

## 考虑设备能耗与污染的维护策略研究\*

王雨婷, 刘勤明, 叶春明, 梁耀旭  
(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

**摘要:**【目的】随着环境问题的日益突出,环保部门对企业的约束逐渐加强,当企业的生产消耗过多能源或者产生过量污染排放时,需要支付一定的环境惩罚成本用于修复损害的环境。传统的预防性维护策略研究没有考虑设备在生产过程中的能耗以及污染排放问题,而且在实际生产过程中,随着设备役龄的增加,设备性能退化的同时也伴随着能耗水平和污染排放水平的增加,过高的能耗与污染不仅对环境产生损害,也会导致企业的运营成本增加。因此需要研究设备的能耗与相应污染排放的维护策略。【方法】将设备的能耗控制和污染排放控制引入到传统的预防性维护来优化设备的预防性维护策略,并将役龄递减因子引入到设备的能耗模型和污染排放模型中,来模拟设备的维护操作对能耗水平和污染排放水平的影响。以设备的可靠度、能耗水平、污染排放水平以及最佳维护次数为决策变量,以设备生命周期内的成本率最低为优化目标,来构建考虑设备能耗和污染排放水平的维护模型。【结果】采用灰狼优化算法对设备预防性维护模型进行优化求解,结果显示在能耗和污染排放的双重控制下,设备生命周期的成本率最小。【结论】通过算例分析验证了模型的有效性。  
**关键词:**顺序预防性维护;能耗控制;污染排放控制;灰狼算法

中图分类号:O224;TB472;F273.4

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2021)03-0016-09

在社会生产力飞速发展的背后,能源消耗急剧增加,环境问题也日益严重。根据国家统计局网站发布的2020年国民经济和社会发展统计公报显示,在2020年中国的能源消费总量为49.8亿吨标准煤,比上年增长了2.2%<sup>[1]</sup>。在众多行业中,尤以制造业的消耗能源占比最大,它的主要能源来源为电力,且制造的过程中不可避免地会产生污染排放。为减少污染排放,降低能源消耗,实现绿色制造,各国都制定了相关的法律法规来约束企业,比如碳排放限额、环境税等等,要求企业承担更多的社会以及环境责任,这也导致企业的成本越来越高,于是能耗与污染控制也逐渐成为了研究热点。

目前国内外学者在制造业节能减排的方面已进行了一些研究。Firdaus等人<sup>[2]</sup>总结了近些年关于设备能耗维护方面的文献,提出在全员生产维护和以可靠性为中心的维护后,面向能源的维护逐渐发展起来,通过能源维护以提高设备的能源使用效率。以能源为中心的维护是一种降低能耗为重点的维修理念,将设备的能耗水平作为设备是否进行维护的判别条件,这为设备的维护判别提供了一种新的方式,且能耗数据的获得较为容易。Yan等人<sup>[3]</sup>研究了机床维护后的能耗建模问题,并引入排放因子量化机床消耗电力产生的温室气体,进而评价设备对环境产生的影响,该研究表明当设备的可靠性降低到某一阈值后,能耗水平将急剧增加。Hoang等人<sup>[4-5]</sup>提出了能源效率指标以及剩余效率有效寿命的概念,并通过测试表明基于能效的状态维护优于传统状态维护。Singh等人<sup>[6]</sup>通过研究发现基于能源效率检测的维护可以降低能耗与维护成本,使得维护更具经济性。Xu等人<sup>[7]</sup>提出了考虑设备生产率和能源效率的周期性维护模型,并提出了一个平均能量效率模型和一个基于更新报酬定理的平均生产率模型来分析定期维修的退化机床的能耗和生产率性能。Yildirim等人<sup>[8]</sup>提出了一个考虑能耗的生产与维护组合模型,以使总成本最小。Zou等人<sup>[9]</sup>提出了一种机会窗口模型,在不牺牲产量的前提下,通过关闭某台设备并同时对该设备进行维护来优化节能。Tlili等人<sup>[10]</sup>研究了设备定期和非定期的维护策略以消

\* 收稿日期:2020-11-11 网络出版时间:2021-05-20 09:45

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. 2020YJAZH068);2020年上海市大学生创新创业训练计划项目(No. SH2020067);上海理工大学科技发展项目(No. 2020KJFZ038)

第一作者简介:王雨婷,女,研究方向为设备维护与决策,E-mail:wyt\_0314@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.20210519.1442.006.html

除设备运转对环境的影响。Xia 等人<sup>[11]</sup>建立了一个基于节能窗的面向能源的可持续维护模型,建立了综合设备维护能耗、成本、可用性的多属性模型,将设备的维护提前或延后到批量生产的转换期间进行,以节省能源。许多文献研究了关于制造业的节能措施、能源管理、碳排放问题以及维护策略,但很少有将能耗、污染与维护相结合的,并且缺少维护动作对设备能耗和污染排放影响的描述。

