

基于麻雀搜索算法考虑病患流的医院 诊疗设备维护优化研究

李岱高, 刘勤明, 李佳翔

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 针对医院诊疗设备出现故障后对病人的影响不可控、产生的维修费用高等问题, 提出了一种基于病患流分布不均的预防性维护决策模型。首先, 针对医院诊疗设备退化速度受病患流分布影响的特点, 采用病患流因子反映其流量变化规律, 并基于设备衰退演化规则构建了设备退化过程模型。其次, 通过将量化的诊疗设备故障风险成本以及延迟或提前维护带来的变动成本纳入成本计算体系, 提出了病患流分布不均状况下以故障风险值为约束的设备维护策略。最后, 采用麻雀搜索算法进行寻优获取关键初始变量, 并对模型进行数值仿真分析, 结果表明, 新维护策略在保障诊疗设备可靠度的同时, 也能保持较低的维护成本。

关键词: 诊疗设备; 病患流分布; 故障风险成本; 变动成本; 麻雀搜索算法

中图分类号: TP 207 **文献标志码:** A

Maintenance optimization of medical equipment considering patient flow distribution based on the sparrow search algorithm

LI Daigao, LIU Qinming, LI Jiaxiang

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To solve the problems of uncontrollable impact on patients and high maintenance costs after the failure of hospital diagnosis and treatment equipment, a preventive maintenance decision-making model based on uneven distribution of patient flow was proposed. Firstly, in view of the characteristics of the hospital treatment equipment degradation rate affected by the distribution of patient flow, the patient flow factor was used to reflect the changing law of its human flow, and the equipment degradation process model was constructed based on the equipment degradation evolution rule. Secondly, by incorporating the quantified cost of diagnosis and treatment equipment failure risk and the variable cost caused by delayed or early maintenance into the cost calculation system, an equipment maintenance strategy that constrains the failure risk value under the uneven distribution of patient flow

收稿日期: 2022-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71632008, 71840003); 上海市自然科学基金资助项目(19ZR1435600); 教育部人文社会科学研究规划基金资助项目(20YJAZH068); 上海理工大学科技发展项目(2020KJFZ038); 2021年上海市大学生创新创业训练计划项目(SH2021078)。

第一作者: 李岱高(1996-), 男, 硕士研究生。研究方向: 设备维护与决策。E-mail: 15800912657@163.com

通信作者: 刘勤明(1984-), 男, 特聘教授。研究方向: 维护调度、人工智能等。E-mail: lqm0531@163.com

was proposed. Finally, through the sparrow search algorithm (SSA) optimization to obtain the key initial variables, and numerical simulation analysis of the model, the results show that the maintenance strategy proposed in this paper can ensure the reliability of the diagnosis and treatment equipment while maintaining a low maintenance cost.

Keywords: *medical equipment; distribution of patient flow; failure risk costs; variable costs; sparrow search algorithm*

在诊疗活动中，就诊患者人流量受节假日、工作时段等因素影响呈现较大波动，如周末、春节假期尾声等就诊高峰期，经常出现病患集中就诊，导致诊疗设备连续不停长时间运转，而非就诊高峰期内设备运行时间间隔明显增加。病患流时间分布的差异导致诊疗设备运行工况不同；同时，病患流分布不均情况下设备运行时间段的收益不同，进而导致不同时刻停机维护的成本产生较大差异。因此，在设备不同病患流运行工况下，保证诊疗设备可靠度的同时降低维护成本成为亟待解决的问题。

目前，医院各种类型诊疗设备的维护和保养常根据历史经验和维护手册进行^[1]，易造成维护过剩或维护不足，增加医疗风险。中国《国家医疗器械不良事件监测年度报告（2020 年）》显示，2020 年共收到医疗器械不良事件报告 536055 份，相较于 2019 年增长 35.25%。对于医院诊疗设备的预防性维护，不少国内外学者都作了相应的研究。Carmignani^[2]提出了基于综合成本的故障影响分析 FEMA 方法；Abbasgholizadeh Rahimi 等^[3]用 FEMA 方法对放射性诊疗设备的故障进行优先排序；Hernández-lópez等^[4]采用层次分析法确定医院诊疗设备维护优先级，并给出相应设备权重便于后续评估。然而，他们的研究局限于患者本身的安全性及设备对医院的重要性，忽视了故障维修成本和停机损失成本等客观成本对维护优先级的影响。张宁等^[5]建立了基于 NSGA- II 的医疗设备预防性维护与病人调度联合优化模型。但文献 [2-5] 均未考虑设备运行工况对于设备衰退速率的影响，不能较好地考虑病患流分布不均对诊疗设备维护费用的影响。

研究不同工况下的设备维护，首先需要建立时变工况与设备衰退规律的集成模型。沈南燕等^[6]建立了考虑总成本最小化的设备故障率演化模型，并结合支持向量机对模型有效性进行检验；

Xia 等^[7]提出了基于环境变化因子和维修效果的设备预防性维护模型，将外部环境变化对故障率递增的影响纳入模型，但二者并未考虑设备历史工况对设备故障率的影响；Li 等^[8]提出了考虑故障率刷新因子的设备维护策略，用以求解定期维护和预防性维护相结合的设备故障率递增模型；Vilarinho 等^[9]将更换部件的成本纳入预防性维护成本中，从而选择更经济的方式对设备进行维护；甘婕等^[10]以长期平均维修费用率最小为目标建立了随机规划模型；盖京波等^[11]考虑了设备使用时间有限条件下设备预防性维修优化模型；汤乐成等^[12]提出了考虑交付时间、产品质量和企业信誉的联合设备维修策略。以上文献均采用了加速失效模型描述设备退化规律，但在医疗设备领域研究较少。

