

航空燃油齿轮泵加速寿命试验与加速退化试验研究进展及展望

安理会¹, 罗 康², 符江锋^{2,3}, 王建礼¹, 李文霞¹, 李柯柯¹

(1. 中国航发西安动力控制科技有限公司, 西安 710077; 2. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129; 3. 西北工业大学 先进动力研究院, 成都 610299)

摘 要: 航空燃油齿轮泵长期服役于高速、高压、高温的恶劣环境, 其寿命和可靠性已成为制约发动机燃油系统性能提升的重要瓶颈。加速寿命试验与加速退化试验是评估燃油齿轮泵寿命与可靠性的重要手段, 本研究全面分析了燃油齿轮泵的故障模式, 系统梳理了国内外针对燃油齿轮泵的加速寿命试验与加速退化试验方法, 并总结了物理失效寿命预测与数据驱动寿命预测模型, 剖析了燃油齿轮泵加速寿命试验与加速退化试验的技术特征, 指出未来燃油齿轮泵加速试验技术可融合等效加速寿命试验、基于布朗运动的加速退化试验和小子样加速寿命试验的历史信息数据, 实现加速应力水平与加速因子的参数更新, 以达到提高寿命预测精度与降低试验成本的目的。

关键词: 航空发动机; 燃油齿轮泵; 加速寿命试验; 加速退化试验; 寿命预测; 研究进展

中图分类号: V233.91

文献标识码: A

文章编号: 1672-2620(2025)01-0041-15

DOI: 10.3724/j.GTER.20250001

Research progress and prospects of accelerated life testing and accelerated degradation testing for aviation fuel gear pump

AN Lihui¹, LUO Kang², FU Jiangfeng^{2,3}, WANG Jianli¹, LI Wenxia¹, LI Keke¹

(1. AECC Xi'an Engine Control Technology Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China; 3. Advanced Power Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Chengdu 610299, China)

Abstract: The aviation fuel gear pump served long-term in harsh environments of high speed, high pressure, and high temperature, and its lifespan and reliability have become significant bottlenecks in enhancing the performance of engine fuel systems. Accelerated life and degradation tests are important means to evaluate the lifespan and reliability of fuel gear pumps. The failure modes of fuel gear pumps were analyzed and the methods of accelerated life testing and accelerated degradation testing for fuel gear pumps were systematically organized both domestically and internationally. The models of physical failure life prediction and data-driven life prediction were summarized. The technical characteristics of accelerated life testing and accelerated degradation testing of fuel gear pumps were analyzed. It is concluded that future technology for accelerated testing of fuel gear pumps could integrate equivalent accelerated life testing, Brownian motion-based accelerated degradation testing, and historical data from small sample accelerated life testing. This integration can enable parameter updates of accelerated stress levels and acceleration factors, thereby improving life prediction accuracy and reducing testing costs.

Key words: aero-engine; fuel gear pump; accelerated life testing; accelerated degradation testing; life prediction; research progress

收稿日期: 2024-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(52372396); 航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目(P2022-B-V-003-001); 中国航发产学研合作项目(HFZL2022CXY013)

作者简介: 安理会(1981-), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 硕士, 研究领域为航空发动机燃油控制系统设计。

1 引言

航空燃油齿轮泵(后文统称燃油齿轮泵)作为航空发动机的核心供油部件,负责向发动机主燃烧室和加力燃烧室提供一定流量和压力的燃油^[1],与一般工业用齿轮泵相比要求更加严格,必须具备极高的可靠度和较长的无故障工作周期。提高燃油齿轮泵可靠性和使用寿命,加强装备“六性”技术的研发,攻克高可靠、长寿命的燃油齿轮泵综合设计技术,切实保障我国新一代航空发动机稳定可靠的供油需求,是新一代航空发动机燃油控制系统技术革新的重要目标^[2]。

当前,新一代航空发动机对燃油齿轮泵的寿命要求越来越高,部分民用飞机采用的燃油齿轮泵寿命已达上万小时,甚至要求与飞机同寿命。欧洲部分国家与美国等航空动力强国在燃油控制装置领域取得了显著的技术突破,军用发动机的燃油控制装置首翻期普遍突破了2 000 h的总寿命,其中燃油离心-齿轮组合泵平均无障碍工作时间(Mean time between failures, MTBF)高达14 000 h^[3-4]。国内燃油齿轮泵的相关可靠性工程技术较国外差距较大,产品首翻期寿命和MTBF技术指标远远落后于国外先进水平^[2-4]。而全寿命试验考核燃油齿轮泵存在周期长、试验成本高等不足,与我国装备快速研制需求不符,已不能满足高可靠、长寿命齿轮泵产品的寿命评估需求,因此有必要对其进行加速寿命试验(Accelerated life testing, ALT)或加速退化试验(Accelerated degradation testing, ADT)^[5-7],以缩短考核产品寿命和可靠性的试验周期。尽管国内对加速寿命试验与加速退化试验的理论研究已经取得较为丰硕的成果,但在燃油齿轮泵应用层面尚未形成一套经过充分验证的、可信有效的燃油齿轮泵加速寿命试验与加速退化试验准则,航空发动机行业也缺少相应的规范和标准。目前国内仅有航空液压柱塞泵所采用的加速寿命试验准则,该准则为引进俄罗斯OCT 1 00389-80(飞机(直升机)液压柱塞泵确定加速寿命试验状态的方法)标准^[1,8],并不完全适用于燃油齿轮泵。此外,加速载荷的有效施加需要确定燃油齿轮泵的失效模式与工况和环境因素的定量关系。燃油齿轮泵的失效模式包括磨损、疲劳、老化和汽蚀等^[9-11],影响因素为压力、转速、介质温度、流量、燃油清洁度等,行业对上述因素与泵寿命

的影响及定量关系尚未开展深入研究,且难以量化确定,现有产品开展加速寿命试验与加速退化试验时,加速因子、加速模型参数和失效判据的确定存在主观随意性强、精度低等问题。

本文通过梳理国内外燃油齿轮泵加速寿命试验与加速退化试验研究成果,结合团队的研究工作,凝练出了我国燃油齿轮泵开展加速寿命试验与加速退化试验需要解决的主要关键技术及其未来发展方向,为国内航空装备厂家和科研人员开展燃油齿轮泵加速寿命试验与加速退化试验相关研究提供参考和借鉴。

2 燃油齿轮泵工作原理与故障统计

2.1 燃油齿轮泵工作原理

燃油齿轮泵通过向发动机燃烧室提供一定压力和流量的燃油来确保发动机正常运行。其工作原理如图1所示,主动驱动轴转动带动主齿轮转动,转动过程中主、从动齿轮齿间容积经历由大到小、再由小到大的过程,这种周期性的加压效应将主动轴提取到的机械能转化为压力能,从而实现燃油的增压功能^[12]。

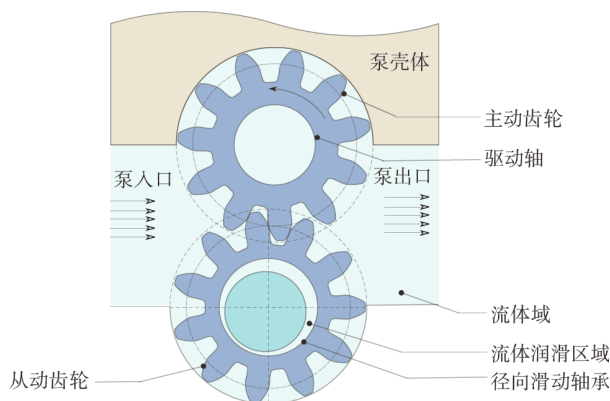


图1 燃油齿轮泵工作原理图

Fig.1 Diagram of the fuel gear pump working principle

2.2 燃油齿轮泵故障统计

结合国内相关单位的统计数据,表1总结了燃油齿轮泵的故障模式。可以看出,磨损是齿轮泵失效的主要模式。据当前行业统计,现役和在役燃油齿轮泵近70%的故障与磨损有直接或间接关系。磨损会使燃油齿轮泵产生性能衰退和突发性故障2种基本失效形式,性能衰退是指由于磨损造成齿轮泵间隙增大,内部泄漏增加,导致容积效率下降,致使寿

表1 燃油齿轮泵故障统计表

Table 1 Fault statistics table of the fuel gear pump

故障来源	故障模式	故障影响
齿轮	齿面磨损	泵转动不畅、油液泄漏、压力下降
径向轴承	磨损	泵转动不稳、噪声增大、振动
密封件	磨损、老化	油液泄漏、压力下降、泵效率降低
过滤器	过滤器堵塞	泵不打油
齿顶与两侧	磨损	油液泄漏、泵效率降低
端面轴承	磨损	油液泄漏、压力下降、泵效率降低
安全阀	损坏	油液泄漏、压力下降、泵效率降低
泵吸入侧	汽蚀	性能降低、振动和噪声增加
花键	磨损、疲劳断裂	系统性能下降、噪声异常
活门组件	活门黏滞	产品非计划维修
壳体	破损、泄漏	发动机着火
其他	噪声异常	安全隐患

命终止;突发性故障是指齿轮泵在非预料的情况下,结构突然损坏^[13-14]。其中,影响磨损的因素包括接触表面形态,材质物理性能、润滑条件以及施加载荷、环境温度等工况参数^[15-16]。结合燃油齿轮泵的相关故障模式可确定磨损是影响燃油齿轮泵寿命的主要失效原因,行业内以磨损失效为依据进行加速寿命试验和加速退化试验考核评估燃油齿轮泵的寿命和可靠性是目前的主流方案。