基于上述研究,本文将设备的能耗控制和污染排放控制引入传统的顺序预防性维护策略中,对设备的维护周期进行优化,进一步降低设备生命周期内的成本率,并将役龄递减因子引入设备的能耗水平和污染排放水平模型中,以模拟维护动作对设备能耗水平和污染排放水平的影响,并用灰狼优化算法(Gray wolf optimization, GWO)对模型进行求解,获得了设备长期成本率最低时最佳的维护次数和维护周期。

## 1 问题描述

本文的研究对象是由一台设备构成的易发生故障的制造系统,且设备在生产过程中会消耗能源并产生污染排放,随着使用时间的增加,设备的能耗水平和污染排放水平都会增加。若设备的能耗水平或污染排放水平超过了当地环保部门执行的限额标准,则需要支付环境损害罚金。企业为了避免支付这部分罚金,会根据环保部门执行的限额标准结合设备的可靠度自主设定控制强度,当设备的能耗或污染排放达到企业自主设定的阈值而设备可靠性还没有达到维修阈值时也对设备进行预防性维护操作来恢复设备的性能,避免高能耗生产和高污染排放。传统的预防性维护一般在设备的可靠度达到阈值时对设备进行预防性维护,本文综合设备运行过程中的能源消耗和污染排放水平,并结合环保部门制定的清洁生产要求对设备进行预防性维护的周期进行优化,建立综合设备可靠性,能耗与污染排放的预防性维护模型。若设备在未达到预防性维护时间点前就发生故障,则对设备进行小修,小修只能将设备的状态恢复到发生故障之前的水平。由于小修所需的时长相对于设备运行的时长来说很短,故忽略不计。当设备的运行时间达到了预防性维护时间点,则需要对设备进行预防性维护,预防性维护只能将设备恢复到之前的某一状态,而不能修复如新,设备将在经历数次预防性维护后进行更换,使生产系统恢复如新,所有的维护操作都是停机维护。假设设备在它生命周期内的工作环境及预防性维护过程相对稳定,中间无生产停歇,且设备生产的产品市场供需平衡,即需求率等于生产率,当设备进行停机维护时,将无法满足市场需求,造成销售损失。

## 2 数学模型

### 2.1 设备故障率模型

设备的故障分布有指数分布、正态分布、伽马分布、威布尔分布等等,其中威布尔分布运用较为广泛。假设设备的故障率服从尺度参数为  $\alpha$ 、形状参数为  $\beta$  的威布尔分布。设备的故障率函数可表示为:

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

其中:  $t$  表示设备的运行时间。在设备的实际运转环境中,故障率会随着设备役龄和维护次数的增加而增加,维护也并不能使设备恢复如新。很多学者通过引入调整因子来建立不同的维护周期内的故障率演化情况,例如: Malik<sup>[12]</sup>提出了役龄递减因子来表示设备预防性维护后初始故障率的变化情况; Nakagawa<sup>[13]</sup>提出了故障率递增因子来表示维护动作对设备故障率的影响; 奚立峰等人<sup>[14]</sup>综合考虑役龄递减因子和故障率递增因子的概念模拟了设备实际故障率变化过程,具有较强的实际操作意义。根据文献<sup>[14]</sup>的研究,在预防性维护前后,设备的故障率函数之间的关系为:

$$\lambda_{i+1}(t) = b_i \lambda_i(t + a_i T_i), 0 < a_i < 1, b_i > 1。$$

其中:  $a_i, b_i$  分别表示设备在第  $i$  次预防性维护的役龄递减因子和故障率递增因子。它们的取值可以根据设备的历史情况求得,本文采用了以往文献中的经验取值法;  $T_i$  表示设备的预防性维护周期。针对单一故障率模型,当设备的可靠度达到阈值  $R$  时对设备采取预防性维护操作,因此,每个预防性维护操作进行的时候,设备的可靠度都为阈值  $R$ ,设备的可靠度与故障率之间的关系可表示为:

$$R = \exp \left[ - \int_0^{T_1} \lambda_1(t) dt \right] = \exp \left[ - \int_0^{T_2} \lambda_2(t) dt \right] = \dots = \exp \left[ - \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt \right],$$

由此求得的每个预防性维护的周期用  $T_i^R$  表示。

## 2.2 设备能耗模型

设备运行需要消耗大量的能源,其中大部分是电耗,设备在运行过程中的能耗会随着役龄的增加而增加,根据 Yan 等人<sup>[3]</sup>的研究表明,设备的能耗和运行时长之间存在映射关系,在设备使用初期,能耗水平保持在一个较低的水平,随着设备性能的退化到一定程度,能耗水平会急剧增加。设备的能耗水平可以表示为:

$$e_i(t) = k \times e^{\beta_e t} + e_0. \quad (1)$$

其中: $e_i(t)$ 表示设备的第*i*次预防性维护能耗水平,即设备生产单位产品的能耗, $e_0, k, \beta_e$ 是能耗模型的调整参数,能耗示例图如图 1 所示。

