

泵压式上面级发动机性能精度干扰因素研究

孙海雨, 董宇峰, 黄晓磊
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 性能精度是液体火箭发动机的一项重要指标, 对于上面级发动机性能精度尤其重要。以某型泵压式上面级发动机为研究对象, 利用影响分析树的方法识别了发动机生产、测试、性能调整过程中影响性能精度的干扰因素; 针对所识别的干扰因素, 通过仿真计算, 得到了其偏差对发动机推力和混合比的影响。根据统计学原理, 推导得到多项干扰因素影响概率的计算模型, 并利用小子样样本对计算模型和程序的正确性进行了验证。利用该概率计算模型, 根据置信水平要求, 确定了多项干扰因素对发动机性能的极限偏差影响。根据发动机性能精度要求, 分解得到了单个干扰因素的控制目标。

关键词: 上面级液体火箭发动机; 发动机性能精度; 干扰因素; 控制目标

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 03-0033-08

Influence of interference factors on performance and accuracy of turbopump-fed upper stage liquid rocket engine

SUN Haiyu, DONG Yufeng, HUANG Xiaolei
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Performance precision is an important control objective in manufacture of liquid rocket engines, especially for upper stage liquid rocket engines. In this paper, a certain turbopump-fed upper stage liquid rocket engine is taken as an object of study. The interference factors that affect manufacture, testing and performance adjustment are recognized by using analysis-tree method. According to these recognized interference factors, the influence of deviation on the engine thrust and mixture ratio were found by means of simulation calculation. The calculation model of affecting the probability by the interference factors was obtained by derivation based on principle of statistics. The correctness of the calculation model and program were validated with small sub-samples. According to the requirement of the confidence level, the effects of the limit deviation of interference factors on engine performance were determined by means of the probability model. The control objective of each single interference factor was obtained according to the requirement of the performance and precision.

Keywords: upper stage liquid rocket engine; engine performance precision; interference factor; control objective

收稿日期: 2015-08-26; 修回日期: 2015-10-18

基金项目: 国家 863 项目(2012AA702302)

作者简介: 孙海雨 (1983—), 男, 高级工程师, 研究领域为宇航推进理论与工程

0 引言

性能精度是液体火箭发动机一项重要指标,对于上面级液体火箭发动机,其性能精度要求尤其严格。在液体火箭发动机产品实现及性能控制过程中,涉及产品加工装配、组件测试,以及发动机性能调整等多个环节皆存在无法消除的偏差。例如,产品加工、装配过程中的结构尺寸公差,组件性能试验中系统的测试偏差,调整计算中的计算误差,以及装配中的误差等等,均对发动机的实际性能精度产生干扰,需要对这些干扰进行控制。

有效地识别强干扰因素并进行控制是控制发动机性能精度的关键。为此,本文通过影响分析树、仿真计算、统计学推导、小子样样本验证、一致性偏差干扰因素影响计算、性能精度指标分解等途径,对液体火箭发动机性能干扰因素和控制方法进行了研究。

1 干扰因素识别

发动机的性能控制过程是根据流量、压力、功率平衡的原理,在给定的发动机工作条件下(额度工作条件),以发动机入口压力、推进剂温度、各组件流阻、性能计算关系式为输入条件,通过选取节流元件,将发动机推力、流量调整到预期值。发动机各组件流阻特性主要是通过液流试验获得,性能计算关系式通过理论及经验修正公式获得,皆依赖于试验的测量精度以及模型的准确度;发动机入口压力及推进剂温度由试验或使用单位调节保证。若发动机入口压力、推进剂温度、各组件流阻特性或性能关系式偏离调整值,则发动机实际推力将偏离预期值,其偏离幅度即为发动机性能精度。

影响发动机性能精度的干扰因素可分为外部干扰因素和内部干扰因素。外部干扰因素主要包括发动机入口压力及推进剂温度,在发动机性能精度评定过程中,根据实际值对发动机性能进行了外部干扰因素影响的修正,故在发动机性能精度研究过程中可不考虑外部干扰因素。

内部干扰因素是指在发动机产品实现过程

中,由于生产加工、试验测试、性能调整等环节的误差,导致的发动机实际性能偏离设计性能。根据某型泵压式上面级液体火箭发动机工作原理、系统组成,按组件将发动机性能精度干扰因素分为涡轮泵、燃气发生器、推力室、阀门、总装管路等5类;然后根据各组件工作特性细化分解得到对发动机性能可能产生影响的 key 因素,将其确定为干扰因素,例如,涡轮泵共识别出6项干扰因素;最后,对所有组件的干扰因素进行汇总,并形成了分析树(见图1),共得到该型发动机性能精度内部干扰因素27项。

