

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.03.012

基于蒙特卡罗方法的粗纱机可靠性预测

董博超, 杨灵芝, 胡 胜

(西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要:为提高粗纱机生产效率及可靠性、降低维护成本,增加企业经济效益,课题组提出了一种粗纱机可靠性预测模型。该模型利用故障模式及影响和危害性分析(failure mode, effects and criticality analysis, FMECA)识别粗纱机的关键部件及其故障模式;将基于蒙特卡罗方法得到的寿命模拟值进行数据拟合,确定粗纱机的初选寿命分布类型;通过皮尔逊 χ^2 检验统计量检验证明分布的有效性,然后采用最大似然函数求解可靠性函数;最后以JWF1418A型自动落纱粗纱机为例进行可靠性预测。研究结果表明:链条和链轮对JWF1418A型自动落纱粗纱机可靠性影响较大,其寿命服从威布尔分布。该模型可推广应用至其他纺织机械设备中,为进一步进行粗纱机维护研究提供参考。

关键词:纺织机械;可靠性预测;粗纱机;故障模式及影响和危害分析 FMECA;蒙特卡罗方法
中图分类号:TS103;TH17 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)03-0078-06

Reliability Prediction of Roving Frame Based on Monte Carlo Method

DONG Bochao, YANG Lingzhi, HU Sheng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to improve the production efficiency and reliability of the equipment, reduce the maintenance cost, and increase the economic benefits of enterprises, a reliability prediction model for roving frame was proposed. This model utilized failure mode, effects and criticality analysis (FMECA) to identify the key components of the roving frame and their failure modes. Based on the life simulation value obtained by Monte Carlo method, data fitting was carried out to determine the primary life distribution type of the roving frame. Pearson χ^2 test was used to prove the effectiveness of distribution. Then, the maximum likelihood function was used to solve the reliability function. Finally, took JWF1418A automatic doffing roving frame as an example to achieve the reliability prediction. The results show that the chain and chain wheel have a relatively great influence on the reliability of JWF1418A automatic doffing roving frame, and its service life follows Weibull distribution. The model can be applied to other textile machinery, and the results can provide reference for further research on roving frame maintenance.

Keywords: textile machinery; reliability prediction; roving frame; FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis); Monte Carlo method

纺织业经过几十年的变革发展成为我国的支柱产业,纺织机械行业也在纺织业的带动下不断发展,取得了亘古未有的进步。随着纺织机械逐渐趋向智能化和自动化,与此同时带来的设备故障率及可靠性的问题,会对企业经济发展造成一定影响^[1]。可靠性预测可

以确定纺织机械的寿命分布类型和可靠性函数,发现薄弱环节,继而及时有效地对纺织机械进行维护,并制定合理的维护策略,对延长设备使用寿命,降低设备维护成本,提高纺织企业的核心竞争力具有深远意义^[2-5]。

收稿日期:2022-11-12;修回日期:2023-02-28

基金项目:中国纺织工业联合会科技指导性项目(2020070);西安工程大学博士启动基金项目(BS1613)。

第一作者简介:董博超(1982),男,山西万荣人,博士,讲师,主要研究方向为系统工程理论及可靠性、维修性研究。E-mail: dongbochao@yeah.net

可靠性预测是降低故障事件风险和提升制造业可用性的最重要活动之一。Lee 等^[6]提出了一种利用故障率数据库对机床零件进行可靠性预测的方法。Kim 等^[7]指出基于物理性能指标的可靠性预测是对某些高可靠性零件或系统进行可靠性评估的一种有效和替代的方法。Moon 等^[8]提出了一种基于概率的固体火箭发动机可靠性预测方法,采用了定量失效模式、影响和关键度分析方法来确定部件的可靠性,并将其集成到故障树分析中,以获得系统的可靠性。Okoye 等^[9]将人工神经网络的非线性特征与训练算法相结合,采用蒙特卡罗仿真进行发电系统的可靠性预测,最后预测的泛化性能有了很大的提高。徐婷^[10]提出了在运用迭代非线性滤波算法情况下基于最小二乘支持向量机的可靠性预测方法,建立了发动机的可靠性数据预测的数学模型,经过实例分析证明该预测方法精度较高。张桦^[11]构建了基于状态检修和马尔可夫过程的变压器全态状态可靠性预测模型,通过对变压器子系统的结构分析,计算得到各部位的故障频率,运用熵权模糊计算量化变压器缺陷的严重程度等级,构建设备危害度评估矩阵,从而完成对变压器的可靠性预测。

