

# 补燃循环过氧化氢/煤油发动机性能敏感性分析

李 强, 王菊金

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

**摘 要:** 针对补燃循环过氧化氢/煤油发动机性能的敏感性, 采用敏感性分析方法对影响发动机性能的内外因素进行分析和评估, 得到了发动机推力和混合比对不同影响因素的敏感性。研究表明, 预燃室汽蚀管和涡轮喷嘴有效流通面积、涡轮效率和过氧化氢泵效率对发动机推力影响最大, 煤油汽蚀管和过氧化氢主汽蚀管有效流通面积、煤油泵扬程和过氧化氢泵扬程对混合比影响最大。对发动机性能影响较大的因素, 在工程实践中应当给予重点关注。

**关键词:** 补燃循环; 过氧化氢发动机; 敏感性

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 05-0035-06

## Analysis of performance sensitivity of hydrogen peroxide/kerosene staged-combustion engine

LI Qiang, WANG Ju-jin

( Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Aiming at the performance sensitivity of hydrogen peroxide/kerosene staged-combustion engine, the sensitivity analysis method was used to analyze and evaluate the influence of internal and external factors on the engine performance. The performance sensitivity of engine thrust and mixture ratio corresponding to the influence factors was obtained. The results show that pre-burner venturi flow area, turbine nozzle area, turbine efficiency and hydrogen peroxide pump efficiency have great effect on engine thrust; kerosene venturi flow area, hydrogen peroxide main venturi flow area, kerosene and hydroxide pump head have great effect on engine mixture ratio. In the actual engineering project, more attention should be paid to the factors that greatly affect the engine performance.

**Keywords:** staged-combustion; hydrogen peroxide engine; sensitivity

收稿日期: 2013-04-24; 修回日期: 2013-08-24

基金项目: 国家 863 项目(2009AA706309)

作者简介: 李强 (1981—), 男, 高级工程师, 博士, 研究领域为液体火箭发动机

## 0 引言

随着航天技术的不断发展以及环保要求的日益提高,无毒无污染的绿色推进剂已成为未来航天推进的发展趋势。高浓度过氧化氢是一种无毒、无污染、高密度、易贮存的绿色推进剂。过氧化氢/碳氢燃料发动机<sup>[1-7]</sup>具有低成本、高密度比冲、可贮存、无毒无污染等优点。

补燃循环过氧化氢/煤油发动机涉及到机械、流体、燃烧、传热、热力学等多个专业,是一个强非线性的热力学系统。发动机性能同时受到外部干扰因素和内部组件特性的影响。在关键技术攻关阶段中,对发动机性能与内外干扰因素的相关性没有予以特别关注,难以回答哪些影响因素对发动机主要性能的影响程度较大,以及这些影响因素对发动机主要性能的影响程度等问题。

根据预先给定各组合件特性,由流量、压力和功率平衡关系,通过发动机调整计算,选择汽蚀管等调节元件。一般来说,组合件流阻是由冷态试验数据结合修正系数给出的。由于加工误差等因素,组合件流阻特性和涡轮泵特性与热试数据会存在一定的偏差。组合件特性偏差会导致发动机推力、比冲和混合比等性能参数的偏差。

将发动机性能参数随内外干扰因素的变化而发生的变化量称为性能参数对干扰因素的敏感性。干扰因素变化量一定时,性能参数的变化量越大,表明该性能参数对干扰因素的敏感性越大,反之,性能参数的变化量越小,表明该性能参数对干扰因素的敏感性越小。

在发动机工程研制过程中,通过发动机性能敏感性分析,可以得到干扰因素对发动机性能参数的影响程度,从而确定关键干扰因素,使研制人员将注意力主要集中于这些关键干扰因素,为发动机设计及性能分析提供理论依据和参考<sup>[8]</sup>。