2 影响强度计算

根据发动机工作原理,引入所识别出的干扰因素,建立发动机静态仿真模型,计算干扰因素单独作用时对发动机性能的影响。为一致评估各干扰因素的影响强度,将其进行无量纲化处理,再对发动机性能偏差进行无量纲化处理,最终确定其影响强度。

将发动机性能精度聚焦于推力和混合比。根据各干扰因素对发动机性能的影响,将其影响强度分为4个等级:在干扰因素偏差为10%的情况下,若造成的发动机性能偏差不大于1%,则该因素为弱影响因素;若造成的发动机性能偏差位于1%~4%,则该因素为一般影响因素;若造成的发动机性能偏差位于4%~10%,则该因素为强影响因素;若造成的发动机性能偏差大于10%,则该因素为超强影响因素。

2.1 涡轮泵干扰因素影响强度

涡轮泵组件的干扰因素有6项,分别为涡轮压比偏差、涡轮效率偏差、氧化剂泵扬程偏差、燃料泵扬程偏差、氧化剂泵效率偏差和燃料泵效率偏差。利用发动机静态仿真计算模型和程序,分别对该6项干扰因素在偏差为10%的情况下对发动机性能的影响进行了仿真计算,具体如表1所示。分析可知:

- 1) 涡轮压比偏差为发动机推力的一般影响因素、混合比的弱影响因素;
- 2) 涡轮效率偏差为发动机推力的超强影响因素、混合比的一般影响因素;

