

基于模糊理论的设备多目标预防性维护策略研究^{*}

梅嘉健, 刘勤明, 叶春明, 王上润

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要:【目的】针对当前生产设备多为单一目标维护决策的不足,同时考虑维护成本率和设备可用度,提出了一种基于模糊理论的多目标预防性维护策略模型。【方法】针对设备的衰退过程,结合役龄递减因子和故障率递增因子的混合故障率来描述设备的衰退特性;在此基础上,以可靠性阈值和预防维护次数为决策变量、设备维护成本率和设备可用度为目标函数建立设备多目标预防维护策略模型,基于模糊加权平均算法求解多目标维护决策模型。【结果】在仅以维护成本率为决策目标时,最优可靠性阈值为0.7,最优维护次数为5;在仅以设备可用度为决策目标时,最优可靠性阈值为0.7,最优维护次数为2;在多目标情况下偏重维护成本率时,最优可靠性阈值为0.7,最优维护次数为4;在多目标情况下偏重设备可用度时,最优可靠性阈值为0.7,最优维护次数为3。【结论】设备多目标预防维护策略模型更具灵活性,更加符合实际情况。

关键词:预防维护;混合故障率;维护成本率;设备可用度;模糊加权平均算法

中图分类号:O221.6;TB472;F273.4

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2021)01-0046-09

在企业不断实现机械化的过程中,设备的使用量和复杂度也大大提高。在企业成本中,设备的维护和管理成本所占比例越来越大。它们直接影响到设备能否长期保持良好的工作状态,进而影响设备加工产品的质量,最终对整个工厂的生产效率和经济效益造成影响。因此,制定合理的设备维护策略成为企业必须考虑的问题。

设备的预防性维护是降低故障风险、减少维护成本和提高设备可用度的重要手段。目前,设备维护模型主要包括基于役龄的维护模型、等周期预防维护模型、故障限制的维护模型和基于可靠性的维护模型。Liu等人^[1]对基于役龄的维修策略和基于可靠性的维修策略进行了建模和比较,以最低费用率为目标建立模型,验证了基于可靠性的维修策略的合理性。等周期预防维护是企业在设备维护过程经常使用的策略,但Khandelwal等人^[2]认为企业难以选取合适的预防维护周期:过短的维护周期导致维护频繁,维护费用激增;过长的维护周期导致维护不足,故障频发,故障维修费用激增。在实际的生产过程中,设备随着役龄和维护次数的递增,设备的失效率往往也会递增。因此,周晓军等人^[3]结合役龄递减因子和故障率递增因子的混合式故障率来描述设备失效率;廖雯竹等人^[4]将系统当机成本和置换成本考虑进系统维护总成本中,以回复改善因子和强化年龄来描述设备的实际健康状况,以设备的期望平均总成本最小化来进行决策;夏唐斌等人^[5-6]整合维护成本率和设备可用度建立动态预防性维护多目标决策模型,求解出基于不同目标下的最优预防维护时间间隔;Han等人^[7]以海上的安全屏障为例,将降低单位时间维护成本作为目标来求解如何安排最优维护时间间隔;陆志强等人^[8-9]在考虑缓冲区的条件下求解最优预防维护周期,运用模糊决策理论来求解目标;郝虹斐等人^[10]在考虑多目标情况下将维护效率和设备寿命相结合,以不同的决策倾向和检测方法来构建多目标决策。综上所述,迄今为止已有很多文献研究了设备的预防维护策略,但是其中有些方案仅考虑单目标维护决策,而实际情况中往往会有多个目标,因此方案缺乏实用性;并且在多目标决策过程中,权重确定方式往往较为主观,缺乏客观性。基于已有研究中存在的问题,本文充分考虑设备在整个维护过程中的预防维护成本、小修成本、停机成本和置换成本,以设备可靠性为中心,维护成本率和设备可用度为目标函数,以可靠性阈值和预防维护次数为决策变量,结合混合故障率模型

^{*} 收稿日期:2020-11-11 修回日期:2020-12-01 网络出版时间:2021-03-11 16:41

资助项目:国家自然科学基金(No. 71632008;No. 71840003);教育部人文社会科学研究规划基金(No. 20YJAZH068);上海理工大学科技发
展项目(No. 2020KJFZ038);上海市自然科学基金(No. 19ZR1435600);2020年上海理工大学大学生创新创业训练计划项目(No.
XJ2020155)

第一作者简介:梅嘉健,男,研究方向为设备维护与决策,E-mail:1402065592@qq.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.20210310.1449.026.html>

来描述设备的系统失效率,以三角模糊数来描述模糊权重,运用模糊加权平均算法求解最优预防维护次数和最优的设备可靠度阈值,求解出符合维护成本率最小化和设备可用度最大化的维护决策。

