

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.06.12

液体火箭发动机地面试验测量系统可靠性评定

刘子星¹, 郭洪业¹, 杨懿^{2*}, 郭亚男²

(1.北京动力机械研究所, 北京 100074; 2.北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘要: 为解决液体火箭发动机地面试验测量系统可靠性评定信息不全面的问题, 对影响液体火箭发动机地面试验测量系统评定的因素进行分析。首先, 将性能可靠性指标和功能可靠性指标作为测量系统可靠性的衡量标准, 给出了液体火箭发动机地面试验测量系统可靠性的定义。然后, 将测量系统不确定度作为性能可靠性指标纳入测量系统可靠度评定体系, 建立测量不确定度与经典可靠性之间的联系; 将分系统单元失效次数作为功能可靠性的评价指标, 制定融合多源可靠性信息的系统可靠性评定策略。之后, 阐述了可靠性数据收集、可靠性信息转换、可靠性信息综合、金字塔式系统可靠性评定和基于专家线性加权的可靠性评定的原理及实现方法。最后, 以某型号液体火箭发动机地面试验测量系统为例, 评定测量系统的可靠性, 结果显示融合多源可靠性信息的金字塔式综合评定法能够准确分析液体火箭发动机地面试验测量系统可靠性, 基于专家线性加权信息融合评定方法能够定位系统中的重点关注对象, 查找薄弱环节。研究成果为行业内技术人员研究、评定测量系统可靠性提供了新的思路和方法, 对于提高型号产品质量、测量数据质量和系统可靠性具有重要意义。

关键词: 液体火箭发动机; 测量系统; 可靠性; 测量不确定度; 金字塔式综合评定; 专家线性加权

中图分类号: TB9; V438+.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2023) 06-0100-14

Reliability evaluation of measurement system for liquid rocket engine ground test

LIU Zixing¹, GUO Hongye¹, YANG Yi^{2*}, GUO Yanan²

(1.Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China;

2.Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: In order to solve the problem of incomplete information in the reliability evaluation of ground test measurement systems for liquid rocket engines, the factors that affect the evaluation of ground test measurement systems for liquid rocket engines are analyzed in this paper. Firstly, the performance reliability index and functional reliability index are used as the measurement standards for the reliability of the measurement system, and the definition of the reliability of the ground test measurement system for liquid rocket engines is given. The uncertainty of the measurement system is incorporated as a performance reliability indicator into the measurement system reliability evaluation system, and the relationship between measurement uncertainty and classical reliability is established. Then, the number of failures of subsystem units is used as an evaluation indicator of functional reliability. A system reliability assessment strategy that integrates multi-source reliability information is developed. Afterwards, the principles and implementation methods of reliability data collection, reliability information conversion, reliability information synthesis, pyramid system reliability

收稿日期: 2023-11-27; 修回日期: 2023-12-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0603702); 国家自然科学基金项目(51976178)

引用格式: 刘子星, 郭洪业, 杨懿, 等. 液体火箭发动机地面试验测量系统可靠性评定[J]. 计测技术, 2023, 43(6): 100-113.

Citation: LIU Z X, GUO H Y, YANG Y, et al. Reliability evaluation of measurement system for liquid rocket engine ground test[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 100-113.



evaluation, and reliability evaluation based on expert linear weighting were elaborated. Finally, taking the ground test measurement system of a certain type of liquid rocket engine as an example, the reliability of the measurement system is evaluated. The results show that the pyramid comprehensive evaluation method that integrates multi-source reliability information can accurately analyze the reliability of the ground test measurement system of liquid rocket engines, and the expert linear weighted information fusion evaluation method can locate the key focus objects in the system and identify weak links. Not only does the research result provide new ideas and methods for technical personnel in the industry to study and evaluate the reliability of measurement systems, but it also has great significance for improving the quality of model products, measurement data quality, and system reliability.

Key words: liquid rocket engine; measurement system; reliability; measurement uncertainty; pyramid comprehensive evaluation; expert linear weighting

0 引言

液体火箭发动机地面试验测量系统的主要功能是在发动机地面试验的过程中准确测量、采集发动机和试车台工艺管路系统的数据,为评判发动机性能(比冲、推力和混合比等)、工作状态和试验台的技术能力等提供可靠、精确的数据支撑^[1]。

液体火箭发动机作为运载火箭的重要动力源,工作时处于强振动、高温和高压的恶劣环境下,这对液体火箭发动机地面试验测量系统工作的可靠性提出了很高的要求。而随着高密度型号试验任务的增加,测量系统长期超负荷运转、维护保养不及时等原因导致其可靠性下降,大大增加了故障发生的概率。以往运行过程中所产生的一系列故障也突显了加强可靠性验证和评定的重要性。

液体火箭发动机地面试验测量系统的可靠性是保障试验测量量值输出质量和建立可靠性试验数据库的重要基础。测量系统的可靠性不仅关系到试验参数测量工作的成败和测量数据的准确性,还影响发动机性能的评估、全系统型号试验、发射任务的周期以及试验的经济成本。

目前,航天系统有多位研究人员对产品/系统的可靠性进行了研究。

谭松林等^[2]总结了航天领域液体火箭发动机可靠性工程的研制经验,从系统可靠性建模与分配、可靠性预计、可靠性分析、可靠性试验、可靠性评定和可靠性管理等方面进行系统论述,但是缺少对测量系统等具有多层结构的系统可靠性信息进行融合的方法论述。

谭永华等^[3]提出双线可靠性评定的方法,将发动机组件、部件故障率的可靠性模型和试验数据威布尔模型相结合,并采用贝叶斯方法进行双线融合,得到发动机可靠性的后验分布,但是缺少对输出测量数据的测量系统可靠性的分析。

吴嘉宁、肖刚等^[4-5]对卫星太阳翼、固体火箭发动机的可靠性进行了研究,这些研究侧重于结构可靠性分析与参数单元可靠性分布类型探究,但是缺少对系统性能可靠性的分析。

冯铁山等^[6]针对运载火箭测量系统多结构、多层次的特点,结合实际的需求,以贝叶斯理论为基础,引入继承因子,采用经典可靠性理论中的金字塔式可靠性评定方法,对运载火箭的测量系统可靠性进行评定,该方法为运载火箭领域复杂系统可靠性的评定提供了参考,但是引入继承因子带有一定的主观经验性,也增加了分析计算的误差。

曹焱、孙有朝、赵璐等^[7-12]介绍了信息熵理论在可靠性评定领域中的应用。针对小样本置信下限计算困难的缺陷,研究了复杂系统和系统单元的可靠性熵方法的评定过程、基于信息熵法的成败型和指数型信息折合模型,分析了串联、并联与和联系统可靠性熵法评定方法和系统可靠性熵法置信下限模型。但是上述方法是否适用于测量系统等具备多层级可靠性信息的系统还有待进一步研究。

针对液体火箭发动机地面试验测量系统可靠性评定信息不全面的问题,本文分析业内测量系统可靠性的研究现状,结合科研实践给出测量系统可靠性的定义,将性能可靠性和功能可靠性作

为测量系统可靠性的评定指标,建立测量不确定度与经典可靠性之间的联系。分别采用金字塔式综合评定方法和基于专家线性加权的综合评定方法评定测量系统的可靠性,为相关研究人员及时掌握测量系统状态、提高发动机性能评估的准确性、优化产品设计提供参考依据。

