

氢氧火箭发动机组件研制阶段可靠性技术综述

王 博¹, 蒋 平¹, 赵 骞², 郑孟伟³

(1. 国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 信息通信学院, 陕西 西安 710106;

3. 北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 氢氧火箭发动机是火箭的“心脏”, 必须具备极高的可靠性, 才能够保证发射成功。国内外针对氢氧火箭发动机开展了大量的可靠性工作。在发动机的研制阶段, 通常是按照自下而上的思路, 从组件的失效机理出发, 开展稳健设计和试验验证, 来保证氢氧火箭发动机的高可靠性。组件的可靠性工作主要是基于失效机理开展分析、监测、试验验证和设计改进; 同时组件到系统的各种试验也为可靠性评估提供了数据, 通过试验数据评估组件可靠性, 根据评估结果可查找薄弱环节, 进而改进设计。从基于失效机理和基于试验数据两个角度对相关的可靠性技术进行综述, 分析发动机组件研制阶段可靠性工作存在的问题, 并提出今后组件可靠性技术的发展设想。

关键词: 氢氧火箭发动机; 可靠性技术; 可靠性评估; 可靠性增长; 失效机理

中图分类号: V438.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2021)02-0001-08

Review on reliability technology of hydrogen-oxygen rocket engine components in development

WANG Bo¹, JIANG Ping¹, ZHAO Qian², ZHENG Mengwei³

(1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Information and Communication, National University of Defense Technology, Xi'an 710106, China;

3. Beijing Institute of Aerospace Dynamics, Beijing 100076, China)

Abstract: Hydrogen-oxygen rocket engine is the heart of rocket, and it must have extremely high reliability to guarantee a successful launch. A lot of reliability work has been carried out on hydrogen-oxygen rocket engine. During its development, the high reliability of hydrogen-oxygen rocket engine is ensured by the bottom-up approach, and robust designs and test verifications are usually carried out based on the failure mechanism of components. Therefore, the reliability work of components mainly focuses on the analysis, monitoring, test verification and design improvement based on the failure mechanism. Meanwhile, various tests of components and the system also provide data for reliability assessment. The reliability of components can be assessed through the test data, and the weakness can be identified based on the evaluation results to improve the design. In this paper, the reliability technology based on failure

收稿日期: 2020-08-13; 修回日期: 2020-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(71871218)

作者简介: 王博(1997—), 女, 硕士, 研究领域为复杂装备可靠性评估。

通信作者: 蒋平(1976—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为复杂系统可靠性评估与试验鉴定。

mechanism and test data are reviewed, the problems existing in the reliability of the engine components are analyzed, and the future development of component reliability technology is proposed.

Keywords: hydrogen-oxygen rocket engine; reliability technology; reliability assessment; reliability growth; failure mechanism

0 引言

氢氧火箭发动机作为火箭系统的“心脏”,必须具备高可靠性,否则将会导致火箭发射失败,威胁人员安全,造成不可估量的严重损失。如果能在研制阶段准确评估发动机可靠性,尽早发现发动机的薄弱环节,就能够避免通过试车暴露问题——返工——再试车的恶性循环,从而保证研制进度、节省研制经费。目前,我国已启动重型运载火箭与火星探测等一批新的重大科技项目和重大工程,多种型号氢氧火箭发动机的研制也在同步推进,如何保证研制出的型号具备高可靠性也备受关注。

氢氧火箭发动机的可靠性很大程度上取决于对其有重要影响的关键组件的可靠性。在研制阶段,从失效机理和故障模式入手,保证涡轮泵、推力室、阀门等重要组件的可靠性,自下而上提高系统可靠性是保证氢氧火箭发动机可靠性的有效途径。同时,从组件到系统都会开展试验来验证其可靠性,试验能够提供可靠性评估所需要的数据。因此,基于研制阶段的试验数据进行可靠性评估,根据评估结果查找薄弱环节,改进设计,也是保证氢氧火箭发动机可靠性的重要途径。

本文对目前国内外氢氧火箭发动机可靠性技术相关研究进行综述,第2章总结了基于涡轮泵、推力室、阀门、密封件等关键部件失效机理的可靠性工作方法;第3章根据组件研制试验类型多、样本小、极少失效的特点,归纳了现有应用于组件的可靠性评估方法;第4章在前两章的基础上探讨了氢氧火箭发动机可靠性工作存在的问题以及未来的发展方向。

