

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407352

基于物理模型与统计分析的作动器活动密封 O形圈磨损预测研究*

宇文晓彤 黄以锋 潘晋新 王生龙 焦晓璇

(空军工程大学航空工程学院 西安 710038)

摘要:在实际服役环境中,飞机发生的总故障的40%是由于密封泄漏造成的,其密封性能的优劣直接影响产品的功能、性能和使用可靠性。然而,飞机上缺乏对密封圈的磨损监测,导致密封圈健康状况难以评估。针对这一问题,本研究提出了一种基于物理模型与统计分析的活动密封O形圈磨损预测方法,首先对密封圈的磨损进行了机理分析和参数测定;其次,采用Abaqus有限元软件模拟研究了密封圈的运动过程,得到密封圈的接触应力,然后,对舵机每个架次的累计行程进行统计分析,得到行程的概率统计曲线,结合Holm-Archard磨损模型得到磨损体积的概率分布曲线;最后,结合时间与行程的关系,建立了磨损体积与时间之间的数学模型。采用多个样本进行验证,结果表明,实际磨损体积在预测密度函数的 3σ 范围内的概率为95.83%,证明本研究建立的模型能够有较大概率预测活动密封的O形圈的体积磨损情况。

关键词: O形密封圈;磨损预测;有限元分析;统计分析;Holm-Archard模型

中图分类号: TN04

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 520.6020

Wear prediction of O-sealing in active seals of actuator based on physical models and statistical analysis

Yuwen Xiaotong Huang Yifeng Pan Jinxin Wang Shenglong Jiao Xiaoxuan

(Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In actual service environments, 40% of the total failures that occur in aircraft are caused by sealing leaks, and the quality of their sealing performance directly affects the functionality, performance, and reliability of the product. However, the lack of wear monitoring of sealing rings on aircraft makes it difficult to evaluate the health status of sealing rings. To address this issue, this paper proposes a method for predicting the wear of active O-sealing based on physical model and statistical analysis. Firstly, a mechanism analysis and parameter measurement are conducted on the wear of the sealing ring. Secondly, Abaqus finite element software is used to simulate and study the motion process of the sealing ring, obtaining the contact stress of the sealing ring. Then, statistical analysis is conducted on the cumulative stroke of each servo flight to obtain the probability statistical curve of the stroke. Combined with the Holm-Archard wear model, the probability distribution curve of the wear volume is obtained. Finally, based on the relationship between time and travel, a mathematical model between wear volume and time is established. Multiple samples are used for validation, and the results show that the probability of the actual wear volume within the predicted density function's 3σ range is 95.83%, proving that the model in this paper has a high probability of predicting the volume wear of the O-sealing for active seals.

Keywords: O-sealing; wear prediction; finite element analysis; statistical analysis; Holm-Archard model

0 引言

作动器是飞机电传飞控系统的重要组成部分,一般采用四余度力综合式设计,属于精密、复杂的液压机电设备^[1],例如,平尾作动器接收电传飞控计算机的指令信

号,向各腔分配工作油液,使作动筒活塞输出相应位移,从而驱动飞机平尾舵面偏转。飞机的左、右平尾各通过一套平尾作动器来控制,实现左、右平尾舵面按照飞控系统的要求同步或差动偏转,实现在俯仰和倾斜通道对飞机进行操纵。由此可见,作动器工作是否正常直接影响飞机的飞行安全^[2]。

作动器的密封通常包括动密封和静密封两大类,据统计,在飞机实际服役环境中,飞机发生密封泄漏问题约占总故障数的 40%。其中,由于活动密封磨损寿命不足造成的故障,高居故障类别的首位。20 世纪 70 年代,美国学者对飞机作动器损坏引起的故障进行了大量的研究,数据表明在飞机作动器损坏到必须更换的故障中,90%以上是由于动密封失效而引起的外泄漏^[3]。活动密封失效会引起密封腔内介质外漏,增加飞机的维修成本,影响飞机飞行安全,甚至造成不可挽回的损失。因此,对作动器活动密封磨损性能的研究显得尤为重要。