1 测量系统可靠性现状、评价指标及定义

1.1 测量系统可靠性现状分析

可靠性是指产品/系统在完成规定任务的过程中不发生故障的概率^[13]。但是对于液体火箭发动机试验而言,测量系统的可靠性有其特殊性,需要同时满足两方面要求:

1) 测量数据的可靠性要求

测量数据是评价发动机性能和试车台技术能力的重要指标。长期以来,火箭发动机试验领域一直以测量数据不确定度作为评价测量数据是否准确可靠的标准。系统建立后,测量数据不确定度评定结果必须满足试验任务书的要求。

2) 测量系统运行的可靠性要求

测量系统在工作周期内能够正常运行是测量系统获取试验数据的前提。目前,试车台测量系统的评估侧重于“测量数据的可靠性要求”,但是对“测量系统正常运行的可靠性”的考核评价研究较少,导致一线技术人员对测量系统可靠性的状态了解不足,对影响整个测量系统可靠性的因素了解不充分,不便于制定提高测量系统可靠性的措施。此外,针对液体火箭发动机试验领域测量系统可靠性综合评价的研究较少,也缺少相关的标准以及规范。

1.2 航天领域可靠性评价指标分析

目前,航天领域对各类型产品的可靠性评价指标可以分为两类:①性能可靠性指标,例如发动机的比冲、质推比,导弹的射程、射击精度,航天器供电电源的负载调整率、稳压调整率等;②功能可靠性指标,其反映产品/系统按照规定要求保持正常工作性能的能力,主要包括平均寿命、工作失效率和可靠寿命等^[16],多应用于发动机及相关组合件结构可靠性和工艺系统可靠性等方面的研究,研究成果较为成熟,已建立行业级或国家级的标准规范。

1.3 测量系统可靠性定义

根据测量系统可靠性现状和航天领域可靠性评价指标的分析,结合液体火箭发动机试验领域的实际情况,本文将“测量数据的可靠性要求”定义为测量系统的性能可靠性指标。对于测量系统而言,性能可靠性指标通常指其测量量值的准确程度,一般用测量不确定度^[14]来衡量测量系统的性能可靠性指标。测量系统的性能可靠性指标满足相应要求是测量系统能够投入使用的前提^[15]。

将“测量系统运行的可靠性要求”作为测量系统的功能可靠性指标。对于测量系统而言,功能可靠性指标通常指在规定时间内和规定条件下,测量系统保持性能可靠性指标满足相应要求的能力。测量系统的功能可靠性指标满足相应要求是测量系统能够长久、正常运行的基础。

本文在经典可靠性定义的基础上,将测量系统可靠性定义为在规定时间内和规定条件下,测量系统正常工作且测量数据的量值满足规定要求的概率。数学形式表示为

$$R(t) = P((\xi > t) \cap (U_0 > U_x)) \quad (1)$$

式中: t 为规定的任务时间, ξ 为产品从工作状态正常至失效所经历的时间, U_x 为测量系统不确定度, U_0 为任务书中所要求的测量系统不确定度, $R(t)$ 为测量系统可靠性。

测量系统可靠性的定义同时包含了性能可靠性指标和功能可靠性指标。

2 测量系统可靠性评定策略

根据经典可靠性理论,任意产品/系统的可靠度真值在理论上是存在的^[16]。但是液体火箭发动机试验测量系统结构复杂、设备种类繁多、分系统分布类型不一致,通过收集大量可靠性信息来计算精确置信下限的方式不仅需要耗费大量的人力、物力和财力,而且试验周期过长,无法满足密集发射任务要求。此外,由于全系统级的试验需要协调的资源多、准备周期较长、成本高,全系统级的可靠性信息较少。以分系统或者组成单元为单位进行可靠性试验(如各种冷调试验、气密性试验等)所积累的可靠性信息较多,其中包含了功能可靠性信息(失效次数、使用寿命等)和性能可靠性信息(测量分系统的测量不确定度)。

液体火箭发动机地面试验测量系统一般分为7个分系统，分别为稳态压力测量系统、温度测量系统、流量测量系统、推力测量系统、脉动压力测量系统、振动测量系统和紧急关机系统。液体火箭发动机地面试验测量系统的组成如图1所示。

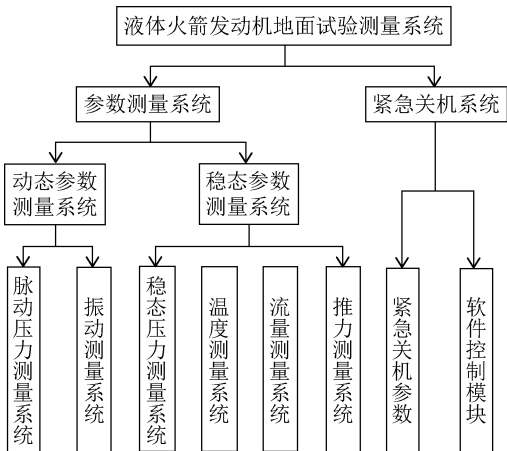


图1 测量系统组成图

Fig.1 Composition diagram of measurement system

由图1可知，测量系统呈现典型的分层结构，即全系统-分系统-组成单元/设备。

根据经典可靠性理论中信息融合理论和复杂系统的评定方法，制定基于融合多源可靠性信息的测量系统评定策略实施路线图如图2所示，具体步骤为：

- 1) 收集并充分利用测量系统各组成单元的性能可靠性指标信息和功能可靠性指标信息；
- 2) 建立性能可靠性信息和功能可靠性信息之间的联系：性能可靠性试验信息以各分系统的测

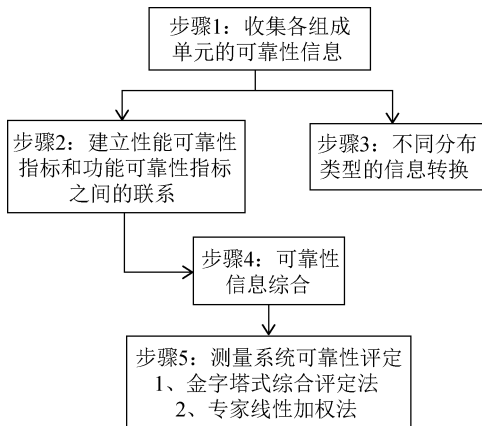


图2 基于融合多源可靠性信息的评定策略实施路线图

Fig.2 Implementation roadmap of assessment strategy based on fusion of multi-source reliability information

量不确定度数据为衡量指标；功能可靠性试验信息则以各分系统和组成单元的历史试验信息(成败型试验信息或者寿命型试验信息)为依据；

- 3) 对不同类型的可靠性信息进行相应转换，采用不同方法合理地分层结构内的可靠性信息进行综合；
- 4) 对可靠性试验信息进行综合；
- 5) 分别采用金字塔式综合评定方法和专家线性加权方法对测量系统可靠性进行综合评定，给出测量系统可靠性的定量评价，并对比分析两种方法的特点。

3 测量系统可靠性评定方法

根据测量系统分层结构的特征，结合评定策略，制定测量系统可靠性评定路线图如图3所示。其中，MML为修正极大似然估计(Modification of the Maximum Likelihood)，CMSR为修正极大似然结合序贯压缩(Combined MML and Sequential Reduction)^[17]。