## 1 发动机系统

补燃循环过氧化氢/煤油发动机推进剂为90%浓度过氧化氢和火箭煤油,采用泵压式供应

系统,补燃循环方案,起动方式为在贮箱压力下的自身起动。发动机系统如图1所示。发动机点火方式为:煤油与过氧化氢分解气(富氧过热蒸汽)自燃点火。发动机由过氧化氢系统、煤油系统、燃气系统、吹除泄出系统和电动气动控制系统组成。总体对发动机性能偏差的主要要求为:推力偏差 $\pm 3\%$ 和混合比偏差 $\pm 4.6\%$ 。

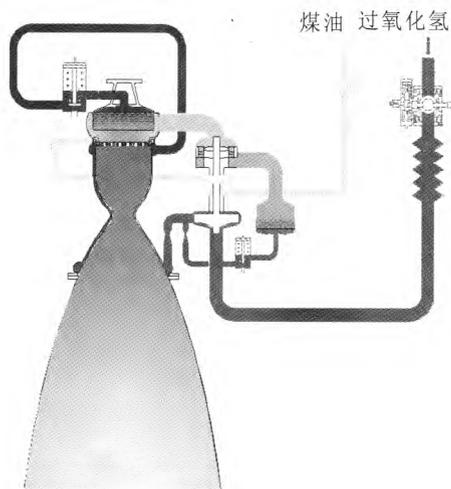


图1 发动机系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of engine system

## 2 敏感性分析

液体火箭发动机工作状态是由组合件特性、工作环境及推进剂入口等参数共同确定。发动机性能敏感性分析可定量地判断干扰因素对发动机性能的影响程度,主要目的有以下两点:

1) 由于发动机组件制造公差、装配偏差或入口条件等原因使发动机参数偏离了设计点,通过发动机性能敏感性分析可获得推力、混合比等性能参数的偏离程度,找到影响发动机系统工作的主要干扰因素;

2) 发动机系统调整时为了使工况达到设定工作状态,要求调整组合件特性参数;根据发动机性能敏感性分析结果可得到组合件参数和状态参数间直接对应关系,因而可以降低组合件调整的盲目性。

目前,发动机性能敏感性分析方法有两种:

1) 线性分析方法 引入敏感矩阵, 用一定计算方法求出发动机某一工况下的影响系数矩阵; 由于此方法带有物理意义上的假设, 因而敏感矩阵只是近似地反映了干扰因素对发动机工作的影响趋势; 只能用于分析条件参数和环境参数小范围扰动对发动机工作影响, 计算结果精度较差。

2) 非线性分析方法 把大范围变化的干扰因素实际值输入发动机计算模型以确定干扰条件下发动机的系统参数, 然后与无干扰时发动机工作参数进行对比, 获得干扰量对发动机工作的影响; 直接使用了发动机静态非线性模型计算, 精度高。

基于以上线性分析法和非线性分析方法的优缺点对比, 本文选择非线性分析方法来进行发动机性能敏感性分析。

### 2.1 单因素敏感性分析

单因素敏感性分析方法简单有效, 能够比较直观地反映各干扰因素对发动机性能的影响程度。该方法每次只能对干扰因素空间的某一点进行分析, 通过局部信息梯度判断干扰因素的影响效果。如果干扰因素的改变使得发动机性能指标出现了很大幅度的变化, 那么发动机性能参数对该干扰因素的敏感性高。

假设影响发动机性能参数  $P$  的干扰因素  $\alpha$  有  $n$  个  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ , 则可以建立如下模型:

$$P=f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \quad (1)$$

对于基准状态  $\alpha^*=\{\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_n^*\}$ , 发动机性能参数为其基准值  $P^*$ 。假设干扰因素  $\alpha_i(i=1,2,\dots,n)$  在其可能的变化范围内变化时, 造成发动机性能参数  $P$  偏离基准值  $P^*$  的偏差为  $\Delta P$ 。性能参数  $P$  对于干扰因素  $\alpha_i$  的敏感度定义为性能参数  $P$  的相对偏差与干扰因素  $\alpha_i$  的相对偏差的比值