3 航空燃油齿轮泵加速寿命试验与加速退化试验研究现状

3.1 总体情况

1967年,美罗姆航展中心首次给出了加速寿命试验的统一定义^[17]。20世纪70年代初,加速寿命试验思想开始在国内发展,应用于电子、机械、航天等多个领域的产品中。恒加应力试验、步加应力试验和序加应力试验是加速寿命试验最常见的试验设计方法,这3类方法在试验精度、试验成本和试验效率方面各有优劣^[18-19]。失效数据统计方法是试验设计后的关键,国内于1981年颁布了有关恒加应力试验的4个国家标准(GB 2689.1-81~GB 2689.4-81)^[20-23]。步进试验数据处理的关键理论则是NELSON^[24]于1980年提出的Nelson原理,这一原理使其可以按照恒加应力试验的数据处理方法进行分析,极大简化了步加应力试验的数据分析流程。随后,研究人员发现序加应力试验方法的效率更高,因此该方法被逐渐应用于加速寿命试验中。但是随着科学技术的飞速发展,高可靠、长寿命的产品采用加速寿命试验依然难以获得截尾失效样本,或者获得

的失效数据缺乏可信度,从而导致估计的实际寿命可信度不高。此类产品的失效通常不是一蹴而就的,而是在长期的使用过程中由于磨损、疲劳等失效机理的不断累积退化造成的,燃油齿轮泵即是如此。因此,利用产品退化数据作为依据来估计燃油齿轮泵寿命和可靠性的加速退化试验应运而生。与加速寿命试验类似,加速退化试验同样采用高于常规的应力水平来加速产品的退化过程,应力施加方式也常分为恒定、步进和序进3种;不同的是加速退化试验不再只单一关注于记录失效寿命,而是更倾向于考虑产品的失效过程,从而取得了更多有效的数据,可通过性能退化数据进行产品的可靠度评估与寿命预测。

通常对燃油齿轮泵进行加速寿命试验与加速退化试验建模评估,需建立应力加速模型描述应力与寿命特征之间的关系,如逆幂律模型、组合模型等,并通过使用寿命分布模型描述产品性能退化时间和失效截尾寿命的随机性进行可靠性评估,如威布尔分布、指数分布等,将加速模型与寿命分布模型结合建模即可得到产品的可靠度以及常规应力寿命(图2)。此外,布朗运动是一种随机过程,其常用于加速退化试验建模,同样需要与应力加速模型和寿命分布模型结合,但不能用于加速寿命试验。其中,逆幂律模型、艾林模型以及二者结合的多应力加速模型是燃油齿轮泵开展加速试验的首选模型,加速应力常从压力、转速、温度和油液清洁度中进行选择。

综上,可靠性评估从获取数据类型的角度可以

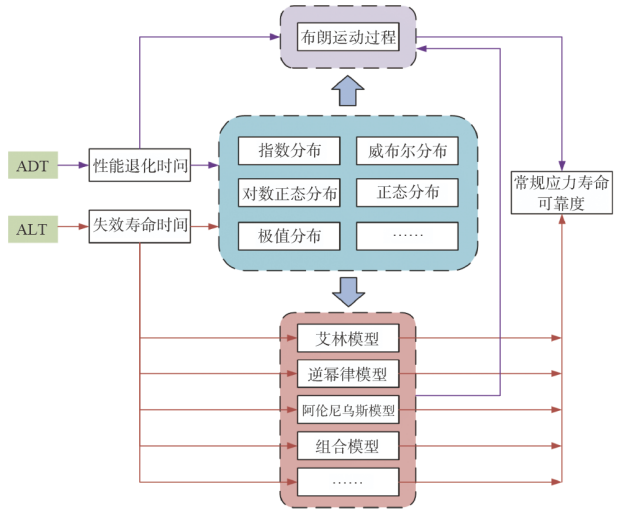


图2 加速寿命试验与加速退化试验建模评估框架图
Fig.2 Accelerated life testing and accelerated degradation testing modeling and evaluation framework diagrams

分为基于寿命信息的可靠性评估与基于退化信息的可靠性评估,而2种方法应分别采用加速寿命试验与加速退化试验进行可靠性评估。目前形成了燃油齿轮泵小子样加速寿命试验可靠性评估技术、基于寿命信息的燃油齿轮泵可靠性评估技术、基于性能退化的燃油齿轮泵可靠性评估技术、燃油齿轮泵寿命预测评估技术和燃油齿轮泵等效加速寿命试验考核技术五大方向。

3.2 燃油齿轮泵小子样加速寿命试验评估技术

加速寿命试验是对加速应力水平下产品的寿命信息估计出加速模型中的未知参数,采用该模型外推正常应力下的产品寿命指标。而为保证模型精度则需要一定数量的试验样本,对当前结构复杂、寿命长和可靠度高的燃油齿轮泵进行常规加速寿命试验较为困难。因此国内外学者开展了小样本加速寿命试验的研究工作。小子样情况下的可靠性评估具有减少试验样本和试验次数、节约成本等优点,在燃油齿轮泵加速寿命试验领域具有重要的理论价值和实际工程意义。

国外研究中,常采用序贯分析方法、Bayes方法和Bootstrap方法来分析这一问题。美国陆军部长代理层要求破坏性试验必须依靠序贯分析方法或Bayes方法来确定系统的可靠性^[25]。Bootstrap方法诞生时属于非参数方法,具有一定的优越性,得到了学者们的关注和研究,从而衍生出了Bayes Bootstrap方法、参数Bootstrap方法等多种变体,使得Bootstrap方法在小子样加速试验的问题研究中得到了广泛应用。国内针对小子样问题的研究始于20世纪60年代,我国学者运用序贯分析方法,在同样的风险下,相比于经典的数据分析方法减少了分析过程中所需的试验样本数。张建伟等^[26]假定燃油齿轮泵的失效时间服从指数分布,结合双逆幂律加速模型,选取压力与转速作为加速应力,建立了截尾样本小于5并解决了判决边界无限延长可能导致判决样本量过大以及试验时间较长问题的修正序贯抽样法(图3),但未给出加速模型参数的具体确定过程。之后国内外学者先后研究和发展出了一系列的小子样可靠性评估方法,如Bayes Bootstrap方法、小子样的相容性检验方法、极值分布分位点法等。在所有小子样问题的研究中,Bayes方法取得了较多的成果,该方法既可以用于单个结构,也能应用于复杂系统,从民用到军用领域均有广泛应用,但在航空燃油泵

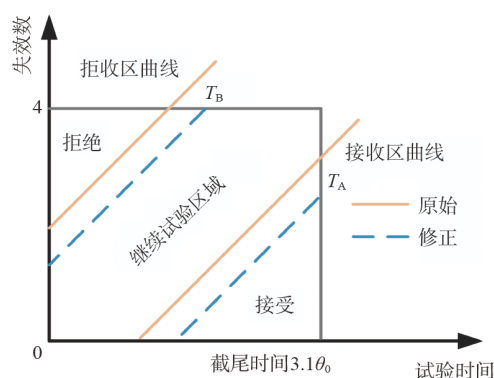


图3 修正序贯抽样判决图^[26]

Fig.3 Correction of sequential sampling decision charts^[26]

加速寿命试验领域暂无相关公开文献。吴海伦^[27]假定燃油泵失效时间服从威布尔分布,选取流量、转速和压力作为加速应力,对燃油泵开展多应力加速寿命试验,在理论方面推理出了燃油泵的GLL-Weibull模型,并采用Bootstrap方法解决了小样本下的寿命估计问题,但未给出具体的试验验证。张莘莘等^[28]对燃油泵采用小子样4个样本估参、变幅载荷和双应力(压力和转速)加速的方法进行了加速寿命试验,得出其加速模型符合双应力逆幂率形式,可用61.5 h加速试验等效425 h长寿命试验。汪明霞^[29]假定燃油泵失效时间服从威布尔分布,选取温度、转速和压力作为加速应力对2台燃油泵开展了加速寿命试验,结合小样本步降试验统计分析方法与蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)方法仿真推导了燃油泵的多应力加速模型,可为开展燃油齿轮泵加速寿命试验提供新的研究思路,但迭代求解小子样试验下的特征寿命过程复杂,以及样本未失效会影响统计分析的精度。总体而言,对燃油齿轮泵开展小子样加速寿命试验仍处于探索和修正阶段,还有大量深入的工作需要开展研究。

3.3 基于寿命信息的燃油齿轮泵可靠性评估技术

对某一批同类型的燃油齿轮泵进行加速寿命试验,选定合适的加速模型,结合失效样本与截尾样本数据推导寿命应力方程与产品可靠度的过程称为基于寿命信息的燃油齿轮泵可靠性评估技术。该技术在以美国和俄罗斯为首的国家较为先进,20世纪60年代美国发布了MIL-P-19692C、MIL-P-19692D、MILP-19692E和SAE-AS19692A等多个军用燃油泵寿命试验标准,苏联于20世纪80年代先后发布了OCT 1 00228-77、OCT 1 00389-80、OCT1 00149-82、

