

# 氢氧火箭发动机性能敏感性分析

郑大勇, 颜 勇, 张卫红  
(北京航天动力研究所, 北京 100076)

**摘 要:** 针对氢氧发动机主要性能的敏感性问题, 运用敏感性分析方法对影响发动机性能的内外因素进行评估和分析, 得到了发动机主要性能对不同影响因素的敏感度。结果表明, 相比于其他影响因素, 涡轮泵效率水平和调节元件特性对发动机主要性能参数的影响较大, 在工程实践中应予以重点关注。

**关键词:** 氢氧火箭发动机; 敏感性分析; 正交试验法

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 04-0018-06

## Analysis for performance parameter sensitivity of hydrogen/oxygen rocket engine

ZHENG Da-yong, YAN Yong, ZHANG Wei-hong  
(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Aiming at the performance parameter sensitivity of the hydrogen/oxygen rocket engine, the sensitivity analysis method was adopted to assess and analyze the influence of internal and external factors on the main characteristics of the rocket engine by means of sensitivity theory and the numerical models. The parameter sensitivity corresponding to different influencing factors was obtained. The analysis result indicates that efficiency of TPA and the characteristic of regulator are the most important influencing factors to the main performance parameters comparing with other factors. The conclusions herewith can be used as a reference of the design and testing analysis.

**Keywords:** hydrogen/oxygen rocket engine; sensitivity analysis; orthogonal testing method

## 0 引言

低温氢氧火箭发动机所包含的零组件众多, 涉及机械、流体、热力学等多个专业, 是一个强非线性的热力学系统, 发动机主要性能参数同时

受外部条件和内部组件特性的影响。在以往的工程实践中, 并没有特别关注发动机性能与这些影响因素的相关性, 难以回答哪些影响因素对发动机性能的影响程度最大, 以及这些因素的影响程度等问题。

把发动机主要性能随内外因素的变化而发生

收稿日期: 2011-03-13; 修回日期: 2011-04-26

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目

作者简介: 郑大勇 (1978—), 男, 工程师, 研究领域为发动机系统

的变化量称为性能对影响因素的敏感性,这种变化量越大,表明敏感性越大,变化值越小,则敏感性越小。在发动机工程研制过程中,性能敏感性可以对影响发动机性能的因素进行分析和评价,用以确定影响发动机性能的较为敏感或最为敏感的因素,以及这种因素的影响程度,使设计人员将注意力集中于这些关键因素,从而为发动机设计及性能分析提供参考和帮助。

本文以典型的燃气发生器循环发动机为例,建立发动机静特性数学模型,对发动机主要性能参数在不同影响因素下的敏感性进行分析,得出一些有益的结论,可供发动机设计和试验分析时参考。

## 1 数学模型

发动机性能敏感性分析可定量判断影响因素对发动机性能的影响程度,根据分析程度不同,可分为单因素分析法和多因素分析法。单因素分析方法是选定一个性能指标,变化其中一个影响因素,同时假定其他因素保持不变,然后比较基准值随影响因素变化的大小,以确定发动机性能对不同影响因素的敏感程度,属于局部敏感性分析;在多因素分析方面,多采用正交试验法,该方法通过合理设计试验组合,可回答在多个影响因素同时作用下的因素主次、因素与性能指标的关系等问题,属于全局敏感性分析<sup>[1]</sup>。

### 1.1 单因素性能敏感性分析

单因素敏感性分析方法简单有效,能够比较直观地反映各因素对性能指标的影响程度。该方法每次只对影响因素空间的某一点进行分析,通过局部信息梯度判断因素的作用效果。如果影响因素的改变使得发动机性能指标出现很大变化,那么发动机性能对于该影响因素的敏感度高。

假设发动机性能  $P$  主要有  $m$  个影响因素  $\alpha$  决定,则建立模型

$$P=f(a_1, a_2, \dots, a_m)$$

在某一基准状态  $a^* = \{a_1^*, a_2^*, \dots, a_m^*\}$  下, 发动机

性能特性为  $P^*$ 。假设各影响因素  $a_i (i=1, 2, \dots, m)$  在各自的可能范围内变动时, 引起性能  $P$  偏离基准状态  $P^*$  的变化量为  $\Delta P_i$ , 则将发动机性能  $P$  相对偏差  $\delta P_i = |\Delta P_i|/P^*$  和影响因素  $a_i$  的相对偏差  $\delta a_i = |\Delta a_i|/a_i^*$  的关系定义为  $P$  因素  $a_i$  的敏感度<sup>[2]</sup>:

$$S(a_i) = \frac{|\Delta P_i|/P^*}{|\Delta a_i|/a_i^*}$$

### 1.2 多因素敏感性分析

单因素敏感性分析简单直观, 但其不足之处在于无法回答各因素之间的相互关系, 是一种相对孤立和静态的分析方法。在工程实际中, 发动机性能一般同时受多个影响因素的共同作用, 仅单一因素发生变化的情况很少, 大多是多种因素共同变化, 一个影响因素的作用很可能受到其他因素的影响, 因此需要进行多因素组合分析。对于多因素影响分析, 一般采用正交设计原理进行试验参数的组合设计, 利用正交设计法选出的组合点具有均匀分布、整齐可比的特点, 既满足多参数组合的要求, 又能大大降低组合次数, 是有一种高效而经济的分析方法<sup>[2,3]</sup>。

本文利用极差法对正交试验得到的性能数据进行分析处理<sup>[4]</sup>。该方法是一种数理统计法, 主要是利用统计得到的极差值判断各因素对指标的影响程度, 具有计算量适中, 简单直观的特点。其计算步骤为:

1) 假设正交试验  $L_n(r^m)$  的试验结果分别为  $y_i (i=1, 2, \dots, n)$ ,  $K_i$  代表在第  $i$  列取某个影响水平时其他所有性能指标的数值之和;

2)  $k_i = K_i/n_i$  代表该影响因素在相应水平上性能指标的平均数,  $n_i$  表示第  $i$  列因素同一水平出现的次数, 等于试验次数除以第  $i$  列的水平数;

3) 计算影响因素  $m_i$  的极差  $R_i = \max(k_i) - \min(k_i)$ 。

极差反映了影响因素对发动机性能指标的影响程度, 该值越大说明该因素的水平改变对试验结果影响也越大, 极差最大的因素也就是最主要因素, 极差较小的因素为较次要因素, 依此类推。

## 2 算例分析

本文以图 1 所示燃气发生器循环发动机为例, 分别运用两种方法对发动机性能敏感性进行分析。

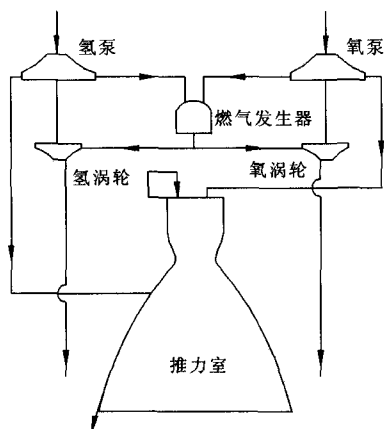


图 1 燃气发生器循环发动机系统图

Fig. 1 Gas generator power cycle engine

发动机为双涡轮泵并联结构, 液氢、液氧经氢泵、氧泵增压后, 各分两路分别进入燃气发生器和推力室; 燃气系统液路和气路分别设置汽蚀管和音速喷嘴用于控制流量; 发生器内产生的燃

气用于驱动氢氧涡轮, 做功后从各自排气管排出; 所选取的发动机性能指标为推力 ( $F$ ) 和混合比 ( $r_o$ ), 利用发动机非线性方程组进行求取。

影响发动机性能的内外因素众多, 根据发动机系统组成, 可大致分为如下几类: 1) 外部条件, 如发动机泵入口压力、温度及外界环境压力等; 2) 流阻特性, 如喷嘴、节流圈及管路特性等; 3) 组件性能, 如涡轮泵效率和燃烧装置效率等。一般情况下同一类因素具有相同量级的影响效应, 在实际敏感性分析中, 不需要对所有影响因素进行全面分析, 根据需要选择具有代表性和参考性的因素即可。

每个影响因素的变化范围称为影响水平数, 两刻度水平数对性能的影响效应是线性的, 三刻度以上的水平数对性能的影响效应多数是二次曲线, 更有利于反映影响的变化趋势, 建议选择三刻度及以上的水平数。

### 2.1 单因素敏感性分析

单因素敏感性分析下的发动机影响因素见表 1 和表 2 第一列, 各因素变化范围均在  $-10\%$  ~  $10\%$  之间, 计算得到发动机性能指标敏感度分别列于表 1 和表 2 的其他列, 不同影响水平下发动机性能敏感度直观图如图 2 所示。

