

当迭代得到差值小于设定值时,计算收敛。

1.2 单因素敏感性分析

单因素敏感性分析即研究发动机性能与某一个影响因素的相关性。

若发动机某项性能参数 F_i 会受到 m 个因素的影响,分别记为 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_m$,则可以根据发动机静态特性方程建立数学模型

$$F_i = f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_m) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

把发动机设计状态作为基准状态,此时影响因素空间为 $\{a_1^*, a_2^*, \dots, a_m^*\}$,对应发动机性能参数空间为 $\{F_1^*, F_2^*, \dots, F_n^*\}$ 。当某个影响因素 $a_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 在一定范围内发生变化,即当影响因素空间变为 $\{a_1^*, a_2^*, \dots, a_j', a_m^*\}$ 时,发动机性能参数空间随之变化为 $\{F_1', F_2', \dots, F_n'\}$ 。记影响因素的偏差量为 $\Delta a_j = a_j' - a_j^*$,发动机性能参数 F_i 的偏差量为 $\Delta F_i = F_i' - F_i^*$,则定义发动机性能参数相对偏差与对应影响因素相对偏差之间的比例关系为发动机性能参数对该影响因素的敏感性,记作

$$S(a_j) = \frac{|\Delta F_i|/F_i^*}{|\Delta a_j|/a_j^*} \quad (7)$$

可以看出,敏感性越高,发动机性能参数随影响因素变化的变化幅度就越大,即影响因素对发动机性能的影响越明显。单因素敏感性分析方法简单,能够快速直观地反映发动机性能随某一影响因素变化的变化梯度。但是单因素分析方法每次只能对影响因素空间的某一点进行分析,通过对某一方向的局部梯度判断影响因素的作用效果,存在一定的片面性^[4]。

1.3 多因素敏感性分析

单因素敏感性分析操作简单,结果直观,但只能就单一因素变化时发动机性能受到的影响进行研究,无法准确分析多因素共同作用对发动机性能产生的影响。液体火箭发动机结构复杂,部件的非线性和参数的耦合性都很强,在工作时往往会有很多参数偏离设计值,使发动机性能受到多个参数变化的共同作用。在这种情况下,单因素敏感性分析

就不能满足需求了,需要进行多因素敏感性分析。

同样将设计状态作为分析的基准状态,改变影响因素空间中 k 个元素的值,将其变为 $\{a_1', \dots, a_k', a_{k+1}^*, \dots, a_m^*\}$,通过计算可以得到对应的发动机性能参数空间 $\{F_1', F_2', \dots, F_n'\}$ 。如果使用排列组合找出影响因素所有可能的组合方式,就可以计算出对应各种影响因素空间的发动机性能参数映射,得到在所有可能情况下影响因素对发动机性能的影响。但是,影响发动机性能的参数较多,这样做会带来巨大的工作量。如分析 9 个影响因素,每个影响因素水平数为 3,则包含每个因素不同水平的组合共有 $3^9 = 19\ 683$ 种,要依次进行分析是难以实现的。因此,多因素敏感性分析常采用正交试验法设计不同的影响因素组合^[11]。

正交试验法即从所有的排列组合中选取部分有特点、有代表性的子样,使各影响因素、各因素水平的分布具有均匀散布和整齐可比的特点,即各个因素的每个不同水平在试验中出现的次数均相同;任意两个因素所有不同水平的搭配均在试验中出现,且出现的次数都相同。这样就可以通过部分试验得到与全部试验同等可信的结果,极大减少试验的次数。一般使用正交表来安排正交试验^[12]。

在以前的研究中,常采用极差分析法对试验结果进行统计和研究。

假设多因素敏感性分析的试验结果为 $y_i (i = 1, 2, \dots, n)$,将第 j 个因素同水平的结果加起来,记作 $X_k (k = 1, 2, \dots, l)$,表示第 j 个因素中水平为 k 的结果之和。若每种因素水平为 k 的试验有 z 次,则将该因素水平为 k 的平均结果记作 $x_k = X_k/z$,计算该因素所有水平的平均结果的极差 $R_j = \max(x_k) - \min(x_k)$,就可以反映该因素对目标参数的影响程度。极差越大,说明该因素水平变化对目标参数的影响越大。