$$S(\alpha_i)=\frac{|\Delta P|/P^*}{|\Delta\alpha_i|/\alpha_i} \quad (2)$$

在进行性能参数单因素敏感性分析时, 选取了 15 个有代表性的干扰因素: 1) 过氧化氢泵入口压力  $p_{ip0}$ ; 2) 过氧化氢泵扬程  $H_{p0}$ ; 3) 过氧化氢泵效率  $\eta_{p0}$ ; 4) 再生冷却夹套流阻系数  $\xi_{jc}$ ; 5)

再生冷却夹套流阻温升  $\Delta T_{jc}$ ; 6) 过氧化氢主汽蚀管有效流通面积  $CdA_{cvm0}$ ; 7) 预燃室汽蚀管有效流通面积  $CdA_{cspb}$ ; 8) 煤油泵入口压力  $p_{ipf}$ ; 9) 煤油泵扬程  $H_{pf}$ ; 10) 煤油泵效率  $\eta_{pf}$ ; 11) 煤油汽蚀管有效流通面积  $CdA_{cvt}$ ; 12) 涡轮喷嘴有效流通面积  $CdA_t$ ; 13) 涡轮效率  $\eta_t$ ; 14) 涡轮排气燃气导管有效流通面积  $CdA_{det}$ ; 15) 气喷嘴有效流通面积  $CdA_{io}$ 。

在敏感性分析中, 每个干扰因素的所取值个数为该干扰因素的水平数。两水平数对性能参数的影响效应一般是线性的, 三水平数及以上的水平数对性能参数的影响效应多数是二次曲线的, 更能反映性能参数随干扰因素的变化趋势。在本文进行单因素敏感性分析时, 选择 5 水平数, 即每个干扰因素相对于其基准值的偏差为  $-10\%$ ,  $-5\%$ ,  $5\%$ ,  $10\%$ 。

单因素敏感性分析得到的发动机真空推力和混合比对干扰因素的敏感度柱状图如图 2 所示。从发动机真空推力对干扰因素的敏感度计算结果可以看出, 干扰因素对发动机真空推力影响程度为  $CdA_{cspb}>CdA_t>\eta_t>\eta_{p0}>CdA_{det}>H_{pf}>H_{p0}>CdA_{cvm0}>\eta_{pf}>CdA_{io}>CdA_{cvt}>\xi_{jc}>\Delta T_{jc}>p_{ip0}>p_{ipf}$ 。其中, 预燃室汽蚀管有效流通面积  $CdA_{cspb}$ 、涡轮喷嘴有效流通面积  $CdA_t$  和涡轮效率  $\eta_t$  对发动机推力的影响最大。

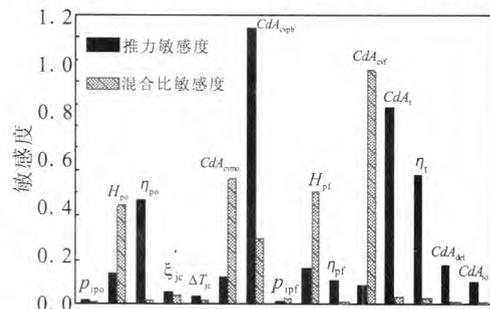


图 2 发动机推力和混合比敏感度

Fig. 2 Performance sensitivity of engine thrust and mixture ratio

从发动机真空推力和混合比对干扰因素的敏感性分析结果可以看出, 发动机真空推力和混合比对干扰因素敏感度的排序不完全相同。一些对发动机真空推力影响较大的干扰因素对发动机混合比的影响较小。例如, 发动机真空推力对涡轮

效率  $\eta_t$  的平均敏感度为 0.574 0, 对真空推力的影响重要程度排第 3 位, 而发动机混合比对涡轮效率  $\eta_t$  的平均敏感度为 0.022 6, 对混合比的影响重要程度排第 9 位, 两者相差一个数量级。