表 1 发动机混合比敏感度

Tab. 1 Mixture ratio sensitivity of engine

	不同影响水平下的混合比敏感度 S				平均 敏感度	敏感度 排序
	-10%	-5%	5%	10%		
氢泵入口压力 $p_{Hf}$	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	11
氧泵入口压力 $p_{O_2}$	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	8
氢主管路流阻系数 $\xi_{mh}$	0.018	0.017	0.015	0.014	0.016	9
氧主管路流阻系数 $\xi_{mo}$	0.092	0.086	0.075	0.070	0.081	6
氢副汽蚀管喉径 $\varphi_{vf}$	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	12
氧副汽蚀管喉径 $\varphi_{vo}$	0.016	0.023	0.009	0.009	0.014	10
氢燃气路流阻系数 $\xi_{gf}$	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	5
氧燃气路流阻系数 $\xi_{go}$	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	7
氢涡轮喷嘴流量系数 $\lambda_{Hf}$	0.677	0.645	0.591	0.567	0.620	3
氧涡轮喷嘴流量系数 $\lambda_{O_2}$	0.127	0.125	0.122	0.120	0.123	4
氢涡轮泵效率 $\eta_{Hf}$	0.914	0.860	0.758	0.727	0.815	2
氧涡轮泵效率 $\eta_{O_2}$	0.873	0.866	0.865	0.850	0.864	1

表 2 发动机推力敏感度

Tab. 2 Thrust sensitivity of engine

	不同影响水平下的混合比敏感度 S				平均 敏感度	敏感度 排序
	-10%	-5%	5%	10%		
氢泵入口压力 $p_{if}$	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	12
氧泵入口压力 $p_{io}$	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	9
氢主管路流阻系数 $\xi_{mh}$	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	11
氧主管路流阻系数 $\xi_{mo}$	0.085	0.079	0.069	0.065	0.075	7
氢副汽蚀管喉径 $\varphi_{vf}$	0.116	0.113	0.107	0.104	0.110	6
氧副汽蚀管喉径 $\varphi_{vo}$	0.414	0.400	0.374	0.363	0.388	3
氢燃气路流阻系数 $\xi_{gf}$	0.048	0.048	0.047	0.047	0.047	8
氧燃气路流阻系数 $\xi_{go}$	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	10
氢涡轮喷嘴流量系数 $\lambda_{tf}$	0.457	0.450	0.436	0.428	0.443	2
氧涡轮喷嘴流量系数 $\lambda_{to}$	0.117	0.115	0.112	0.111	0.114	5
氢涡轮泵效率 $\eta_{tf}$	0.253	0.242	0.218	0.209	0.231	4
氧涡轮泵效率 $\eta_{to}$	0.820	0.806	0.777	0.761	0.791	1

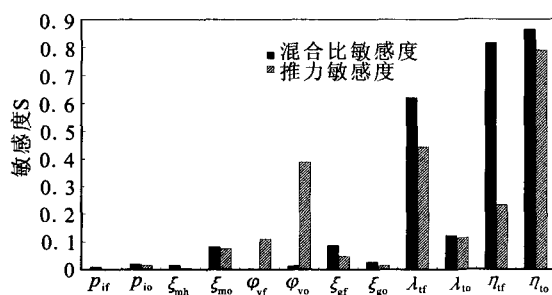


图 2 发动机性能敏感度

Fig. 2 Performance parameter sensitivity of engine

计算结果可看出,在所分析的变化范围内,影响因素对发动机推力和混合比表现出类似的敏感性,规律大致相同,即随着影响因素变化率的增大,发动机推力和混合比的变化增大,基本成线性关系。对于发动机混合比来说,其敏感度大小为  $\eta_{to} > \eta_{tf} > \lambda_{to} > \lambda_{tf} > \xi_{mo} > \xi_{mf} > \xi_{go} > p_{io} > \xi_{mh} > p_{if} > \varphi_{vf}$ , 氢、氧涡轮泵效率  $\eta_{tf}$  和  $\eta_{to}$  对发动机推力的影响最大;对于发动机推力来说,其敏感度大小为  $\eta_{to} > \lambda_{tf} > \varphi_{vo} > \eta_{tf} > \lambda_{to} > \varphi_{vf} > \xi_{mo} > \xi_{gf} > p_{io} > \xi_{go} > \xi_{mh} > p_{if}$ , 氧涡轮泵效率  $\eta_{to}$  和氢涡轮喷嘴流量系数  $\lambda_{tf}$  对混合比的