基于上述研究中存在的问题，本文考虑诊疗设备服役过程中病患流分布不均对其退化速度的影响，构建了病患流分布影响下故障率模型；有别于其他研究将故障风险成本与时间变动成本分开研究，本文同时将维护风险、设备重要性等故障风险以及维护时间变动产生的变动成本纳入成本体系，以维护总成本最小为优化目标构建了不同病患流分布下的设备维护调整策略，以满足诊疗设备运行高可靠要求和降低维修费用的需求。最后以某型号的 CT 机服役数据为例进行仿真分析，并采用麻雀搜索算法对维护策略进行优化，验证了其合理性和有效性。

1 问题描述与假设

本文的研究对象主要为大型复杂且不适合长时间连续使用的诊断治疗类医疗设备，例如 X 射线机、CT 机、核磁共振仪等，简称诊疗设备。该类设备使用寿命的衰退趋势会随其连续运行时长的增加而发生变动。例如 CT 机需要连续曝光产生

射线,连续使用多次长时间曝光会导致设备过热,从而影响设备寿命。而就诊病人流越密集越容易导致诊疗设备的连续运行,就诊排队病患流时域分布不均不仅会造成诊疗设备运行工况的差异,导致设备可靠度的衰退;同时,诊疗设备在病患流高峰期进行维护还将给医院造成较大的经济损失,需要对设备维护计划进行局部修正。如果提前对诊疗设备进行维护,则会造成一定的维护成本浪费,而延迟维护又会造成较大的失效风险。因此,本文基于病患流工况影响建立诊疗设备故障率演化模型,在病患就诊高峰期考虑可靠性及经济性,对诊疗设备制定合理的维护计划。

模型基本假设:

- 诊疗设备以全新状态投入使用,初始役龄为0;
- 在不同病患流量影响下设备失效机理不发生改变,服从加速失效模型;
- 不考虑由于备件不足引发的维修等待,设备发生的各种故障能被及时修复;
- 初始设备故障率服从两参数威布尔分布,形状参数为 m ,尺度参数为 η ;
- 每位患者在诊断设备的就诊时间为相同的固定值;
- 病患流区间内病患流因子 λ 可以表征其真实病患流水平。

2 模型建立

2.1 病患流分布影响下故障率模型构建

病患流分布密度不同导致各区间设备连续运行时长不同,从而影响医疗设备衰退速率。为更好地表征病患流分布对设备的影响,借鉴文献[13]中对环境应力的等效处理方法,将病病人流量数据进行分段等效处理,由此获得不同病患流区间内等效平均人流量。定义不同病患流区间的人流量因子 a_i 反映其变化规律,即

$$a_i = \lambda_i / \lambda_0 \quad (1)$$

式中: λ_i 为第 i 个病患流区间等效平均人流量; λ_0 为该诊疗设备基准人流量,即在设备设计最佳运行状态下病人流量。

诊疗设备在第 n 个病患流区间的等效役龄 t_n 为

$$t_n = a_i t_i \quad (2)$$

式中, t_i 为第 i 个病患流区间时长。

诊疗设备在不同病人流量影响下的等效役龄如图1所示,设备在经历 n 个病患流区间后的等效役龄 t_{0n} 为

$$t_{0n} = t_n + \sum_{i=1}^{n-1} t_{0i} = a_n \left(t - \sum_{i=1}^{n-1} t_i \right) + \sum_{i=1}^{n-1} t_{0i} \quad (3)$$

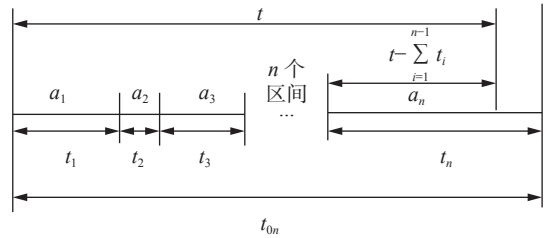


图1 病患流区间等效役龄折算

Fig.1 Equivalent service age conversion

在可靠性理论中,可靠度与故障率的关系为^[14]

$$R(t) = \exp \left(- \int_0^t l(t) dt \right) \quad (4)$$

式中: $R(t)$ 表示设备可靠度; $l(t)$ 表示设备故障率; t 为设备在当前预防性维护周期内的服役时长。

结合式(2)和式(3),可知在经过 n 个病患流区间后,诊疗设备的可靠度为

$$R(t, n) = \exp \left[- \int_0^{a_n \left(t - \sum_{i=1}^{n-1} t_i \right) + \sum_{i=1}^{n-1} t_{0(n-1)}} l_0(t) dt \right] \quad (5)$$

式中, $l_0(t)$ 为设备在基准病患流工况下的故障率函数。

执行预防性维护时第 n 个病患流区间内设备的故障率函数为

$$l(t, n) = a_n l_0 \left[a_n \left(t - \sum_{i=1}^{n-1} t_i \right) + \sum_{i=1}^{n-1} t_{0i} \right] \quad (6)$$

虽然诊疗设备运行状态可通过维护来改善,但修复后设备衰退速率较维护前加快,文献[15]使用役龄回退因子和故障率递增因子的概念用以描述这个过程,并验证了其合理性。为刻画维护活动对设备衰退过程的影响,引入役龄回退因子 ε 和故障率递增因子 β 描述维护过程对设备故障率的影响,第 k 次维护后设备的故障率函数为

$$l_k(t) = \beta_{k-1} l_{k-1}(t + \varepsilon_{k-1} T_{k-1}) \quad (7)$$

式中: ε_k 为第 k 个预防性维护周期内回退因子,用来描述在役龄层面维护活动对设备故障率的影响; β_k 为第 k 个预防性维护周期内故障率递增因子,用来描述不完美维护状况下设备故障率随维