每次预防性维护后,设备的能耗水平会恢复,但不会回到初始水平。故预防性维护前后设备的能耗水平之间的关系可以表示为:

$$e_{i+1}(t) = e_i(t + a_i T_i). \quad (2)$$

根据环保部门能耗限额的规定,当设备的能耗水平超过  $E$  时将对超过  $E$  的每单位能耗收取  $C_e$  数额的罚金,直到采取维护措施,能耗水平恢复后停止。企业为了避免支付这一部分的罚款,会自主设置一个低于环保部门能耗限额的阈值  $E_L$ ,当设备的能耗水平达到此阈值时,对设备进行预防性维护来恢复能耗水平。针对单一能耗模型,每个预防性维护操作进行的时候,设备的能耗水平都为阈值  $E_L$ ,因此设备的能耗水平阈值  $E_L$  与能耗水平之间的关系可表示为:

$$E_L = e_1(t) = e_2(t) = \dots = e_i(t). \quad (3)$$

以此求得的每个预防性维护周期用  $T_i^e$  表示,另外引入  $r = \frac{E_L}{E}$  来表示企业自主设定的能耗水平阈值和环保部门设定的限额之间的关系。

## 2.3 设备污染排放模型

设备在运行过程中还会产生污染排放,在倡导绿色可持续发展的大背景下,环保部门对污染排放超过限额标准的企业会实施罚款。设备的污染排放主要包括启动阶段产生的大量污染,以及在生产过程中持续产生的污染。用于污染无害化处理的过滤器可以吸收部分有害物质降低污染浓度,但这些过滤产品的吸收效率也会随着使用时长的增加而逐渐下降。根据 Ben-Salem 等人<sup>[15]</sup>的研究,假设设备的排放水平为  $u$ ,即生产单位数量的产品带来的排放量,可表示为:

$$u(t) = u_0 \times e^{\beta_u t}. \quad (4)$$

其中: $u_0$ 表示设备初始时的排放量, $\beta_u$ 是污染排放模型的调整参数( $0 \leq \beta_u \leq 1$ ),每次预防性维护后,设备的污染排放水平会恢复,但不会回到初始水平。故预防性维护前后设备的能耗水平之间的关系可以表示为:

$$u_{i+1}(t) = u_i(t + a_i T_i), \quad (5)$$

根据环保部门污染排放限额的规定,当设备的污染排放水平超过限额  $U$  时,将对超过  $U$  的每单位污染排放量收取  $C_u$  数额的罚金,直到采取维护措施,污染排放水平恢复后停止。企业为了避免支付这一部分的罚款,会自主设置一个低于环保部门污染排放限额的阈值  $U_L$ ,当设备的能耗水平达到阈值  $U_L$  时,对设备进行预防性维护来恢复污染排放水平。针对单一能耗模型,每个预防性维护操作进行的时候,设备的污染排放水平都为阈值  $U_L$ ,因此设备的能耗水平阈值  $U_L$  与能耗水平之间的关系可表示为:

$$U_L = u_1(t) = u_2(t) = \dots = u_i(t). \quad (6)$$

以此求得的每个预防性维护周期用  $T_i^u$  表示,另外引入  $\eta = \frac{U_L}{U}$  来表示企业自主设定的能耗水平阈值和环保部门设定的限额之间的关系。

## 2.4 预防性维护策略

设备在运行过程中会消耗能源以及产生污染排放,根据清洁生产相关法规,当设备的能耗水平或污染排放水平超过限额标准时,都需要支付罚金。传统的预防性维护是当设备的可靠度达到阈值时进行维护,没有考虑

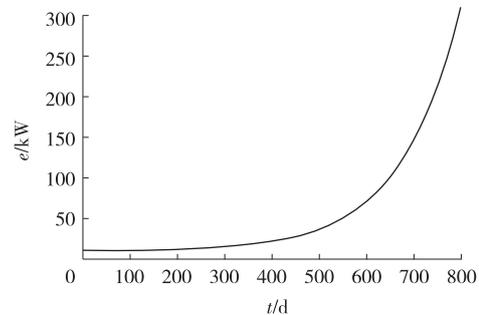


图 1 设备能耗示例图

Fig. 1 Example diagram of equipment energy consumption

到设备的能耗水平以及污染排放水平,实际上设备的可靠度降低到阈值时,能耗水平和污染排放水平很可能已经超过了环保部门的限额标准,会导致企业支付罚款而增加成本。为了避免成本增加以及保护环境,企业会制定一个低于环保限额的能耗阈值与污染排放阈值,来对设备预防性维护的周期进行调整。因此,设备进行维护的周期选取能耗控制周期与污染排放控制周期中较小的值:

$$T_i = \min\{T_i^R, T_i^E, T_i^U\}。$$

设备在一个预防性维护周期内能耗水平超过环保部门限额标准时需要支付的罚金为:

$$C_d^i = C_e \times \max\left\{\int_{T_i^E}^{T_i} (e(t) - E) dt, 0\right\}。$$

其中: $T_i^E$ 表示在第*i*个维护周期内,设备的能耗水平达到环保部门设定的限额标准时的时间。可由(1),(2)和(3)式求得。设备在一个预防性维护周期内污染排放水平超过环保部门限额标准时需要支付的罚金为:

$$C_{ud}^i = C_u \times \max\left\{\int_{T_i^U}^{T_i} (u(t) - U) dt, 0\right\}。$$