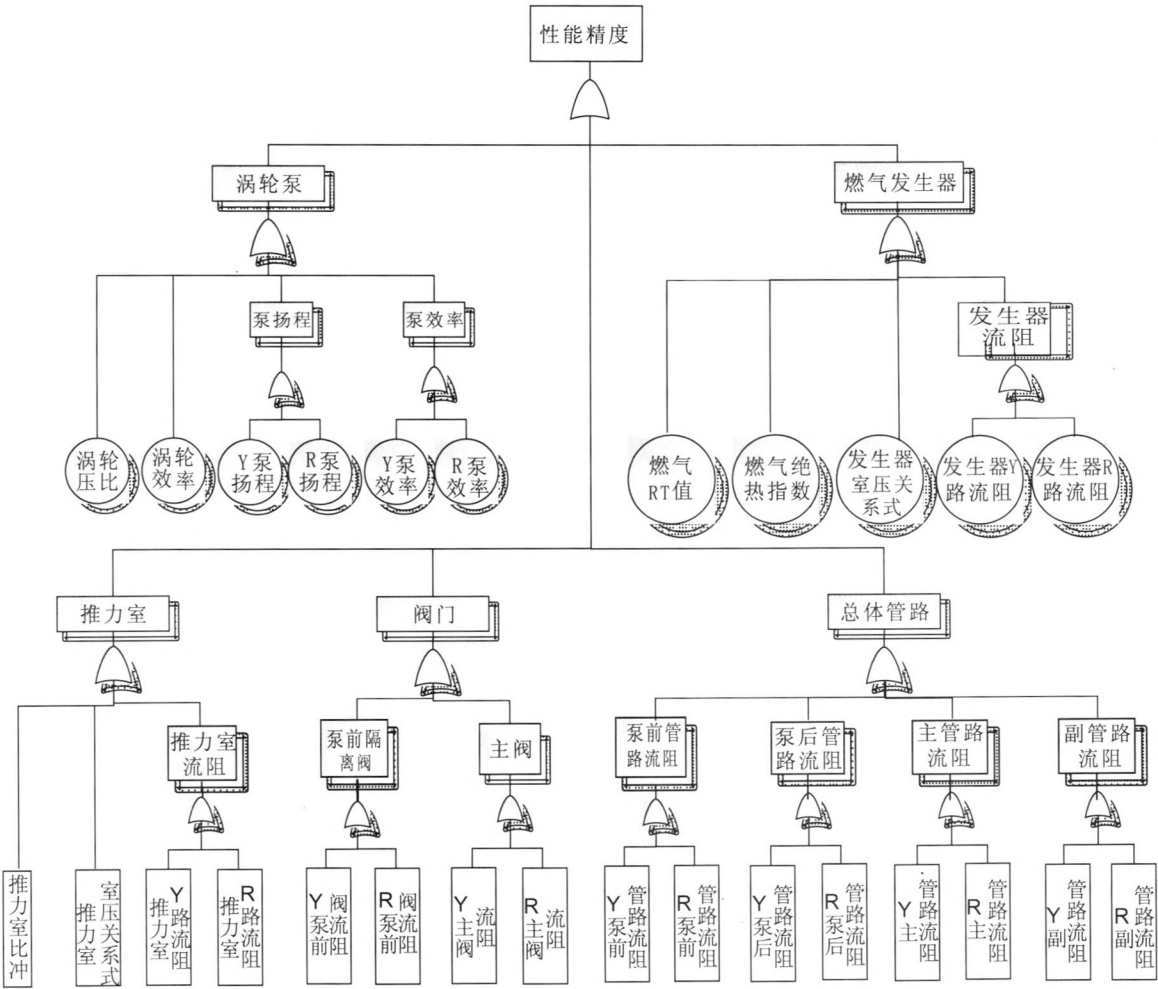


图 1 内部干扰因素分析树

Fig. 1 Analysis tree of interior interference factors

表 1 涡轮泵干扰因素偏差 10% 对发动机性能的影响

Tab. 1 Influence of interference factors of turbopump with 10% deviations on engine performance

发动机性能	涡轮压比	涡轮效率	Y 泵扬程	R 泵扬程	Y 泵效率	R 泵效率
涡轮转速	2.10	12.99	6.75	1.54	6.49	7.67
推力室压力	2.85	17.83	4.29	4.57	8.86	10.48
发生器室压	3.04	19.00	8.89	8.86	9.44	11.17
氧化剂流量	2.69	16.80	0.24	0.56	8.35	9.88
燃料流量	2.98	18.68	12.72	12.85	9.27	10.97
混合比	0.29	1.58	11.07	14.11	-0.84	0.98

3) 氧化剂泵和燃料泵扬程偏差是发动机推力的强影响因素、混合比的超强影响因素；

4) 氧化剂泵和燃料泵效率偏差是发动机推力的强影响因素、混合比的弱影响因素。

2.2 燃气发生器干扰因素影响强度

燃气发生器的干扰因素有 5 项，分别为燃气 RT 值偏差、燃气绝热指数偏差、发生器室压关系式偏差、氧化剂路流阻偏差和燃料路流阻偏差。利用发动机静态仿真计算模型和程序，分别对该 5 项干扰因素在偏差为 10% 情况下对发动机性能的影响进行了仿真计算，具体如表 2 所示，分析可知：

1) 燃气发生器燃气 RT 值偏差为发动机推力

的超强影响因素、混合比的一般影响因素；

2) 燃气发生器燃气绝热指数偏差为发动机推力的超强影响因素、混合比的一般影响因素；

3) 燃气发生器室压-流量关系式偏差为发动机推力的强影响因素、混合比的一般影响因素；

4) 燃气发生器氧化剂路流阻偏差为发动机推力和混合比的弱影响因素；燃料流阻偏差为发动机推力的一般影响因素、混合比的弱影响因素。

表 2 燃气发生器干扰因素偏差 10% 对发动机性能的影响

Tab. 2 Influence of interference factors of gas-generator with 10% deviations on engine performance

发动机性能	燃气 RT 值	燃气绝热指数	室压关系式	氧化剂路流阻	燃料路流阻
涡轮转速	9.39	6.92	6.92	0.13	1.07
推力室压力	12.61	9.47	9.47	0.17	1.09
发生器室压	13.44	3.72	3.72	0.26	0.80
Y 流量	11.90	8.95	8.95	0.18	1.02
R 流量	13.15	10.84	10.84	0.17	1.24
混合比	1.44	1.70	1.70	0.01	0.22

2.3 推力室干扰因素影响强度

推力室组件对发动机性能精度的干扰因素有 4 项，分别为推力室比冲偏差、推力室室压关系式偏差、推力室氧化剂路流阻偏差和推力室燃料路流阻偏差。利用发动机静态仿真计算模型和程序，分别对该 4 项干扰因素在偏差为 10% 情况下对发动机性能的影响进行了仿真计算，具体如表