1 氢氧火箭发动机简介

氢氧发动机是世界火箭发动机技术发展的趋势之一。液氢是重要的高能低温液体火箭燃料。在产生相同能量的前提下,体积小、重量最轻,无污染。氢氧火箭发动机主要由推力室、推进剂供应系

统、阀门与调节器及发动机总装元件等组成^[1]。氢氧火箭发动机的故障就是一个或多个组件的故障。组件的可靠性是发动机可靠性的基本保证,影响发动机可靠性的关键组件包括:涡轮泵、推力室、阀门以及密封件^[2]。

涡轮泵主要由涡轮、泵、转子和轴承等组件组成,涡轮工作于高温、高压和高速条件下;泵工作在低温、高压和高速的推进剂中。同时,涡轮泵还是氢氧火箭发动机的主要激振源之一。涡轮泵和推力室的寿命常用威布尔分布进行描述。阀门是典型的机械结构件,属于成败型产品,可靠工作次数分布规律同样符合威布尔分布。密封件起着隔离介质和压力腔的作用,包括静密封和动密封,对于防止介质外漏或控制介质内漏起着重要作用。其中,动密封是控制涡轮泵内泄的关键组件,对涡轮泵的效率 and 转子振动具有重要意义,一旦失效将严重影响涡轮泵的运行,导致重大的事故。

2 基于失效机理的氢氧火箭发动机组件可靠性工作方法

2.1 涡轮泵可靠性工作方法

涡轮泵的可靠性工作主要是对它的失效机理和故障模式开展研究。涡轮泵自身的异常振动是反映其故障的重要表现形式之一,例如基于振动信号开展故障检测和试验验证,通过振动信号特征的选择提取和信号处理实现涡轮泵的故障定位。信号特征提取主要集中在三个方面:特征集降维处理^[3]、时域特征选择与提取^[4]和频域特征选择与提取^[5]。在信号处理方面,国内外已开展大量基于固定阈值、自适应阈值等方法的氢氧火箭发动机故障检测与诊断算法研究^[5-6]。针对实时故障检测,一般采用固定阈值的红线报警方法,但该方法有时存在虚警和漏警的现象。自适应阈值算法主要包括自适应阈值算法(ATA)和自适应相关算法(ACA)^[7]等故障检测方法,目前还存在算法训练效率不高、信号特征不够理想和阈值随异常数据自适

应变化等问题。

涡轮叶片是转子系统的零件,也是减损与延寿控制技术中的关键组件。由于很难得到涡轮叶片的结构动力学模型的解析解,在实际的分析中往往应用有限元分析法来求解其数值解^[8],依此评估涡轮叶片寿命,实现故障预测和分析。如何在了解涡轮叶片损伤模式与机理、研究涡轮叶片载荷谱的基础上,在设计和制造过程中采取恰当的改进措施,保证叶片可靠性水平,是氢氧火箭发动机涡轮泵研制过程中亟需解决的问题^[9]。

预测轴承疲劳寿命的寿命模型和基于加速退化试验的可靠性评估方法已经趋于多样、成熟^[10-12]。但对轴承内部载荷分布、接触表面和次表面的应力状态进行准确的仿真和计算还需要进一步的研究。在发动机研制过程中,轴承的性能和寿命考核通常采用模拟介质运转试验,根据试验过程中轴承转速的变化情况、试验后样本的完整性评估来判断轴承性能,定量求解流体润滑雷诺方程,或者对不同介质下轴承的静态性能特性进行计算分析^[13]。同时,郑继坤强调轴承的不正确使用导致的故障比轴承自身设计、生产质量导致的故障要多,因此需要在设计阶段考虑周全、结构上采取保证措施、正确装配和使用以及充分的相关介质试验来确保轴承的正确工作条件^[14]。