其中: $T_i^U$ 表示在第*i*个维护周期内设备的污染排放水平达到环保部门设定的限额标准时的时间。可由(4),(5)和(6)式求得。当设备的预防性维护周期受到能耗和污染排放的双重控制时,高能耗成本与高污染排放成本都为0。设备的维护操作成本包括小修成本以及预防性维护成本,在第*i*个维护周期内可表示为:

$$C_m^i = C_c \times \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt + C_p \times T_p。$$

当设备在生产期间进行停机维护时,生产不足以满足市场需求,必然会造成销售损失,设备在第*i*个维护周期内的销售损失成本可表示为:

$$C_{stop}^i = C_s \times \int_0^{T_p} x(t) dt。$$

其中: $C_s$ 表示单位产品盈利价值, $x(t)$ 表示设备生产率。

### 2.5 长期成本率模型

综上所述,设备在它的生命周期内的维护成本率可以表示为:

$$EC = \frac{\sum_{i=1}^N (C_d^i + C_{ud}^i + C_m^i + C_{stop}^i) + C_{new}}{\sum_{i=1}^N (T_i + T_p)}。$$

其中: $C_{new}$ 表示设备的更换费用与一次预防性维护费用的差值,在最后一个预防性维护时执行更换操作,使系统恢复如新。因此,考虑能耗和污染排放的设备维护优化模型可以表示为:

$$\begin{cases} \min EC | EC = EC(R, r, \eta, N) \\ \text{s. t. } 0 \leq R \leq 1 \\ \quad 1 \leq N \leq 50 \\ \quad 0 \leq r \leq 1 \\ \quad 0 \leq \eta \leq 1 \end{cases}，$$

其中: $R$ 为可靠度阈值, $r$ 为企业自主设备的能耗阈值与环保部门执行的限额标准之比, $\eta$ 为污染排放阈值与环保部门执行的限额标准之比, $N$ 为最优维护次数,目标函数为设备生命周期内的成本率  $EC$  最低。通过优化目标函数  $\min EC$  可得到设备生命周期内的最优维护计划。

## 3 模型求解

对于以上复杂的多变量优化问题,非线性的函数求解很难得到结果,而GWO具有极强的群体智能优化特性,它模拟了灰狼跟踪、包围和攻击猎物等狩猎行为。与一些普遍用于优化目标的求解算法,比如遗传算法(Genetic algorithm, GA)、粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)、差分进化算法(Differential evolution, DE)相比,GWO结果更简单,需要的参数少,计算的速度快,并且能够实现局部最优和全局最优的平衡,在求解过程中具有更高的精度和效率。具体算法步骤如下:

- 1) 初始化灰狼种群规模  $S$ ,灰狼种群  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_S\}$ ,种群中每个灰狼个体的位置由可靠度阈值  $R$ 、最

佳维护次数  $N$ 、能耗控制强度  $r$  以及污染排放控制强度  $\eta$  构成,最大迭代次数为  $T$ ,第 1 次迭代时,迭代次数  $t=1$ ;

2) 将长期成本率  $EC(R, r, \eta, N)$  作为个体适应度函数,即  $f=EC(R, r, \eta, N)$ ,计算每个灰狼个体的适应度值  $f_i(i=1, 2, \dots, S)$ ,寻找适应度值前三的灰狼个体  $G_1, G_2, G_3$ ;

3) 计算 GWO 的收敛因子  $a=2-2\tan^{-1}\left(\frac{\pi}{4t}\right)$ ,并更新系数向量  $A=2a \circ r_1 - a, C=2r_2$ ,其中:  $t$  为当前迭代次数,  $\circ$  表示哈达玛乘积,  $r_1$  和  $r_2$  是  $[0, 1]$  内的随机变量,随着迭代次数的增加,收敛因子由 2 线性减小到 0;

4) 遍历种群中每个灰狼个体,开始搜寻包围攻击猎物。计算个体与猎物之间的距离  $D=C \circ X_p(t) - X(t)$ ,灰狼的位置更新公式为  $X(t+1)=X_p(t) - A \circ D$ ,其中:  $X_p(t)$  表示猎物的位置向量,  $X(t)$  表示灰狼的位置向量。灰狼个体跟踪猎物位置的数学模型为:

$$\begin{cases} D_{G_1} = |C_1 \circ X_{G_1} - X| \\ D_{G_2} = |C_2 \circ X_{G_2} - X| \\ D_{G_3} = |C_3 \circ X_{G_3} - X| \end{cases}$$