3.1 收集可靠性数据

可靠性数据是指在产品/系统的生命周期各阶段的可靠性工作及活动中所产生的，能够反映产

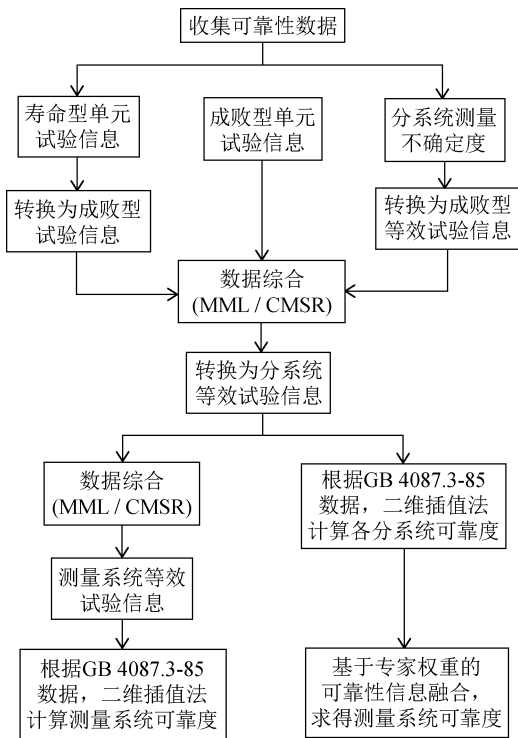


图3 测量系统可靠性评定路线图

Fig.3 Roadmap of measurement system reliability assessment

品/系统可靠性水平及状况的各种数据^[17]。液体火箭发动机地面试验测量系统的可靠性数据主要来源于各种类型的可靠性试验。本文中,通过测量数据的不确定度衡量性能可靠性指标信息。可根据国际通用不确定度评定A、B类方法^[14]和行业内制定的相关标准、规范,分析测量系统的不确定度来源,评定各测量分系统的测量不确定度。功能可靠性指标的可靠性信息来源于各分系统组成单元设备的失效次数。设备的失效数可以通过系统运行过程中的统计数据得知。

3.2 可靠性信息转换

收集各类型的可靠性信息后需要进行可靠性信息转换,主要包括性能可靠性指标数据转换和功能可靠性数据转换两方面内容。

3.2.1 性能可靠性信息转换

性能可靠性信息来源于测量不确定度。测量不确定度取值范围为(0 ~ 1)。根据A、B类测量不确定度的定义,用不同于对测量样本统计分析的方法进行不确定度评定的方法称为B类评定方法。液体火箭发动机试验测量系统的试验次数有限,测量积累的数据不足,在缺乏其他信息的情况下,本文将之视为均匀分布,采用B类评定方法。在满足总体任务书所规定的不确定度指标要求的前提下,测量系统的不确定度数值越接近0,表明测量数据的质量越高,测量系统的性能越好。功能可靠性以不发生故障的概率来表示,取值范围为(0 ~ 1),其数值越接近1,表明可靠度越高。两类指标描述优秀特性(性能越好或者可靠度越高)时,数值变化趋势是相反的,不利于不确定度信息的转化和融合。统一不确定度和可靠度数值变化趋势是建立测量不确定度和可靠度之间关系,实现性能可靠性指标和功能可靠性指标转换、融合的前提。解决方法如下:

建立测量数据可靠度的概念,其定义为:测量系统的测量不确定度满足试验任务书所提出指标要求的程度。测量数据可靠度的变化范围为(0 ~ 1),其数值越接近1,表明数据可靠程度越高。

测量数据可靠度的数学模型为:设任务书对航天产品的可靠度要求为 R_0 ,实际评定得到的测量数据可靠度为 R_x 。任务书对测量系统不确定度

指标要求为 U_0 ,测量系统不确定度评定结果为 U_x 。若 $U_x > U_0$,根据任务书的要求,不可以开展测量任务;若 $U_x < U_0$,可开展测量任务。已知测量数据可靠度上限值 $R_H = 1$ 。根据 (U_0, R_0) 、 $(U_x = 0, R_H = 1)$ 两点信息在坐标轴上拟合一元线性方程

$$R_x = aU_x + b \quad (2)$$

式中: a 、 b 为常数。求解式(2)即可得到测量不确定度数值与数据可靠度之间的线性关系。以 U_x 作为输入条件,输出值即为 R_x 。

求得 R_x 后,对于测量系统所执行的测量任务而言,如果数据可靠度满足要求,则能执行测量任务;如果数据可靠度不满足要求,则不能执行测量任务。即数据可靠度 R_x 满足要求=成功,数据可靠度 R_x 不满足要求=失败。因此,可以根据区间估计理论,将数据可靠度的结果视为二项成败型信息,将数据可靠度的变化区间视为其置信区间,将数据可靠度的区间数值转换为成败型等效试验信息。

工程应用中,对于故障检测率、可靠性等的估计,其上限值越大越好,一般不予考虑;技术人员重点关注的是其下限值。根据参数估计理论中单侧置信下限估计的方法^[18]可得

$$\sum_{i=0}^F \binom{n}{i} R_L^{n-i} (1 - R_L)^i = 1 - \gamma \quad (3)$$

式中: F 为产品 n 次试验中的失败次数, $F > 0$; R_L 为测量系统单侧可靠性置信下限; γ 为置信水平, $\gamma = 0.9$; n 为试验次数。

根据式(2)计算得到数据可靠度,将其作为测量系统单侧可靠性置信下限代入式(3),求解得到等效试验次数。求解过程较为繁琐,为便于求近似解,可以根据参考文献[19],采用线性插值法,计算得到等效试验次数和置信下限值,从而将数据可靠度转换为成败型等效试验信息。

3.2.2 功能可靠性信息转换

功能可靠性指标的数据一般来源于统计信息,例如平均寿命时间、工作失效的概率等,一般服从指数分布、正态分布、威布尔分布或伽马分布等^[17]。测量系统各分系统、组成单元的可靠性试验信息分布类型也存在差别,一般为指数寿命分布型或二项成败分布型。在进行可靠性信息转换的过程中需要解决数据来源和分布类型不同的问题。

本文的解决方案是将指数寿命分布型信息转换为二项成败型试验信息,具体方法详见文献[18]。

3.3 可靠性信息综合

采用MML法以及CMSR法作为各分系统的信息综合方法具有以下4个方面的优点^[17]:

1) 计算简单、公式易于理解、操作方便,尤其适用于由多个部件/子系统串联组成的系统,易于指导工程实践。

2) 在单元有/无失效情况下,可以互为补充。

3) 物理意义清晰,非常便于结合金字塔式系统综合评定方法,对具有多层级、组成成分系统/单元较多、单元失效分布类型为指数分布/二项成败分布特征的复杂系统的可靠性进行评定。

4) 已有较为成熟的指数分布型数据和二项成败型数据相互转换的方法,数据转换较易实现。

3.3.1 MML法的基本原理

系统中包含 m 个子系统,系统可靠性与子系统可靠性之间的关系为 $R_s = R(R_1, R_2, \dots, R_m)$,若第 j 子系统在 n_j 次成败型试验中有 r_j 次失效、 s_j 次成功,则系统可靠性的极大似然估计为 $\hat{R}_s = R(\hat{R}_1, \hat{R}_2, \dots, \hat{R}_m)$,令 $\hat{R}_i$ 为 R_i 的极大似然估计,即

$$\hat{R}_i = \frac{s_i}{n_i}, i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