3 所示，分析可知：

1) 推力室比冲偏差为发动机推力的强影响因素，对发动机混合比无影响；

2) 推力室室压-流量关系式偏差为发动机推力的强影响因素、混合比的弱影响因素；

3) 推力室流阻偏差是发动机推力的弱影响因素、混合比的一般影响因素。

表 3 推力室干扰因素偏差 10% 对发动机性能的影响

Tab. 3 Influence of interference factors of thrust chamber with 10% deviations on engine performance

发动机性能	推力室比冲	室压关系式	氧化剂路流阻	燃料路流阻
推力	9.74	/	/	/
涡轮转速	0.00	1.00	0.37	0.10
推力室压力	0.00	7.33	0.51	0.61
发生器室压	0.00	1.29	0.57	0.01
Y 流量	0.00	1.93	1.24	0.52
R 流量	0.00	2.48	1.16	2.64
混合比	0.00	0.57	2.43	3.07

2.4 阀门干扰因素影响强度

阀门组件对发动机性能精度的干扰因素有 4 项, 分别为氧化剂泵前隔离阀流阻偏差、燃料泵前隔离阀流阻偏差、氧化剂主阀流阻偏差和燃料主阀流阻偏差。利用发动机静态仿真计算模型和

程序, 分别对该 4 项干扰因素在偏差为 10% 的情况下对发动机性能的影响进行了仿真计算, 具体如表 4 所示。

分析可知: 阀门的 4 种干扰因素皆为发动机推力和混合比的弱影响因素。

表 4 阀门干扰因素偏差 10% 对发动机性能的影响

Tab. 4 Influence of interference factors of valves with 10% deviations on engine performance

发动机性能	推力室比冲	室压关系式	氧化剂路流阻	燃料路流阻
涡轮转速	0.001 1	0.009 0	0.00	0.14
推力室压力	0.002 2	0.020 6	0.11	0.22
发生器室压	0.001 8	0.019 6	0.03	0.29
Y 流量	0.014 8	0.021 6	0.19	0.16
R 流量	0.001 1	0.017 2	-0.06	0.34
混合比	0.013 7	0.004 6	0.26	-0.18

2.5 总装管路干扰因素影响强度

总装管路对发动机性能精度的干扰因素有 8 项, 分别为氧化剂泵前管路流阻偏差、燃料泵前管路流阻偏差、氧化剂泵后管路流阻偏差、燃料泵后管路流阻偏差、氧化剂主系统流阻偏差、燃料主系统流阻偏差、氧化剂副系统流阻偏差和燃料副系统流阻偏差。利用发动机静态仿真计算模型和程序, 分别对该 8 项干扰因素在偏差为 10% 情况下对发动机性能的影响进行了仿真计算, 具

体如表 5 所示, 分析可知:

- 1) 发动机泵前管路流阻、泵后管路流阻皆为发动机推力和混合比的弱影响因素;
- 2) 主系统流阻偏差是发动机推力的弱影响因素, 是发动机混合比的一般影响因素;
- 3) 氧化剂副系统管路流阻偏差是发动机推力和混合比的弱影响因素;
- 4) 燃料副系统管路流阻偏差是发动机推力参数的强影响因素、混合比的弱影响因素。

表 5 总体管路干扰因素偏差 10% 对发动机性能的影响

Tab. 5 Influence of interference factors of pipes with 10% deviations on engine performance

发动机性能	Y 泵前流阻	R 泵前流阻	Y 泵后流阻	R 泵后流阻	Y 主流阻	R 主流阻	Y 副流阻	R 副流阻
涡轮转速	-0.000 6	0.025 9	0.000 5	0.037 0	-0.40	-0.05	0.59	3.05
推力室压力	0.009 0	0.042 8	0.033 00	0.060 3	0.54	0.29	0.87	4.16
发生器室压	0.002 4	0.558	0.008 0	0.078 2	-0.62	0.00	1.21	6.39
Y 流量	0.017 7	0.031 1	0.055 8	0.043 8	1.33	-0.25	0.94	3.89
R 流量	-0.004 9	0.064 7	-0.018 6	0.089 9	-1.26	1.24	0.74	4.80
混合比	0.022 6	-0.033 6	0.074 4	-0.046 1	2.62	-1.47	0.20	-0.87

2.6 小结

该型发动机推力“强”以上干扰影响因素共计 11 项, 由强到弱为涡轮效率散差、燃气绝热指数偏差、燃气做功 RT 值偏差、氧化剂泵扬程偏差、燃气 RT 值偏差、燃气发生器室压关系式偏差、燃料泵效率偏差、