其中:  $D_{G_1}, D_{G_2}, D_{G_3}$  分别表示  $G_1, G_2, G_3$  与其他灰狼个体之间的距离,  $X_{G_1}, X_{G_2}, X_{G_3}$  分别表示  $G_1, G_2, G_3$  当前的位置,  $C_1, C_2, C_3$  是随机向量,种群中其他灰狼的最终位置由下式确定:

$$\begin{cases} X_1 = X_{G_1} - A_1 \circ D_{G_1} \\ X_2 = X_{G_2} - A_2 \circ D_{G_2} \\ X_3 = X_{G_3} - A_3 \circ D_{G_3} \\ X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \end{cases} \quad (7)$$

5) 若  $t \leq T$  则  $t=t+1$  转到第 2 步,否则输出最优灰狼个体的位置。灰狼的位置更新如图 2 所示。

灰狼种群根据  $G_1, G_2, G_3$  的位置来搜索猎物,基于数学建模的散度,用  $A > 1$  或  $A < -1$  的随机值迫使灰狼与猎物分离,避免陷入局部最优。伪代码如表 1 所示。

表 1 GWO 伪代码

Tab. 1 The pseudocode of GWO

代码行号	GWO 伪代码
1	初始化灰狼种群规模 $S$ 和最大迭代次数 $T$
2	初始化参数 $a, A$ 和 $C$
3	计算所有灰狼个体的适应度值
4	选择适应度值最好的前 3 只灰狼保存其位置
5	While (当前迭代次数小于最大迭代次数) do
6	for (每个灰狼个体 $(X_i), i=1, \dots, S$ ) do
7	更新其他灰狼的位置信息
8	End for
9	更新参数 $a, A$ 和 $C$
10	计算所有灰狼个体的适应度值
11	更新适应度值最好的 3 只灰狼的位置
12	更新迭代次数 $t = t+1$
13	End While
14	Return 适应度值最好的灰狼的位置

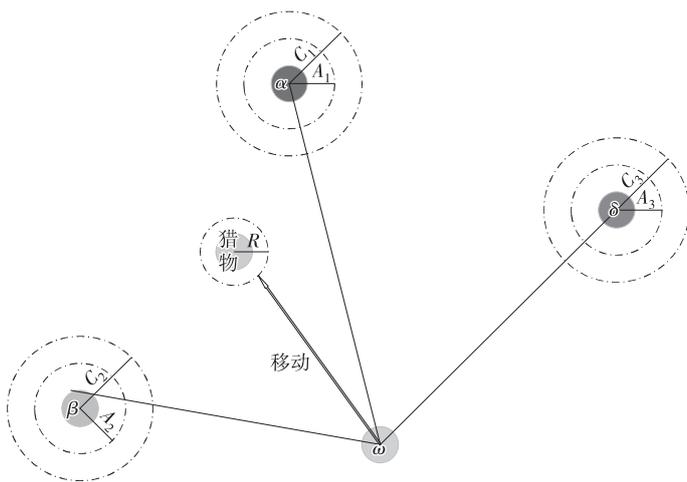


图 2 灰狼位置更新图

Fig. 2 Gray wolf position update chart

### 4 算例分析

假设设备的故障率服从形状参数为  $\alpha$ ,尺度参数为  $\beta$  的威布尔分布,通过对设备的历史故障数据的分析统计可以得到相应的参数值,根据文献[17],假设设备的役龄递减因子和故障率递增因子为:

$$a_i = \frac{i}{3i+7}, b_i = \frac{12i+1}{11i+1}。$$

其中: $i$  表示设备维护的第  $i$  个周期,模型中其他参数的值见表 2。

表 2 各参数取值  
Tab.2 Value of each parameter

参数名	$\alpha$	$\beta$	$e_0$	$\beta_e$	$E$	$u_0$	$\beta_u$	$U$	$T_p$
参数值	1 000	3	8	0.008	15	2	0.005	10	3
参数名	$C_e$	$C_u$	$C_s$	$C_{new}$	$C_c$	$C_p$	$k$	$x(t)$	
参数值	500	800	10	49 000	300	500	0.5	100	

由 Python 仿真的结果显示设备可靠度周期大于能耗控制周期和污染控制周期,仿真结果如图 3 所示,符合假设条件。针对高能耗以及易产生污染排放的设备,引入能耗控制和污染排放控制对基于可靠度的顺序预防性维护进行约束,以三者中周期最小的作为设备预防性维护的周期以避免支付高额的惩罚成本。结果显示在能耗与污染排放的双重控制下,设备的长期成本率低于单能耗控制和无控制下的设备上期成本率。在双控制下可靠度取值,能耗控制取值以及污染排放控制取值变化时,设备长期成本率变化见表 3。

