

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.015

基于步进应力的定时截尾式离心泵加速寿命试验研究

李杰,王彬,叶志锋

(南京航空航天大学 能源与动力学院,南京 210016)

摘要:针对离心泵寿命试验时间长、成本高的问题,以油温、转速、负载为加速因子设计加速载荷谱并完成加速寿命试验,研究泵在试验载荷下出口压力的退化轨迹。采用最小二乘法估计获得泵的伪寿命,拟合离心泵增广样本寿命数据并采用极大似然估计得到其寿命分布及参数,对模型可靠性及精度进行验证后,完善泵的加速模型并计算其在常规载荷下的寿命。研究表明:泵出口压力服从指数退化,分布拟合表明泵寿命满足威布尔分布,额定转速应力下相关系数高于0.98,威布尔—广义艾林模型可准确获得泵在常规应力水平下的寿命特征。

关键词:离心泵;退化轨迹;寿命模型;广义艾林模型;可靠度

中图分类号:TH311 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)04-0076-05

Research on Accelerated Life Test of Centrifugal Pumps with Time-Truncated Data Based on Step-Stress

Li Jie, Wang Bin, Ye Zhifeng

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To address the issues of long duration and high cost in centrifugal pump life testing, an accelerated load spectrum was designed using oil temperature, rotational speed, and load as accelerating factors, and accelerated life tests were conducted to study the degradation trajectory of the pump's outlet pressure under test loads. The pseudo life of the pump was estimated using the least squares method. The augmented sample life data of the centrifugal pump were fitted, and its life distribution and parameters were obtained via maximum likelihood estimation. After verifying the reliability and accuracy of the model, the acceleration model of the pump was refined, and its life under normal loads was calculated. The results show that the outlet pressure of the pump follows an exponential degradation pattern. Distribution fitting indicates that the pump life conforms to the Weibull distribution, with a correlation coefficient above 0.98 under rated speed stress. The Weibull-Generalized Eyring model can accurately obtain the life characteristics of the pump under normal stress levels.

Keywords: centrifugal pump; degenerate trajectory; life model; Generalized Eyring model; reliability

0 引言

离心泵具有结构简单、流量大、质量轻、抗污染性能强等特点,因此在燃油系统得到广泛应用^[1-2]。离心泵的可靠性与寿命对燃油调节至关重要。目前,国内离心泵的可靠性水平与国外同类产品存在一定差距。数千小时的寿命考核试验给产品研发带来极大压力。开展便捷高效的加速寿命试验方法对离心泵的寿命评估、可靠性提升设计具有重要的工程意义。

为了能缩短机电产品的寿命试验时间,加速寿命试验方法逐渐发展并得以应用,众多学者对此进行了相关研究。文献[3]通过温度、湿度加速应力变循环对长寿命机电产品进行了加速贮存

试验,最终得到了产品的贮存寿命。文献[4]开展了面向液压齿轮泵的加速污染磨损试验,通过改变油液中固体颗粒大小以配制不同污染燃油进行变应力试验,并依靠试验数据建立了液压泵污染磨损寿命影响机制模型。文献[5]设计了基于PCA和威布尔分布的滚动轴承寿命估计方法,对故障数据进行PCA降维后得到退化指标及相应的特征参数。文献[6]根据某型号高压大流量航空液压泵的特性,研制了能够在高压、高转速下进行温度、压力、转速和冲击载荷4种压力变换的加速寿命试验台。综上所述,众多学者针对不同机电产品加速寿命试验方法进行了相关研究,但是对离心泵加速寿命试验及其在复合高强度工况下的可靠性评估研究较少。

第一作者简介:李杰(1998—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为航空燃油系统及元件,1651224167@qq.com。

本文针对离心泵常规寿命试验时间长、成本高等问题,进行了基于高温燃油下的步进双应力的定时截尾加速寿命试验,获得离心泵性能退化规律,完善加速模型并得到工作载荷下泵的完整寿命,对提高离心泵的寿命预测准确度、验证离心泵可靠性是否满足工作要求具有重要的参考价值。