1.4 方差分析法

极差法原理简单,计算速度快,结果直观易懂,但是只能分析出不同因素对目标参数影响程度的相对大小,无法判断每个因素对目标参数影响程度的显著性,而且也不能区分影响因素水平变化引起的目标参数变化和试验误差引起的目标参数变化。要排除试验误差带来的影响,并分析出不同因素对目标参数影响程度的显著性,就需要使用方差分

析法^[13-17]。

若使用正交表 $L_n(q^m)$ 进行正交试验, 将第 k 号试验结果记为 $y_k, k=1, 2, \dots, n$ 。并记

$$T = \sum_{k=1}^n y_k, \bar{y} = \frac{T}{n}, r = \frac{n}{q} \quad (8)$$

$$S_T = \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2 \quad (9)$$

$$S_j = r \sum_{i=1}^q \left(\frac{T_{ij}}{r} - \bar{y} \right)^2 = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^q T_{ij}^2 - \frac{T^2}{n}, j = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

式中: \bar{y} 为所有试验结果的算术平均数; r 为某个影响因素同一水平的重复次数; S_T 称为总体的离差平方和, 表征所有试验结果的离散程度; T_{ij} 表示第 j 个因素水平为 i 的所有试验结果之和; S_j 称为第 j 列的离差平方和, 表征第 j 个因素不同水平试验结果的离散程度。在正交试验中, 有

$$S_T = \sum_{j=1}^m S_j \quad (11)$$

将二次型 S_T 的秩称为 S_T 的自由度, 记作 f_T ; 同理定义 S_j 的自由度, 记为 f_j 。则有

$$f_T = n - 1 \quad (12)$$

$$f_j = q - 1, j = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

$$f_T = \sum_{j=1}^m f_j \quad (14)$$

若正交表中有未安排影响因素的空列, 则该列的离差平方和作为误差平方和, 记作 S_e , 它的自由度记作 f_e 。

如果试验的结果相互独立, 且服从等方差为 σ^2 的正态分布, 那么 S_1, S_2, S_m 互相独立。如果在某一系列 j 中, $T_{1j}, T_{2j}, \dots, T_{qj}$ 相互独立, 且同样服从方差为 σ^2 的正态分布, 则认为该列因素对试验结果的影响不显著, 则有

$$S_j / \sigma^2 \sim \chi^2(f_j), j = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

选取统计量

$$F_j = \frac{S_j / f_j}{S_e / f_e} \quad (16)$$

如果影响因素的作用不显著, 则有

$$F_j \sim F(f_j, f_e), j = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

给定显著性水平 α , 可以通过查 F 分布表可以得到 $F_j(f_j, f_e)$ 的值, 然后由公式 $F_{1-\alpha}(f_j, f_e) = 1 / F_\alpha(f_j, f_e)$ 求出 $F_{1-\alpha}(f_j, f_e)$ 的值, 如果 $F_j > F_{1-\alpha}(f_j, f_e)$, 则认为该因素的影响显著, 反之则认为影响不显著。当判断因素的影响显著时, 显著性水平 α 越

小, 则认为影响的显著性越高。

在进行方差分析时, 可以首先求出每一列的平均离差平方和, 即

$$\bar{S}_j = S_j / f_j \quad (18)$$

对于第 j 列, 如果 $\bar{S}_j < \bar{S}_e$, 就将 S_j 看做误差平方和, 并入 S_e 中, 同时也将该列的 f_j 并入到 f_e 中。记并入后的误差平方和为 S_e^* , 对应的自由度为 f_e^* 。此时选取的统计量变为

$$F_j^* \triangleq \frac{S_j / f_j}{S_e^* / f_e^*} \quad (19)$$

当 $F_j^* > F_{1-\alpha}(f_j, f_e^*)$ 时, 则认为在置信度为 $1 - \alpha$ 的情况下, 因素 j 对试验结果的影响显著, 反之则认为影响不显著。

可以看出, 方差分析能够有效地把影响因素的离散程度和与误差的离散程度区分开, 并通过 F 检验法分析出每个因素对试验结果影响的显著性大小, 进而找出对试验结果造成影响的主要因素。与极差法相比, 方差分析法更准确、更可信, 分析得出的信息量也更大。