2.2 推力室可靠性工作方法

局部冷却性能差、钎焊缺陷、通道堵塞等是推力室发生故障的主要原因^[15]。

推力室由推进剂喷注器、燃烧室、喷管等组成。氢氧火箭推进剂通过喷注器按一定流量和混合比进入燃烧室雾化、混合和燃烧。喷注过程对燃烧效率和燃烧稳定性有重要影响,如果喷注不均匀,会影响喷嘴结构的可靠性^[16],严重的还会导致喷嘴烧蚀。为保证燃烧室的可靠工作,推进剂中的一部分流经冷却套,带走壁上高温燃气带来的热量。再生冷却通道一侧承受高温燃气,一侧流经低温冷却剂,同时冷却通道两侧的压力差使推力室室壁承受机械载荷,致使推力室室壁工作在极限状态附近^[17]。因此,在进行推力室可靠性强化时需要充分考虑材料、环境等因素的影响,Krishnaveni等在给定可靠性要求下提出推力室的压力安全因子确定方法,通过该方法可以确定推力室不发生故障的压力

上限^[18]。

目前主要借助三维计算流体力学方法(computational fluid dynamics,CFD)计算发动机推力室内部流场,分析造成喷注不均匀的原因,进而提出设计改进措施与意见^[19-20];同时观察燃气参数和冷却液参数的变化,进行热传数据的评估研究以及冷却结构优化^[21-22]。

2.3 阀门可靠性工作方法

氢氧火箭发动机阀门的基本性能要求包括:强度性能、密封性能和总体动作性能^[23],主要故障模式有阀门启动(关闭)失灵、卡滞、阀门污染(泄漏)。在低温环境试验中,阀门更容易发生卡滞、卡死故障,王志等针对阀门的拒动、卡滞故障模式,提炼出识别阀门开关动作状态的指标^[24]。阀门泄漏检测手段的研究是极具现实意义的工作^[25]。传统的阀门密封性能检测手段是“阀门泄漏量气泡法”,根据试验中出现气泡的数量和时间计算漏率。但是存在计算数据不准确,精度不高的隐患。在实际制造试验中,谢建超等改进技术缺陷,提出已经获得专家认可的“阀门泄漏量差压检漏技术”^[26]。

为了保证阀门的可靠性,在研制过程中通常采取强度、密封、总体动作试验来进行验证^[27],这些试验已经形成规范。但是,依据不同类型试验数据评估阀门的可靠性水平,还有待深入研究。

2.4 密封件可靠性工作方法

固体火箭发动机密封件的研究成果较为丰硕,但是关于氢氧火箭发动机密封件的文献相对较少。密封件的可靠性与其设计结构密切相关,好的设计结构是保证密封性能和可靠性的关键^[28]。密封包括锥面法兰密封、球面法兰密封、径向密封和间隙密封等。目前,主要借助有限元方法进行密封设计的结构强度和密封性分析^[29]。此外,基于有限元方法也可以进行密封件的温度场和热载变形的计算,帮助改进密封设计,总结端面温度的分布规律以及密封环内温度变化趋势^[30-31]。

3 基于试验数据的氢氧火箭发动机组件可靠性评估

氢氧火箭发动机是集机、电、控、化等多学科于一体的复杂系统,工作过程也非常复杂。为了在组件研制过程中保证其高可靠性,国内外普遍采用各

种研制试验来进行验证。通过试验数据来评估组件的可靠性,根据评估结果查找薄弱环节,进而改进设计,保证高可靠性水平,是组件可靠性工作的一项重要内容。但是,组件的研制试验类型多、样本小、极少失效,基于试验数据的组件可靠性评估尚待深入的研究和实践。

3.1 小子样、无失效寿命数据的评估

氢氧火箭发动机组件生产批量小,因此,研制试验的样本量小、试验时间短,常常出现极少失效甚至无失效的现象。这些特点决定了氢氧火箭发动机组件可靠性评估难以采用传统的基于大样本寿命数据的可靠性评估方法。从20世纪70年代开始,如何进行高可靠产品在无失效条件下的可靠性评估,引起了国内外学者的重视。但通过氢氧火箭发动机的组件研制试验数据来开展可靠性评估,尚未形成适用的规范。