1 数学方程

1.1 退化轨迹方程

各类产品的性能退化轨迹都有相对应的变化规律轨迹函数,即单调递增或单调递减。取退化轨迹曲线的二阶导数,如果二阶导数大于零,则产品的退化轨迹指数分布形式,其表达式为

$$y_j = \lambda_j \cdot e^{\omega_j \cdot t_j} \quad (1)$$

式中: y_j 为机械产品的性能退化参数; t_j 为寿命试验时间; ω_j 和 λ_j 为机械产品退化模型的参数;下标 j 为机械产品在不同应力水平下的标号。

1.2 寿命分布方程

威布尔分布由最弱环模型(失效原因为产品中的最弱部件)导出,认为最弱部件的寿命即为整个产品的寿命。许多机械设备的寿命分布都符合威布尔分布,其概率密度函数为^[7]

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^m}, \quad t \geq t_0 \quad (2)$$

分布函数为

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^m}, \quad t \geq t_0 \quad (3)$$

式中: m 为形状参数; η 为尺度参数; t_0 为位置参数。其中位置参数仅影响曲线起点的位置,对曲线的形状不造成影响,离心泵失效节点随机,因此式中 $t_0 = 0$ ^[8]。

1.3 加速模型方程

当导致产品失效的应力水平包括温度和其他非温度应力如湿度、电压、转速、负载等同时作用时,则选用广义艾林模型作为加速模型,其寿命特征方程为^[9]

$$\xi = \frac{A}{T} \exp\left(\frac{B}{KT}\right) \exp(CV) \exp\left(\frac{DV}{KT}\right) \quad (4)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 为待定常数,其中 A 、 B 与寿命方程中的形状参数及尺度参数有关, C 、 D 为经验值,依靠相关标准获得; K 为玻耳兹曼常数; T 为绝对温度; V 为非温度应力。

1.4 威布尔分布步进试验数据分析及可靠性验证

离心泵寿命模型及加速模型的估计方法采用

极大似然估计法,其思路为构造一个以观测数据和未知参数为自变量的似然函数,使这个函数达到极大参数值,就是模型的参数估计值。该方法获得分布曲线具有良好的渐进性质且准确度较高。利用极大似然估计法对威布尔分布进行逆矩阵估计得^[10]

$$\sum_{i=1}^{r-1} \ln \frac{u_r(m, b)}{u_i(m, b)} = r - 1 \quad (5)$$

其中 m^{-1} 的线性无偏估计值(BLUE)为

$$\hat{m}^{-1} = \sum_{i=1}^r C(n, r, i) \ln t_j(b), \quad r \leq 25 \quad (6)$$

将 $\hat{m}^{-1}$ 的估计值代入式(6),通过数值方法计算未知数 b 的估计值 $\hat{b}$,最终可得被测品在应力水平 S_i 下的特征寿命 η_i 估计值

$$\hat{\eta}_i = \left\{ \frac{1}{r} \left[\sum_{j=1}^r t_i^{\hat{m}}(\hat{b}) + (n-r) t_r^{\hat{m}}(\hat{b}) \right] \right\}^{\frac{1}{\hat{m}}} \quad (7)$$

根据此方程也可得到加速方程中参数 a 的估计值为 $\hat{a} = \ln \hat{\eta}_i - \hat{b} \varphi_i$ 。最后得到被测品在正常应力水平 S_0 下特征寿命 η_0 的估计值及正常应力水平 S_0 下各种可靠性指标的估计值。

区间估计是一种评价可靠性指标的方法,通过区间估计获得总体相关参数的估计范围,并非获得一个点的估计值。常用总体参数在一定置信水平下的估计范围(置信区间)来描述总体相关参数的估计范围。当定置信水平为 $1-\alpha$ 时,加速模型系数 γ_i 在 $1-\alpha$ 下的置信区间可以用下式表示

$$\left[\hat{\gamma}_i - Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\text{var}(\hat{\gamma}_i)}, \hat{\gamma}_i + Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\text{var}(\hat{\gamma}_i)} \right] \quad (8)$$

