

空-空导弹固体火箭发动机性能 可靠性评估

蔡 选 义

摘 要

本文以某型发动机为实例,利用经过生产工艺定型后积累的发动机地面静止点火试验结果,运用失效树分析法和数字仿真法求底事件的可靠度方法,对交付批产品在使用温度范围内的性能可靠性进行了预估,并定量地给出了性能可靠性指标,找出了影响系统性能可靠性的主要因素,可供使用与设计单位如何根据需要进行产品可靠性指标分配时参考。

一、引 言

作为空-空导弹动力装置的固体火箭发动机,为确保导弹总体的战术技术要求,对其主要性能参数有严格的要求。由于固体火箭发动机是一次使用的不可维修产品,不允许对全部产品进行点火试验来评述性能可靠性。特别是采用复合固体推进剂的发动机,因目前工艺条件的限制,生产批量较小,通常在混批产品中进行少量的抽样点火试验,即通过抽样产品在典型环境条件下试验得到的结果评述全部产品性能的稳定可靠性。当然,抽样试验具有随机性,因此交付产品实际上带有一定的风险。

严格地说,所谓产品性能稳定可靠,应该是全部产品在规定的条件下和规定的工作时间内完成规定性能指标的成功概率。这里所说的规定条件,对空-空弹而言,包括使用时的各种环境条件,如温度、湿度、振动、冲击、挂飞过程中受到的气动加热、灰尘,海洋盐雾以及贮存条件等等。因此,在不同的场合和不同的情况下,应该用不同的数量指标来表示产品的可靠性。

本文以某型发动机为实例,利用经生产工艺定型后积累的发动机地面静止点火试验结果,对交付批产品在使用温度范围内的性能可靠性进行预估,并定量地提出性能可靠性指标。这里只评定发动机固有的性能可靠度,至于经贮存后的性能可靠性,可以用同一方法处理。由于积累的试验数据尚不完整,这里未作评估。

至于发动机结构可靠性,该型号经过近200发的点火试验已得到充分考核,不作为本文可靠性评估的内容。

二、发动机主要性能指标

固体火箭发动机作为空-空导弹的动力装置,对全弹能否完成预定的任务影响极大,导弹总体除了对安全性提出严格要求外(安全度为1),对性能指标,也有明确的要求。在设计阶段,每个性能指标均需与导弹总体反复协调,如总冲影响导弹的射程;最大推力则影响全弹

的过载和保险执行机构的最大解脱过载；最小推力则影响保险执行机构的最小纵向过载；最长工作时间则影响导弹的最小发射距离；发动机的推力增长率则直接影响到载机的安全和导弹的初始误差。因此，我们在分析和设计发动机系统性能可靠性时，对这些参数应根据其需要和实际可能进行可靠性指标的分配，以最低的生产成本获得最佳的性能可靠性。

空-空导弹总体对发动机的主要性能要求，通常包括如下参数：

- 使用温度范围
- 地面总冲
- 最大推力
- 最小推力
- 允许工作时间
- 推力达到某一规定值的时间。

三、用失效树分析法 (FTA) 进行性能可靠性分析

1. 失效树的结构函数

总体要求的性能指标，在规定的使用温度范围内，必须同时满足，即如某一性能参数超差，认为直接影响发动机性能超差，用 X_i 来表示这些性能参数，并作为失效树的底事件。

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{—— 底事件}i\text{发生 (即性能超差)} \\ 0 & \text{—— 底事件}i\text{不发生 (即性能正常)} \end{cases}$$

令 X_1 —— 总冲

X_2 —— 最大推力

X_3 —— 最小推力

X_4 —— 最长工作时间

X_5 —— 最短工作时间

X_6 —— 初始推力增长率

用 ϕ 来表示顶事件

$$\phi = \begin{cases} 1 & \text{—— 发动机性能超差} \\ 0 & \text{—— 发动机性能正常} \end{cases}$$

根据失效树的名称可知，顶事件是系统不希望发生的失效状态，相当 $\phi = 1$ ，与此状态相对应的底事件状态相当 $X_i = 1$ ，这就是说顶事件状态 ϕ 完全由FT中底事件状态 X 所决定，即：

$$\phi = \phi(\vec{X})$$

式中 $\vec{X} = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6)$

称 $\phi(\vec{X})$ 为FT的结构函数

2. 几点假设

(1) 发动机各性能参数间有内在联系，相互有影响。但根据导弹总体要求，任一性能参数超差，则不能完成预定的功能。因而从可靠性定义看，发动机性能处于“失效”状态。为此假设：凡全部性能参数满足规定指标要求为“正常”状态。凡任一性能参数超差，则为“失效”状态。

