

基于 NSGA-II 的医疗设备预防性维护与病人调度联合优化*

张 宁¹, 刘勤明¹, 叶春明¹, 张震宇¹, 董 明²

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 上海交通大学 安泰经济与管理学院, 上海 200240)

摘要:【目的】针对病人进行核磁共振成像预约检查过程中出现的调度与设备维护计划相互影响的问题,提出一种联合优化模型,研究对象是单机系统,多位病人等候进行检查。【方法】考虑到设备失效服从威布尔分布,设备具有退化效应,引入役龄递减因子、失效率递增因子、维护时间递增因子和维护费用递增因子对设备的劣化过程做了模拟,构建了合适的维护方案。接着考虑到病人就诊过程中设备必须保持足够的可靠度,保证病人就诊检查全过程的安全性,制定了一种提前式预防性维护方案。【结果】以总成本最低、总延误时间最少、总就诊时间最少为目标,采用 NSGA-II 算法求得 Pareto 最优解,采用层次分析法使医院的预约系统能够根据实际情况排布出合适的调度方案,有效协调病人就诊调度与设备维护计划。【结论】通过实际算例证明了所提出的联合优化模型的有效性。

关键词:医院诊疗设备;预防性维护;多目标优化;NSGA-II

中图分类号:O224;T15

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2021)01-0130-11

在医院日常的门诊中,常常会有病人需要进行多个项目的检测;而盲目无序无策略的排队就诊往往导致医疗资源浪费现象的产生;有些科室人员过分密集,有些科室又存在不必要的空闲。针对这一现象,采取科学有效的调度措施是十分必要的。此外,考虑到医院的经济效益以及从对病人负责的角度出发,需要对医疗设备进行定期的维护,以保证医疗设备正常运行,延长它们的使用寿命,特别是对于那些贵重的或是对病人治疗能起到关键作用的医疗设备,更加应该保证设备的安全长久运行。

目前有部分学者提出,应将维护和调度综合起来考虑,进行联合优化,这样能够解决二者单独考虑时顾此失彼的不足。Cassady 和 Kutanoğlu^[1]合作建立了以总期望加权工作完成时间最小为优化目标的单台设备预防维护和生产调度联合优化模型,并且对比了联合优化与单独优化的效果,说明了联合优化模型的有效性。Wang 等人^[2]优化了预防维护计划和生产调度,采用分支定界法对联合优化问题进行求解。Mosheiov 等人^[3-4]针对单机系统,假设工件不可中断,提出了各种优化目标。例如最小化完成时间,在设计求解方案时,有的采用了各类启发式算法,计算并证明了误差边界;有的设计了分支定界算法进行求解。陶辛阳等人^[5]设计了健康指数来反应设备的可靠度情况,以单机生产设备为研究对象,引入役龄递减因子和故障率递增因子,在生产调度中提出多个优化目标,以实现多目标全局决策优化。崔伟伟等人^[6]针对单机系统,提出一种综合考虑生产调度和设备维护的联合决策模型,设计了遗传算法对模型进行优化求解,并与枚举算法相比较,并证明了该模型的有效性。蒋志高等人^[7]考虑了设备周期维护以及共建加工的学习效应,提出了虚拟维护,建立了两阶段模型求解目标函数为最小化完工时间的单机调度问题。李志颖等人^[8]对于产能有限的批量问题,建立了以单机系统为研究对象的多目标联合优化模型,利用改进的差分进化算法进行求解并验证了模型的有效性。汪洋^[9]考虑了机器的老化效应,提出了一种基于负载的柔性维护策略,设计了一种包含两阶段的解决程序,采用了进化算法和粒子群启发式算法分别进行求解,为车间调度提供了一种解决方案。

从以上分析可以看出,生产调度和维护联合优化往往能够取得比单独优化更好的效益。因此在医疗行业中

* 收稿日期:2020-11-12 修回日期:2020-12-16 网络出版时间:2021-03-11 16:30

资助项目:国家自然科学基金(No. 71632008;No. 71840003);上海市自然科学基金(No. 19ZR1435600);教育部人文社会科学研究规划基金(No. 20YJAZH068);2020年上海理工大学大学生创新创业训练计划(No. XJ2020154);上海理工大学科技发展项目(No. 2020KJFZ038)

第一作者简介:张宁,男,研究方向为设备维护与决策,E-mail: 672047460@163.com;通信作者:刘勤明,男,副教授,博士,E-mail: lqm0531@163.com

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20210310.1429.022.html

也可以借鉴关于生产线的研究思想,进行医疗设备维护和病人就诊调度的联合优化,这样能使得医疗设备使用寿命和稳定性大大增加,病人就诊时间缩短,享受更好的医疗服务,从而能给病人带来更好的体验。然而目前国内对于医疗设备维护的研究还较少。杨旭^[10]从经济角度入手,分析了医疗设备故障停机引发损失,并制定了符合实际的维修策略。赵明信^[11]分析了医用 X 射线诊断设备的重要功能单元,采取了针对性的维护策略。现实中,医疗器械往往很少进行维护,大多数情况下都是一次性使用到服役期满或是出现故障进行维修或更换。因此,十分有必要针对医疗设备的使用特点提出针对性的维护策略。

在医疗背景下进行生产调度和维护联合优化与普通生产线上并不完全相同。首先,应该考虑到在病人就诊期间,医疗设备必须具有高可靠度,以防病人就诊期间出现无法弥补的意外,耽误治疗。而在生产线上,往往无需考虑这一点,即使设备加工出次品,所造成的经济损失也在可控范围内。其次,在有病人等候治疗时,应该尽量减少因排队或是器械故障带来的等候时间。因此,不能简单地把医疗领域的问题和生产线上的情形混为一谈。近些年来关于病人排队及预约调度方面的研究逐渐兴起,潘兴薇等人^[12]针对医院挂号预约系统存在的问题,设计了 3 种预约调度规则,通过运用遗传算法进行求解,算例证明提出的方法能有效优化医院现有的调度规则,从而缩短患者等待时间和医生加班时间。朱黎敏等人^[13]考虑了 3 类病人的实际需求,通过建立 MDP 模型探讨了病人的最优调度策略。秦岚等人^[14]分析了医院现有的两种排队策略,建立了病人满意度模型,并且对这两种排队策略进行分析,结果得出应用预约策略对改善病人等待满意度具有良好效果。