M4-73和M35-84等一系列开展燃油泵加速寿命试验的方法指南,代表了燃油泵可靠性研究的先进技术水准^[1]。而该技术在国内起步较晚,经过几代人的努力,逐步掌握了燃油泵的失效模式、失效机理、可靠性设计及可靠性试验方法,并于20世纪90年代初开始应用于燃油泵^[28],制定了面向燃油泵的寿命试验标准(GJB 2188A-2002)^[30],并制定了液压元件可靠性评估的国家标准(GB/T 35023-2018)^[31]。从总体趋势来看,国外目前仅公布了上述美国和俄罗斯体系的寿命试验标准,且时间较为久远;而国内进入21世纪之后,由于燃油泵的寿命和可靠性不断提高,并未进行大规模地选择试验样本开展基于寿命信息的燃油齿轮泵可靠性评估技术。

21世纪前燃油泵的寿命与可靠度较低,国内许多学者选取了一定量的试验样本对燃油泵开展了基于寿命信息的燃油泵可靠性评估技术。张莘莘等^[28]对12件同型燃油泵选用压力为加速应力,以逆幂律模型为基础,采用恒定应力加速寿命试验方法和威布尔分布最佳线性无偏估计法进行数据处理,推导了产品的寿命及其可靠性特征值,大约缩短至其常规寿命试验所需时间的15.6%,可用125 h加速寿命试验等效于800 h常规寿命试验,并找出了该型产品的关键失效模式为密封件磨损。陈兆能等^[32]对燃油泵开展了5年的可靠性研究,基于逆幂律加速模型,首先分别对12件燃油泵开展了恒定压力加速寿命试验和压力冲击加速寿命试验;然后选取2件燃油泵开展了双应力(转速和压力)加速寿命试验;最后选取2件燃油泵开展了恒定温度加速寿命试验,结果表明:①产品恒定压力加速寿命试验和压力冲击加速寿命试验的失效时间均服从威布尔分布,形状参数分别为0.625和1.952;②选取双应力(转速和压力)进行加速寿命试验是可行的,加速应力同时选择恒转速和恒压力时加速比可达9.46,加速应力同时选择恒转速和冲击压力时加速比可达5.12;③温度作为加速应力时,不适宜疲劳失效模式的加速寿命试验。截至目前,国内并未给出燃油齿轮泵加速寿命试验的相关试验标准,且国外对该领域的技术进行了严格封锁,加之采取加速寿命试验技术需要观察到部分或全部燃油齿轮泵失效的发生,导致其费用高、试验时间长,这与当前高可靠、长寿命燃油齿轮泵相矛盾,若不采用结合小子样理论的加速寿命试验,基于寿命信息的燃油

齿轮泵可靠性评估方法可能无法进一步满足国内燃油齿轮泵制造商和用户的需求。尽管杨旻等^[33]提出了以油液清洁度作为加速应力的恒定应力加速寿命试验方法,但其并未给出具体的试验结果验证。

随着航空科学技术的不断进步,结合燃油齿轮泵小子样加速寿命试验评估技术和基于寿命信息的燃油齿轮泵可靠性评估技术的当前研究现状可知,采用传统的加速寿命试验及相关统计方法并不能有效考核燃油齿轮泵的寿命和可靠性,尽管小子样加速寿命试验技术可以有效减少试验费用和试验样本,但加速模型精度与适用性,以及计算求解繁琐问题需进一步完善。

3.4 基于性能退化的燃油齿轮泵可靠性评估技术

对燃油齿轮泵开展加速退化试验的过程同时记录性能退化数据(如出口流量、振动信号等),结合布朗运动过程与仿真模拟样本进行评估燃油齿轮泵寿命和可靠度的方法称为基于性能退化的燃油齿轮泵可靠性评估技术。基于性能退化的可靠性评估方法可追溯到1969年GERTSBACH和KORDONSKI^[34]通过建立线性退化模型对设备进行的可靠性评估。NELSON^[35]、LU^[36]和MEEKER^[37]等在基于性能退化的可靠性评估的建模、统计分析及应用等方面做了大量工作。已有试验研究表明,基于性能退化的可靠性评估方法可在更短的试验时间内获得相同的估计精度^[38],并在LED^[39-40]、疲劳裂纹长度^[41]、电缆^[42]、桥横梁^[43]、陀螺仪^[44]、通风机^[45]、燃气涡轮机^[46]、锂离子电池^[47-48]等高可靠、长寿命产品的退化建模和可靠性评估方面得到了广泛应用。

燃油齿轮泵的性能退化过程并不是一条光滑上升或下降的曲线,而是具有随机波动特征。布朗运动恰能描述非单调的退化过程且具有良好的物理意义和统计分析特性,并取得了众多研究成果。LIAO和ELSAYED^[49]考虑环境动态性对性能退化的影响,提出了线性漂移布朗运动的可靠性评估方法;WHITMORE和SCHENKELBERG^[50]为描述非线性退化趋势,提出了时间尺度的布朗运动模型;TSENG和PENG^[51]提出了一种综合的布朗运动并应用于LED灯退化建模;YE等^[52]提出了一类新的随机效应布朗运动模型,考虑了扩散项与漂移项的相关性,除表征个体差异外,还可以描述高退化速率

给产品带来的随机波动性;WANG等^[53]针对两阶段退化过程,提出了基于布朗运动和Gamma过程的分阶段退化实时可靠性评估方法;Si等^[44]假定布朗运动漂移项中的1个参数服从正态分布来描述产品间的个体差异,并给出了首达阈值的失效分布以及剩余寿命分布的近似表达式;PANG等^[54]在加速退化试验研究中建立了考虑退化过程随机波动性、退化速率个体差异和测量误差的非线性退化模型,并推导了考虑测量误差的退化过程首达时分布近似解;LI等^[55-56]在加速退化试验的建模中,基于布朗运动模型和广义布朗运动模型给出了考虑个体差异和测量误差的首达时寿命分布数值解。进一步地,潘骏等^[57]针对具有多个性能特征的产品退化过程,建立了多元正态分布的加速退化模型;SHEN等^[58]研究了基于多元正态分布的加速退化可靠性评估方法。基于性能退化的燃油齿轮泵可靠性评估技术在国外仅开放了1篇论文,而国内学者开展了大量的研究工作。EDMUND^[59]对燃油齿轮泵使用步进应力加速退化试验(Step-stress accelerated degradation testing, SSADT)和贝叶斯推理(图4)估计布朗运动的退化参数,利用最大重叠离散小波变换(Maximum overlap discrete wavelet transform, MODWT)与自回归移动平均(ARMA(2,1))提取压力脉动特征,提供随机、线性和非单调的退化路径,使用布朗函数进行了建模运动仿真,之后利用蒙特卡罗方法进行模拟大样本的退化轨迹,并设置伪故障阈值(Delta omega),存储每个样本的伪故障时间(Pseudo fault time, PFT)估计燃油齿轮泵的可靠度。刘小平等^[60-62]对燃油齿轮泵的性能退化可靠性评估开展了许多研

究,先是为研究测量误差在SSADT方法剩余寿命估计中的影响,建立了基于布朗运动的考虑个体差异和测量误差的退化模型,进一步提高了可靠性估计与剩余寿命预测的准确性;并以燃油齿轮泵为研究对象,考虑其性能退化过程中存在退化初值个体差异、退化速率个体差异、退化轨迹随机波动和测量误差等多种不确定性,结合布朗运动对一元和二元性能退化可靠性评估、SSADT的建模和优化设计等4个方面展开了研究,为燃油齿轮泵整体的可靠性评估提供了更好的理论支持。赵家炜^[63]将压力作为加速应力对燃油齿轮泵进行了SSADT,并将退化性能指标进行了特征提取。黄爱梅等^[64]确定了某型燃油泵的加速退化试验方案,根据算例推导出了性能退化量均值随时间的线性退化模型,但未给出具体的试验验证。LI等^[56]对燃油齿轮泵进行SSADT验证了预测算法的准确度。GUO等^[65]对燃油齿轮泵进行SSADT建立了燃油齿轮泵的退化评估模型,推导了常规应力作用下的失效时间。GUO等^[66]采用动网格技术对燃油齿轮泵内部流场进行详细模拟,建立了端面与径向泄漏量 and 对应磨损量的三次函数,并固定油液污染度、转速和温度不变,对燃油齿轮泵进行了SSADT验证,可有效识别泵的磨损退化状态,但与实际模型存在一定的误差。WANG等^[67]对燃油齿轮泵进行了SSADT,并对原始振动信号数据段进行了预处理。

综上,国内在布朗运动结合加速退化试验进行基于性能退化燃油齿轮泵可靠性评估技术的理论层面上取得了一定的发展,但燃油齿轮泵长期服役于高温、高压、高速的恶劣环境中,高温低黏度的燃油

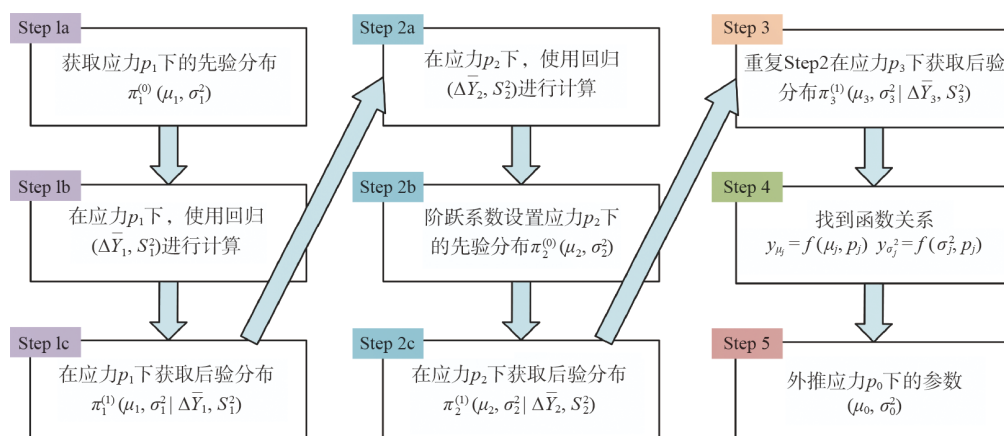


图4 贝叶斯推理步骤^[59]

