[文章编号] 1003－4684(2026)01-0001-05

某型锁式差速器可靠性评价及剩余寿命预测

刘远航[1,2]，刘文超[1,2]，李方珂[1,2]，游达章[1,2]，熊 新[3]

(1 湖北工业大学机械工程学院，湖北 武汉 430068；2 湖北省现代制造质量工程重点实验室，湖北 武汉 430068；
3 湖北时瑞达重型工程机械有限公司，湖北 襄阳 441116)

[摘 要] 为更精确地表征汽车轴间差速器失效规律，基于二参数威布尔分布理论对某型锁式差速器使用寿命进行研究。首先，分析整理该型号差速器的历史维修数据，建立基于二参数的威布尔分布模型；其次，分析差速器的故障分布规律并确定模型对应参数；最后，采用 Kolmogorov-Smirnov 检验法对模型进行拟合优度检验，验证使用二参数威布尔分布方法评估差速器可靠性的合理性。在此基础上，通过计算得出差速器的平均无故障使用寿命为 945 d，特征寿命为 1581 d，中位寿命为 1240 d。以四台运行时长不同的锁式差速器为例进行剩余寿命预测分析，明确了剩余寿命与可靠度及工作时长之间的对应关系，从而有助于企业对其进行合理的预测性维护。该方法可为同类机械设备的可靠性评估与维护决策提供参考。

[关键词] 锁式差速器；可靠性；二参数威布尔分布；Kolmogorov-Smirnov 检验；剩余寿命预测

[中图分类号] TB114.3 [文献标识码] A

差速器通过动态调节车辆转弯时两侧车轮的转速差，以提升车辆行驶稳定性与操控性能[1-2]。但在复杂多变的工况下，差速器易受载荷冲击、磨损老化等因素影响，导致传动效率下降、异响等故障，不仅会降低车辆性能，甚至引发安全隐患[3]。同时，准确预测差速器剩余寿命是开展可靠性评价的关键环节，基于预测结果制定科学的预防性维修周期，能够有效降低维修成本与人力损耗[4-5]。因此，深入开展差速器可靠性评价研究，对保障道路交通安全、优化汽车综合性能、实现降本增效有着重要的理论价值与现实意义[6]。

目前，国内外针对汽车轴间差速器的可靠性研究仍处于起步阶段，相关成果相对匮乏[7]。在具体研究方向上，邹煜林等借助有限元仿真软件构建模型，运用 Goodman 修正法评估差速器壳体的疲劳寿命，并通过搭建疲劳耐久实验台架，对电驱动总成的差速器壳体开展疲劳可靠性分析[8]；端木萍萍通过模拟差速器齿轮的动态啮合过程，依据仿真结果确定行星齿轮单齿的危险加载位置，并基于齿根弯曲应力的动态变化规律，完成行星齿轮的疲劳寿命分析[9]；杨凯则以差速器螺纹连接结构为研究对象，利用软件建立有限元仿真模型，深入分析特殊工况下差速器螺栓的螺纹应力分布，明确了应力集中区域[10]。在车辆部件剩余寿命预测领域，武旭东等依据混合动力汽车工作模式简要说明能量控制策略工作机理，分别论述了基于规则、基于优化及基于人工智能等能量控制管理策略的发展现状，讨论了考虑电池寿命的控制策略对整车经济性能的影响[11]；YAN R G 等聚焦于全尺寸车轴裂纹扩展试验，探索在超高周疲劳条件下对全尺寸车轴裂纹寿命分析至关重要的断裂力学特性，利用试验数据得到疲劳裂纹扩展速率曲线并建立了足尺车轴的有限元模型，为制定车轴超声检测间隔时间表提供了基础[12]。

综上所述，现有研究在汽车零部件疲劳分析方面已取得较多进展，且寿命预测多依托基于材料老化特性的模型仿真展开，但针对差速器整体的可靠性评价体系尚未成熟，缺乏基于整机历史服役数据的系统性可靠性评价与寿命预测研究。相比已有研究多集中于部件疲劳仿真，本文从整机维修数据出发，系统开展可靠性建模与寿命预测，基于历史维修数据，采用威布尔分布与改进蝙蝠算法进行参数估计，实现剩余寿命预测。