综上所述,本文通过对医院患者就诊情况的研究,提出了医疗设备维护和病人调度联合优化的问题,在考虑设备预防性维护和小修的情况下对病人的调度方案做了分析,采用 NSGA-II 算法实现了对多目标问题的求解^[15-17],并且利用层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 进行科学打分,为医院的实际决策方案提供了支持。最后,通过算例证明了所提出的优化策略相较于大多数医院采用的 FCFS (First customer first service) 规则具有明显的优势,并且在实际操作中具有较高的实用性。

1 问题描述

在医院里,病人常常需要利用核磁共振成像 (MRI) 做全身影像诊断,以帮助医生准确掌握身体内的病症。MRI 是一类重要的诊疗设备,在医院放射科室有着广泛的应用。在许多大型医院,除去急诊情况,病人往往需要提前预约才能进行 MRI 的检测,无法像日常门诊一样做到随到随治。有部分医院开启了网上预约,病人可以在网上提交检测申请,预约一个大致的检测时间,次日排队就诊。这种预约模式并不能针对门诊排队问题产生合适的解决方案,由于预约后,患者集中前往就诊,不可避免的会产生在医院的排队就诊现象。同时,医疗设备大多进行预防性维护来保障设备的安全运行,MRI 设备由于本身较为贵重和精密,更需要进行预防性维护来保证医院和患者的利益,由此更会延长患者的等待时间,影响到排队患者的就诊体验。因此,设计一种合理的调度方案兼顾患者的就诊调度以及预防性维护的排布是十分必要的。

本文中的问题可以描述为:有 n 位患者在医院的预约系统中预约需要在一台 MRI 设备上接受检查,每位患者设定了自己的预约检查时间,由预约系统在截止时间后收集完当日预约的所有病人信息后将预约结果反馈给病人,病人由此得知实际的就诊时间。所有病人的检查活动都可以从时间轴的 0 时刻开始,病人的检查活动无法因各种因素中断,否则就会出现意料之外的事故。患者 p_i 所需的检查时间为 t_p 。设备故障服从两参数威布尔分布。设备接近或达到小修阈值时,判定进行小修,每次小修的费用固定,小修不受预防性维护对可靠度的影响,只跟上一次的小修时间有关,同时小修不影响退化状态,也不会中断病人的检查。此外,为了保证医疗设备的稳定性,必须定期对医疗设备进行预防性维护。预防性维护是不完美维护,考虑了设备的退化效应,随着维护次数的逐渐增加,设备役龄递减,失效率递增,同时设备的预防性维护费用和预防性维护时间递增。设备进行预防性维护期间需要停机,在此期间无法为病人提供检查服务。考虑现实情况,根据设备当前运行时的可靠度,判断下一位病人进行检查期间设备是否会低于可靠度阈值,若会则提前进行维护,待维护结束后再继续进行病人的检查。

2 符号说明

本文对所使用的变量及对应的符号作如下约定。 Z :总成本; Z_s :小修费用; N_s :小修次数; t_s :小修时间; a_i :预防维护周期内役龄递减因子; b_i :第 i 次预防维护周期内失效率递增因子; c :预防性维护时间递增因子; d :预防性

维护费用递增因子; T_i : 第 i 次预防维护周期; μ_i : 第 i 次预防性维护费用; θ_i : 第 i 次预防性维护时间; N_p : 预防性维护次数; R_f : 可靠度阈值; R_s : 小修阈值; $X_{i,k,p}$ 为 0-1 型变量, 当 $X_{i,k,p}$ 值为 1 时表示第 i 次预防性维护周期内第 k 个就诊的病人 p , 值为 0 时表示其他情况; Y_k 为 0-1 型变量, 当 Y_k 值为 1 时表示预防性维护在第 k 个病人后进行, 值为 0 时表示其他情况; t_p : 病人 p 的治疗时间; t_{pi} : 病人 p 预约治疗开始时间; t_{pb} : 病人 p 实际治疗开始时间; t_{pd} : 病人 p 延误就诊的时间; T_D : 总延误时间; T_{total} : 全部患者总治疗时间; Z_c : 惩罚成本因子。

3 数学模型

3.1 维护模型

假设备故障率服从威布尔分布, 失效率函数为: $\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}$ 。从 0 时刻开始, 直到设备有效役龄为 t 时, 设备的可靠度函数为: $R(t) = 1 - \int_0^t \lambda(t) dt = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right]$ 。

为了考虑设备维护的退化效应, 设置了预防维护周期内役龄递减因子和失效率递增因子, 随着预防性维护次数增加, 设备役龄受到设备役龄递减因子影响而递减: $\lambda_{i+1} = b_i \lambda_i$, $b_i \in (1, +\infty)$ 。失效率受到失效率递增因子影响而递增, 在每次预防性维护过后初始失效率变为 $\lambda(a_i T_i)$ 。因此, 得到设备的失效率函数为: $\lambda_{i+1}(t) = b_i \lambda_i(t + a_i T_i)$, $a_i \in (0, 1)$, $b_i \in (1, +\infty)$ 。将此失效率函数代入可靠度函数中, 得到在第 $i+1$ 次预防维护周期的 t 时刻设备的可靠度为: $R_{i+1}(t) = \exp \left[- \int_0^t b_i \lambda_i(t' + a_i T_i) dt' \right]$ 。第 $i+1$ 次预防维护周期 T_{i+1} 可通过 R_f 推算出: $R_f = \exp \left[- \int_0^{T_{i+1}} b_i \lambda_i(t' + a_i T_i) dt' \right]$ 以及 $\ln R_f = - \int_0^{T_{i+1}} b_i \lambda_i(t' + a_i T_i) dt'$ 。变量 $X_{i,k,p}$ 用来确定病人就诊的次序位置, 其中 i 表示预防性维护周期, k 表示维护周期内的就诊位次, p 为病人编号。则第 i 次维护周期内第 k 个病人就诊后设备的役龄为: $W_{ik} = \sum_{n=1}^k x_{i,n,p} t_{p,n}$ 。