R_s 的方差为

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial R_s}{\partial R_i} \right]^2 \text{Var}(\hat{R}_i) \quad (5)$$

式中: $\text{Var}(\hat{R}_i) = \hat{R}_i(1 - \hat{R}_i)/n_i$ 。 σ^2 的估计量为

$$\hat{\sigma}^2 = \sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial R_s}{\partial R_i} \right]_{R_i = \hat{R}_i}^2 \text{Var}(\hat{R}_i) \quad (6)$$

式中: $\text{Var}(\hat{R}_i) = \hat{R}_i$ 。令 $\hat{n} = \hat{R}_s(1 - \hat{R}_s)/\hat{\sigma}^2$, $\hat{s} = \hat{n}\hat{R}_s$,将 $(\hat{n}, \hat{s})$ 看作系统进行 $\hat{n}$ 次成败型试验,其中 $\hat{s}$ 次成功,根据二项分布参数的区间估计方法求解 R_s 的置信下限。采用插值法进行计算,公式如下

$$n_* = \begin{cases} [\hat{n}] + 1, & \text{当}\hat{n}\text{不等于整数时} \\ \hat{n}, & \text{当}\hat{n}\text{等于整数时} \end{cases} \quad (7)$$

$$s^* = \begin{cases} [\hat{s}] + 1, & \text{当}\hat{s}\text{不等于整数时} \\ \hat{s}, & \text{当}\hat{s}\text{等于整数时} \end{cases} \quad (8)$$

根据 (n_*, s^*) 求得二项分布参数的置信下限,并将其作为 R_s 的置信下限。计算方法为:设系统由 m 个成败型单元串联而成,第 i 个单元试验次数为 n_i ,成功次数为 x_i , $i = 1 \sim m$,则系统等效失败

次数 $\hat{F}$ 、等效成功次数 $\hat{x}$ 和等效试验次数 $\hat{n}$ 由式(9)~式(11)求得。

$$\hat{n} = \left(\prod_{i=1}^m \frac{n_i}{x_i} - 1 \right) / \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{x_i} - \sum_{i=1}^m \frac{1}{n_i} \right) \quad (9)$$

$$\hat{x} = \hat{n} \prod_{i=1}^m (x_i / n_i) \quad (10)$$

$$\hat{F} = \hat{n} - \hat{x} \quad (11)$$

根据 γ 、 $\hat{F}$ 和 $\hat{n}$,查阅参考文献[19],得到系统近似置信下限 R_L 。由上述分析可知,MML法的优点是计算过程简单,适用于多种小样本量、不同分布的可靠性综合模型。但是当某一单元的试验信息 $x_j = n_j$ 时,系统的等效试验数据 $\hat{n}$ 、 $\hat{x}$ 和 x_j 、 n_j 无关,则不宜采用MML法。

3.3.2 CMSR法的基本原理

设系统由 m 个成败型单元串联而成,第 i 个单元试验次数为 n_i ,成功次数为 x_i , $i = 1 \sim m$ 。在 i 个单元试验中存在无失败单元,即该单元的试验次数等于成功次数。使用CMSR法求解系统可靠性置信下限分为以下两个步骤:

1) 将 m 个单元的试验信息 n_i ($i = 1 \sim m$)按数值从大到小进行排序。

2) 舍掉所组成单元中试验次数非最小的无失败单元的数据后,在剩下数据中,令试验次数最小的无失败单元为 (n_l, x_l) ,试验次数大于 n_l 的最小有失败单元为 (n_i, x_i) ,即 $n_i \geq n_l$, $n_i > x_i$, $n_l = x_l$ 。按照式(12)~式(14)压缩综合两个单元的试验信息。

当 $x_i > n_l$ 时

$$\left\{ \begin{array}{l} (n_i, x_i) \rightarrow (n_i \frac{n_l}{x_i}, x_i) \\ (n_l, x_l) \rightarrow (n_l, x_l) \end{array} \right\} \rightarrow (n_i \frac{n_l}{x_i}, x_l) \quad (12)$$

当 $x_i = n_l$ 时

$$(n_i, x_i), (n_l, x_l) \rightarrow (n_i \frac{n_l}{x_i}, x_l) \quad (13)$$

当 $x_i < n_l$ 时

$$(n_i, x_i), (n_l, x_l) \rightarrow (n_i, x_i \frac{x_l}{n_l}) \quad (14)$$

3.4 金字塔式系统可靠性综合评定

按照金字塔式评定方法的分层原理,液体火箭发动机试验测量系统可以分为全系统-分系统-组成单元-测量设备、元器件的多级结构,如图4所示。

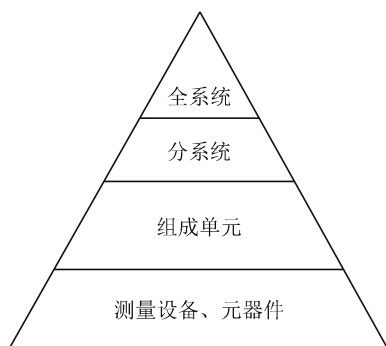


图4 测量系统金字塔分层结构图

Fig.4 Pyramid hierarchical structure of measurement system

金字塔式综合评定的步骤如下:

1) 画出分系统可靠性框图, 对于串并联混合型系统, 一般先评定并联系统, 再与其他系统组成串联系统;

2) 确定各组成单元中设备的可靠性分布类型;

3) 将组成单元不同类型可靠性试验数据转换为同一类型等效试验信息(本文中指数寿命型试验信息转换为二项成败型等效试验信息);

4) 根据分系统的等效试验信息, 采用相应的可靠性综合评定方法计算分系统的等效试验信息和可靠度置信下限。

根据分系统的等效试验信息, 依照步骤4)中的可靠性综合评定方法计算全系统等效试验信息和可靠度置信下限。

3.5 基于专家线性加权的信息融合

专家信息是指行业内的专家凭借自身的专业知识、多年积累的工作经验和认识, 对产品的相关指标给出的主观判断。自20世纪60年代起, 国外已有诸多学者对专家信息的提取、转化和融合进行了研究^[20-22]。该方法充分利用专家自身的知识以及在多年生产实践中所积累的经验等信息, 虽然带有一定的主观性, 但是凭借其对信息合理、规范、的描述, 在生产实践中得到了广泛应用。

在采用经典可靠性评定方法计算测量系统各分系统可靠度的基础上, 充分利用行业内专家信息的优势, 将测量系统的技术要素作为测量系统可靠性的评估依据, 通过调查问卷的方式收集专家对各分系统的评定信息, 采用专家线性加权融合方法分配各分系统的可靠性信息权重, 再合成测量系统的可靠度。以经典可靠性评定方法的分析计算结果为基础, 保证各分系统可靠性信息的

准确性, 有效避免了专家主观信息过度地影响评定结果。专家以计算结果为基础所给出的权重值充分融合了专家从全局高度对各测量分系统的合理评价信息, 能够为一线技术员准确评价各分系统的性能和状态、梳理薄弱环节以及制定改进措施提供重要参考。