贝叶斯方法将样本寿命数据与各类先验信息结合起来,修正参数估计的结果,同时需要的样本量相对来说也更少一些,是目前处理小子样、无失效数据问题的主流方法,已经应用于氢氧火箭发动机及其组件的可靠性评估中^[32-34]。首先需要基于先验信息给出参数的先验分布,再根据传统贝叶斯、多层贝叶斯、E-Bayes 等一系列的贝叶斯方法得到参数的验后分布^[10,34]。先验分布的选择是极其关键的一步,由于发动机组件研制阶段的小子样、无失效或极少失效的特点,验后分布对先验分布的选择将会非常敏感。

目前的研究中大都选择失效概率作为待估参数,常用的确定失效概率的方法包括经典法(经验公式)和贝叶斯方法,再用最小二乘法拟合寿命分布^[35],完成无失效数据的可靠性评估。较为常用的累积频率经验公式(失效概率)有

$$P_i = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}$$

$$P_i = \frac{i - 0.35}{n}$$

$$P_i = \frac{i - 0.5}{n}$$

$$P_i = \frac{i}{n+1} (i=1, 2, \dots, n)$$

贝叶斯方法需要首先确定失效概率的先验分布,姜祥周、茆诗松和 Bremerman 等基于试验数据特

点分别选择了不同的先验分布^[32,36-37],此外也可以用减函数构建失效概率的先验分布^[38],然后推导失效概率的贝叶斯验后分布,计算点估计值。在使用最小二乘法时,不同的加权方法也会带来不同的评估效果,为了进一步提高评估精度,国内外对此也做了大量研究^[37,39]。

徐彬涓根据液体火箭发动机阀门的3种研制试验类型和数据特点^[40],提出一种融合3类试验结果的可靠性预测方法,将贝叶斯方法运用于无失效数据的评估过程中。胡丹丹总结了无失效条件下的可靠性评估方法^[41],讨论了发动机轴承的寿命分布参数不同取值对可靠性评估结果的影响。总的来说,基于小子样寿命数据的评估方法在氢氧火箭发动机组件可靠性评估中应用较少。

3.2 考虑可靠性增长的可靠性评估

氢氧火箭发动机组件在研制过程中通常要经历多个阶段的试验,根据试验结果进行设计改进。因此,从统计学的角度来讲,不同阶段的组件并非同一总体。如果考虑充分利用研制过程各阶段的试验数据来评估组件可靠性,可以借鉴可靠性增长的概念。可靠性增长是可靠性理论研究的三大方向之一,国内外可靠性增长的研究方兴未艾。可靠性增长模型研究和实践目前有两个方向,分别是通过传统的统计估计方法和贝叶斯方法,来建立可靠性增长模型。

传统的统计估计方法已经趋于成熟,其中以 Duane 模型和 AMSAA 模型为代表的通用模型具有广泛的适用性。但这些模型不能进行分阶段的可靠性增长估计,也不能充分利用已有的试验信息和其他相关信息。此外,在 Duane 模型和 AMSAA 模型的基础上,蔡忠义等^[42]提出一种基于研制阶段变总体变环境试验数据的可靠性综合评估方法与模型;王华伟根据液体火箭发动机的特点,建立了基于增长数据折合的可靠性增长模型^[43-44];冯静等提出了一种新的基于修正似然函数的可靠性增长分析方法,在一定程度上解决了无失效数据情形下的火箭发动机可靠性增长分析问题^[45]。

贝叶斯可靠性增长模型包括 Smith 提出的二项式可靠性增长贝叶斯模型^[46],Gross 的三项可靠性模型^[47],周源泉的指数可靠性增长贝叶斯模型^[48]等。王华伟等提出的双参数 Bayes 可靠性增长模