1 威布尔分布及数据处理

1.1 威布尔分布模型

威布尔分布作为一种经典的概率分布模型，在失效分析、生存数据分析等领域中得到广泛应

[收稿日期] 2024－07－30
[基金项目] 国家自然科学基金(51875180)；湖北省科技厅科技人才服务企业项目(2024DJC033)
[第一作者] 刘远航(2000－)，男，河南新县人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为可靠性与质量控制。

用[13]。威布尔分布包含三个关键调节参数:形状参数、尺度参数和位置参数。其中,形状参数决定了分布曲线的形态,能够反映失效数据的分布特性;尺度参数用于调整曲线的宽窄程度,表征数据的离散程度;位置参数则调节曲线在横轴上的位置,通常描述设备或材料的初始失效时间。这些参数相互配合,使得威布尔分布能够灵活适配不同类型的失效数据,为可靠性评估提供精准的数学模型支持。

考虑到差速器投入使用初期即存在故障风险,故取位置参数为 0。选用二参数威布尔分布模型拟合差速器的故障数据,则对应的可靠度函数为

$$R(t)=\exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{k}\right],t\geqslant 0 \tag{1}$$

故障概率密度函数

$$f(t)=\frac{k}{\lambda}\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{k-1}\exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{k}\right] \tag{2}$$

式中:t 为差速器的故障时刻;k 为形状参数;λ 为尺度参数。

1.2 数据分析

以某企业作业 8 年零 3 个月记录的 15 台某型锁式差速器历史维修数据为例进行分析,共收集到 97 组故障数据,经清洗整理后余下 72 组有效数据。如表 1 所示,将其按时间从小到大的顺序排列:$t_{(1)}\leqslant t_{(2)}\leqslant\cdots\leqslant t_{(a)}\leqslant\cdots\leqslant t_{(b)}$,则对应的经验分布函数

$$F_b(t)=\begin{cases}0 & t<t_{(1)}\\ \dfrac{a-0.3}{b+0.4} & t_{(1)}\leqslant t\leqslant t_{(b)}\\ 1 & t_{(b)}<t\end{cases} \tag{3}$$

式(3)为中位秩公式,用于计算故障分布函数值。其中,b 为故障时刻总数,a 为排列后的故障时间顺序号。

表 1 锁式差速器故障数据信息

样本序号	故障时间/d	中位秩 $F(t)$
1	66	0.0097
2	97	0.0235
⋮	⋮	⋮
21	793	0.2859
⋮	⋮	⋮
36	1377	0.4931
37	1397	0.5069
⋮	⋮	⋮
54	2143	0.7458
⋮	⋮	⋮
71	2966	0.9765
72	2981	0.9903

根据表 1 中数据,使用可靠性评估软件 Minitab 绘制出差速器的威布尔累积分布概率图(图 1)[14]。从图 1 可以看出,该型号差速器的大部分故障时间数据点近似呈线性分布,由此可初步认为其故障发生规律服从威布尔分布。

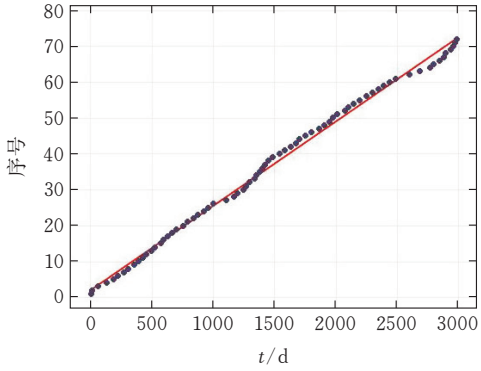

图 1 基于 Minitab 绘制的锁式差速器威布尔分布拟合数据

2 模型参数估计与检验

为确保锁式差速器可靠性模型的有效性与准确性,分别采用最小二乘法和极大似然估计法对模型参数进行求解,随后对比两种方法的求解结果,选取最优方法。

2.1 最小二乘法(LSM)

假设某型锁式差速器在维修周期内共产生过 b 次故障,且差速器寿命 T 服从二参数威布尔分布,即 $T\sim W(k,\lambda)$:

$$F(t)=1-\exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{k}\right] \tag{4}$$