Fig.4 Bayesian reasoning steps^[59]

会加剧泵的失效,这是一个多物理场耦合的过程,当前加速退化试验中仅考虑压力作为加速应力,可能造成加速状态与常规状态失效机制不一致的问题,仍需进一步探讨。

3.5 燃油齿轮泵寿命预测评估技术

国内外学者在寿命预测领域做出了诸多显著贡献,推动了燃油齿轮泵可靠性研究的发展。基于数据驱动和物理失效模型的预测方法是目前最为热门的2种策略,前者不依赖于精确的系统失效机理建模,而是利用传感器收集试验元件或系统的退化数据,随后通过统计与人工智能等方法对退化数据进行分析处理实现元件或系统的寿命预测;而后者需建立基于物理失效的寿命预测模型,其物理失效的复杂度取决于系统本身和工作状态,对于复杂系统,精确推导其物理失效模型难度较大。

3.5.1 基于物理失效的寿命预测评估方法

根据产品的失效机理(如磨损、疲劳等)构建寿命与工况的物理方程称为基于物理失效的寿命预测评估方法。国外学者着重于关注比例风险模型预测燃油齿轮泵总体失效的寿命;而国内学者结合燃油齿轮泵机理模型与仿真技术分别从磨损和疲劳失效在基于物理失效的寿命预测评估方面取得了阶段性的研究成果。

COX^[68]提出的比例风险模型(Proportional hazards model, PHM)在寿命预测领域具有极其深远的影响,各国学者对该模型进行了一系列的改良。KUMAR和WESTBERG^[69]提出了分层比例风险模型,经验证该方法更适合机械部件的退化过程^[70];AALEN^[71]提出了Aalen模型,改进后能降低PHM的限制条件,并在机械部件的寿命预测中有优良的效果;GORJIAN等^[72]提出了显式风险模型,在机械部件的可靠性评估等方面有显著效果。刘勇等^[73]基于燃油齿轮泵磨损劣化机理研究,建立了污染颗粒与齿轮泵磨损线形模型,从理论上初步推导了燃油齿轮泵的寿命预测模型。MCLINN^[74]推导了以压力、温度、转速和油液黏度为应力的燃油齿轮泵线性寿命预测方程,进行了加速寿命试验验证,但并没考虑4种因素之间是否存在两两交互作用。SHEN等^[75]针对燃油齿轮泵齿面接触疲劳的典型失效模式,考虑燃油齿轮泵内部流场的影响,提出了基于虚拟仿真技术的齿轮疲劳寿命预测方法,并结合工程应用,证明了该方法的有效性。王晓红等^[76]应用

Omega理论对外啮合齿轮泵进行了污染磨损寿命分析,建立了齿轮泵磨损泄漏模型,并利用试验数据对其进行了优化,最后得到了齿轮泵寿命的变化规律。郭善新等^[77]针对齿轮泵实际使用寿命远低于设计预期寿命问题,建立了齿轮泵在NAS1638标准不同污染等级下的磨损预测寿命模型。曹永军^[78]基于齿轮泵磨损寿命试验,结合Omega理论建立了以油液污染颗粒及工作压力为变量,以容积效率为指标的齿轮泵磨损寿命模型。张剑慈^[79]基于Omega理论分析了不同尺度磨粒对燃油泵耐受度的影响,较准确地预测了燃油泵的磨损寿命。王淑红等^[80]以燃油齿轮泵从动轴承作为敏感部件,选取影响燃油齿轮泵寿命的主要因素(温度)作为修正因子并给出其修正系数的计算方法,推导了燃油齿轮泵通用寿命模型。基于物理失效的寿命预测评估方法最大的优点在于可对燃油齿轮泵加速寿命试验和加速退化试验的可靠性评估结果进行模型的准确度和稳健性验证,以及为加速应力的选取和燃油齿轮泵的维护提供技术支持。

3.5.2 基于数据驱动的寿命预测评估方法

根据产品的性能退化数据,定义数据失效阈值后,引入智能预测算法进行预测未来寿命的过程称为基于数据驱动的寿命预测评估方法。随着对燃油齿轮泵可靠性要求的不断提高,试验技术对高可靠、长寿命产品研发目标的验证具有重要的支撑作用。此外,由于产品的更新迭代速度不断加快,对产品寿命信息的快速获取提出了更高要求。因此,结合齿轮泵加速退化试验退化数据与智能算法进行合理有效的寿命预测在可靠性试验工程领域受到了广泛关注。现阶段研究人员针对该方向开展了大量的研究工作,形成了众多研究成果。

WANG等^[67]将燃油齿轮泵步进应力加速退化试验处理后的健康指标作为标签输入到基于Bi-LSTM网络的剩余使用寿命预测模型中,并进行模型训练,实现了燃油齿轮泵的剩余使用寿命预测,但未对燃油齿轮泵进行可靠度评估。何庆飞等^[81]使用改进灰色神经网络寿命预测模型对燃油齿轮泵寿命特征进行分析和预测,精度可达98.42%,进一步以液压油光谱分析数据为特征,提出了基于灰色模型和SVM的燃油齿轮泵寿命预测模型,预测精度提升为99.37%^[82]。王向周等^[83]改造出具有采集检测燃油泵运行参数的控制器,基于倒立二叉树型支持

向量机方法实现了燃油泵的在线寿命预测与健康管理能力,可减少时间成本,降低试验损耗。张弛^[84]基于燃油齿轮泵步进应力加速退化试验的试验数据,首次将自适应模糊神经网络方法运用于燃油齿轮泵寿命预测领域并取得了较好的预测结果。李永涛^[85]提出了一种基于Bayesian-LSTM的燃油齿轮泵健康状态识别方法,并根据燃油齿轮泵步进应力加速退化试验采集各健康状态的退化信息验证了该方法的有效性。张先航等^[86]采用小波分析提取了燃油泵性能退化趋势信号,运用布朗运动对其性能退化数据进行建模分析,通过Bayes方法实现预测模型参数的在线更新,得到其剩余寿命预测结果,预测结果的不确定性随运行时间的推移逐渐降低。LI等^[87]提出了一种基于核函数主成分分析(Kernel principal component analysis, KPCA)和时学习算法(Just-in-time learning, JITL)方法的机械设备剩余使用寿命预测方法,能够及时预警燃油齿轮泵的性能退化过程,及时预报燃油齿轮泵的剩余使用寿命,并结合燃油齿轮泵步进应力加速退化试验进行了验证,结果表明具有更高的预测精度。ZHENG等^[88]提出了一种基于两阶段多通道Robust-ResNet的燃油齿轮泵健康监测方法,该方法可以处理两阶段任务,包括燃油齿轮泵健康管理的实时监控故障检测和剩余使用寿命预测。GUO等^[65]以燃油齿轮泵的出口流量和退化融合指标为训练指标,采用Trainbr-RBFNN进行训练,对步进应力加速退化试验下的燃油齿轮泵失效时间进行了有效预测。因此,只要保证燃油齿轮泵加速退化试验与燃油齿轮泵常规工况下的失效机制尽可能一致,采用基于数据驱动的寿命预测方法可以进一步缩短试验时间,减少试验成本,若预测精度较高,其预测值可作为燃油齿轮泵的实际实时监测值。

综上所述,基于物理失效和基于数据驱动的燃油齿轮泵寿命预测评估方法目前均得到了较为充足的发展。2类技术各有优缺点,基于物理失效的寿命预测方法难于准确模拟燃油齿轮泵性能退化及失效的物理过程,原因在于燃油齿轮泵失效是由多物理场耦合、恶劣工况和失效零件多样化共同组成;而基于数据驱动的寿命预测方法难点在于燃油齿轮泵的性能退化数据是否能真正衡量燃油齿轮泵实际工况的失效机制,这需要进一步优化加速退化试验的设计过程。

3.6 燃油齿轮泵等效加速寿命试验考核技术

从航空发动机常规载荷谱与燃油齿轮泵失效的主要原因出发,根据磨损或疲劳失效机理,可建立出某一载荷(转速、压力和温度等)情况下的关键零件加速状态和常规状态的磨损量或疲劳损伤相同的等式,由此推导出适用于燃油齿轮泵的等效多应力加速模型。根据燃油齿轮泵等效多应力加速模型选取加速应力进行加速试验并验证模型准确性的过程可称为燃油齿轮泵等效加速寿命试验考核技术。该技术的等效多应力加速模型能在最大程度上接近产品的失效机制,已在国内的实际工程中得到应用。