2 模型分析

2.1 发动机系统

某型在研 65 t 级液氧/甲烷发动机采用燃气发生器循环, 同轴涡轮泵布局, 发动机系统如图 1 所示。在地面级发动机中, 推力 F_e 和混合比 r_e 是设计人员最关心的性能参数, 因此选取推力和混合比作为研究的目标参数。

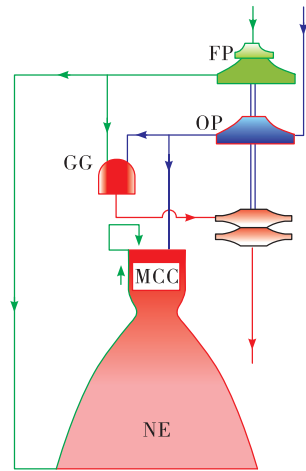


图 1 液氧/甲烷发动机系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of liquid oxygen/methane engine system

2.2 影响因素分析与选取

能够对发动机性能产生影响的干扰因素分为内部和外部干扰因素。外部干扰因素是由发动机工质和外部环境带来的干扰,可以精确测量并采取措施加以控制,一般认为是非随机变量;内部干扰因素则是由发动机本身带来的干扰,即在制造过程中,因加工误差,零件安装差异以及部件液流试验测量误差等造成发动机部件特性具有一定的随机散布性,一般认为是随机变量^[2]。

在这些随机变量中,有两类对发动机工况的影响最直接,即流路的流阻特性和部件的性能参数。这两类参数也恰好最容易受到加工误差和工艺稳定性的影响,是需要重点关注的。此外,边界条件也会影响发动机的工作状态,是需要关注的。因此,我们从外部边界条件、流路的流阻特性和涡轮泵的性能特性中选出19个比较有代表性的参数^[18-19],分别为甲烷泵入口压力(p_{ipf})、氧泵入口压力(p_{ipo})、甲烷主管路流阻系数($C_{q_{pmf}}$)、氧主管路流阻系数($C_{q_{pmo}}$)、甲烷副管路流阻系数($C_{q_{psf}}$)、氧副管路流阻系数($C_{q_{pso}}$)、推力室甲烷喷嘴压降($C_{q_{cf}}$)、推力室氧喷嘴压降($C_{q_{co}}$)、发生器甲烷喷嘴压降($C_{q_{gf}}$)、发生器氧喷嘴压降($C_{q_{go}}$)、涡轮喷嘴流量系数(μ_t)、涡轮效率系数(β_t)、甲烷泵效率系数(η_{pf})、氧泵效率系数(η_{po})、甲烷主阀流阻系数($C_{q_{mf}}$)、氧主阀流阻系数($C_{q_{mv}}$)、甲烷副阀流阻系数($C_{q_{gfv}}$)、氧副阀流阻系数($C_{q_{gov}}$)、燃气管路流阻系数($C_{q_{pg}}$)。

选取影响因素后,需要确定影响因素的水平数。因素的水平数是指该因素取值的个数。一般情况下,选择两水平数进行分析,得到对目标参数的影响一般是线性的,选择三水平数或者更多的水平数,得到的结果一般呈二次曲线,甚至是更高次曲线,可以更好地趋近真实的情况。因此,选择三水平数或更多的水平数,能够提高分析的准确性。本文从仿真准确性和计算规模两个方面综合考虑,在单因素敏感性分析中,每个因素均选择五水平数,即基准值和分别偏离基准值-20%,-10%,10%,20%;在多因素敏感性分析中,每个因素均选择三水平数,即基准值和分别偏离基准值-10%,10%。