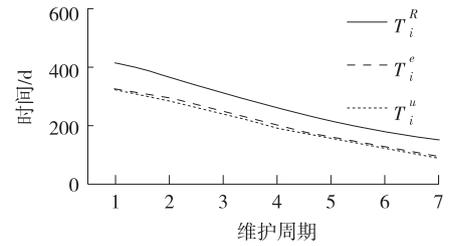


图 3 维护周期递减图

Fig. 3 Maintenance cycle decrement diagram

表 3 能耗与污染排放双重控制下的成本率

Tab. 3 The cost rate under the dual control of energy consumption and pollution emission

$R$	$r$	$\eta$	$EC$								
			$N=1$	$N=2$	$N=3$	$N=4$	$N=5$	$N=6$	$N=7$	$N=8$	$N=9$
0.99	1	1	244.52	141.33	110.01	96.50	89.96	86.79	85.47	85.27	85.78
0.97	1	1	169.71	98.13	76.41	67.06	62.55	60.38	59.50	59.40	59.79
0.93	1	1	164.70	93.95	72.23	62.78	58.27	56.24	55.65	55.97	56.90
0.93	0.95	1	167.89	95.76	73.63	63.99	59.39	57.32	56.72	57.04	57.99
0.93	0.87	1	183.20	104.49	80.33	69.81	64.78	62.51	61.85	62.20	63.22
0.93	0.75	1	225.78	128.75	98.95	85.97	79.75	76.94	76.10	76.50	77.73
0.93	1	0.96	168.95	96.37	74.09	64.39	59.76	57.68	57.07	57.40	58.35
0.93	1	0.89	177.43	101.20	77.80	67.61	62.74	60.55	59.91	60.25	61.25
0.93	1	0.76	198.17	113.02	86.88	75.49	70.04	67.59	66.86	67.23	68.33

以上结果显示设备在能耗控制和污染排放控制的双重作用下,生命周期内的最低长期总成本率为 55.65,对应的最优预防性维护次数为 7 次,即在第 7 次预防性维护时需要对该设备进行更换,相应的最优预防性维护周期见表 4。

表 4 能耗与污染排放双重控制下的最优预防性维护周期

Tab. 4 Optimal preventive maintenance cycle under dual control

$R$	$r$	$\eta$	$N$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$EC$
0.93	1	1	7	321.89	289.70	245.13	199.17	157.24	121.50	92.34	55.65

当能耗控制取值不变,随着污染排放控制取值的降低,设备预防性维护周期缩短,成本率增加。而当污染排放控制取值不变,而能耗控制取值降低时,设备预防性维护周期会由污染排放控制逐渐变成能耗控制下的周期,值也在降低,成本率随之增高。决策变量取值变化时,设备长期总成本变化情况见图 4。设备预防性维护的周期呈现递减之势,与实际情况相符,当设备进行第 7 次预防性维护时进行更换处理,将生产系统恢复如新。