活动密封磨损是造成液压作动器类产品失效的关键问题之一,通常表现为氟橡胶“O”形密封圈和保护环的磨损。“O”形密封圈在作动筒中起到密封,防止漏油的功能,由于“O”形密封圈具有密封性能好、价格便宜、结构简单^[3]等特点,被广泛应用于航空航天、船舶、汽车等各个方面。因此,国内外学者进行了大量的工作,从不同角度和方法对密封圈的磨损进行了分析,Napiórkowski 等^[4]利用 Holm-Archard 理论磨损模型预测了磨蚀性土体中工作元件的磨损,得到轻质和重质土壤的相关系数最高,了解了 Holm-Archard 模型对土壤体磨损预测的适用性。张付英等^[5]基于 Abaqus 软件构建了预紧状态下的有限元模型,结合疲劳分析软件 FE-SAFE 预测不同过盈量和理论接触宽度对旋转轴唇型密封圈循环寿命的影响,并验证预测方法的有效性。张征凯等^[6]通过寿命试验与 ANSYS 仿真相结合的手段,基于溢流阀内 O 形圈的磨损过程,对不同工况下的某溢流阀进行寿命预测。秦明亮等^[7]利用 ANSYS 软件对某型号 GIS 轴封结构用 O 形圈的装配、加压及运动过程进行仿真分析,对仿真结果进行对比分析,并通过试验进行验证。李苗苗等^[8]使用 ANSYS 软件创建唇形密封圈的三维轴对称有限元分析模型,分析研究了不同的结构参数对油封性能的影响。钟亮等^[9]通过合理的假设和前处理,利用有限元分析软件 Abaqus 建立了 O 形密封圈的有限元模型,通过改变预压缩量、流体压力、摩擦系数和活塞运动速度等参数,得出影响 O 形密封圈密封特性的主要因素是流体压力和摩擦系数。马生辉等^[10]基于 Archard 磨损模型,利用有限元软件对风电轴承在风机实际运行工况下接触与磨损行为进行仿真模拟,对轴承接触和磨损特征的演变过程进行了研究。李强等^[11]通过建立航空液压作动器 O 形圈静密封数值仿真模型,对 O 形圈在不同条件下的接触压力分布和 Mises 应力分布进行了研究,评价了 O 形圈静密封的可靠性。

目前,国内外学者们对 O 形圈磨损的研究主要集中在不同工况或结构参数下的密封圈磨损理论,以测定不同应力与环境条件对 O 形圈磨损的影响。然而,在实际应用过程中,如何判定 O 形圈磨损量是工程应用中的难

题。因此,本研究以某型液压作动器 O 形圈磨损为例,结合物理模型分析与有限元仿真,对作动器 O 形圈活动密封磨损的预测进行研究。

针对飞机上缺乏对密封圈的磨损监测,导致密封圈健康状态难以评估的问题,本研究提出了一种基于物理模型与统计分析的活动密封 O 形圈磨损预测方法,首先对密封圈的磨损进行了机理分析和参数测定,建立了磨损体积与舵机每个架次累积行程间的关系模型;其次,采用 Abaqus 有限元软件模拟研究了密封圈的运动过程,得到密封圈的接触应力;然后,对舵机每个架次的行程进行统计分析,得到行程的概率统计曲线,结合 Holm-Archard 磨损模型得到磨损体积的概率分布曲线;最后,结合时间与行程的关系,建立了磨损体积与时间之间的数学模型。为验证模型的准确性,文中采用多个样本进行验证。结果表明,实际磨损体积在预测密度函数的 3σ 范围内的概率为 95.83%,证明本研究建立的模型能够有较大概率预测活动密封的 O 形圈的体积磨损情况。本研究所提方法为活动密封 O 形圈磨损预测的研究提供了思路。

1 活动密封磨损模型机理分析及参数测定

1.1 活动密封磨损的机理分析

磨损是相互接触的物体在相对运动过程中表层材料不断损伤的过程,是摩擦产生的必然结果。近年来随着研究的深入,普遍认为活动密封件磨损机理的主要类型包括:磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损和微动磨损^[12]。

对作动器活动密封来说,直线往复运动的密封圈始终处于与金属表面相对滑动的摩擦过程中,在摩擦的作用下,橡胶件发热、磨损和老化,最终导致液压作动器密封失效,进而造成漏油故障,其主要失效原因是橡胶/PTFE 非金属活动密封材料的磨损寿命不足。橡胶和 PTFE 材料在相互摩擦过程中产生磨损,不同的摩擦条件产生了不同类型的磨损,每种磨损的强度与摩擦系数直接相关。在填充 PTFE 磨损试验中,PTFE 复合密封材料会逐渐向对偶件表面转移、依附,对偶件表面可形成一层 PTFE 转移膜,复合材料与对偶件间的摩擦就转变为 PTFE-PTFE 间的粘着磨损,与典型的密封粘着磨损特征相符合。

粘着磨损是指滑动摩擦时摩擦副接触面局部发生金属粘着,在随后相对滑动中粘着处被破坏,有金属屑粒从零件表面被拉拽下来或零件表面被擦伤的一种磨损形式,是 PTFE 密封材料的主要磨损机理。Holm^[13]在 1946 年最早建立了“粘着”理论,从原子尺度提出了霍姆磨损方程。由于后来观察表明磨损不是原子的捕捉,是更大规模原子的脱落,1953 年,Archard^[14]提出了新的计算模