1 问题描述

设备维护方式包括小修、预防性维护和置换。小修是对设备进行保养维护,即对设备进行润滑、调节、除尘等,使设备能在更好的环境下运行。小修不会改变设备的故障率,即“修复如旧”。预防性维护是对设备的部分部件进行修复,对降低设备故障率有明显的效果,即“修复非新”。置换是将整个设备进行更换,设备的故障率恢复至 0,即“修复如新”。本文在考虑对维护成本率和设备可用度有一定偏好的情况下,对这 3 种维护方式做出合理的安排,即:采取顺序维修策略,设备达到设定的可靠性阈值 R 就对设备进行预防性维护;由于维护间隔期随设备的劣化而降低,因此假定设备的最优预防维护次数为 N ,当预防维护次数在 $N-1$ 内,设备达到设定的可靠性阈值 R 就对设备进行预防性维护,而当预防维护次数达到 N 时,则对设备进行置换;设备运行期间发生的故障则采取小修解决^[11]。以役龄递减因子和故障率递增因子来对设备的失效率函数进行描述,以预防维护成本、小修成本、停机成本和置换成本作为总的维护成本,以维护成本率和设备可用度为优化目标,以可靠性阈值和最优预防维护次数为决策变量,通过模糊加权平均算法求出符合目标的最优维护决策。

2 符号说明及假设

2.1 符号说明

本文所用到的符号及它们的含义如下: i :预防维护次数($i=1,2,\dots,N$); N :最优预防维护次数; T_i :第 $i-1$ 个到第 i 个预防维护周期间的时间间隔($i=1,2,\dots,N$); $\lambda_i(t)$:第 $i-1$ 个到第 i 个预防维护周期间的失效率函数($i=1,2,\dots,N$); R :可靠性阈值; a_i :第 i 个预防维护周期的役龄递减因子($i=1,2,\dots,N$)且 $a_i \in (0,1)$; b_i :第 i 个预防维护周期故障率递增因子($i=1,2,\dots,N$)且 $b_i \in (1,+\infty)$; C_p :单次预防维护成本; t_p :单次预防维护时间; C_{mr} :单次小修成本; t_{mr} :单次小修时间; C_r :置换成本; t_r :置换时间; C_b :单位时间的停机成本; C_i :第 i 个周期的维护成本($i=1,2,\dots,N$); C_N :第 N 个周期的维护成本; C_T :维护成本率; A :设备可用度。

2.2 假设条件

本文研究的假设条件为:1) 以独立的系统为研究对象,它的初始状态为新;2) 系统状态可被有效监控,系统随即失效且可用数学函数进行表示;3) 采用小修的方式解决设备在预防维护周期间失效的问题,且小修不改变故障率函数;4) 进行预防性维护、小修和置换均视为停机。

3 预防性维护决策建模

3.1 系统失效率的优化

针对设备的衰退过程,结合役龄递减因子和故障率递增因子所组成的混合故障率模型来描述设备的衰退特性,对系统的失效率函数进行表示^[12],为:

$$\lambda_{i+1}(t) = b_i \lambda_i(t + a_i T_i), \quad t \in (0, T_{i+1}).$$

其中: a_i 和 b_i 的取值需根据之前的历史维护数据进行估计。

在设备的可靠性阈值达到预先设定的可靠性阈值 R 时,系统的失效率函数和可靠度之间的关系为:

$$\exp \left[- \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt \right] = R.$$

由上述方程可得不同阶段的维护时间间隔表达式为:

$$\exp \left[- \int_0^{T_1} \lambda_1(t) dt \right] = \exp \left[- \int_0^{T_2} \lambda_2(t) dt \right] = \dots = \exp \left[- \int_0^{T_N} \lambda_N(t) dt \right] = R. \quad (1)$$

基于(1)式,可得:

$$\int_0^{T_1} \lambda_1(t) dt = \int_0^{T_2} \lambda_2(t) dt = \dots = \int_0^{T_N} \lambda_N(t) dt = -\ln R.$$

3.2 维护成本率的构建

设备在运转过程中的维护成本包括预防维护成本、小修成本、停机成本和置换成本。在 1 个维护周期内,预防维护时间、小修时间和置换时间都视为停机时间,其中小修发生的次数与 T_i 有关。

当 $0 < i < N$ 时,设备的维护成本包括预防维护成本、小修成本和停机成本;在 1 个维护周期内,预防维护成本为 C_p ,小修成本为 $C_{mr} \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt$, 停机成本为 $C_b \left[t_p + t_{mr} \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt \right]$ 。此时,设备的维护成本为:

$$C_i = C_p + C_{mr} \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt + C_b \left[t_p + t_{mr} \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt \right] = C_p + C_{mr}(-\ln R) + C_b [t_p + t_{mr}(-\ln R)]。$$

当 $i = N$ 时,设备的维护成本包括置换成本、小修成本和停机成本;在 1 个维护周期内,置换成本为 C_r ,小修成本为 $C_{mr} \int_0^{T_N} \lambda_N(t) dt$, 停机成本为 $C_b \left[t_r + t_{mr} \int_0^{T_N} \lambda_N(t) dt \right]$ 。当维护周期为 N 时,设备进行置换,它的维护成本为:

$$C_N = C_r + C_{mr} \int_0^{T_N} \lambda_N(t) dt + C_b \left[t_r + t_{mr} \int_0^{T_N} \lambda_N(t) dt \right] = C_r + C_{mr}(-\ln R) + C_b [t_r + t_{mr}(-\ln R)]。$$