模型参数 σ 在 $1-\alpha$ 下的置信区间可以用下式表示

$$\left[\hat{\sigma} - Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\text{var}(\hat{\gamma}_i)}, \hat{\sigma} + Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\text{var}(\hat{\gamma}_i)} \right] \quad (9)$$

将 $\hat{m} = 1/\hat{\sigma}$ 代入上式,可以获得形状参数 m 在 $1-\alpha/2$ 下的置信区间表达式为

$$\left[\frac{1}{\hat{\sigma} + Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\text{var}(\hat{\sigma})}}, \frac{1}{\hat{\sigma} - Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\text{var}(\hat{\sigma})}} \right] \quad (10)$$

在威布尔寿命分布模型中其形状参数 $\hat{m}$ 保持不变,此时可认为被测产品的可靠度函数只与特征寿命 $\hat{\eta}$ 有关,由此可根据上式得到测试产品可靠度在 $1-\alpha/2$ 下的置信区间表达式为

$$\left[\exp\left[-\left(\frac{t}{\hat{\lambda}}\right)^{\hat{m}}\right], \exp\left[-\left(\frac{t}{\hat{\lambda}}\right)^{\hat{m}}\right] \right] \quad (11)$$

2 加速寿命试验

考虑试验的可操作性,在加速寿命试验期间各应力状态转换时间不宜过长且各应力状态持续时间较短,这很难做到燃油温度的实时调控。按照加速寿命试验载荷谱设计原则,本次试验全程采用 70℃ 高温燃油。加速试验载荷谱仅需改变离心泵转速及流量两组应力水平,每组应力对比常规寿命试验状态应得到不同的加速比,为节约试验时间,各应力水平的加速系数应不小于 3。考虑试验过程中的安全问题及离心泵滑油润滑状态等问题,初步确定额定转速为 115%、110%、105%、100% 4 组转速应力水平。此加速载荷谱下进行寿命试验时待测泵不会出现额外的失效模式。因温度恒定,所以加速载荷谱采用高温燃油下的双应力交叉步进方法。单次载荷谱的应力切换状态如图 1 所示,时间为 9 min。

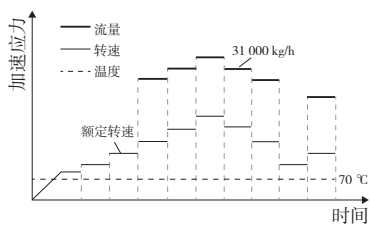


图 1 单次循环的加速载荷谱

按照上述载荷谱进行离心泵的加速寿命试验,搭建燃油离心泵变载荷加速寿命试验台,其中待测泵在试验台上的连接方式如图 2 所示,满足

加速寿命试验要求的试验台需具备以下条件:施加的应力水平(转速、流量及温度等)的大小及形式都可以实时改变并可以监测与记录,可以实时测量并记录待测泵进出口压力、燃油温度和出口流量等。考虑以上试验条件,本次加速寿命试验台采用直流调速电机,以便快速实现转速应力的切换,流量部分采用比例节流阀和变量马达进行调节。

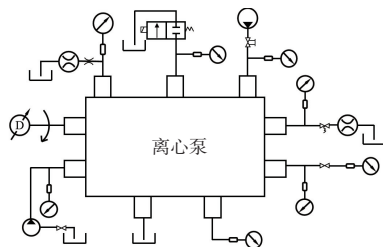


图 2 被测泵试验台连接方式

3 试验数据处理分析

3.1 退化轨迹拟合

加速寿命试验每次循环过程中,打开测试泵进口活门,记录在不同转速下泵出口的压力传感器及流量传感器输出值。如表 1 所示为每隔 80 h 记录的性能数据,可以看出测试泵在加速寿命试验中期开始出现退化迹象,试验后期泵供油性能退化速度加快。图 3 所示为泵在完整试验周期中额定转速水平状态下的出口压力数据(其中因试验前期泵未发生供油性能退化,因此前期阶段时长的压力数据未显示)。