式(4)为差速器可靠性模型的故障概率分布函数,将表 1 中数据 $[t_i,F(t_i)]$ $(i=1,2,\cdots,b)$ 代入其中,并连续取两次对数,可得

$$\ln\left[\ln\frac{1}{1-F(t_i)}\right]=k\ln t_i-k\ln\lambda \tag{5}$$

然后令:$y_i=\ln\left[\ln\dfrac{1}{1-F(t_i)}\right]$;$x_i=\ln t_i$;$c_1=-k\ln\lambda$;$c_2=k$,则式(5)可分解变换为

$$y_i=c_1+c_2x_i(i=1,2,\cdots,b) \tag{6}$$

再通过回归分析法则,推导出模型参数 c_1、c_2、k 与 λ 的估值表达式为

$$\hat{k}=\hat{c}_2=\frac{\sum_{i=1}^{b}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sum_{i=1}^{b}(x_i-\bar{x})^2} \tag{7}$$

$$\hat{c}_1=\bar{y}-\hat{c}_2\bar{x} \tag{8}$$

$$\hat{\lambda}=\exp\left(-\frac{\hat{c}_1}{\hat{c}_2}\right) \tag{9}$$

得到式(7)、(8)、(9)后,利用 matlab 软件编程结合表 1 中的时间数据,计算得出各参数的估计值分别为:$\hat{k}=\hat{c}_2=1.3044$;$\hat{c}_1=-56.2453$;$\hat{\lambda}=1602.3445$。

2.2　极大似然估计法(MLE)

极大似然估计法[15]是在已知观测数据下估计模型参数的重要方法,其核心是构建描述给定参数下观测数据出现概率的似然函数,通过求解似然函数的偏导数并令其为零,从而得到参数的最优估计值。极大似然估计法具有直观性强、操作简便的优势,尤其适用于参数空间相对较小的场景,因而在统计学领域得到广泛应用。

将表 1 中的故障间隔数据代入式(2)后取对数,得似然函数:

$$L(k,\lambda) = -k\lambda\ln\lambda + b\ln k + (k-1)\sum_{i=1}^{b}\ln t_i - \frac{1}{\lambda^k}\sum_{i=1}^{b}t_i^k \tag{10}$$

对式(10)中两个参数分别求偏导,得如下方程组

$$\begin{cases}\lambda^k = \dfrac{1}{b}\displaystyle\sum_{i=1}^{b}t_i^k \\ \dfrac{1}{k} + \dfrac{1}{b}\displaystyle\sum_{i=1}^{b}\ln t_i = \dfrac{\displaystyle\sum_{i=1}^{b}t_i^k\ln t_i}{\displaystyle\sum_{i=1}^{b}t_i^k}\end{cases} \tag{11}$$

由于式(11)为超越方程组,使用常规代数方法计算存在诸多困难,故引入改进蝙蝠算法进行求解。

蝙蝠算法[16]是一种元启发式搜索算法,能较为准确地模拟蝙蝠的行为特征与觅食过程。该算法通过模拟蝙蝠的声波回声定位行为进行全局寻优。本文引入遗传算法的选择、交叉和变异算子对其进行改进,以增强局部搜索能力并避免早熟收敛[17-18]。

基于表 1 中的故障数据,分别利用蝙蝠算法与改进蝙蝠算法对式(11)进行求解。两种算法的基本参数均设置为:种群数目 $N=40$、迭代次数 $M=60$。参数估计结果如表 2 所示,可以看出改进蝙蝠算法的收敛精度为 0.0556,而蝙蝠算法的收敛精度为0.0613,表明改进蝙蝠算法对此类方程组具有更高的计算精度。基于改进蝙蝠算法求解极大似然估计方程,得到尺度参数 $\hat{\lambda}=1581.2117$,形状参数 $\hat{k}=1.5100$。

表 2　两种算法的参数估计结果

算法	$\hat{k}$	$\hat{\lambda}$	收敛精度
蝙蝠算法	1.4927	1593.9748	0.0613
改进蝙蝠算法	1.5100	1581.2117	0.0556

2.3　模型参数选择

采用点估计的优良性判别准则,计算表 1 数据样本均值 $\bar{t}=1467$,标准差 $s=85.607$。

通过分别计算极大似然估计和最小二乘法所得参数对应的数学期望与标准差,结果如表 3 所示。分析数据可知:相较于最小二乘法,极大似然估计所求参数构建的分布模型,其数学期望更接近差速器故障时间的平均值,且标准差数值显著更小。这表明在衡量数据离散程度时,极大似然估计的参数估计结果参数估计值的方差更小。由此可推断,采用极大似然估计进行模型参数求解,与样本统计量(均值、标准差)的偏差更小,拟合优度更佳。故拟选用 $\hat{\lambda}=1581.2117$,$\hat{k}=1.5100$ 作为威布尔分布的尺度参数与形状参数。