护次数增加而变化； ε_k 和 β_k 取值可根据历史维护数据进行估计； T_{k-1} 表示第 $k-1$ 和第 k 个预防性维护周期时间间隔。

维护策略调整总体流程图如图2所示。

2.2 故障风险模型

故障风险的定义为故障发生的概率及故障后果的严重程度，其值由两者量化的结果表示。医院诊疗设备相较于其他普通的生产设备，发生故障造成的后果不仅包含维修成本和停机损失，还包含造成病人安全事故的舆情成本和诉讼成本等。在病患流高峰时，需要对诊疗设备进行提前维护或延迟维护，因此，为辅助决策是否提前或延迟进行维护，需要事先对诊疗设备进行故障风险评估，确定其故障风险系数，使其在保证诊疗活动安全性的情况下尽量兼顾高水平的可靠性。

采用故障风险成本 C_{risk} 衡量风险后果。

$$C_{risk} = P_d I_d \tag{8}$$

式中： P_d 为设备故障发生概率； I_d 为设备故障发生的后果。

诊疗设备在第 n 个病患流区间内发生故障的

概率^[16]为

$$P_d = \int_0^{\Delta t} l_k(t,n)dt \tag{9}$$

故障后果由故障维修成本和故障风险因子构成，即

$$I_d = c_d \varphi_n \tag{10}$$

式中： c_d 为单位故障维修成本； φ_n 为故障风险因子，用于衡量设备发生故障后产生的风险。

提前评定医疗设备的故障风险需考虑设备发生故障带来的负面舆情、医院声誉损失、补救成本等多方面因素，参与评估的要素根据设备实际服役过程中关键因素确定^[4]。由于涉及模糊环境下考虑多因素的影响问题，因此采用模糊综合评价法提前确定好 φ_n 的值。

根据大型诊疗设备的特点分别确定因素集 $U = \{u_1, u_2, \cdots, u_i, \cdots, u_n\}$ 和评语集 $V = \{v_1, v_2, \cdots, v_i, \cdots, v_n\}$ ，据此构成评价矩阵 W 为

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1m} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nm} \end{bmatrix} \tag{11}$$

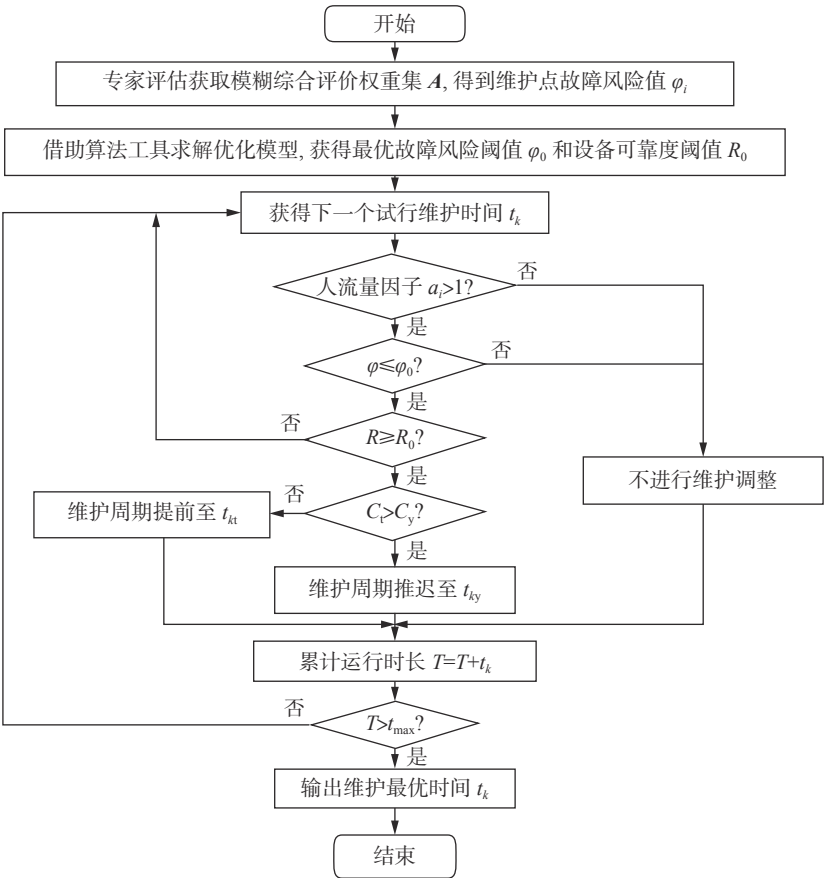


图2 考虑病患流分布的医院诊疗设备维护策略流程图
Fig.2 Flow chart of medical equipment maintenance strategy

模糊关系矩阵中各个元素 w_{ik}' 为

$$w_{ik}' = \frac{w_{ik}}{\sum_{k=1}^n w_{ik}} \quad (12)$$

通过层次分析法确定因素集中各影响因素的权重^[17],获得权重集 $A=[a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n]$,合成模糊综合评价结果矢量 B 为

$$B = AR = (b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n) \quad (13)$$

$$\varphi_i = \max b_i \quad (14)$$

式中: R 为模糊关系矩阵; b_i 为第 i 个指标的模糊综合评价结果。

由于医院诊疗设备性质特殊,发生故障的后果相较于其他行业往往更为严重,评判故障风险时需为后果最为严重的情况作准备,故直接取其中最大权重值作为该点故障风险值 φ_i 。

