弹用涡扇发动机可靠性参数选择及评定方法

王大伟 张利明

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院，北京 100191) (中航工业 120 厂，哈尔滨 150060)

洪 杰

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院，北京 100191)

摘 要：根据弹用涡扇发动机的结构和使用特点，选择平均故障间隔时间 MTBF (Mean Time Between Failure)、起动可靠度 RST(Rate of Startup Successfully)、平均故障前工作时间 MTTF(Mean Time To Failure)作为弹用涡扇发动机的可靠性参数体系. MTBF 是反映发动机基本可靠性参数，利用 Bayes 数据融合技术建立 MTBF 评定模型. RST 是反映发动机起动可靠性参数，利用基于故障树分析方法建立起动可靠性评定模型. MTTF 是反映发动机任务可靠性参数，基于在任务期间发动机关键件的寿命分布模型进行可靠性评定. 通过应用表明：评定参数选择合理，指标评定方法有效，为评估弹用发动机在研制、生产、使用阶段的可靠性水平提供了参考依据.

关 键 词：弹用涡扇发动机；可靠性参数；指标评定；数据融合

中图分类号：TB 114

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)12-1468-05

Selection of reliability parameters and targets assessment for certain missile turbofan engine

Wang Dawei

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Zhang Liming

(Factory 120 of AVIC, Haerbin 150060, China)

Hong Jie

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the characteristics of structures and employments on missile turbofan engine, mean time between failure(MTBF), rate of startup successfully(RST)and mean time to failure(MTTF)were chosen as the parameters of reliability evaluation. MTBF reflect the basic reliability, and MTBF evaluation model was erected based on Bayes data fusion technology. RST reflect starting reliability, and RST evaluation model was established by dint of fault tree analysis. MTTF embody mission reliability, and MTTF distribution model according to key components during operation founded. These evaluation methods are evaluated by application on certain missile turbofan engine. The parameters are selected effectively, the models are correct, and the conclusions can be used as reference in reliability evaluation during development and employment.

Key words: missile turbofan engine; reliability parameter; targets assessment; data fusion

收稿日期：2008-11-28

作者简介：王大伟(1975—)，男，黑龙江齐齐哈尔人，博士生，wangdawei@sjp.buaa.edu.cn.

产品可靠性水平是以某几个参数的具体值(称可靠性指标)来衡量的,正确合理地选择产品的可靠性参数和确定评定方法,对于产品的研制工作具有十分重要的意义.

军用航空发动机可靠性参数和指标可以根据国军标[1-2]的有关规定执行.弹用燃气涡轮发动机是在航空发动机技术上发展起来的,与航空发动机的结构组成特点基本相同,都属于高温高速旋转复杂机械产品,含有可修复和不可修复部件,部件的寿命长短不一,故障模式种类多,工作条件比较复杂等等.但是弹用发动机在贮存、起动、使用等方面又区别于航空发动机.所以,弹用涡扇发动机可靠性参数的选择应以航空发动机常用的可靠性参数为参考,根据自身特点合理选择可靠性参数,以评估发动机在各阶段的可靠性综合水平.

对于可靠性指标评定,数学均值、整体分布等传统的可靠性指标评定方法都是基于整体故障样本计算的,这样得到的可靠性指标对发动机设计实际指导作用有限,因此,有必要研究适合弹用涡扇发动机自身特点的可靠性指标和相应的评定方法.

1　弹用涡扇发动机可靠性参数体系

1.1　弹用发动机特点

1) 小尺寸.由于导弹的外形尺寸和隐身性的要求,弹用发动机的体积和质量必须满足导弹的总体要求,发动机具有较小的体积和较轻的质量.

2) 短寿命(一次使用).弹用涡扇发动机为短工作寿命型,工作寿命包括:发动机出厂的调试与验收试验时间、维护和使用前的检测运转时间、导弹动力航程的飞行时间.工作寿命随导弹的任务剖面变化而变化,一般总寿命为 3～10 h 之间.

3) 不维护或少维护.对于弹用涡扇发动机,降低其维护性是发动机设计中要考虑的问题之一.要求在贮存期间维修量小,长期贮存需要吹转和更换易老化零件等.从技术发展的角度来看,随着材料、防护技术的进步,发动机的维修量会进一步减少,甚至在整个寿命期内不需要任何维护.