## 2.2 多因素敏感性分析

单因素敏感性分析较为简单, 但是其不足之处在于无法回答各干扰因素之间的相互关系, 是一种相对孤立和静态的分析方法。在液体火箭发动机研制的工程实际中, 发动机性能一般同时受到多个干扰因素的工作影响, 仅仅单一干扰因素发生变化的情况较少, 大多数是多个干扰因素共同偏离理论值, 一个干扰因素对发动机性能的影响可能受到其它干扰因素的影响。因此, 需要进行发动机性能多因素敏感性分析。

对于单因素或两因素敏感性分析, 因其干扰因素少, 敏感性分析的设计、实施与结果分析都比较简单。但在多因素敏感性分析时, 常常需要同时考察 3 个或 3 个以上的干扰因素, 若进行全面敏感性分析, 则包含的水平组合数较多, 工作量巨大。例如, 对于 8 个干扰因素, 每个干扰因素水平数为 3 的多因素敏感性分析, 全面敏感性分析所包含的水平组合数为 6 561(3<sup>8</sup>), 完成多因素敏感性分析的工作量巨大, 难以实施。

对于多因素影响分析, 一般采用正交试验设计原理<sup>[9]</sup>进行因素的组合设计。用正交试验设计方法安排多因素水平组合, 具有均衡分散和整齐可比的特点, 既可以满足多因素组合的要求, 又可以显著减少多因素分析所包含的水平组合数。以正交表为工具安排试验方案和进行结果分析的试验称为正交试验。它是由试验因素的全部水平组合中, 挑选部分有代表性的水平组合进行试验的, 通过对这部分试验结果的分析了解全面试验的情况, 找出最优的水平组合。正交试验设计的基本特点是, 用部分试验来代替全面试验, 通过对部分试验结果的分析, 了解全面试验的情况。

从发动机性能单因素敏感性分析结果可以看出, 在研究的 15 个干扰因素中, 涡轮排气燃气导管有效流通面积  $CdA_{det}$ 、煤油泵效率  $\eta_{pf}$ 、气喷嘴有效流通面积  $CdA_{ic}$ 、再生冷却夹套流阻系数

$\xi_{ic}$ 、再生冷却夹套流阻温升  $\Delta T_{ic}$ 、煤油泵入口压力  $p_{pf}$ 、过氧化氢泵入口压力  $p_{po}$  这 7 个干扰因素对发动机性能的影响较小。在进行发动机性能多因素敏感性分析时, 选择其他 8 个对推力和混合比有较大影响的干扰因素进行多因素敏感性分析。

选取每个干扰因素的水平数均为 3, 每个干扰因素相对于其基准值的偏差为 -5%, 0%, 5%。根据正交试验设计方法, 采用表 1 所示的正交试验表进行多因素敏感性分析。

对于正交试验得到的性能数据, 一般可以采用极差法和方差法进行分析处理。其中, 极差法是一种直观分析, 利用数理统计方法得到各因素的极差, 并依照各因素极差的大小排出重要性顺序。极差反映了干扰因素对发动机性能的影响程度, 该因素极差越大说明该因素的变化对性能指标的影响越大。因此, 本文采用极差法对性能数据进行分析处理。表 2 和表 3 分别列出了补燃循环过氧化氢/煤油发动机真空推力和混合比的干扰因素极差及极差顺序。从发动机性能多因素敏感性分析结果可以看出, 对于发动机真空推力, 干扰因素影响程度为:  $CdA_{cvtb} > CdA_{ic} > \eta_t > \eta_{po} > CdA_{cvm} > H_{pt} > H_{po} > CdA_{cvt}$ ; 对于发动机混合比, 干扰因素影响程度为:  $CdA_{cvt} > CdA_{cvm} > H_{pt} > H_{po} > CdA_{cvtb} > CdA_{ic} > \eta_t > \eta_{po}$ 。干扰因素对发动机真空推力和混合比影响的重要程度顺序不同。