课题组通过故障模式及影响和危害性分析(failure mode, effects and criticality analysis, FMECA)得到了粗纱机的关键部件及其故障模式;利用蒙特卡罗方法得到的系统寿命模拟值进行了分析计算;根据数据拟合和拟合优度检验确定粗纱机的寿命分布函数,为制定粗纱机维护策略提供参考。

1 粗纱机 FMECA 分析

课题组以 JWF1418A 型自动落纱粗纱机为研究对象,根据 JWF1418A 型自动落纱粗纱机的主要结构和运动规律,将其主要划分为 7 个机构,即喂入机构、牵伸机构、加捻机构、卷绕成形机构、取放纱管机构、运纱小滑车机构和空满管交换机构。该自动落纱粗纱机的功能就是尽可能替代人工,减轻作业人员的劳动强度,实现从落纱、换管、生头和开车工作全自动化,提高粗纱机的生产效率,提升成纱质量和产量。该粗纱机为串联系统,其中任何一个机构中的零部件故障都会对其相应的机构造成影响,而其中任何一个机构受到影响都会对该粗纱机的可靠性造成影响^[12-13]。

1.1 严酷度类别的定义

机械设备不同零部件所造成的故障不同,不同的故障通常对设备造成的影响也不同。为了划分不同故障模式对设备造成的影响,通常对故障模式所造成的设备最终影响的严重程度确定等级,一般将等级分为 4 类,严重程度等级被称为严酷度类别。该粗纱机严酷度类别的定义如表 1 所示。

表 1 严酷度类别

Table 1 Severity category

类别	说明
I	导致粗纱机预定功能丧失,对粗纱机造成重大伤害,甚至可能导致作业人员伤亡
II	导致粗纱机部分预定功能丧失,通常不会对作业人员造成伤害
III	导致粗纱机预定功能下降,需停机进行维护,通常不会造成显著损伤
IV	对粗纱机运行无影响或影响很小

1.2 粗纱机危害性分析

危害性分析(criticality analysis, CA)是确定各种零部件故障模式的后果和发生概率,在故障模式及影响分析(failure mode and effects analysis, FMEA)的基础上进行危害性分析。课题组选用危害度矩阵图法进行 JWF1418A 型粗纱机的危害性分析。

危害度矩阵图法是利用图形的方法来评估零部件故障模式的危害性,横坐标是故障模式的严酷度类别,纵坐标是故障模式的发生概率等级。表 2 所示是故障模式发生概率等级,根据评分准则对各机构主要零部件故障模式发生概率进行评估。

表 2 发生概率等级评分准则

Table 2 Occurrence probability rating criteria

发生度	故障发生的可能性	参考值 P/%
A 级	非常高	$P > 20.0$
B 级	高	$10.0 < P \leq 20.0$
C 级	中等	$1.0 < P \leq 10.0$
D 级	较低	$0.1 < P \leq 1.0$
E 级	极低	$P \leq 0.1$

粗纱机各机构主要零部件故障模式的危害性大小由故障模式的严酷度类别和发生概率等级来确定。在危害性矩阵图中找到相对应的点,向对角线作垂线,以

该垂线和对角线的交点到坐标原点的距离用来表示零部件故障模式危害性的大小。2 点之间的距离越长,其危害性越大,反之,2 点之间的距离越短,其危害性越小。由于篇幅有限,文中仅展示取放纱管机构的危害性矩阵图如图 1 所示,取放纱管机构故障模式如表 3 所示。