加权融合算法的基本思想^[2]是: 设 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 为 n 个数据源的可靠性参数估计值, 各数据源之间相互独立, 各数据源的可靠性参数较好地满足线性关系。融合后的可靠性参数估计值为

$$\theta = \sum_{i=1}^n \omega_i \theta_i \quad (15)$$

式中: ω_i 为第 i 个信息源可靠性参数的权重值, $\omega_i \in [0, 1]$, 且 $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n = 1$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

由上述模型可知, 线性加权融合方法的关键在于权重值的选取。目前, 常用的确定权重值的方法有基于专家经验法、信息源可信度法、先验信息法和现场子样相关性法等^[23-24]。本文采用基于专家经验法, 对测量系统的多源可靠度信息进行评分, 依据评分的结果, 计算各可靠度信息的权重和系统的可靠度。分析测量系统的技术要素, 可以得出5个最重要的评分因素: 系统复杂度、测量系统的技术水平(本文简称: 技术水平)、系统工作状态对发动机可靠性评定的重要性(本文简称: 重要性)、环境条件和测量数据质量对评估发动机性能的重要性(本文简称: 测量数据质量重要性)。

评分原则和依据如下:

1) 复杂程度

根据建立系统的难易程度、系统或组成单元中仪器设备的数量、后期安装、调试和操作的难易程度进行评定, 最复杂为10分, 最简单为1分。

2) 技术水平

根据系统/产品所运用的技术在所处行业内的水平高低进行判定, 技术水平最高为10分, 最低为1分。

3) 重要性

根据系统工作状态对发动机可靠性评定的重要程度进行评定, 重要程度最高为10分, 最低为1分。

4) 环境条件

根据系统所处环境进行评定, 系统在工作或

者测试过程中,环境条件最恶劣为10分,环境条件最好为1分。

5) 测量数据质量重要性

测量数据质量对发动机性能参数评定非常重要为10分,测量数据质量对发动机性能参数评定最不重要为1分。

各分系统权重的计算公式为

$$\omega_i = r_{ij} / \left(\sum_{i=1, j=1}^n r_{ij} \right) \quad (16)$$

式中: r_{ij} 为系统的第 j 个单元的第 i 个因素的评分值, $j = 1, 2, \dots, n$, $j = 1$ 为复杂度因素, $j = 2$ 为技术水平因素, $j = 3$ 为工作时间因素, $j = 4$ 为环境条件因素, $j = 5$ 为系统的重要程度因素, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

基于专家评分的可靠性信息综合方法具有以下优点: ①可以充分利用专家在该领域丰富的经验和知识,为多源信息的融合提供合理、可信的依据; ②较好地结合了测量系统在运行过程中的实际情况,专家评分的信息能够为系统改进和优化提供合理的指导意见。

针对 MML 法和 CMSR 法在可靠性信息折合过程中存在数据丢失的问题,本文充分利用行业内专家的经验信息,在得到第2层各分系统可靠度信息后,采用专家线性加权的方法对各分系统的可靠性信息进行融合,得到测量系统的可靠度信息。

4 实例分析

以某型号液体火箭发动机地面试验测量系统为研究对象,采用基于融合多源可靠性信息的评定策略评定测量系统的可靠性,并对评定结果进行对比分析。

4.1 稳态压力测量系统可靠性评定

压力是反映发动机和试验台设备工作过程特性的重要参数。按照随时间变化的规律,压力可分为稳态压力和脉动压力^[25]。稳态压力的测量结果为压力平均值,主要用于研究试验台和发动机的性能。

4.1.1 系统简介

稳态压力测量系统一般由引压管、压力传感器、供电电源、压力校准源和数据采集与分析系统等设备组成^[26],如图5所示。

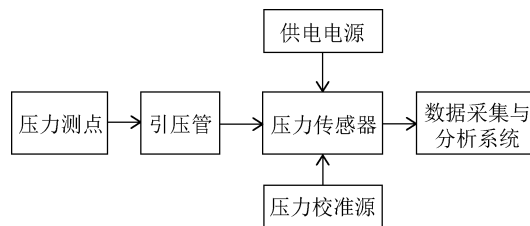


图5 稳态压力测量系统基本原理图

Fig.5 Schematic diagram of steady-state pressure measurement system

4.1.2 测量数据可靠度评定

通过分析稳态压力测量系统的基本组成和测量原理可知,系统不确定度主要来源为稳态压力测量前端系统引入的不确定度、数据采集系统引入的不确定度和压力计量标准引入的不确定度。不确定度来源及所采用的评定方法如图6所示。

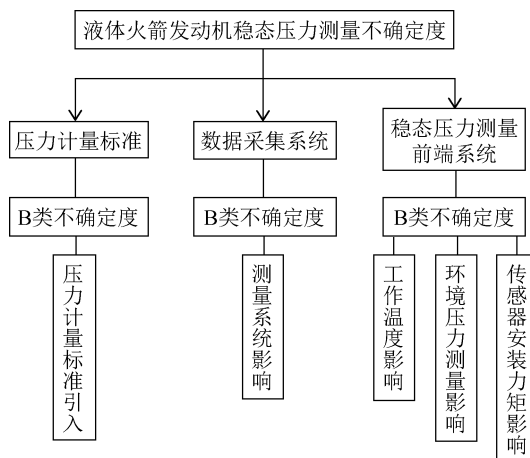


图6 稳态压力测量系统不确定来源图

Fig.6 Uncertainty source diagram of steady state pressure measurement system

不确定度评定方法详见文献[27]。传感器安装力矩对压力测量不确定度的影响非常小,在计算过程中可忽略不计。不确定度分量数据如表1所示。

稳态压力测量系统合成标准不确定度 $u_c(y)$ 和扩展不确定度 U_p 的计算公式^[14]为

表1 不确定度分量数据表

Tab.1 Data table of uncertainty components

测量系统引入的相对不确定度	上级计量标准引入的不确定度	工作温度影响引入的不确定度	压力环境影响引入的不确定度
u_{BP}	u_{BP1}	u_{BP2}	u_{BP3}
0.001 6	0.000 06	0.000 8	0.000 01

$$u_{cP}(\gamma) = \sqrt{u_{BP}^2 + u_{BP1}^2 + u_{BP2}^2 + u_{BP3}^2} \quad (17)$$

$$U_p = k u_{cP}(\gamma), (k = 2) \quad (18)$$

计算得到 $u_{cP}(\gamma)$ 为 0.18%, U_p 为 0.36% ($k = 2$)。试验任务书要求发动机的可靠度不低于 0.960 0, 要求稳态压力测量系统的不确定度不高于 0.5%。测量系统不确定度评定结果为 0.36%。发动机可靠度的上限点、下限点为 (0.000 0, 1.000 0)、(0.005 0, 0.960 0)。根据式(1)拟合一元线性方程, 得到 $a = -8$, $b = 1$ 。当测量系统不确定度评定结果为 0.36% 时, 计算得到数据可靠度值为 0.971 2。 $\gamma = 0.9$ 时, 根据参考文献[19]得到单侧可靠性置信下限的数据, 如表 2 所示。