因此,当维护周期 i 为 $0 < i \leq N$ 时,设备的维护成本率为:

$$C_T = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} C_i + C_N}{\sum_{i=1}^N T_i + (N-1)t_p + t_r + t_{mr} \sum_{i=1}^N \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} C_i + C_N}{\sum_{i=1}^N T_i + (N-1)t_p + t_r + Nt_{mr}(-\ln R)}。$$

3.3 设备可用度的构建

在某些特定的情况下,如国防军工、高精设备等行业对设备可用度的要求远高于对设备维护成本率的要求,此时设备可用度成为关注的焦点,它的表达式为:

$$A = \frac{T_{MU}}{T_{MU} + T_{MD}}。$$

式中: T_{MU} 是设备的平均工作时间; T_{MD} 是设备的平均停机时间,它包含设备的预防维护时间和小修时间。

当维护周期 i 为 $0 < i \leq N$ 时,设备可用度为:

$$A_i = \frac{T_i}{T_i + t_p + t_{mr} \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt} = \frac{T_i}{T_i + t_p + t_{mr}(-\ln R)}。$$

当维护周期为 N 时,设备进行置换,设备可用度为:

$$A_N = \frac{T_N}{T_N + t_r + t_{mr} \int_0^{T_N} \lambda_N(t) dt} = \frac{T_N}{T_N + t_r + t_{mr}(-\ln R)}。$$

当维护周期 i 为 $0 < i \leq N$ 时,设备可用度为:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N T_i + (N-1)t_p + t_r + t_{mr} \sum_{i=1}^N \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N T_i + (N-1)t_p + t_r + Nt_{mr}(-\ln R)}。$$

3.4 多目标决策模型

在单目标决策过程中,常常会追求较低维护成本率或较高设备可用度中的任意一个目标,但在实际生产过程中,往往需要综合考虑这两个目标。因此,本文以维护成本率 C_T 最低和设备可用度 A 最高为目标建立如下多目标决策模型:

$$D = \begin{cases} \min C_T(R, N) \\ \max A(R, N) \end{cases}。$$

多目标决策问题具有目标间不可公度性的特点。目标间的不可公度性是指由于各个目标的决策属性不同,所以难以对所有目标有一个统一的衡量标准。对于决策目标维护成本率和设备可用度来说,两者之间也没有一个统一的衡量标准。在本次维护决策过程中,需要考虑到定性指标的存在,从而使决策具有不确定性,而模糊理论对于解决多目标情况下评价指标不同的问题有较好的效果。因此,针对两目标决策体系和量纲的不同,本文采用模糊理论来求解此问题。运用模糊理论将维护成本率和设备可用度的具体实数转变为各自相应的优属度,根据实际情况的要求,得出考虑多目标情况下的维护决策优属度。因此,可以通过优属度来对单目标决策和多目标决策进行对比和评价。

4 模型求解

针对提出的多目标预防维护模型,先求解出不同可靠度下对应的维护时间间隔,再求出每一个可靠性阈值和最优维护次数对应下的维护成本率和设备可用度,接着通过模糊理论将维护成本率和设备可用度的实数转变为相应的优属度;根据实际情况对维护成本率和设备可用度的偏好来确定相应的权重,并以三角模糊数来描述权重,最终得出考虑多目标情况下的维护决策优属度,从而得出最优决策集 $D(R, N)$ 并确定最优的维护策略。模型的具体求解步骤如下。

1) 设立在不同的预防维护次数 N 下的可靠度阈值 R 以及此时对应的维护成本率 $C_T(R, N)$ 和设备可用度 $A(R, N)$ 。

2) 根据模糊理论将 $C_T(R, N)$ 和 $A(R, N)$ 转化为模糊数 $P_{C_T}(R, N)$ 和 $P_A(R, N)$, 其中 $P_{C_T}(R, N)$ 和 $P_A(R, N)$ 分别代表决策集 $D(R, N)$ 基于维护成本率和设备可用度的优属度,具体的转化公式为:i) 当目标越大越优时,

$$r'_{ij} = \frac{x_{ij} - \inf(x_i)}{\sup(x_i) - \inf(x_i)}; \quad (2)$$

ii) 当目标越小越优时,

$$r'_{ij} = \frac{\sup(x_i) - x_{ij}}{\sup(x_i) - \inf(x_i)}。 \quad (3)$$

其中: r'_{ij} 表示决策 j 目标 i 特征值的最优目标隶属度(优属度), x_{ij} 表示决策 j 目标 i 的特征值, $\sup(x_i)$ 和 $\inf(x_i)$ 表示目标 i 特征值 x_i 的上确界和下确界。在本文中,先找出 $C_{T\max}(R, N)$, $C_{T\min}(R, N)$, $A_{\max}(R, N)$, $A_{\min}(R, N)$ 。目标越大越优对应于设备可用度,其中 $P_A(R, N)$ 即为 r'_{ij} , $A_{\max}(R, N)$ 和 $A_{\min}(R, N)$ 分别为 $\sup(x_i)$ 和 $\inf(x_i)$, $A(R, N)$ 为 x_{ij} 。目标越小越优对应于维护成本率,其中 $P_{C_T}(R, N)$ 即为 r'_{ij} , $C_{T\max}(R, N)$ 和 $C_{T\min}(R, N)$ 分别为 $\sup(x_i)$ 和 $\inf(x_i)$, $C_T(R, N)$ 为 x_{ij} 。由此(2),(3)两式就可以分别转化为:

$$P_A(R, N) = \frac{A(R, N) - \inf(x_i)}{\sup(x_i) - \inf(x_i)}$$

以及

$$P_{C_T}(R, N) = \frac{\sup(x_i) - C_T(R, N)}{\sup(x_i) - \inf(x_i)}。$$

从而分别求出设备可用度优属度 $P_A(R, N)$ 和维护成本率优属度 $P_{C_T}(R, N)$ 。

3) 运用模糊加权平均算法寻找最优维护决策^[13]。令 $P(R, N)$ 为决策 $D(R, N)$ 的优属度, $P_{C_T}(R, N)$ 和 $P_A(R, N)$ 为决策 $D(R, N)$ 对于维护成本率和设备可用度的优属度。 W_{C_T} 和 W_A 分别表示决策属性维护成本率和设备可用度的模糊权重,它们的模糊权重用三角模糊数来表示,即 $W = (a, b, c)$ 。 α 截集 $(P)_\alpha$ 的下限和上限分别表示为 $(P)_\alpha^L$ 和 $(P)_\alpha^U$ 。 α 截集 $[P_{C_T}(R, N)]_\alpha$ 的下限和上限分别表示为 $[P_{C_T}(R, N)]_\alpha^L$ 和 $[P_{C_T}(R, N)]_\alpha^U$ 。 α 截集 $[P_A(R, N)]_\alpha$ 的下限和上限分别表示为 $[P_A(R, N)]_\alpha^L$ 和 $[P_A(R, N)]_\alpha^U$ 。 α 截集 $(W_{C_T})_\alpha$ 的下限和上限分别表示为 $(W_{C_T})_\alpha^L$ 和 $(W_{C_T})_\alpha^U$ 。 α 截集 $(W_A)_\alpha$ 的下限和上限分别表示为 $(W_A)_\alpha^L$ 和 $(W_A)_\alpha^U$ 。采用三角模糊数定义的权重的隶属函数(图 1)为:

$$w(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & x \in [a, b] \\ \frac{c-x}{c-b}, & x \in [b, c] \end{cases}。$$

P 的 α 截集表达式为:

$$\begin{aligned} (P)_\alpha &= [(P)_\alpha^L, (P)_\alpha^U], \\ (P)_\alpha^L &= \min \left\{ \frac{[P_{C_T}(R, N)]_\alpha^L W_{C_T} + [P_A(R, N)]_\alpha^L W_A}{W_{C_T} + W_A} \right\}, \\ (P)_\alpha^U &= \max \left\{ \frac{[P_{C_T}(R, N)]_\alpha^U W_{C_T} + [P_A(R, N)]_\alpha^U W_A}{W_{C_T} + W_A} \right\}。 \end{aligned}$$

其中: $(W_{C_T})_\alpha \in [(W_{C_T})_\alpha^L, (W_{C_T})_\alpha^U]$, $(W_A)_\alpha \in [(W_A)_\alpha^L, (W_A)_\alpha^U]$ 。最终所求 $(P)_\alpha$ 仍为模糊数, $(P)_\alpha^L$ 和 $(P)_\alpha^U$ 应以设定三角模糊数分别求

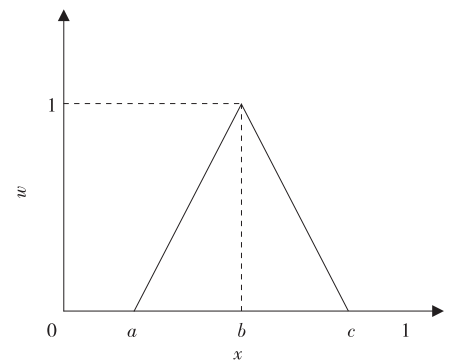


图 1 权重隶属函数

Fig. 1 Weight membership function

出,再进行排序,找出最大值和最小值,以此得到最终优属度的区间,求出区间中点作为 $(P)_a$,即 $(P)_a = \frac{(P)_a^L + (P)_a^U}{2}$ 。

5 算例分析

本文选用在电子和机械领域使用较为广泛的二参数威布尔分布来描述该设备的系统失效率^[14],即:

$$\lambda(t) = \frac{m}{Z} \left(\frac{t}{Z} \right)^{m-1}。$$

其中: m 为形状参数, Z 为生命特征参数,两者需根据之前的历史维护数据进行估计,分别假定 $m=3, Z=100$ 。为了得到设备的最优维护计划,还需要确定调整因子 (a_i, b_i) ,成本因子 (C_p, C_{mr}, C_r, C_b) ,时间因子 (t_p, t_{mr}, t_r) 等参数,假设 $a_i = \frac{i}{3i+7}, b_i = \frac{12i+1}{11i+1}, C_p=40, C_{mr}=80, C_r=800, C_b=70, t_p=2, t_{mr}=1, t_r=3$ 。

5.1 结果分析

在企业实际生产中,设备不能无限制的维护,到达一定维护次数后,若不进行置换,则可能会造成生产的产品质量下降,不符合质量要求。因此,本文设定 N, R 两个决策变量的范围为: $N \in [1, 8], R \in [0.7, 0.8]$ 。仿真结果以 Python 软件得出。