影响最大。

## 2.2 多因素敏感性分析

从单因素分析结果来看,泵入口压力和液路管路流阻系数对发动机性能影响不大,在进行多因素敏感性分析时,暂时忽略这些因素的影响,仅对影响较大的因素进行分析。此外,影响因素变化范围太大对计算的收敛性有一定影响,特别是在多因素共同作用下,这种影响更为严重,很可能出现非线性方程组无法收敛的情况。为了提高分析效率,在进行多因素敏感性分析时,适当降低因素的变化程度,仅选取 -5%、0 和 5% 三水平刻度变化范围。最终形成的正交试验组合及相应的发动机主要性能参数如表 3 (已根据基准值进行了单位化处理)。

发动机混合比和推力的极差分析结果如表 4、表 5,对比图见图 3。

从计算结果可以看出,多因素共同作用下,发动机性能对各因素的敏感性与单因素结果基本一致。对于发动机混合比来说,影响因素的重要性排序由大到小依次为  $\eta_{to} > \eta_{tf} > \lambda_{to} > \lambda_{tf} > \xi_{mo} > \varphi_{vf} > \varphi_{vo}$ ;对于发动机推力来说,影响因素的重要性排序为  $\eta_{to} > \lambda_{tf} > \varphi_{vo} > \eta_{tf} > \lambda_{to} > \varphi_{vf} > \lambda_{to} > \xi_{go}$ 。

表 3 发动机性能正交表  
Tab. 3 Orthogonal table of engine performance

组合	$\lambda_{if}$	$\lambda_{io}$	$\varphi_{vf}$	$\varphi_{vo}$	$\eta_{if}$	$\eta_{io}$	$\xi_{gf}$	Fe	re
1	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%	0.999	1.033
2	-5%	0	0	0	0	0	0	1.023	1.032
3	-5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	1.043	1.028
4	0	-5%	-5%	0	0	5%	5%	1.053	1.054
5	0	0	0	5%	5%	-5%	-5%	0.949	0.915
6	0	5%	5%	-5%	-5%	0	0	0.997	1.037
7	5%	5%	0	-5%	5%	0	5%	1.017	0.945
8	5%	0	5%	0	-5%	5%	-5%	0.997	1.051
9	5%	5%	-5%	5%	0	-5%	0	0.921	0.922
10	-5%	-5%	5%	5%	0	0	-5%	1.002	1.034
11	-5%	0	-5%	-5%	5%	5%	0	1.101	1.034
12	-5%	5%	0	0	-5%	-5%	5%	0.967	1.028
13	0	-5%	0	5%	-5%	5%	0	1.013	1.095
14	0	0	5%	-5%	0	-5%	5%	0.976	0.961
15	0	5%	-5%	0	5%	0	-5%	1.008	0.952
16	5%	-5%	5%	0	5%	-5%	0	0.948	0.898
17	5%	0	-5%	5%	-5%	0	5%	0.956	1.016
18	5%	5%	0	-5%	0	5%	-5%	1.029	1.003

表 4 发动机混合比各因素极差分析  
Tab. 4 Range analysis for every factor of engine mixture ratio

	$\lambda_{if}$	$\lambda_{io}$	$\varphi_{vf}$	$\varphi_{vo}$	$\eta_{if}$	$\eta_{io}$	$\xi_{gf}$
$k_{1i}$	6.1901	6.0588	6.0125	6.0129	5.9294	5.7582	5.9880
$k_{2i}$	6.0147	6.0104	6.0176	6.0162	6.0065	6.0168	6.0186
$k_{3i}$	5.8346	5.9703	6.0093	6.0103	5.7732	6.2645	6.0329
$R_i$	0.0592	0.0147	0.0014	0.0010	0.0811	0.0844	0.0075
极差排序	$\eta_{io}>\eta_{if}>\lambda_{if}>\lambda_{io}>\xi_{gf}>\varphi_{vf}>\varphi_{vo}$						