4) 长期贮存.弹用涡扇发动机要能长期贮存,保证随时能够发射起动.贮存环境条件对于发动机有影响,主要考虑盐雾、湿热、霉菌和老化等因素的作用,其中非金属材料的老化和金属材料的锈蚀等是重点.

5) 快速起动.弹用涡喷发动机快速起动是其区别于航空发动机的一个重要特征,是满足武器系统使用性的关键指标之一.因此在导弹发射前,弹用涡扇发动机不需要任何维护,不需开启油封,不经过慢车暖机阶段就能够加速到大推力状态.

1.2　参数选择原则

对机械系统可靠性参数的选择应遵循以下基本原则:

1) 应能反映发动机基本可靠性水平.

2) 应能全面反映发动机的战备完好性,接到作战命令时,能及时实施其作战计划.

3) 应能全面反映发动机的任务成功性,即反映发动机在规定任务剖面内完成规定任务的能力.

4) 满足评估要求前提下选择数量最少的参数.

5) 便于预测、验证或统计评估.

6) 各个参数及其指标值之间不应相互矛盾.

1.3　参数选择

目前,弹用涡扇发动机可靠性参数还没有形成统一的评价体系,根据其结构组成、贮存、起动和工作特点,建议弹用涡扇发动机选择以下可靠性参数,以评价发动机设计、研制、生产、使用等阶段的可靠性水平.

1) 平均故障间隔时间.平均故障间隔时间 MTBF(Mean Time Between Failure)衡量弹用涡扇发动机在出厂前的调试与验收试验、维护和使用前的检测运转等过程中的可靠性综合水平.平均故障间隔时间是发动机一个十分重要的基本可靠性参数,它能反映出发动机质量的优劣.

2) 起动可靠度.弹用发动机的起动加速过程就是导弹的起飞过程,必须在规定的时间内达到指定的飞行速度和高度,进入巡航状态.弹用发动机的起动过程是一个非稳态过程,发动机的进气条件、振动力学环境等都在剧烈变化之中,所以,起飞阶段是弹用发动机故障的多发区,因此对弹用涡扇发动机进行起动可靠度 RST(Rate of Startup Successfully)评定是十分必要和关键的.

3) 平均故障前工作时间.在导弹发射后,发动机属于不可修复的成败型系统.平均故障前工作时间 MTTF(Mean Time To Failure)是反映不可修复产品可靠性水平的一个基本参数.平均故障前工作时间反映弹用发动机在发射后持续工作时间的长短,决定了导弹的作战射程和剖面,即反映了系统的任务可靠性指标.

2　弹用涡扇发动机可靠性指标评定

2.1　基于 Bayes 数据融合的 MTBF 评定模型

1) 使用的数据.作为弹用涡扇发动机的基本

可靠性参数,MTBF的评定采用发动机在出厂的调试与验收试验、维护和使用前的检测运转等过程中的全部故障数据.

2) 故障分类.弹用涡扇发动机在结构上与航空发动机一样,由主机和附件系统构成.对故障进行分析定位,按照故障所属的系统进行分类.确定故障所属是主机故障还是附件系统故障.对于主机故障要按照压气机组件、燃烧室组件、涡轮组件分类.附件系统的故障要对故障所属的系统分类,如燃油系统,滑油系统,电子系统等.

3) 系统级MTBF评定.对每一类故障进行分布检验、参数估计、MTBF指标计算.由于结构复杂,各故障件的寿命长短不一,各类故障有各自的分布类型和分布参数.分布模型的建立需要确定分布类型和参数估计,寿命分布类型可由失效机理和工程应用经验或工程上常用的分布拟合优度检验方法来确定;参数估计在工程上有很多常用的估计方法,如极大似然法、矩法和图估法等等.具体分布拟合优度检验方法和常用参数估计方法可见文献[3-4].

4) 总体MTBF评定.发动机整机可靠性指标是各组件和系统综合作用的结果,总体MTBF由发动机各组件和系统的MTBF融合得到.Bayes方法是一种有效的多源数据融合方法,Bayes融合方法的基本思想是利用先验信息融合样本数据得到后验分布,根据后验分布进行可靠性评估[5-6],Bayes公式为

$$\pi(\theta \mid x)=\frac{\pi(\theta)p(x \mid \theta)}{\int_{\Theta}\pi(\theta)p(x \mid \theta)\mathrm{d}\theta}$$

根据Bayes公式的前提条件和"相继律"原理,将发动机各类故障逐步融合,最后得到发动机总体MTBF后验分布,根据此分布进行总体MTBF评定.MTBF评定流程如图1所示.