推力室比冲性能偏差、氧化剂泵效率偏差、推力室室压关系式偏差、燃料泵扬程偏差、燃料副系统管路流阻偏差 (见图 2); 混合比“强”以上干扰因素有 2 项, 由强到弱分别为燃料泵扬程偏差和氧化剂泵扬程偏差 (见图 3)。

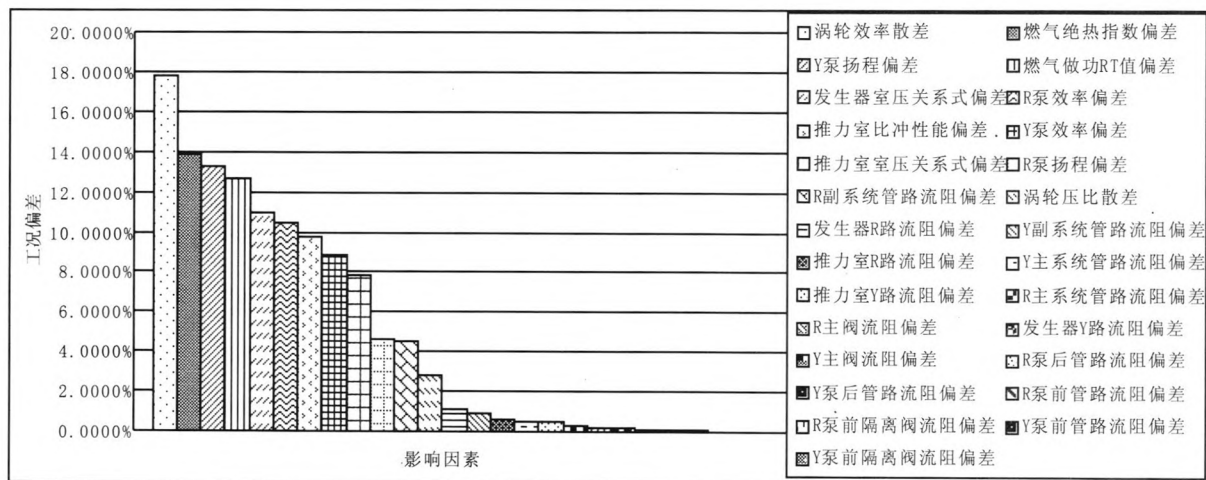


图 2 发动机推力干扰因素强度

Fig. 2 Influence intensity of interference factors on engine thrust

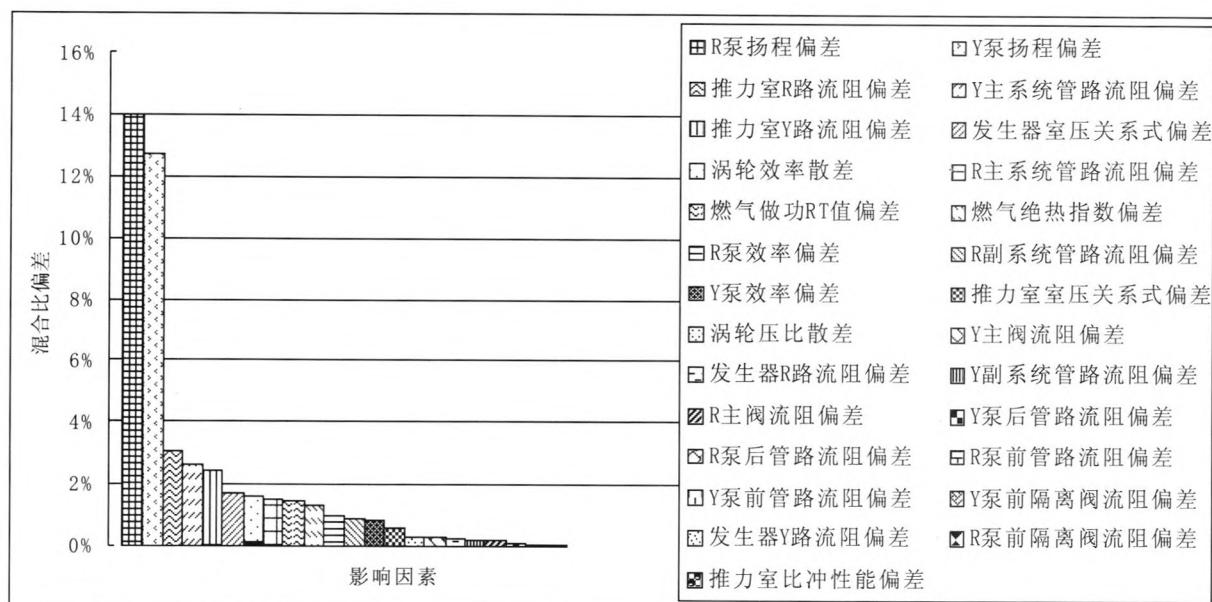


图 3 发动机混合比干扰因素强度

Fig. 3 Influence intensity of interference factors on mixture ratio

3 干扰综合影响概率计算模型

在发动机工作过程中, 有多种内部干扰因素影响发动机性能。在发动机性能精度干扰因素控

制过程中, 面临控制目标选择和制定的问题。若发动机共识别出 M 项干扰因素, 在 M 项干扰因素综合影响下, 可能表现为 N 项 ($N \leq M$) 一致性偏差, 每项的出现存在一定的概率, 可根据置

信度水平反向计算出 M 项干扰因素影响中最多可出现的一致性偏差数量 N 。

3.1 问题描述及采用的假设

1) 发动机性能精度干扰因素的项数记为 M , 每项干扰因素对发动机性能的影响存在极限正偏差、极限负偏差和零偏差 3 种情况。

2) 各项干扰因素之间互相独立, 其对发动机性能的影响也相互独立。

3) 不同干扰因素对发动机性能精度的影响可以互相抵消。

数学模型简化为: 共发生 M 项事件, 每项事件有极限正偏差、极限负偏差和零偏差 3 种可能性, 且每两项事件间可相互抵消, 求 M 项事件发生相互抵消后存在 N 项及以上极限正偏差或负偏差的概率。

3.2 计算模型推导

由于

$$P_1 (\text{抵消后存在 } N \text{ 项及以上正偏差}) \\ = P_2 (\text{抵消后存在 } N \text{ 项及以上负偏差}) \quad (1)$$

所以