型——Archard 模型,为之后的磨损计算模型提供了理论基础^[15]。磨损理论中较为经典的理论模型之一是 Holm-Archard 理论,其具有较强的适应性被广泛应用于疲劳磨损、粘着磨损、轻微磨损等各种磨损环境^[12],为描述磨损提供了基础^[4]。

由于活动密封的失效机理与典型的密封粘着磨损特征相符合,本研究选用 Holm-Archard 粘着磨损模型^[4]描述工作载荷下活动密封圈的磨损过程, Holm-Archard 粘着磨损模型在本研究中的形式如式(1)所示。

$$\Delta V = K \frac{F_N L}{H} \quad (1)$$

式中: ΔV 为磨损体积; K 为磨损系数; F_N 为正压力载荷; H 为材料硬度; L 为磨损行程。

本研究主要考虑摩擦系统中滑动距离、载荷、材料硬度、磨损系数等对磨损体积的影响。

1.2 密封材料的磨损系数和硬度测定

理论磨损系数是指单位负荷作用下,滑动单位距离所引起的体积磨损。在 Holm-Archard 磨损模型中,理论磨损系数 K 与材料属性、工况等相关。其与材料的摩擦系数 μ 存在下列关系:

$$\lg K = 5 \lg \mu - 2.27 \quad (2)$$

通过 POB 填充 PTFE 密封材料的摩擦学性能测试实验,得到本研究摩擦系数取值为 0.2,因此通过式(2)可计算得到 $K = 1.718 \times 10^{-6}$ 。

橡胶的硬度测试方法与硬度范围、形状样品和准确度的要求等因素有关,由于邵氏硬度计携带方面、操作简单,且适用于现场的硬度测定,长期用于橡胶、塑料成品等的硬度性能测定^[16]。因此,本研究选用邵氏硬度计对密封材料的硬度进行测试。

通过对密封材料硬度进行测试,可得到活动密封件的邵氏硬度为 82,即硬度为 380 N/mm^2 。

1.3 正压力载荷测定

密封圈的正压力载荷 F_N 与接触应力、接触面积有关,结合物理知识,对密封圈的受力进行分析,可得密封圈在初始装配状态下密封圈的正压力与接触应力 P 及密封圈与配偶零件表面的接触面积 A 满足以下关系:

$$F_{N_{\max}} = P \times A \quad (3)$$

式中: $F_{N_{\max}}$ 为初始装配状态下密封圈的正压力; P 为接触应力值; A 为密封圈与配偶零件表面的接触面积。

当密封失效时,密封圈的正压力为 0,即 $F_N = 0$ 。

此寿命期内密封圈的正压力载荷均值可按照式(4)计算:

$$\overline{F_N} = (F_{N_{\max}} + 0) / 2 \quad (4)$$

式中: $\overline{F_N}$ 为正压力载荷均值; $F_{N_{\max}}$ 为最大正压力载荷。

结合式(3)、(4)可知,寿命期内密封圈的正压力载荷均值 $\overline{F_N}$ 与接触应力值 P 和密封圈与配偶零件表面的接触面积 A 满足以下关系:

$$\overline{F_N} = 2F_{N_{\max}} = 2 \times P \times A \quad (5)$$

从密封圈的密封结构角度分析,密封圈与配偶零件表面的接触面积 A 满 $A = \pi D_1 L_1$,其中 D_1 为配偶零件直径, L_1 为密封圈的压缩宽度。为简化模型的计算,根据某型号作动器的设计数据,文中的 D_1 为 25.51 mm,根据该型号作动器密封圈的大修数据,文中 L_1 为 0.06 mm。

在第 2 章中,通过 Abaqus 有限元软件对 O 密封圈进行建模,通过仿真获得接触应力值 P 。

2 O 形圈活动密封寿命模型

2.1 O 形圈有限元几何模型建立

飞机在实际运行环境中,由于大气湿度、温度等因素的不同,飞行员实际操作的不同,因此飞机上对活动密封 O 形圈的磨损监测难以在实际工作环境下进行观察。且由于在飞机上直接测相关参数的难度较大、成本高,而有限元法是一种应用广泛的数值计算方法,具有坚实的理论基础^[17],能够根据 O 形圈的实际运行环境对其模型进行简化,因此,本研究采用 Abaqus 对活动密封 O 形圈进行建模。

由于在不同环境下,作动器活动行程、O 形圈的磨损程度均不相同,且其受力情况较为复杂,建立模型的不确定性较大,为更好探究飞机实际行程与作动器活动密封 O 形圈磨损量之间的关系,本研究建立的密封模型包括以下假设^[8]:

模型为完全轴对称安装,密封圈各处受力状态相同;密封圈材料是各向同性的,且自身没有缺陷。

文中建立的密封模型尺寸来源于某型飞机的液压作动器,根据尺寸建立 O 形圈的有限元仿真模型,建立模型的轴切面如图 1 所示。O 形密封圈的材料为丁腈橡胶,内径为 26 mm,截面直径为 3 mm,如表 1 所示。由于活塞杆和腔体材料为常用金属材料,其弹性模量远大于橡胶的弹性模量,因此在构建有限元模型时将金属部件做刚体处理,只需用弹性模量和泊松比对其金属特征的进行表征。



图 1 O 形圈有限元仿真模型的轴切面

Fig. 1 Axial section of O-ring finite element simulation model

表 1 O 形密封圈材料及参数

Table 1 O-ring material and parameters

材料	内径	截面直径
丁腈橡胶	26 mm	3 mm

本研究以丁腈橡胶密封圈作为研究对象,相关研究结果证明了 Mooney-Rivlin 模型与丁腈橡胶实验测试结果的一致性^[18],因此采用 Mooney-Rivlin 本构模型对橡胶的力学性能进行分析,在 Mooney-Rivlin 模型中,材料常数 $C_{10} = 4C_{01}$ ^[19],文章参考文献 [20],选取 $C_{10} = 8.24 \text{ MPa}$, $C_{01} = 2.06 \text{ MPa}$,如图 2 所示。橡胶和刚体间的法向行为设为“硬”接触,切向行为的摩擦系数设为 0.15。

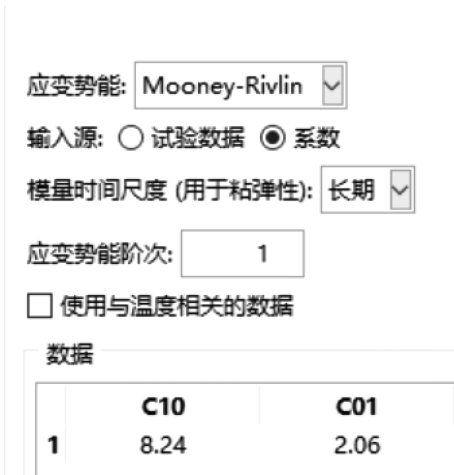


图 2 材料属性设置

Fig. 2 Material property settings

对模型而言,网格划分可减少误差,提高计算的精度,网格数越多则计算精度越高,但计算时间就越长^[21]。从计算时间和精度合理的角度考虑,本研究对 O 形圈模型采用自由网格划分,划分后的几何模型如图 3 所示。

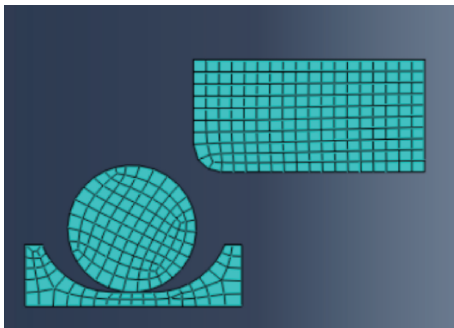


图 3 O 形圈有限元几何模型

Fig. 3 Finite element geometric model of O-ring

2.2 边界条件设置及载荷施加

为更好地模拟实际运行过程,更贴合实际工作环境^[22],提高结果的准确度,在 Abaqus 建模的过程中,需要设置边界条件以及施加的载荷。如图 4 所示,本研究使用 Abaqus 对密封圈进行相互作用的分析时采用表面-表面的有限滑移接触,在模拟实际工况下活动密封圈的运动方式对密封槽外部和活动刚体接触部分时,施加以下约束:1)密封槽外侧完全固定;2)活动刚体上施加 Y 轴方向的位移约束,模拟 O 形圈受压过程。

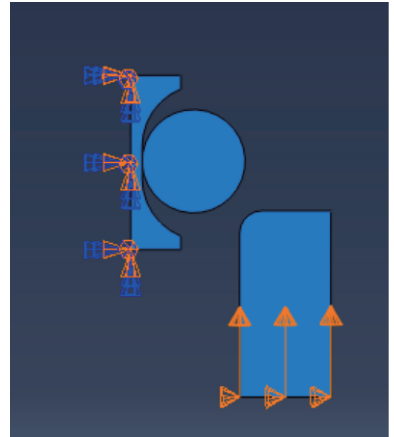


图 4 O 形圈有限元模型约束

Fig. 4 O-Ring finite element model constraints

2.3 仿真结果和计算

完成了模型的建立、材料属性的设置、网格划分以及相互作用和载荷确定后,本节对建立的模型进行可视化展示,更直观的观察 O 形圈的活动密封运动过程。通过 Abaqus 的可视化模块,可观察到建立模型的三维运动过程。为更清晰、更直观地观察密封圈接触应力的变化以及压缩的过程,本研究选用模型的轴切面进行可视化展示,得到密封圈的接触应力 P ,结果如图 5 所示。由于本研究建立模型时使用的长度单位是 mm,根据 Abaqus 软件的规则,图中接触应力 P 的单位为 MPa。因此,接触应力 P 的取值为 9.856 MPa 。