在多个干扰因素共同作用下, 对发动机真空推力和混合比影响最大的 4 个干扰因素与单因素敏感性分析结果是一致的。

## 2.3 敏感性分析结果讨论

从补燃循环过氧化氢/煤油发动机性能敏感性分析结果可以看出:

- 1) 对发动机真空推力影响最大的 4 个因素为: 预燃室汽蚀管有效流通面积、涡轮喷嘴有效流通面积、涡轮效率和过氧化氢泵效率;
- 2) 对发动机混合比影响最大的 4 个因素为: 煤油汽蚀管有效流通面积、过氧化氢主汽蚀管有效流通面积、煤油泵扬程和过氧化氢泵扬程;
- 3) 在多个干扰因素共同作用下, 对发动机真空推力和混合比影响最大的 4 个干扰因素与单因素敏感性分析结果是一致的。

表 1 发动机性能敏感性分析正交试验表

Tab. 1 Orthogonal test table of engine performance sensitivity

序号	干扰因素相对偏差/%								推力	混合比
	$CdA_{cypb}$	$CdA_{cxf}$	$CdA_1$	$CdA_{cymo}$	$H_{pl}$	$\eta_l$	$H_{po}$	$\eta_{po}$		
1	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	0.941	1.103
2	-5	-5	-5	-5	0	0	0	0	0.993	1.012
3	-5	-5	-5	-5	5	5	5	5	1.043	1.010
4	-5	0	0	0	-5	-5	-5	0	0.911	0.987
5	-5	0	0	0	0	0	0	5	0.959	0.986
6	-5	0	0	0	5	5	5	-5	0.940	0.983
7	-5	5	5	5	-5	-5	-5	5	0.883	0.964
8	-5	5	5	5	0	0	0	-5	0.866	0.960
9	-5	5	5	5	5	5	5	0	0.911	0.961
10	0	-5	0	5	-5	0	5	-5	0.967	1.136
11	0	-5	0	5	0	5	-5	0	1.017	1.062
12	0	-5	0	5	5	-5	0	5	0.983	1.058
13	0	0	5	-5	-5	0	5	0	0.977	1.017
14	0	0	5	-5	0	5	-5	5	1.003	0.950
15	0	0	5	-5	5	-5	0	-5	0.906	0.945
16	0	5	-5	0	-5	0	5	5	1.080	0.999
17	0	5	-5	0	0	5	-5	-5	1.038	0.932
18	0	5	-5	0	5	-5	0	0	1.002	0.929
19	5	-5	5	0	-5	5	0	-5	1.022	1.098
20	5	-5	5	0	0	-5	5	0	0.989	1.091
21	5	-5	5	0	5	0	-5	5	1.029	1.020
22	5	0	-5	5	-5	5	0	0	1.137	1.072
23	5	0	-5	5	0	-5	5	5	1.099	1.066
24	5	0	-5	5	5	0	-5	-5	1.063	0.995
25	5	5	0	-5	-5	5	0	5	1.124	0.964
26	5	5	0	-5	0	-5	5	-5	1.013	0.957
27	5	5	0	-5	5	0	-5	0	1.048	0.895

表 2 发动机真空推力各因素极差分析

Tab. 2 Range analysis of engine vacuum thrust

干扰因素	$CdA_{cypb}$	$CdA_{cxf}$	$CdA_1$	$CdA_{cymo}$	$H_{pl}$	$\eta_l$	$H_{po}$	$\eta_{po}$	
水	$k_1$	2.815 8	2.994 6	3.132 1	3.016 2	3.014 2	2.909 1	2.977 7	2.918 4
平均	$k_2$	2.991 3	2.998 9	2.987 4	2.990 3	2.992 4	2.993 8	2.997 2	2.995 3
值	$k_3$	3.174 5	2.988 1	2.862 1	2.975 0	2.975 0	3.078 6	3.006 7	3.067 9
极差 R		0.358 7	0.010 9	0.270 0	0.041 2	0.039 2	0.169 5	0.029 0	0.149 5
极差顺序		$CdA_{cypb} > CdA_1 > \eta_l > \eta_{po} > CdA_{cymo} > H_{pl} > H_{po} > CdA_{cxf}$							