在病人就诊过程中, 医疗设备的可靠度需要时刻保持在阈值之上, 当医疗设备的可靠度低于阈值时, 会存在相当大的安全隐患, 对病人的就诊产生不必要的麻烦, 甚至会导致严重的医疗事故。并且由于 MRI 检测的特殊性, 无法在病人就诊过程中中断病人的检查。为此, 本文提出一种提前式预防性维护, 即在医疗设备的可靠度降低至阈值前, 对于当前位次的就诊病人采取延后就诊的策略, 具体的延后时间由预防性维护所需时间决定。这种提前式预防性维护能够确保每一位病人就诊全过程中医疗设备都保持足够的可靠度也即安全性, 大大降低了病人就诊时医疗设备发生故障的风险。假设当 t 时刻设备达到可靠度阈值时, 按调度顺序就诊的为第 k 个病人, 则将此病人的就诊时间推迟至设备维护结束后, 以确保就诊期间设备保持足够的可靠度:

$$Y_k = \begin{cases} 1, & W_{ik} > t \\ 0, & W_{ik} \leq t \end{cases}。$$

设备维护是一种退化的过程, 引入时间递增因子 c_i 和费用递增因子 d_i 。随着维护次数的增加, 进行一次预防性维护花费的时间和费用均越来越多, 即: $\theta_{i+1} = c_i \theta_i$, $\mu_{i+1} = d_i \mu_i$ 。其中: $c_i > 1$, $d_i > 1$ 。

医疗设备在安排进行预防性维护后, 能够避免产生临时中断治疗的故障; 同时由于设备本身的复杂性以及多部件的联动性, 仍会不可避免的会产生某些小故障; 但这些故障通常不会影响病人的治疗过程, 只需要略微修复即可。因此, 定义这类维修为小修, 设定小修阈值为 R_s 。

3.2 调度计划

在调度计划中, 考虑了现有国内预约系统的特点, 患者可以自由选择医院提供的空闲时间, 预约往往在前一日提前进行, 具体就诊则安排在预约日, 也即次日及以后。在国内现有的预约系统基础上, 本文提出一种新的预约模式: 患者在预约时可以选取次日就诊的处于工作状态的任意时间, 在预约期限截止后, 由预约系统根据设定的维护规则、调度规则及医院和患者之间的共同利益设计排定合理的就诊顺序, 这种预约模式能够确保患者的就诊计划和医疗设备的维护计划提前排定, 给患者以及医院设备护理科室充足的响应时间, 比起动态调度稍有不足, 但是充分考虑了资源的限制, 极大地协调了患者对适宜就诊时间的需求以及医院对医疗设备护理的提前规划。

在调度模型中, 假设所有病人一经预约均需要接受就诊, 每位患者接受的检查之间是相互独立的, 可以进行

先后次序的调整: $\sum_{n=1}^k x_{i,n,p} = 1, \sum_{l=1}^p x_{i,k,l} = 1$ 。

病人 p 就诊的时刻由该病人就诊顺序之前的病人的总就诊时间和医疗设备预防性维护时间决定。假设病人 p 就诊的位次为第 k 位,在病人就诊前已经进行了 i 次预防性维护,则病人 p 在经过系统调度后排定的具体就诊开始时间为: $t_{pl} = \sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^k X_{m,n,p} t_p + \sum_{m=1}^i \theta_m - t_p$ 。

由于病人 p 在经过系统调度后排定的具体就诊开始时间与预约时的理想预约时间存在偏差,用 t_{pl} 来表示这一差值并且定义为延误就诊时间,因此由于各种原因病人 p 延误就诊的时间为: $t_{pl} = \sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^k X_{m,n,p} t_p + \sum_{m=1}^i \theta_m - t_p - t_{pa}$,

所有病人的总延误时间为: $T_D = \sum_{l=1}^p t_{ld} = \sum_{l=1}^p \left(\sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^k X_{m,n,l} t_l + \sum_{m=1}^i \theta_m - t_l - t_{la} \right)$ 。

此外,还要考虑所有病人就诊完成总时间尽量短,不拖延治疗。就诊完成总时间由 3 部分组成:病人治疗时间、预防性维护时间、设备小修时间: $T_{\text{total}} = \sum_{l=1}^p t_l + \sum_{m=1}^{N_p} \theta_m + N_s \times t_s$ 。

3.3 多目标联合优化模型

由于患者的预约就诊时间与预约系统排定的实际就诊时间之间往往存在差异,会产生延误就诊时间,经过实际观察可以发现,在国内各大门诊的排队中,普遍存在着因为排队队列过长而放弃就诊的现象。同样的现象也会发生在本文设计的预约系统中,如果经由系统调度产生的实际就诊时间与患者心理的预约就诊时间相差过大,往往会导致出现爽约的现象,针对这种现象,提出惩罚成本。该惩罚成本因子 Z_c 包括因患者的心理落差而产生的满意度波动进而导致爽约以及因为患者爽约而造成的医疗设备空运行的惩罚,由于患者的爽约与否在调度顺序排定时不得而知,本文假定患者爽约率与就诊延误时间线性相关,因而该惩罚成本与患者就诊延误时间线性相关。医院的总成本包括预防性维护成本、小修成本以及涉及患者满意度及设备空运行的惩罚成本为:

$$Z = N_s \times Z_s + \sum_{i=1}^{N_p} \mu_i + Z_c \times \sum_{l=1}^p \left(\sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^k X_{m,n,l} t_l + \sum_{m=1}^i \theta_m - t_l - t_{la} \right)。$$

从医院角度看,追求的是为患者提供最及时的治疗服务以及成本最小化,而从患者角度看,追求的是最好的治疗体验。因此,本问题中有 3 个要实现的目标,分别为总成本尽量小、病人延误就诊时间尽量小以及所有病人就诊完成总时间尽量小。对以上 3 个目标进行整合:

$$f(1) = \min Z = \min \left(N_s \times Z_s + \sum_{i=1}^{N_p} \mu_i + Z_c \times \sum_{l=1}^p \left(\sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^k X_{m,n,l} t_l + \sum_{m=1}^i \theta_m - t_l - t_{la} \right) \right),$$

$$f(2) = \min T_D = \min \left(\sum_{l=1}^p \left(\sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^k X_{m,n,l} t_l + \sum_{m=1}^i \theta_m - t_l - t_{la} \right) \right),$$

$$f(3) = \min T_{\text{total}} = \min \left(\sum_{l=1}^p t_l + \sum_{m=1}^{N_p} \theta_m + N_s \times t_s \right)。$$

4 模型求解

4.1 编码与初始种群

根据该调度问题的单设备、多病人的特点,编码方式采用基于病人就诊顺序的编码, n 表示病人的数量,染色体序列的每一个元素是 $1 \sim n$ 之间的一个随机数,该数字在序列中的位次表示该位病人的实际就诊位次。初始种群的产生采用随机生成的方式生成。因为子代种群是基于初始种群经过选择交叉变异得到的,初始种群个体越多就越容易找到最优解,但是种群个体增大同时也会影响算法的收敛速度,因此,选择合适的初始种群大小,这样既可以提高第一代种群的质量,也能加速结果靠近最优解^[18]。