表 2 单侧可靠性置信下限数据表

Tab.2 Single side reliability lower confidence limit data table

试验次数, 失效数	单侧置信下限
75, 0	0.969 77
80, 0	0.971 63

表 3 稳态压力测量系统寿命型单元试验数据表

Tab.3 Data sheet for lifetime unit test of steady-state pressure measurement system

试验单元	单元失效类型	失效次数 F_i	试验次数 n_i	成功次数 x_i	系统试验总时间 /h
引压管	寿命型	1	50	49	700
压力传感器	寿命型	2	51	49	700
供电电源	寿命型	0	55	55	720
信号转换装置	寿命型	1	52	51	720

表 4 稳态压力测量系统成败型单元试验数据表

Tab.4 Data sheet of success or failure unit test of steady-state pressure measurement system

试验单元	单元失效类型	失效次数 F_i	试验次数 n_i	成功次数 x_i
数据采集分析系统	成败型	0	60	60
信号对接环节	成败型	1	355	354
数据可靠度	成败型	0	78.879 8	78.879 8

按照文献[10]中的方法, 将指数寿命型单元等效转换为成败型单元, 计算等效试验次数 n_i 和等效成功次数 x_i , 结果如表 5 所示。

数据采集分析系统和信号对接环节存在无失效单元($n_i = x_i$)的情况, 故可采用 CMSR 法进行综合。根据表 4 和表 5 中的数据, 将 n_i 从大到小排序为

根据表 2 的数据, 采用线性插值法, 计算得到等效试验次数 $\hat{n} = 78.879 8$, 等效试验失效次数 $\hat{F} = 0$ 。

4.1.3 方案实施

根据稳态压力测量系统的基本原理和设备组成, 分析得到该系统的可靠性框图, 如图 7 所示。

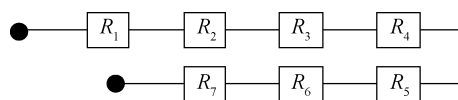


图 7 稳态压力测量系统可靠性框图

Fig.7 Reliability diagram of steady state pressure measurement system

图 7 中, $R_1 \sim R_7$ 分别为引压管、压力传感器、传感器供电电源、信号转换装置、数据采集分析系统、信号对接环节和数据的可靠度。引压管、压力传感器、供电电源和信号转换装置的单元失效类型为寿命型。数据采集分析系统和信号对接环节的单元失效类型为成败型。统计各单元的可靠性试验数据, 如表 3 和表 4 所示。

(721.000 9, 719.000 9)、(720.500 2, 719.500 2)、(701.502 1, 698.502 1)、(701.001 0, 699.001 0)、(355, 354)、(78.879 8, 78.879 8)、(60, 60), 去掉无失效单元(78.879 8, 78.879 8), 将试验次数最小无失效单元(60, 60)和次小有失效单元(355, 354)进行压缩综合。由式(12)可以得到

表5 稳态压力测量系统指数寿命单元综合等效试验数据表

Tab.5 Data sheet of comprehensive equivalent test for exponential life unit of steady state pressure measurement system

试验单元	系统试验总时间 / h	等效失败次数 Z_i	等效试验次数 n_i	等效成功次数 x_i
引压管	700	2	701.001 0	699.001 0
压力传感器	700	3	701.502 1	698.502 1
供电电源	720	1	720.500 2	719.500 2
信号转换装置	720	2	721.000 9	719.000 9

(355, 354), (60, 60) → (355 × 60 / 354, 60) = (60.169 5, 60.000 0)

稳态压力等效系统可靠性图如图8所示。

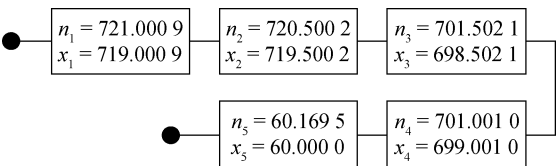


图8 稳态压力等效系统可靠性图

Fig.8 Reliability equivalent diagram of steady state pressure measurement system

等效系统图7中各单元均为失效单元，故采用MML法进行综合。由式(12)~式(14)得到试验次数为226.095 2，成功次数为222.922 9，失败次数为3.172 4。当 $\gamma = 0.9$ 时，查阅文献[19]得到线性内插数据，如表6所示。

依表6的数据，采用线性插值法，计算得到稳态压力测量系统单侧可靠性置信下限 $R_L = 0.970 11$ 。

表6 稳态压力测量系统单侧可靠性置信下限数据表

Tab.6 Data sheet for lower confidence limit of single side reliability of steady state pressure measuring system

试验次数, 失效数	单侧置信下限
200, 3	0.966 90
250, 3	0.973 47
200, 4	0.960 43
250, 4	0.968 28

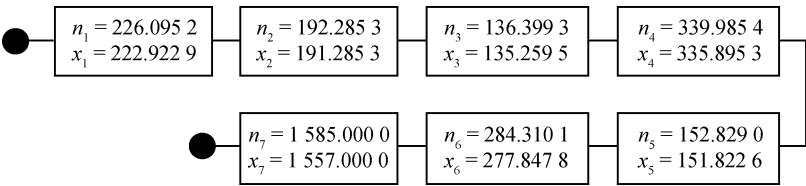


图10 测量系统等效数据可靠性图

Fig.10 Equivalent data reliability diagram of measurement system

4.2 金字塔式测量系统可靠性评定

利用测量系统分系统和组成单元可靠性试验信息较多的优点，采用经典可靠性理论中的金字塔式综合评定方法对测量系统可靠性进行综合评定。金字塔式测量系统可靠性评定路线图如图9所示。

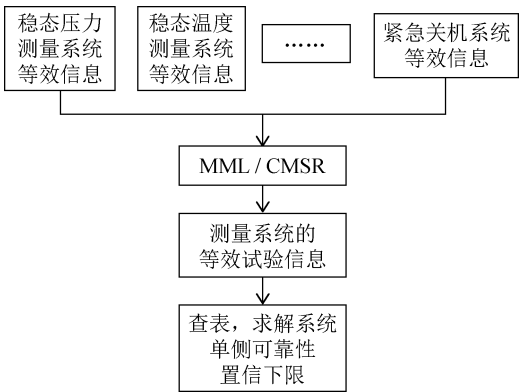


图9 金字塔式测量系统可靠性评定路线图

Fig.9 Reliability assessment roadmap of pyramid measurement system

对测量系统中各分系统的等效试验次数数据进行汇总，如表7所示。测量系统等效可靠性试验信息如图10所示。

等效系统图中各单元均为失效单元，故采用MML法进行综合。由式(12)~式(14)得到试验次数为262.903 4，成功次数为255.807 7，失败次数为7.095 6。当 $\gamma = 0.9$ 时，查阅文献[19]得到线性内插数据，如表8所示。

表7 测量系统各分系统等效试验数据表

Tab.7 Data sheet of equivalent test for each subsystem of measurement system

系统名称	等效试验次数	等效成功次数	等效失败次数
稳态压力测量系统	226.095 2	222.922 9	3.172 4
温度测量系统	192.285 3	191.285 3	1
稳态流量测量系统	136.399 3	135.259 5	1.139 8
推力测量系统	339.985 4	335.895 3	4.090 1
脉动压力测量系统	152.829	151.822 6	1.006 4
振动测量系统	284.310 1	277.947 8	6.362 3
紧急关机系统	1 585	1 557	28