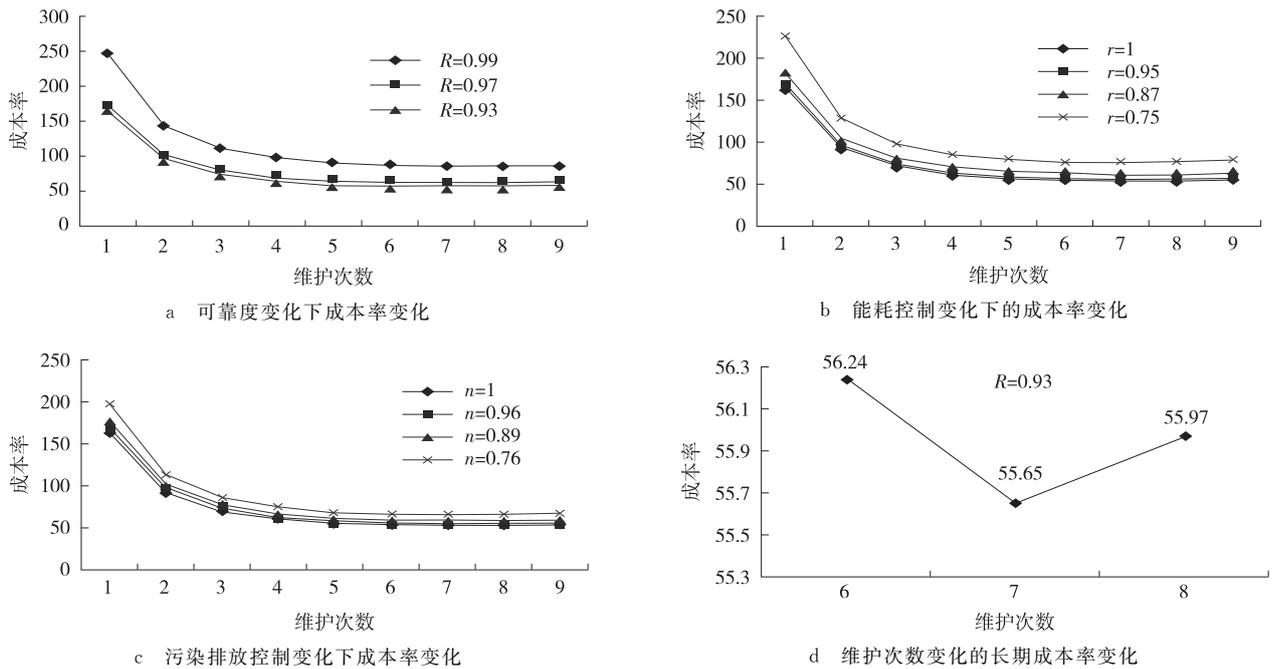


图 4 控制强度变化下设备长期成本率变化情况

Fig. 4 Change of long-term cost rate of equipment under change of control intensity

图 4d 反应的是当可靠度取 0.93, 能耗控制强度和污染排放控制强度取 1 时, 设备维护次数变化时长期成本率的变化。在最优维护次数为 7 时, 设备的长期成本率最低。在可靠度取值 0.93 但只有能耗控制情况下, 设备的长期成本率见表 5。

表 5 单能耗控制下的成本率

Tab. 5 Cost rate under single energy consumption control

R	r	$\eta$	EC								
			N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8	N=9
0.93	1	1	164.64	95.79	74.88	66.02	62.02	60.51	60.44	61.29	62.78

由表 5 可知, 在只有能耗控制下的预防性维护策略中, 设备的长期成本率在第 7 次预防性维护时进行更换下取得最小值为 60.44, 大于能耗控制和污染排放控制双重作用下的设备长期成本率, 相应的预防性维护周期见表 6。

表 6 单能耗控制下的最优预防性维护周期

Tab. 6 Optimal preventive maintenance cycle under single energy consumption control

R	r	$\eta$	N	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	EC
0.93	1	1	7	329.88	296.89	251.22	204.11	161.14	124.52	94.63	60.44

虽然在只有能耗控制下设备的每一个预防性维护周期的时间长度大于能耗控制与污染排放控制双重作用下的预防性维护的时间长度, 但设备的长期成本率较大, 因此能耗控制与污染排放控制双重作用下的预防性维护策略更优。在没有能耗和污染排放控制下, 设备的长期成本率见表 7。

表 7 无控制下的成本率

Tab. 7 Cost rate without control

R	r	$\eta$	EC								
			N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8	N=9
0.93	1	1	961.07	856.05	810.36	798.83	818.45	869.87	955.14	1 076.67	1 236.56

在没有能耗控制和污染排放控制的作用下,设备的长期成本率在第 4 次预防性维护时进行更换下取得最小值,为 798.83,远大于双重控制下的设备长期成本率,对应的预防性维护周期见表 8。

表 8 无控制下的预防性维护周期

Tab. 8 Preventive maintenance cycle without control

$R$	$r$	$\eta$	$N$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$EC$
0.93	1	1	4	417.11	364.57	299.19	238.19	798.83

在没有能耗和污染排放控制下,设备的预防性维护周期相比于双控制下要长,但设备的长期成本率远大于双控制下的设备长期成本率。综上所述,设备在不同控制条件下长期成本率对比如图 5 所示。

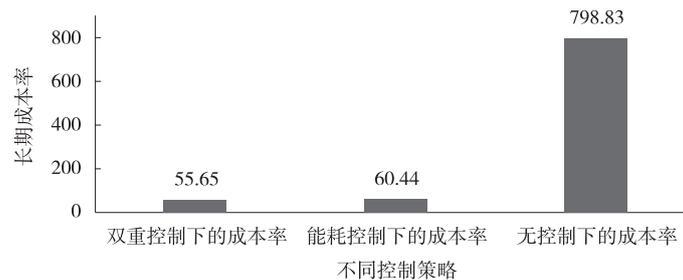


图 5 不同控制条件下设备寿命周期内最低成本率对比

Fig. 5 Comparison of lowest cost rate in equipment life cycle under different control conditions

## 5 结论

随着环境问题的日益突出,环保部门对企业的绿色生产约束逐渐加强,企业的运行与成本也在不断增加,企业所要承担的环境责任随着环境问题的恶化逐渐增大。传统的顺序预防性维护只考虑设备的可靠度性能,而忽略了设备在达到可靠度阈值前,能耗和污染排放有可能超过环保部门设定的环境阈值,从而将会导致企业支付高额的环境成本。本文在传统的顺序预防性维护基础上,加入了设备的能耗控制和污染排放控制,并将设备的故障率递增因子引入到能耗和污染排放模型中,完善维护活动对设备能耗和污染排放水平增长的影响。通过算例表明,对于能耗和污染排放较高的企业,加入能耗控制和污染排放控制的设备预防性维护策略,使得生命周期内的长期成本率降低,从而有利于企业降低成本。