4.2 快速非支配排序

首先设定两个变量, N_a 用来表示处于支配地位解 a 的数量, S_a 用来表示处于支配地位解 a 所支配的解的集合,初始化分层等级 rank1,判定种群中所有 $N_a = 0$ 的个体并且设定这些个体为 rank1,遍历被该层个体支配的个体 S_a 并且将支配计数减 1,寻找此时个体的支配计数 $N_a = 0$ 的个体,并且把这些个体存入新的一个集合,作为

分层等级 rank2 的个体。如此执行下去,直到所有个体均得到了非支配排序等级。

4.3 拥挤距离

在 NSGA-II 算法中,采用了拥挤比较的方法代替了原先 NSGA 算法中的共享函数方法,这种方法拥有较好的复杂度,同时不需要自定义维持种群多样性的参数。拥挤距离表示的是同一分层内的个体即求得的目标函数值点的聚集程度,根据每一个目标函数值点找到并计算出该点两侧相邻目标函数值点的平均距离,对于处于最大值与最小值边界的解,指定它们的拥挤距离为无穷大,对于其他解,采用如下的拥挤距离计算公式:

$$d_c = \sum_{k=1}^m \frac{|f_k^{i+1} - f_k^{i-1}|}{f_k^{\max} - f_k^{\min}},$$

其中: d_c 表示拥挤距离, m 表示个体 i 的第 m 个目标函数值, f_k^{i+1} 表示个体 $i+1$ 在第 k 个目标函数上的值, f_k^{i-1} 表示个体 $i-1$ 在第 k 个目标函数上的值, $f_k^{\max}$ 和 $f_k^{\min}$ 是第 m 个目标函数的最大和最小值。

4.4 选择策略

选择策略的作用是从种群中选取优秀个体进行下一步的交叉变异操作,产生新一代的子代种群,本算法采用二元锦标赛选择策略,选择标准是基于拥挤比较算子以及非支配排序等级。拥挤比较算子在算法中可以将选择过程导向均匀分布的 Pareto 最优前沿面,在两个不同支配等级排名的解中,选取拥有较低排名的解,若两个解属于同一 Pareto 前沿面,选取处于非拥挤区域的解。

4.5 交叉和变异操作

选择合适的交叉算子决定了 NSGA-II 算法的全局搜索能力。本文采取 PMX(部分绘制交叉)交叉操作。该操作的步骤为:首先,对于某一对染色体,随机选取其中一条染色体中某个片段的几个基因,同时选择另一条染色体中相同位置的片段,交换这两组基因。然后进行冲突检测,在这一对选取交换的基因中找到其中每个基因的映射关系,即染色体的配对关系,检查新生成的子代染色体中存在重复的基因,根据之前确定的映射关系将这些冲突的基因转换为对应的映射。变异能够增加解的多样性并避免陷入局部最优中。在本文中,设定以预定的概率 P_M 改变所选染色体的基因值。

4.6 算法基本流程

步骤 1:初始化生成父代种群 P_t 的规模为 N ,设 $t=0$ 。

步骤 2:进行快速非支配等级排序。

步骤 3:对父代种群进行选择交叉变异操作生成子代种群 Q_t 。

步骤 4:合并 P_t 和 Q_t 生成新种群 R_t ,进行快速非支配排序及拥挤距离计算。

步骤 5:使用精英策略从 R_t 中选取 N 个优良个体作为新一代的父代种群 P_{t+1} 。

步骤 6:对新父代种群进行选择交叉变异操作,生成子代种群 Q_{t+1} 。

步骤 7:判定迭代次数是否达到上限,若达到则算法结束,否则 $g=g+1$,进入步骤 4。

5 实验仿真

5.1 算例分析

通过上述算法对建模的设备维护病人调度联合优化问题进行了编程。设定小修费用 $Z_s=200$,单位:元,小修时间 $t_s=10$,单位:min,在第 i 次预防性维护周期中,役龄递减因子 $a=0.05$,失效率递增因子 $b_i=1+0.02 \times (N_p-1)$,时间递增因子 $c=1.05$,费用递增因子 $d=1.05$,首次预防性维护费用 $\mu_1=800$,首次预防性维护时间 $\theta_1=30$,预防性维护可靠度阈值 $R_f=0.85$,小修阈值 $R_s=0.8$,威布尔分布形状参数 $\beta=1.5$,尺度参数 $\eta=400$,惩罚成本因子 $Z_c=0.5$ 。病人的治疗时间 t_p 和预约治疗开始时间 t_{pa} 如表 1 所示。

表 1 病人的治疗时间 t_p 和预约治疗开始时间 t_{pa}
Tab. 1 Patient's treatment time t_p and appointment start time t_{pa}

t_{pa}/min	0	20	30	50	50	60	90	90	120	150	150	180
t_p/min	24	32	20	35	20	12	42	18	24	14	34	14

在 Matlab R2018b 版本上进行仿真,设定种群数量 $NP=50$,迭代次数 $g=200$,交叉概率 $P_c=0.8$,变异概率 $P_m=0.3$,目标函数为病人检查延误时间、设备维护总费用和病人检查总时间。程序运行结束后得到 15 个

Pareto 最优解, Pareto 最优解分布图如图 1 所示, 每个最优解对应方案如图 2~16 所示。类似于甘特图, 图 2~16 展示了在单机情形下每项任务(数字 1~12 代表病人的编号, N_p 代表预防性维护, N_s 代表小修, 且分别用不同颜色区分)的进行时间段, 横轴表示时间, 单位为 min。

由于该问题一共有 3 个目标函数, 对应的最优解分布图为 3 维空间, 对应的 3 个维度分别为总延误时间、总成本以及就诊完成总时间。由于该问题 3 个目标之间存在冲突, 每一个目标函数值的变动必然引起其他目标函数值的变动, 即在改进任何目标函数的同时, 必然会削弱至少一个其他目标函数, 三者无法同时取得最优, 故最优解呈现为一个 Pareto 解集, 解集中均为该问题的最优解, 并且所有解之间无法比较优劣。

在该 Pareto 最优解分布图中可以看出, 最优解在 Pareto 前沿面中分布较为均匀, 个别解相对较为分散, 没有出现最优解拥挤于一处的现象, 表明所得到的结果较为良好合理。图 17~19 分别给出了 3 个目标函数值即总成本、总延误时间和就诊总时间的进化曲线, 图中时间单位为 min, 成本单位为元。从曲线中可以看出迭代过程中目标函数值收敛性良好, 且在迭代 140 代后逐渐趋于稳定。