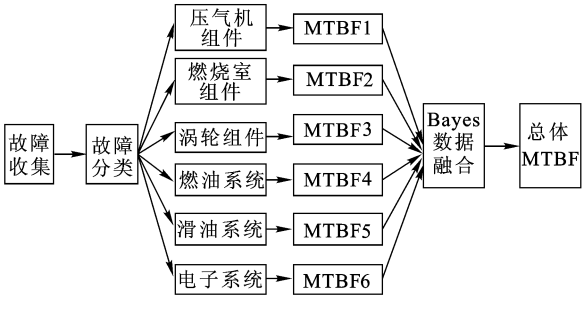


图1 MTBF评定流程

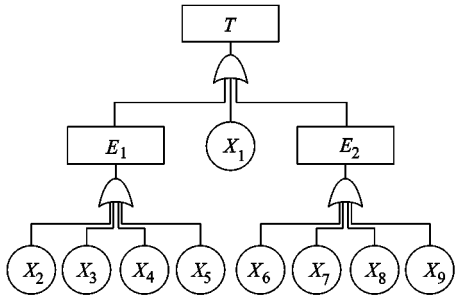
2.2 基于起动故障树的RST的评定模型

在研制期间,由于没有或很少有在外场使用的数据样本,用统计定义求起动成功率很困难.本文从影响发动机起动因素分析,建立发动机起动故障树,根据基本事件的概率及其逻辑关系建立起动可靠性评定模型.

1) 建立起动系统故障树

故障树分析FTA(Fault Tree Analysis)是系统安全分析方法中十分重要并且广泛应用的一种方法.该方法能对各种系统的危险性进行识别评价,是故障事件在一定条件下的逻辑推理分析方法.它是围绕某些特定的状态作层层深入的分析,以清晰故障树图形表达了零部件与系统间的关系.

弹用涡扇发动机的结构特点决定起动可靠性的主要因素是起动系统和燃油系统,根据起动系统和燃油系统的组成结构和工作过程,建立弹用涡扇发动机起动系统故障树模型,如图2所示,这是建立发动机起动系统数学模型的前提和基础.



T—发动机起动失败;E_1—起动系统故障;E_2—燃油系统故障;X_1—起动指令传输失败;X_2—烟火起动器故障;X_3—电爆管故障;X_4—点火线圈短路;X_5—点火电嘴故障;X_6—燃油泵故障;X_7—燃油分配器故障;X_8—燃油控制器故障;X_9—燃油喷嘴故障.

图2 起动系统故障树

2) 顶事件发生概率

顶事件状态Φ取决于故障树中基本事件状态X和故障树的结构,即

$$\Phi=\Phi(X)$$

当逻辑结构为与门时,顶事件发生概率为

$$F_T(t)=\prod_{i=1}^{n}F_i(t)=F_1(t)F_2(t)\cdots F_n(t)$$

可靠度函数为

$$R_T(t)=1-\prod_{i=1}^{n}(1-R_i(t))=$$
$$1-[1-R_1(t)][1-R_2(t)]\cdots[1-R_n(t)]$$

当逻辑结构为或门时,顶事件发生概率为

$$F_T(t)=1-\prod_{i=1}^{n}(1-F_i(t))=$$
$$1-[1-F_1(t)][1-F_2(t)]\cdots[1-F_n(t)]$$

可靠度函数为

$$R_T(t)=\prod_{i=1}^{n}R_i(t)=R_1(t)R_2(t)\cdots R_n(t)$$

发动机起动系统故障树基本事件发生的概率来源于生产、试验、使用方面的统计数据. 对于国产电子元器件的故障概率,可采用 GJB299B《电子设备可靠性预计手册》和《电子设备贮存与不工作可靠性预计方法》等进行预计;对于进口的电子元器件,则可采用美军标 MIL-HDBK-217E《电子设备可靠性预计》进行预计;对于机械零部件可参考《机械设备可靠性预计程序手册》结合发动机在试验和使用过程中的实际情况进行可靠性预计.

3) 基本事件概率重要度分析

确定哪些基本事件对系统或顶事件具有致命性的影响,哪些具有轻微影响,衡量这种影响大小的尺度称为重要度.