型、基于增长数据折合的指数分布可靠性增长模型,能在小子样情况下指导航天产品可靠性增长规划的制定^[43-44]。刘琦等在液体火箭发动机批次试验中,运用 Compertz 模型和线性回归方法分析可靠性增长因子,然后建立动态参数的递推估计模型^[49]。目前的贝叶斯模型虽然可用于分阶段的可靠性增长,但这些模型常选取无信息先验分布,以避免对先验分布的争议,这样做事实上没有充分利用先验信息,没有真正发挥贝叶斯方法的优势。先验分布的确定和验后推断计算是贝叶斯可靠性增长领域的两大问题。对先验分布的研究包括 Jeffreys 无信息先验分布^[50]、Raiffa 和 Schlaifer 的共轭先验分布^[51]、Jaynes 的最大熵先验分布^[52],以及 Lindley 的多阶段先验分布^[53]。相应地,目前的先验分布确定方法有无信息先验、用历史数据确定先验分布、共轭先验以及运用自助采样(bootstrap)方法^[54]和随机加权法确定先验分布。验后量计算可归结为验后分布积分计算,例如 Gibbs 抽样法、取舍抽样法等^[55]。在氢氧火箭发动机组件的贝叶斯可靠性增长评估中,如何选择适用的先验分布来评估组件的可靠性,既能避免主观的干扰,又能充分利用前面阶段的试验数据,是一个值得探索的重要问题。

3.3 考虑多源信息融合的可靠性评估

氢氧火箭发动机组件的研制试验类型多,例如阀门就有温度、打压、动作、振动等不同类别的试验,试验条件和试验数据类型也各不相同。同时,很多型号研制过程中有老型号的相关信息、专家判断等信息,这些都可以看作是当前组件的多源信息。比如,研制过程中不断改进的产品,与改进前的产品可靠性之间存在密切联系,用不可靠度比率 δ 可以描述这种可靠性关系^[56]。这一重要参数信息可构造可靠性的先验分布。更为广泛的,还可以用继承因子的概念将先前型号产品和相似产品的故障数据、可靠性指标数据融入样本产品的可靠性评估过程^[57]。在实际的可靠性工程中,专家的判断是非常重要的^[58],因为它可能是除了少量试验数据以外唯一的信息来源。比如由专家判断给出参数或超参数的取值范围,根据工作经验估计样本寿命等^[59]。

按照贝叶斯理论,将来源于不同途径,与现场

试验信息一致的多源信息转化为先验分布,完成多源信息的融合,可以有效提高发动机组件可靠性评估结果的精度。

现有的融合方法包括加权融合、环境因子融合和多阶段变总体融合。针对同一状态产品的加权融合应用极为广泛,如基于可信度的融合^[60]、基于相关函数的融合^[61]、专家设定权重^[58]、基于模糊逻辑算子的融合^[62]等。产品在不同环境下的试验信息的融合——环境因子融合^[58]可以基于统计推断、预测技术、加速寿命试验衍生出不同的处理方法。产品在研制过程中各阶段试验信息的融合是多阶段变总体融合,也可看作可靠性增长。融合可靠性增长全程试验信息进行小子样产品可靠性评定时,通常有两条途径:一是利用全程信息设法得到可靠性评定模型的参数估计,达到增长信息融合的目的;二是直接利用可靠性增长信息建立系统可靠性增长模型,从而实现增长信息的融合^[63]。

根据氢氧火箭发动机研制过程的不同数据类型,探索不同类型、不同体量的数据之间的融合方法是一大重要课题。

4 存在的问题

基于失效机理的组件可靠性工作方法已经得到了充分的发展,为提高氢氧火箭发动机可靠性做出了巨大贡献,但在工程实际中还存在以下问题:

1) 涡轮泵的转子系统间的次同步振动、燃烧室内的高频不稳定燃烧,以及造成的全箭振动,如火箭结构与推进系统间的纵向耦合振动、伺服系统与发动机间的耦合振动,是导致发动机故障的重要原因。因此,应该进一步深入开展涡轮泵故障监测与诊断技术研究,通过振动信号特征的选择提取和信号处理实现涡轮泵的故障定位,在研制试验中发现问题,定位薄弱环节,为以后的设计改进和试验设计提供客观依据。

2) 工程要求轴承的轴向力调节装置必须具有自适应功能,且平衡范围大,具有足够高的灵敏度。美、欧、日开展了以流体动力学为理论基础的动静压轴承研究,其中静压轴承已经应用于航天飞机。预测轴承疲劳寿命的寿命模型和基于加速退化试验的可靠性评估方法已经趋于多样、成熟,在轴承可靠性工作中加强新方法的应用是提高轴承可靠