2.3 变动成本模型

根据假设c,维护活动及时开展,因此每次维护的停机时间相同。图3为维护时刻调整示意图,其中 $PM_{(n-1)}$, PM_n , $PM_{(n+1)}$ 分别为不考虑维护调整时的第 $n-1$, n , $n+1$ 次预防性维护时刻, PM_{ny} 为延迟维护时第 n 次预防性维护时刻, PM_m 为维护提前时第 n 次预防性维护时刻。为避免停机损失过大,在就诊高峰期时需对诊疗设备进行提前或延迟维护。提前对诊断设备进行维护会造成其使用价值的浪费,而维护活动延迟进行则会产生一定的设备失效风险,严重情况下可能导致误诊或无效诊疗甚至更严重的医疗事故。为保证诊疗活动的安全性,延迟维护必须在故障风险限制范围内进行,因此,规定诊疗设备故障风险不能高于阈值 φ_0 。

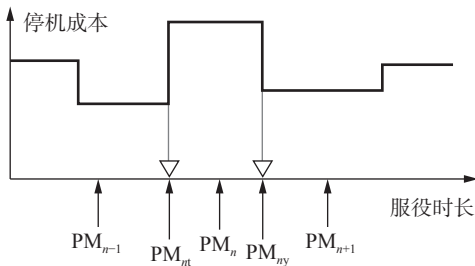


图3 维护周期调整示意图

Fig.3 Schematic diagram of maintenance cycle adjustment

进行设备动态维护时的变动成本 ΔC 包括设备提前维护变动成本 C_t 与延迟维护变动成本 C_y 。

提前进行诊疗设备维护可以有效保障诊疗活

动的安全性,但会造成其使用价值产生一定的浪费,从而产生一定的经济损失。由于在诊疗活动中对诊疗设备可靠度要求较高,因此将可靠度阈值考虑到维护策略的成本建模中十分必要^[18]。设备提前维护价值浪费成本 C_L 的计算公式为

$$C_L = c_r(R_t - R_0)/(1 - R_0) \quad (15)$$

式中: c_r 为每次维护的可靠度利用价值; R_t 为提前维护时刻设备可靠度; R_0 为设备维护可靠度阈值。

诊疗设备维护延迟将会导致设备故障风险高于预期,其惩罚成本 C_Y 为

$$C_Y = c_y(R_0 - R_y)/R_0 \quad (16)$$

式中: c_y 为延迟维护的基本惩罚成本; R_y 为设备延迟维护时刻可靠度。

维护调整会使诊疗设备在不同周期内的故障率发生变动,其故障率变化引起的故障维修变动成本 ΔC_d 为

$$\Delta C_d = C_d \int_0^{\Delta t} l_k(t, n) dt \quad (17)$$

式中: C_d 为单次故障维修成本; Δt 为设备进行维护调整时其维护时间调整量。

结合式(15)、式(16)和式(17),部件提前维护变动成本 C_t 与延迟维护变动成本 C_y 可由以下两式联立计算得出。

$$C_t = C_L - \Delta C_d \quad (18)$$

$$C_y = C_Y + \Delta C_d \quad (19)$$

假设诊断设备在本次维护周期内进行了 J 次维护调整,则其由于动态维护调整引起的变动成本为

$$\Delta C = \sum_{i=1}^J (\gamma C_t + (1 - \gamma) C_y) \quad (20)$$

式中, γ 为两种调整成本的决策变量,当维护提前时取 $\gamma = 1$,延迟维护时取 $\gamma = 0$ 。

2.4 停机成本模型

对于医院诊疗设备来说,计算停机成本时仅考虑停机时间是不够的,其停机成本会随病患流动态变化。诊疗设备第 i 次预防性维护的停机损失成本 C_{si} 为

$$C_{si} = T_{pi} \lambda_i r + C_p \quad (21)$$

式中: T_{pi} 为维护停机时间,包括故障维修用时和预防性维护用时; λ_i 为第 i 个病患流区间内等效平均病人流量; r 为单位病人诊疗平均收益。

若诊疗设备在服役周期内进行了 I 次预防性维护停机、 K 次故障停机,则设备维护停机总成本

C_s 为

$$C_s = \sum_{i=1}^I C_{si} + \sum_{i=1}^K C_{di} \quad (22)$$

2.5 诊疗设备总维护成本模型

假设诊疗设备在服役周期内进行了 I 次维护停机, J 次维护调整, K 次故障停机, 则其运行过程中的总成本 C 包括: 故障风险成本 C_{risk} 、变动成本 ΔC 和停机损失成本 C_s , 故考虑病患流分布的诊疗设备维护模型优化目标可表示为

$$\begin{cases} \min C = C_{risk} + \Delta C + C_s \\ \text{s.t. } \varphi \leq \varphi_0 \\ R \geq R_0 \end{cases} \quad (23)$$

通过求解优化模型获得设备确定合适的最高故障风险阈值 φ_0 和诊疗设备最低可靠度阈值 R_0 , 从而得出诊疗设备下一个最优维护时间 t_k 。

3 麻雀搜索算法

3.1 算法过程

从上文内容可看出, 该优化模型涉及多个非线性函数, 理论上难以直接求解, 而麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)是受麻雀觅食行为和反捕食行为启发而提出的新型算法, 与目标优化领域常用的遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)相比, 具有参数设置简单、寻优能力强和易于实现的优点^[19]。因此, 本文采用麻雀搜索算法求解该模型以获取故障风险阈值 φ_0 和诊疗设备可靠度阈值 R_0 , 算法具体步骤如下:

步骤1 确定种群数量 P , 初始化麻雀种群

$$X = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \dots & x_1^d \\ x_2^1 & x_2^2 & \dots & x_2^d \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_n^1 & x_n^2 & \dots & x_n^d \end{bmatrix}$$