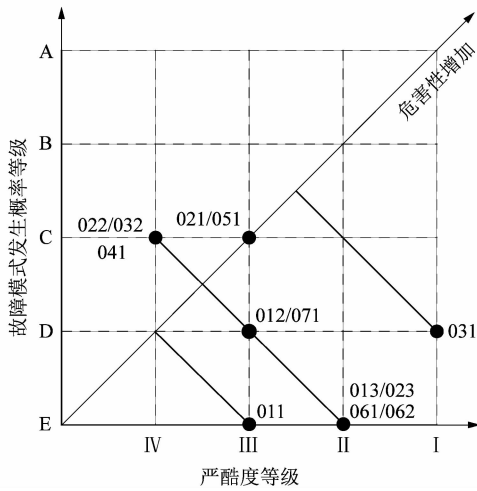


图 1 取放纱管机构危害性矩阵图

Figure 1 Hazard matrix of bobbin taking and releasing mechanism

表 3 取放纱管机构故障模式

Table 3 Failure mode of bobbin taking and releasing mechanism

构件		故障	
序号	名称	序号	模式
01	减速电机	1	异常噪声或振动过大
		2	轴承过热
		3	通用电机不转
02	传动轴	1	磨损
		2	弯曲
		3	断裂
03	传动齿轮	1	轮齿折断
		2	齿面损坏
04	螺杆	1	磨损
05	滑配键	1	磨损
06	龙筋	1	不换向
		2	不升降
07	取纱管	1	损坏

因为 JWF1418A 型粗纱机为串联系统,将严酷度

在 II 级以上且危害度较高的零部件作为该粗纱机的关键部件,该粗纱机的关键部件及故障模式如表 4 所示。

表 4 粗纱机关键部件及故障模式

Table 4 Key components and failure modes of roving frame

序号	类别	故障模式
1	链条	断裂
2	链轮	轮齿折断
3	变频电机	匝间短路,轴承损伤
4	传动齿轮	轮齿折断
5	罗拉	断裂
6	胶圈	断裂
7	龙筋	不换向或不升降
8	减速电机	通用电机不转
9	传动轴	断裂
10	气缸	输出力不足或活塞杆和缸盖损坏

2 基于蒙特卡罗方法的可靠性预测

蒙特卡罗方法也称统计模拟方法,是以概率论和统计理论方法为基础,使用随机数来解决很多计算问题的方法。其核心思想是通过大量随机样本,逼近想要研究的实际问题的解。随机采样得到的近似解,随着随机采样数值增多,得到正确结果的概率越大。借助计算机技术,蒙特卡罗方法省却了繁复的数学推导和演算过程,并且蒙特卡罗方法能够比较逼真地描述事物的特点和模拟实验过程,解决一些数值方法难以解决的问题,因而其应用领域十分广泛。

基于蒙特卡罗方法的可靠性预测的总体思路是:确定系统中关键零部件的寿命分布类型及相关参数之后,运用蒙特卡罗模拟得到关键零部件的寿命模拟值;根据系统可靠性框图,进行逻辑运算,确定系统寿命模拟值;对系统寿命数据进行拟合及拟合优度检验,最后确定系统的寿命分布类型和可靠度。

2.1 零部件寿命模拟值的确定

已知系统中关键零部件的寿命分布类型及相关参数,运用 MATLAB 软件分析,得到关键零部件的寿命模拟值,其中生成 $m \times n$ 形式的正态分布随机数矩阵的函数为 $\text{normrnd}(\mu_{ni}, \sigma_{ni}, m, n)$, i 代表寿命服从正态分布的零部件, μ_{ni} 和 σ_{ni} 分别代表其寿命均值和标准差;生成 $m \times n$ 形式的对数正态分布的随机数矩阵

的函数为 $\text{lognrnd}(\mu_{ij}, \sigma_{ij}, m, n)$, j 表示寿命服从对数正态分布的零部件, μ_{ij} 和 σ_{ij} 分别表示寿命取对数后的均值和标准差;生成 $m \times n$ 形式的威布尔分布的随机数矩阵的函数为 $\text{wblrnd}(\eta_q, \beta_q, m, n)$, q 是指寿命服从威布尔分布的零部件, η_q 和 β_q 分别指 q 部件寿命分布的尺度参数和形状参数。

2.2 系统寿命模拟值的确定

如果系统为串联系统,串联系统的寿命模拟值为各关键零部件寿命模拟值的最小值,即:

$$t_k = \min_{t_i, t_j, t_q \in S_k} (t_i, t_j, t_q) \quad (1)$$

式中: t_k 为粗纱机寿命模拟值, t_i, t_j 和 t_q 为最小路集中各单元的寿命模拟值。

通过蒙特卡罗方法模拟得到的一组零部件寿命模拟值中,可得到一个系统寿命模拟值。模拟次数增加,得到的系统模拟值也会增多,当模拟次数足够多时,可以运用系统模拟值推断出系统的寿命分布类型。