表 3　模型有效性与偏差性对比

指标/模型	数学期望	标准差
原始数据	1467	85.607
LSM 模型	1382	88.137
MLE 模型	1423	83.404

2.4　拟合优度检验

在数理统计学中,分析方法的合理选择直接影响最终结果的精度。常用的分布样本检验方法有 Kolmogorov-Smirnov 检验(K-S 检验)和卡方检验。相较于卡方检验法较为苛刻的使用条件,K-S 检验法验证精度更高,且受小样本容量的影响更小[19]。基于此,本文采用 K-S 检验法对模型进行拟合优度验证。设总体分布函数为 $F(t)$,$F_0(t)$ 为已知的连续分布函数,则检验问题 $H_0:F(t)=F_0(t)$。那么有

$$F_0(t) = 1-\exp\left[-\left(\frac{t}{1581.2117}\right)^{1.51}\right] \tag{12}$$

表 4　锁式差速器的寿命检验分布

序号 i	故障时间/d	$F_0(t)-i/b$	$F_0(t)-(i-1)/b$
1	66	0.0057	0.0082
2	97	0.0131	0.0008
⋮	⋮	⋮	
36	1377	0.0558	0.0697
⋮	⋮	⋮	
72	2981	0.0739	0.0600

代入表 1 中差速器的 72 组故障数据,详细结果如表 4 所示。

由表 4 可得:Kolmogorov 统计检验量 $D_b=\max\{|F_0(t)-i/n|,|F_0(t)-(i-1)/n|\}=0.0997$。取显著水平 $\alpha=0.05$,故障样本量 $b=72$,然后查阅 Kolmogorov-Smirnov D 临界值表可知 $D_b^{\alpha}=0.1917$,即 $D_b<D_b^{\alpha}$,故接受原假设。

3　差速器可靠性评价及剩余寿命预测

3.1　锁式差速器的可靠性评价

将上文求得的模型参数代入式(1),得差速器的可靠度函数为:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{1581.2117}\right)^{1.51}\right]\quad t\geqslant 0 \tag{13}$$

对式(13)进行积分求解可得该型号锁式差速器

平均寿命 TMTBF=945 d,中位寿命 $t_{0.5}$ =1240 d,特征寿命 $t_{e^{-1}}$ =1581 d。

图 2 为可靠度函数曲线。从中可以看出,随着差速器运行时间的增加,可靠度函数值随工作时间增加而单调递减,因此需要制定合适的保养维修规划,确保设备能在无故障情况下正常作业[20]。

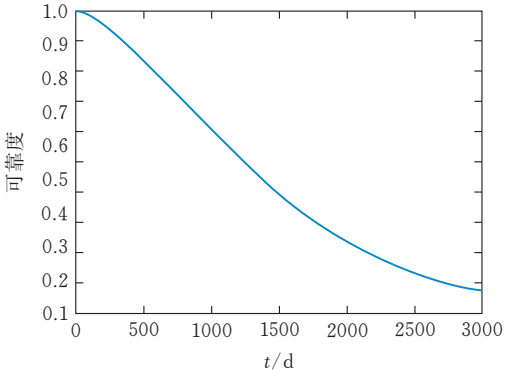

图 2 基于 Minitab 绘制的锁式差速器可靠度函数曲线

为合理设置差速器的预防性维修周期,通过式(13)计算不同可靠度下的使用寿命,得到结果如表 5 所示。

表 5 各可靠度下的预防性维修周期

$R(t)$	预防性维修周期/d
0.9	356
0.8	586
0.7	799
0.6	1013

由表 5 可得,随着可靠度 $R(t)$ 的减小,差速器的预防维修周期愈发延长。当可靠度为 0.7 时,预防性维修周期为 799 d 小于其平均寿命 TMTBF=945 d,故将该型号锁式差速器的预防性维修周期设定为 799 d 较为合理。

3.2 剩余寿命预测

产品的剩余寿命预测是可靠性评价的重要拓展方向。在可靠性理论中,剩余寿命预测是指通过分析给定系统在未来工作过程中可能出现的故障时刻,提前采取必要措施,避免生产中断或安全风险的发生。这一技术对于复杂设备的维护和管理具有至关重要的意义[21-22]。