## 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报[R/OL]. (2021-02-28)[2021-03-01]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/28/content\\_5589283.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/28/content_5589283.htm).
- [2] National Bureau of Statistics of China. The national economic and social development statistical bulletin of the People's Republic of China in 2020[R/OL]. (2021-02-28)[2021-03-01]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/28/content\\_5589283.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/28/content_5589283.htm).
- [3] FIRDAUS N, SAMAT H A, MOHAMAD N. Maintenance for energy efficiency: a review[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 530(1): 012047.
- [4] YAN J H, HUA D G. Energy consumption modeling for machine tools after preventive maintenance[C]//IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Macao, China; IEEE, 2010: 11706050.
- [5] HOANG A, DO P, LUNG B. Energy efficiency performance-based prognostics for aided maintenance decision-making: application to a manufacturing platform[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 2838-2857.
- [6] HOANG A, DO P, LUNG B. Investigation on the use of energy efficiency for condition-based maintenance decision-making[J]. IFAC-Papers On Line, 2016, 49(28): 73-78.
- [7] SINGH G, ANIL K C T, NAIKAN V N A. Efficiency monitoring as a strategy for cost effective maintenance of induction motors for minimizing carbon emission and energy consumption[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 184: 193-201.
- [8] XU W G, CAO L. Energy efficiency analysis of machine tools with periodic maintenance[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(18): 5273-5285.
- [9] YILDIRIM M B, NEZAMI F G. Integrated maintenance and production planning with energy consumption and minimal repair

- [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74: 1419-1430.
- [9] ZOU J, ARINEZ J, CHANG Q, et al. Opportunity window for energy saving and maintenance in stochastic production systems [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2016, 138(12): 121009.
- [10] TLILI L, RADHOU M, CHELBI A. Condition-based maintenance strategy for production systems generating environmental damage [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 494162.
- [11] XIA T B, XI L F, DU S C, et al. Energy-oriented maintenance decision-making for sustainable manufacturing based on energy saving window [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(5): 051001.
- [12] MALIK M A K. Reliable preventive maintenance policy [J]. AIIE Transactions, 1979, 11(3): 221-228.
- [13] NAKAGAWA T. Sequential imperfect preventive maintenance policies [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1988, 37(3): 295-298.
- [14] 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(10): 1465-1468.  
XI L F, ZHOU X J, LI J. Research on sequential preventive maintenance strategy of equipment in finite interval [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2005(10): 1465-1468.
- [15] BEN-SALEM A, GHARBI A, HAJJI A. Environmental issue in an alternative production-maintenance control for unreliable manufacturing system subject to degradation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(1): 383-398.
- [16] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.
- [17] 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(12): 2044-2047.  
ZHOU X J, XI L F, LI J. A reliability based preventive maintenance model of equipment sequence [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2005(12): 2044-2047.

## Operations Research and Cybernetics

### Research on Maintenance Strategy Considering Equipment Energy Consumption and Pollution

WANG Yuting, LIU Qinming, YE Chunming, LIANG Yaoxu

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

**Abstract:** [Purposes] As environmental problems become increasingly prominent, environmental protection agencies have gradually strengthened their constraints on companies. When companies consume too much energy or produce excessive pollution emissions, they need to pay environmental penalty costs to repair the damaged environment. However, the traditional preventive maintenance strategy research does not consider the energy consumption and pollution emissions of the equipment in the production process. In the actual production process, as the service age of equipment increases, its performance degradation is also accompanied by an increase in energy consumption and pollution emissions. Excessive energy consumption and pollution not only cause damage to the environment, but also increase the total costs. [Methods] Introducing equipment energy consumption control and pollution emission control into traditional preventive maintenance to optimize equipment preventive maintenance strategies, and the age-decreasing factor is introduced into the energy consumption model and pollution emission model of the equipment to simulate the impact of equipment maintenance operations on its energy consumption and pollution emission levels. Taking equipment reliability, energy consumption level, pollution emission level, and optimal maintenance times as decision variables, and the lowest cost rate in the equipment life cycle as the optimization goal, a maintenance model considering equipment energy consumption and pollution emission levels was constructed. [Findings] Taking the Weibull distribution of equipment failure rate as an example, the grey wolf optimization algorithm is used to optimize the equipment preventive maintenance model. The results show that under the dual control of energy consumption and pollution emissions, the life cycle cost rate of equipment is the smallest. [Conclusions] The validity of the model is verified by an example analysis.

**Keywords:** sequential preventive maintenance; energy control; pollution emission control; grey wolf optimization algorithm

(责任编辑 许 甲)