性的重要途径之一。

3) 阀门的强度、密封、动作试验设计已经日益成熟。依据不同类型试验数据实现可靠性的综合评估,是未来阀门可靠性工作的研究重点。

4) 密封面尺寸越大,在发动机影响下产生的热变形会使得不平度控制越困难。为提高密封件可靠性,一方面需要改进密封设计,另一方面也需要选择更合适的材料。此外,也可通过对发动机密封件不平度误差实施检测的专用装置设计、测量、平面度判读等方法的探索和完善,保证密封件的可靠性^[32]。

氢氧火箭发动机从需求分析、规划设计阶段开始就确定了组件的高可靠性要求,而且组件的研制试验中,能够投入的样本量往往很小。同时,受到研制经费和研制时间的限制,在组件的研制试验中不可能总是得到完全样本,通常是在到达给定的截尾时间时停止试验,容易出现极少失效甚至无失效的数据。因此,小子样、极少失效的研制试验数据很难直接用于组件的可靠性评估,现有的组件研制阶段的可靠性工作大都局限于失效机理分析和试验验证,以及针对试验结果的设计强化,缺乏定量的可靠性评估结果的支持。对组件各种类型的试验和数据的研究所存在问题:

1) 需要研究从多源信息融合的角度,通过失效机理分析,提出对不同类型试验数据的处理方法;

2) 需要探讨小子样、极少失效甚至无失效数据的可靠性评估方法在组件可靠性评估中的应用;

3) 需要研究多源信息融合的评估方法应用于组件可靠性评估,以减少单纯依靠无失效数据的评估可能带来的结论不可验证性和不可信任性,提高评估结果的可信度;

4) 根据不同阶段研制试验和评估结果来制定和调整组件的可靠性增长规划,作为氢氧火箭发动机组件研制阶段的重要工作,不仅可以实现可靠性增长的量化和监管,还能分析提供故障纠正措施以及确保纠正措施的有效性,是今后氢氧火箭发动机组件可靠性工作的重点方向之一。

5 结语

氢氧火箭发动机的可靠性很大程度上取决于对其有重要影响的关键组件的可靠性,分析重要组

件的可靠性、故障模式和失效机理,自下而上提高产品可靠性是保证氢氧火箭发动机可靠性的有效途径。针对氢氧火箭发动机组件小子样、极少失效甚至无失效的试验数据特点,发展更适用于研制过程的数据评估方法显得尤为重要。为了充分利用多源信息以提高发动机及其组件的可靠性评估精度,应当深入探讨多源信息融合方法。此外,重视航天产品可靠性增长的规划和实施,才能更好地实现研制阶段的组件可靠性要求。

参考文献:

- [1] 蔡国飙,李家文. 液体火箭发动机设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011.
- [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.
- [3] 谢涛. 基于进化计算的液体火箭发动机故障诊断技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 1998.
- [4] 朱恒伟. 液体推进剂火箭发动机地面试车故障检测与诊断研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 1997.
- [5] DAVIDSON M, STEPHENS J. Advanced health managementsystem for the space shuttle main engine[C]//40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2004.
- [6] 谢光军. 液体火箭发动机涡轮泵实时故障检测技术及系统研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006.
- [7] 夏鲁瑞. 液体火箭发动机涡轮泵健康监控关键技术及系统研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010.
- [8] 魏鹏飞,吴建军,陈启智. 液体火箭发动机涡轮叶片结构特性的有限元分析[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(2): 29-31.
- [9] 刘士杰,梁国柱. 航天飞机主发动机高压燃料涡轮泵的故障模式[J]. 航空动力学报, 2015, 30(3): 611-626.
- [10] SOLIMAN A A, ABD ELLAH A H, SULTAN K S. Comparison of estimates using record statistics from Weibull model: Bayesian and non-Bayesian approaches[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2006, 51(3): 2065-2077.
- [11] IOANNIDES E, HARRIS T A. A new fatigue life model for rolling bearings[J]. Journal of Tribology, 1985, 107(3): 367-377.
- [12] Rolling bearings-dynamic load ratings and rating life: BS ISO 281[Z]. 2007-03-30.
- [13] 杜家磊,闫攀运,梁国柱. 涡轮泵流体静压轴承性能