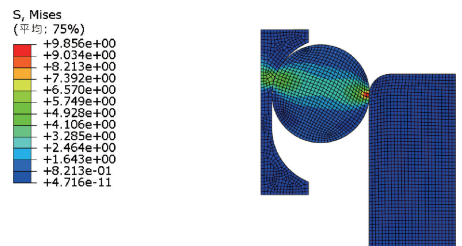


图 5 活动密封接触应力仿真结果

Fig. 5 Simulation results of contact stress for active sealing

结合本研究 1.3 中 D_1 、 L_1 的数据,由式(5)可得 $\overline{F_N} = 2F_{Nmax} = 2 \times P \times A = 94.79 \text{ N}$ 。

为得到活动密封的磨损体积,本研究在 25 ℃ 的环境温度,80 ℃ 的油液温度下,采用 1 Hz 的活塞运动频率对平尾舵机活动密封的磨损行程进行试验,如表 2 所示。

表 2 试验参数设计

Table 2 Test parameter design

环境温度	油液温度	活塞运动频率
25 ℃	80 ℃	1 Hz

将磨损系数、材料硬度、载荷等参数代入式(1)可得到密封圈一次全行程往复的磨损体积,经计算得到磨损体积为 $1.22 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ 。

本节利用 Abaqus 有限元软件模拟活动密封 O 形圈的运动过程得到了 Holm-Archard 粘着磨损模型中正压力载荷的值,并设计试验计算得到密封圈一次全行程往复的磨损体积,在第 3 章中对舵机行程的数据进行统计分析,以确定磨损体积和舵机行程之间的关系。

3 舵机行程数据统计分析

3.1 数据可视化

由于作动器的结构复杂,O 形圈体积较小,一次全行程往复的磨损行程不易观察,很难直观地监测到 O 形圈的体积磨损量。为对 O 形圈的磨损量进行更直观的监测,本研究通过分析建立 O 形圈的体积磨损量、舵机行程与飞行时间之间的关系,通过飞机的飞行时间直观地反映 O 形圈的体积磨损量。

在不同架次,不同指令的情况下,每个架次的舵机累计行程不同。为分析每架次舵机累计行程的整体分布规律,本研究对 258 个架次的舵机正常运行时的行程数据进行了初步处理,并对其整体的分布规律进行可视化展示。

利用 MATLAB 软件将 258 个架次的舵机行程以直方图的形式进行展示,得到了如图 6 所示的可视化结果。由图 6 可以发现,舵机累计行程的规律整体上近似于正态分布。

3.2 参数拟合

为验证舵机的行程规律是否符合正态分布,以及服从的正态分布的均值和方差,本研究利用 MATLAB 对舵机的数据进行进一步的拟合计算,拟合结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出,舵机的行程规律整体上服从正态分布,通过计算得到舵机行程的平均值为 3 266.24,标准差为 1 322.83,故舵机行程满足 $N(3 266.24, 1.75 \times 10^6)$ 的正态分布。

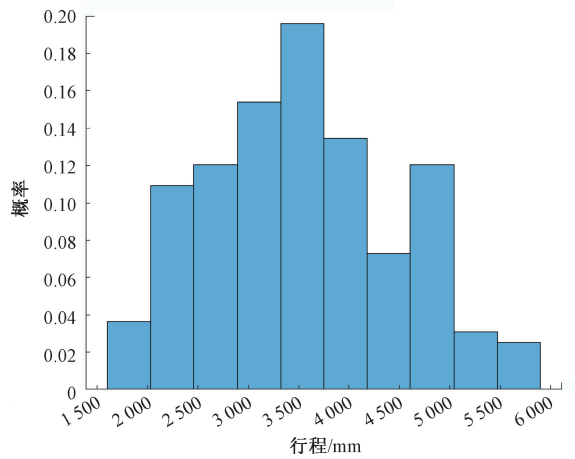


图 6 舵机行程分布图

Fig. 6 Distribution diagram of servo stroke

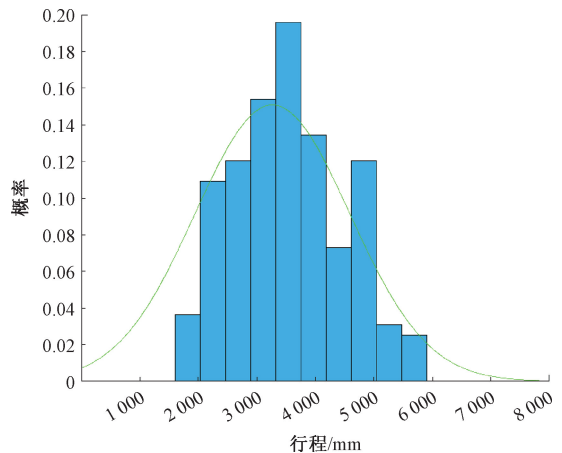


图 7 舵机行程数据拟合结果图

Fig. 7 Fitting result chart of servo stroke data

利用式(1)计算可得磨损体积:

$$\Delta V = 1.718 \times 10^{-6} \times \frac{94.79}{380} L = 4.285 \times 10^{-7} L. \tag{6}$$