确定种群上界 L_{ub} 、种群下界 L_{lb} 和最大迭代次数 ξ_{max} , 设定系统预警值 R_2 和安全值 S_T ;

步骤2 将总维护成本 $C(\varphi, R)$ 作为每只麻雀个体的适应度函数, 即 $f = C(\varphi, R)$, 计算各麻雀个体的适应度值 f_i 并进行排序, 确定位置最优个体 X_{best} 和位置最差个体 X_{worst} , 更新全局最佳适应度值 f_g 和全局最差适应度值 f_w ;

步骤3 通过式(24)更新麻雀发现者, 为整个

种群寻找食物, 并为加入者提供觅食的方向;

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j} \exp\left(-\frac{i}{\alpha \xi_{max}}\right), & R_2 < S_T \\ X_{i,j} + QL, & R_2 \geq S_T \end{cases} \quad (24)$$

式中: $x_{i,j}$ 为麻雀加入者个体; α 为(0, 1)区间随机数; Q 为服从正态分布的随机数; L 为单位矩阵。

步骤4 在觅食过程中, 部分加入者会时刻监视发现者, 当发现者发现更好的食物, 加入者会与其争夺食物, 若成功则获得发现者的食物, 若失败则更新加入者位置, 通过式(25)更新麻雀发现者和加入者位置;

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \exp\left(\frac{X_{worst} - X_{i,j}^t}{i^2}\right), & i > \frac{n}{2} \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j} - X_p^{t+1}| A^+ + L, & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

步骤5 意识到危险的麻雀在种群中的比例为 S_D , 位置由式(26)随机产生;

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{best}^t + \beta |X_{i,j}^t - X_{best}^t|, & f_i < f_g \\ X_{i,j} + K \left[\frac{|X_{i,j}^t - X_{worst}^t|}{(f_i - f_w) + \varepsilon} \right], & f_i = f_g \end{cases} \quad (26)$$

步骤6 若当前迭代次数 $\xi < \xi_{max}$, 转到步骤2, 否则输出最优麻雀个体位置信息 f_g 。

3.2 基于麻雀搜索算法的维护策略模型求解

考虑病患流分布的诊疗设备维护是一种复杂的多变量优化问题, 为将麻雀搜索算法应用于模型求解, 需先在麻雀种群矩阵中合理布局变量的位置以便于模型求解。麻雀种群矩阵参数含义如图4所示, 矩阵中每一行代表一个单独的麻雀个体。 n 代表麻雀种群个体数, 矩阵 k 列代表共有 k 维决策变量。

将麻雀搜索算法应用于优化诊疗设备维护模型的具体步骤如下:

步骤1 读取设置区间内模型所需的诊疗设备

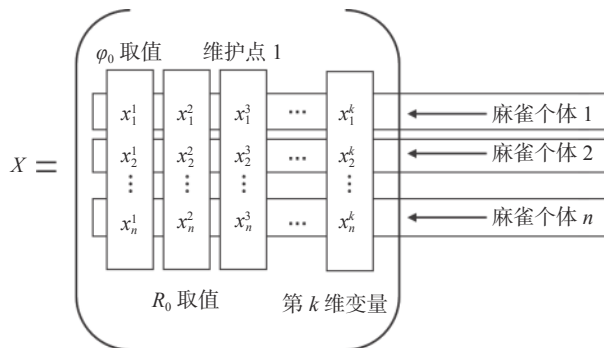


图4 麻雀种群含义示意图

Fig. 4 Schematic diagram meaning of sparrow population

所有历史数据与可读信息, 并对所得数据进行预处理;

步骤 2 将参数初始化, 输入麻雀种群规模 N 、发现者比例 P_D 、警戒者比例 S_D 、安全值 S_T 、最大迭代次数 $\xi_{\max}$ 、种群上下限 L_{ub} , L_{lb} 。初始化麻雀种群, 生成 n 只 k 维麻雀种群矩阵 X 。

步骤 3 以诊疗设备总维护成本 $C(\varphi, R)$ 最低作为目标函数, 计算每只麻雀适应度值 f_i , 排序获得最优适应度值 f_g 、最差适应度值 f_w , 及其对应位置 X_{best} 和 X_{worst} 。

步骤 4 根据式 (24) 更新发现者位置, 根据式 (25) 更新加入者位置, 根据式 (26) 更新警戒者位置。

步骤 5 计算麻雀个体适应度值, 并更新麻雀位置, 重新确定 f_g , f_w 以及 X_{best} 和 X_{worst} 。

步骤 6 判断迭代次数是否达到最大次数 $\xi_{\max}$, 如果是则输出最优适应度值 f_g 作为目标值, 输出最优麻雀位置 X_{best} 作为最优目标解; 否则转到步骤 4 继续进行运算。

算法求解流程如图 5 所示。

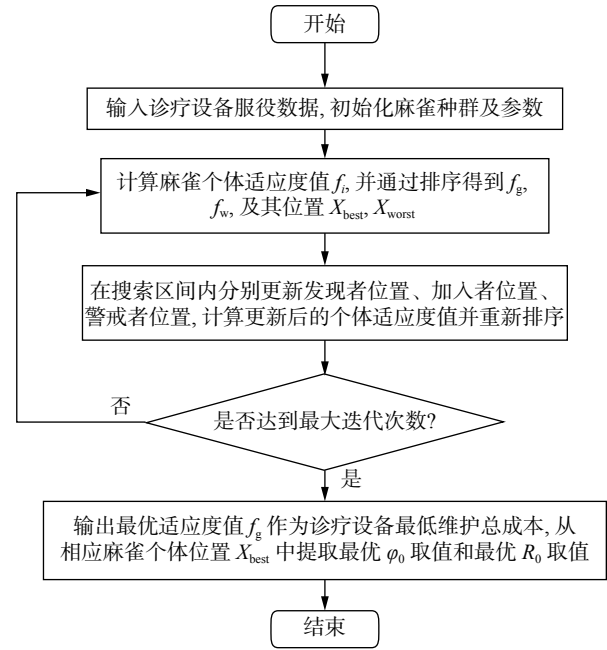


图 5 SSA 算法流程图
Fig.5 Flow chart of SSA algorithm

4 算例分析

为验证上述模型的有效性, 本文以某医院联影 UCT710 型号 CT 机的维护数据为例进行分析。根据假设 d, CT 机在基准病患流工况下的故障率函数为

$$l_0(t)=\frac{m}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1}$$

(27)