概率重要度的定义是:在已知基本事件的不可靠度(或可靠度)的情况下,基本事件发生时与不发生时相比,系统不可靠度(顶事件发生的概率)的减少量. 也就是说某基本事件 i 从故障状态变为正常状态时,系统的不可靠度(即顶事件发生的概率)降低了多少(或可靠度增加了多少),其概率计算公式为

$$F_{系统}[当\ \Phi(X_i)=1]-F_{系统}[当\ \Phi(X_i)=0]=\Delta F$$

2.3　基于关键件寿命分布的 MTTF 评定模型

MTTF 是弹用涡扇发动机任务可靠性参数,对于弹用涡扇发动机,确定任务可靠性指标时只考虑在任务期间发动机致命性故障的影响. 任务可靠性主要取决于各关键件的寿命分布,因此可以采用关键件概率寿命模型进行 MTTF 的评估. 例如涡轮叶片,由于处于高温、高转速工作环境,是影响发动机工作寿命的关键因素,而对于燃油系统、电气系统等故障,也可能会造成致命性影响,但它们的工作寿命一般很长,和关键件相比强度储备较大. 因此,一般将涡轮叶片等关键件的断裂故障视为评定发动机 MTTF 的主要数据.

根据关键件的失效机理,用威布尔分布建立发动机关键件的寿命分布模型,采用 Bayes 数据融合方法得到发动机总体 MTTF 的后验分布进行评定.

3　应用实例

3.1　MTBF 评定

根据某型弹用涡扇发动机在试车过程中的故障数据,进行分析、整理,出现频率较高的典型故障有发动机振动超标、发动机超温、燃油分配器故障、管路漏油等故障. 建立发动机故障数据库,经分布拟合检验、参数估计、数据融合,分别建立主机和附件系统的故障分布模型,再进行整机数据融合得到总体 MTBF. 融合过程如图 3～图 5 所示,系统级和总体 MTBF 指标计算结果如表 1 所示.

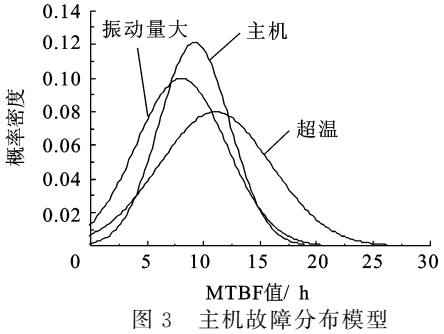


图 3　主机故障分布模型

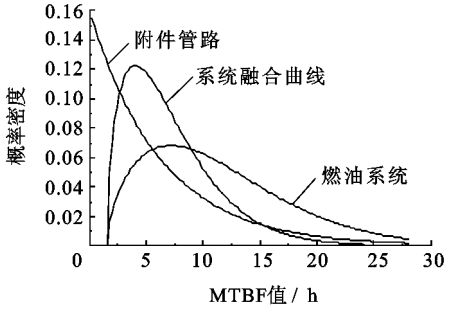


图 4　附件系统故障分布模型

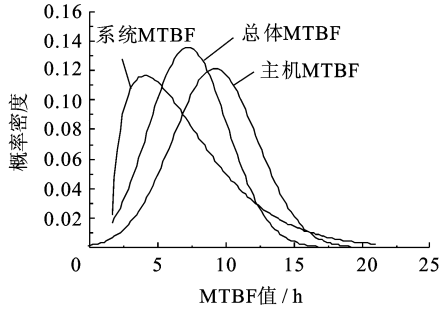


图 5　总体故障分布模型

表 1　弹用涡扇发动机 MTBF 计算结果

名称		分布类型	分布参数	系统级 MTBF 值/h	总体 MTBF 值/h
主机	振动超标	正态分布	$\mu=7.9$　$\sigma=3.8$	9.2	7.4
	超温	正态分布	$\mu=11.2$　$\sigma=4.9$	9.2	7.4
燃油系统		威布尔分布	$t_0=3.3$　$m=1.54$　$\eta=10.5$	12.7	7.4
附件管路		指数分布	$\lambda=0.17$	5.6	7.4

3.2 起动可靠性评定

采用基于起动故障树的起动可靠性评定模型对某型弹用涡扇发动机进行起动可靠性评定.发动机顶事件起动失败发生概率计算式为

$$F_T = 1-(1-F_{X_1})(1-F_{E_1})(1-F_{E_2})$$

式中,$F_{E_1}=1-\prod_{i=2}^{5}(1-F_{X_i})$;$F_{E_2}=1-\prod_{i=6}^{9}(1-F_{X_i})$.