3 敏感性分析

3.1 单因素敏感性分析

使用2.1节中介绍的原理,对选出的19个参数

进行单因素敏感性分析,得到发动机推力敏感度如表1所示;发动机混合比敏感度如表2所示;推力和混合比对不同影响因素的平均敏感度直方图如图2所示,其中,横坐标1~19代表的影响因素分别为甲烷泵入口压力(p_{ipf})、氧泵入口压力(p_{ipo})、甲烷主管路流阻系数($C_{q_{pmf}}$)、氧主管路流阻系数($C_{q_{pmo}}$)、甲烷副管路流阻系数($C_{q_{psf}}$)、氧副管路流阻系数($C_{q_{pso}}$)、推力室甲烷喷嘴压降($C_{q_{cf}}$)、推力室氧喷嘴压降($C_{q_{co}}$)、发生器甲烷喷嘴压降($C_{q_{gf}}$)、发生器氧喷嘴压降($C_{q_{go}}$)、涡轮喷嘴流量系数(μ_t)、涡轮效率系数(β_t)、甲烷泵效率系数(η_{pf})、氧泵效率系数(η_{po})、甲烷主阀流阻系数($C_{q_{mf}}$)、氧主阀流阻系数($C_{q_{mv}}$)、甲烷副阀流阻系数($C_{q_{gfv}}$)、氧副阀流阻系数($C_{q_{gov}}$)、燃气管路流阻系数($C_{q_{pg}}$)。

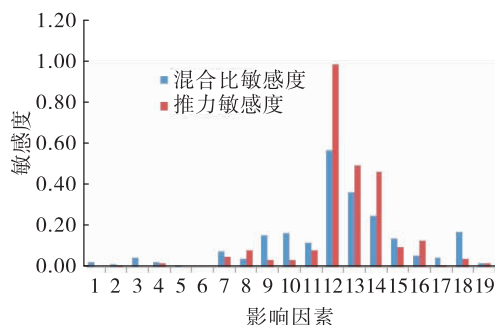


图2 平均敏感度直方图

Fig.2 Average sensitivity histogram

由表1和表2可以看出,在选取的水平下,发动机性能参数与各影响因素的变化呈正相关,即二者具有相同的变化趋势。其中,有部分影响因素的变化与性能参数的变化呈线性关系。对于发动机推力,影响最大的10个因素对其影响程度依次为: $\beta_t > \eta_{pf} > \eta_{po} > C_{q_{gov}} > C_{q_{gfv}} > C_{q_{go}} > \mu_t > C_{q_{gf}} > C_{q_{mov}} > C_{q_{co}}$,其中涡轮效率、甲烷泵效率和氧泵效率对发动机推力的影响最大,未参与排序的9个因素对其影响非常小;对于发动机混合比,影响最大的10个因素对其影响程度依次为: $\beta_t > \eta_{pf} > \eta_{po} > C_{q_{mov}} > C_{q_{co}} > C_{q_{cf}} > C_{q_{gfv}} > \mu_t > C_{q_{gf}} > C_{q_{gov}}$,其中对发动机混合比影响最大的同样是涡轮效率、甲烷泵效率和氧泵效率,未参与排序的9个因素对混合比几乎没有影响。

表 1 发动机推力敏感度
Tab.1 Thrust sensitivity of engine

影响因素	不同水平下的敏感度				平均敏感度	敏感度排序
	-20%	-10%	10%	20%		
氢泵入口压力	0.001 22	0.001 22	0.001 22	0.001 83	0.001 37	19
氧泵入口压力	0.012 22	0.012 22	0.012 22	0.012 22	0.012 22	14
氢主管路流阻系数	0.003 67	0.003 67	0.002 44	0.002 44	0.003 05	18
氧主管路流阻系数	0.024 43	0.024 43	0.024 43	0.024 43	0.024 43	12
氢副管路流阻系数	0.004 89	0.004 89	0.004 89	0.004 89	0.004 89	17
氧副管路流阻系数	0.006 11	0.006 11	0.006 11	0.006 11	0.006 11	16
燃发器氢喷嘴流阻系数	0.054 98	0.053 76	0.052 54	0.051 92	0.053 30	8
燃发器氧喷嘴流阻系数	0.092 85	0.090 41	0.085 52	0.083 08	0.087 97	6
推力室氢喷嘴流阻系数	0.046 43	0.042 76	0.035 43	0.031 77	0.039 10	11
推力室氧喷嘴流阻系数	0.034 21	0.036 65	0.042 76	0.044 59	0.039 55	10
涡轮喷嘴流量系数	0.146 61	0.108 74	0.058 64	0.041 54	0.088 88	7
涡轮效率	1.072 69	1.020 16	0.935 86	0.928 53	0.989 31	1
氢泵效率	0.560 78	0.525 35	0.466 71	0.447 16	0.500 00	2
氧泵效率	0.561 39	0.503 36	0.416 62	0.387 29	0.467 17	3
副系统氢阀流阻系数	0.126 45	0.109 96	0.085 52	0.076 97	0.099 73	5
副系统氧阀流阻系数	0.164 32	0.145 39	0.117 29	0.106 29	0.133 32	4
推力室氢阀流阻系数	0.014 05	0.012 22	0.009 77	0.008 55	0.011 15	15
推力室氧阀流阻系数	0.065 36	0.051 31	0.032 99	0.027 49	0.044 29	9
燃气管路流阻系数	0.022 60	0.023 21	0.023 21	0.022 60	0.022 91	13

