

固体发动机失效树定量分析法

胡保朝 杨亦材 谢蔚民

(〇六六基地设计所) (西北工业大学)

摘要: 根据固体火箭发动机失效树定量分析中确定底事件失效概率存在的困难, 提出了确定底事件失效概率的工程方法——征求意见评分法。通过对某型号发动机试样阶段结构可靠性实例分析, 得出了较满意的结果。

主题词: 固体火箭发动机, 故障树形图分析, 可靠性

METHOD OF FAULT-TREE QUANTITATIVE ANALYSIS FOR SOLID ROCKET MOTOR

Hu Baochao Yang Yicai
(066 Base Designing Institute)

Xie Weimin

(Northwestern Polytechnical University)

Abstract: Based on the existing problem of determining the failure probabilities of base events in solid rocket motor fault tree quantitative analysis, an engineering method of "Solicitation Opinions to Give Marks" is put forward to determine the failure probability. And a more satisfied result is obtained by analysing the living example of the structure reliability for some solid rocket motor at the test sample stage.

Keywords: Solid rocket engine, Fault tree analysis, Reliability

1 前言

失效树分析法 (FTA—Fault Tree Analysis) 作为一个分析工具, 在航天、航空、核能、化工等领域获得了广泛的应用。FTA 在国外已被公认为是当前复杂系统安全性、可靠性分析的

一种最好的方法。

固体火箭发动机失效树分析法目前没有见到系统报道,据有关专家介绍,美国曾对固体火箭发动机建立过失效树,但没有发表这方面的研究成果。根据失效树分析法在其他领域应用的成功经验,固体火箭发动机失效树分析法的具体步骤可分为:

- a. 失效树建造
- b. 建立数学模型
- c. 定性分析
- d. 定量分析

对前三个步骤,由可靠性分析人员和从事发动机设计、生产管理的工程技术人员根据有关失效树理论,通过全面分析系统的结构和工作特性,经过细致的工作是可以完成的。至于最后一个步骤,关键的问题是确定底事件的失效概率。固体火箭发动机由于不可重复使用、试验耗资可观等固有特点,在目前的技术水平下,要通过理论计算和可靠性试验的方法来确定数量较多的底事件的失效分布类型及失效概率是相当困难的,为此,本文通过对某型号发动机的实例分析,提出了一种近似确定失效树底事件失效概率的工程方法——征求意见评分法,力图对固体发动机失效树定量分析进行探索。

2 征求意见评分法简介

征求意见评分法是一种工程处理方法,需要从事该系统研制的可靠性、设计、制造、管理、使用等有关人员来共同完成,而且要经过多次反复修正,具体方法步骤如下:

2.1 收集信息

广泛收集国内外类似型号发动机的信息及所分析的发动机研制过程的详细信息是该方法的前提和基础。本文实例中收集的主要信息有:美国几种固体发动机失效统计(设计不当占 30%、生产原因占 30%、操作不当占 40%),国内 12 种固体发动机研制过程中的 85 次故障(设计占 45.9%、工艺及总装占 37%、原材料缺陷占 5.9%、运输、起吊、存放占 5.9%、试车占 4.7%、各部件出现的故障百分比为:点火装置 12.3%、壳体 14.6%、装药 32.9%、喷管 30.5%、其他 9.8%)。另外还有大量其他信息和本型号研究过程的失效信息。

2.2 征求意见

将所收集的资料进行分析整理,并根据本系统的结构、工作特点、继承性及其新颖性,征求有关管理、设计、制造、使用等有关人员的意见,初步确定失效树底事件的失效概率范围,反馈该信息,反复征求意见,直至得到大家的认可。本文实例中,最后确定的底事件的失效概率范围为 0.00005~0.0008。省略事件的概率为 0.00005。

2.3 评分

给定了底事件失效概率的范围后,让上述有关人员对各自熟悉的底事件评分,即给出相应底事件的失效概率,列成表格(如表 1 所示)。

表1 评分结果

评分人 人员代号	底事件的代号及相应的预测值			
	P _{B1}	P _{B2}	 P _{Bj}	 P _{Bn}
1	C ₁₁	C ₁₂	C _{1j}	C _{1n}
2	C ₂₁	C ₂₂	C _{2j}	C _{2n}
⋮				
i	C _{i1}	C _{i2}	C _{ij}	C _{in}
⋮				
m	C _{m1}	C _{m2}	C _{mj}	C _{mn}

2.4 数据处理

2.4.1 根据评分表计算如下参数

$$C_j = \frac{1}{m_j} \sum_{i=1}^{m_j} C_{ij}$$

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{m_j - 1} \sum_{i=1}^{m_j} (C_{ij} - C_j)^2}$$

$$\bar{V}_j = S_j / C_j$$

式中： m_j ——对第 j 个底事件评分的人员数量；

C_j ——第 j 个底事件预测值的均值；

S_j ——第 j 个底事件预测值的方差根，表示参加评分人员评分的离散程度。

$\bar{V}_j$ ——方差变异系数，其值表示评分人员的协调程度。

2.4.2 剔除异常数据

由于评分的人为因素，评分表中有可能出现异常数据，为此，必须对每一数据进行检验，剔除异常数据。

评分问题可以认为是正态分布情形下的小子样问题，采用 Grubbs 法进行检验。

$$g_j = (\max\{C_{ij}\} - C_j) / S_j$$

或

$$g_j = (C_j - \min\{C_{ij}\}) / S_j$$

若 $g_j > a_j$ 则 $\max\{C_{ij}\}$ 或 $\min\{C_{ij}\}$ 即为异常数据。其中 a_j 是不同显著水平 α_j 和不同 m_j 之下的临界值，可查 Grubbs 检验临界值表求得。