由表 1 可见,当设备的可靠性阈值保持不变时,设备的预防维护时间间隔呈递减趋势,与设备的实际劣化情况相符。随着设备可靠性阈值的逐渐增大,设备的预防维护时间间隔变短,即需要通过更加频繁的预防维护来维持设备的高可靠性,更加符合高精设备对高可靠性的要求。

表 1 不同可靠度下对应的维护时间间隔

Tab. 1 The corresponding maintenance interval for different reliability

R	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	R	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8
0.70	70.92	61.98	50.87	40.50	32.06	25.60	20.76	17.11	0.76	64.99	56.80	46.61	37.11	29.37	23.46	19.02	15.67
0.71	69.97	61.15	50.19	39.95	31.62	25.26	20.48	16.88	0.77	63.94	55.88	45.86	36.51	28.90	23.08	18.72	15.42
0.72	69.00	60.31	49.49	39.40	31.19	24.91	20.20	16.64	0.78	62.87	54.95	45.09	35.90	28.42	22.70	18.40	15.16
0.73	68.02	59.45	48.79	38.84	30.75	24.56	19.91	16.41	0.79	61.77	53.99	44.31	35.28	27.92	22.30	18.08	14.90
0.74	67.03	58.58	48.08	38.27	30.30	24.20	19.62	16.17	0.80	60.65	53.01	43.51	34.64	27.42	21.90	17.76	14.63
0.75	66.01	57.70	47.35	37.70	29.84	23.83	19.32	15.92									

本文以 $R=0.7$ 为例,选择不同的役龄递减因子 $\left(a_i = \frac{i}{i+7}, a_i = \frac{i}{3i+7}, a_i = \frac{i}{5i+7}\right)$ 和故障率递增因子 $\left(b_i = \frac{12i+1}{7i+1}, b_i = \frac{12i+1}{9i+1}, b_i = \frac{12i+1}{11i+1}\right)$ 来显示它们对维护时间间隔的影响。由图 2 可知,随着役龄递减因子的减小,设备达到维护阈值的时间间隔变长,设备劣化速度减慢。由图 3 可知,随着故障率递增因子的增大,设备达到维护阈值的时间间隔变短,设备需要更加频繁的维护来保证可靠度。不同因子的选取对维护时间间隔有不同的影响,本文依据历史维护数据选取 $a_i = \frac{i}{3i+7}, b_i = \frac{12i+1}{11i+1}$ 。

用表 2 中 $R=0.7$ 时的数据来分析维护次数对维护成本率的影响。如图 4 所示,维护成本率随维护次数的增加而先下降后上升,在第 5 次维护达到最低的维护成本率 742.27×10^{-2} 。由于设备的置换成本较高,在设备运行初期进行置换将导致维护成本率较高,因而随维护次数的增加,维护成本率先降低;但随着设备的不断劣化,维护时间间隔将缩短,需要更加频繁地进行维护,从而使预防维护成本上升,进而导致维护成本率的上升。因此,上述维护成本率的变化趋势符合实际情况。

由表 3 可知,设备的可用度最高为 95.88%,对应的最优可靠性阈值为 0.7,并在第 2 次达到可靠性阈值 0.7 时进行置换。在仅考虑单目标决策情况下,若只考虑较低成本率,设备置换将会延后,可能导致产品质量不佳,若只考虑较高可用度,设备置换过于频繁,维护成本较高。

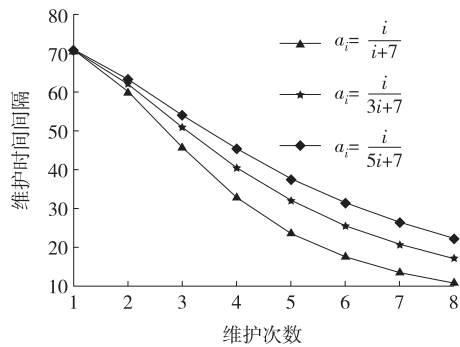


图 2 役龄递减因子 a_i 对维护时间间隔的影响
Fig. 2 Effect of diminishing service age factor on maintenance interval

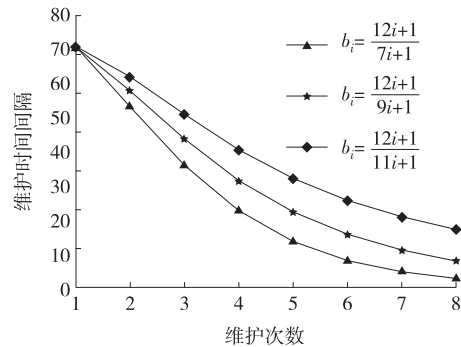


图 3 故障率递增因子 b_i 对维护时间间隔的影响
Fig. 3 Effect of increasing failure rate factor on maintenance interval