表8 测量系统单侧可靠性置信下限数据表

Tab.8 Data sheet of lower confidence limit of single side reliability of measurement system

试验次数, 失效数	单侧置信下限
250, 7	0.953 37
300, 7	0.961 08
250, 8	0.948 54
300, 8	0.957 04

根据表8的数据, 采用线性插值法, 计算得到

单侧可靠性置信下限为0.95607。

4.3 基于专家权重的可靠度评定

为保证专家信息的可信度和权威性, 选择了8位液体火箭发动机试验测量领域的资深专家进行评分, 将专家对各因素的评分结果进行加总, 取平均值, 计算各分系统的权重, 结果如表9所示。

根据表9中的权重和经典可靠性评定结果, 通过式(15)和式(16)计算得到采用专家线性加权算法评定的测量系统可靠度为0.968 53。系统可靠度权重数据如表10所示。

表9 专家评分表

Tab.9 Expert rating form

分系统名称	复杂程度 r_{i1}	技术水平 r_{i2}	重要性 r_{i3}	环境条件 r_{i4}	测量数据质量 的重要性 r_{i5}	各系统 评分	权重 ω_i
稳态压力系统	7.875	4.625	9.500	4.625	9.000	35.625	0.135
温度测量系统	8.500	4.875	9.500	4.500	7.500	34.875	0.132
流量测量系统	7.125	5.750	8.875	6.250	8.500	36.500	0.139
推力测量系统	9.500	8.250	9.500	2.750	9.500	39.500	0.150
脉动压力测量系统	7.875	8.500	8.625	6.625	8.500	40.125	0.152
振动测量系统	8.625	8.125	8.625	5.125	6.625	37.125	0.141
紧急关机系统	9.500	9.250	9.500	1.500	9.750	39.500	0.150

4.4 评定结果对比分析

对比金字塔式测量系统可靠性评定和基于专家权重的可靠度评定的评定结果可知:

1) 采用金字塔式综合评定方法能够定量分析计算测量系统的可靠度。测量系统可靠性评定结果(0.956 07)小于各分系统的可靠度数值, 也小于任务书对发动机可靠度(0.960 00)的要求。结果表明虽然性能可靠性指标满足了任务书的要求, 但

是在性能可靠性指标和结构可靠性指标的双重考核下, 测量系统的可靠性并不一定能满足任务书的要求, 也证明了结构可靠性指标与性能可靠性指标的同等重要性。评定结果证明了融合多源可靠性信息的系统可靠性评定策略可以用于液体火箭发动机地面试验测量系统可靠性评定。根据表9中的数据可知, 紧急关机系统的可靠性最低, 在测试和运行过程中其失效数也最高, 该结果为提

表 10 系统可靠度权重数据表
Tab.10 Data sheet of system reliability weights

系统名称	分系统可靠度	专家评分权重	专家评分法测量系统可靠度
稳态压力系统	0.970 11	0.135	0.968 53
温度测量系统	0.979 87	0.132	
流量测量系统	0.970 30	0.139	
推力测量系统	0.973 54	0.150	
脉动压力测量系统	0.974 63	0.152	
振动测量系统	0.961 42	0.141	
紧急关机系统	0.957 39	0.150	

高全系统的可靠性指明了方向。

2) 由专家评分法的权重值排序情况可以看出,专家在对各分系统的权重进行打分的过程中,全面权衡了各分系统对于液体火箭发动机测试的重要性,给出了较为合理的权重分值。其中脉动压力测量系统、紧急关机系统和推力测量系统的权重值最高。脉动压力是考核推力室性能、研究不稳定燃烧的重要参数。紧急关机系统关系着所有参数的获取和紧急关机红线的判读。推力是反映发动机性能(比冲)指标的关键参数。结合实际,上述3个系统的设备精密程度、维护难易程度相较于其他系统更高,结构组成、数据分析方法相较于其他系统更复杂,权重分值的排序与测量系统的实际情况较为吻合,印证了专家评分的合理性。

3) 金字塔式综合评定的结果略低于试验任务书的可靠性指标要求,而基于专家权重的可靠性评定结果(0.968 53)则略高于试验任务书的要求,主要原因在于金字塔式综合评定法以大量试验信息为依据,各分系统阶段性的可靠性试验信息变化对评定结果存在一定影响,尤其是紧急关机系统和振动系统的失效次数较高,对全系统可靠性的影响较大。后期对薄弱环节进行改进,可有效提高测量系统的可靠性。而专家评分法的主观性较强,评定结果的主要贡献在于根据权重值的排序确定系统中的重点关注对象,查找薄弱环节,为一线测量系统技术人员提供重要参考。

5 结论

以经典可靠性理论为基础,采用融合多源可靠性信息的系统可靠性评定策略,对某型号氢氧

发动机试验地面测量系统可靠性进行评定,得出以下3点结论:

1) 通过重新定义测量系统可靠性以及建立数据可靠度概念,有效解决了测量不确定度和可靠度数值变化趋势不一致的问题。通过区间两点线性拟合方法,实现了不确定度数值和可靠度数值之间的转换,转换的结果能够较好地描述测量系统性能可靠性。利用区间单侧置信下限估计的方法能够合理地将数据可靠度信息转换为等效成败型试验信息。评定结果验证了将性能可靠性指标和功能可靠性指标作为测量系统可靠性衡量指标的合理性和可行性。

2) 分析了测量系统的组成结构,采用金字塔式可靠性综合评定方法,结合经典可靠性理论中的MML法和CMSR法,能够较好地实现系统的试验信息综合。采用查表法和线性插值法可以较为精确地计算系统可靠性置信下限。计算结果表明,上述方法不仅能够较好地解决全系统与分系统之间可靠性试验信息折合的问题,而且评定的结果也符合实际情况。

3) 采用基于专家线性加权的方法进行测量分系统可靠性信息融合,不仅能充分利用多位专家的行业经验与知识,还能根据专家对各分系统的评价信息梳理系统中的薄弱环节,有针对性地制定改进措施,为进一步提高系统可靠度奠定基础。虽然该方法带有一定的主观性,但是增加了可靠度的信息来源。多位专家信息的融合保障了信息的可信度,评定的结果也能够合理地反映测量系统的实际情况。

4) 由本文的分析过程和结果可知,评定测量

系统可靠性时,可同时采用金字塔式综合评定法和基于专家线性加权评定法。金字塔式综合评定法的信息全部来源于测试数据,且该方法给出了测量系统可靠性的定量分析结果,当金字塔式综合评定法和基于专家线性加权评定法的结果不一致时,以金字塔式综合评定法的结果为准,专家线性加权的结果则作为参考。可根据专家给出的加权值高低以及信息转换过程中等效失效次数的高低,制定提高系统可靠性的措施,指导工程实践。