得到 $F_T=0.0243$,即起动可靠度 $R=0.9757$,基本事件中燃油分配器故障概率最大,其概率重要度也最大,为0.9933,如表2所示.所以降低燃油分配器故障率是提高发动机起动可靠度的重点.

表2 基本事件发生概率和重要度

序号	基本事件名称	发生概率	概率重要度
X_1	起动指令传输失败	0.0002	0.9568
X_2	烟火起动器故障	0.0002	0.9568
X_3	电爆管故障	0.0005	0.9571
X_4	点火线圈短路	0.0006	0.9580
X_5	点火电嘴故障	0.0002	0.9568
X_6	燃油泵故障	0.0005	0.9571
X_7	燃油分配器故障	0.0201	0.9933
X_8	燃油控制器故障	0.0005	0.9571
X_9	燃油喷嘴故障	0.0001	0.9567

3.3 MTTF评定

影响发动机MTTF的主要因素包括高压涡轮叶片断裂故障、主轴承磨损、涡轮轴、盘的断裂等关键件故障.各故障模式的强度储备不同,根据某型弹用涡扇发动机使用实际情况和主要故障的分析结果,涡轮轴和轮盘的寿命较长,强度储备较大,故在整机寿命评估中不予考虑,只考虑高压涡轮叶片和主轴承的寿命分布.

由高压涡轮叶片和主轴承两种故障模式得到整机寿命分布如图6所示.

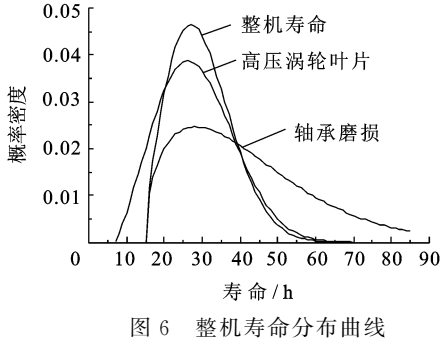


图6 整机寿命分布曲线

整机寿命服从威布尔分布,得到发动机MTTF指标为

$$T_{\mathrm{IF}}=E(t)=t_0+\eta\Gamma\left(1+\frac{1}{m}\right)=29.6\ \mathrm{h}$$

需要指出,各关键件的强度储备会随着飞行任务剖面的不同而发生改变,因此,选择哪些关键件计算发动机MTTF指标要考虑到飞行载荷的变化.

4 结束语

本文对弹用涡扇发动机可靠性参数体系选择和指标评定方法进行了研究.参考军用航空发动机可靠性参数,结合弹用涡扇发动机的结构和使用特点,选择平均故障间隔时间MTBF、起动可靠度RST、平均故障前工作时间MTTF作为可靠性参数体系.分别对3个可靠性指标的评定方法进行研究,建立了可靠性指标评定模型.对某型弹用涡扇发动机的应用表明,可靠性参数选择合理,评定方法有效,为全面衡量发动机在设计、研制、生产、使用阶段的可靠性水平提供了参考依据.

参考文献(References)

[1] GJB1909-5-94,装备可靠性维修性参数选择和指标确定要求(军用飞机)[S]
GJB1909-5-94, Reliability and maintainability parameter selection and methods of their indexof equipment(military aircraft)[S](in Chinese)

[2] GJB241-87,航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范[S]
GJB 241-87, General criterion of jet turbine engineand fan jet engine[S](in Chinese)

[3] 周源泉.质量可靠性增长与评定方法[M].北京:北京航空航天大学出版社,1997:27-68
Zhou Yuanquan. Quality reliability growth evaluation method[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1997:27-68(in Chinese)

[4] Kececioglu D. Reliability and life testing handbook[M]. New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993:102-135

[5] Erto P. New practical Bayes estimates for the 2-parameter Weibull distribution[J]. Microelectronics Reliability, 1994, 34(5):789-802

[6] Elperin T, Gertsbakh I. Bayes credibility estimation of an Exponential parameter for random censoring & incomplete information[J]. IEEE Trans on Reliability, 1990, 39(2): 204-208

(编 辑:张 嵘)