设差速器的失效时间为 T ,而其已经运行了时间 t ,则条件变量 $T_t=T-t$ 为剩余使用寿命时间。记 $F_t(x)$ 为剩余使用寿命 T_t 的分布函数,那么有

$$F_t(x)=P(T_t\leqslant x)=P\left(\frac{T\leqslant t+x}{T>t}\right)=\frac{F(t+x)-F(t)}{1-F(t)} \tag{14}$$

式中,x 为差速器的剩余寿命时间。

将尺度参数与形状参数代入式(14)并结合式(4),有

$$F_t(x)=1-\frac{R(t+x)}{R(t)}=1-\exp\left[\left(\frac{t}{1581.2117}\right)^{1.51}-\left(\frac{t+x}{1581.2117}\right)^{1.51}\right] \tag{15}$$

差速器剩余寿命 T_t 的可靠度函数为

$$R_t(x)=\exp\left[\left(\frac{t}{1581.2117}\right)^{1.51}-\left(\frac{t+x}{1581.2117}\right)^{1.51}\right] \tag{16}$$

概率密度函数为

$$f_t(x)=\frac{1.51}{1581.2117}\left(\frac{t+x}{1581.2117}\right)^{0.51}\exp\left(\frac{t^{1.51}-(t+x)^{1.51}}{1581.2117^{1.51}}\right) \tag{17}$$

通过上述表达式,可求得正常运转状态下的差速器剩余寿命。以 A、B、C、D 四台不同工况的差速器为例,分析设备可靠度以及剩余寿命与工作时长的关系,进而设定合适的维修规划。A、B、C、D 四台差速器的工作时间分别为 171 d、824 d、1536 d、2018 d。将这些数据代入式(16)、(17),可得各差速器剩余寿命的可靠度曲线与概率密度曲线。

如图 3 所示,从右到左依次为 A、B、C、D 四台不同役龄的差速器可靠度曲线,在同水平的可靠度中,差速器的剩余使用寿命随着工作时长的增加逐步减少。工作时间最短的差速器 A 可靠度曲线下降趋势最为平缓;而工作时间最长的差速器 D 可靠度曲线下降趋势最为陡峭且最快出现故障,与实际情况相符。这是由于差速器工作时间越长,其受到的冲击和磨损越严重,故其剩余寿命的可靠度下降越快。这表明,随着役龄增加,差速器的剩余寿命分布不仅期望值缩短,其不确定性(分散程度)也可能发生变化。

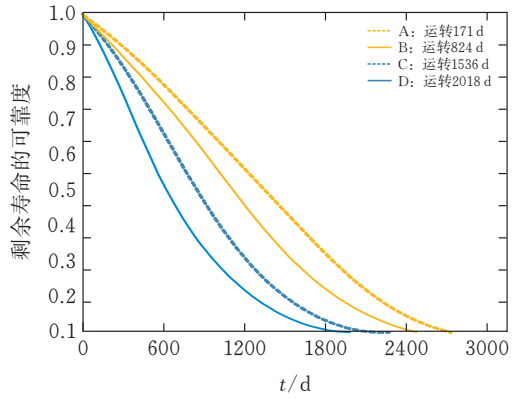

图 3 锁式差速器剩余寿命的可靠度曲线

图 4 中,从右到左依次为 A、B、C、D 四台差速器剩余寿命的概率密度曲线。由图 4 可见,随着差速器工作时长的增加,对应剩余寿命概率密度曲线的极值点逐渐左移。即故障多发时刻左移,由此说明:工作时间越长的差速器,在之后更短的一段时间

内产生故障的概率越高。因此对本例中的 4 台锁式差速器而言，应优先对役龄最大的差速器 D 进行预测性维护。结合图 3、图 4 分析可得，随着工作时间增加，差速器累积损伤加剧，剩余寿命分布向左偏移，表明早期失效风险增大。