2.3 系统寿命分布类型的确定

对系统寿命数据运用 MATLAB 进行拟合,绘制不同寿命分布概率图,根据拟合直线的离散情况,初步判断系统寿命分布类型。

确定初选分布后,运用 MATLAB 确定初选寿命分布的相关参数,进行拟合优度的皮尔逊 χ^2 检验,检验实际频数和理论频数是否较为接近。

首先将数据分成 p 个区间 $[\bar{t}_{k-1}, \bar{t}_k]$, 记作 $I_k (k =$

$1, 2, 3, \dots, p)$, 那么每个点落在区间 I_k 的概率均为:

$$R_k = F_x(\bar{t}_k) - F_x(\bar{t}_{k-1}), k = 1, 2, 3, \dots, p. \quad (2)$$

式中: $F_x(t)$ 为初选寿命分布函数, p 是数据量。

其次计算皮尔逊 χ^2 检验统计量为:

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^p \frac{(r_k - mR_k)^2}{mR_k} \quad (3)$$

式中: r_k 是频数, m 是模拟次数。

若 $\chi^2 \leq \chi_\gamma^2(v)$, 则系统寿命服从初选寿命分布, 否则不服从该分布。

$$\chi_\gamma^2(v) \approx \frac{1}{2} [\sqrt{2v-1} + u_\gamma]^2; \quad (4)$$

$$u_\gamma \approx \frac{a_0 + a_1 z}{1 + b_1 + b_2 z^2} \quad (5)$$

式中: 自由度 $v = p - 3$; γ 为置信度; u_γ 为标准正态分布的分位数; $a_0 = 2.30753$; $a_1 = 0.27061$; $b_1 = 0.99229$; $b_2 = 0.04481$; $z = \sqrt{\ln(1/\gamma^2)}$ 。

3 算例分析

根据 JWF1418A 型粗纱机的 FMECA 分析结果,本节主要运用蒙特卡罗方法对该粗纱机进行可靠性预测并确定其相关可靠性函数。

3.1 粗纱机寿命模拟值的确定

通过对已有零部件和相似零部件的寿命分布类型及相关参数分析,假设 JWF1418A 型粗纱机的关键部件的寿命分布类型及相关参数如表 5 所示。

表 5 粗纱机关键部件寿命分布参数

Table 5 Life distribution parameters of roving frame key components

序号	部件	分布	均值 μ	标准差 σ	尺度参数 η	形状参数 β
1	链条	威布尔			2 634	1.58
2	链轮	对数正态	8.45	1.39		
3	变频电机	威布尔			3 699	1.42
4	传动齿轮	对数正态	9.13	1.87		
5	罗拉	对数正态	5.83	1.29		
6	胶圈	正态	1 994.00	85.00		
7	龙筋	正态	2 863.00	73.00		
8	减速电机	威布尔			3 184	1.39
9	传动轴	对数正态	6.62	1.10		
10	气缸	威布尔			2 893	2.33

运用蒙特卡罗方法,通过 MATLAB 软件分析,得到 500 个单元寿命模拟值。模拟次数 $m = 500$, 可以获得

500 个粗纱机寿命模拟值,对获得的粗纱机寿命模拟值进行区间化处理,整理得到 50 个特征数据如表 6 所示。

表 6 粗纱机寿命模拟特征数据
Table 6 Life simulation characteristic data of roving frame

序号	频数 r_k	\bar{t}_k/h	序号	频数 r_k	\bar{t}_k/h
1	6	200	26	9	7 420
2	5	450	27	7	7 800
3	6	770	28	6	8 070
4	6	920	29	9	8 340
5	7	1 010	30	9	8 510
6	9	1 240	31	5	8 790
7	4	1 530	32	8	9 000
8	7	1 970	33	9	9 280
9	9	2 140	34	9	9 490
10	10	2 350	35	12	9 650
11	8	2 790	36	11	9 970
12	6	3 040	37	2	11 070
13	10	3 230	38	8	11 880
14	10	3 580	39	9	12 560
15	6	3 840	40	4	12 960
16	10	4 210	41	4	13 580
17	9	4 470	42	7	14 210
18	9	4 850	43	8	15 050
19	10	5 390	44	7	15 860
20	14	5 640	45	7	16 510
21	10	5 980	46	9	17 230
22	13	6 180	47	8	17 960
23	12	6 450	48	6	18 760
24	10	6 730	49	6	19 050
25	11	7 160	50	4	19 820