邹丕先等^[89]推导了柱塞式燃油泵的疲劳型和磨损型等效多应力加速模型,对柱塞式燃油泵ZB-36E和调节器RT-9E进行了3次验证试验,等效加速试验后附件性能的变化情况、各零组件外观状况与在飞机上使用到期的情况和以往按常规寿命试验的结果均相仿,200 h等效加速试验可代替1 000 h的常规寿命试验,验证了加速模型的可行性。张耿^[90]以燃油齿轮泵径向轴承磨损失效为主要失效模式,针对航空发动机的典型任务剖面,如地面慢车、巡航、爬升、起飞等状态,根据Archard磨损模型与疲劳损伤累计理论^[91-92]推导了齿轮泵黏性磨损型等效加速寿命方程与疲劳磨损型等效加速寿命方程,并给出了等效加速寿命试验的试验方法,该方法在较短的时间内可达到全寿命试验的效果。2种等效加速寿命方程进行试验得到的加速比如图5所示。中国航发西安动力控制科技有限公司对燃油齿轮泵展开了大量的等效加速寿命试验,并取得了一定的突破。该企业考虑到与燃油齿轮泵和磨损相关的几个核心物理参数为压力、转速以及受温度影响的介质黏度,因此针对燃油齿轮泵的滑动轴承与花键磨损,构建了较为实用的加速寿命模型。此外,李柯柯等^[93]对燃油齿轮泵的可靠性强化试验技术进行了分析、研究、试验和总结,归纳形成了燃油齿轮泵的可靠性强化试验规范,并已成功应用于某型发动机3型燃油附件的研制任务中。

等效加速寿命试验采用2件或以上同类型的燃油齿轮泵即可进行试验验证其准确性,如加速比可采用磨损累计量(或疲劳损伤累计值)和前后试验时间进行验证。为进一步提升等效加速寿命试验技术成熟度以及加速模型的适用度,未来可多次进行试验反馈,以给出一套精确度更高的燃油齿轮泵等效

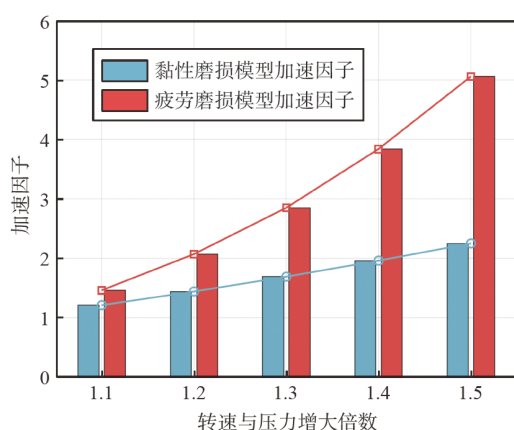


图5 黏性磨损方程与疲劳磨损方程加速比对比图

Fig.5 Comparison of the acceleration ratio of the viscous wear equation and the fatigue wear equation

加速寿命试验方法。

4 燃油齿轮泵加速寿命试验与加速退化试验研究展望

在进行燃油齿轮泵加速寿命试验与加速退化试验评估过程中,普遍以磨损退化型失效为主,存在样本量少、个体差异性显著、试验数据难获取且难以建立退化模型、磨损过程多因素耦合、油膜厚度难以确定、多故障模式、模型参数不确定性、加速模型的选择主观性较强等挑战。国内现有加速试验方法成熟度不高,未构建一套经过试验充分验证的、物理失效机理驱动的、泛化性较强的加速寿命试验与加速退化试验方法和加速模型。具体而言,还需要从以下4个方面进行更深入的研究:

(1) 燃油齿轮泵小子样加速寿命试验模型求解复杂度与精度平衡方法研究。具体包括:①小子样加速寿命试验技术迭代求解燃油齿轮泵特征寿命的方法求解过程复杂,统计分析方法的软件实现将成为一项富有挑战性且极具工程现实意义的研究工作;②小子样加速寿命试验过程中仍需将燃油齿轮泵失效,加之燃油齿轮泵为高可靠产品,可能造成燃油齿轮泵未完全失效或失效时间较长,间接影响模型精度;③燃油齿轮泵的关键失效部件轴承工作于高速、高压、高温的多物理场耦合环境,要进一步提高最终加速模型的精度可从加速应力的施加角度出发进行解决,但其加速应力数值的确定是导致其失效时间长短和模型精度相互博弈的关键难点。

(2) 结合布朗运动与基于数据驱动寿命预测的

燃油齿轮泵加速退化试验实时数据更新方法研究。加速退化试验结合布朗运动将成为未来进行燃油齿轮泵可靠性评估的突破方向,融合基于数据驱动的寿命预测则可缩短加速试验的时间成本。加速退化试验完全适用于燃油齿轮泵且具有许多优点:①使用布朗运动模拟燃油齿轮泵的磨损随机非严格单调退化过程合理且可行;②已有研究给出步进应力加速退化试验的设计方法;③加速退化试验适用于小样本量,且形成了贝叶斯推理估计漂移参数和扩散系数的方法;④MODWT-ARMA(2,1)方法可将压力脉动信号变化为随时间变化的Delta Omega,而Delta Omega作为燃油齿轮泵失效阈值的可信度更高;⑤可根据小样本的布朗运动参数使用蒙特卡罗模拟大样本量的退化轨迹,对齿轮泵的可靠性进行估计,无需考虑复杂的失效机理且节省试验成本。此外,根据燃油齿轮泵加速退化试验后的退化指标进行预测剩余寿命的算法精度较高,只要保证加速试验数据的可信度,结合加速退化试验可进一步减少试验时间成本。尽管如此,目前燃油齿轮泵加速退化试验的应力施加方法与选取的应力类型还需不断进行验证,以保证加速试验与常规试验状态下的失效机理一致,从而保证数据的准确度,且退化阈值的设置和整个过程的程序实现具有挑战性,科研人员应共同努力推动发展。

(3) 累积试验数据反馈的燃油齿轮泵等效加速寿命试验方法研究。等效加速寿命试验考核燃油齿轮泵寿命应多次验证加速模型的精度,根据积累的大量历史数据建立磨损退化模型并进行寿命预测。当前,燃油齿轮泵等效加速寿命试验主要是针对轴承的黏性磨损和疲劳磨损建立的等效多应力加速寿命模型,已在工程实际中进行了试验验证,但是还存在黏性磨损系数的不确定性问题,磨损系数与油液温度、清洁度、燃油饱和水蒸气、施加载荷的大小等因素有关,科研人员可选择合适的参数多次进行等效加速寿命试验,结合常规寿命试验进行验证,保证加速模型的可信度,从而积累大量且准确的历史数据建立磨损退化模型并进行基于数据驱动的寿命预测。此外需要考虑3个问题:①轴承涂有润滑脂,应针对Stribeck曲线进一步考虑磨损系数;②燃油齿轮泵除径向轴承磨损外,端面止推轴承(侧板)与密封件的磨损失效也会导致燃油齿轮泵失效,试验过程应大量积累各个关键摩擦副的磨损数据;③关键摩

擦副除黏性磨损外还会产生磨粒磨损,应针对各个部件建立相应的磨粒磨损方程和黏性磨损方程进行深入研究。

(4) 结合物理失效寿命预测的燃油齿轮泵加速试验应力选择与验证方法研究。基于物理失效的寿命预测模型能为燃油齿轮泵加速寿命试验与加速退化试验技术提供额外的帮助,可根据已有的寿命预测模型进行应力敏感度分析,如方差灵敏度分析、回归分析等,确定出哪些应力对燃油齿轮泵的寿命影响较大,使加速试验的设计和试验过程更加具有针对性。此外,寿命预测值可为加速寿命试验与加速退化试验的评估结果提供参考和验证。

如图6所示,从目前来看,未来航空燃油齿轮泵加速寿命试验与加速退化试验技术可继续往等效加速寿命试验、结合布朗运动的加速退化试验和小子样加速寿命试验发展,结合寿命预测方法对3个方向

不断进行试验结果反馈,随着时间的推进给出一套可靠的燃油齿轮泵寿命和可靠性评估方法。

5 结论

研究归纳了当前国内外开展燃油齿轮泵加速寿命试验与加速退化试验的方法,以及物理失效寿命预测模型与数据驱动寿命预测算法;对比总结了当前方法的技术特征;并给出了当前航空发动机行业针对燃油齿轮泵开展寿命和可靠性评估的3条创新发展路线。主要结论如下:

(1) 常规加速寿命试验技术应用于高可靠性燃油齿轮泵存在试验成本高问题,而小子样加速寿命试验技术可减少试验样本、节约试验时间,但是迭代求解燃油齿轮泵特征寿命的过程复杂;