表 5 发动机推力各因素极差分析  
Tab. 5 Range analysis for every factor of engine thrust

	$\lambda_{if}$	$\lambda_{io}$	$\varphi_{vf}$	$\varphi_{vo}$	$\eta_{if}$	$\eta_{io}$	$\xi_{gf}$
$k_{1i}$	6.1338	6.0319	6.0379	6.1185	5.9294	5.7600	5.9837
$k_{2i}$	5.9969	6.0018	5.9978	5.9955	6.0024	6.0028	6.0027
$k_{3i}$	5.8677	5.9647	5.9627	5.8844	6.0666	6.2356	6.0120
$R_i$	0.0444	0.0112	0.0125	0.0390	0.0229	0.0793	0.0047
极差排序	$\eta_{io}>\lambda_{if}>\varphi_{vo}>\eta_{if}>\varphi_{vf}>\lambda_{io}>\xi_{gf}$						

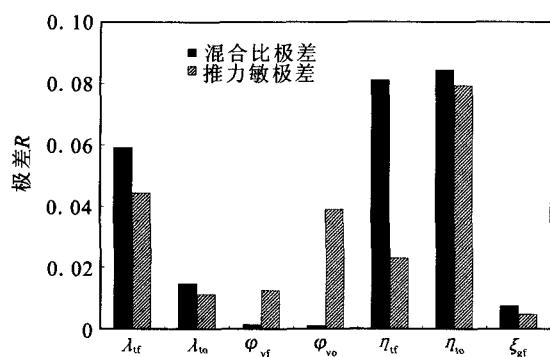


图 3 发动机推力和混合比极差

Fig. 3 Range analysis of engine thrust and mixture ratio

### 2.3 结果讨论

从以上分析结果来看, 可得出以下结论:

1) 在影响发动机性能的所有因素中, 氢、氧涡轮泵的效率水平占有绝对的主导地位, 发动机性能对该影响因素的敏感度远远大于其他因素, 涡轮泵效率出现的偏差将导致发动机性能出现同样量级的偏差;

2) 发动机氢氧主路介质流速低, 损失较小, 其变化量对发动机性能的影响不大, 同样, 发动机混合比和推力对外部影响因素 (压力、温度) 的敏感度也不高;

3) 发生器燃气路的音速喷嘴和管路特性影响着涡轮的燃气流量, 本算例中基准状态下氢涡轮的燃气流量是氧涡轮流量的两倍多, 在相同的氢、氧燃气路影响因素变化量下, 发动机性能对氢路影响因素的敏感度高;

4) 对于双涡轮泵并联的发生器循环发动机来说, 副系统液路流量的增量在两涡轮的燃气分配比例能够基本保持不变, 由此使得发动机混合比对副系统液路影响因素的敏感度低; 相反, 燃气路影响因素决定着氢、氧涡轮的做功能力, 其变化量可同时对发动机混合比和推力产生影响。

### 3 结论

不同的影响因素对发动机性能的影响程度有所不同, 如发动机性能对某一因素的敏感度较大, 则需要在零组件生产加工过程中严控质量, 加强敏感因素的质量控制, 或进行地面组件试验, 摸清组件特性, 以降低组件特性的不确定性对发动机整体性能的影响程度。本文通过敏感性分析还给出了发动机主要调节元件与发动机性能的定量关系, 可用于发动机二次调整和分析, 对提高调整精度和分析效率有一定帮助。

本文的敏感性分析是在并联结构的燃气发生器循环发动机上得到的。在实际工程应用中, 由于选择的基准点、循环方式和推进剂类别有所差异, 可能会使得发动机推力和混合比对各影响因素的敏感程度有所不同, 但该方法仍具有一定的参考性, 稍作调整, 可用于相应的计算分析。

#### 参考文献:

- [1] 高允彦. 正交及回归试验设计方法 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
- [2] 李松, 陈钊. 刚构桥基于敏感性原理的参数敏感度分析 [J]. 华中科技大学学报 (城市科学版), 2008, 25 (4): 123-125.
- [3] TANAKA H. A comparative study of GA and orthogonal experimental design [C]// Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Indianapolis, USA: ICEC, 1997: 143-6.
- [4] ABUD-ARCHILA M, VAZQUEZ-MANDUJANO D G.. Optimization of osmotic dehydration of yam bean (*pachyrhizus erosus*) using an orthogonal experimental design [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84 (3): 413-19.
- [5] 李二兵, 谭跃虎. 水泥土挡墙整体稳定的敏感性分析 [J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊): 1137-1140.
- [6] 颜庆津. 数值分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.

(编辑: 马 杰)