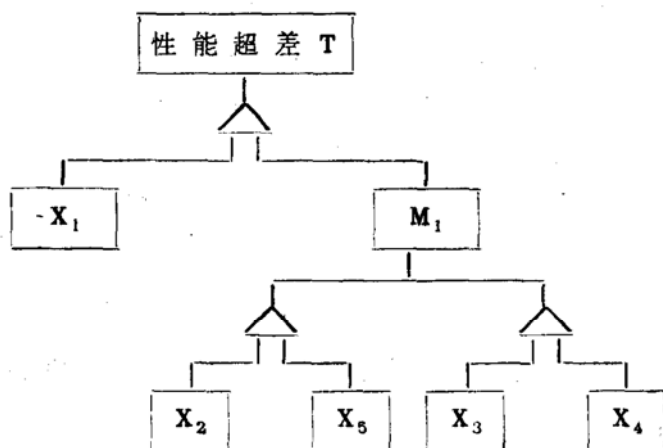
(2) 本型号发动机在工艺定型后，完成了近200发的点火试验，其中包括60多发的空中发射试验。初始推力增长率均满足要求，为此假设其可靠度为1，即 $X_6 = 1$ 。

(3) 总体要求的总冲一般为+20℃条件下的地面总冲。在计算实例中，因20℃条件下积累的数据太少。为此，假设在-55℃条件下的总冲满足要求，则一定满足总体要求。

3. 系统失效树的定量计算

(1) 根据发动机各性能参数之间的逻辑关系和上述假设，可建立如下失效树，顶事件

T与各底事件之间用相应的中间事件和逻辑门相连接。



总体性能参数的结构函数为:

$$T = X_1 \cup X_2 \cup X_3 \cup X_4 \cup X_5$$

(2) 求顶事件 (发动机总体性能) 失效概率

为了精确计算总体性能的失效概率, 首先将底事件用直接化法化为不交和。

$$\begin{aligned}
 T &= X_1 \cup X_2 \cup X_3 \cup X_4 \cup X_5 \\
 &= X_1 + \bar{X}_1 X_2 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_5 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_5 X_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_5 \bar{X}_3 X_4
 \end{aligned}$$

因为这是不交和, 且底事件相互独立, 故由此得到顶事件失效概率的计算公式:

$$\begin{aligned}
 P(T) &= P(X_1) + P(\bar{X}_1) \cdot P(X_2) + P(\bar{X}_1) \cdot P(\bar{X}_2) \cdot \\
 &\quad P(X_5) + P(\bar{X}_1) \cdot P(\bar{X}_2) \cdot P(\bar{X}_5) \cdot P(X_3) \\
 &\quad + P(\bar{X}_1) \cdot P(\bar{X}_2) \cdot P(\bar{X}_5) \cdot P(\bar{X}_3) \cdot P(X_4)
 \end{aligned}$$

只要知道各底事件的失效概率可靠度, 便可求出发动机性能的失效概率或可靠度。

四、用数字仿真法求底事件 (各性能参数) 的可靠度

上面提到的系统性能可靠度的定义是“系统性能保持在规定范围内的概率”。因此在研究系统性能可靠性时, 不少问题可以用常规的解析方法加以处理。但由于各性能参数往往是随机变量, 这样用解析方法就变得十分困难, 为此, 我们可用数字仿真法求出发动机各性能参数的可靠度。

1. 总冲 I_0 仿真模型和仿真逻辑关系

由发动机地面静止点火试验的统计数据, 总冲一般属正态分布, 因此得到总冲的均值 μ_{I_0} 和方差值 σ_{I_0} 后, 便可进行仿真运行。由于交付批中每一台发动机均有具体的装药重量, 而发动机的实测比冲对生产工艺定型后的发动机和同一测试系统来说基本稳定。因此, 本实例中采用如下公式进行计算。

发动机总冲值由装药重量和平均比冲所决定:

$$I_0 = \bar{I}_1 \cdot W_P$$

式中 $\bar{I}_1$ ——发动机实测平均比冲。

W_P ——发动机内装药重量。

装药重量, 对每一台具体发动机是不完全一样的, 属随机变量。它与装药生产过程中的原材料, 模具尺寸公差, 药柱成型后的补充加工以及具体称量等多种因素有关, 同理实测平

均比冲, 对每一台具体发动机与其结构尺寸公差, 测试系统的精度等因素有关。现取装药重量和比冲分别为随机变量 ξ_{WP} 、 ξ_{I1} 、根据以往试验结果和交付批发动机装药重量的统计规律, 认为上面两个随机变量比较接近正态分布。

$$\text{令 } X_1 = \xi_1$$

则此随机变量分布函数的表达式为 $f_1(X_1)$

$$f_1(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(X_1 - \mu_1)^2}{2\sigma^2}}$$

$$\text{随机变量总冲 } \xi_{I0} = s(\xi_{WP} \cdot \xi_{I1}) \quad (1)$$

由发动机地面静止点火试验的统计数据 and 交付批每台发动机的具体装药重量的统计数据分别求出其均值和方差值。

仿真逻辑的建立:

对装药重量和平均比冲进行随机抽样, 在第 j 次抽样时

$$\xi_{1j} = F_1^{-1}(\eta_j)$$

式中 η_j ——随机数 η 序列中第 j 个。

ξ_{1j} —— $i=1,2$ (分别指随机变量装药重量和平均比冲)

在第 j 次运行中, 性能参数总冲 I_0 的抽样值, 则由(1)式求出。

具体抽样公式为:

$$(\sqrt{-2\ln\eta_1} \cdot \cos 2\pi\eta_2) \cdot \sigma + \mu$$

式中 η_1 、 η_2 分别为同列随机数中的单数和双数。

$$(\sqrt{-2\ln\eta'_1} \cdot \sin 2\pi \cdot \eta'_2) \cdot \sigma + \mu$$

式中 η'_1 、 η'_2 分别为另一列随机数中的单数和双数。

2. 最大推力最小推力仿真模型和仿真逻辑关系。

根据地面静止点火试验结果的统计推断, 认为最大推力和最小推力接近正态分布, 由样本观察值得到其均值和方差值后进行随机抽样, 在第 j 次抽样时:

$$\xi_j = F_1^{-1}(\eta_j)$$

η_j ——为随机数 η 序列中的第 j 次

ξ_{ij} —— $j=1,2$ (分别指最大推力和最小推力)

抽样公式同前。

3. 发动机工作时间的仿真模型和仿真逻辑。

根据试验结果数据的统计推断, 发动机工作时间属正态分布, 由样本观察值得到工作时间 t_{max} 、 t_{min} 的均值和方差值。

在第 j 次抽样时

$$\xi_{ij} = F^{-1}(\eta_j)$$

η_j ——为随机数 η 序列中的第 j 次

ξ_{ij} —— $j=1,2$ (分别指最长和最短工作时间)

抽样公式同前

4. 性能参数可靠性仿真运行及其仿真结果统计

系统共进行了50次人工仿真运行, 将得到的结果值与总体规定的性能指标进行比较, 如

果超过规定值, 则视为失效。再将累积失效数 Δm 与总的运行次数 N 相比, 便得到失效概率 $P(T)$ 。

$$\therefore \text{各性能参数的可靠度为 } R_i = 1 - \frac{\Delta m_i}{N}$$

仿 真 结 果

性能参数项目	I-55°C	F_{max}	F_{min}	t_{max}	t_{min}
失效次数 Δm	0	3	2	0	0
失效概率 $P_i(T)$	0	0.06	0.04	0	0
性能可靠度 R_i	1	0.94	0.96	1	1

五、发动机性能可靠度 $R(T)$

$$\begin{aligned}
 P(T) &= P(X_1) + P(\bar{X}_1) \cdot P(X_2) + P(\bar{X}_1) \cdot P(\bar{X}_2) \cdot P(X_5) + \\
 &\quad P(\bar{X}_1) \cdot P(\bar{X}_2) \cdot P(\bar{X}_5) \cdot P(X_3) + P(\bar{X}_1) \cdot P(\bar{X}_2) \cdot \\
 &\quad P(\bar{X}_5) \cdot P(\bar{X}_3) \cdot P(X_4) = 0.06 + 1 \times 0.94 \times 0.04 = 0.0976
 \end{aligned}$$

$$\therefore \text{性能可靠度 } R(T) = 1 - 0.0976 = 0.9024$$

六、结 论

在现有生产工艺条件下生产的发动机, 在规定的使用条件下, 其性能可靠度为0.9024, 综合性的性能参数总冲 I_0 在-55°C条件下也能满足总体要求, 可靠度高达1, 影响系统性能可靠度的主要因素是发动机推力超差。而造成推力超差的根本原因是装药生产厂的推进剂原材料性能不稳定, 推进剂燃速的压力指数偏高, 为此大大增加了报废率, 经济上造成很大的损失。根据目前国产原材料的生产水平, 严格控制工艺, 并对配方作少量调正, 预计能进一步提高产品的性能可靠度。同时设计部门应与有关单位, 根据需要与可能进行产品可靠性指标的分配, 以便在符合使用要求的前提下, 降低生产成本, 提高经济效益。

参 考 文 献

- (1) 杨为民、盛一兴: 系统可靠性数字仿真(可靠性工程教材之三)。
- (2) 蔡选义: 某型号发动机环境条件试验总结。