表 2 发动机混合比敏感度
Tab.2 Mixing ratio sensitivity of engines

影响因素	不同水平下的敏感度				平均敏感度	敏感度排序
	-20%	-10%	10%	20%		
氢泵入口压力	0.026 78	0.026 78	0.026 78	0.026 78	0.026 78	14
氧泵入口压力	0.013 39	0.013 39	0.013 39	0.013 39	0.013 39	17
氢主管路流阻系数	0.043 52	0.043 52	0.043 52	0.043 52	0.043 52	12
氧主管路流阻系数	0.026 78	0.026 78	0.026 78	0.026 78	0.026 78	15
氢副管路流阻系数	0.006 70	0.006 70	0.006 70	0.006 70	0.006 70	18
氧副管路流阻系数	0.003 35	0.003 35	0.003 35	0.003 35	0.003 35	19
燃发器氢喷嘴流阻系数	0.077 00	0.077 00	0.073 65	0.071 98	0.074 91	9
燃发器氧喷嘴流阻系数	0.040 17	0.040 17	0.036 83	0.036 83	0.038 50	13
推力室氢喷嘴流阻系数	0.159 02	0.157 35	0.150 65	0.150 65	0.154 42	6
推力室氧喷嘴流阻系数	0.170 74	0.167 39	0.160 70	0.157 35	0.164 04	5
涡轮喷嘴流量系数	0.169 07	0.133 91	0.090 39	0.077 00	0.117 59	8
涡轮效率	0.826 92	0.652 83	0.445 26	0.346 50	0.567 88	1
氢泵效率	0.465 35	0.398 39	0.314 70	0.274 52	0.363 24	2
氧泵效率	0.343 15	0.277 87	0.207 57	0.175 76	0.251 09	3
副系统氢阀流阻系数	0.174 09	0.150 65	0.120 52	0.107 13	0.138 10	7
副系统氧阀流阻系数	0.073 65	0.063 61	0.050 22	0.045 20	0.058 17	10
推力室氢阀流阻系数	0.056 91	0.050 22	0.036 83	0.031 80	0.043 94	11
推力室氧阀流阻系数	0.219 28	0.190 83	0.143 96	0.128 89	0.170 74	4
燃气管路流阻系数	0.018 41	0.020 09	0.020 09	0.018 41	0.019 25	16

虽然对发动机推力和混合比影响最大的 3 个因素是相同的,但是有一些因素对推力和混合比的影响差别较大。例如副系统氧阀流阻系数 $C_{q_{gov}}$,对推力的影响程度排在第 4 位,敏感度为 0.132 3,对混合比的影响则排在第 10 位,敏感度仅为 0.058 1,二者相差 2.3 倍;又如推力室氧喷嘴流阻系数 $C_{q_{co}}$,对推力的影响程度排在第 10 位,敏感度仅为 0.039 8,但对混合比的影响程度却排在第 5 位,敏感度为 0.164 0,二者相差 4.1 倍。