$$P (\text{抵消后存在 } N \text{ 项及以上正偏差或 } N \text{ 项及以上负偏差}) \\ = P_1 (\text{抵消后存在 } N \text{ 项及以上正偏差}) \\ + P_2 (\text{抵消后存在 } N \text{ 项及以上负偏差}) \\ = 2 \times P_1 (\text{抵消后存在 } N \text{ 项及以上正偏差}) \quad (2)$$

而

$$P_1 (\text{抵消后存在 } N \text{ 项及以上正偏差}) \\ = \sum_{k=N}^M P (\text{抵消后有 } k \text{ 个为正的}) \quad (3)$$

所以首先需要计算 M 个事件抵消后有 k 个为正的。

“抵消之后, 有 k 个为正”有如下两种可能:

1) 有 k 个正, 其余全为零; 2) 有 $k+i$ 个正的, 还有 i 个负的, 剩下的为零 ($i=1, 2, \dots$ 且)。第一种情况可以归结到第二种情况里, 对应于 $i=0$ 的情形。所以:

$$P (\text{抵消后有 } k \text{ 个为正的}) \\ = \sum_{i=0}^{i \leq (M-k)/2} P (\text{有 } k+i \text{ 个正, } i \text{ 个负, 其余 } M-k-2i \text{ 个为零})$$

$$= \sum_{i=0}^{i \leq (M-k)/2} C_M^{k+i} \left(\frac{1}{3}\right)^{k+i} \times C_{M-k-i}^i \left(\frac{1}{3}\right)^i \times C_{M-k-2i}^{M-k-2i} \left(\frac{1}{3}\right)^{M-k-2i} \\ = \left(\frac{1}{3}\right)^M \times \sum_{i=0}^{i \leq (M-k)/2} C_M^{k+i} \times C_{M-k-i}^i \quad (4)$$

将公式(4)代入到公式(3)和(2)中, 并整理最后得到: 共发生 M 项事件中相互抵消后存在 N 项及以上极限正偏差或 N 项及以上极限负偏差的概率为

$$P_N = 2 \times \left(\frac{1}{3}\right)^M \times \sum_{k=N}^M \left[\sum_{i=0}^{i \leq (M-k)/2} (C_M^{k+i} \times C_{M-k-i}^i) \right] \quad (5)$$