表3 发动机真空混合比各因素极差分析

Tab. 3 Range analysis of engine vacuum mixture ratio

干扰因素	$CdA_{\text{cypb}}$	$CdA_{\text{cvt}}$	$CdA_t$	$CdA_{\text{cvm}}$	$H_{\text{pt}}$	$\eta_t$	$H_{\text{po}}$	$\eta_{\text{po}}$	
水	$k_1$	2.958 7	3.167 2	3.009 9	2.921 2	3.083 7	3.003 4	2.939 7	3.006 5
平	$k_2$	3.009 6	3.000 6	3.009 3	3.008 5	3.005 3	3.007 4	3.008 4	3.009 0
均	$k_3$	3.053 1	2.853 6	3.002 2	3.091 7	2.932 4	3.010 6	3.073 3	3.005 9
值									
极差 R		0.094 4	0.313 6	0.007 7	0.170 5	0.151 4	0.007 2	0.133 7	0.003 1
极差顺序		$CdA_{\text{cvt}} > CdA_{\text{cvm}} > H_{\text{pt}} > H_{\text{po}} > CdA_{\text{cypb}} > CdA_t > \eta_t > \eta_{\text{po}}$							

### 3 结论

针对补燃循环过氧化氢/煤油发动机性能的敏感性问题,采用敏感性分析方法对影响发动机性能的内外因素进行分析和评估,得到了发动机推力和混合比对不同影响因素的敏感性。不同的影响因素对发动机性能的影响程度不同,对于对发动机性能影响较大的因素,在工程实践中应当给予重点关注。

#### 参考文献:

- [1] ANDERSON W, CROCKETT D, HILL S, et al. Low cost propulsion using a high-density, storable, and clean propellant combination, AIAA 98-3679 [R]. USA: AIAA, 1998.
- [2] BUTLER K. AR2-3 Engine refurbishment and gas generator testing, AIAA 99-2738 [R]. USA: AIAA, 1999.
- [3] VENTURA M, CARBODEN G. A brief history of concentrated hydrogen peroxide uses, AIAA 99-2739 [R]. USA: AIAA, 1999.
- [4] VENTURA M, MULLENS P. The use of hydrogen peroxide for propulsion and power, AIAA 99-2880[R]. USA: AIAA, 1999.
- [5] VENTURA M, WERNIOMONT E. History of the reaction motors super performance 90%  $\text{H}_2\text{O}_2$ /kerosene LR-40 rocket engine, AIAA 2001-3838[R]. USA: AIAA, 2001.
- [6] KIM P Y, MAJAMAKI A, PAPESH C, et al. Design and development testing of the TR-108-a 30klbf-thrust-class hydrogen peroxide/hydrocarbon pump-fed engine, AIAA 2005-3566[R]. USA: AIAA, 2005.
- [7] AKRKHANGELSKY V I, SUDAKOV V S, FATUEV I Y. History of development of hydrogen peroxide LPRE at NPO Energomash, IAC-05-E4.3.01[R]. USA: IAF, 2005.
- [8] 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.
- [9] 高允彦. 正交试验及回归试验设计方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
- [10] 董李亮. 过氧化氢发动机试验技术现状[J]. 火箭推进, 2004, 30(6): 36-39.
- [11] 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): 114-119.
- [12] 凌前程. 过氧化氢双组元发动机推力室研究[J]. 火箭推进, 2009, 35(4): 25-29.

(编辑: 陈红霞)