剔除异常数据后，再对新的数据系列求相应的 C_j 、 S_j 及 $\bar{V}_j$ 。直至没有异常数据，这时的 C_j 即为底事件失效概率的预测值。

2.5 方法的可行性

综合评定法首先是建立在收集和统计大量有关资料的基础之上的，有一定的继承性。评分法在企业管理、市场预测等方面已得到广泛应用而且比较符合实际。将此方法用于预示底事件的失效概率表面上人为因素很大，但它却有一定的科学性。对本文实例而言，所征求意见和参加评分的每一个人都是从事固体火箭发动机管理、设计、制造等工作的工程技术人员，他们有丰富的经验和知识，在进行产品设计以前，对国内外同类零部件的优缺点都非常清楚。

因此, 他们的评分结果是可信的。另外, 据有关专家介绍, 我国第一台液体发动机可靠性评定就是用评分征求意见法估算出来的。由此可见, 在目前的技术水准下, 该方法不失为一种较好的工程处理方法。

3 实例分析

本文用上述方法得出了固体火箭发动机结构失效树全部 150 个底事件的失效概率 (如表 2 所示)。为了验证结果的正确性及方法的合理性和可行性, 根据失效树割集理论, 借助计算机, 用 Vessely-Fussel 下行法, 求出了该失效树的全部 203 个最小割集, 得出了顶事件的发生概率为 0.02675, 即可靠度为 0.97325。而根据目前所用的评估固体火箭发动机可靠性的方法所求得的发动机可靠度下限为 0.9415。这种方法是建立在验前信息和大量试验的基础上, 无失效越多, 预估的可靠度下限就越高, 这样, 势必要花费更多的经费和人力。由此更进一步证明了综合评定法的合理性和优越性。

表 2 表格形式的底事件失效概率

BE	F	BE	F	BE	F
0	.00000	61	.00020	62	.00020
63	.00010	64	.00020	65	.00080
66	.00020	67	.00080	68	.00020
69	.00020	70	.00080	71	.00020
72	.00020	73	.00050	74	.00080
75	.00010	76	.00050	77	.00020
78	.00020	79	.00020	80	.00050
81	.00050	82	.00020	83	.00080
84	.00020	85	.00010	86	.00010
87	.00010	88	.00010	89	.00010
90	.00010	91	.00020	92	.00010
93	.00010	94	.00020	95	.00010
96	.00020	97	.00050	98	.00050
99	.00010	100	.00020	101	.00020
102	.00010	103	.00005	104	.00005
105	.00020	106	.00050	107	.00020
108	.00010	109	.00010	110	.00010
111	.00050	112	.00010	113	.00010
114	.00050	115	.00010	116	.00010
117	.00050	118	.00010	119	.00010
120	.00050	121	.00010	122	.00010
123	.00010	124	.00010	125	.00010
126	.00010	127	.00010	128	.00010
129	.00010	130	.00010	131	.00010
132	.00010	133	.00020	134	.00050
135	.00050	136	.00010	137	.00020
138	.00050	139	.00010	140	.00010
141	.00010	142	.00020	143	.00010
144	.00010	145	.00010	146	.00010

147	.00020	148	.00020	149	.00010
150	.00010	151	.00010	152	.00020
153	.00010	154	.00020	155	.00020
156	.00010	157	.00010	158	.00010
159	.00020	160	.00010	161	.00080
162	.00080	163	.00010	164	.00010
165	.00010	166	.00010	167	.00010
168	.00010	169	.00010	170	.00010
171	.00010	172	.00010	173	.00010
174	.00010	175	.00010	176	.00010
177	.00010	178	.00010	179	.00010
180	.00010	181	.00010	182	.00010
183	.00010	184	.00005	185	.00005
186	.00010	187	.00005	188	.00005
189	.00010	190	.00005	191	.00005
192	.00010	193	.00020	194	.00010
195	.00020	196	.00020	197	.00010
198	.00020	199	.00050	200	.00050
201	.00005	202	.00005	203	.00005
204	.00020	205	.00020	206	.00020
207	.00010	208	.00010	209	.00010
210	.00010	0	.00000	0	.00000

4 尾 声

本文所述方法是在实例应用的基础上提出来的, 尽管在本例的应用中得到了较满意的结果, 但底事件概率的确定仍缺乏一定的理论依据, 工作量也相当大。该方法还有待在理论分析的基础上, 进一步完善和发展。

参 考 文 献

- [1] 胡保朝. 失效树分析法在固体火箭发动机可靠性分析中的应用研究: [硕士论文]. 西北工业大学, 1990
- [2] Herrman C R, Ingram G E, and Weiker E L. An Application of the "Requirement Vs Capability" Analysis to Estimating Design Reliability of Solid Rocket Motors. NASA N70-22698
- [3] 胡昌寿. 可靠性工程——设计、试验、分析、管理. 宇航出版社, 1988
- [4] 叶定友. 固体火箭发动机故障统计及分析. 固体火箭推进, 1986 (2)
- [5] 华棣, 顾明初译. 火箭发动机可靠性理论基础. 国防工业出版社
- [6] 黄锡滋. 可靠性技术中的失效树分析法. CF40113
- [7] 吕顺详, 李庆宇著. 质量——可靠性的设计、检验和效益. 知识出版社, 1985
- [8] 张骏华著. 结构可靠性设计与分析. 宇航出版社, 1989. 9
- [9] 航天飞机 STS-6 惯性顶级系统故障分析. AIAA84-1189