(2) 基于布朗运动的加速退化试验技术应用于燃油齿轮泵可减少试验样本和试验时间,且能积累

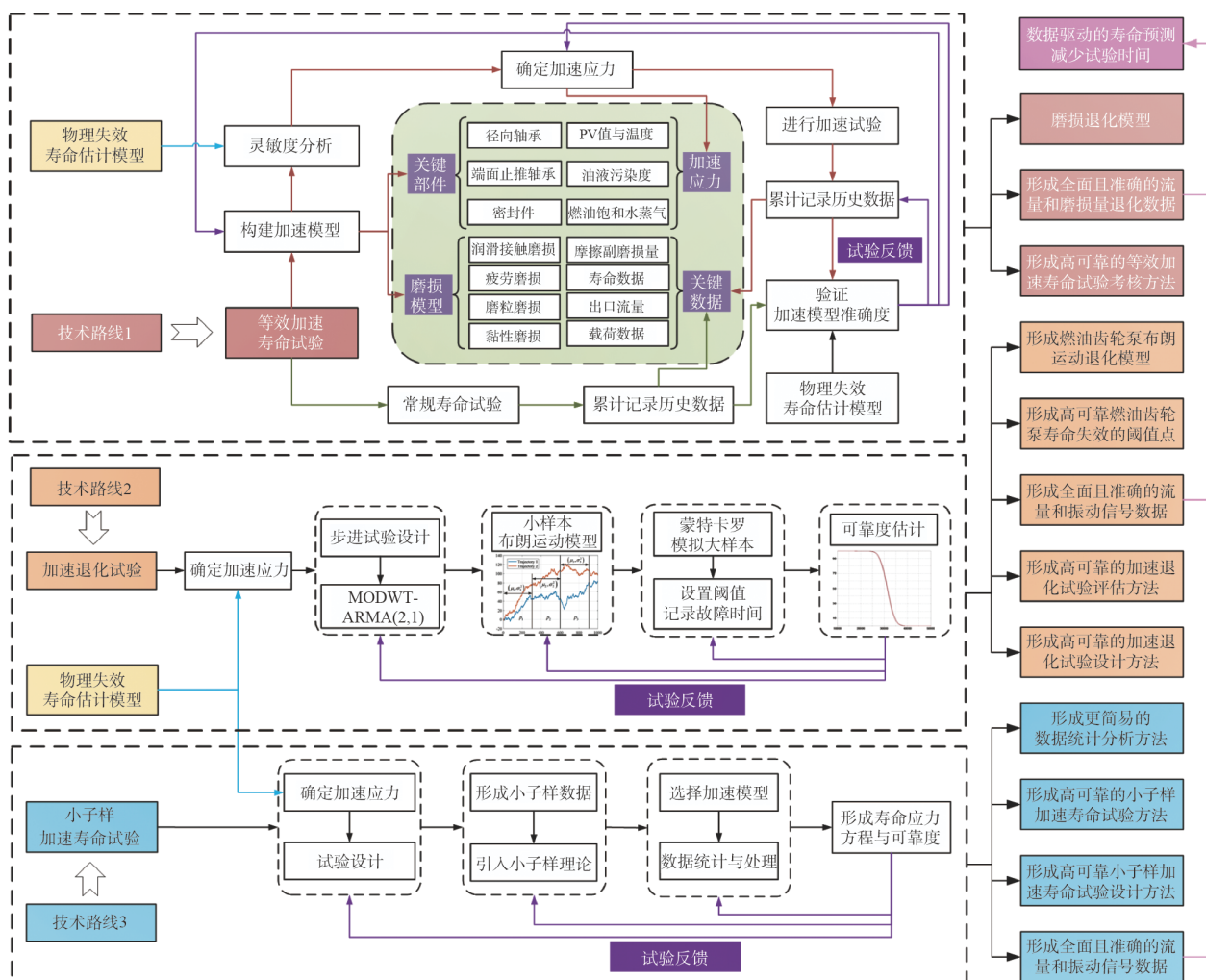


图6 燃油齿轮泵加速寿命试验与加速退化试验技术未来发展路线图

Fig.6 Roadmap for the future development of fuel gear pump ALT and ADT technology

大量退化数据,结合蒙特卡罗模拟或智能预测寿命算法可考核燃油齿轮泵的寿命与可靠性;

(3) 等效加速寿命试验技术应用于燃油齿轮泵可减少试验样本,且该加速试验数据能准确表征燃油齿轮泵某些部件的失效机制,但是燃油齿轮泵服役环境复杂、失效部件多样化,需全面考虑关键摩擦副与磨损模型,积累试验数据并结合等效加速寿命试验技术不断进行改进;

(4) 未来可引入基于物理失效的燃油齿轮泵寿命估计模型进行敏感度分析确定加速应力或验证加速模型的准确度,从而提高加速试验设计的可行性,并准确积累试验后的出口流量、振动信号等退化数据,引入基于数据驱动的智能寿命预测算法,实现减少试验时间、实时状态监测等优点。

(5) 未来可通过提高小子样加速寿命试验技术、基于布朗运动的加速退化试验技术和等效加速寿命试验技术的成熟度,夯实历史数据,结合物理失效寿命估计模型与智能寿命预测算法,不断进行试验反馈改进加速模型,建立一套较为有效的加速试验规范,为后续形成一套经过充分验证的、可信度高的燃油齿轮泵寿命与可靠性考核准则提供有力支持。

参考文献:

- [1] 马纪明,阮凌燕,付永领,等. 航空液压泵加速寿命试验现状[J]. 液压与气动,2015,(6):6-12.
MA Jiming, RUAN Lingyan, FU Yongling, et al. Accelerated life testing status of aviation hydraulic pump[J]. Hydraulics and Pneumatics, 2015, (6): 6-12. (in Chinese)
- [2] 安理会,王建礼,刘意,等. 航空发动机燃油控制装置可靠性研究综述[J]. 推进技术,2024,45(1):6-22.
AN Lihui, WANG Jianli, LIU Yi, et al. A review of the reliability of aero engine fuel control devices[J]. Propulsion Technology, 2024, 45(1): 6-22. (in Chinese)
- [3] 刘尚勤,王磊. 航空发动机的一种新型主燃油泵设计[J]. 航空发动机,2003,29(2):5-7.
LIU Shangqin, WANG Lei. Design of a new main fuel pump for aero engine[J]. Aero Engine, 2003, 29(2): 5-7. (in Chinese)
- [4] 刘尚勤. 离心泵用作航空发动机主燃油泵研究[J]. 航空发动机,2006,32(2):43-45.
LIU Shangqin. Research on the use of centrifugal pump as the main fuel pump of aero engine[J]. Aero Engine, 2006, 32(2): 43-45. (in Chinese)
- [5] BOLARINWA O A. Principles and methods of validity and reliability testing of questionnaires used in social and health science researches[J]. Nigerian Postgraduate Medical Journal, 2015, 22(4): 195-201.
- [6] 赛义德. 可靠性工程[M]. 杨舟,译. 2版. 北京:电子工业出版社,2013.
EISAYED E A. Reliability Engineering[M]. Translated by YANG Zhou. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. (in Chinese)
- [7] MODARRES M, AMIRI M, JACKSON C. Probabilistic physics of failure approach to reliability: modeling, accelerated testing, prognosis and reliability assessment[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2017.
- [8] 中国航空工业总公司. 飞机(直升机)液压柱塞泵确定加速寿命试验状态的方法[S]. OCT 1 00389-80, 1996.
Aviation Industry Corporation of China. Method for determining the accelerated life test state of aircraft (helicopter) hydraulic piston pump[S]. OCT 1 00389-80, 1996. (in Chinese)
- [9] 严如强,许文纲,王志颖,等. 航空发动机燃油控制系统故障诊断技术研究进展与挑战[J]. 机械工程学报, 2024, 60(4): 3-31.
YAN Ruqiang, XU Wengang, WANG Zhiying, et al. Research progress and challenges of fault diagnosis technology for aero engine fuel control system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(4): 3-31. (in Chinese)
- [10] DHOTE N D, KHOND M P. Condition monitoring approach for wear recognition in gear pump[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2022, 22(4): 1558-1565.
- [11] DHOTE N, KHOND M P, SHEIKH S, et al. Performance and ferrography analysis for determining the wear of an external gear pump[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1969(1): 012015.
- [12] 樊思齐. 航空发动机控制(上册)[M]. 西安:西北工业大学出版社,2008.
FAN Siqi. Aero Engine Control (Volume 1)[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2008. (in Chinese)
- [13] 杨旸,刘杰. 齿轮泵磨损加速寿命试验方法的研究[J]. 机床与液压,2014,42(23):204-206.
YANG Yang, LIU Jie. Study on wear accelerated life testing method of gear pump[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2014, 42(23): 204-206. (in Chinese)
- [14] 赵家伟. 基于图神经网络的外啮合齿轮泵剩余使用寿命预测研究[D]. 河北秦皇岛:燕山大学,2021.
ZHAO Jiawei. Research on prediction of remaining service life of external meshing gear pump based on graph neural network[D]. Hebei Qinhuangdao: Yanshan University, 2021. (in Chinese)