表 2 维护成本率仿真结果
Tab. 2 Maintenance cost rate simulation results

R	$C_T \times 10^2$							
	$N=1$	$N=2$	$N=3$	$N=4$	$N=5$	$N=6$	$N=7$	$N=8$
0.70	1 431.85	935.68	797.80	751.61	742.27	751.01	769.72	794.36
0.71	1 447.83	944.98	805.01	757.90	748.09	756.58	775.15	799.74
0.72	1 464.54	954.74	812.61	764.54	754.25	762.49	780.93	805.46
0.73	1 482.03	964.99	820.62	771.57	760.78	768.77	787.09	811.57
0.74	1 500.38	975.79	829.08	779.01	767.71	775.44	793.64	818.08
0.75	1 519.66	987.18	838.03	786.90	775.09	782.56	800.64	825.04
0.76	1 539.95	999.22	847.52	795.28	782.94	790.14	808.12	832.50
0.77	1 561.37	1 011.97	857.60	804.21	791.31	798.25	816.12	840.48
0.78	1 584.01	1 025.49	868.32	813.73	800.26	806.94	824.70	849.06
0.79	1 608.02	1 039.89	879.77	823.92	809.85	816.26	833.92	858.28
0.80	1 633.55	1 055.24	892.01	834.83	820.15	826.28	843.85	868.23

根据上述步骤中的公式,分别求解维护成本率和设备可用度的优属度,具体数据如表 4、表 5 所示。

对维护成本率和设备可用度的不同偏好会产生不同的维护决策,若偏向于维护成本率,则维护成本率和设备可用度的三角模糊权重分别为 $(0.6, 0.7, 0.8)$ 和 $(0.2, 0.3, 0.4)$,且 $\alpha=0$,运用模糊加权平均算法求出所有可靠性阈值和最优维护次数对应下的维护决策优属度,即 $(P)_\alpha$ 。由于所求数量较多,本文依据 $(P)_\alpha$ 的大小降序列举前 10 个维护决策优属度,最终得出表 6。若偏向于设备可用度,则维护成本率和设备可用度的三角模糊权重分别为 $(0.2, 0.3, 0.4)$ 和 $(0.6, 0.7, 0.8)$,且 $\alpha=0$,依据上述方法最终可得出表 7。

5.2 结果比较

在仅以维护成本率为决策目标(表 4)时,维护决策为 $(0.7, 5)$,最优可靠性阈值为 0.7,最优维护次数为 5。在仅以设备可用度为决策目标(表 5)时,维护决策为 $(0.7, 2)$,最优可靠性阈值为 0.7,最优维护次数为 2。在多目标情况下偏重维护成本率(表 6)时,最优维护决策为 $D(0.7, 4)$,此时优属度为 0.950 9,即最优可靠性阈值为 0.7,最优维护次数为 4。在多目标情况下偏重设备可用度(表 7)时,最优维护决策为 $D(0.7, 3)$,此时优属度为 0.955 5,即最优可靠性阈值为 0.7,最优维护次数为 3。相较于单目标决策,考虑多目标情况下的决策更灵活,更

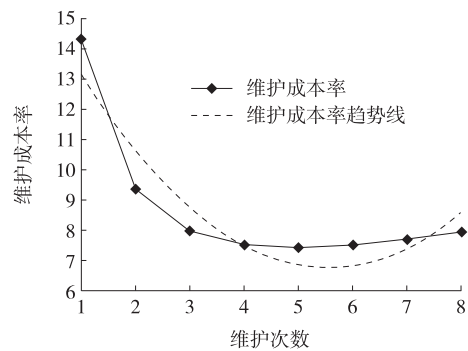


图 4 当 $R=0.7$ 时不同的维护次数对应的维护成本率
Fig. 4 Different maintenance times correspond to the maintenance cost rate when $R=0.7$

符合实际。由此可见,在运用模糊理论和模糊权重后,使整个模型可以符合实际情况来进行多目标决策,适应不同的生产需求。

表 3 设备可用度仿真结果

Tab. 3 Equipment availability simulation results

R	A								R	A							
	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8		N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8
0.70	95.48	95.88	95.79	95.56	95.25	94.90	94.54	94.15	0.76	95.20	95.64	95.56	95.32	95.00	94.63	94.25	93.85
0.71	95.44	95.84	95.76	95.52	95.21	94.87	94.49	94.11	0.77	95.15	95.59	95.51	95.27	94.94	94.58	94.19	93.79
0.72	95.40	95.81	95.72	95.49	95.18	94.82	94.45	94.07	0.78	95.09	95.54	95.46	95.21	94.89	94.52	94.13	93.72
0.73	95.35	95.77	95.69	95.45	95.13	94.78	94.41	94.02	0.79	95.02	95.49	95.41	95.16	94.83	94.46	94.06	93.65
0.74	95.31	95.73	95.65	95.41	95.09	94.74	94.36	93.97	0.80	94.95	95.43	95.35	95.10	94.76	94.39	93.99	93.57
0.75	95.26	95.69	95.61	95.36	95.05	94.69	94.31	93.91									