在实际服役环境下,舵机通过识别输入信号,其内部的控制电路根据反馈信号对输出轴进行调整,使舵机旋转到指定的角度位置。舵机接收的指令不同,其偏转角度也是不同的,因此舵机的累积运动行程难以直接测量,不利于对密封圈磨损量的预测,而飞机飞行的时间小时数是可以直观的观测到,因此本研究借助时间 t 对密封圈的磨损体积进行预测。

假设行程 L 和时间 t 之间的关系为: $L = at$,因 L 服从 $N(3 266.24, 1.75 \times 10^6)$ 的正态分布,即 at 服从 $N(3 266.24, 1.75 \times 10^6)$ 的正态分布,则 a 服从 (μ_a, σ_a^2) 的正态分布。

在实际服役环境下,飞机飞行一个架次的时间为

2.5 h, 即 $t=2.5$ 时, at 服从 $N(3\ 266.24, 1.75 \times 10^6)$ 的正态分布。

利用正态分布的性质可得, 当 $t=2.5$ 时, 求得 $\mu_a = 1\ 306.50$, $\sigma_a^2 = 2.8 \times 10^5$, 故 a 服从 $N(1\ 306.50, 2.8 \times 10^5)$ 的正态分布。

因此, 作动筒活动密封 O 形圈磨损体积满足以下关系:

$$\Delta V = 4.285 \times 10^{-7} L = 4.285 \times 10^{-7} at. \quad (7)$$

其中, 随机变量 $at \sim N(1\ 306.50t, 2.8 \times 10^5 t^2)$ 。

模型结果可视化如图 8 所示, 图中表示在不同时间条件下, 不同磨损量发生的概率。由图可以看出, 运行时间较短时, 磨损体积较小, 随着作动筒的活动, 磨损体积逐渐增加。在时间相同的条件下, 由于舵机运行过程中的行程服从正态分布, 磨损体积不是固定不变的, 且在运行较长时间以后, 磨损体积的均值和方差均逐渐增大。

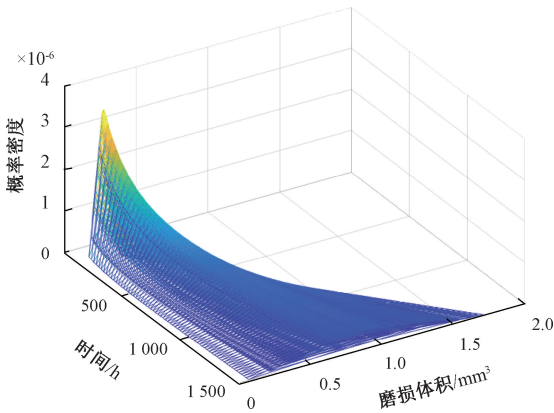


图 8 不同时间条件下磨损量的分布概率

Fig. 8 Probability of wear distribution under different time conditions

3.3 模型精度验证

为进一步验证本研究模型的准确性, 本研究利用大修时测得的数据对模型的精度进行测量。由于舵机行程数据符合正态分布, 本研究选用正态分布的 3σ 原则对模型进行验证。由于作动筒活动密封 O 形圈是规则的圆环, 本研究利用圆环的体积公式对大修时测得的数据进行计算, 得到密封圈实际环境中的磨损体积, 观察计算的体积是否在 3σ 中, 以此验证模型的准确性。

本研究使用的数据包含 78 个大修时测得的密封圈的截面直径、内径尺寸及飞行时间, 将截面直径、内径尺寸代入圆环的体积公式, 通过计算得到密封圈实际的磨损体积。

将飞行时间代入式(7)计算得到密封圈的理论磨损体积, 通过对密封圈实际磨损体积进行统计分析, 得到结果如下: 实际磨损体积在该模型 2σ 范围概率为 70.83%, 在该模型 3σ 范围概率为 95.83%。