3.2 多因素敏感性分析

根据单因素敏感性分析,发现部分因素对发动机推力和混合比的影响非常小,为减小不必要的工

作量,提高计算效率,可以在进行多因素敏感性分析的时候将其忽略。通过分析,从 19 个因素中分别选出对推力和混合比影响较为明显的因素进行多因素敏感性分析。

由于发动机静态特性方程组的非线性很强^[20],因此当多因素同时变化时,求解方程组的难度会增大,甚至可能出现计算不收敛的情况。为了保证方程收敛并提高计算效率,仅选取 3 个水平进行仿真。根据选择的因素数和水平数,选择 $L_{27}(3^{13})$ 正交表设计仿真试验。发动机推力敏感性试验的组合方式及试验结果如表 3 所示,发动机混合比敏感性试验的组合方式与试验结果如表 4 所示。

表 3 推力敏感度试验及结果
Tab.3 Thrust sensitivity test and results

组合	影响因素相对偏差/%									推力
	β_i	η_{pf}	η_{po}	$C_{q_{gov}}$	$C_{q_{gfv}}$	$C_{q_{go}}$	μ_t	$C_{q_{gf}}$	空列	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.000 0
2	-10	0	-10	-10	0	-10	-10	0	0	0.824 4
3	10	0	10	10	0	10	10	0	0	1.142 9
4	0	-10	-10	10	0	0	0	-10	-10	0.916 2
5	-10	-10	10	0	0	-10	-10	-10	-10	0.888 7
6	10	-10	0	-10	0	10	10	-10	-10	1.026 6
7	0	10	10	-10	0	0	0	10	10	1.070 3
8	-10	10	0	10	0	-10	-10	10	10	0.946 4
9	10	10	-10	0	0	10	10	10	10	1.079 8
10	0	0	0	0	-10	-10	10	-10	10	1.009 0
11	-10	0	-10	-10	-10	10	0	-10	10	0.818 3
12	10	0	10	10	-10	0	-10	-10	10	1.135 4
13	0	-10	-10	10	-10	-10	10	10	0	0.912 2
14	-10	-10	10	0	-10	10	0	10	0	0.865 5
15	10	-10	0	-10	-10	0	-10	10	0	0.999 6
16	0	10	10	-10	-10	-10	10	0	-10	1.077 1
17	-10	10	0	10	-10	10	0	0	-10	0.934 6
18	10	10	-10	0	-10	0	-10	0	-10	1.069 2
19	0	0	0	0	10	10	-10	10	-10	0.983 8
20	-10	0	-10	-10	10	0	10	10	-10	0.844 7
21	10	0	10	10	10	-10	0	10	-10	1.164 1
22	0	-10	-10	10	10	10	-10	0	10	0.896 6
23	-10	-10	10	0	10	0	10	0	10	0.904 5
24	10	-10	0	-10	10	-10	0	0	10	1.041 1
25	0	10	10	-10	10	10	-10	-10	0	1.072 9
26	-10	10	0	10	10	0	10	-10	0	0.977 6
27	10	10	-10	0	10	-10	0	-10	0	1.116 1

表 4 混合比敏感度试验及结果
Tab.4 Mixed ratio sensitivity tests and results

组合	影响因素相对偏差/%									混合比
	β_i	η_{pf}	η_{po}	Cq_{mov}	Cq_{co}	Cq_{ef}	Cq_{gv}	μ_t	空列	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.000 0
2	-10	0	-10	-10	0	-10	-10	0	0	1.047 5
3	10	0	10	10	0	10	10	0	0	0.981 9
4	0	-10	-10	10	0	0	0	-10	-10	1.108 5
5	-10	-10	10	0	0	-10	-10	-10	-10	1.069 6
6	10	-10	0	-10	0	10	10	-10	-10	1.009 7
7	0	10	10	-10	0	0	0	10	10	0.928 4
8	-10	10	0	10	0	-10	-10	10	10	1.001 0
9	10	10	-10	0	0	10	10	10	10	0.968 5
10	0	0	0	0	-10	-10	10	-10	10	1.029 1
11	-10	0	-10	-10	-10	10	0	-10	10	1.147 3
12	10	0	10	10	-10	0	-10	-10	10	0.970 9
13	0	-10	-10	10	-10	-10	10	10	0	1.093 7
14	-10	-10	10	0	-10	10	0	10	0	1.106 5
15	10	-10	0	-10	-10	0	-10	10	0	0.965 9
16	0	10	10	-10	-10	-10	10	0	-10	0.947 1
17	-10	10	0	10	-10	10	0	0	-10	1.078 3
18	10	10	-10	0	-10	0	-10	0	-10	0.953 5
19	0	0	0	0	10	10	-10	10	-10	0.977 9
20	-10	0	-10	-10	10	0	10	10	-10	1.069 0
21	10	0	10	10	10	-10	0	10	-10	0.922 7
22	0	-10	-10	10	10	10	-10	0	10	1.072 3
23	-10	-10	10	0	10	0	10	0	10	1.082 4
24	10	-10	0	-10	10	-10	0	0	10	0.940 4
25	0	10	10	-10	10	10	-10	-10	0	0.933 0
26	-10	10	0	10	10	0	10	-10	0	1.057 9
27	10	10	-10	0	10	-10	0	-10	0	0.929 0