在表 2 中给出了各个 Pareto 最优解所对应的方案的 3 个目标函数值, 在医院预约系统实际安排就诊调度方案时, 可以从医院的实际利益或者病人的实际需求角度出发, 针对 3 个目标函数分别设置不同的权重值, 计算各组方案的整体效益, 从而做出决策。与单独设置权重将问题转化为单目标问题, 利用传统的遗传算法求解相比, 利用多目标遗传算法 NSGA-II 求解更具有优势, 原因在于利用遗传算法求解只能得到一种方案, 而多目标问题中, 每个目标值之间往往是相互制约的关系, 如果其中某一目标达到最优必然会会影响其他目标的值使其无法达到最优, 优化算法往往能协调多个目标之间的关系, 求得较为优秀的 Pareto 解集, 在最终决策中只需要根据实际需求灵活增加判断条件, 从得到的 Pareto 解集中得到理想的最优解即可。

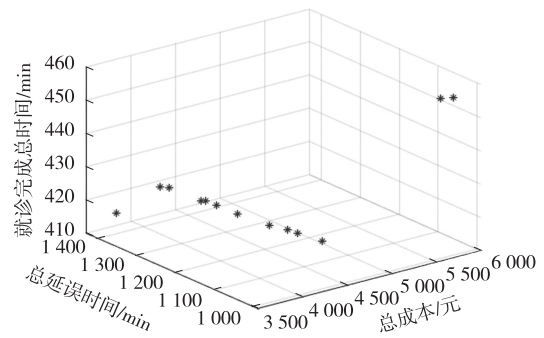


图 1 Pareto 最优解分布图

Fig. 1 Pareto optimal solution distribution

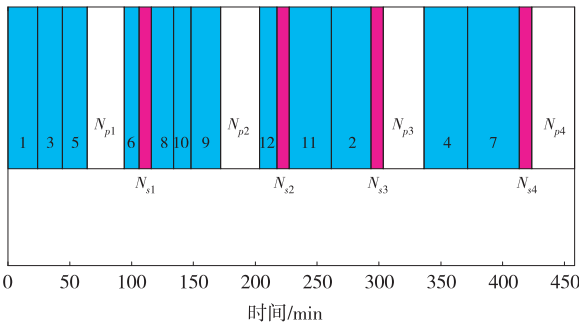


图 2 方案 1 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 2 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 1

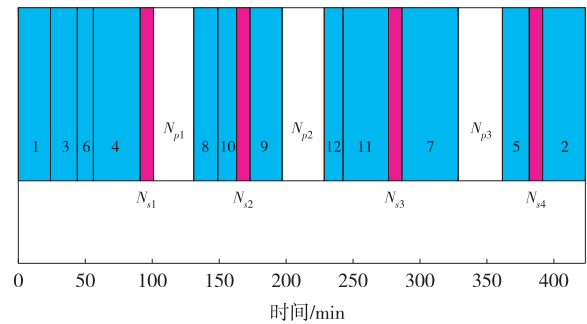


图 3 方案 2 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 3 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 2

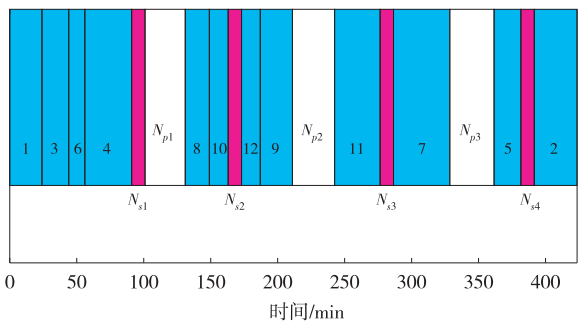


图 4 方案 3 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 4 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 3

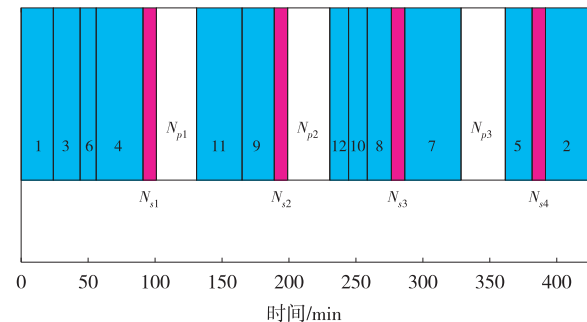


图 5 方案 4 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 5 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 4

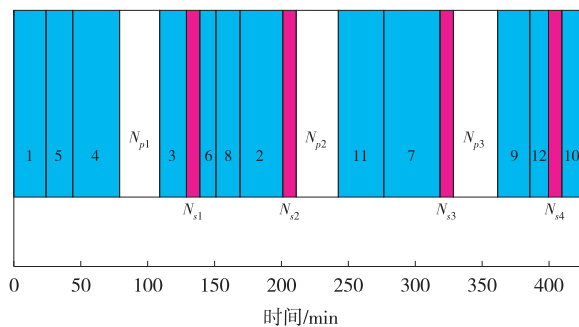


图 6 方案 5 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 6 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 5

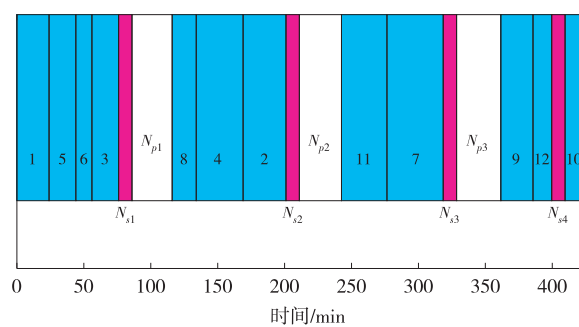


图 7 方案 6 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 7 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 6

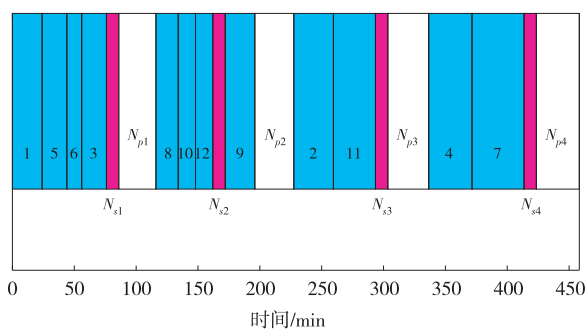


图 8 方案 7 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 8 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 7