从结果来看, 实际磨损体积的绝大部分值落在了模型分布的 3σ 范围内, 说明本研究建立的模型能够有较大概率预测活动密封的 O 形圈的体积磨损情况。

4 结 论

针对飞机上缺乏对密封圈的磨损监测, 导致密封圈健康状态难以评估的问题, 本研究提出了一种基于物理模型与统计分析的磨损体积的计算方法, 首先对密封圈的机理进行分析, 确定磨损模型的种类选取 Holm-Archard 磨损模型; 其次, 采用 Abaqus 有限元软件模拟研究了密封圈的运动过程, 获得相应的应力; 然后, 对每个架次的舵机累计行程进行统计分析, 得到行程的概率统计曲线, 结合 Holm-Archard 磨损模型得到磨损体积的概率分布曲线; 最后, 结合时间与行程的关系, 建立了磨损体积与时间之间的数学模型。为验证模型的准确性, 本研究采用多个样本进行验证。结果表明, 实际磨损体积在预测密度函数的 2σ 范围的概率为 70.83%, 在预测密度函数的 3σ 范围的概率为 95.83%, 说明本研究建立的模型能够有较大概率预测活动密封的 O 形圈的体积磨损情况。本研究方法为活动密封 O 形圈磨损预测的研究提供了思路, 对指导维护人员及时更换作动器密封圈, 减少故障的发生具有重要意义。当 O 形圈处于恶劣的工作环境时, 将加大或直接破坏 O 形圈的正常磨损趋势, 该模型为后续恶劣环境下 O 形圈磨损模型的建立奠定了基础。

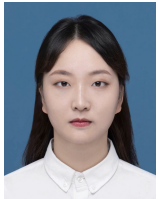
参考文献

- [1] SUN X, WANG X, LIN S. Multi-fault diagnosis approach based on updated interacting multiple model for aviation hydraulic actuator [J]. Information, 2020, 11(9): 410.
- [2] 石山, 刘德鹏, 李成茂. 基于改进粒子群优化算法的飞机作动系统功率调度[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(10): 2024-2030.
SHI SH, LIU D P, LI CH M. Power scheduling of aircraft actuation system based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(10): 2024-2030.
- [3] 蔡智媛. 高压航空作动器用往复 O 形圈结构优化及疲劳寿命预测[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
CAI ZH Y. Optimization of reciprocating O-ring structure and fatigue life prediction for high-pressure aviation actuators [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [4] NAPIÓRKOWSKI J, LEMECHA M, KONAT Ł. Forecasting the wear of operating parts in an abrasive soil mass using the Holm-Archard model [J]. Materials,

- 2019, 12(13): 2180.
- [5] 张付英,张原浩,高勇新. 旋转轴唇型密封圈的寿命预测研究[J]. 润滑与密封,2022,47(2):96-101.
ZHANG F Y, ZHANG Y H, GAO Y X. Research on life prediction of lip shaped sealing rings for rotating shafts [J]. Lubrication and Sealing, 2022,47(2):96-101.
- [6] 张征凯,曾宪枢. 基于 O 形密封圈磨损过程的不同工况下溢流阀寿命预测方法[J]. 排灌机械工程学报, 2021,39(5): 477-482.
ZHANG ZH K, ZENG X SH. Life prediction method for relief valves under different working conditions based on the wear process of O-ring seals [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(5): 477-482.
- [7] 秦明亮,王岩,崔庆,等. 断路器轴封结构用 O 形圈的有限元分析与试验[J]. 高压电器,2023,59(4): 32-37.
QIN M L, WANG Y, CUI Q, et al. Finite element analysis and testing of O-ring for circuit breaker shaft seal structure [J]. High Voltage Electrical Appliances, 2023, 59(4):32-37.
- [8] 李苗苗,陈蔚芳,崔惠婷,等. 安装过盈量和介质压力对旋转轴唇形橡胶密封圈密封性能的影响[J]. 橡胶工业 2019, 66(6):450-455.
LI M M, CHEN W F, CUI H T, et al. The influence of installation interference and medium pressure on the sealing performance of rotary shaft lip shaped rubber seals [J]. Rubber Industry, 2019, 66(6): 450-455.
- [9] 钟亮,赵俊利,范社卫. 基于 ABAQUS 的 O 形密封圈密封性能仿真研究[J]. 煤矿机械,2014,35(3):52-54.
ZHONG L, ZHAO J L, FAN SH W. Simulation study on the sealing performance of O-ring seals based on ABAQUS [J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(3): 52-54.
- [10] 马生辉,吉政甲,蔡晓春,等. 基于有限元分析和 Archard 模型的风电机组轴承磨损特性研究[J]. 青海大学学报,2024,42(1):70-77,106.
MA SH H, JI ZH J, CAI X CH, et al. Research on wear characteristics of wind turbine bearings based on finite element analysis and Archard model [J]. Journal of Qinghai University, 2024,42(1):70-77,106.
- [11] 李强,王东辉,张伟. 航空液压作动器 O 形圈静密封性能及可靠性有限元分析[J]. 液压与气动,2018,(4): 69-73.
LI Q, WANG D H, ZHANG W. Finite element analysis of static sealing performance and reliability of O-ring in aviation hydraulic actuators [J]. Hydraulic and Pneumatic, 2018,(4):69-73.
- [12] 付豪,尧军平,梁超群,等. 基于 Archard 磨损模型研究 SiC/AZ91D 复合材料干摩擦磨损特性[J/OL]. 复合材料学报:1-9[2024-06-06]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240318.005>.
FU H, YAO J P, LIANG CH Q, et al. Based on the Archard wear model, the dry friction wear characteristics of SiC/AZ91D composites were studied [J/OL]. Journal of Composite Materials: 1-9 [2024-06-06]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240318.005>.
- [13] HOLM R. Electric Contacts-Theory and Application[M]. 4th ed. Berlin:Springer-Verlag,1967:20-76.
- [14] ARCHARD J F. Microscopic aspects of adhesion and lubrication [J]. Tribology International, 1982, 15(5):242.
- [15] 金屿. 直列泵微动往复密封机理及摩擦磨损行为研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2023.
JIN Y. Research on the mechanism and friction and wear behavior of micro reciprocating seals for inline pumps [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [16] 陈火成. 浅析指针式 A 型邵氏硬度计硬度测定值影响因素和解决对策[J]. 计量与测试技术,2014,41(5): 31-32,35.
CHEN H CH. The influencing factors and solutions of the hardness determination value of the pointer type A shore hardness tester are analyzed [J]. Metrology and Testing Technology, 2014,41(5):31-32,35.
- [17] 汪茹,田瑾,吴飞,等. 一种基于有限元法的超高压输电线路三维电场计算方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019,33(4):103-110.
WANG R, TIAN J, WU F, et al. Three-dimensional electric field calculation method for EHV transmission line based on finite element method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(4):103-110.
- [18] 李相欣,刘万强,刘志国,等. 复合 Mooney-Rivlin 本构参数对轨道交通用橡胶减振件垂向静刚度的影响分析[J]. 铁道车辆,2024,62(1):86-91.
LI X Y, LIU W Q, LIU ZH G, et al. Analysis of the influence of composite Mooney-Rivlin constitutive parameters on the vertical static stiffness of rubber shock absorbers for rail transit [J]. Rolling Stock, 2024, 62(1):86-91.
- [19] 左圆圆. 动密封件密封性能及磨损机理研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018.
ZUO Y Y. Study on sealing performance and wear mechanism of dynamic seals [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.