使用方差分析法对正交试验结果进行分析。结果如表 5 和表 6 所示,已知 $F_{0.95}(2,2) = 19, F_{0.99}(2,2) = 99, F_{0.999}(2,2) = 999$,对比得到各因素的影响显著性,其中 * 的数量越多,表示影响越显著。

由表 5 和表 6 分析可以看出:

1)传统的极差分析法只能得到各因素对性能参数影响程度的相对大小,而方差分析法可以获得各因素对发动机性能影响的显著性大小,结果直

观,与极差分析法相比,既能够提高发动机性能敏感性的分析准确度,又可以加深设计人员对各因素实际影响程度大小的认识。

2)对于发动机推力和混合比,涡轮效率对性能的影响均高度显著,即涡轮效率与发动机性能参数有着极强的相关性,涡轮效率的改变会引起发动机性能参数较大范围的变化。

3)甲烷泵效率和氧泵效率对发动机推力的影

响均为高度显著,对发动机混合比的影响较显著,但其显著性明显高于其他影响较显著的因素。通过查表得 $F_{0.995}(2,2) = 199$,即当选择的显著性水平 $\alpha = 0.005$ 时,甲烷泵效率和氧泵效率对发动机混合比的影响显著性比其他因素要高出一个等级。

综上,涡轮泵的效率对发动机性能有着十分显著的影响,其影响程度远大于其他因素,因此在设计与加工过程中,对涡轮泵的关键几何参数要提高精度要求,降低加工散差,同时还需要通过涡轮气流试验和泵水力试验或通过实际热试车获取涡轮泵的实际效率,并以此为基础,使用调节元件对发动机进行参数调节,以保证发动机性能参数满足总体要求。

表5 推力敏感度方差分析

Tab.5 Variance analysis of thrust sensitivity

影响因素	$S_j/10^{-2}$	f_j	F_j	显著性
β_i	17.421 21	2	30 511.48	* * * *
η_{pf}	4.434 739	2	7 766.99	* * * *
η_{po}	3.958 894	2	6 933.60	* * * *
Cq_{gov}	0.351 726	2	616.01	* *
Cq_{gfv}	0.182 759	2	320.08	* *
Cq_{go}	0.140 655	2	246.34	* *
μ_t	0.144 611	2	253.27	* *
Cq_{gf}	0.053 778	2	94.19	*
空列	0.000 571	2	NULL	NULL

表6 混合比敏感度方差分析

Tab.6 Variance analysis of mixed ratio sensitivity

影响因素	$S_j/10^{-2}$	f_j	F_j	显著性
β_i	5.774 386	2	1469.82	* * * *
η_{pf}	2.366 912	2	602.48	* *
η_{po}	1.192 377	2	303.51	* *
Cq_{mov}	0.499 894	2	127.24	* *
Cq_{co}	0.529 892	2	134.88	* *
Cq_{cf}	0.484 908	2	123.43	* *
Cq_{gfv}	0.356 329	2	90.70	*
μ_t	0.285 238	2	72.61	*
空列	0.003 929	2	NULL	NULL

4 结论

为了提高发动机性能敏感性分析的准确度,本文基于方差分析法对发动机性能开展了敏感性分析,分别得到了各因素对发动机推力和混合比影响的显著性大小,提高了发动机性能敏感性分析的准确度。