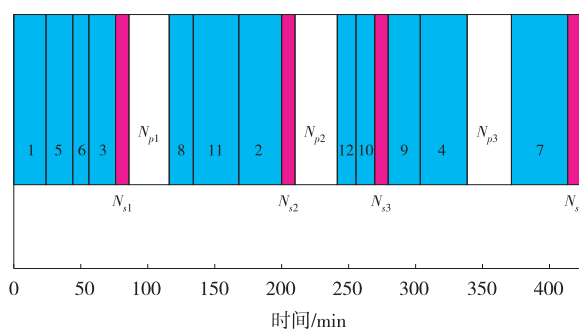


图 9 方案 8 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 9 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 8

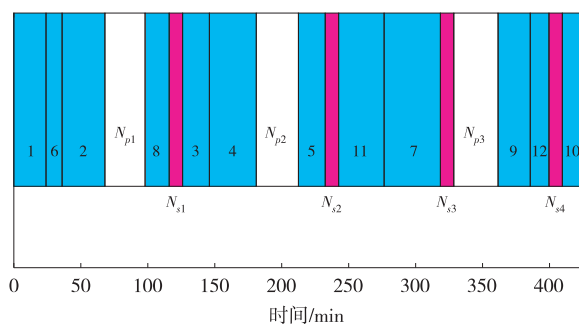


图 10 方案 9 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 10 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 9

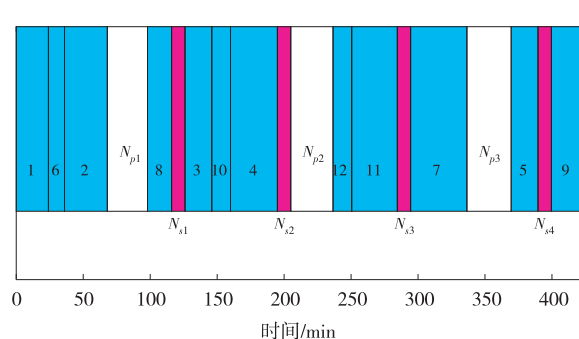


图 11 方案 10 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 11 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 10

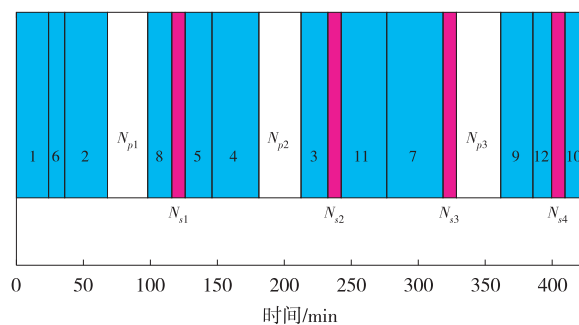


图 12 方案 11 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 12 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 11

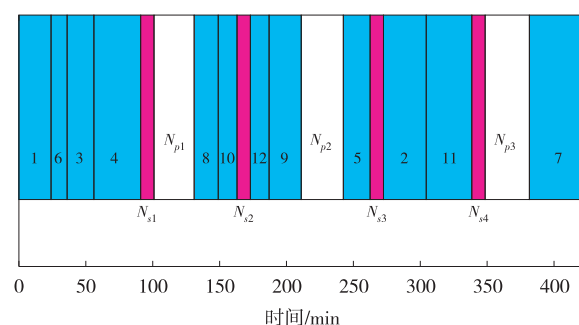


图 13 方案 12 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 13 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 12

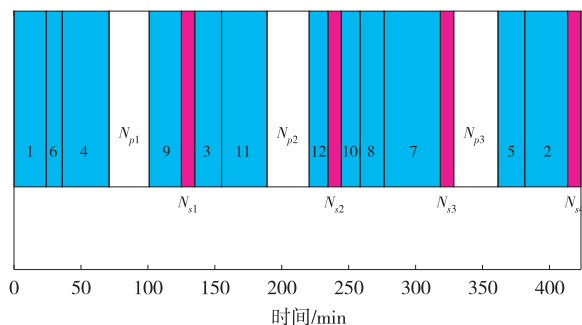


图 14 方案 13 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 14 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 13

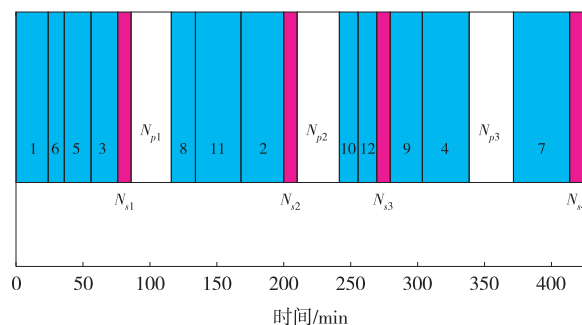


图 15 方案 14 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 15 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 14