- [15] 吕志朋,王立强,赵凤芹,等. 基于滑动轴承的磨损疲劳实验分析[J]. 造纸装备及材料,2023,52(9):17-19.
LU Zhipeng,WANG Liqiang,ZHAO Fengqin,et al. Experimental analysis of wear fatigue based on sliding bearings[J]. Papermaking Equipment and Materials, 2023,52(9):17-19. (in Chinese)
- [16] 张天宇,张浩. 外啮合齿轮泵侧板磨损分析[J]. 液压气动与密封,2018,38(10):65-67.
ZHANG Tianyu,ZHANG Hao. Wear analysis of side plate of external gear pump[J]. Chinese Hydraulics, Pneumatics and Seals,2018,38(10):65-67. (in Chinese)
- [17] 张春华,温熙森,陈循. 加速寿命试验技术综述[J]. 兵工学报,2004,25(4):485-490.
ZHANG Chunhua,WEN Xisen,CHEN Xun. Survey of accelerated life testing techniques[J]. Acta Armamentarii,2004,25(4):485-490. (in Chinese)
- [18] 茆诗松,王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京:科学出版社,1997.
MAO Shisong,WANG Lingling. Accelerated life testing[M]. Beijing:Science Press,1997. (in Chinese)
- [19] 张春华,陈循,温熙森. 步降应力加速寿命试验(上篇)——方法篇[J]. 兵工学报,2005,26(5):661-665.
ZHANG Chunhua,CHEN Xun,WEN Xisen. Step drop stress accelerated life testing (Part I)—Method[J]. Acta Armamentarii,2005,26(5):661-665. (in Chinese)
- [20] 国家标准总局. 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则[S]. GB 2689.1-81,1981.
China State Bureau of Standards. General principles of constant stress life testing and accelerated life testing method[S]. GB 2689.1-81,1981. (in Chinese)
- [21] 国家标准总局. 寿命试验和加速寿命试验的图估计法(用于威布尔分布)[S]. GB 2689.2-81,1981.
China State Bureau of Standards. Graph estimation method for life test and accelerated life testing (for Weibull distribution)[S]. GB 2689.2-81,1981. (in Chinese)
- [22] 国家标准总局. 寿命试验和加速寿命试验的简单线性无偏估计法(用于威布尔分布)[S]. GB 2689.3-81,1981.
China State Bureau of Standards. Simple linear unbiased estimation method for life test and accelerated life testing (for Weibull distribution)[S]. GB 2689.3-81,1981. (in Chinese)
- [23] 国家标准总局. 寿命试验和加速寿命试验的最好线性无偏估计法(用于威布尔分布)[S]. GB 2689.4-81,1981.
China State Bureau of Standards. The best linear unbiased estimation method for life test and accelerated life testing (for Weibull distribution)[S]. GB 2689.4-81,1981. (in Chinese)
- [24] NELSON W. Accelerated life testing-step-stress models and data analyses[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1980,R-29(2):103-108.
- [25] 张金槐,蔡洪. Bayes小子样理论的应用研究——回顾与展望[J]. 飞行器测控技术,1998,(1):1-4.
ZHANG Jinhui,CAI Hong. Application of Bayes' child-like theory: a review and prospects[J]. Aircraft TT&C Technology,1998,(1):1-4. (in Chinese)
- [26] 张建伟,李华聪,符江锋,等. 航空齿轮泵序贯加速寿命试验方法研究[J]. 液压与气动,2012,36(5):101-104.
ZHANG Jianwei,LI Huacong,FU Jiangfeng,et al. Study on sequential accelerated life testing method of aviation gear pump[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2012,36(5):101-104. (in Chinese)
- [27] 吴海伦. 离心式航空燃油泵的加速寿命试验研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2015.
WU Hailun. Experimental study on accelerated life of centrifugal aviation fuel pump[D]. Beijing:Beihang University,2015. (in Chinese)
- [28] 张莘莘,卢建生,张增良,等. 输油泵加速寿命试验方法及可靠性研究[J]. 北京航空航天大学学报,1992,(1):65-71.
ZHANG Pingping,LU Jiansheng,ZHANG Zengliang,et al. Study on accelerated life test method and reliability of oil transfer pump[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,1992,(1):65-71. (in Chinese)
- [29] 汪明霞. 航空泵加速寿命试验关键技术的研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2011.
WANG Mingxia. Research on key technologies for accelerated life testing of aviation pump[D]. Beijing:Beihang University,2011. (in Chinese)
- [30] 中国人民解放军总装备部. 飞机变量液压泵通用规范[S]. GJB 2188A-2002,2002.
General Armaments Department of the People's Liberation Army. General specification for aircraft variable hydraulic pumps[S]. GJB 2188A-2002,2002. (in Chinese)
- [31] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 液压元件可靠性评估方法[S]. GB/T 35023-2018,2018.
State Administration for Market Regulation,Standardization Administration of the People's Republic of China. Reliability evaluation method of hydraulic components[S]. GB/T 35023-2018,2018. (in Chinese)
- [32] 陈兆能,王均功,余经洪. 25SCY14-1B型轴向柱塞泵失效机理研究及寿命提高[J]. 上海交通大学学报,1994,28(2):31-38.
CHEN Zhaoneng,WANG Jungong,YU Jinghong. Study on failure mechanism of 25SCY14-1B axial

- piston pump and its life improvement[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1994, 28(2): 31–38. (in Chinese)
- [33] 杨 旻, 刘 杰. 齿轮泵磨损加速寿命试验方法的研究[J]. 机床与液压, 2014, 42(23): 204–206.
YANG Yang, LIU Jie. Study on wear accelerated life testing method of gear pump[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42(23): 204–206. (in Chinese)
- [34] GERTSBACH I B, KORDONSKIĬ K B. Models of failure[M]. New York: Springer-Verlag, 1969.
- [35] NELSON W B. Accelerated testing: statistical models, test Plans, and data analysis[M]. New York: Wiley-Interscience, 2004.
- [36] LU C J, MEEKER W, ESCOBAR L A. A comparison of degradation and failure-time analysis methods for estimating a time-to-failure distribution[J]. Statistica Sinica, 1996, 6(3): 531–546.
- [37] MEEKER W Q, HAMADA M. Statistical tools for the rapid development and evaluation of high-reliability products[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, 44(2): 187–198.
- [38] MEEKER W Q, ESCOBAR L A. Statistical methods for reliability data[M]. New York: Wiley, 1998.
- [39] HUANG Jianlin, GOLUBOVIĆ D, KOH S, et al. Lumen degradation modeling of white-light LEDs in step stress accelerated degradation test[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2016, 154: 152–159.
- [40] LI Junxing, WANG Zhihua, LIU Xia, et al. A Wiener process model for accelerated degradation analysis considering measurement errors[J]. Microelectronics Reliability, 2016, 65: 8–15.
- [41] ZHENG Jianfei, SI Xiaosheng, HU Changhua, et al. A nonlinear prognostic model for degrading systems with three-source variability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2016, 65(2): 736–750.
- [42] WHITMORE G A, SCHENKELBERG F. Modelling accelerated degradation data using Wiener diffusion with a time scale transformation[J]. Lifetime Data Analysis, 1997, 3(1): 27–45.
- [43] WANG Xiao. Wiener processes with random effects for degradation data[J]. Journal of Multivariate Analysis, 2010, 101(2): 340–351.
- [44] SI Xiaosheng, WANG Wenbin, HU Changhua, et al. Remaining useful life estimation based on a nonlinear diffusion degradation process[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61(1): 50–67.
- [45] WANG Zhaoqiang, Hu Changhua, Si Xiaosheng, et al. Remaining useful life prediction of degrading systems subjected to imperfect maintenance: Application to draught fans[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 100: 802–813.
- [46] MO Huadong, SANSVINI G, XIE Min. Performance-based maintenance of gas turbines for reliable control of degraded power systems[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 103: 398–412.
- [47] TANG Shengjin, YU Chuanqiang, WANG Xue, et al. Remaining useful life prediction of lithium-ion batteries based on the Wiener process with measurement error [J]. Energies, 2014, 7(2): 520–547.
- [48] FENG Jing, KHAM P, TANG Yanzhen. Remaining useful lifetime prediction based on the damage-marker bivariate degradation model: a case study on lithium-ion batteries used in electric vehicles[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 70: 323–342.
- [49] LIAO Haitao, ELSAYED E A. Reliability inference for field conditions from accelerated degradation testing[J]. Naval Research Logistics, 2006, 53(6): 576–587.
- [50] WHITMORE G A, SCHENKELBERG F. Modelling accelerated degradation data using Wiener diffusion with a time scale transformation[J]. Lifetime Data Analysis, 1997, 3(1): 27–45.
- [51] TSENG S T, PENG C Y. Optimal burn-in policy by using an integrated Wiener process[J]. IIE Transactions, 2004, 36(12): 1161–1170.
- [52] YE Zhisheng, CHEN Nan, SHEN Yan. A new class of Wiener process models for degradation analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 139: 58–67.
- [53] WANG Xiaolin, JIANG Ping, GUO Bo, et al. Real-time reliability evaluation for an individual product based on change-point gamma and Wiener process[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2014, 30(4): 513–525.
- [54] PANG Zhenan, HU Changhua, SI Xiaosheng, et al. Nonlinear step-stress accelerated degradation modeling and remaining useful life estimation considering multiple sources of variability[J]. IEEE Access, 2019, 7: 124558–124575.
- [55] LI Junxing, WANG Zhihua, ZHANG Yongbo, et al. Degradation data analysis based on a generalized Wiener process subject to measurement error[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 94: 57–72.
- [56] LI Junxing, WANG Zhihua, LIU Xia, et al. A Wiener process model for accelerated degradation analysis considering measurement errors[J]. Microelectronics Reliability, 2016, 65: 8–15.
- [57] 潘 骏, 王小云, 陈文华, 等. 基于多元性能参数的加速退化试验方案优化设计研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 30–35.
PAN Jun, WANG Xiaoyun, CHEN Wenhua, et al. Research on optimal design of accelerated degradation experimental scheme based on multiple performance