参考文献

- [1] 郭霄峰,李耀华,陈鸿彦,等. 液体火箭发动机试验[M]. 北京:中国宇航出版社,1990.
GUO X F, LI Y H, CHEN H Y, et al. Liquid rocket engine test [M]. Beijing: China Aerospace Press, 1990: 130-131. (in Chinese)
- [2] 谭松林,李宝盛. 液体火箭发动机可靠性[M]. 北京:中国宇航出版社,2014.
TAN S L, LI B S. Reliability of liquid rocket engines [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2014. (in Chinese)
- [3] 谭永华,李健,贺元军,等. 一种针对液体火箭发动机可靠性的双线评估方法[J]. 推进技术, 2021, 42(2): 421-424.
TAN Y H, LI J, HE Y J, et al. A two line evaluation method for reliability of liquid rocket engine [J]. Propulsion Technology, 2021, 42(2): 421-424. (in Chinese)
- [4] 吴嘉宁,阎绍泽,谢里阳. 基于RBD与FTA的航天器太阳翼可靠性分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(1): 15-20.
WU J N, YAN S Z, XIE L Y. Reliability analysis of spacecraft solar wing based on RBD and FTA [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2012, 52(1): 15-20. (in Chinese)
- [5] 肖刚. 基于折合信息的固体火箭发动机可靠性综合评估[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(7): 33-36.
XIAO G. Comprehensive reliability evaluation of solid rocket motor based on reduced information [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(7): 33-36. (in Chinese)
- [6] 冯铁山,李洪,蓝鲲. 基于贝叶斯统计的测量系统可靠性评定方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2014, 336(6): 60-64.
FENG T S, LI H, LAN K. Reliability evaluation method of measurement system based on Bayesian statistics [J]. Missile and Space Delivery Technology, 2014, 336(6): 60-64. (in Chinese)
- [7] 曹燧,孙有朝. 和联系统可靠性综合评定的信息熵法[J]. 航空计算技术, 2013, 43(2): 16-21.
CAO Y, SUN Y C. Information entropy method for comprehensive reliability evaluation of combined system [J]. Aerocomputing Technology, 2013, 43(2): 16-21. (in Chinese)
- [8] 孙有朝,施军. 单元可靠性评定的熵方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(6): 793-796.
SUN Y C, SHI J. Entropy method for unit reliability assessment [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 36(6): 793-796. (in Chinese)
- [9] 孙有朝. 基于信息理论的复杂产品可靠性综合评估[J]. 应用科学学报, 2001, 19(2): 113-116.
SUN Y C. Comprehensive reliability evaluation of complex products based on information theory [J]. Journal of Applied Sciences, 2001, 19(2): 113-116. (in Chinese)
- [10] 孙有朝. 成敗型与指数型单元混合系统的可靠性熵法评定[J]. 航空动力学报, 2007, 22(8): 1135-1139.
SUN Y C. Evaluation of reliability entropy method for mixed systems of pass fail and exponential units [J]. Journal of Aerodynamics, 2007, 22(8): 1135-1139. (in Chinese)
- [11] 孙有朝. 指数型单元混联系统可靠性综合的信息论方法[J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 783-788.
SUN Y C. Information theory method for reliability synthesis of exponential unit hybrid system [J]. Journal of Aerodynamics, 2005, 20(5): 783-788. (in Chinese)
- [12] 赵璐,许昕,潘宏侠,等. 基于信息熵与信息融合的供输弹系统故障诊断研究[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(1): 169-172.
ZHAO L, XYU X, PAN H X, et al. Research on fault diagnosis of ammunition supply and transportation system based on information entropy and information fusion [J]. Mechanical Design and Research, 2020, 36(1): 169-172. (in Chinese)
- [13] 孙有朝,张永进,李龙彪,等. 可靠性原理与方法(上、下册)[M]. 北京:科学出版社,2016.
SUN Y C, ZHANG Y J, LI L B, et al. Principles and methods of reliability (Volume 1 and Volume 2) [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [14] 中国国家标准化管理委员会. 测量不确定度评定和表示: GB/T 27418-2017[S]. 北京:中国标准出版社,

- 2017.
- China National Standardization Administration. Evaluation and representation of measurement uncertainty: GB/T 27418-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [15] 杨懿, 郭亚男, 王永鹏, 等. 液体火箭发动机试验流量测量系统可靠性评定[J]. 计测技术, 2021, 41(5): 108-113.
- YANG Y, GUO Y N, WANG Y P, et al. Reliability evaluation of flow measurement system for liquid rocket engine test [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(5): 108-113. (in Chinese)
- [16] 周源泉, 翁朝曦. 可靠性评定[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- ZHOU Y Q, WENG C X. Reliability assessment [M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)
- [17] 马小兵, 杨军. 可靠性统计分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2020.
- MA X B, YANG J. Reliability statistical analysis [M]. Beijing: Beihang University Press, 2020. (in Chinese)
- [18] 赵宇, 杨军, 马小兵. 可靠性数据分析教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
- ZHAO Y, YANG J, MA X B. A tutorial on reliability data analysis [M]. Beijing: Beihang University Press, 2009. (in Chinese)
- [19] 中国国家标准局. 二项分布可靠性单侧置信下限: GJB 4087.3-85[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
- China National Bureau of Standards. Unilateral confidence lower limit for reliability of binomial distribution: GJB 4087.3-85 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1985. (in Chinese)
- [20] 马溧梅. 可靠性评定中专家信息的提取研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- MA L M. Research on expert information extraction in reliability assessment [D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [21] BRAM W, TIM B, JOHN Q. Expert judgment combination using moment methods [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007: 1-25.
- [22] DONGHAN Y, WON S P. Combination and evaluation of expert opinions characterized in terms of fuzzy probabilities [J]. Annals of Nuclear Energy, 2000, 27: 713-726.
- [23] 杨军, 于清津, 秦润东, 等. 可靠性试验评定中相关专家信息融合[J]. 航空计算技术, 2008, 38(5): 37-40.
- YANG J, YU Q J, QIN R D, et al. Relevant expert information fusion in reliability test evaluation [J]. Aeronautical Computing Technology, 2008, 38(5): 37-40. (in Chinese)
- [24] 杨军, 武小悦, 马溧梅. 可靠性试验评定中专家信息融合[J]. 航空计算技术, 2007, 37(5): 14-18.
- YANG J, WU X Y, MA L M. Expert information fusion in reliability test evaluation [J]. Aeronautical Computing Technology, 2007, 37(5): 14-18. (in Chinese)
- [25] 杨懿, 于涛, 郭亚男, 等. 脉动压力测量技术在火箭发动机试验中的应用[J]. 宇航学报, 2021, 42(7): 917-926.
- YANG Y, YU T, GUO Y N, et al. Application of fluctuating pressure measurement technology in rocket engine test [J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(7): 917-926. (in Chinese)
- [26] 杨懿, 陈文丽, 贾志杰, 等. 降低发动机试验稳态压力测量不确定度方法研究[J]. 计测技术, 2020, 40(5): 15-16.
- YANG Y, CHEN W L, JIA Z J, et al. Improvement of steady state pressure measurement method for engine test [J]. Metrology & Measurement Technology, 2020, 40(5): 15-16. (in Chinese)
- [27] 中国航天标准化研究所. 液体火箭发动机试验测量不确定度评定: 第2部分 稳态压力: QJ 1789.2-2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- China Aerospace Standardization Research Institute. Evaluation of measurement uncertainty in liquid rocket engine testing: part 2 steady state pressure: QJ 1789.2-2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 刘子星 (1984—), 男, 高级工程师, 主要从事航空发动机控制技术研究。

通讯作者: 杨懿 (1984—), 男, 湖南岳阳人, 高级工程师, 主要从事液体火箭发动机试验测试技术和航天技术应用产业项目运营与管理等方面的研究。