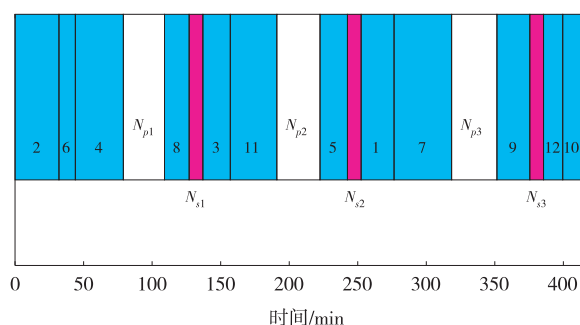


图 16 方案 15 就诊调度以及病人检查总时间

Fig. 16 Schedule of treatment and total time of patient examination in scheme 15

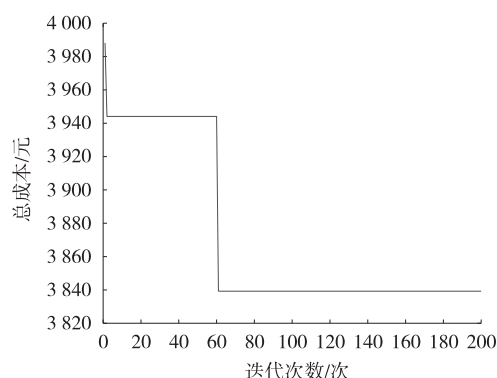


图 17 总成本进化曲线

Fig. 17 Evolution curve of total cost

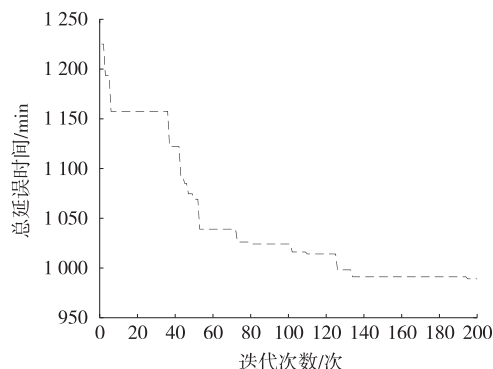


图 18 总延误时间进化曲线

Fig. 18 Evolution curve of total delay time

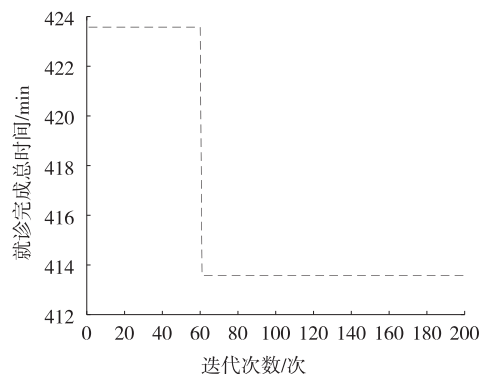


图 19 就诊总时间进化曲线

Fig. 19 Evolution curve of the total visiting time

5.2 AHP 决策过程

AHP 是一种定性和定量相结合的、系统的、层次化的分析方法。这种方法能针对问题本身复杂的特性,对于其中各种因素的相互关系探寻本质,在对一些难以完全定量的复杂系统内在关系研究的基础上,利用各种因素间已知的较少的定量信息使决策过程更显科学化和数学化,从而为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题提供简便的决策方法。在本文的下一步决策过程中,将运用 AHP 对上文通过 NSGA-II 算法得到的 Pareto 解集进行筛选,找出符合相应要求的最优解。

5.2.1 确立判断矩阵 在确定各层次各因素之间的权重时,先对各因素之间进行两两比较,按照重要性对比对各个因素分别赋予 1~9 的标度,判断矩阵的元素 a_{ij} 表示的是第 i 个因素相对于第 j 个因素的比较结果,得到的判

断矩阵为 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 6 \\ \frac{1}{3} & 1 & 4 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{4} & 1 \end{bmatrix}$, 其中该矩阵按列从左至右分别对应 $f(1), f(2), f(3)$, 按行从上到下分别对应 $f(1), f(2), f(3)$ 。

计算得到的一致性指标 $CI = 0.0268, RI = 0.58$, 显然 $CR = \frac{CI}{RI} = 0.046 < 0.1$, 所以通过一致性检验。同时, 计算得到的权重矢量为 $\mathbf{W} = (0.644 \ 1 \ 0.270 \ 6 \ 0.085 \ 3)^T$ 。

5.2.2 确立决策矩阵 由于多目标问题中各个目标的值没有统一的量纲, 无法直接进行比较, 故将每个目标的值做统一量纲处理, 设决策矩阵的元素取值为: $b_{ij} = \frac{a_j^{\max} - a_{ij}}{a_j^{\max} - a_j^{\min}}$, 式中 $a_j^{\max}$ 为目标函数 j 在所有方案中的最大值, a_{ij} 为目标函数 j 在方案 i 中的值, $a_j^{\min}$ 为目标函数 j 在所有方案中的最小值, 最终得到决策矩阵 $\mathbf{B} = (b_{ij})_{p \times q}$ 。

表 2 各方案的目标函数值

Tab. 2 Objective function values of each scheme

方案编号	总成本/元	总延误时间/min	总就诊时间/min
1	5 591.581	998.650	458.304
2	4 201.201	1 120.650	423.575
3	4 257.485	1 086.150	423.575
4	4 147.597	1 244.150	423.575
5	4 092.843	1 353.725	423.575
6	4 139.148	1 270.725	423.575
7	5 694.170	989.150	458.304
8	4 266.357	1 061.575	423.575
9	4 039.239	1 364.225	423.575
10	4 154.896	1 190.650	423.575
11	4 039.239	1 364.225	423.575
12	4 322.641	1 011.075	423.575
13	4 101.292	1 273.150	423.575
14	4 266.357	1 061.575	423.575
15	3 839.239	1 431.225	413.575

5.2.3 综合决策 计算 $D = \mathbf{B}\mathbf{W}^T = \sum_{j=1}^q b_{ij}w_j$, 得到评价方案的最终得分矩阵, 选取其中的最大得分对应的方案 $\max\{D_i\} = D_{15} = 0.729 \ 4$, 即方案 15 为最优方案。对应的就诊调度安排如图 16。

传统的调度规则主要有 FCFS、SPT (Smallest processing time)、EDD (Earlist due date) 等, 目前国内几乎所有的预约系统和全部门诊几乎都是采用 FCFS 规则, 先到的患者优先进行就诊, 先进行预约的患者享有优先挑选时间的权利。然而这一规则在医疗领域显然并非最优选择, 患者偏好的就诊时间大致呈现泊松分布, 如果完全开放预约选择会导致高峰时段大量患者排队就诊, 对患者造成不必要的影响, 而如果采取半开放预约, 即考虑高峰容量的限制性预约, 则会影响后续到来的病人的就诊安排。本文提出的调度方案虽然不能完全遵从患者的预约时间意愿, 但是能错开患者到来的高峰, 为患者提前安排好实际就诊时间, 让患者能有充足的准备, 若在系统排定的时间到达即能立刻就诊。

在进行具体的数值分析后, 得到根据 FCFS 规则下的总成本、总延误时间和就诊总时间数据, 分别为总成本 $Z = 5 \ 283.761$ 元, 总延误时间 $T_D = 1 \ 224.575$ min, 就诊总时间 $T_{\text{total}} = 423.575$ min, 经由 AHP 分析后所得到的得分为 0.334 9, 远低于文中调度方案得出的最优方案得分, 因此本文提出的优化调度算法是有效的。

6 结论

本文提出了医疗设备预防性维护和病人调度的联合优化问题,针对医疗设备和病人的特点制定了较符合实际的提前式预防性维护方案,保证了病人在进行治疗和检查期间设备的安全可靠运行。在参考了目前国内的门诊排队预约情况后,又提出了优化后的门诊预约调度方案,针对病人和医院的实际利益需求提出了3个优化目标,分别为总成本最小、病人总延误时间最小以及病人总就诊时间最小。建立了考虑医疗设备的退化效应下的维护调度联合决策模型,并且采用了快速有效的多目标优化算法NSGA-II进行了求解。求解的结果对医院实际对病人的调度决策具有一定借鉴意义。