根据联影 UCT710 型号 CT 历史失效数据分析拟合, 得到威布尔分布形状参数 $m=2.5$, 尺度参数 $\eta=500$, 役龄回退因子 $\varepsilon_k=\frac{k}{3k+7}$ 、故障率递增因子 $\beta_k=\frac{12k+1}{10k+1}$ 。假设单次故障维修成本 $C_d=15000$, 设备单次预防性维护成本 $C_p=2000$, 可靠度利用价值 $C_r=6000$, 单位病人诊疗收益 $r=400$, 延迟维护基本惩罚成本 $C_y=800$, 故障停机用时与预防性维护停机时间均取 $T_p=1\text{ h}$, 在设备生命周期内随机生成初始维护点。

因素集 $U=\{\text{事故风险}u_1, \text{设备复杂性}u_2, \text{设备可替代性}u_3, \text{设备利用率}u_4\}$, 评价集 $V=\{\text{高}v_1, \text{较高}v_2, \text{中}v_3, \text{较低}v_4, \text{低}v_5\}$, 某时间点风险评价矩阵 $R=\begin{bmatrix}0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.5 & 0.2 & 0.2 & 0\end{bmatrix}$, 各因素权重 $A=[0.3, 0.2, 0.25, 0.25]$, 则由式 (13) 可得模糊综合评判结果 $B=[0.15, 0.505, 0.23, 0.095, 0.02]$, 取其中隶属值最高的 0.505 作为故障风险值 φ 。

4.1 算法求解比较

首先, 为了验证麻雀搜索算法在考虑病患流分布的医院诊疗设备预防性维护模型中的有效性和优越性, 将其与普遍应用在寻优问题上的粒子群算法 (PSO) 和鲸鱼算法 (WOA) 进行对比, 所有算法的共有参数保持一致, 种群规模设置为 50, 最大迭代次数设置为 1000。各算法的参数参照文献 [20] 设置, 如表 1 所示。表中: W 为惯性因子; C_1, C_2 为加速度常数; a, b 为系数。

表 1 算法参数设置
Tab.1 Algorithm parameter setting

算法	参数
SSA	$S_T=0.2, P_D=0.2, S_D=0.8$
PSO	$W=0.729, C_1=1.49445, C_2=1.49445$
WOA	$a=2, b=1$

比较结果如表 2 所示, 可知 SSA 算法与 WOA 算法求解结果相近, 且明显优于 PSO 算法所得结果。各算法迭代如图 6 所示, 可看出 PSO 算法收敛速度虽比 SSA 算法和 WOA 算法快, 在迭代到 50 次左右就达到了最优值, 但所得最优值相较于其他两个算法偏差较大。由此可知, PSO 算法在

此处陷入了局部最优，SSA 算法和 WOA 算法由于较强的全局寻优能力，避免了陷入局部最优。在迭代次数相同且收敛精度相差无几的情况下，SSA 算法的收敛速度明显优于 WOA 算法。

表 2 算法结果对比
Tab.2 Comparison of algorithm results

算法	φ_0	R_0	C
SSA	0.8545	0.7906	34573.6
WOA	0.8638	0.8024	34591.9
PSO	0.8755	0.7533	35893.1

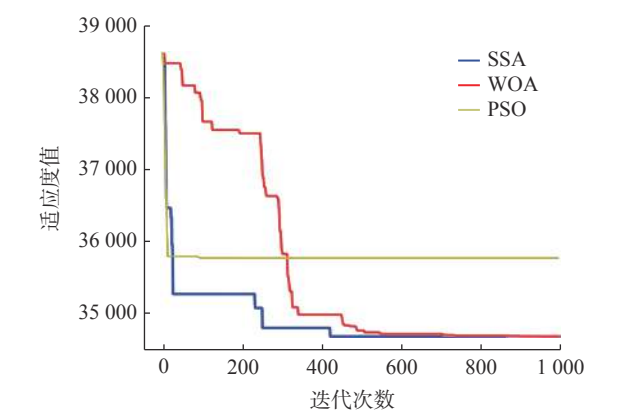


图 6 各算法迭代图
Fig.6 Algorithm iteration graph

4.2 结果分析

通过 SSA 算法寻优得到最佳故障风险阈值 $\varphi_0=0.8545$ ，最佳设备可靠度阈值 $R_0=0.7906$ ，通过数值仿真求解得到诊疗设备最优维护时间 t_k 等参数如表 3 所示。

表 3 SSA 算法求解结果
Tab.3 Solution results of SSA algorithm

t_k/h	C_{risk}	C_S	ΔC	C
1 647	4633.14	5297.57	8 761.49	18692.2

考虑病患流分布情况下诊疗设备故障率演化状况与未考虑病患流分布(即基准病患流)情况下有一定差异。如图 7 所示，不考虑病患流分布情况下诊疗设备维护时间点延后且维护间隔增加，停机维护成本固然较低，但未考虑病人流量因