表 1 泵出口流量及压力

参数	时间/h											
	80	160	240	320	400	480	560	640	720	800	880	960
流量/(kg/h)	27 281	27 377	26 821	27 376	26 582	26 937	25 574	24 072	23 635	22 141	21 873	21 147
压力/MPa	6.11	6.14	6.09	6.12	6.09	6.10	6.01	5.84	5.61	5.39	5.14	4.76

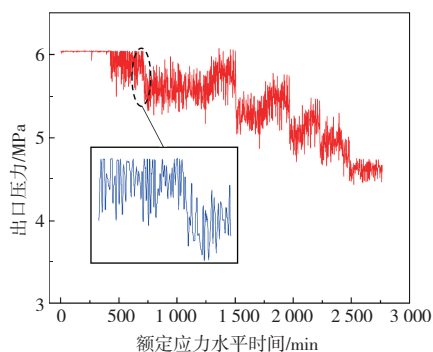


图 3 额定转速下泵出口压力

待测泵出口压力的退化过程是线性与非线性并存的过程,且数据存在较明显的噪音干扰,因此需先对压力信号进行降噪平滑处理。采用移动均值法进行数据降噪处理,是将平滑处理后的泵出口压力数据进行拟合,通过拟合结果中的相关系数 R 来确定拟合曲线的精准度。如图 4 所示为拟合后的离心泵出口压力退化轨迹,指数分布的相关系数 R 为 0.952,拟合精准度较高,因此可以认为该曲线为被测泵出口压力的实际退化轨迹。

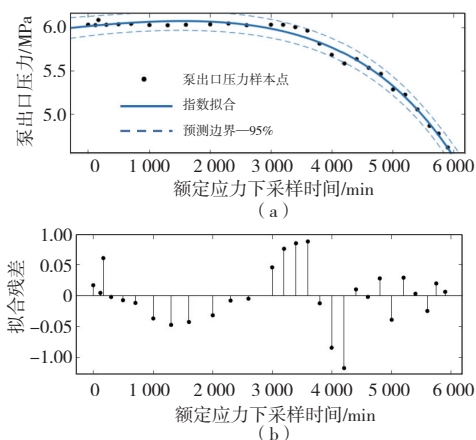


图4 泵压力退化轨迹拟合曲线

3.2 寿命分布拟合

基于退化轨迹,根据相关记录被测泵部件失效或供油性能临界值的标准设定失效阈值(认为额定转速下泵出口压力下降至70%时失效),采用最小二乘法进行预测,进而估计得到该应力水平下离心泵的伪寿命值。最小二乘法在时序预测方面,通过构建线性回归模型,根据最小化观测值与预测值之间的误差平方和找到最佳拟合曲线。如图5所示为依靠额定应力状态下的测试泵出口压力数据得到的伪寿命值。可以看出在额定转速下记录时间达到6 835 min时,测试泵出口压力到达失效阈值,因为试验中单次载荷谱循环时间为9 min,所以预测当加速寿命试验时间达到约1 025 h时测试泵失效。