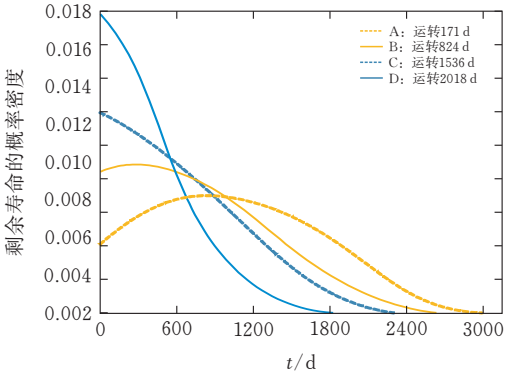

图 4　锁式差速器剩余寿命的概率密度曲线

4　结论

1）基于二参数威布尔分布，该型号锁式差速器平均寿命为 945 d，特征寿命为 1581 d。

2）该型号差速器推荐预防性维修周期为 799 d（可靠度 0.7）。

3）经剩余寿命预测分析得出，役龄越长的差速器，其剩余寿命可靠度下降越快，应优先维护。

[参 考 文 献]

[1] 聂少文，薛龙，雷君，等.电驱动差速器扭矩分配研究与优化[J].机械设计与研究，2023，39(05)：89-91.

[2] 唐刚，刘柯军，李平平.汽车差速器用高强度螺栓断裂失效分析[J].轨道交通材料，2023，2(05)：20-24.

[3] BEHVAR A，TAHMASBI K，SAVICH W，et al. Tooth interior fatigue fracture in automotive differential gears[J]. Engineering Failure Analysis，2024，156：107829.

[4] 李小华，朱熙河，黄孜君，等.基于电子诊断技术的新能源汽车检测与维修[J].汽车维修与保养，2024(06)：94-95.

[5] 陈文堆.新能源汽车故障维修方法及关键技术分析[J].产品可靠性报告，2024(05)：104-106.

[6] BHAVI I，PATIL G V，KUPPAST V V. Early detection of failure of spiral bevel gears used in differential gearbox[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention，2021，21(04)：1189-1194.

[7] 许爱芬，贾巨民，陶泽南，等.汽车差速器可靠性试验台的研制与测试[J].机械传动，2020，44(11)：166-170.

[8] 邹煜林，井睿康，马斌，等.电驱动总成差速器壳体疲劳可靠性分析[J].北京汽车，2023(05)：21-25.

[9] 端木萍萍.某差速器齿轮的动态啮合分析与疲劳寿命研究[D].南京：南京理工大学，2014.

[10] 杨凯.汽车差速器螺栓连接结构应力分布研究及性能分析[D].合肥：安徽农业大学，2022.

[11] 武旭东，王靖岳，薛春伟，等.混合动力汽车电池寿命预测及能量控制管理策略[J].科技导报，2024，42(02)：79-89.

[12] YAN R G，WANG W J，DING R，et al. Research on size effects in fracture properties and residual life prediction for high-speed train axles[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics，2024，134：104715.

[13] OZONUWE S N，ONYEKACHI D，OSIDE C U. Application of the two-parameter Weibull distribution method to assess the reliability of gas turbine compressors[J]. Journal of Engineering Research and Reports，2020，18(04)：12-20.

[14] 文昌俊，陈哲，徐云飞，等.基于威布尔分布的谷物干燥机可靠性分析[J].机电工程，2022，39(07)：972-977.

[15] 王宇凤.基于极大似然估计的仓室模型研究新冠疫情[D]. 成都：电子科技大学，2023.

[16] 翟羽婷，王欣，白蕾.基于改进蝙蝠算法的无线传感器网络动态任务调度[J].传感技术学报，2024(04)：704-708.

[17] 董宁，赵丙秀，王俊杰.基于遗传算法优化下棉花的产量预测模型研究[J].农机化学报，2024(12)：39-43.

[18] 文昌俊，陈洋洋，何永豪，等.基于混合威布尔分布的水稻插秧机的可靠性分析及剩余寿命预测[J].科学技术与工程，2024，24(01)：163-169.

[19] 文昌俊，邵明颖，何永豪，等. 轮式拖拉机可靠性评价及剩余寿命预测[J].中国农机化学报，2023，44(11)：73-78.

[20] CORDONEANU D. Bearing fault diagnosis using the Kolmogorov-Smirnov test on frequency features extracted using the Goertzel algorithm[C]//IOP Conference Series：Materials Science and Engineering. IOP Publishing，2020，997(01)：012041.

[21] 李建新，牛刚.基于威布尔分布及海因里希法则的动车组车门系统维修周期优化研究[J].城市轨道交通研究，2023，26(01)：169-172.

[22] ALLAL Z，NOURA H N，CHAHINE K. Efficient health indicators for the prediction of the remaining useful life of proton exchange membrane fuel cells[J]. Energy Conversion and Management：X，2024，21：100503.

（下转第 11 页）