本文的研究内容还可以进行进一步的扩充,在调度方面,可以考虑资源充足下的多医疗设备维护及病人就诊预约调度,设备数量的增加将会大大增加求解的难度。同时,也可以考虑针对病人的爽约和迟到现象应用动态规划的方式进行求解,或是考虑病人未预约情况下的临时就诊以及急诊病人的调度规划。在医疗设备维护方面,可以根据不同性质的医疗设备开拓新颖的多种维护策略并存的维护方式,或是考虑复杂设备中多部件系统之间的维护相关性,制定机会维护策略。

参考文献:

- [1] CASSADY C R, KUTANOGLU E. Integrating preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(2): 304-309.
- [2] WANG S, LIU M. A branch and bound algorithm for single-machine production scheduling integrated with preventive maintenance planning [J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(3): 847-868.
- [3] MOSHEIOV G, SARIG A. Scheduling a maintenance activity to minimize total weighted completion-time [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2009, 57(4): 619-623.
- [4] YANG S J. Minimizing total completion time on a single machine with a flexible maintenance activity [J]. Computers & Operations Research, 2011, 38(4): 755-757.
- [5] 陶辛阳, 夏唐斌, 奚立峰. 基于健康指数的预防性维护与多目标生产调度联合优化建模 [J]. 上海交通大学学报, 2014, 4(8): 1170-1174.
TAO X Y, XIA T B, XI L F. Health-index-based joint optimization of preventive maintenance and multi-attribute production scheduling [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 4(8): 1170-1174.
- [6] 崔维伟, 陆志强. 单机系统的生产调度与预防性维护的集成优化 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(12): 2009-2013.
CUI W W, LU Z Q. Integrating production scheduling and preventive maintenance planning for a single machine [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(12): 2009-2013.
- [7] 蒋志高, 董明. 考虑维护且加工时间可变的单机调度问题研究 [J]. 工业工程与管理, 2011, 16(3): 68-74.
JIANG Z G, DONG M. Study on single-machine problem with maintenance and variable processing time [J]. Industrial Engineering and Management, 2011, 16(3): 68-74.
- [8] 李志颖, 倪婧, 秦萍, 等. 有限产能批量问题生产调度与设备维护集成优化研究 [J]. 现代制造工程, 2019(7): 30-35.
LI Z Y, NI J, QIN P, et al. Research on integration optimization of production scheduling and equipment maintenance for capacitated lot-sizing problem [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(7): 30-35.
- [9] 汪洋. 基于设备老化效应和柔性维护策略的生产调度研究 [D]. 天津: 天津大学, 2019.
WANG Y. Research on production scheduling based on equipment aging effect and flexible maintenance strategy [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [10] 杨旭. 从故障停机引发的经济损失谈医疗设备维修策略 [J]. 医疗卫生装备, 2001(1): 47-48.
YANG X. Discussion on the maintenance strategy of medical equipment from the perspective of economic loss caused by failure shutdown [J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2001(1): 47-48.
- [11] 赵明信. 医用X线诊断设备预防性维护决策研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018.
ZHAO M X. Research on preventive maintenance decision of medical X-ray diagnostic equipment [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2018.
- [12] 潘兴薇, 耿娜. 面向核磁共振检查的预约调度仿真优化研究 [J]. 工业工程与管理, 2016(6): 17-23.
PAN X W, GENG N. Simulation optimization research on appointment scheduling for MRI examinations [J]. Industrial Engineering and Management, 2016(6): 17-23.

- [13] 朱黎敏,耿娜,谢晓岚. 基于 MDP 的门诊病人图像检查最优预约调度[J]. 工业工程与管理,2014,19(3):101-108.
ZHU L M, GENG N, XIE X L. MDP-based appointment scheduling for imaging examinations of outpatients[J]. Industrial Engineering and Management, 2014, 19(3): 101-108.
- [14] 秦岚,徐寅峰. 基于满意度的预约门诊排队策略研究[J]. 运筹与管理,2013,22(2):135-142.
QIN L, XU Y F. Research of scheduling outpatient appointments based on patients'satisfaction[J]. Operations Research and Management Science, 2013, 22 (2): 135-142.
- [15] DEB K, PRATAB A, AGRAWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [16] SRINIVAS N, DEB K. Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms [J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(4): 221-248.
- [17] 雷德明,严新平. 多目标智能优化算法及其应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
LEI D M, YAN X P. Multiobjective intelligent optimization algorithm and its application[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [18] 王青松,谢兴生,周光临. 一种改进的非支配排序遗传算法[J]. 信息技术与网络安全,2019,38(5):28-32.
WANG Q S, XIE X S, ZHOU G L. An improved non-dominated sorting genetic algorithm[J]. Information Technology and Network Security, 2019, 38(5): 28-32.

Operations Research and Cybernetics

Joint Optimization of Preventive Maintenance and Patient Scheduling for Medical Equipment Based on NSGA- II

ZHANG Ning¹, LIU Qinming¹, YE Chunming¹, ZHANG Zhenyu¹, DONG Ming²

(1. School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093;

2. Antai College of Economics & Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: [Purposes] Aiming at the problem that scheduling and equipment maintenance plan affect each other in the process of MRI appointment examination, a joint optimization model is proposed. The research object is single machine system, and many patients are waiting for examination. [Methods] Considering that the equipment failure obeys Weibull distribution and the equipment has the decay effect, the degradation process of the equipment is simulated by introducing service age decline factor, failure rate increasing factor, maintenance time increasing factor and maintenance cost increasing factor, and the appropriate maintenance scheme is constructed. Secondly, considering that the equipment must keep enough reliability in the process of patient's treatment and ensure the safety of the whole process of patient's treatment and examination, a preventive maintenance scheme in advance is formulated. [Findings] With the minimum total cost, the least total delay time and the minimum total treatment time, the Pareto optimal solution is obtained by NSGA-II algorithm, and AHP is used to make the hospital reservation system arrange the appropriate scheduling scheme according to the actual situation, and effectively coordinate the patient treatment scheduling and equipment maintenance plan. [Conclusions] The effectiveness of the proposed joint optimization model is verified by an actual example.

Keywords: medical treatment equipment; preventive maintenance; multi-objective optimization; NSGA-II

(责任编辑 许 甲)