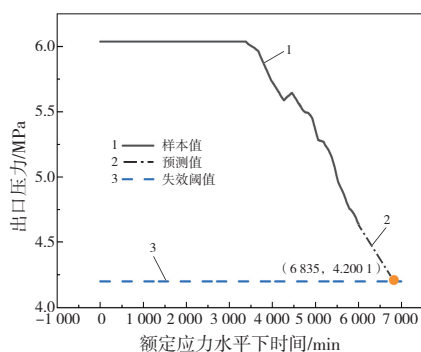


图5 出口压力失效阈值预测

首先离心泵的失效形式一般因为部件损耗造成的,即其任一部件的故障就会造成泵整体性能的下降或失效,因此其寿命服从威布尔分布可能

性最大,其次可能符合正态分布或对数正态分布,因此需对伪寿命样本进行3种形式的分布拟合,通过相关系数 R 进行验证。由于对单一泵进行试验时只能采取一个寿命样本数据,因此需要采取相应方法完善估计所需的样本。本文采取虚拟增广样本方法,根据试验得到的离心泵伪寿命值,结合以往记录的此型号泵或类似泵的失效时间(失效时间的均值应与试验样本的伪寿命值相等),得到伪寿命的虚拟增广样本数据。依靠虚拟增广样本数据分别进行威布尔分布、对数正态分布和正态分布拟合,如表2所示,其中威布尔分布拟合的相关系数 R 最高为0.986 6,验证了测试泵寿命服从威布尔分布。

表2 各分布拟合的相关系数

分布模型	相关系数 R
威布尔	0.986 6
对数正态	0.972 4
正态	0.946 3

采用极大似然估计法得到的额定转速状态下的二参数威布尔寿命分布的拟合曲线,其中图6(a)为测试离心泵的可靠度随加速寿命试验时间下的变化,它可以明显看出离心泵的可靠度随试验时间的增加逐渐下降。在试验额定应力下时间 $t=80$ h之前离心泵的可靠度维持在0.99以上,随后开始产生退化迹象,离心泵可靠度开始下降;当试验时间达到 $t=117$ h时离心泵的可靠度 $R(117)=0.5$,此时对应的离心泵寿命为其中位寿命。图6(b)为测试离心泵的失效概率密度随加速寿命试验时间的变化轨迹,它可以看出在试验时间为 $t=120$ h时离心泵发生故障失效的概率最大,所以实际应用中在该时间点前后应加强对离心泵供油状态的监测。图6(c)为测试离心泵剩余寿命概率随时间的变化轨迹,它可以明显看出离心泵的剩余寿命概率分布与其可靠度之间存在明显关系,在时间样本达到130 h左右时,泵出口压力达到预估的失效阈值,此时则认为离心泵内部件因磨损及疲劳等原因造成失效,离心泵已无法达到预期工作状态,实际应用中应暂停离心泵工作并进行维修处理。

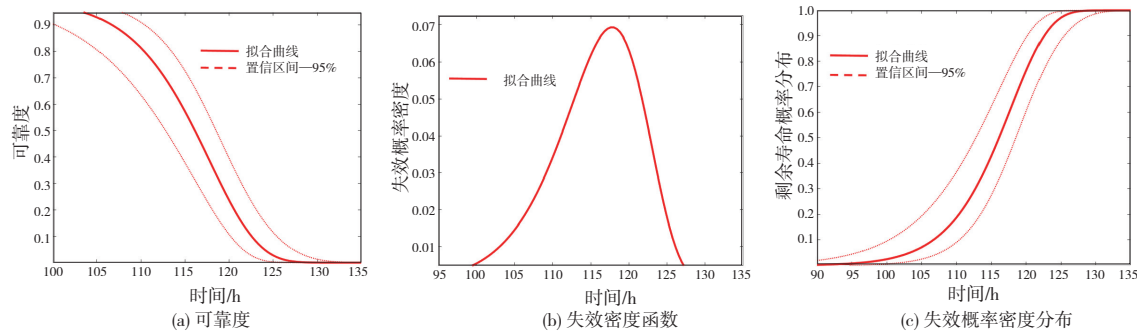


图6 被测泵威布尔分布拟合

3.3 可靠性及精度评估

采用威布尔寿命分布下极大似然估计法及其相关参数的置信区间估计方法,依靠加速寿命试验获得的出口压力数据,计算获得各参数在额定转速水平下的置信区间,对模型可靠度进行估计与分析。计算结果如表3所示,得到在额定转速应力水平下的威布尔分布形状参数和尺度参数及其95%的置信区间,在该应力状态下极大似然估计的似然比检验量 $E=0.936\ 2$,小于其临界值,再次确定被测离心泵的寿命分布符合威布尔模型。