3.3 计算模型和程序的正确性验证

根据公式(5)编制了计算程序, 并利用小子样数据 (当 $M=2$ 和 $M=3$ 时) 验证了计算模型和程序的正确性, 具体如下:

1) 对于 $M=2$ 的情形, 正偏差、负偏差和零偏差分别用+、0、-表示, 事件发生共有 9 种可能, 分别为“++、+0、+-、0+、00、0-、-+、-0、--”。

其中正负抵消后有 1 个为正的事件为 2 个 (+0、0+), 正负抵消后有 2 个为正的事件为 1 个 (++) ; 正负抵消后有 1 个为负的组合为 2 个 (-0、0-), 正负抵消后有 2 个为负的组合为 1 个 (--)。所以, 1 个及以上为正或 1 个及以上为负的概率为 $6/9=0.666\ 67$, 2 个及以上为正或 2 个及以上为负的概率为 $2/9=0.222\ 22$ 。

利用公式(5)及所编制程序计算的 1 个及以上为正或 1 个及以上为负的概率为 0.66667, 2 个及以上为正或 2 个及以上为负的概率为 0.222 22, 计算结果与小子样枚举法结果一致。

2) 对于 $M=3$ 的情形, 正偏差、负偏差和零偏差分别用+、0、-表示, 事件发生共有 27 种可能, 分别为“+++、++0、++-、+0+、+00、+0-、+-+、+-0、+--、0++、0+0、0+-、00+、000、00-、0-+、0-0、0--、-++、-+0、-+-、-0+、-00、-0-、---、--0、---”。

其中正负抵消后有 1 个为正的事件为 6 个 (++-、+00、+-+、0+0、00+、-+-), 正负抵消后有 2 个为正的事件为 3 个 (++0、+0+、0++), 正负抵消后有 3 个为正的组合作为 1 个 (+++)。所

以, 1 个及以上为正或 1 个及以上为负的概率为 $20/27=0.740\ 741$, 2 个及以上为正或 2 个及以上为负的概率为 $8/27=0.296\ 30$, 3 个及以上为正或 3 个及以上为负的概率为 $2/27=0.074\ 074$ 。

利用公式(5)及所编制程序计算的 1 个及以上为正或 1 个及以上为负的概率为 0.740 741, 2 个及以上为正或 2 个及以上为负的概率为 0.296 30, 3 个及以上为正或 3 个及以上为负的概率为 0.074 074, 计算结果与小子样枚举法结果一致。

4 干扰因素控制目标

根据公式 (5) 得到了 M 项干扰因素中, 相互抵消、综合影响造成 N 项 ($N \leq M$) 一致性偏差概率的计算模型, 利用计算程序得到 27 项干

扰因素对发动机性能精度的影响中, 出现 N 项及以上一致性 (极限正偏差或极限负偏差) 偏差的概率, 具体如图 4 和表 6 所示。

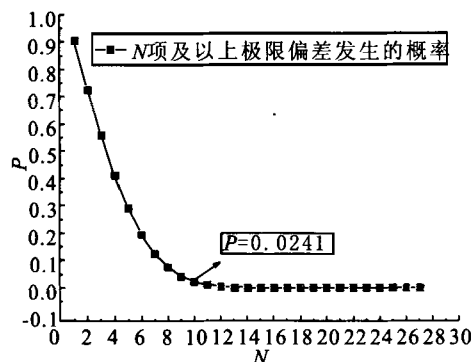


图 4 N 项及以上一致干扰偏差发生的概率

Fig. 4 Probability of appearing N or more uniform interference deviations

表 6 N 项及以上一致干扰偏差发生的概率

Tab. 6 Probability of appearing N or even more uniform interference deviations

N	P	N	P	N	P
1	0.906 62	10	0.024 1	19	4.784 2E-6
2	0.724 84	11	0.012 42	20	1.190 7E-6
3	0.557 23	12	0.006 02	21	2.618 28E-7
4	0.410 87	13	0.002 74	22	4.994 07E-8
5	0.289 86	14	0.001 16	23	8.054 19E-9
6	0.195 21	15	4.578 86E-4	24	1.057 75E-9
7	0.125 22	16	1.671 61E-4	25	1.064 83E-10
8	0.076 32	17	5.613 8E-5	26	7.344E-12
9	0.044 1	18	1.722 12E-5	27	2.62E-13