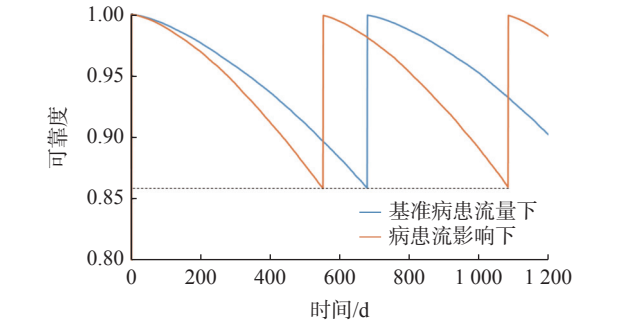


图 7 是否考虑病患流分布下设备可靠度变化
Fig.7 Change of equipment reliability considering patient flow distribution

素会带来较高的故障风险成本，其区别由是否考虑病患流影响下初始维护方案的不同来反映。将考虑病患流分布记为方案 1，基准病患流分布情况记为方案 2，对比结果如表 4 所示。

从表 4 中可看出，由于不考虑病患流的影响，方案 2 不产生变动成本，总停机维护成本较低。但忽略病患流量的影响会埋下更多安全隐患，从而产生更高的故障风险成本，导致总维护成本高，达到 40649.8 元，高于考虑病患流影响下的总成本。将方案 2 中维护时间点 639~1198 代入考虑病患流分布的诊疗设备维护模型中计算故障风险成本和停机维护成本，发现故障风险成本上升，产生惩罚成本 15286.5，总成本增加 13498.4。因此，方案 1 相较于方案 2 能更全面地考虑病患流的影响及其带来的故障风险。考虑病患流的影响在本文框架下有其合理性，建立诊疗设备可靠度和故障率模型时充分考虑病患流造成的影响，有利于更合理地制定设备维护策略。

4.3 敏感度分析

为探究考虑病患流分布的诊疗设备维护模型各参数和模型总维护成本之间的关系，需要分析模型对各参数的敏感度。本文采用只改变一个参数，其余参数固定不变的方法，来分析不同参数取值对总维护成本的影响。需分析参数有故障风险阈值 φ_0 、设备可靠度阈值 R_0 、单位病人平均诊疗收益 r 、可靠度利用价值 C_r 。参数变化幅度为-20%~20%，具体的变化情况如表 5 所示。

表 4 是否考虑病患流影响下初始维护方案比较
Tab.4 Comparison of initial maintenance schemes under the influence of patient flow

方案	维护时间点序列/h	平均维护间隔/h	维护时刻病患流因子 a_i	C_{risk}	C_S	ΔC	C
1	552~1084	425	1.19~1.12	9751.3	4836.5	19985.8	34573.6
2	639~1198	447	—	19627.2	23628.2	—	40649.8

表 5 参数灵敏度分析
Tab.5 Parameter sensitivity analysis

参数	变化幅度	C_{risk}	C_S	ΔC	C	总成本变动率/%
ϕ_0	—	4 633.14	5 297.57	8 761.49	18 692.20	—
	-20%	2 983.75	5 836.42	11 280.71	20 100.88	7.54
	-10%	3 168.44	4 738.14	10 837.64	18 744.22	0.28
	+10%	5 966.83	5 167.98	8 461.33	19 596.14	4.84
	+20%	6 807.55	5 311.69	8 267.85	20 387.09	8.79
R_0	-20%	5 883.42	4 772.38	8 340.79	18 996.59	1.63
	-10%	5 559.77	5 613.49	8 557.16	19 730.42	5.55
	+10%	3 567.27	5 536.89	10 030.77	19 134.93	2.37
	+20%	3 239.63	5 447.26	11 470.01	20 156.90	7.84
r	-20%	4 633.14	4 237.06	8 761.49	17 633.70	-5.66
	-10%	4 633.14	4 768.72	8 761.49	18 163.35	-2.83
	+10%	4 633.14	5 827.33	8 761.49	19 221.96	2.83
	+20%	4 633.14	6 259.09	8 761.49	19 653.72	5.14
C_r	-20%	4 633.14	5 297.57	7 584.42	17 515.13	-6.29
	-10%	4 633.14	5 297.57	8 411.03	18 341.74	-1.87
	+10%	4 633.14	5 297.57	9 199.56	19 130.27	2.34
	+20%	4 633.14	5 297.57	9 800.48	19 731.19	5.56

由表 5 结果分析可知:

a. 故障风险成本 C_{risk} 对故障风险阈值 ϕ_0 和设备可靠度阈值 R_0 较为敏感, 对单位病人平均诊疗收益 r 和可靠度利用价值 C_r 不敏感。当 ϕ_0 增大时, 对故障风险值 ϕ 的要求降低, 制定诊疗设备维护策略时可接受更高的故障风险, 从而带来更高的故障风险成本; 同时, 增大的故障风险阈值使维护过程中的维护变动更少, 从而带来变动成本 ΔC 下降。当 R_0 增大时, 对设备可靠度要求更高, 高可靠度使设备发生故障的风险降低, 进而使故障风险成本 C_{risk} 减小; 同时, 高可靠度需要更多次的维护来保障, 因此 R_0 增大导致变动成本 ΔC 上升。

b. 设备维护停机成本 C_S 对单位病人平均诊疗收益 r 最敏感, 对故障风险阈值 ϕ_0 和设备可靠度阈值 R_0 较为敏感, 对可靠度利用价值 C_r 不敏感。 r 增大直接影响设备停机维护时产生的病人诊疗费用损失, 从而增加了停机维护成本。 ϕ_0 和 R_0 的变动影响设备停机维护时间点和停机次数, 但停机时病人诊疗费用损失受该时段病患流密度, 即参数 a_i 影响, 因此, C_S 的变动趋势与 ϕ_0 和 R_0 无正负相关。

c. 设备维护变动成本 ΔC 对可靠度利用价值 C_r 较为敏感, 对单位病人平均诊疗收益 r 不敏感。 C_r 增大导致设备维护时间提前时产生更多的可靠度浪费, 从而造成维护变动成本增加。

d. 设备维护总成本 C 对故障风险阈值 ϕ_0 、设备可靠度阈值 R_0 最敏感, 这两项参数直接影响诊疗设备预防性维护周期内停机维护与预防性维护次数; 设备维护总成本 C 对可靠度利用价值 C_r 较为敏感, 因为在模型中参数 C_r 仅影响维护时间提前时的维护变动成本 ΔC , 而维护变动成本仅为维护总成本的构成部分, 因此对维护总成本的影响较小。