- parameters[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2):30-35. (in Chinese)
- [58] SHEN Ye, ZHANG Chunhua, TAN Yuanyuan, et al. Accelerated degradation testing for systems with multiple performance parameters[C]// 2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. Xi'an, China: 2011.
- [59] EDMUND Z. Innovation report: a methodology for estimating gear pump wear-out reliability using pump pressure ripple and an extremely small sample size—The case study of a heavy-duty diesel engine lubrication gear pump[D]. Coventry: University of Warwick, 2020.
- [60] 刘小平, 张立杰, 沈凯凯, 等. 考虑测量误差的步进加速退化试验建模与剩余寿命估计[J]. 兵工学报, 2017, 38(8): 1586-1592.
- LIU Xiaoping, ZHANG Lijie, SHEN Kaikai, et al. Modeling and remaining life estimation of step accelerated degradation testing considering measurement error[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(8): 1586-1592. (in Chinese)
- [61] 刘小平. 基于性能退化的齿轮泵可靠性评估方法研究[D]. 河北 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
- LIU Xiaoping. Research on reliability evaluation method of gear pump based on performance degradation[D]. Hebei Qinhuangdao: Yanshan University, 2020. (in Chinese)
- [62] 刘小平, 郭 斌, 崔德军, 等. 基于二元维纳过程的小样本齿轮泵可靠寿命预测[J]. 中国机械工程, 2020, 31(11): 1315-1322.
- LIU Xiaoping, GUO Bin, CUI Dejun, et al. Reliable life prediction of small sample gear pump based on binary wiener process[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(11): 1315-1322. (in Chinese)
- [63] 赵家炜. 基于图神经网络的外啮合齿轮泵剩余使用寿命预测研究[D]. 河北 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- ZHAO Jiawei. Research on prediction of remaining service life of external meshing gear pump based on graph neural network[D]. Hebei Qinhuangdao: Yanshan University, 2021. (in Chinese)
- [64] 黄爱梅, 郭月娥, 虞健飞. 基于加速退化数据的航空液压泵剩余寿命预测技术研究[J]. 机械设计与制造, 2011, (1): 154-155.
- HUANG Aimei, GUO Yuee, YU Jianfei. Research on residual life prediction technology of aviation hydraulic pump based on accelerated degradation data[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2011, (1): 154-155. (in Chinese)
- [65] GUO Rui, LI Yongtao, ZHAO Lijiang, et al. Remaining useful life prediction based on the Bayesian regularized radial basis function neural network for an external gear pump[J]. IEEE Access, 2020, 8: 107498-107509.
- [66] GUO Rui, LI Yongtao, SHI Yue, et al. Research on identification method of wear degradation of external gear pump based on flow field analysis[J]. Sensors, 2020, 20(14): 4058.
- [67] WANG Chenyang, JIANG Wanlu, YUE Yi, et al. Research on prediction method of gear pump remaining useful life based on DCAE and Bi-LSTM[J]. Symmetry, 2022, 14(6): 1111.
- [68] COX D R. Regression models and life-tables[J]. Journal of the Royal Statistical Society: series B (Methodological), 1972, 34(2): 187-202.
- [69] KUMAR D, WESTBERG U. Some reliability models for analyzing the effect of operating conditions[J]. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 1997, 4(2): 133-148.
- [70] 喻 勇, 司小胜, 胡昌华, 等. 数据驱动的可靠性评估与寿命预测研究进展: 基于协变量的方法[J]. 自动化学报, 2018, 44(2): 216-227.
- YU Yong, SI Xiaosheng, HU Changhua, et al. Research progress on data-driven reliability assessment and life prediction: a covariate-based approach[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(2): 216-227. (in Chinese)
- [71] AALEN O O. Further results on the non-parametric linear regression model in survival analysis[J]. Statistics in Medicine, 1993, 12(17): 1569-1588.
- [72] GORJIAN N, MA Lin, MITTINTY M, et al. The explicit hazard model- Part 1: theoretical development [C]// 2010 Prognostics and System Health Management Conference. Macao, China: 2010.
- [73] 刘 勇, 马 彪, 张赛飞, 等. 油液污染颗粒引起的齿轮泵劣化失效研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 316-321.
- LIU Yong, MA Biao, ZHANG Saifei, et al. Study on gear pump deterioration and failure caused by oil pollution particles[J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46(2): 316-321. (in Chinese)
- [74] MCLINN J A. Life testing hydraulic gear motors[C]// Annual Reliability and Maintainability Symposium. Alexandria, USA: 2005.
- [75] SHEN Haidong, LI Zhiqiang, QI Lele, et al. A method for gear fatigue life prediction considering the internal flow field of the gear pump[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 99: 921-929.
- [76] 王晓红, 闫玉洁, 李秋茜. 基于Omega理论的外啮合齿轮泵磨损寿命分析[J]. 机床与液压, 2014, 42(7): 155-158.
- WANG Xiaohong, YAN Yujie, LI Qiuqian. Wear life analysis of external gear pump based on Omega theory [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42(7): 155-

158. (in Chinese)
- [77] 郭善新,陈达贵,张禹,等. 高压齿轮泵污染磨损的寿命模型研究与验证[J]. 流体机械,2018,46(5):13-17.
GUO Shanxin, CHEN Dagui, ZHANG Yu, et al. Research and verification of life model of pollution wear of high-pressure gear pump[J]. Journal of Fluid Machinery, 2018, 46(5): 13-17. (in Chinese)
- [78] 曹永军. 面向液压齿轮泵剩余寿命的污染磨损试验设计及分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2015.
CAO Yongjun. Experimental design and analysis of pollution wear for the remaining life of hydraulic gear pump[D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)
- [79] 张剑慈. 液压泵的磨损寿命试验[J]. 机床与液压, 2001, (5): 146-147.
ZHANG Jianci. Wear life testing of hydraulic pump[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2001, (5): 146-147. (in Chinese)
- [80] 王淑红,李华聪,张建伟. 航空发动机燃油齿轮泵寿命估算方法研究[J]. 机械设计与制造, 2012, (8): 138-140.
WANG Shuhong, LI Huacong, ZHANG Jianwei. Research on life estimation method of fuel gear pump for aero engine[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2012, (8): 138-140. (in Chinese)
- [81] 何庆飞,陈桂明,陈小虎,等. 基于改进灰色神经网络的液压泵寿命预测[J]. 中国机械工程, 2013, 24(4): 500-506.
HE Qingfei, CHEN Guiming, CHEN Xiaohu, et al. Life prediction of hydraulic pump based on improved grey neural network[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(4): 500-506. (in Chinese)
- [82] 何庆飞,陈桂明,陈小虎,等. 基于灰色支持向量机的液压泵寿命预测方法[J]. 润滑与密封, 2012, 37(4): 73-77.
HE Qingfei, CHEN Guiming, CHEN Xiaohu, et al. Life prediction method of hydraulic pump based on grey support vector machine[J]. Lubrication and Sealing, 2012, 37(4): 73-77. (in Chinese)
- [83] 王向周,闫贺龙,郑成华. 液压泵寿命的在线预测与健康管理[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(10): 1024-1030.
WANG Xiangzhou, YAN Helong, ZHENG Shuhua. Online prediction and health management of hydraulic pump life[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(10): 1024-1030. (in Chinese)
- [84] 张驰. 外啮合齿轮泵的自适应模糊神经网络寿命预测方法研究[D]. 河北秦皇岛:燕山大学,2019.
ZHANG Chi. Research on life prediction method of adaptive fuzzy neural network for external gear pump [D]. Hebei Qinhuangdao: Yanshan University, 2019. (in Chinese)
- [85] 李永涛. 外啮合齿轮泵的健康状态识别方法研究[D]. 河北秦皇岛:燕山大学,2021.
LI Yongtao. Research on health state identification method of external gear pump[D]. Hebei Qinhuangdao: Yanshan University, 2021. (in Chinese)
- [86] 张先航,李曙林,常飞,等. 基于Wiener过程的航空燃油泵寿命预测[J]. 航空科学技术, 2017, 28(11): 47-53.
ZHANG Xianhang, LI Shulin, CHANG Fei, et al. Life prediction of aviation fuel pump based on wiener process[J]. Aeronautical Science and Technology, 2017, 28(11): 47-53. (in Chinese)
- [87] LI Zhenbao, JIANG Wanlu, ZHANG Sheng, et al. Research on prediction method of hydraulic pump remaining useful life based on KPCA and JITL[J]. Applied Sciences, 2021, 11(20): 9389.
- [88] ZHENG Jianbo, LIAO Jian, ZHU Yaqin. Two-stage multi-channel fault detection and remaining useful life prediction model of internal gear pumps based on robust-ResNet[J]. Sensors, 2023, 23(5): 2395.
- [89] 邹丕先,薛建华,何秀德. 柱塞式燃油泵的等效试验研究[J]. 航空动力学报, 1988, 3(1): 76-78.
ZOU Pixian, XUE Jianhua, HE Xiude. Equivalent experimental study of piston fuel pump[J]. Journal of Aerospace Power, 1988, 3(1): 76-78. (in Chinese)
- [90] 张耿. 供油装置等效加速试验技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2015.
ZHANG Geng. Research on equivalent accelerated test technology of oil supply device[D]. Beijing: Beihang University, 2015. (in Chinese)
- [91] 刘建伟. 疲劳累积损伤理论发展概述[J]. 山西建筑, 2008, 34(23): 76-78.
LIU Jianwei. Overview of the development of fatigue cumulative injury theory[J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(23): 76-78. (in Chinese)
- [92] 桂长林. Archard的磨损设计计算模型及其应用方法[J]. 润滑与密封, 1990, (1): 12-21.
GUI Changlin. Archard's wear design calculation model and its application method[J]. Lubrication and Sealing, 1990, (1): 12-21. (in Chinese)
- [93] 李柯柯,王军,丁燕,等. 燃油泵与液压机械装置的可靠性强化试验技术与应用[R]. 西安:中国航发西安动力控制科技有限公司,2016.
LI Keke, WANG Jun, DING Yan, et al. Reliability enhancement test technology and application of fuel pump and hydraulic mechanical device[R]. Xi'an: AECC Xi'an Engine Control Technology Co., Ltd., 2016. (in Chinese)