根据计算结果查图和表可知, 27 项干扰因素中, 出现 10 项及以上干扰因素造成发动机性能出现一致性偏差的可能性为 0.0241。若要求发动机性能精度控制置信度为 0.97, 则在该置信水平下可确定, 27 项干扰因素中最高只可能对发动机性能精度造成 10 项的一致性偏差。

根据给定的置信度水平确定干扰因素影响一致性偏差的最高项数, 进而根据发动机性能偏差

总要求, 分解得到每项干扰因素对发动机性能精度影响的控制目标。例如, 若某发动机性能精度控制总要求为 5%, 而在 0.97 置信度下, 27 项干扰因素综合作用下, 最多只能造成发动机性能精度出现 10 项一致性偏差, 则将 27 项干扰因素每项的影响控制目标确定为 $5\%/10=0.5\%$ 。

(下转第 55 页)

参考文献:

- [1] 刘洋, 蒲晓航, 李江. 固体燃料 ATR 涡轮/压气机匹配方法研究[J]. 推进技术, 2015, 36(3): 378-384.
- [2] 潘宏亮, 林彬彬, 刘洋. 加力式空气涡轮火箭发动机特性研究[J]. 固体火箭技术, 2010, 33(6): 650-655.
- [3] 杜子学, 韩山河. 压气机叶片流固耦合的强度和振动研究[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(5): 789-793.
- [4] 李小娟, 桂幸民. 风扇/增压级带间隙三维粘性流动数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(1): 4-7.
- [5] 任众, 刘振侠, 黄键. 斜流压气机扩压器设计和流场的数值模拟研究[J]. 航空计算技术, 2011, 41(4): 36-41.
- [6] 崔伟伟, 杜建一, 徐建中. 离心压气机的叶片扩压器设计及流场分析[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(2): 259-262.
- [7] 陶胜, 周正贵, 严欣, 等. 三维环境下离心/斜流压气机二维叶型优化设计[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12): 2965-2972.
- [8] 王宏亮, 席光. 离心压气机叶轮多学科优化设计方法研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(11): 1835-1838.
- [9] 王仲奇, 秦仁. 透平机械原理[M]. 机械工业出版社, 1981.
- [10] 殷明霞, 冀国锋, 桂幸民. 叶尖间隙流动对某微小型离心压气机性能的影响[J]. 航空动力学报, 2010, 25(3): 565-570.
- [11] 彭森, 杨策. 离心压气机叶尖间隙泄漏流动数值研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(6): 935-937.
- [12] 刘立军, 徐忠, 张玮. 叶顶间隙泄漏时离心压气机模型级内流动的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(9): 908-913.

(编辑: 王建喜)

(上接第 40 页)

5 结论

1) 所研究的泵压式上面级发动机共识别出内部干扰因素 27 项, 其中涡轮效率偏差等 11 项干扰因素对发动机推力影响强烈, 燃料泵扬程偏差和氧化剂泵扬程偏差 2 项干扰因素对发动机混合比影响强烈。这些干扰因素若发生 10% 的偏差, 将单独造成发动机推力或混合比出现超过 4% 的偏差。

2) 利用统计学原理, 推导得到“ M 项干扰因素综合影响下, 造成发动机性能精度出现 N 项及以上一致性干扰影响偏差的概率”计算模型。利用小子样列举对比, 验证了该计算模型和相关计算程序的正确性。

3) 计算得到某型泵压式上面级发动机 27 项干扰因素综合作用下, 造成发动机性能精度出现 N 项 ($N=1, 2, \dots, 27$) 及以上一致性偏差的概率, 该概率随 N 数量递减。

4) 在 0.97 置信度下, 27 项干扰因素中最多只能出现 10 项一致性偏差, 据此将 27 项干扰因素对发动机性能的影响控制目标定为不大于 0.5%, 此时可确保发动机总性能偏差不大于 5%。

参考文献:

- [1] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [2] 沈赤兵, 吴建军, 王克昌, 等. 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): 38-44.
- [3] 沈赤兵, 吴建军, 陈启智. 干扰因素对液体火箭发动机性能的影响[J]. 中国空间科学技术, 1997(2): 16-24.
- [4] 张黎辉, 张振鹏. 干扰因素对补燃式液体火箭发动机性能的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(6): 704-706.
- [5] 沈赤兵, 吴建军, 陈启智. 内外干扰因素对液体火箭发动机的影响分析[J]. 国防科技大学学报, 1997, 19(3): 92-96.

(编辑: 陈红霞)