通过分析,发现涡轮泵的效率对发动机性能的影响高度显著。在发动机设计与生产过程中,需要提高涡轮泵关键几何参数的加工公差要求,并提高产品放行标准,还要通过涡轮气流试验和泵水力试验摸清每台涡轮泵的实际特性,并使用调节元件对发动机参数进行调节,以减小由于加工和装配导致的涡轮泵性能散差对发动机性能造成的影响。对于影响显著的阀门流阻系数,要通过水力试验获得具体的参数,若与设计值偏差较大,则需要在发动机装配过程中放置节流圈进行相应的调整,以保证发动机性能的稳定。

本文使用的方差分析法普遍适用于各类液体火箭发动机,在之前的发动机敏感性分析中很少用到,对将来其他发动机的敏感性分析具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 郑大勇, 颜勇, 张卫红. 氢氧火箭发动机性能敏感性分析[J]. 火箭推进, 2011, 37(4):18-23.
ZHENG D Y, YAN Y, ZHANG W H. Analysis for performance parameter sensitivity of hydrogen/oxygen rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(4): 18-23.
- [2] 李松, 陈钊, 唐英, 等. 刚构桥基于敏感性原理的参数敏感度分析[J]. 土木工程与管理学报, 2008, 25(4): 123-125.
- [3] 李强, 王菊金. 补燃循环过氧化氢/煤油发动机性能敏感性分析[J]. 火箭推进, 2013, 39(5):35-40.
LI Q, WANG J J. Analysis of performance sensitivity of hydrogen peroxide/kerosene staged-combustion engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(5):35-40.
- [4] 张晟, 金平, 蔡国飙. 推力室冷却通道结构可靠性仿真及参数敏感性分析[J]. 航空动力学报, 2018, 33(11): 100-108.
- [5] 薛帅杰, 刘红军, 洪流, 等. 厚液膜敞口型离心喷嘴动

- 力学特性试验[J]. 航空学报, 2018, 39(12):166-176.
- [6] 侯金丽, 金平, 蔡国飙. 基于敏感性分析的氧/甲烷燃烧反应简化机理[J]. 航空动力学报, 2012, 27(7):1549-1554.
- [7] 李元启, 刘红军, 徐浩海, 等. 液体火箭发动机动态特性仿真技术研究进展[J]. 火箭推进, 2017, 43(5):1-6. LI Y Q, LIU H J, XU H H, et al. Research progress on numerical simulation technology of liquid rocket engine dynamic characteristics [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(5):1-6.
- [8] 陈杰, 王克昌, 陈启智. 液氧/煤油推进剂液体火箭发动机循环动力平衡分析[J]. 国防科技大学学报, 1992, 14(2):53-58.
- [9] 吕超力. Levy 型索穹顶的敏感性分析及结构改进[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- [10] 赵国华. 电力行业二氧化硫减排因素的敏感性分析与对策研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2008.
- [11] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社, 1996.
- [12] 杨子胥. 正交表的构造[M]. 济南:山东人民出版社, 1978.
- [13] MANGALATHU S, JEON J S, PADGETT J E, et al. Performance-based grouping methods of bridge classes for regional seismic risk assessment: application of ANOVA, ANCOVA, and non-parametric approaches [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46(14):2587-2602.
- [14] 金玉玲, 孙浩. 基于 ANOVA 方差的生态旅游者对景区管理模式的态度分析[J]. 宝鸡文理学院学报(社会科学版), 2019(3):38-43.
- [15] 戴金辉, 韩存. 双因素方差分析方法的比较[J]. 统计与决策, 2018(4):30-33.
- [16] 李锦环. 怎样用方差分析方法分析试验数据[J]. 吉林农业, 2012(2):60.
- [17] 杨小勇. 方差分析法浅析:单因素的方差分析[J]. 实验科学与技术, 2013, 11(1):41-43.
- [18] 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(3):16-20.
- [19] 张黎辉, 凌桂龙, 段娜, 等. 基于遗传算法的液体火箭发动机参数优化[J]. 航空动力学报, 2008, 23(5):916-920.
- [20] 郭克芳, 李志. 液体火箭发动机静态特性的非线性分析[J]. 宇航学报, 1988, 9(4):44-49.