- 计算与试验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(2): 322-332.
- [14] 郑继坤. 涡轮泵轴承的特点与发展展望[C]//第十一届全国低温工程大会. 贵州:[s.n.], 2013.
- [15] 殷谦, 张金容. 液体火箭发动机故障模式及分析[J]. 推进技术, 1997, 18(1): 22-25.
- [16] 唐飞, 李家文, 常克宇. 涡流冷却推力室中涡流结构的分析与优化[J]. 推进技术, 2010, 31(2): 165-169.
- [17] BIRYUKOV V I, TSARAPKIN A. Damping decrements in the combustion chambers of liquid-propellant rocket engines[J]. Russian Engineering Research, 2019, 39(1): 6-12.
- [18] KRISHNAVENI A, CHRISTOPHER T, JEYAKUMAR K, et al. Probabilistic failure prediction of high strength steel rocket motor cases[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2014, 14(4): 478-490.
- [19] 宣智超, 谢恒, 袁宇. 某氢氧发动机推力室氢喷嘴烧蚀问题仿真分析[J]. 火箭推进, 2016, 42(5): 6-11.
- XUAN Z C, XIE H, YUAN Y. Simulation analysis of hydrogen nozzle ablation problem existing in thrust chamber of a hydrogen oxygen engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016, 42(5): 6-11.
- [20] 石晓波, 刘占一, 郭灿琳. 燃气发生器喷注器内氧腔三维流动分析[J]. 火箭推进, 2013, 39(2): 6-11.
- SHI X B, LIU Z Y, GUO C L. Analysis of three-dimensional flow in oxygen chamber in injector of gas generator[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(2): 6-11.
- [21] 张晟, 金平, 蔡国飙. 推力室冷却通道结构可靠性仿真及参数敏感性分析[J]. 航空动力学报, 2018, 33(11): 2651-2659.
- [22] SON M, KO S, KOO J. Genetic algorithm to optimize the design of main combustor and gas generator in liquid rocket engines[J]. Journal of Thermal Science, 2014, 23(3): 259-268.
- [23] 林晔, 喻天翔, 崔卫民, 等. 航天阀门的可靠性试验方法研究[J]. 制造业自动化, 2010, 32(6): 95-97.
- [24] 王志, 王建军, 刘玉, 等. 火箭发动机阀门开关动作状态识别技术研究[J]. 推进技术, 2018, 39(5): 1171-1176.
- [25] 曾庆祥. 阀门产品常见泄漏问题及解决办法[J]. 中国新技术新产品, 2016(4): 172.
- [26] 谢建超, 秦春云, 曹京京. 阀门泄漏量差压检漏技术研究[J]. 中国科技博览, 2016(20): 34-35.
- [27] 林晔, 喻天翔, 崔卫民, 等. 航天阀门的可靠性试验方法研究[J]. 制造业自动化, 2010, 32(6): 95-97.
- [28] 杜天恩. 高压液体火箭发动机新结构密封[J]. 推进技术, 2000, 21(4): 16-19.
- [29] 赵经明. 涡轮泵表面织构间隙密封-转子系统动力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [30] 张树强, 王良, 赵伟刚. 液体火箭发动机涡轮泵用机械密封温度场及热载变形研究[J]. 火箭推进, 2014, 40(5): 92-98.
- ZHANG S Q, WANG L, ZHAO W G. Research on temperature field and heat deformation of mechanical seal in liquid rocket engine turbopump[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(5): 92-98.
- [31] 单晓亮, 胡欲立. 基于 Ansys 的机械密封环温度场分析[J]. 润滑与密封, 2006, 31(9): 116-119.
- [32] 姜祥周, 师义民, 沈政. 无失效数据下液体火箭发动机可靠性多层 Bayes 估计[J]. 航天控制, 2008, 26(3): 88-91.
- [33] 韩明. 无失效数据下液体火箭发动机的 E-Bayes 可靠性分析[J]. 航空学报, 2011, 32(12): 2213-2219.
- [34] 王婷婷, 师义民, 刘英. 某型号液体火箭发动机可靠性分析[J]. 航天控制, 2009, 27(6): 79-82.
- [35] LAMONT C, MAZZA F, DONALDSON N. A Bayesian demonstration of reliability for encapsulated implanted electronics[C]//2019 9th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER). San Francisco, CA: IEEE, 2019.
- [36] 茆诗松, 李亿民, 陆淑兰, 等. 恒定应力加速寿命试验中无失效数据的处理[J]. 应用概率统计, 1993, 9(2): 216-219.
- [37] BREMERMAN M V. Practical Bayesian methods for determining device failure rates from zero-failure data[C]//2013 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). Orlando, FL: IEEE, 2013.
- [38] 宁江凡, 鄢小清, 张士峰. 液体火箭发动机无失效条件下的可靠性分析方法[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(5): 22-25.
- [39] 王玉, 王晓峰, 卑喜敏. 航空发动机密封组件平面度误差检测技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2012, 48(4): 51-52.
- [40] 徐彬涓. 发动机阀门可靠性预测技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- [41] 胡丹丹. 无失效数据下轴承可靠性评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [42] 蔡忠义, 陈云翔, 庄骏, 等. 基于研制试验数据的可靠