表 4 维护成本率的优属度

Tab. 4 The superiority of maintenance cost rate

R	$P_{c_T}(R, N)$							
	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8
0.70	0.226 3	0.783 0	0.937 7	0.989 5	1.000 0	0.990 2	0.969 2	0.941 6
0.71	0.208 4	0.772 6	0.929 6	0.982 5	0.993 5	0.983 9	0.963 1	0.935 5
0.72	0.189 6	0.761 6	0.921 1	0.975 0	0.986 6	0.977 3	0.956 6	0.929 1
0.73	0.170 0	0.750 1	0.912 1	0.967 1	0.979 2	0.970 3	0.949 7	0.922 3
0.74	0.149 4	0.738 0	0.902 6	0.958 8	0.971 5	0.962 8	0.942 4	0.914 9
0.75	0.127 8	0.725 2	0.892 6	0.949 9	0.963 2	0.954 8	0.934 5	0.907 1
0.76	0.105 0	0.711 7	0.881 9	0.940 5	0.954 4	0.946 3	0.926 1	0.898 8
0.77	0.081 0	0.697 4	0.870 6	0.930 5	0.945 0	0.937 2	0.917 1	0.889 8
0.78	0.055 6	0.682 2	0.858 6	0.919 8	0.934 9	0.927 4	0.907 5	0.880 2
0.79	0.028 6	0.666 1	0.845 7	0.908 4	0.924 2	0.917 0	0.897 2	0.869 8
0.80	0.000 0	0.648 9	0.832 0	0.896 1	0.912 6	0.905 7	0.886 0	0.858 7

表 5 设备可用度的优属度

Tab. 5 The superiority of equipment availability

R	$P_A(R, N)$							
	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8
0.70	0.827 5	1.000 0	0.963 2	0.860 8	0.727 3	0.577 1	0.417 4	0.252 3
0.71	0.810 1	0.985 3	0.948 7	0.845 9	0.711 6	0.560 5	0.399 8	0.233 6
0.72	0.791 7	0.969 7	0.933 4	0.830 0	0.695 0	0.542 9	0.381 1	0.213 8
0.73	0.772 3	0.953 3	0.917 2	0.813 3	0.677 3	0.524 2	0.361 2	0.192 7
0.74	0.751 7	0.935 8	0.899 9	0.795 5	0.658 6	0.504 3	0.340 1	0.170 3
0.75	0.730 0	0.917 3	0.881 6	0.776 5	0.638 6	0.483 1	0.317 6	0.146 5
0.76	0.707 0	0.897 6	0.862 1	0.756 3	0.617 3	0.460 5	0.293 7	0.121 0
0.77	0.682 6	0.876 6	0.841 3	0.734 7	0.594 6	0.436 4	0.268 0	0.093 9
0.78	0.656 6	0.854 2	0.819 1	0.711 7	0.570 2	0.410 6	0.240 6	0.064 8
0.79	0.628 8	0.830 2	0.795 3	0.687 0	0.544 2	0.382 9	0.211 2	0.033 6
0.80	0.599 1	0.804 5	0.769 7	0.660 4	0.516 1	0.353 1	0.179 6	0.000 0

表 6 以维护成本率为偏好的维护决策优属度

Tab. 6 A maintenance decision preference based on maintenance cost rate

$D(R, N)$	$[(P)_a^L, (P)_a^U]$	$(P)_a$
(0.7, 4)	[0.938 0, 0.963 8]	0.950 9
(0.7, 3)	[0.942 8, 0.947 9]	0.945 3
(0.71, 4)	[0.927 8, 0.955 1]	0.941 5
(0.71, 3)	[0.933 4, 0.937 2]	0.935 3
(0.72, 4)	[0.917 0, 0.946 0]	0.931 5
(0.72, 3)	[0.923 5, 0.926 0]	0.924 8
(0.73, 4)	[0.905 6, 0.936 4]	0.921 0
(0.7, 5)	[0.890 9, 0.945 5]	0.918 2
(0.73, 3)	[0.913 1, 0.914 1]	0.913 6
(0.74, 4)	[0.893 5, 0.926 1]	0.909 8

表 7 以可用度为偏好的维护决策优属度

Tab. 7 A maintenance decision preference based on availability

$D(R, N)$	$[(P)_a^L, (P)_a^U]$	$(P)_a$
(0.7, 3)	[0.953 0, 0.958 1]	0.955 5
(0.71, 3)	[0.941 1, 0.944 9]	0.943 0
(0.7, 2)	[0.913 2, 0.956 6]	0.934 9
(0.72, 3)	[0.928 5, 0.930 9]	0.929 7
(0.71, 2)	[0.900 2, 0.942 7]	0.921 5
(0.73, 3)	[0.915 2, 0.916 2]	0.915 6
(0.72, 2)	[0.886 5, 0.928 1]	0.907 3
(0.74, 3)	[0.900 5, 0.901 0]	0.900 7
(0.7, 4)	[0.886 5, 0.912 3]	0.899 4
(0.73, 2)	[0.872 0, 0.912 6]	0.892 3

6 结束语

针对设备的衰退过程,本文结合役龄递减因子和故障率递增因子来描述设备的衰退特性,以可靠度阈值和最优预防维护次数为决策变量,并以维护成本率和设备可用度为目标构建多目标维护决策模型。运用模糊理论将维护成本率、设备可用度和多目标下的决策统一转化为优属度,通过优属度这一衡量标准来进行比较和分析。数值仿真的结果显示,本文构建的模型可依据实际情况来进行多目标决策,有助于弥补仅考虑单目标决策模型的不足,符合实际情况的需求。本文的研究对象是单一设备情况下的多目标决策建模,但在实际的企业中,往往会有多设备组成串并联系统来生产某种产品。因此,后续研究将关注串并联系统的多目标预防性维护方向。