表3 可靠性模型参数及其置信区间(95%)

参数	MLE	置信下限	置信上限	区间长度
$\hat{\eta}$	118.052	83.339	152.765	69.426
$\hat{m}$	7.224 3	6.108 3	8.340 3	2.232
σ	0.045	0.039	0.051	0.012
γ	3.340	3.031	3.649	0.618

3.4 加速模型

获得威布尔分布模型中的未知参数数值后,将广义艾林模型代入,得到威布尔—广义艾林加速模型。加速模型中 ΔP 可由流量与进出口压差的换算公式获得,将加速模型转化为流量、转速及温度的关系式,基于极大似然估计法得到的形状参数 m 与该应力下特征寿命 $\hat{\eta}$,可以求得未知数 A 、未知数 B 的数值。将常规应力水平下的转速、温度及流量代入即可获得该状态下测试泵的寿命。如表4所示为测试泵内流通常温燃油时各转速状态下的工作寿命。

表4 常温燃油介质下各转速对应寿命

相对转速/%	流量/(kg/h)	0.95可靠度下寿命/h
50	15 000	4 721
60	17 500	4 276
70	19 500	3 611
80	21 500	2 947
90	24 500	2 132

4 结语

本文针对离心泵常规寿命试验时间长、成本高等问题,确定了定时截尾式的步进应力循环加速寿命试验方案并完成试验,拟合得到离心泵出口压力的退化轨迹,设置失效阈值,预测得到伪寿命值,并采用极大似然估计法验证了测试离心泵寿命分布,并对模型可靠度进行评估,最终得到测试离心泵的加速模型,代入常规应力水平得到正常工作状态下测试离心泵的完整寿命。结果表明:被测离心泵符合指数退化轨迹,寿命分布满足威布尔模型,其相关系数 R 为0.986 6。通过威布尔—广义艾林模型得到典型工作状态下测试离心泵的完整寿命。

参考文献:

[1] Wu X L, Yang Y F, Shi W D, et al. Numerical simulation study on flow characteristics of multistage centrifugal pumps under different inlet gas void fractions [J]. Sustainability, 2023, 15(21): 15485.

[2] Yuan J P, Shi J L, Fu Y X, et al. Analysis of fluid-structure coupling dynamic characteristics of centrifugal pump rotor system[J]. Energies, 2022, 15(6): 2133.

[3] 张文广, 贺东旭, 李浩瀚, 等. 机电产品加速贮存试验与寿命评估方法研究[J]. 机电工程, 2021, 38(5): 528-535.

(下转第92页)

坐标可快速转换为工件坐标系坐标。优化后圆锥曲线统一极坐标方程的一致性,有效减少了所编制通用宏程序模版中变量数量。在进行加工程序调试时,只需在该通用宏程序模板中调整圆锥曲线极轴旋转角、离心率、焦距等参数对应变量的赋值,即可完成加工程序的编制。经多次加工验证,该通用宏程序模版适用于各类圆锥曲线牙型螺纹的加工,并能大幅提升圆锥曲线牙型螺纹的编程效率。

参考文献:

- [1] 邹峰,孙武兵,张甜甜,等. Mastercam 软件在特殊螺纹加工中的应用[J]. 金属加工(冷加工),2024(7):61-65.
- [2] 闫博,冯能. 基于 CAXA 数控车软件的异形螺纹加工编程[J]. 设备管理与维修,2021(14):103-104.
- [3] 凌超强,卫滨,孙永辉,等. 使用 CAM 软件加工异形螺纹的方法[J]. 金属加工(冷加工),2023(4):68-73.
- [4] 张玲. 基于宏程序和 VERICUT 的空间螺旋槽四轴数控仿真加工技术研究[J]. 现代制造技术与装备,2025,61(1):104-106,110.
- [5] 曹智梅. 车削抛物线宏程序自动生成技术研究[J]. 机械工程与自动化,2024(6):40-42.
- [6] 崔亚军. 基于 A 类宏程序模态调用的模块化数控加工程序编制探究[J]. 模具制造,2025,25(5):56-58,61.
- [7] 杨春花. 基于宏程序的数控机床参数化编程技术应用[J]. 电脑编程技巧与维护,2025(4):27-29,114.
- [8] 刘云,胡建民,邹斌,等. 分析数控宏程序在数控车床上实现锯齿形螺纹的加工应用[J]. 中国金属通报,2025(3):112-114.
- [9] 杨香港. 宏程序在梯形螺纹加工中的应用[J]. 今日制造与升级,2024(11):72-75.
- [10] 张宣宣,顾燕,康徐红. 内椭圆数控加工方法研究[J]. 中国机械,2024(9):68-71,75.
- [11] 陈雄. 基于华中数控系统车削正弦曲线的宏程序编程研究[J]. 中国机械,2024(5):50-53.
- [12] 龙育才,田长青,朱永星. 椭圆异型螺纹数控宏程序编制的设计[J]. 轻工科技,2019,35(3):42-43.
- [13] 朱治法,孙艳华,杜春平. 宏程序车削异形螺纹的编程探索[J]. 桂林航天工业学院学报,2018,23(4):451-454.
- [14] 辜文娟. 基于华中数控系统车削椭圆的宏程序编程探究[J]. 科技与创新,2023(5):122-124.
- [15] 胡翔云,胡莹. 直线拟合椭圆轮廓曲线数控加工误差分析[J]. 模具制造,2024,24(1):73-75.
- [16] 张晖. 法兰盘椭圆型腔数控铣削工艺与编程研究[J]. 内燃机与配件,2023(24):45-47.
- [17] 韩雪松,钟丽珠,谌炎辉,等. 异形螺纹的三维建模与数控编程技术[J]. 机电工程技术,2023,52(7):230-233.
- [18] 陆家峰,郭长城. 异形螺纹的数控加工技术分析[J]. 造纸装备及材料,2022,51(5):108-110.
- [19] 黄振沛. 基于数控车削椭圆面螺纹零件加工的研究[J]. 煤矿机械,2017,38(6):76-78.
- [20] 李丽萍. 螺纹的数控仿真加工分析[J]. 机械工程与自动化,2024(6):77-79.
- [21] 王军强,王伟,韩亮. 大螺距半圆形截面螺纹加工方法[J]. 金属加工(冷加工),2019(11):50-53.
- [22] 岳瑞飞,年得君,余正存. 数控车削大螺距三角形螺纹加工方法研究[J]. 河南科技,2023,42(21):37-40.
- [23] 李雅昔. 基于统一极坐标方程的圆锥曲线宏程序通用模版编制[J]. 现代制造工程,2026(1):95-100,134.

收稿日期:2025-07-09

(上接第 80 页)

- [4] 曹永军,宋黎明,陈伟. 高危离心泵的工程设计方案研究[J]. 化工设备与管道,2022,59(6):66-71.
- [5] 韩威,杨杏,李刚,等. 基于 PCA 和威布尔分布的滚动轴承剩余寿命预测方法研究[J]. 机械制造与自动化,2022,51(4):61-64,77.
- [6] 桑勇,王占林. 航空液压泵加速寿命试验台的研制[J]. 液压气动与密封,2009,29(1):45-48.
- [7] Fan M, Dazin A, Bois G, et al. Instabilities identification based on a new centrifugal 3D impeller outflow model[J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 140:108466.
- [8] 吴松,吕晶晶,李小康. 可靠性加速寿命试验综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2021,39(1):94-100.
- [9] Ding C, Yang C Y, Tse S K. Accelerated life test sampling plans for the Weibull distribution under Type I progressive interval censoring with random removals[J]. Journal of Statistical Computation and Simulation, 2010, 80(8):903-914.
- [10] 马小兵,刘宇杰,王晗. 加速寿命试验三参数威布尔分布的极小变异-极大似然估计[J]. 装备环境工程,2023,20(5):12-18.

收稿日期:2024-03-12