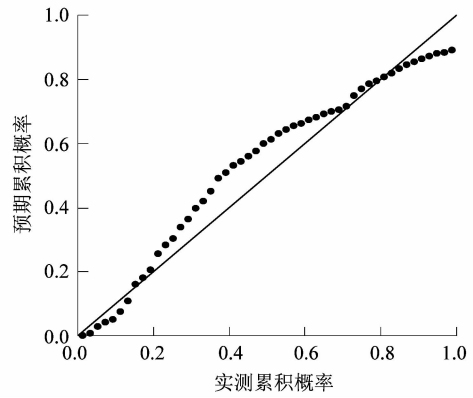


图 3 粗纱机对数正态 P-P 图

Figure 3 Lognormal P-P diagram of roving frame

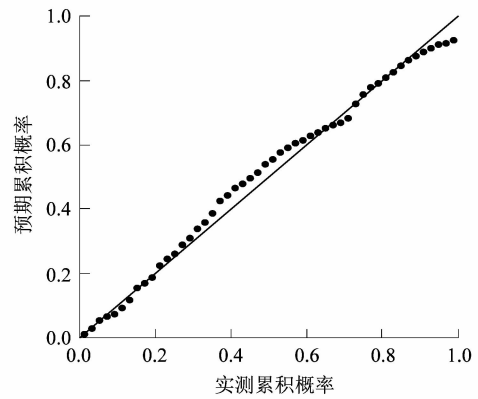


图 4 粗纱机威布尔 P-P 图

Figure 4 Weibull P-P diagram of roving frame

3.2 粗纱机寿命分布类型的确定

运用 SPSS 拟合, 绘制粗纱机不同寿命分布 P-P 图, 如图 2~5 所示。

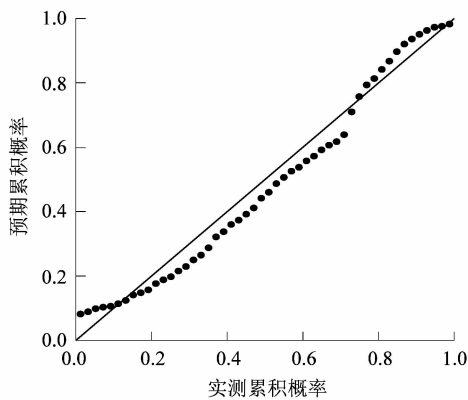


图 2 粗纱机正态 P-P 图

Figure 2 Normal P-P diagram of roving frame

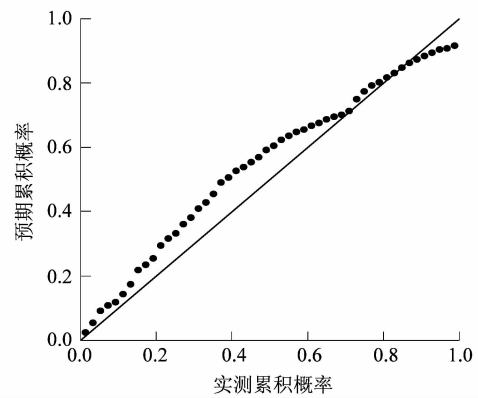


图 5 粗纱机指数 P-P 图

Figure 5 Index P-P diagram of roving frame

在威布尔 P-P 图中粗纱机寿命模拟特征数据基本落在对角线上, 因此确定 JWF1418A 型自动落纱粗纱机寿命服从威布尔分布, 故将威布尔分布作为初选

分布。确定初选分布后,运用 MATLAB 得到该分布的尺度和形状参数分别为 8 668.9 和 1.4,进一步开展拟合优度的皮尔逊 χ^2 检验。得到皮尔逊 χ^2 检验统计量 $\chi^2 = 52.75$ 。

综上分析, γ 为 0.05,确定 $\chi_\gamma^2(v) = 59.99$,满足 $\chi^2 < \chi_\gamma^2(v)$ 条件。JWF1418A 型自动落纱粗纱机系统寿命服从威布尔分布。