参考文献:

- [1] LIU G H, LONG X Y, TONG S, et al. Optimum consecutive preventive maintenance scheduling model considering reliability[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2019, 24(4): 490-495.
- [2] KHANDELWAL D, SHARMA J, RAY L. Optimal periodic maintenance of a machine[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1979, 24(3): 513-513.
- [3] 周晓军, 奚立峰, 李杰. 一种基于可靠性的设备顺序预防性维护模型[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(12): 120-123.
ZHOU X J, XI L F, LI J. A reliability based sequential preventive maintenance model for equipment[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(12): 120-123.
- [4] 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): 153-157.
LIAO W Z, PAN E S, XI L F. Dynamic preventive maintenance strategy based on equipment reliability[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(8): 153-157.
- [5] 夏唐斌, 周晓军, 奚立峰. 基于失效率调整因子的多目标动态预防性维护决策建模[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(5): 821-824.
XIA T B, ZHOU X J, XI L F. Multi-objective dynamic preventive maintenance decision modeling based on failure rate adjustment factor[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(5): 821-824.
- [6] 夏唐斌. 面向制造系统健康管理的动态预测与预知维护决策研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
XIA T B. Research on dynamic prediction and predictive maintenance decision for health management of manufacturing systems [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [7] HAN Y, ZHEN X W, HUANG Y, et al. Integrated methodology for determination of preventive maintenance interval of safety barriers on offshore installations[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 132: 313-324.
- [8] 陆志强, 王佳跃, 周炳海. 带缓冲区的可修复设备多目标预防性维护决策模型[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10): 2124-2128.
LU Z Q, WANG J Y, ZHOU B H. Multi-objective preventive maintenance decision model for repairable equipment with buffer

- zone[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2010, 16(10): 2124-2128.
- [9] 王佳跃. 基于模糊理论的设备多目标维护决策方法[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
WANG J Y. Equipment multi-objective maintenance decision method based on fuzzy theory[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011.
- [10] 郝虹斐, 郭伟, 桂林, 等. 非完美维修情境下的预防性维修多目标决策模型[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(5): 518-524.
HAO H P, GUO W, GUI L, et al. Multi-objective decision model of preventive maintenance under imperfect maintenance condition[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018, 52(5): 518-524.
- [11] 余斌. 基于可靠性的设备维护策略研究[J]. 机械工程师, 2015(7): 128-130.
YU B. Research on equipment maintenance strategy based on reliability[J]. Mechanical Engineer, 2015(7): 128-130.
- [12] 奚立峰, 周晓军, 李杰. 有限区间内设备顺序预防性维护策略研究[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(10): 1465-1468.
XI L F, ZHOU X J, LI J. Study on the strategy of sequential preventive maintenance of equipment in finite interval[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2005, 11(10): 1465-1468.
- [13] 徐泽水. 对方案有偏好的三角模糊数型多属性决策方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(8): 9-12.
XU Z S. Research on multi-attribute decision making method based on triangular fuzzy number with preference for scheme[J]. Systems Engineering and Electronics Technology, 2002, 24(8): 9-12.
- [14] 方玲珍, 史凯龙, 陆彪, 等. 基于维护效率的设备多目标预防维护优化建模[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(6): 116-122.
FANG L Z, SHI K L, LU B, et al. Multi-objective preventive maintenance optimization modeling of equipment based on maintenance efficiency[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2018, 24(6): 116-122.

Operations Research and Cybernetics

Research on Multi-Objective Preventive Maintenance Strategy Based on Fuzzy Theory

MEI Jiajian, LIU Qinming, YE Chunming, WANG Shangrun

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

Abstract: [Purposes] In order to solve the problem that most of the current production equipment is a single objective maintenance decision, and consider maintenance cost rate and equipment availability, a multi-objective preventive maintenance strategy model based on fuzzy theory is proposed. [Methods] Firstly, the recession process equipment combined with recursion decline factor and failure rate of the mixture of factor to describe the equipment failure rate decline characteristics. Secondly, on this basis, the multi-objective preventive maintenance strategy model of equipment is established by taking reliability threshold and preventive maintenance times as decision variables and equipment maintenance cost rate and equipment availability as objective functions, the fuzzy weighted average algorithm is used to solve the multi-objective maintenance decision model. [Findings] When only maintenance cost is the decision target, the optimal reliability threshold is 0.7, and the optimal number of maintenances is 5. When only equipment availability is the decision objective, the optimal reliability threshold is 0.7, and the optimal number of maintenances is 2. When the maintenance cost rate is emphasized in the multi-objective situation, the optimal reliability threshold is 0.7 and the optimal maintenance times is 4. When the availability of equipment is emphasized in the multi-objective situation, the optimal reliability threshold is 0.7 and the optimal maintenance times are 3. [Conclusions] The multi-objective preventive maintenance strategy model of equipment is more flexible and more in line with the actual situation.

Keywords: preventive maintenance; mixed failure rate; maintenance cost rate; availability of equipment; fuzzy weighted average algorithm

(责任编辑 方 兴)