- [20] 周嘉航. 某型伺服作动器橡胶密封圈密封性能分析与疲劳寿命预测[D]. 沈阳:东北大学,2024.
ZHOU J H. Analysis of sealing performance and fatigue life prediction of rubber sealing rings for a certain type of servo actuator [D]. Shenyang: Northeastern University,2024.
- [21] 刘苹,张小平,匡斯建,等. 电机温度场分析中三维有限元模型网格划分方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019,33(8):173-178.
LIU P, ZHANG X P, KUANG S J, et al. 3D finite element model mesh division method in motor temperature field analysis[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33(8):173-178.
- [22] 张安安,何明光,于璐,等. 基于有限元法的海底电缆埋设深度实时预测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023,37(12):18-28.
ZHANG AN AN, HE M G, YU L, et al. Real-time prediction of submarine cable embedment depth based on finite element method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023,37(12):18-28.

作者简介



宇文晓彤,2022 年于河北工业大学获得学士学位,现为空军工程大学硕士研究生,主要研究方向为智能检测与健康管理。

E-mail: 2876907164@qq.com

Yuwen Xiaotong received her B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2022. Now she

is a M. Sc. candidate in Air Force Engineering University. Her main research interest includes intelligent detection and health management.



黄以锋,2008 年于空军工程大学获得硕士学位,2011 年于空军工程大学获得博士学位,现为空军工程大学副教授,主要研究方向为复杂设备测试性设计、故障诊断与寿命预测。

E-mail: huangyiff@163.com

Huang Yifeng received his M. Sc. degree in 2008 from Air Force Engineering University, received his Ph. D. degree in 2011 from Air Force Engineering University. Now he is an associate professor in Air Force Engineering University. His main research interests include complex equipment test design and prognostics and fault diagnosis and life prediction.



焦晓璇(通信作者),2014 年于空军工程大学获得硕士学位,2019 年于空军工程大学获得博士学位,现为空军工程大学副教授,主要研究方向为机电系统状态监测、故障诊断与寿命预测。

E-mail: jiaoxx_sensor@outlook.com

Jiao Xiaoxuan (Corresponding author) received his M. Sc. degree in 2014 from Air Force Engineering University, received his Ph. D. degree in 2019 from Air Force Engineering University. Now he is an associate professor in Air Force Engineering University. His main research interests include condition monitoring of electromechanical systems and prognostics and fault diagnosis and life prediction.