3.3 粗纱机寿命分布模型参数求解

将 \bar{t}_k 视为完全样本,威布尔分布的似然函数表示为:

$$L(\beta, \eta) = \frac{\beta \bar{t}_k^{\beta-1}}{\eta^\beta} \exp \left[- \left(\frac{\bar{t}_k}{\eta} \right)^\beta \right]. \quad (6)$$

对式(6)取对数得:

$$\ln L(\beta, \eta) = p \ln \left(\frac{\beta}{\eta} \right) + (\beta - 1) \sum_{k=1}^p \ln \left(\frac{\bar{t}_k}{\eta} \right) - \sum_{k=1}^p \ln \left(\frac{\bar{t}_k}{\eta} \right)^\beta. \quad (7)$$

$$\text{令: } \frac{d}{d\beta} [\ln L(\beta, \eta)] = 0;$$

$$\frac{d}{d\eta} [\ln L(\beta, \eta)] = 0。$$

整理后得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sum_{k=1}^p (\bar{t}_k)^\beta \ln \bar{t}_k}{\sum_{k=1}^p (\bar{t}_k)^\beta} - \frac{1}{\beta} &= \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \ln \bar{t}_k; \\ \eta^\beta &= \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p (\bar{t}_k)^\beta. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将 50 个 \bar{t}_k 数据代入计算,可得 $\beta = 1.283, \eta = 8\ 590.31$,代入威布尔分布,可得:

1) 概率密度分布式

$$f(t) = \frac{1.283 t^{0.283}}{8\ 590.31^{1.283}} \exp \left[- \left(\frac{t}{8\ 590.31} \right)^{1.283} \right]。$$

2) 粗纱机寿命分布函数

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{8\ 590.31} \right)^{1.283} \right]。$$

3) 粗纱机的可靠度函数

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{8\ 590.31} \right)^{1.283} \right]。$$

4 结语

可靠性预测对防止和降低设备故障造成的经济损失具有重要意义。课题组综合运用 FMECA 和蒙特卡罗方法对粗纱机进行寿命可靠性预测,研究结果表明影响 JWF1418A 型粗纱机可靠性的关键部件为链条、链轮和变频电机等,其寿命服从威布尔分布。基于现有研究成果,未来可以构建以总维护成本最小化的预防维护模型,确定 JWF1418A 型粗纱机的最优维护周期及最优预防性维护次数。文中提出的方法可以推广应用到其他纺织机械设备中,并且为纺织机械维护保养提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 马颜雪,范小怡,高长春. 桐乡毛衫产业集群的发展及对策研究[J]. 天津纺织科技,2022(4):61-64.
- [2] 曹晓滨. 纺织机械发展前景分析与研究[J]. 现代制造技术与装备,2016,239(10):93-95.
- [3] 朱晓. 设备管理中机械修理维护的意义及分析[J]. 设备管理与维修,2019(20):49-51.
- [4] 张飞,权丽君. 单级双吸离心泵转子系统的可靠性分析[J]. 机电工程,2021,38(9):1207-1211.
- [5] 欧阳杰,俞思源. 一种基于机械可靠性的安全设计方法[J]. 机电工程技术,2022,51(7):207-220.
- [6] LEE S W, LEE H K. Reliability prediction for VDI turret[J]. Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering, 2005, 28(1):49-54.
- [7] KIM Y S, CHUNG Y B. A study on reliability prediction of system with degrading performance parameter[J]. Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering, 2015, 38(4):142-148.
- [8] MOON K H, GANG J H, KIM D S, et al. A probabilistic based systems approach to reliability prediction of solid rocket motors[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2016, 17(4):565-578.
- [9] OKOYE M O, YANG J Y, LI Y L. The nonlinearity property accommodation in the monte carlo method of generation system reliability prediction by the neural network model[J]. Energy Reports, 2021, 7(suppl. 1):505-510.
- [10] 徐婷. 基于最小二乘支持向量回归的系统可靠性预测[D]. 镇江:江苏科技大学,2015:46-59.
- [11] 张桦. 配电系统可靠性预测模型及其算法研究[D]. 重庆:重庆大学,2016:15-32.
- [12] 孔繁苓. JWF1418A 型自动落纱粗纱机的设计思路及结构特点[J]. 纺织机械,2007(4):23-25.
- [13] 毛立民,裴泽光. 纺纱机械[M]. 北京:中国纺织出版社,2012.