- 性综合评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(12): 70-72.
- [43] 王华伟, 周经伦, 何祖玉, 等. 液体火箭发动机可靠性增长规划研究[J]. 宇航学报, 2003, 24(3): 287-289.
- [44] 王华伟. 液体火箭发动机可靠性增长分析与决策研究[J]. 宇航学报, 2004, 25(6): 655-658.
- [45] 冯静, 刘琦, 周经伦, 等. Weibull 分布产品零失效下的可靠性增长研究[J]. 系统工程理论方法应用, 2004, 13(1): 85-88.
- [46] SMITH A F M. A Bayesian note on reliability growth during a development testing program[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1978, R-26(5): 346-347.
- [47] GROSS W A J. The Barlow-Scheuer reliability growth model from a Bayesian viewpoint[J]. Technometrics, 1978, 20(3): 249-254.
- [48] 周源泉, 刘文生, 田胜利. 双参数指数分布的可靠性评估(I) [J]. 质量与可靠性, 2004(1): 5-10.
- [49] 刘琦, 冯静, 周经伦. 基于 Gompertz 模型的液体火箭发动机可靠性增长分析[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 419-423.
- [50] TIBSHIRANI R. Noninformative priors for one parameter of many[J]. Biometrika, 1989, 76(3): 604-608.
- [51] RAIFFA H, SCHLAIFER R. Applied statistical decision theory[J]. The American Mathematical Monthly, 1962, 69(1): 72.
- [52] JAYNES E T. On the rationale of maximum-entropy methods[J]. Proceedings of the IEEE, 1982, 70(9): 939-952.
- [53] LINDLEY D V. On a measure of the information provided by an experiment[J]. Annals of Mathematical Statistics, 1956, 27(4): 986-1005.
- [54] 李芷筠, 戴志辉, 焦彦军. 小样本失效数据下保护可靠性的贝叶斯-蒙特卡罗评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(5): 9-14.
- [55] 王燕萍, 吕震宙. 一种基于 Gibbs 抽样的可靠性增长 Bayes 方法[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(6): 784-788.
- [56] GUIDA M, PULCINI G. Automotive reliability inference based on past data and technical knowledge[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2002, 76(2): 129-137.
- [57] KLEYNER A, BHAGATH S, GASPARINI M, et al. Bayesian techniques to reduce the sample size in automotive electronics attribute testing[J]. Microelectronics Reliability, 1997, 37(6): 879-883.
- [58] 刘琦, 冯静, 周经伦. 基于专家信息的先验分布融合方法[J]. 中国空间科学技术, 2004, 24(3): 13-16.
- [59] COOLEN F P A. On Bayesian reliability analysis with informative priors and censoring[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1996, 53(1): 91-98.
- [60] 徐承相, 马瑞萍, 张笑. 基于 Bayes 方法的可靠性试验评估分析[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(12): 65-67.
- [61] 冯静, 刘琦, 周经伦, 等. 相关函数融合法及其在可靠性分析中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(6): 682-684.
- [62] 冯静, 周经伦. 基于 Bayes-模糊逻辑算子的小子样可靠性信息融合方法[J]. 航空动力学报, 2008, 23(9): 1633-1636.
- [63] 冯静. 小子样复杂系统可靠性信息融合方法与应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.