5 结 论

针对诊疗设备这类故障危害大、事故影响坏、故障维修费用和停机损失高昂的特殊设备, 将分别考虑安全性、经济性的故障风险方法和考虑设备连续运行状态的病患人流量因子纳入设备预防性维护模型, 克服已有模型对于设备故障和设备连续运行对于寿命的影响认识不足的问题。研究结果表明, 考量故障风险因素和病患人流量

因子使模型更贴合实际，根据模型制定的维护策略更加合理。本文所构建的基于病患流分布不均的预防性维护决策模型较为复杂、求解难度较高，故引入 SSA 算法工具辅助求解模型，算例分析结果表明，SSA 算法能有效提高模型求解速度与精确度。

为诊疗设备制定合理有效的维护策略，对保证诊疗活动安全性和提高其使用效率都具有重大意义。本文提出的基于病患流分布不均的预防性维护决策模型能够帮助医院诊疗设备在运行期间更好地兼顾高可靠度和经济性问题，有效降低设备维护成本，减少设备停机对正常诊疗活动的影响，对诊疗设备维修具有借鉴作用。

未来的研究可考虑多机系统下通过调度进一步降低维护停机成本，降低病人等待时间，使模型实用性更强。另外，鉴于医院诊疗设备是一个复杂的多部件系统，可进一步考虑系统内部件维修之间的关系，使模型更贴合实际。

参考文献：

[1] 韩浩. 医疗设备预防性维护在医疗设备管理中的应用价值分析 [J]. *中国设备工程*, 2021(7): 43–44.

[2] CARMIGNANI G. An integrated structural framework to cost-based FMECA: the priority-cost FMECA[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(4): 861–871.

[3] ABBASGHOLIZADEH RAHIMI S, JAMSHIDI A, AIT-KADI D, et al. Prioritization of failures in radiation therapy delivery[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(12): 1898 – 1903.

[4] HERNÁNDEZ-LÓPEZ L A, PIMENTEL-AGUILAR A B, ORTIZ-POSADAS M R. An index to prioritize the preventive maintenance of medical equipment[J]. *Health and Technology*, 2020, 10(2): 399–403.

[5] 张宁, 刘勤明, 叶春明, 等. 基于 NSGA-Ⅱ 的医疗设备预防性维护与病人调度联合优化 [J]. *重庆师范大学学报 (自然科学版)*, 2021, 38(1): 130–140.

[6] 沈南燕, 武星, 李静, 等. 自动化生产线中关键设备的预防性维护策略研究 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(21): 231–240.

[7] XIA T B, XI L F, LEE J, et al. Optimal CBPM policy

considering maintenance effects and environmental condition[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 56(9): 1181–1193.

[8] LI D W, ZHANG Z H, ZHONG Q H, et al. Performance deterioration modeling and optimal preventive maintenance strategy under scheduled servicing subject to mission time[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(4): 821–828.

[9] VILARINHO S, LOPES I, OLIVEIRA J A. Preventive maintenance decisions through maintenance optimization models: a case study[J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 11: 1170–1177.

[10] 甘婕, 曾建潮, 张晓红. 考虑性能可靠度约束的维修决策模型 [J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(4): 1079–1087.

[11] 盖京波, 孔耀. 有限使用时间内预防性维修策略优化 [J]. *兵工学报*, 2015, 36(11): 2164–2172.

[12] 汤乐成, 刘勤明, 叶春明, 等. 考虑批量生产的设备视情维护策略优化研究 [J]. *上海理工大学学报*, 2021, 43(3): 296–302.

[13] 张国龙, 石景岚, 方远, 等. 基于环境应力数据的使用可靠性预测方法研究 [J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2021, 39(4): 68–71.

[14] 梅嘉健, 刘勤明, 吴肇晟. 基于拆卸序列的多部件设备机会维护策略研究 [J]. *计算机应用研究*, 2021, 38(12): 3703–3708.

[15] 黄征. 可修系统维修的仿真分析 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.

[16] 陈嘉倩, 刘勤明, 叶春明, 等. 基于故障风险的医院诊疗设备预防性机会维修策略研究 [J]. *工业工程与管理*, 2021, 26(5): 51–58.

[17] 项伟, 许健, 董芳, 等. 基于模糊数学的甘薯食用品质感官评价模型 [J]. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(6): 1624–1634.

[18] 廖雯竹, 潘尔顺, 奚立峰. 基于设备可靠性的动态预防维护策略 [J]. *上海交通大学学报*, 2009, 43(8): 1332–1336.

[19] 刘丽娜, 南新元, 石跃飞. 改进麻雀搜索算法求解作业车间调度问题 [J]. *计算机应用研究*, 2021, 38(12): 3634–3639.

[20] 付华, 刘昊. 多策略融合的改进麻雀搜索算法及其应用 [J]. *控制与决策*, 2022, 37(1): 87–96.

(编辑：丁红艺)